

Correlation of Atmospheric Microplastics with PM_{2.5}/PM₁₀ and Atmospheric Conditions: Systematic Review and Bibliometric Analysis

Dayanna Pomalaza Colque¹. Lorgio Valdiviezo-Gonzales²

¹⁻² Carrera de Ingeniería en Seguridad Laboral y Ambiental, Universidad Tecnológica del Perú, UTP, Perú,
U20248434@utp.edu.pe, lvaldiviezo@utp.edu.pe

Abstract– *The objective of this research is to demonstrate the correlation between microplastics, particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), and atmospheric conditions (precipitation, temperature, humidity, and wind speed). The study was based on articles indexed in Scopus and Web of Science (WOS). After using the PICO and PRISMA methodologies, 12 articles were selected for detailed analysis. These covered key aspects such as the physicochemical properties of atmospheric microplastics, sampling procedures, microplastic identification, and the use of statistical tools to evaluate correlations. A positive correlation was identified between atmospheric microplastics and PM_{2.5}/PM₁₀ through statistical analysis (Pearson, Spearman, linear regression, and Kruskal-Wallis), while no significant correlations were observed with meteorological conditions such as precipitation, temperature, humidity, and wind speed. The most common microplastics are polymers such as polypropylene, polyethylene, and polystyrene, which are mostly medium-sized (101–500 µm), fibrous in shape, and transparent in color, characteristics that facilitate their suspension and transport over long distances. In addition, bibliometric analysis shows a significant increase in publications at present, with a predominance of contributions from Asia, especially China, reflecting growing global scientific interest in the subject. In conclusion, the results show that atmospheric microplastics should be considered alongside PM_{2.5}/PM₁₀ in air quality monitoring systems, given their common origin, similar aerodynamic behavior, and joint contribution to air pollution and potential impact on human health.*

Keywords– *atmospheric microplastics, particulate matter, correlation, atmospheric conditions, air quality.*

Relación entre Microplásticos atmosféricos, material particulado y condiciones atmosféricas

Dayanna Pomalaza Colque¹, Lorgio Valdiviezo-Gonzales²

¹⁻² Carrera de Ingeniería en Seguridad Laboral y Ambiental, Universidad Tecnológica del Perú, UTP, Perú,
U20248434@utp.edu.pe, lvaldiviezo@utp.edu.pe

Resumen— El objetivo de la presente investigación es evidenciar la correlación entre microplásticos, material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) y condiciones atmosféricas (precipitación, temperatura, humedad y velocidad del viento). El estudio desarrollado se apoyó en artículos indexados en Scopus y Web of Science (WOS). Luego de utilizar las metodologías PICO y PRISMA se seleccionaron 12 artículos para un análisis detallado. Abarcando aspectos claves como propiedades fisicoquímicas de los microplásticos atmosféricos, procedimientos de muestreo, identificación de microplásticos y el uso de herramientas estadísticas para evaluar las correlaciones. Se identificó una correlación positiva entre microplásticos atmosféricos y PM_{2.5}/PM₁₀ mediante análisis estadísticos (Pearson, Spearman, regresión lineal y Kruskal-Wallis), mientras que no se observaron correlaciones significativas con condiciones meteorológicas como precipitación, temperatura, humedad y velocidad del viento. Los microplásticos más frecuentes corresponden a polímeros como polipropileno, polietileno, poliestireno presentando mayoritariamente tamaños medianos (101–500 µm), formas fibrosas y colores transparentes, rasgos que facilitan su permanencia en suspensión y su transporte a largas distancias. Adicionalmente, el análisis bibliométrico demuestra un incremento significativo en publicaciones a la actualidad, con predominio de contribuciones provenientes de Asia, especialmente China, lo que refleja el creciente interés científico mundial sobre el tema. En conclusión, los resultados evidencian que los microplásticos atmosféricos deben ser considerados junto con el PM_{2.5}/PM₁₀ en los sistemas de monitoreo de calidad del aire, dado su origen común, comportamiento aerodinámico similar y su contribución conjunta a la contaminación atmosférica y potencial impacto en la salud humana.

Palabras clave— microplásticos atmosféricos, material particulado, correlación, condiciones atmosféricas, calidad del aire.

I. INTRODUCCIÓN

La problemática de los desechos plásticos a nivel global se ha intensificado en las últimas décadas, convirtiéndose en uno de los principales desafíos ambientales contemporáneos; se estima que aproximadamente el 79% de estos residuos terminan siendo liberados en el entorno natural [1]. Entre ellos destacan los microplásticos, del cual, debido a su tamaño diminuto y carácter persistente, representan impactos ambientales y potenciales riesgos para la salud. Estudios muestran que los microplásticos atraviesan barreras biológicas y se acumulan en órganos, generando preocupación por sus efectos duraderos [2], [3].

Hasta ahora, la mayoría de las investigaciones se han centrado en la identificación, cuantificación y análisis eco toxicológico de microplásticos en medios acuáticos y terrestres. Sin embargo, la atmósfera constituye un vector clave en su

dispersión y transformación química, un aspecto que ha recibido menor atención [2]. Tanto los microplásticos como el material particulado (PM) en sus fracciones PM_{2.5} y PM₁₀ son capaces de permanecer suspendidos en el aire, siendo transportados por corrientes atmosféricas y sometidos a procesos de deposición seca y húmeda, que constituyen las principales vías de remoción [2], [4]. Estos mecanismos determinan su desplazamiento, asentamiento y eventual impacto en la calidad del aire, incluso en zonas alejadas de sus fuentes de emisión [3].

En este marco, estudios recientes han comenzado a explorar la posible correlación entre microplásticos y partículas suspendidas. Por ejemplo, en la ciudad de Shenyang se encontró que los microplásticos representaban un 12,33% de la masa total de los PM_{2.5}, sugiriendo que este material particulado puede actuar como medio de transmisión [2], [4]. Asimismo, investigaciones en Bushehr han demostrado que los microplásticos presentes en PM_{2.5} pueden funcionar como vectores de otros contaminantes, facilitando su transporte y dispersión en el ambiente [5]. No obstante, la evidencia actual sigue siendo insuficiente y fragmentada, ya que la coexistencia de estos contaminantes podría deberse tanto a interacciones reales como a coincidencias espaciales derivadas de sus características físicas y su ubicuidad [6], [7], [8].

Dentro del material particulado PM₁₀, se han identificado microplásticos compuestos por polímeros como el polipropileno (PP) y el poliestireno (PS), cuya presencia está asociada principalmente a la quema de desechos plásticos y a las emisiones derivadas de actividades industriales [9]. Además, los microplásticos pueden co-transportar patógenos e interactuar de manera física y química, facilitando su migración conjunta en ambientes [10].

La coexistencia de microplásticos atmosféricos junto con material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀) plantea una problemática emergente en la gestión de la calidad del aire. Por un lado, ambos contaminantes comparten propiedades que les permiten permanecer suspendidos y ser transportados a grandes distancias, lo que amplifica su alcance e impacto [2], [3], [4]. Por otro, la presencia de polímeros como el polipropileno (PP) y el poliestireno (PS) en PM₁₀, asociados a fuentes antropogénicas, evidencia la contribución directa de actividades humanas a esta problemática

Entre otros factores que podrían mostrar una correlación con la presencia de microplásticos se encuentran las condiciones atmosféricas, cuya interacción puede intensificar la

problemática. De acuerdo con [4], variables como el viento y la precipitación podrían influir en su dispersión, deposición y abundancia en la atmósfera. Asimismo,[11] reporta posibles asociaciones con temperatura, viento y humedad; sin embargo, la magnitud de dichas relaciones permanece incierta debido a las limitaciones metodológicas y a la influencia de otros factores antropogénicos.

La justificación de esta revisión sistemática radica en la existencia de un vacío científico. Aunque la literatura sobre microplásticos ha avanzado significativamente en medios acuáticos y terrestres [2], [3]; la investigación sobre la atmósfera como vector de dispersión y transformación de estas partículas sigue siendo incipiente [2], [6], [7], [8]. La mayoría de los estudios se han concentrado en la contaminación marina, donde los microplásticos afectan la biota acuática y la cadena alimentaria, o en su acumulación en suelos y sedimentos [2], [3]. Sin embargo, la atmósfera cumple un rol crucial en la movilidad global de estos contaminantes, ya que permite su transporte transfronterizo, su interacción con otros contaminantes atmosféricos y su eventual deposición en ecosistemas alejados de las fuentes de emisión [2], [3], [8]

En este contexto, la presente revisión sistemática busca sintetizar y evaluar la evidencia científica disponible sobre la correlación entre microplásticos atmosféricos, fracciones de material particulado (PM2.5 y PM10) y condiciones atmosféricas.

II. METODOLOGÍA

Este estudio fue llevado a cabo a través de un análisis exhaustivo y estructurado de fuentes bibliográficas relevantes, siguiendo los principios de una revisión sistemática con el propósito de examinar la posible correlación entre los microplásticos atmosféricos, las fracciones de material particulado (PM 2.5 y PM 10) y condiciones atmosféricas. Para ello se formuló la pregunta de investigación y se optimizó la estrategia de búsqueda mediante el enfoque PICO (Problema, Intervención, Comparación y Resultado). Dicha metodología permitió estructurar de manera rigurosa los términos claves, además de establecer los criterios de inclusión y exclusión, garantizando la coherencia con los objetivos principales del estudio y la solidez del proceso de revisión sistemática. Asimismo, se aplicaron los lineamientos establecidos por la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) con el fin de delimitar de manera sistemática el proceso de búsqueda, depurar los registros duplicados y realizar un análisis preliminar de los títulos identificados en las bases de datos seleccionados.

A. Metodología Pico

Para un mejor análisis se plantean las siguientes preguntas de investigación:

RQ: ¿Existe evidencia científica sobre la correlación entre las concentraciones de microplásticos atmosféricos, material

particulado (PM 2,5 y PM10) y las condiciones atmosféricas reportada en la literatura?

Seguido de las siguientes preguntas complementarias:

Q1: ¿Cuáles son las metodologías de muestreo, identificación y cualificación de microplásticos presentes en la atmósfera?

Q2: ¿Cuáles son las características fisicoquímicas distintivas de los microplásticos atmosféricos?

Q3: ¿Qué métodos estadísticos se han utilizado en la literatura científica para determinar la correlación entre los microplásticos atmosféricos, el material particulado y las condiciones atmosféricas?

A partir de la formulación de las preguntas de investigación, se identificaron las palabras claves correspondientes a cada componente del modelo PICO, lo que permite estructurar de manera sistemática la estrategia de búsqueda bibliográfica. En la Tabla 1 se detallan dichos componentes: el “Problema” se define como la presencia de microplásticos atmosféricos; la “Intervención” comprende los parámetros de calidad del aire, la contaminación atmosférica y las condiciones meteorológicas; mientras que el “Resultado” hace referencia a la posible correlación entre los microplásticos, el material particulado (PM2.5 y PM10) y las condiciones atmosféricas.

Por otro lado, el componente de “Comparación” no resulta aplicable en esta revisión, dado el carácter exploratorio y observacional de la pregunta de investigación.

Con el propósito de brindar una mejor comprensión del enfoque metodológico adoptado, la Tabla I presenta el desglose de los elementos que conforman la estrategia PICO utilizada en este estudio.

TABLA I
METODOLOGÍA PICO

P	Problema	“microplastics” or “micro plastic” or “micro particle”	Presencia de microplásticos
I	Intervención	("Air quality parameter" OR "air pollution parameter" OR "atmospheric conditions" OR "air metrics" OR "weather parameters") and ("PM2.5" OR "PM10")	Calidad del aire, parámetro de contaminación del aire, condiciones atmosféricas, métricas del aire, parámetros meteorológicos
C	Comparación	-	-
O	Resultados	Relationship OR correlation OR association OR presence OR concentration OR interaction	Relación, correlación, asociación, presencia, concentración e interacción

Mediante la integración estratégica de términos clave, se estableció una cadena de búsqueda orientada a la identificación de literatura científica pertinente que respalde la existencia de una correlación.

("microplastics" OR "micro plastic" OR "micro particle" OR "micro debris") AND ("PM2.5" OR "PM10") AND (relationship OR correlation OR association OR presence OR concentration OR interaction) AND ("air quality" OR "air pollution" OR "atmospheric conditions" OR "air metrics" OR "weather parameters").

La ecuación de búsqueda se implementó en las bases de datos SCOPUS y Web of Science (WOS), realizando la recopilación de documentos hasta el 30 de septiembre de 2025.

B. Metodología Prisma

Durante el proceso de búsqueda y selección de artículos científicos, se establecieron y aplicaron criterios de inclusión y exclusión con el propósito de garantizar la pertinencia y calidad de los estudios considerados en el análisis. Para asegurar la rigurosidad metodológica de la revisión, se adoptaron las directrices de la guía PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), la cual sirvió como marco de referencia para la estructuración y desarrollo del proceso de revisión sistemática. En la Tabla II se presentan detalladamente los criterios utilizados en esta etapa metodológica.

TABLA II
CRITERIOS DE INCLUSIÓN Y EXCLUSIÓN

Criterios de inclusión		Criterios de exclusión	
CI 1	Artículos que no describan la metodología de muestreo en la recolección de microplásticos.	CE 1	Artículos publicados antes del 2020 y que sean revisiones sistemáticas, metaanálisis o un estudio secundario.
CI 2	Artículos con análisis cuantitativo entre microplásticos y material particulado (PM2.5/PM10) o entre microplásticos y condiciones atmosféricas.	CE 2	Estudios que aborden la contaminación por PM y sus impactos.
CI 3	Artículos que empleen métodos estadísticos para evaluar la correlación entre microplásticos atmosféricos, material particulado (PM2.5 y PM10) o condiciones atmosféricas.	CE 3	Estudios que midan MPs o PM por separado sin analizar su relación
CI 4	Estudios que aborden la presencia de microplásticos (MPs) en la atmósfera o en material particulado (PM2.5, PM10)	CE 4	Estudios que no están habilitados en su versión completa

La estrategia de búsqueda se estructuró a partir de los componentes del modelo PICO, lo que permitió recuperar un total inicial de 94 artículos, distribuidos en 61 registros provenientes de Scopus y 33 de WoS.

En una primera fase, se procedió a la depuración de duplicados dentro de la base de datos WoS, eliminándose 20

registros redundantes y obteniéndose así un total consolidado de 74 artículos.

Posteriormente, se aplicó el criterio de exclusión CE1, restringiendo la selección a estudios publicados a partir del año 2020 y excluyendo revisiones sistemáticas, metaanálisis, actas de congresos y otros documentos no originales. Tras esta etapa, se conservaron 41 artículos procedentes de ambas bases.

En la siguiente fase, se implementó el criterio CE2, mediante el cual se descartaron los estudios centrados exclusivamente en la contaminación por material particulado y sus impactos ambientales o en salud, por no estar alineados con los objetivos de esta investigación. Luego de esta depuración, se mantuvieron 41 artículos.

Finalmente, se aplicaron los criterios CE3 y CE4. El primero excluyó aquellos trabajos que abordaban de manera independiente la medición de microplásticos (MPs) o material particulado (PM2.5/PM10) sin establecer una relación entre ambos, mientras que el segundo descartó los artículos sin disponibilidad de texto completo. Tras esta última etapa, se seleccionaron 12 artículos que analizan de forma directa la correlación entre microplásticos atmosféricos, fracciones de material particulado y condiciones atmosféricas, todos ellos obtenidos a través de la base de datos Scopus.

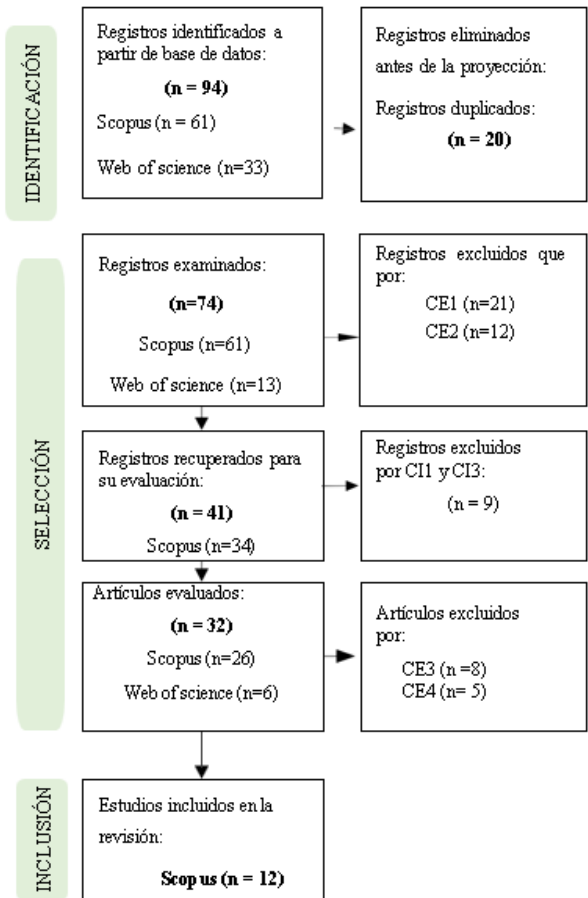


Figura 1. Diagrama PRISMA.

C. Análisis bibliométrico

Técnicas de identificación		Referencia
Análisis Visual	Microscopía Óptica/Estereoscópica/Digital	[2], [5], [6], [8], [11], [16]
	Microscopía de Fluorescencia/Epifluorescencia	[3], [8], [10]
	Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)	[3], [6], [7], [11]
Espectroscopía Vibratoria	Espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) / Micro FTIR/Espectrómetro μ FTIR	[3], [5], [6], [7], [8], [10], [11]
	Espectroscopía Raman/Espectroscopía μ Raman/Micro-Raman	[2], [4], [7], [16]
Métodos cromatográficos	Pirólisis-Cromatografía de Gases-Espectrometría de Masas (Pyr-GC/MS)	[1]

2. ¿Cuáles son las características fisicoquímicas distintivas de los microplásticos atmosféricos?

Las características fisicoquímicas distintivas de los microplásticos presentes en el medio atmosférico, según el análisis realizado por los autores, incluyen principalmente su composición polimérica y características físicas. En las muestras recolectadas, se identificaron polímeros como poliestireno (PS), polipropileno (PP) y polietileno (PE), mostradas en la Tabla V.

TABLA V
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS MP

Composición química	Referencia
Polietileno (PE)	[1], [2], [3], [4], [7], [8], [9], [10], [11], [16]
Polipropileno (PP)	[1], [2], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [16]
Poliamida / Nylon (PA /NYLON)	[1], [2], [3], [4], [5], [8], [9], [11], [16]
Tereftalato de polietileno (PET)	[3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [16]
Poliestireno (PS)	[2], [4], [7], [8], [9], [10], [11], [15], [16]
Policloruro de vinilo (PVC)	[1], [2], [6], [8], [9], [10]
Poliéster (PES)	[2], [10]
Polivinilo alcohol (PVA), Polietileno-Vinil-Acetato (PEVA), Poliácilonitrilo (PAN), Poli-butil metacrilato (PBMA), Polioximetileno (POM), etc.	[9], [16]

Además, en la Tabla VI muestra el color blanco/transparente como una característica predominante en los microplásticos atmosféricos.

TABLA VI
COLOR DE LOS MICROPLÁSTICOS

Color	Referencia
Transparente / blanco	[2], [3], [4], [6], [7], [8], [9], [11], [16]
Negro	[2], [4], [7], [8], [9], [11], [15]
Rojo/Rosa	[2], [3], [4], [7], [9], [11], [16]

Azul	[2], [3], [7], [9], [11], [16]
Gris	[2], [4], [7], [8], [11]
Verde	[2], [3], [7], [9], [16]
Amarillo /naranja	[2], [3], [7], [9], [16]
Marrón	[3], [16]

En la Tabla VII se observa que las formas fragmentadas son las más frecuentes entre los microplásticos atmosféricos.

TABLA VII
FORMA DE LOS MICROPLÁSTICOS

Forma MP	Referencia
Fragmentos	[2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11], [16]
Fibras / fibrosos/ filamentos	[2], [3], [4], [5], [7], [8], [9], [11], [15], [16]
Películas / films / laminas	[4], [5], [9], [10], [15]
Espumas	[9], [10]
Gránulos /granulares /esfericas	[2], [5], [10]

Tal como se muestra en la Tabla VIII, los microplásticos medianos (101–500 μ m) representan la fracción más abundante.

TABLA VIII
TAMAÑO DE LOS MICROPLÁSTICOS

Clase de tamaño (μ m)	Intervalo	Referencia
Ultrafinos	0.5 – 2.5	[4], [8]
Muy pequeños	2.6 – 20	[7], [16]
Pequeños	21 – 100	[7], [9], [16]
Medianos	101 – 500	[2], [5], [7], [9], [11]
Grandes	501 – 1000	[2], [5], [9], [11]

3. ¿Qué métodos de análisis estadísticos se han utilizado en la literatura científica para determinar la correlación entre los microplásticos atmosféricos, el material particulado y las condiciones atmosféricas?

Los estudios aplican distintos métodos estadísticos para explorar la relación entre microplásticos atmosféricos, partículas en suspensión y variables meteorológicas. Pearson muestra asociaciones positivas con PM2.5 y precipitación, pero negativas con temperatura, humedad y viento; Spearman confirma vínculos con PM10 y otros factores, aunque con variaciones contextuales. Pruebas como Kruskal-Wallis y la regresión lineal refuerzan la conexión con PM2.5 y PM10, evidenciando en conjunto una interacción compleja entre microplásticos y condiciones ambientales. En síntesis, los métodos estadísticos revelan relaciones complejas entre los

microplásticos y los factores ambientales indicados en la Tabla IX.

TABLA IX
MÉTODOS DE ANÁLISIS ESTADÍSTICOS

Análisis de correlación	Parámetros	Relación	Referencia
Análisis de correlación de Pearson	PM 2,5	Positiva	[1], [6]
		No Significativa	[7]
	Precipitación	Positiva	[5], [9]
	Temperatura	No Significativa	[5], [7], [9]
	Humedad	No Significativa	[5], [7], [9]
	Velocidad del viento	No Significativa	[5], [7], [9]
Análisis de correlación de Spearman	PM 2,5	Positiva	[2]
	PM 10	Positiva	[2]
	Pluviosidad	Positiva	[10]
	Humedad	Positiva	[10]
		Negativa	[8]
	Velocidad del viento	Positiva	[10]
	Temperatura	Positiva	[8]
	Precipitación	Negativa	[8]
Prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis	PM 2,5	Positiva	[3]
	PM 10	Positiva	[3]
Regresión lineal	PM 2,5	Positiva	[4], [16]
	PM 10	Positiva	[16]
Enfoque descriptivo correlacional	PM 10	Positiva	[11]

IV. DISCUSIÓN

Respecto a las metodologías de muestreo, reportadas en la Tabla III indican una preferencia metodológica del 67% de artículos publicados hacia el muestreo activo por bombeo. Esta elección se justifica por la capacidad de esta técnica para cuantificar con precisión el volumen de aire muestreado en un intervalo temporal determinado, lo que resulta fundamental para el cálculo de concentraciones de microplásticos en suspensión (ej. #partículas MPs/m³) [17]. Además de facilitar la captura de partículas pequeñas, a diferencia de los métodos pasivos, esto facilita la obtención de datos más detallados y en corto tiempo[17], [18], [19]. Dichas características lo convierten en una opción idónea para el análisis de ambientes interiores con elevadas concentraciones de microplásticos [19]. Por otro lado, el muestreo pasivo por deposición atmosférica presenta ventajas operativas y económicas notables, al no requerir de sistemas mecánicos complejos ni de un suministro

energético continuo [20], [21]. No obstante, su aplicación se orienta principalmente a estudios de larga duración y resulta especialmente útil en zonas remotas, donde las limitaciones logísticas dificultan la implementación de equipos de muestreo active[22]. Estos hallazgos reflejan que la selección de la metodología de muestreo está condicionada por múltiples factores, entre los que destacan los recursos económicos disponibles, la duración del estudio, la ubicación geográfica del sitio de muestreo y el nivel de precisión requerido en la cuantificación.

La Tabla IV presenta las principales técnicas para la identificación y cuantificación de microplásticos atmosféricos. La Espectroscopía Vibratoria es la metodología predominante, empleada por el 84% de los estudios citados, ya que, Raman, FTIR, μ -Raman y μ -FTIR presentan una alta resolución (hasta 1 μ m), sensibilidad y capacidad para una identificación química precisa [23]. Sus ventajas incluyen su naturaleza no destructiva, que preserva las muestras para análisis posteriores [24], y su alto rendimiento, al reducir los tiempos de preparación y el riesgo de contaminación [25]. Sin embargo, su principal limitación es la interferencia por fluorescencia, inducida por colorantes, aditivos o biofilms, que puede enmascarar las señales espectrales del polímero[26]. Otras técnicas complementarias son el análisis visual (microscopía óptica y estereoscópica), valorado por su simplicidad, pero limitado por su baja resolución y subjetividad, lo que hace necesaria su complementación con métodos espectroscópicos para una verificación química [27], [28]. Seguido de la microscopía de fluorescencia (con tinción de Nile Red), que permite la detección automatizada, pero puede generar falsos positivos por materia orgánica y tiene baja eficacia en partículas muy pequeñas [29]. Además, otra técnica que destaca es la de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), considerada el estándar óptimo por integrar análisis morfológico y composicional, aunque su alto costo y requerimiento de tiempo limitan su uso en monitoreos rutinarios a gran escala [30].

En la Tabla V, se muestran las propiedades químicas de los microplásticos, mostrando al polipropileno (PP), como el compuesto más presente en los MP atmosféricos, debido a su uso masivo en textiles y empaques, y por su baja densidad, resistencia a la degradación y transporte eólico [31]. Seguido de compuestos como el polietileno, Tereftalato de polietileno y Poliestireno que presentan una presencia del 84% en los artículos encontrados, debido a su presencia en bolsas, envases de alimentos, botellas de bebidas, juguetes y textiles [32], [33], [34].

La Tabla VI evidencia la distribución cromática de los microplásticos atmosféricos, donde la fracción predominante (84%) corresponde a partículas de color transparente/blanco. Su presencia esta porque las principales fuentes de emisión (textiles sintéticos, productos de consumo y desechos industriales) liberan partículas con este color. Además, dicha tonalidad presenta mayor resistencia a la decoloración y menor

densidad, favoreciendo su dispersión y persistencia ambiental [35], [36]. Por lo tanto, la predominancia de microplásticos transparentes/blancos refleja directamente su origen antropogénico y confiere propiedades que amplifican su persistencia ambiental.

En la Tabla VII, mostramos la variedad de formas de los microplásticos. Según [37], [38], [39], [40] los microplásticos con forma aerodinámica, como fibras y fragmentos, se desplazan más lejos al sedimentar más lentamente que las partículas esféricas de igual volumen. La forma aerodinámica prolonga la permanencia de los microplásticos en el aire, y en el caso de fibras, puede causar inflamación pulmonar y alteraciones respiratorias restrictivas [41]. Por ende, la forma de los microplásticos facilita su dispersión, pero también incrementa riesgos para la salud y el ambiente.

La Tabla VIII muestra mayor presencia de microplásticos atmosféricos medianos (101 – 500 μm). Esta consecuencia puede ser debido a que los plásticos grandes se fragmentan por radiación UV, abrasión y degradación química, generando microplásticos de 101–500 μm [42]. Otros factores que pueden generar esta diferencia de tamaños son los plásticos como el polietileno, poliestireno y polipropileno poseen propiedades físicas diferentes que determinan su modo de degradación y dispersión en el ambiente [43], [44], [45]. Además, las partículas grandes tienden a sedimentar con mayor rapidez, reduciendo su permanencia. En cambio, las más pequeñas permanecen flotando por más tiempo, ampliando su dispersión [46], [47]. De esta manera, se evidencia como las propiedades físicas junto con la sedimentación de partículas varían en los diferentes tamaños de los microplásticos, favoreciendo su dispersión.

Los resultados presentados en la Tabla IX destacan a los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman, como los más usados para evaluar las relaciones existentes entre las variables analizadas. Debido a que, el coeficiente de Pearson evalúa relaciones lineales basadas en la coincidencia de valores absolutos, mientras que Spearman se centra en el orden de los datos, siendo útil para detectar patrones aun cuando las magnitudes difieran [48], [49]. Otra herramienta usada para modelar la relación entre microplásticos y variables atmosféricas específicas es la regresión lineal [50]. En el caso de uso de Prueba no paramétrica de Kruskal -Wallis resulta apropiada para contrastar las concentraciones de microplásticos en distintas condiciones atmosféricas o niveles de partículas, pues no requiere que los datos sigan una distribución normal [50], [51], [52]. Por ende, la combinación de pruebas paramétricas y no paramétricas permite un análisis integral de los datos. Pearson y la regresión lineal captan relaciones lineales, mientras Spearman y Kruskal-Wallis aportan flexibilidad ante distribuciones irregulares. Así, el uso conjunto fortalece la validez de las conclusiones al adaptarse a distintos comportamientos de las variables.

Gran parte de la evidencia muestra una correlación positiva entre PM_{2,5}/PM₁₀ y microplásticos atmosféricos, con algunas excepciones. Para [53] es debido a que provienen de fuentes comunes como el tráfico vehicular y polvo urbano. Así, cuando aumenta la concentración del material particulado, también se incrementa los microplásticos atmosféricos. Además, ambos comparten procesos físicos-químicos de formación en emisiones antropogénicas y son transportados conjuntamente por dinámicas meteorológicas de la capa límite atmosférica [54].

Además, la correlación entre microplásticos y condiciones atmosféricas resulta variable, pudiendo ser positiva, negativa o incluso no significativa según el enfoque del estudio, tipo de plástico y el entorno. En el caso de la precipitación, algunos trabajos señalan que la lluvia arrastra y deposita los microplásticos suspendidos en el aire, reduciendo su concentración atmosférica y evidenciando una correlación negativa [55]. Otros, en cambio, destacan que la lluvia favorece la deposición de microplásticos acumulados en la atmósfera hacia la superficie, reflejando una correlación positiva [56]. Otro ejemplo se observa en la correlación con la temperatura. El aumento de la temperatura acelera el desgaste de materiales urbanos y potencia la liberación de microplásticos atmosféricos [57]. Sin embargo, esta relación puede resultar no significativa, ya que la temperatura no actúa como un factor aislado, sino que interactúa con otros procesos meteorológicos y fisicoquímicos que determinan el comportamiento de las partículas en suspensión, especialmente en megaciudades [58]. Respecto a la humedad, los resultados muestran cierta variabilidad. En pruebas de intemperismo acelerado, la alta humedad acelera la fotodegradación del PET, este proceso incrementa la formación y liberación de microplásticos en la atmósfera [59], evidenciando una correlación positiva. Aunque en otros casos, la correlación negativa entre microplásticos y humedad se da porque el aire húmedo favorece su agregación y biopelculización, aumentando el peso y acelerando su sedimentación [60]. Para [61] la falta de correlación significativa se debe a que la deposición de microplásticos no depende linealmente de la humedad, sino de una combinación compleja de factores meteorológicos (lluvia, viento, temperatura, inversión térmica) y de las fuentes locales de emisión.

De los artículos analizados, con referente a la correlación entre microplásticos atmosféricos y material particulado (PM_{2.5} y PM₁₀), el 88% de estudios reporta una correlación positiva empleando diversos enfoques estadísticos. En consecuencia, la investigación de microplásticos atmosféricos no pueden abordarse de manera aislada, dado que ambos contaminantes coexisten y presentan una correlación significativa ($r = 0,76$; $p < 0,05$), lo que indica que comparten procesos de origen, transporte y deposición [62]. Asimismo, se ha observado que la disminución en la calidad del aire se acompaña de un incremento progresivo en la concentración de

ambos contaminantes [63]. No obstante, los estudios revisados aún no logran esclarecer con precisión los mecanismos fisicoquímicos que explican esta tendencia, lo que constituye una limitación metodológica relevante. Desde la perspectiva de salud pública, los microplásticos de tamaño respirable (equivalentes a PM2.5 y PM10) permanecen en suspensión y pueden ser inhalados, lo que hace indispensable su monitoreo conjunto para evaluar riesgos sanitarios [64]. Esto se añade, la variabilidad entre la correlación de microplásticos atmosféricos y las condiciones atmosféricas, como la precipitación, el viento, la temperatura y la humedad, estas sí influyen en el transporte, suspensión y deposición de microplásticos en la atmósfera; sin embargo, los mecanismos de estas interacciones aún no se comprenden del todo [65]. Bajo este marco, el profundizar en estas correlaciones resulta crucial, pues revelan un fenómeno combinado de contaminación con implicaciones directas para la salud humana y el ambiente, en un contexto donde persisten vacíos de conocimiento.

V. CONCLUSIONES

Esta revisión sistemática y el análisis bibliométrico permitieron identificar cómo el estudio de la correlación entre microplásticos atmosféricos, las partículas PM 2.5/PM 10 y las condiciones atmosféricas han experimentado un crecimiento notable en los últimos cinco años, con un volumen de publicaciones concentrado principalmente en países asiáticos, donde la intensa actividad industrial y urbana genera una elevada preocupación por la contaminación del aire y sus componentes emergentes. Mediante esta revisión, se confirma una correlación positiva entre los niveles de microplásticos atmosféricos y la concentración de PM 2.5 y PM 10, siendo influenciadas por factores meteorológicos que afectan su dispersión y depósito, especialmente en entornos urbanos e interiores.

Esto responde a las tres interrogantes complementarias de la revisión. Siendo en primer lugar, con respecto a las metodologías se usaron principalmente dos: el muestreo activo por bombeo, preciso y útil en monitoreos cortos en espacios cerrados, y el muestreo pasivo por deposición, económico y adecuado para estudios largos en zonas remotas. La identificación química se realiza sobre todo con FTIR y Raman, complementadas con microscopía y técnicas cromatográficas.

En segundo lugar, los microplásticos atmosféricos presentan un perfil fisicoquímico particular: están compuestos principalmente por polímeros ligeros como polipropileno, polietileno y poliestireno. Suelen aparecer como fibras o fragmentos, lo que favorece su permanencia en suspensión. Predominan en tamaños medianos y colores claros/transparentes, rasgos asociados a productos de consumo masivo que contribuyen a su persistencia ambiental.

Finalmente, los métodos analíticos empleados para identificar estas relaciones incluyen Pearson y Spearman para establecer asociaciones directas, hasta modelos de regresión lineal y pruebas no paramétricas como Kruskal-Wallis para contrastar datos bajo distintas condiciones.

Asimismo, en el análisis bibliométrico revela un campo de investigación en crecimiento, liderado por China y centrado en el concepto de "microplastics", que estructura redes temáticas que vinculan la contaminación, la composición química y la calidad del aire. La alta citación de estudios clave en revistas prestigiosas confirma la relevancia y el rigor científico consolidado en esta área de estudio a nivel global. Estos hallazgos resaltan con urgencia la necesidad de estandarizar los protocolos de monitoreo y, de manera crucial, integrar el análisis de microplásticos dentro del monitoreo de calidad del aire.

AGRADECIMIENTO

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Tecnológica del Perú por el apoyo financiero que permitió la realización de esta investigación.

REFERENCIAS

- [1] C. Yuan *et al.*, "Micro/nanoplastics in the Shenyang city atmosphere: Distribution and sources," *Environmental Pollution*, vol. 372, May 2025, doi: 10.1016/j.envpol.2025.126027.
- [2] J. Jiang, H. Ren, X. Wang, and B. Liu, "Pollution characteristics and potential health effects of airborne microplastics and culturable microorganisms during urban haze in Harbin, China," *Bioresour. Technol.*, vol. 393, p. 130132, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.BIORTECH.2023.130132.
- [3] V. C. Shruti, G. Kutralam-Muniasamy, F. Pérez-Guevara, P. D. Roy, and I. E. Martínez, "Occurrence and characteristics of atmospheric microplastics in Mexico City," *Science of The Total Environment*, vol. 847, p. 157601, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2022.157601.
- [4] R. Akhbarizadeh, S. Dobaradaran, M. Amouei Torkmahalleh, R. Saeedi, R. Aibaghi, and F. Faraji Ghasemi, "Suspended fine particulate matter (PM2.5), microplastics (MPs), and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air: Their possible relationships and health implications," *Environ. Res.*, vol. 192, p. 110339, Jan. 2021, doi: 10.1016/J.ENVRES.2020.110339.
- [5] Q. Jia *et al.*, "Atmospheric deposition of microplastics in the megalopolis (Shanghai) during rainy season: Characteristics, influence factors, and source," *Science of The Total Environment*, vol. 847, p. 157609, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2022.157609.
- [6] L. Cai *et al.*, "Property characteristics of PM2.5 and source analysis based on PMF method in Harbin[哈尔滨大气颗粒物PM2.5中微塑料的赋存特征及基于PMF法的来源解析]," *Huanjing Kexue Xuebao/Acta Scientiae Circumstantiae*, vol. 43, no. 8, pp. 257–264, Aug. 2023, doi: 10.13671/j.hjkxxb.2023.0109.
- [7] K. Sharaf Din, M. F. Khokhar, S. I. Butt, A. Qadir, and F. Younas, "Exploration of microplastic concentration in indoor and outdoor air samples: Morphological, polymeric, and elemental analysis," *Science of the Total Environment*, vol. 908, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.168398.
- [8] Y. C. Chen *et al.*, "Impact of seasonal changes and environmental conditions on suspended and inhalable microplastics in urban air," *Environmental Pollution*, vol. 362, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.envpol.2024.124994.
- [9] T. Mutshekwa, F. Mulaudzi, V. P. Maiyana, L. Mofu, L. F. Munyai, and F. M. Murungweni, "Atmospheric deposition of microplastics in urban, rural, forest environments: A case study of Thulamela Local Municipality," *PLoS One*, vol. 20, no. 3 March, Mar. 2025, doi: 10.1371/journal.pone.0313840.

- [10] L. F. Amato-Lourenço, L. dos Santos Galvão, H. Wiebeck, R. Carvalho-Oliveira, and T. Mauad, "Atmospheric microplastic fallout in outdoor and indoor environments in São Paulo megacity," *Science of the Total Environment*, vol. 821, May 2022, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.153450.
- [11] H. A. Özen and T. Mutuk, "The influence of road vehicle tyre wear on microplastics in a high-traffic university for sustainable transportation," *Environmental Pollution*, vol. 367, p. 125536, Feb. 2025, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2024.125536.
- [12] R. Akhbarizadeh, S. Dobaradaran, M. Amouei Torkmahalleh, R. Saeedi, R. Aibaghi, and F. Faraji Ghasemi, "Suspended fine particulate matter (PM_{2.5}), microplastics (MPs), and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air: Their possible relationships and health implications," *Environ. Res.*, vol. 192, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.envres.2020.110339.
- [13] J. Sun, Z. Peng, Z. R. Zhu, W. Fu, X. Dai, and B. J. Ni, "The atmospheric microplastics deposition contributes to microplastic pollution in urban waters," *Water Res.*, vol. 225, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.watres.2022.119116.
- [14] X. Zhu *et al.*, "Airborne Microplastic Concentrations in Five Megacities of Northern and Southeast China," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 55, no. 19, pp. 12871–12881, Oct. 2021, doi: 10.1021/acs.est.1c03618.
- [15] L. Cai *et al.*, "Property characteristics of PM_{2.5} and source analysis based on PMF method in Harbin," *环境科学学报*, vol. 43, no. 8, pp. 257–264, Aug. 2023, doi: 10.13671/J.HJKXXB.2023.0109.
- [16] J. Sun, Z. Peng, Z. R. Zhu, W. Fu, X. Dai, and B. J. Ni, "The atmospheric microplastics deposition contributes to microplastic pollution in urban waters," *Water Res.*, vol. 225, Oct. 2022, doi: 10.1016/j.watres.2022.119116.
- [17] I. Han, C. Lee, C. Belchez, A. G. Shipper, and K. E. Wiens, "Microplastics in Urban Ambient Air: A Rapid Review of Active Sampling and Analytical Methods for Human Risk Assessment," *Environments 2024, Vol. 11, Page 256*, vol. 11, no. 11, p. 256, Nov. 2024, doi: 10.3390/ENVIRONMENTS11110256.
- [18] N. Yamamoto, D. Schmechel, B. T. Chen, W. G. Lindsley, and J. Peccia, "Comparison of quantitative airborne fungi measurements by active and passive sampling methods," *J. Aerosol Sci.*, vol. 42, no. 8, pp. 499–507, 2011, doi: 10.1016/j.jaerosci.2011.05.004.
- [19] D. B. Nguyen, D. C. Le, H. V. T. Truong, M. T. Tran, and S. T. P. Phu, "A Short Review On Content And Composition Of Airborne Microplastics," *2024 9th International Conference on Applying New Technology in Green Buildings, ATiGB 2024*, pp. 167–172, 2024, doi: 10.1109/ATiGB63471.2024.10717663.
- [20] S. Manibusan and G. Mainelis, "Passive bioaerosol samplers: A complementary tool for bioaerosol research. A review," *J. Aerosol Sci.*, vol. 163, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.jaerosci.2022.105992.
- [21] F. A. Esteve-Turrillas and A. Pastor, "Passive Air Sampling," *Comprehensive Analytical Chemistry*, vol. 73, pp. 203–232, 2016, doi: 10.1016/bs.coac.2016.04.003.
- [22] L. S. Rodríguez Pirani *et al.*, "First evidence of airborne microplastics in the sub-Antarctic Beagle Channel: Detection and characterization by infrared and Raman microspectroscopies," *Chemosphere*, vol. 388, p. 144692, Oct. 2025, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2025.144692.
- [23] J. S. Böke, J. Popp, and C. Krafft, "Optical photothermal infrared spectroscopy with simultaneously acquired Raman spectroscopy for two-dimensional microplastic identification," *Scientific Reports 2022 12:1*, vol. 12, no. 1, pp. 18785–, Nov. 2022, doi: 10.1038/s41598-022-23318-2.
- [24] K. Ye, M. Xie, X. Chen, Z. Zhu, and S. Gao, "Raman Spectroscopy in the Detection of Environmental Micro- and Nanoplastics: Applications and Challenges[拉曼光谱技术在环境微纳塑料检测中的应用与挑战]," *Progress in Chemistry*, vol. 37, no. 1, pp. 2–15, Jan. 2025, doi: 10.7536/PC240710.
- [25] A. Kissel, A. Nogowski, A. Kienle, and F. Foschum, "Flow Raman Spectroscopy for the Detection and Identification of Small Microplastics," *Sensors 2025, Vol. 25, Page 1390*, vol. 25, no. 5, p. 1390, Feb. 2025, doi: 10.3390/S25051390.
- [26] C. F. Araujo, M. M. Nolasco, A. M. P. Ribeiro, and P. J. A. Ribeiro-Claro, "Identification of microplastics using Raman spectroscopy: Latest developments and future prospects," *Water Res.*, vol. 142, pp. 426–440, Oct. 2018, doi: 10.1016/J.WATRES.2018.05.060.
- [27] K. P. Lim, C. Sun, and P. E. Lim, "Observation and visual identification of microplastics," in *Analysis of Microplastics and Nanoplastics*, Elsevier, 2024, pp. 155–182. doi: 10.1016/B978-0-443-15779-0.00008-0.
- [28] B. Singh, G. Srivastava, D. Kala, M. Gill, A. Kaushal, and S. Gupta, "Microplastics as an emerging threat to human health: Challenges and advancements in their detection," *Applied Chemical Engineering*, vol. 6, no. 2, 2023, doi: 10.24294/ace.v6i2.2103.
- [29] D. Ho, P. Prabhakar, K. G. Karthikeyan, and H. Feng, "Shedding light on the polymer's identity: Microplastic detection and identification through Nile red staining and multispectral imaging (FIMAP)," *J. Environ. Chem. Eng.*, vol. 13, no. 5, p. 117944, Oct. 2025, doi: 10.1016/J.JECC.2025.117944.
- [30] W. Li, Y. Luo, and X. Pan, "Identification and Characterization Methods for Microplastics Basing on Spatial Imaging in Micro-/Nanoscales," in *Handbook of Environmental Chemistry*, vol. 95, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2020, pp. 25–37. doi: 10.1007/978-2020-446.
- [31] A. Kaushik *et al.*, "Identification and physico-chemical characterization of microplastics in marine aerosols over the northeast Arabian Sea," *Science of The Total Environment*, vol. 912, p. 168705, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.168705.
- [32] M. I. Muhib, M. K. Uddin, M. M. Rahman, and G. Malafaia, "Occurrence of microplastics in tap and bottled water, and food packaging: A narrative review on current knowledge," *Science of the Total Environment*, vol. 865, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.161274.
- [33] V. Dhaka *et al.*, "Occurrence, toxicity and remediation of polyethylene terephthalate plastics. A review," *Environ. Chem. Lett.*, vol. 20, no. 3, pp. 1777–1800, Jun. 2022, doi: 10.1007/s10311-021-01384-8.
- [34] R. Yadav, A. Jangra, M. Rachamalla, and D. Kumar, "Polystyrene: A Hazardous Risk to Marine as Well as Human Life," in *World Sustainability Series*, vol. Part F3811, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2025, pp. 201–223. doi: 10.1007/978-3-031-77327-3_11.
- [35] K. Nishshankage, I. Gunasekara, and M. Vithanage, "Microbiome in Atmospheric Microplastics and Microplastic Deposition on Symbiotic Organisms," in *Plastisphere: The Ecosystem of Plastics*, CRC Press, 2025, pp. 36–54. doi: 10.1201/9781032717814-3.
- [36] C. Tu, Y. Tian, Y. Liu, X. N. Zhang, and Y. M. Luo, "Occurrence of Atmospheric (Micro)plastics and the Characteristics of the Plastic Associated Biofilms in the Coastal Zone of Dalian in Summer and Autumn[大连海岸带夏、秋季大气沉降(微)塑料的赋存特征及其表面生物膜特性]," *Huanjing Kexue/Environmental Science*, vol. 43, no. 4, pp. 1821–1828, Apr. 2022, doi: 10.13227/j.hjxx.202108117.
- [37] C. A. Preston, C. L. McKenna Neuman, and J. Aherne, "Effects of Shape and Size on Microplastic Atmospheric Settling Velocity," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 57, no. 32, pp. 11937–11947, Aug. 2023, doi: 10.1021/acs.est.3c03671.
- [38] D. Tatsii *et al.*, "Shape Matters: Long-Range Transport of Microplastic Fibers in the Atmosphere," *Environ. Sci. Technol.*, vol. 58, no. 1, pp. 671–682, Jan. 2024, doi: 10.1021/acs.est.3c08209.
- [39] A. S. W. Reininger, D. Tatsii, T. Bhowmick, G. Bagheri, and A. Stohl, "The atmospheric settling of commercially sold microplastics," *Atmos. Chem. Phys.*, vol. 25, no. 18, pp. 10691–10705, Sep. 2025, doi: 10.5194/acp-25-10691-2025.
- [40] G. Sathyamohan, M. Sewwandi, B. Ambade, and M. Vithanage, "Sources and circulation of microplastics in the aerosphere-atmospheric transport of microplastics," in *Microplastics in the*

Ecosphere: Air, Water, Soil, and Food, Wiley, 2023, pp. 125–146. doi: 10.1002/9781119879534.ch8.

- [41] Y. Li *et al.*, “Inhalable microplastics of different shapes disrupt airway epithelial homeostasis: A comparative study of fibers and irregular particles,” *Environ. Int.*, vol. 203, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.envint.2025.109736.
- [42] A. Mishra, P. Tripathi, and R. S. Singh, “Potential Environmental Contamination by Microplastics,” in *Environmental Science and Engineering*, vol. Part F158, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2025, pp. 17–44. doi: 10.1007/978-3-031-76949-8_2.
- [43] T. Morioka, S. Tanaka, A. Kohama-Inoue, and A. Watanabe, “The quantification of the airborne plastic particles of 0.43–11 μm : Procedure development and application to atmospheric environment,” *Chemosphere*, vol. 351, Mar. 2024, doi: 10.1016/j.chemosphere.2024.141131.
- [44] Q. Zhou, C. Tian, and Y. Luo, “Various forms and deposition fluxes of microplastics identified in the coastal urban atmosphere,” *Kexue Tongbao/Chinese Science Bulletin*, vol. 62, no. 33, pp. 3902–3909, Nov. 2017, doi: 10.1360/N972017-00956.
- [45] F. Jahedi, N. Jaafarzadeh Haghighi Fard, M. Abdullatif Khafae, S. Hesam, R. Dehbandi, and N. Kaydi, “Characterization of airborne microplastics and exposure assessment in the Mahshahr special economic zone, Northern Persian Gulf,” *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 16, no. 9, Sep. 2025, doi: 10.1016/j.apr.2025.102585.
- [46] K. Nishshankage, I. Gunasekara, and M. Vithanage, “Microbiome in Atmospheric Microplastics and Microplastic Deposition on Symbiotic Organisms,” in *Plastisphere: The Ecosystem of Plastics*, CRC Press, 2025, pp. 36–54. doi: 10.1201/9781032717814-3.
- [47] A. Du *et al.*, “Distribution Characteristics of Atmospheric Microplastics in Typical Desert Agricultural Regions,” *Environ. Toxicol. Chem.*, vol. 43, no. 9, pp. 1982–1995, Sep. 2024, doi: 10.1002/etc.5951.
- [48] V. Morgado, C. Palma, and R. J. N. Bettencourt da Silva, “Microplastics identification by infrared spectroscopy – Evaluation of identification criteria and uncertainty by the Bootstrap method,” *Talanta*, vol. 224, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.talanta.2020.121814.
- [49] J. M. Levermore, T. E. L. Smith, F. J. Kelly, and S. L. Wright, “Detection of Microplastics in Ambient Particulate Matter Using Raman Spectral Imaging and Chemometric Analysis,” *Anal. Chem.*, vol. 92, no. 13, pp. 8732–8740, Jul. 2020, doi: 10.1021/acs.analchem.9b05445.
- [50] S. G. Schreiber, S. Schreiber, R. N. Tanna, D. R. Roberts, and T. J. Arciszewski, “Statistical tools for water quality assessment and monitoring in river ecosystems – a scoping review and recommendations for data analysis,” *Water Quality Research Journal*, vol. 57, no. 1, pp. 40–57, Feb. 2022, doi: 10.2166/wqrj.2022.028.
- [51] H. Suseno, S. Suadi, J. Jamhari, and R. Rustadi, “Certifications as Catalysts for Enhancing Quality Management Maturity and Sustainability: Evidence from Fish Processing Enterprises in Indonesia,” *International Review of Management and Marketing*, vol. 15, no. 5, pp. 147–155, 2025, doi: 10.32479/irmm.19214.
- [52] J. P. Schöggel, M. Rusch, L. Stumpf, and R. J. Baumgartner, “Implementation of digital technologies for a circular economy and sustainability management in the manufacturing sector,” *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 35, pp. 401–420, Jan. 2023, doi: 10.1016/j.spc.2022.11.012.
- [53] T. Martinmäki, S. Saarikoski, H. Timonen, J. Järkko, V. Niemi, and M. Sillanpää, “Plastic and rubber polymers in urban PM₁₀ by pyrolysis-gas chromatography-mass spectrometry,” *Anal. Bioanal. Chem.*, vol. 417, pp. 3835–3844, 123AD, doi: 10.1007/s00216-025-05906-z.
- [54] D. Kau, D. Materić, R. Holzinger, K. Baumann-Stanzer, G. Schauer, and A. Kasper-Giebl, “Fine micro- and nanoplastics concentrations in particulate matter samples from the high alpine site Sonnblick, Austria,” *Chemosphere*, vol. 352, p. 141410, Mar. 2024, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2024.141410.
- [55] A. Prajapati, P. Jadhao, and A. R. Kumar, “Atmospheric microplastics deposition in a central Indian city: Distribution, characteristics and seasonal variations,” *Environmental Pollution*, vol. 374, p. 126183, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2025.126183.
- [56] S. Abbasi *et al.*, “Atmospheric deposition of microplastics in Shiraz, Iran,” *Atmos. Pollut. Res.*, vol. 15, no. 2, p. 101977, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.APR.2023.101977.
- [57] W. Wu, X. Geng, R. Han, H. Zhao, and J. Wang, “Characterization of airborne microplastics and health risks in high-temperature urban streets: A case study of Nanjing city,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 496, p. 139431, Sep. 2025, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2025.139431.
- [58] Y. Liu, Z. Nie, Y. Meng, G. Liu, Y. Chen, and G. Chai, “Influence of meteorological conditions on atmospheric microplastic transport and deposition,” *Environ. Res.*, vol. 265, p. 120460, Jan. 2025, doi: 10.1016/J.ENVRES.2024.120460.
- [59] A. Prajapati, P. Jadhao, and A. R. Kumar, “Atmospheric microplastics deposition in a central Indian city: Distribution, characteristics and seasonal variations,” *Environmental Pollution*, vol. 374, p. 126183, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2025.126183.
- [60] P. Liu *et al.*, “Physicochemical characteristics of airborne microplastics of a typical coastal city in the Yangtze River Delta Region, China,” *Journal of Environmental Sciences*, vol. 148, pp. 602–613, Feb. 2025, doi: 10.1016/J.JES.2023.09.027.
- [61] Y. Huang *et al.*, “Atmospheric transport and deposition of microplastics in a subtropical urban environment,” *J. Hazard. Mater.*, vol. 416, p. 126168, Aug. 2021, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2021.126168.
- [62] A. L. Patricia Abad, J. Trilleras, V. A. Arana, L. Stella Garcia-Alzate, and C. David Grande-Tovar, “Atmospheric microplastics: exposure, toxicity, and detrimental health effects,” 2023, doi: 10.1039/d2ra07098g.
- [63] C. C. Gaylarde, J. A. Baptista Neto, and E. M. da Fonseca, “Indoor Airborne Microplastics: Human Health Importance and Effects of Air Filtration and Turbulence,” *Microplastics*, vol. 3, no. 4, pp. 653–670, Dec. 2024, doi: 10.3390/microplastics3040040.
- [64] Y. Liu, Z. Nie, Y. Meng, G. Liu, Y. Chen, and G. Chai, “Influence of meteorological conditions on atmospheric microplastic transport and deposition,” *Environ. Res.*, vol. 265, p. 120460, Jan. 2025, doi: 10.1016/J.ENVRES.2024.120460.
- [65] L. A. Solórzano, D. Gavilanes, F. Cadena, L. Irusta, A. González, and M. Aldas, “A Review of the Sampling, Analysis, and Identification Techniques of Microplastics in the Air: Insights into PM_{2.5} and PM₁₀,” *Polymers* 2025, Vol. 17, Page 3045, vol. 17, no. 22, p. 3045, Nov. 2025, doi: 10.3390/POLYM17223045.