

Presence and characterization of microplastics in agricultural soils in the northern area of Lima-Peru

Karen Orellana Balbin¹; Ximena Mendoza Marchino²; Mercedes Gomez Lazarte³ and Anita Arrascue Lino⁴
^{1,2,3,4} Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, U201817864@upc.edu.pe, U201819090@upc.edu.pe,
mercedes.gomez@upc.pe³ and anita.arrascue@upc.pe⁴

Abstract– Microplastic (MP) pollution has become a growing environmental problem due to its presence in aquatic, aerial, and terrestrial media. These microplastics can compromise soil quality, interfere with plant development, and potentially enter the food chain. This study evaluated the concentration of microplastics in agricultural soils in the Caballero area, Carabaylo, Lima-Peru, using the density separation technique. Sampling was conducted at different depths (0-10 cm, 10-20 cm, and 20-30 cm) at 11 points on a 1.43-hectare plot. The results revealed a total concentration of 3069.39 items/kg, with the highest accumulation found in the surface layer (0-10 cm) at 3778.45 items/kg. Plastic fragments were the most predominant type, with 84,791 items, and the most frequent colour was blue, with 54,806 items. The identified particles ranged in size from 1 to 200 µm. These findings highlight the impact of microplastics on soil quality and agricultural productivity, as well as their potential entry into the food chain and implications for human health. The study emphasizes the need to further investigate these contaminants to assess their effects on ecosystems and health, and to develop more effective mitigation and management strategies.

Keywords– Microplastic, crop soil, ecological risk, density separation technique.

Presencia y caracterización de microplásticos en suelos agrícolas en la zona norte de Lima-Perú

Karen Orellana Balbin¹; Ximena Mendoza Marchino²; Mercedes Gomez Lazarte³ and Anita Arrascue Lino⁴

¹Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Peru, U201817864@upc.edu.pe, U201819090@upc.edu.pe, mercedes.gomez@upc.pe³ and anita.arrascue@upc.pe⁴

Resumen– La contaminación por microplásticos (MPs) se ha convertido en un problema ambiental creciente debido a su presencia en medios acuáticos, aéreos y terrestres. Estos microplásticos pueden comprometer la calidad del suelo, interferir en el desarrollo de las plantas y, potencialmente ingresar a la cadena alimentaria. El presente estudio evaluó la concentración de microplásticos en suelos agrícolas de la zona de Caballero, Carabaylo, Lima-Perú, utilizando la técnica de separación por diferencia de densidad. Se realizaron muestreos a distintas profundidades (0-10 cm, 10-20 cm y 20-30 cm) en 11 puntos de una parcela de 1.43 hectáreas (ha). Los resultados revelaron una concentración total de 3069.39 ítems/kg, siendo la mayor acumulación detectada en la capa superficial (0-10 cm) con 3778.45 ítems/kg. Los fragmentos plásticos fueron el tipo más predominante 84 791 ítems, y el color azul fue el más frecuente con 54 806 ítems. Las partículas identificadas presentaron tamaños que variaron entre 1-200 μm . Estos hallazgos destacan el impacto de los microplásticos en la calidad del suelo y la productividad agrícola, así como su posible ingreso en la cadena alimentaria y sus implicaciones para la salud humana. La investigación subraya la necesidad de profundizar en el estudio de estos contaminantes para evaluar sus efectos en los ecosistemas y la salud, y desarrollar estrategias de mitigación y manejo más efectivas.

Palabras clave– Microplástico, suelo agrícola, riesgo ecológico, técnica de diferencia de densidad.

I. INTRODUCCIÓN

El plástico se ha convertido en un material indispensable en la vida cotidiana debido a su versatilidad, bajo costo y conveniencia, lo que lo ha posicionado como la principal opción en la fabricación de envases y una amplia variedad de productos de consumo [1], [2]. Como resultado, la producción global de plásticos ha crecido exponencialmente en los últimos 100 años, alcanzado 400.3 millones de toneladas en 2022 [3], [4]. Además, los plásticos contaminan aguas subterráneas, aguas superficiales, la calidad del suelo y contribuyeron al 3.4% de los gases de efecto invernadero en el 2019 [5].

Sin embargo, la falta de concientización y la ineficiencia en la gestión de residuos han dado lugar a una acumulación masiva de desechos plásticos en el medio ambiente [6]. Estos residuos persisten en el entorno y se fragmentan en partículas microscópicas conocidas como microplásticos (MPs), cuyo tamaño oscila entre 1 μm y menos que 5 mm [7]. Los microplásticos pueden clasificarse en primarios, cuando son añadidos intencionalmente a productos comerciales como cosméticos y jabones, y secundarios, cuando se generan por la degradación de plásticos de mayor tamaño debido a la

exposición a la radiación UV, la fricción mecánica y los procesos de envejecimiento ambiental [8].

Las investigaciones sobre la contaminación por microplásticos se han centrado principalmente en ecosistemas marinos, donde se han detectado en organismos planctónicos, bentónicos y peces [9]. Se ha demostrado que estos contaminantes generan impactos severos, aunque no letales, en organismos acuáticos, afectando procesos celulares y moleculares [10]. Sin embargo, la investigación sobre su presencia en los suelos, especialmente en suelos agrícolas, sigue siendo limitada, a pesar de que se ha estimado que su concentración en los suelos es 4 - 23 veces mayor que en los océanos [11]. Esta acumulación se debe a la complejidad de los ecosistemas terrestres, donde la degradación de microplásticos es más lenta y su persistencia es mayor.

Las prácticas agrícolas han sido identificadas como una fuente significativa de contaminación por microplásticos en suelos, debido al uso extensivo de plásticos en cultivos y la irrigación con aguas contaminadas [12], [13]. Asimismo, la deposición atmosférica también contribuye a la propagación de microplásticos a grandes distancias, ya que el viento puede transportar partículas de microplásticos depositándolas en zonas agrícolas alejadas de su fuente original [14], [15]. Una vez en el suelo, los microplásticos pueden migrar a mayores profundidades, alterando la estructura del suelo y afectando la biodiversidad microbiana, ya que los microplásticos son ingeridos por las lombrices de tierra lo que genera un bloqueo en sus intestinos reduciendo sus tasas de crecimiento y reproducción en 15% [16]. Estos MPs afectan el comportamiento de las lombrices disminuyendo su actividad de excavación y aumentando su estrés oxidativo [17]. También modifican las características metabólicas de las comunidades microbianas [18], alterando la descomposición de la materia orgánica y el ciclo de los nutrientes [15], comprometiendo el rendimiento de los cultivos [19], [20], [21], [22]. Estudios recientes han evidenciado que los microplásticos pueden ser absorbidos por las plantas a través de sus raíces, facilitando su incorporación en la cadena alimentaria [22]. Se ha detectado la presencia de microplásticos en diversas frutas y hortalizas, lo que confirma su potencial riesgo para la salud humana [23] ya que también tienen la capacidad de adsorber contaminantes químicos, metales pesados, y otros podrían afectar la salud humana [16].

Se estima que una persona puede ingerir hasta 5 g de microplásticos por semana a través de distintas fuentes [23], acumulándose en órganos como pulmones, hígado, bazo,

riñones y placenta [24]. Aunque el impacto total de los microplásticos en la salud humana aún no se comprende completamente, estudios preliminares han vinculado su exposición con alteraciones cromosómicas, infertilidad, obesidad y ciertos tipos de cáncer [25].

Actualmente no existe un estándar nacional o internacional que establezca límites máximos permisibles específicos para microplásticos en el aire, agua, suelo o alimentos. Sin embargo, países como Reino Unido, España, Suecia, Estados Unidos y China han implementado regulaciones para restringir la comercialización de microplásticos primarios [26]. En América Latina, no se han adoptado normativas específicas sobre microplásticos, aunque algunos países han legislado con relación a los plásticos de un solo uso. En Perú, la Ley N°30884 regula el plástico de un solo uso y promueve el empleo de plásticos biodegradables; mientras que la resolución Ministerial 021- 2011-MINAM exige que las entidades públicas utilicen plásticos con al menos un 80% de material reciclado. Estas medidas han logrado reducir el consumo de plásticos en un 30%, aunque los plásticos aún representan el 11% de residuos totales del país [27].

El departamento de Lima concentra el 46% de los residuos plásticos generados de todo el Perú, debido a su alta densidad poblacional y actividad económica [28]. Como resultado, la contaminación por microplásticos es más alta en esta región, lo que se evidencia en estudios que han detectado su presencia en el estómago e intestinos de tres especies de peces comerciales en la costa de Lima [29]; así como en playas del litoral como Agua Dulce, Costa Azul, Albufera Medio Mundo, Vesique y El Chaco [30]. Sin embargo, la investigación sobre microplásticos en suelos agrícolas sigue siendo incipiente. En este contexto, se realizó el presente estudio en el distrito de Carabayllo, una zona que produce más del 45% de la producción hortícola de Lima, y que se considera crítica debido a su intensa actividad agrícola y exposición a diversas fuentes de microplásticos [31].

Carabayllo, ubicado en el valle del río Chillón (Fig. 1) es reconocido por su diversidad de cultivos. En diciembre de 2020, los principales cultivos por superficie sembrada incluyeron el brócoli (58 ha), lechuga (32 ha), poro (30 ha), cebolla china (30 ha) y maíz chala (30 ha) [32]. Los productos agrícolas de esta zona abastecen mercados locales, ferias agroecológicas, mercados mayoristas y restaurantes [33], [34], [35]; lo que contribuye significativamente a la seguridad alimentaria y al desarrollo económico de la región. Sin embargo, durante las visitas de campo se identificó un botadero informal cercano a los terrenos de cultivo ($11^{\circ} 48.360'S$ $76^{\circ} 59.495'W$), así como residuos plásticos en avanzado estado de degradación, en las proximidades de las plantaciones (Fig. 2), lo que sugiere una alta exposición de estos suelos a la contaminación por microplásticos.



Fig. 2 Botadero informal (Izq.) y plásticos en degradación en cultivos (Der.) de la zona agrícola Caballero en el distrito de Carabayllo

Por ello, el objetivo de este estudio fue analizar la concentración y distribución de microplásticos en diferentes niveles de profundidad del suelo de la zona agrícola Caballero del distrito de Carabayllo. Además, se busca determinar las características fisicoquímicas del suelo e identificar las propiedades morfológicas de los microplásticos, así como su distribución en los diferentes niveles de profundidad.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Área de estudio y recolección de muestras

Las muestras de suelo fueron recolectadas el 09 de abril del 2024 en un terreno agrícola de aproximadamente 1.43 hectáreas, ubicado en el distrito de Carabayllo ($11^{\circ}48'21.4''S$ $76^{\circ}59' 28.8''W$). Para este estudio, se seleccionaron 11 puntos de muestreo, siguiendo las directrices de la Guía de Muestreo de Suelo del Ministerio del Ambiente, como se muestra en la Fig. 03. En cada uno de los puntos de seleccionados, se extrajeron tres muestras de suelo, con un peso de 1 kg cada una, correspondientes a 3 diferentes profundidades definidas conforme a la guía [36] 0-10 cm (nivel 1), 10-20 cm (nivel 2) y 20-30cm (nivel 3).



Fig. 1 Mapa de ubicación del distrito de Carabayllo

III. RESULTADOS

El análisis de laboratorio reveló que el suelo presenta un pH de 6.59. El contenido de materia orgánica fue del 0.93%, y la porosidad del suelo se estimó en 47.92%. La humedad gravimétrica registrada fue de 2.75%. Finalmente, según su granulometría, el suelo se clasificó como franco-arenoso (Tabla 1).

TABLA I
CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

pH (1:1)	Porosidad %	Humedad Gravimétrica %	Clase Textural
6.59	47.92	2.75	Franco Arena (52%) Limo (34%) Arcilla (14%)

La concentración de microplásticos (Fig. 7) fue más alta en el nivel 1 (0-10 cm), con 3778.445 ítems/kg, seguido por el nivel 2 (10-20 cm), con 2962.818 ítems/kg, y finalmente el nivel 3 (20-30 cm), con 2466.909 ítems/kg. Este patrón sugiere que la mayor acumulación de microplásticos en las capas superficiales del suelo, podría estar asociado a procesos de deposición atmosférica, prácticas agrícolas y una menor movilidad de estas partículas hacia horizontes más profundos.

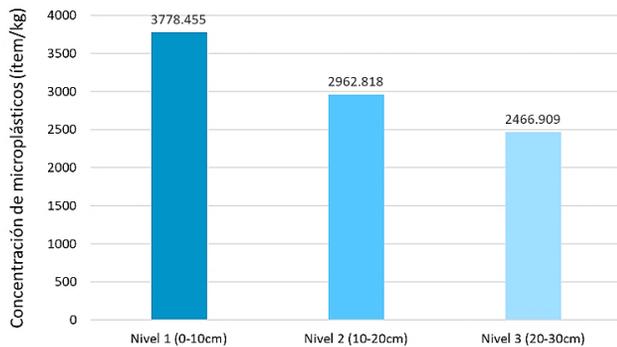


Fig. 7 Concentración de microplásticos por nivel de suelo analizado en el distrito de Carabayllo, Lima, Perú

En contraste, los microplásticos de colores como rojo, rosado y negro presentan frecuencias mínimas y fueron agrupados en la categoría de “otros”. Este patrón sugiere una dominancia del color azul, posiblemente vinculada a fuentes específicas de contaminación plástica, como textiles sintéticos, envases o materiales agrícolas. El color predominante de los microplásticos en los tres niveles de profundidad del suelo fue el azul, con la mayor frecuencia en el nivel 1 (0–10 cm) registrando 22997 unidades y una disminución progresiva en el nivel 2 (10–20 cm) con 18625 y en el nivel 3 (20–30 cm) con 13184 (Fig. 8). Asimismo, el blanco presenta una presencia significativa en los tres niveles. Aunque en menor cantidad que el azul, mientras que los colores amarillo, naranja y celeste tienen frecuencias bajas, siendo el naranja el único que incrementa ligeramente en los niveles más profundos.

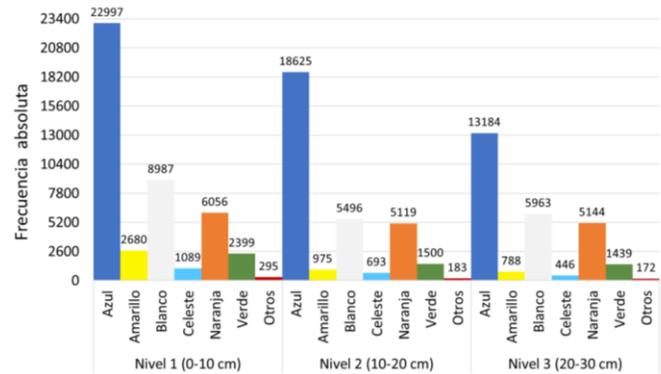


Fig. 8 Colores de microplásticos por nivel de suelo analizado en el distrito de Carabayllo, Lima, Perú

Las formas encontradas en el presente estudio se dividieron en tres categorías: fragmento, esfera y fibra, basado en la clasificación de la Referencia [43]. La forma predominante de los microplásticos en los tres niveles de profundidad fue la de fragmentos, con una frecuencia de 35040 unidades en el nivel 1 (0–10 cm), que disminuye a 27197 unidades en el nivel 2 (10–20 cm) y a 22554 unidades en el nivel 3 (20–30 cm), mostrando una tendencia decreciente con la profundidad (Fig. 9). Las fibras son las segundas con mayor frecuencia, con 4057 unidades en el nivel 1, disminuyendo a 3632 unidades en el nivel 2 y a 3179 en el nivel 3. Por otro lado, las esferas presentan las frecuencias más bajas en comparación, alcanzando 2466 en el nivel 1, que se reduce a 1763 en el nivel 2 y a 1403 en el nivel 3. Este resultado sugiere que los fragmentos representan la principal forma de microplásticos en el suelo, posiblemente debido a la degradación de materiales plásticos de mayor tamaño por procesos físicos, químicos y biológicos, como la radiación UV, la abrasión mecánica y la actividad microbiana.

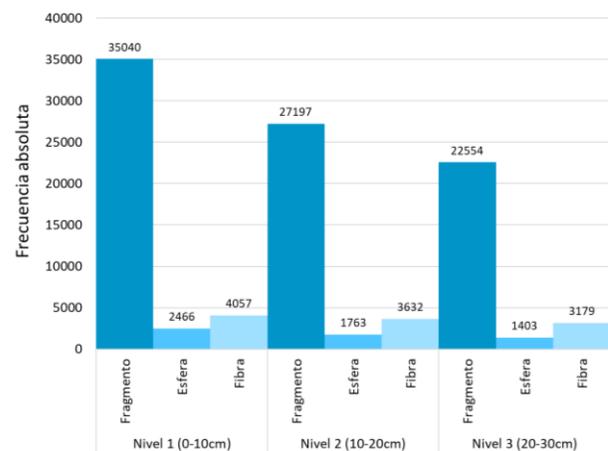


Fig. 9 Formas de microplásticos por nivel de suelo analizado en el distrito de Carabayllo, Lima, Perú

Los tamaños de microplásticos se dividieron en cuatro categorías: 1-200 μm , 200-500 μm , 500-1000 μm y 1000-5000 μm , basado en la clasificación de las Referencias [42] y [44]. El tamaño de microplásticos más frecuente en los tres niveles de profundidad correspondió al rango de 1-200 μm , con una mayor frecuencia de 38972 unidades en el nivel 1 (0–10 cm), seguido por 29260 unidades en el nivel 2 (10–20 cm) y con menor frecuencia con 25589 unidades en el nivel 3 (20–30 cm) (Fig. 10). El segundo rango con mayor frecuencia en los tres niveles es de 200-500 μm , con 2586 unidades en el nivel 2 (10–20 cm), 1795 unidades en el nivel 1 (0–10 cm) y 1484 unidades en el nivel 3 (20–30 cm). Por otro lado, los rangos de tamaño de 500-1000 μm y 1000-5000 μm presentan una mínima frecuencia en comparación. Este resultado indica que las partículas más pequeñas son predominantes en el suelo, lo que podría estar asociado a procesos avanzados de fragmentación de plásticos de mayor tamaño y a su mayor movilidad en las capas superficiales. La alta presencia de microplásticos en este rango de tamaño también sugiere un mayor potencial de interacción con el microbiota del suelo y su posible incorporación en la cadena trófica.

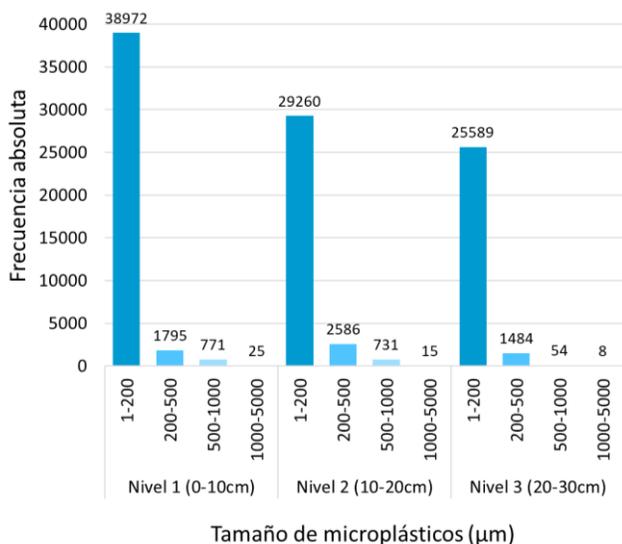


Fig. 10 Tamaños de microplásticos por nivel de suelo analizado en el distrito de Carabayllo, Lima, Perú

IV. DISCUSIÓN

Los suelos analizados presentaron un pH promedio de 6.59, lo que indica condiciones químicas balanceadas, favorables para la actividad biológica y la disponibilidad de nutrientes, condiciones óptimas para la agricultura. Este hallazgo coincide con los estudios de la Referencia [45] realizados en el área agrícola de la provincia Yong-In en Corea, en donde se identificó los efectos de los microplásticos en cuatro tipos de suelos con prácticas agrícolas diferentes y se obtuvo como resultados que concentraciones moderadas de microplásticos no afectan de manera significativa el pH del suelo, debido a la

capacidad de la materia orgánica y la actividad microbiana para amortiguar posibles alteraciones [46].

Sin embargo, se ha reportado que los suelos con mayor concentración de arena son más susceptibles a la acumulación y transporte de microplásticos, debido a la mayor cantidad de macroporos que tienen en comparación con otros tipos de suelo [47]. Además, se encontró que la mayor abundancia de microplásticos suele encontrarse en suelos arcillosos ligeros en polvo, mientras que su concentración es menor en suelos arcillosos arenosos calizos [47]. Esto se debe a que los suelos arcillosos, al presentar partículas más aglomeradas y compactas, favorecen la retención de microplásticos. Para nuestra área de estudio se determinó que el contenido de arena en el suelo fue de 52%, limo 34% y arcilla 14%. También se identificó que presenta 47.92% de porosidad lo que indica un alto espacio poroso y una humedad gravimétrica de 2.75% lo que sugiere una baja capacidad de retención de agua. Estos resultados facilitan la movilidad y acumulación de los microplásticos en niveles más profundos del suelo.

Hallazgos de la referencia [48] indicaron que la presencia de microplásticos disminuye la capacidad de infiltración de agua en el suelo, reduciendo la retención hídrica y acelerando la evaporación. Este fenómeno favorece la formación de agrietamientos en la superficie del suelo, lo que fue evidenciado en los puntos de muestreo. Estos resultados corroboran la existencia de una relación inversa entre la cantidad de microplásticos y la capacidad de infiltración, destacando su impacto adverso en las propiedades físicas del suelo agrícola y, potencialmente, en su productividad.

Además, se identificó que la mayor concentración de microplásticos se encuentra en el nivel 1 (capa superficial de 0 – 10 cm), lo que concuerda con las referencias [49], [50], [1], [51], en los que se ha reportado una mayor acumulación en esta profundidad. Esto se atribuye a la deposición inicial de plásticos en la superficie y su posterior fragmentación e infiltración con el paso del tiempo. Sin embargo, la concentración de microplásticos disminuye progresivamente con la profundidad, que podría deberse a una menor exposición a fuentes externas y a la reducción de los procesos de transporte vertical [50]. No obstante, este patrón se ve afectado por diversos factores como la rotación de cultivos, la remoción del suelo y la textura, ya que la porosidad influye directamente en el movimiento y retención de partículas plásticas dentro del perfil del suelo [52].

En cuanto a las características morfológicas de los microplásticos encontrados, el color predominante en los tres niveles de profundidad fue el azul, lo cual contrasta con estudios previos [53], [40], [54], donde el color blanco fue identificado como el color más abundante. Esta discrepancia podría explicarse por los procesos de desgaste y decoloración que sufren los microplásticos con el tiempo debido a la fricción con partículas del suelo y la exposición al agua, lo que tiende a transformar los colores originales hacia tonos más claros.

Respecto a la forma predominante, los microplásticos identificados fueron principalmente del tipo fragmento, lo que coincide con lo reportado en estudios previos [50]. Sin

embargo, investigaciones adicionales han señalado que la forma más común en otros suelos agrícolas es la de película [51]. Esta variación puede estar relacionada con las diferencias en los procesos de degradación y las diversas fuentes de origen de los microplásticos [55]. Los fragmentos generalmente derivan de la fragmentación de objetos plásticos más grandes, como envases o utensilios, mientras que las películas generalmente provienen de plásticos delgados, como bolsas o envolturas. Estas diferencias reflejan la influencia de las condiciones ambientales y las actividades humanas locales en la morfología de los microplásticos presentes en el suelo.

En cuanto a la distribución del tamaño de los microplásticos, se identificó que en este estudio varió entre 0.45 μm a 2036 μm , lo que amplía los rangos reportados en investigaciones previas, en las que se han registrado microplásticos de 0.1 mm a 0.5 mm, o en intervalos de 50-100 μm y de 100-200 μm , dependiendo de los métodos utilizados, como el tamaño del tamiz y los filtros empleados [47], [56]. La mayor frecuencia de microplásticos correspondió al rango de 1-200 μm , en concordancia con estudios anteriores que también reportan una mayor concentración de partículas en los tamaños más pequeños. Este predominio podría estar asociado a procesos de fragmentación continua, que generan partículas de menor tamaño y facilitan su movilidad hacia capas más profundas del suelo, afectando su distribución vertical [22].

Asimismo, como se mencionó anteriormente, diversos estudios han evidenciado la presencia de microplásticos en tejidos vegetales comestibles, lo cual guarda una estrecha relación con el tamaño de las partículas [56]. Las partículas más pequeñas tienen mayor probabilidad de ser absorbidas por las raíces y translocadas dentro de la planta. Se ha reportado que las raíces de zanahoria presentan microplásticos de tamaños menores a 1000 μm [57], mientras que en lechuga se han encontrado partículas en raíces, tallos y hojas en un rango de 200 a 1000 μm [58]. En el caso del pepino, se han detectado microplásticos en tallos, hojas y en el sistema de transporte interno entre 100 y 700 μm [59]. En cultivos como el maíz, se han identificado partículas de hasta 3000 μm en las raíces [60], mientras que en el arroz se ha evidenciado la presencia de microplásticos tan pequeños como 20 μm en las raíces y en el espacio intracelular [61]. Estos hallazgos refuerzan la importancia de considerar el tamaño de las partículas en la evaluación del riesgo de incorporación de microplásticos en la cadena alimentaria.

IV. CONCLUSIONES

Esta investigación sobre la contaminación por microplásticos en suelos de la zona agrícola del distrito de Carabaylo evidencia que la concentración de microplásticos disminuye a niveles más profundos, lo que nos permite conocer la distribución vertical de los microplásticos y su contacto directo con las raíces de los cultivos, lo que podría facilitar su ingreso a la cadena alimenticia y poniendo en riesgo la salud pública. También se determinó las características morfológicas

con mayor frecuencia de los microplásticos, en donde, el color principal fue el azul, la forma más frecuente fue el fragmento y el rango de tamaño de microplásticos con mayor frecuencia fue de 1-200 μm . Sin embargo, estos resultados varían según las características fisicoquímicas del suelo ya que es un factor que afecta la distribución, acumulación y fragmentación de los microplásticos.

La presente investigación contribuye expandir el conocimiento sobre la presencia de microplásticos en los suelos agrícolas, la inadecuada gestión de residuos sólidos en esa zona agrícola y la potencial contaminación de los suelos y alimentos.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Con profunda estima y reconocimiento, agradecemos a nuestra asesora de tesis Anita Arrascue y a la directora de la carrera Mercedes Gómez. Su dedicación docente y guía han sido importantes para el enriquecimiento de nuestra investigación. Asimismo, expresamos nuestro agradecimiento al profesor Jimmy Jara, Daniel Prialé y a la profesora Valeria Paz por brindarnos su tiempo para usar el laboratorio, así como sus comentarios constructivos.

REFERENCIAS

- [1] V. Kumar M and M. Sheela A, "Effect of plastic film mulching on the distribution of plastic residues in agricultural fields," *Chemosphere*, vol. 273, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.128590.
- [2] A. Tursi *et al.*, "Microplastics in aquatic systems, a comprehensive review: origination, accumulation, impact, and removal technologies," Oct. 04, 2022, *Royal Society of Chemistry*. doi: 10.1039/d2ra04713f.
- [3] M. Gholizadeh *et al.*, "Exploring the microplastic pollution: Unveiling origins and varieties in coastal sediments and waters of the Bushehr Province, Persian Gulf, Iran," *Mar Pollut Bull*, vol. 198, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.marpolbul.2023.115939.
- [4] Plastics Europe, "Plastics – the fast Facts 2023," 2023. Accessed: Aug. 24, 2024. [Online]. Available: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2023/>
- [5] ONU, "Todo lo que necesitas saber sobre la contaminación por plásticos."
- [6] S. Singh, S. S, S. Sachdev, K. S. Sahoo, B. Ambade, and K. Bauddh, "Microplastic pollution in agricultural environments: Origins, impacts, and mitigation strategies," *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, vol. 138, p. 103866, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.PCE.2025.103866.
- [7] U. Mayor de San Andrés Bolivia Castañeta, "Microplásticos: Un contaminante que crece en todas las esferas ambientales, sus características y posibles riesgos para la salud pública por exposición," *Revista*

- Boliviana de Química*, vol. 37, no. 3, pp. 160–175, 2020, doi: 10.34098/2078-3949.37.3.4.
- [8] A. Rahman, A. Sarkar, O. P. Yadav, G. Achari, and J. Slobodnik, “Potential human health risks due to environmental exposure to nano- and microplastics and knowledge gaps: A scoping review,” *Science of The Total Environment*, vol. 757, p. 143872, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2020.143872.
- [9] M. Kushwaha *et al.*, “Microplastics pollution in the marine environment: A review of sources, impacts and mitigation,” *Mar Pollut Bull*, vol. 209, p. 117109, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.MARPOLBUL.2024.117109.
- [10] M. A. Browne, A. J. Underwood, M. G. Chapman, R. Williams, R. C. Thompson, and J. A. van Franeker, “Linking effects of anthropogenic debris to ecological impacts,” *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, vol. 282, no. 1807, p. 20142929, May 2015, doi: 10.1098/rspb.2014.2929.
- [11] United Nations Environment Programme, “Microplastics: The long legacy left behind by plastic pollution.”
- [12] J. Y. Uwamungu *et al.*, “Microplastic contamination in soil agro-ecosystems: A review,” *Environmental Advances*, vol. 9, p. 100273, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.ENVADV.2022.100273.
- [13] M. U. Ali *et al.*, “Environmental emission, fate and transformation of microplastics in biotic and abiotic compartments: Global status, recent advances and future perspectives,” *Science of The Total Environment*, vol. 791, p. 148422, Oct. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.148422.
- [14] M. Cui, S. Yu, Y. Yu, X. Chen, and J. Li, “Responses of cherry radish to different types of microplastics in the presence of oxytetracycline,” *Plant Physiology and Biochemistry*, vol. 191, pp. 1–9, Nov. 2022, doi: 10.1016/J.PLAPHY.2022.09.012.
- [15] M. M. Hasan and M. N. Tarannum, “Adverse impacts of microplastics on soil physicochemical properties and crop health in agricultural systems,” *Journal of Hazardous Materials Advances*, vol. 17, p. 100528, Feb. 2025, doi: 10.1016/J.HAZADV.2024.100528.
- [16] L. Fu, J. Li, G. Wang, Y. Luan, and W. Dai, “Adsorption behavior of organic pollutants on microplastics,” *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 217, p. 112207, Jul. 2021, doi: 10.1016/J.ECOENV.2021.112207.
- [17] E. L. Ng *et al.*, “An overview of microplastic and nanoplastic pollution in agroecosystems,” *Science of The Total Environment*, vol. 627, pp. 1377–1388, Jun. 2018, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2018.01.341.
- [18] M. Xiao *et al.*, “Microplastics shape microbial communities affecting soil organic matter decomposition in paddy soil,” *J Hazard Mater*, vol. 431, p. 128589, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2022.128589.
- [19] E. Brown, A. MacDonald, S. Allen, and D. Allen, “The potential for a plastic recycling facility to release microplastic pollution and possible filtration remediation effectiveness,” *Journal of Hazardous Materials Advances*, vol. 10, p. 100309, May 2023, doi: 10.1016/J.HAZADV.2023.100309.
- [20] I. Colzi *et al.*, “Impact of microplastics on growth, photosynthesis and essential elements in Cucurbita pepo L,” *J Hazard Mater*, vol. 423, p. 127238, 2022, doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.127238.
- [21] A. Cramer, P. Benard, M. Zarebanadkouki, A. Kaestner, and A. Carminati, “Microplastic induces soil water repellency and limits capillary flow,” *Vadose Zone Journal*, vol. 22, no. 1, p. e20215, Jan. 2023, doi: 10.1002/VZJ2.20215.
- [22] L. Y. Chen *et al.*, “Status, characteristics, and ecological risks of microplastics in farmland surface soils cultivated with different crops across mainland China,” *Science of The Total Environment*, vol. 897, p. 165331, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.165331.
- [23] M. Jin, X. Wang, T. Ren, J. Wang, and J. Shan, “Microplastics contamination in food and beverages: Direct exposure to humans,” *J Food Sci*, vol. 86, no. 7, pp. 2816–2837, Jul. 2021, doi: 10.1111/1750-3841.15802.
- [24] United Nations Environment Programme, “Microplastics: The long legacy left behind by plastic pollution.”
- [25] C. Campanale, C. Massarelli, I. Savino, V. Locaputo, and V. F. Uricchio, “A Detailed Review Study on Potential Effects of Microplastics and Additives of Concern on Human Health,” *Int J Environ Res Public Health*, vol. 17, no. 4, Feb. 2020, doi: 10.3390/IJERPH17041212.
- [26] A. Farbiarz, “EEUU, Canadá, el Reino Unido, Francia, Suecia: países que prohíben los microplásticos en los cosméticos,” *Revista Técnica de Medio Ambiente*.
- [27] MINAM, “Consumo de bolsas de plástico en el país se redujo en más de mil millones de unidades - Noticias - Ministerio del Ambiente - Plataforma del Estado Peruano.” Accessed: May 31, 2024. [Online]. Available: <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/70995-consumo-de-bolsas-de-plastico-en-el-pais-se-redujo-en-mas-de-mil-millones-de-unidades>
- [28] MINAM, “Cifras del mundo y el Perú | Menos Plástico Más Vida,” 2017. Accessed: Aug. 31, 2024. [Online]. Available: <https://www.minam.gob.pe/menos-plastico-mas-vida/cifras-del-mundo-y-el-peru/>
- [29] G. E. De-la-Torre, D. C. Dioses-Salinas, B. Licinio Pérez-Baca, and L. Santillán, “Microplastic abundance in three commercial fish from the coast of Lima, Peru,” *Brazilian Journal of Natural Sciences*, vol. 2, no. 3, pp. 171–171, Sep. 2019, doi: 10.31415/BJNS.V2I3.67.

- [30] L. L. Sánchez Contreras, A. L. Huamán Quispe, and O. J. Ángeles Mendiola, "Micro plástico: una amenaza imperceptible en la Playa Agua Dulce, distrito de Chorrillos," *Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas*, vol. 25, no. 49, pp. 303–311, Jun. 2022, doi: 10.15381/iigeo.v25i49.19219.
- [31] Municipalidad Distrital de Carabayllo, "Plan Distrital de Manejo de Residuos Sólidos Municipales 2022-2026."
- [32] Instituto Tecnológico de la Producción, "Carabayllo Distrito, Provincia de Lima, Departamento de Lima."
- [33] Velásquez Hector, "Bioferia Agroecologica municipal de Carabayllo con los productores ecológicos del valle Chillón," Red de acción en agricultura alternativa.
- [34] Equipo Red Agrícola, "La conquista de las hortalizas en el mercado local," Red agrícola.
- [35] Municipalidad de Carabayllo, "Desarrollo Económico Local y Turismo."
- [36] MINAM, "Guía para el Muestreo de Suelos."
- [37] T. W. Crutchett and K. R. Bornt, "A simple overflow density separation method that recovers >95% of dense microplastics from sediment," *MethodsX*, vol. 12, p. 102638, Jun. 2024, doi: 10.1016/J.MEX.2024.102638.
- [38] E. Fries, J. H. Dekiff, J. Willmeyer, M. T. Nuelle, M. Ebert, and D. Remy, "Identification of polymer types and additives in marine microplastic particles using pyrolysis-GC/MS and scanning electron microscopy," *Environmental Sciences: Processes and Impacts*, vol. 15, no. 10, pp. 1949–1956, Oct. 2013, doi: 10.1039/C3EM00214D.
- [39] Y. Wang *et al.*, "A case on source to soil to solutions: Distribution characteristics of microplastics in farmland soil of the largest vegetable base in Northwest China," *Science of The Total Environment*, vol. 907, p. 167910, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.167910.
- [40] L. Cao *et al.*, "Occurrence, distribution and affecting factors of microplastics in agricultural soils along the lower reaches of Yangtze River, China," *Science of The Total Environment*, vol. 794, p. 148694, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.148694.
- [41] M. Kumar *et al.*, "Microplastics as pollutants in agricultural soils," 2020, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114980.
- [42] M. A. Khan *et al.*, "Abundance, spatial distribution, and characteristics of microplastics in agricultural soils and their relationship with contributing factors," *J Environ Manage*, vol. 328, p. 117006, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2022.117006.
- [43] S. Wang *et al.*, "Occurrence of macroplastic debris in the long-term plastic film-mulched agricultural soil: A case study of Northwest China," *Science of The Total Environment*, vol. 831, p. 154881, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2022.154881.
- [44] Y. Zhou, X. Liu, and J. Wang, "Characterization of microplastics and the association of heavy metals with microplastics in suburban soil of central China," *Science of The Total Environment*, vol. 694, p. 133798, Dec. 2019, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2019.133798.
- [45] S. K. Kim, J. S. Kim, H. Lee, and H. J. Lee, "Abundance and characteristics of microplastics in soils with different agricultural practices: Importance of sources with internal origin and environmental fate," *J Hazard Mater*, vol. 403, p. 123997, Feb. 2021, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2020.123997.
- [46] J. li Li, N. ying Li, J. Ni, R. lin Wan, and J. yan Yang, "Effects of microplastics on soil physicochemical properties and vertical migration and transformation of chromium," *J Environ Chem Eng*, vol. 12, no. 6, p. 114577, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.JECE.2024.114577.
- [47] X. Yang, Z. Zhang, and X. Guo, "Impact of soil structure and texture on occurrence of microplastics in agricultural soils of karst areas," *Science of The Total Environment*, vol. 902, p. 166189, Dec. 2023, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.166189.
- [48] S. Jannesarahmadi, M. Aminzadeh, R. Raga, and N. Shokri, "Effects of microplastics on evaporation dynamics in porous media," *Chemosphere*, vol. 311, p. 137023, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.137023.
- [49] M. A. Khan *et al.*, "Abundance, spatial distribution, and characteristics of microplastics in agricultural soils and their relationship with contributing factors," *J Environ Manage*, vol. 328, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.jenvman.2022.117006.
- [50] S. Guo *et al.*, "Organic fertilizer and irrigation water are the primary sources of microplastics in the facility soil, Beijing," 2023, doi: 10.1016/j.scitotenv.2023.165005.
- [51] I. K. Harms, T. Diekötter, S. Troegel, and M. Lenz, "Amount, distribution and composition of large microplastics in typical agricultural soils in Northern Germany," *Science of the Total Environment*, vol. 758, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143615.
- [52] R. Qi, D. L. Jones, Z. Li, Q. Liu, and C. Yan, "Behavior of microplastics and plastic film residues in the soil environment: A critical review," *Science of The Total Environment*, vol. 703, p. 134722, Feb. 2020, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2019.134722.
- [53] M. Mondol, P. B. Angon, and A. Roy, "Effects of microplastics on soil physical, chemical and biological properties," *Natural Hazards Research*, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.NHRES.2024.02.002.
- [54] M. M. Ghorbaninejad Fard Shirazi, S. Shekoohiyan, G. Moussavi, and M. Heidari, "Microplastics and mesoplastics as emerging contaminants in Tehran landfill soils: The distribution and induced-ecological risk," *Environmental Pollution*, vol. 324, p. 121368, May 2023, doi: 10.1016/J.ENVPOL.2023.121368.

- [55] J. Pinto Da Costa, T. Rocha-Santos, and A. Duarte, *The environmental impacts of plastics and micro-plastics use, waste and pollution: EU and national measures*. Europe, 2020.
- [56] Z. Yuan, R. Nag, and E. Cummins, “Human exposure to micro/nano-plastics through vegetables, fruits, and grains – A predictive modelling approach,” *J Hazard Mater*, vol. 480, p. 135900, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2024.135900.
- [57] Y. Dong, M. Gao, W. Qiu, and Z. Song, “Uptake of microplastics by carrots in presence of As (III): Combined toxic effects,” *J Hazard Mater*, vol. 411, p. 125055, Jun. 2021, doi: 10.1016/J.JHAZMAT.2021.125055.
- [58] L. Li, Q. Zhou, N. Yin, C. Tu, and Y. Luo, “Uptake and accumulation of microplastics in an edible plant,” *Chinese Science Bulletin*, vol. 64, no. 9, pp. 928–934, Mar. 2019, doi: 10.1360/N972018-00845.
- [59] Z. Li, Q. Li, R. Li, J. Zhou, and G. Wang, “The distribution and impact of polystyrene nanoplastics on cucumber plants,” *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 13, pp. 16042–16053, Apr. 2021, doi: 10.1007/s11356-020-11702-2.
- [60] M. A. Urbina, F. Correa, F. Aburto, and J. P. Ferrio, “Adsorption of polyethylene microbeads and physiological effects on hydroponic maize,” *Science of The Total Environment*, vol. 741, p. 140216, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.140216.
- [61] B. Zhou *et al.*, “Microplastics in agricultural soils on the coastal plain of Hangzhou Bay, east China: Multiple sources other than plastic mulching film,” *J Hazard Mater*, vol. 388, p. 121814, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.jhazmat.2019.121814.