

Application of Biochar for the Reduction of the Effects Generated by Microplastics in Agricultural Soils: Case Study in Carabayllo, Lima

Holguin Timoteo, Alexandra¹ ; Falcón Cerna, Jesús Gustavo² ; Ruiz-Huaman, Carmen Milagros³ 

¹Peruvian University of Applied Sciences, Peru, u20201f294@upc.edu.pe

²Peruvian University of Applied Sciences, Peru, u20211b262@upc.edu.pe

³Peruvian University of Applied Sciences, Peru, pcigcrui@upc.edu.pe

Abstract– Microplastic contamination in agricultural soils represents an emerging threat to soil productivity and quality. In the Carabayllo district, where agriculture supplies 45% of the horticultural production for Lima, the accumulation of microplastics in the soil is a source of environmental concern. This study evaluated the effectiveness of biochar in reducing the negative effects induced by microplastics in agricultural soil in the Chocas Bajo sector of Carabayllo. The design of the investigation was quantitative exploratory-correlational with soil sampling at nine points to quantify microplastics through digestion with H₂O₂ and separation by density with NaCl. Subsequently, biochar doses of 0%, 1%, 2%, and 5% of the soil weight were applied in a pot experiment. The analysis focused on the soil's chemical properties (pH and electrical conductivity) and growth variables of the selected crop (shoot length, root length, and fresh biomass) as indicators. The results showed an average concentration of 95.9 ± 57.1 microplastic particles per kilogram in the soil. Application of biochar regulated the pH towards neutral values and showed a significant positive correlation with electrical conductivity and with growth variables, with the 2% dose standing out for its best performance.

Keywords– microplastics, biochar, pH, electrical conductivity, fresh biomass.

Aplicación de Biocarbón para la Reducción de los Efectos Generados por Microplásticos en Suelos Agrícolas: Estudio de Caso en Carabayllo, Lima

Holguin Timoteo, Alexandra¹; Falcón Cerna, Jesús Gustavo²; Ruiz-Huaman, Carmen Milagros³

¹Peruvian University of Applied Sciences, Peru, u20201f294@upc.edu.pe

²Peruvian University of Applied Sciences, Peru, u20211b262@upc.edu.pe

³Peruvian University of Applied Sciences, Peru, pcigcrui@upc.edu.pe

Resumen— La contaminación por microplásticos en suelos agrícolas representa una amenaza emergente para la productividad y calidad del suelo. En el distrito de Carabayllo, donde la agricultura abastece en 45% respecto a la producción hortícola de Lima, la acumulación de microplásticos en el suelo es motivo de preocupación ambiental. Este estudio evaluó la efectividad del biocarbón en la reducción de los efectos negativos inducidos por microplásticos en un suelo agrícola del sector Chocas Bajo, Carabayllo. El diseño de la investigación fue cuantitativo exploratorio-correlacional, con muestreo de suelo en nueve puntos para cuantificar microplásticos mediante digestión con H₂O₂ y separación por densidad con NaCl. Posteriormente, se aplicaron dosis de biocarbón del 0%, 1%, 2% y 5% respecto al peso del suelo en un experimento con macetas. El análisis se centró en las propiedades químicas del suelo (pH y conductividad eléctrica) y las variables de crecimiento del cultivo seleccionado (longitud del tallo, longitud de la raíz y biomasa fresca) como indicadores. Los resultados mostraron una concentración promedio de 95.9 ± 57.1 partículas de microplásticos por kilogramo de suelo. La aplicación de biocarbón reguló el pH hacia valores neutros y mostró una correlación positiva significativa con la conductividad eléctrica y las variables de crecimiento, destacando la dosis del 2% por su mejor desempeño.

Palabras clave— microplásticos, biocarbón, pH, conductividad eléctrica, biomasa fresca.

I. INTRODUCCIÓN

La creciente acumulación de residuos plásticos y su consecuente fragmentación en microplásticos representa un problema ambiental de escala global. Entre 2016 y 2020, se han acumulado aproximadamente 710 millones de toneladas de plásticos en ecosistemas terrestres y marinos [1], mientras que para el año 2060, se proyecta una estimación global de microplásticos de 6 millones de toneladas [2]. En relación con lo mencionado, la evidencia cuantitativa revela concentraciones significativas en suelos agrícolas, con promedios que varían desde 2383-3815 partículas de microplásticos por metro cuadrado de suelo en Argentina hasta 21300 partículas por kilogramo de suelo en Bangladesh [3],[4]. Esta contaminación se agrava ante la falta de normativas que definan límites permisibles de microplásticos en suelo, agua o aire.

La presencia de microplásticos, definidos como partículas derivadas de la fragmentación de materia plástica con tamaños entre 1 y 5000000 nanómetros [5], influye en las propiedades

fisicoquímicas de los suelos agrícolas. Diversos estudios indican que estos contaminantes emergentes alteran propiedades como el pH y la conductividad eléctrica (CE). En particular, se señala que su presencia influye, de manera tenue, en el pH del suelo debido a su composición química. Ello podría incrementar o disminuir de acuerdo con el tipo de microplástico predominante en el suelo [6], mientras que, en cuanto a la CE, se menciona que estos contaminantes alteran la actividad iónica y, en consecuencia, se afecta dicha propiedad [7]. De acuerdo con las referencias [8] y [9], los microplásticos que se encuentren presentes en suelo agrícola podrían movilizarse hacia partes internas de un cultivo. La translocación de microplásticos en plantas ocurre mediante rutas apoplásticas y simplásticas, facilitando su movilidad desde la raíz hacia los tejidos aéreos. Se reporta una acumulación preferencial en hojas por efecto del gradiente transpiratorio, lo que intensifica procesos de estrés oxidativo. Por su parte, la entrada radicular se produce a través de fisuras en la zona de emergencia de raíces laterales, seguida por un transporte apoplástico hacia el xilema, donde el flujo transpiratorio dirige las partículas hacia tallos y hojas. Las referencias mencionadas coinciden en que esta movilidad no es solo un proceso físico, sino que induce alteraciones fisiológicas, incluyendo desbalances nutricionales, inhibición del crecimiento y potencial bioacumulación en frutos comestibles, con riesgos asociados para la salud humana.

La relevancia de estas propiedades es crítica en suelos agrícolas: la referencia [10] indica que el pH óptimo se sitúa en torno a 6.5 y su alteración modifica la disponibilidad de nutrientes; la CE ideal se encuentra entre 1 y 4 decisiemens por metro, siendo que niveles superiores podrían interpretarse como una dificultad en la absorción de agua por las raíces, mientras que, valores menores podrían indicar una menor actividad iónica y, por lo tanto, una menor disponibilidad de nutrientes, de acuerdo con esta última referencia.

El uso de biocarbón, un material carbonoso obtenido por pirólisis de biomasa orgánica en condiciones controladas [11], se plantea como una solución para contrarrestar posibles alteraciones de las propiedades mencionadas causadas por la presencia de microplásticos. Diversas investigaciones demuestran que este producto posee una capacidad significativa para retener microplásticos debido a su

composición superficial, la cual presenta grupos funcionales, y a su característica de adsorción [12],[13],[14]. Este mecanismo involucra una variedad de interacciones a nivel molecular, como enlaces de hidrógeno, interacciones electrostáticas e hidrofóbicas y la captación en su superficie estructural a través de la difusión en sus poros, en los cuales se retiene a los microplásticos [15],[16]. La adsorción de estos contaminantes causa su inmovilización, lo que reduce su influencia en el suelo y, por ende, en el crecimiento de cultivos. El biocarbón contribuye al crecimiento vegetal a través de mecanismos biológicos. La estructura superficial porosa funciona como un microecosistema que favorece la colonización y actividad de microorganismos benéficos, incluidos fijadores de nitrógeno, solubilizadores de fósforo y productores de fitohormonas [17],[18]. Este producto altera la estructura y textura del suelo, incrementando la porosidad y reduciendo la compactación. Esto facilita la expansión del sistema radicular, optimiza la exploración del perfil edáfico y mejora la eficiencia en la captación de agua y nutrientes [19].

Los resultados de la referencia [13] evidenciaron una retención efectiva de microplásticos mayor a 86% con un máximo de 92.4% mediante la aplicación de dosis de biocarbón en condiciones de laboratorio, incluso con valores de pH extremos de 3 y 9 y tras siete ciclos de uso. Se han estimado resultados diferenciados de adsorción por tipo de microplástico, siendo en miligramos de partícula por gramo de suelo, 199.6 para poliestireno, 205.52 para polietileno y 131.37 para polimetil metacrilato [14] y, en otra investigación, se incrementó la adsorción de microplásticos hasta un 90 % tras un proceso de oxidación ácida al biocarbón [12]. En cuanto al pH, los resultados de la referencia [20] señalaron que, tras una reducción de esta propiedad en 2.1% en promedio debido a la presencia de estos contaminantes, el biocarbón logró incrementarlo entre 1% y 2.5%. La evidencia experimental indica que el biocarbón atenúa las alteraciones morfológicas inducidas por microplásticos en cultivos. Se reportó que la presencia de microplásticos de poliestireno redujo la altura vegetal entre 3.5% y 14.4% respecto al control; sin embargo, tras la incorporación de biocarbón, se incrementó entre 3.5% y 21.6%. La biomasa presentó un aumento entre 5.5% y 7.4% con la combinación de microplásticos y biocarbón, evidenciando una recuperación del crecimiento. En el sistema radicular, la inhibición temprana causada por microplásticos se atenúa con biocarbón, alcanzando longitudes aproximadamente 2.5% mayores [21]. Resultados similares indicaron un incremento de hasta 22% en la altura del tallo cuando se enmienda biocarbón en suelos contaminados con microplásticos [22].

Dada su disponibilidad en el mercado peruano, se empleó un biocarbón comercial derivado de biomasa vegetal, específicamente residuos agrícolas y forestales recolectados y procesados por una empresa dedicada al rubro en Lima. Su procedencia comercial garantiza condiciones estandarizadas de producción trazabilidad respecto a la fuente de biomasa empleada. Se seleccionó al distrito de Carabayllo por su relevancia agroproductiva, siendo que contribuye con más del

45% a la producción hortícola en Lima Metropolitana [23]. Por otro lado, este presentó una generación significativa de residuos plásticos: 18430 toneladas en 2023, posicionándolo como el séptimo distrito con mayor generación de Lima Metropolitana [24]. Alrededor de 2196.57 toneladas por año de residuos no fueron gestionados adecuadamente, lo que sugiere un posible vertido inadecuado [25]. El presente estudio busca aportar a la base investigativa correspondiente al desarrollo de estrategias para la mitigación de los efectos generados por los microplásticos en suelos agrícolas. Se evaluó la efectividad del biocarbón para lograr ello en un suelo agrícola. Se calculó la concentración promedio de microplásticos en el área con potencial contaminación para demostrar su presencia y se comparó la influencia de distintas dosis de biocarbón en las propiedades de pH, CE y variables de crecimiento de cultivo, usando *Raphanus sativus*, en un ensayo experimental con macetas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Zona de estudio

El estudio se desarrolló en un área de cultivo correspondiente al sector de Chocas Bajo en Carabayllo en la provincia de Lima Metropolitana. Este sector es parte de la zona agrícola 3 de Carabayllo, la cual cuenta con 90 agricultores y se ubica a la altura del kilómetro 34 de la carretera Lima-Canta [23]. Previo al muestreo, se visitó la zona y se observó residuos plásticos como bolsas y botellas en los límites e interior de la parcela agrícola. Otro aspecto que se consideró fue la cercanía con la carretera Lima-Canta y un centro recreacional.

B. Muestreo

Se siguió la metodología de la Guía para el Muestreo de Suelos del Ministerio del Ambiente [26], considerando un muestreo aleatorio simple, en el que todas las subáreas delimitadas correspondientes a la parcela agrícola tuvieron la misma probabilidad de ser seleccionadas como muestra, siendo su extensión de 0.93 hectáreas, la cual conforma la totalidad de las subáreas. Se delimitó la cantidad de subáreas que podían ser consideradas como parte de la muestra mediante la superposición de una rejilla regular sobre la parcela agrícola usando Google Earth. A cada subárea se le asignó una combinación de números de la forma “(x, y)”, siguiendo el patrón de un plano cartesiano formado por la rejilla regular. Como se observa en la Fig. 1, se obtuvieron 46 subáreas, siendo cada una de 202 metros cuadrados aproximadamente. El tamaño de muestra se estimó mediante la prueba para una proporción en Minitab, el cual tuvo como resultado un tamaño de 153. Este es el primer paso para calcular el tamaño real, el cual se obtuvo mediante la corrección para población finita, dado que la población real está conformada por 46 subáreas. El cálculo ajustado resultó en un tamaño de muestra de 36 subáreas, las cuáles serán aleatorizadas mediante el software Minitab para la posterior selección.



Fig. 1 Vista de subáreas delimitadas en la parcela agrícola.

Para obtener las muestras, se utilizaron los siguientes materiales: 1 espátula de acero inoxidable, 36 frascos de muestreo para suelo, 1 balanza y agua destilada.

C. Determinación de la cantidad de microplásticos

La cuantificación inicial de microplásticos en el suelo es fundamental para establecer la línea base de contaminación y evidenciar su presencia en el área de estudio. Con este antecedente, la investigación se orientó a evaluar los cambios inducidos por el biocarbón en las propiedades químicas del suelo (pH y conductividad eléctrica) y en el crecimiento de *R. sativus*, como indicadores de la reducción de los efectos negativos asociados a la contaminación por microplásticos.

El procedimiento inició con un tamizado de 5 milímetros para su homogeneización [27], ello con la finalidad de filtrar microplásticos de este tamaño como máximo, de acuerdo con el rango considerado. Seguido de ello, se pesó 100 gramos en un vaso de precipitados para la etapa de digestión de materia orgánica, usando 50 mililitros de H_2O_2 al 30% [28],[29]. Se mantuvo a 50 °Celsius y se agitó a 100 revoluciones por minuto hasta que el líquido se evapora [30]. De acuerdo con la última referencia, el uso del reactivo seleccionado para este proceso resulta más efectivo al registrar aproximadamente 93% de eliminación de materia orgánica en suelos con alto contenido de ésta y, por ende, una mayor recuperación de microplásticos. Posterior a ello, se realizó la separación por densidad usando 200 mililitros de NaCl saturado que se ha seleccionado por su predominancia de uso en investigaciones similares y su eficiencia en la separación del sobrenadante [31],[32]. Luego, las soluciones se agitaron por 5 minutos a 4000 revoluciones por minuto en la centrifugadora [33],[34]. Finalmente, se filtró al vacío, a través de filtros de 0.43 micrómetros, los cuales se colocaron en placas Petri tras el proceso y se sometieron a secado en estufa. Al obtener los filtros secos, se observaron estos contaminantes mediante microscopio, usando luz ultravioleta para la distinción de estos [35].

De manera similar que el procedimiento en suelos, se realizó la identificación de microplásticos en las hojas y raíces

del cultivo seleccionado en el ensayo experimental por cada nivel propuesto. Se pesó 1 gramo de raíz y 1 gramo de hoja para ser sometidos a digestión orgánica, filtrado al vacío y posterior secado del filtro [36]. Se utilizó 20 mililitros de H_2O_2 al 30% a una temperatura de 60 °Celsius y 500 revoluciones por minuto para cada tratamiento, realizándose dos procesos de digestión orgánica de forma continua para mayor eficiencia [37]. La solución obtenida es sometida a filtrado al vacío y el filtro es secado para su posterior observación en el microscopio con luz ultravioleta.

D. Diseño experimental

El diseño es completamente al azar con tres repeticiones por tratamiento, cuya asignación fue aleatoria y se garantizó la homogeneidad de condiciones [38]. Se realizó una manipulación controlada de las dosis de biocarbón (control, 1%, 2% y 5% respecto al peso del suelo), sustentando en las cantidades utilizadas por las referencias [20] y [21] y se midieron variables dependientes relacionadas con las propiedades del suelo: pH y conductividad eléctrica, y el crecimiento de *R. sativus*: altura de tallo, longitud de raíz y biomasa fresca. Se obtuvo una muestra compuesta de 3.6 kilogramos según la referencia [26], para su distribución equitativa en cada una de las macetas que se utilizaron por repetición.

Se ejecutó una prueba piloto para estimar desviaciones estándar y diferencias máximas de medias por cada variable, lo que permitió determinar el número de réplicas mediante Minitab. Los cálculos indicaron 2 réplicas para pH, longitud de raíz y brote, y 3 para conductividad eléctrica. Sin embargo, se uniformizó el diseño a 3 réplicas por variable. Cada maceta recibió 300 gramos del suelo contaminado con microplásticos y uno de los cuatro tratamientos establecidos. Se sembró tres semillas de *R. sativus* por maceta a 1.5 centímetros de profundidad, aplicándose, posteriormente, raleo para conservar una plántula dominante [39]. Tras la incorporación del biocarbón, el suelo se ajustó al 60% de su capacidad de retención de agua y se mantuvo un riego interdiario durante todo el periodo experimental [40]. Las mediciones de las variables definidas se realizaron a los 35 días.

E. Medición de propiedades del suelo y variables de crecimiento del cultivo seleccionado

En cuanto al pH, la metodología se basó en la norma ISO 10390:2005, utilizando un potenciómetro calibrado y una mezcla de 20 gramos de suelo con 20 mililitros de agua destilada, agitada y reposada antes de la medición [41]. Para la conductividad eléctrica, la metodología siguió la norma ISO 11265:1994, mezclando 20 gramos de suelo con 100 mililitros de agua destilada, agitados por 30 minutos y posteriormente filtrado para medición con un conductímetro.

Finalmente, tanto la altura del tallo como la longitud de raíz fueron medidas usando el instrumento Vernier para el aseguramiento de una mayor precisión y la biomasa fresca se midió usando una balanza digital para estimar su peso.

D. Análisis estadístico

El tamaño de muestra se determinó mediante una prueba de proporciones en Minitab, utilizando un poder estadístico de 0.8, un valor de comparación de 0.6 y un valor hipotetizado de 0.5. Para la obtención de la concentración promedio de microplásticos en el suelo se consideraron las muestras seleccionadas, la desviación estándar y el intervalo de confianza al 95%.

En cuanto al diseño experimental, se consideró la prueba de normalidad Anderson-Darling sobre los residuos de cada variable. Si los datos cumplieron con los supuestos de normalidad, homocedasticidad e independencia, se procedió a realizar el Análisis de Varianza (ANOVA) de un factor para evaluar las diferencias entre las dosis de biocarbón; en caso contrario, se utilizó la prueba de Kruskal-Wallis. Si se identificaron diferencias significativas ($p < 0.05$), se ejecutaron comparaciones post-hoc mediante Tukey HSD para ANOVA o test de Bonferroni para Kruskal-Wallis. Se evaluó la relación entre las variables de respuesta y las dosis aplicadas mediante correlación lineal. Para ello, se consideró una prueba de normalidad de Anderson-Darling para los datos medidos de cada variable, se empleó la correlación de Pearson para distribuciones normales o Spearman para distribuciones no normales. Todos los análisis se desarrollaron con un nivel de significancia de 0.05 y utilizando el software Minitab para cálculos y generación de gráficos.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La concentración media de microplásticos en el suelo agrícola fue de 95.9 ± 57.1 partículas por kilogramo, con un intervalo de confianza al 95% entre 73.4 y 118.5 partículas por kilogramo. De igual manera, se verificó la presencia de microplásticos en raíces y hojas en todos los tratamientos, lo que confirma su translocación interna. Las evidencias fotográficas mostraron microplásticos predominantemente filamentosos con variabilidad dimensional, corroborando su movilidad dentro del sistema suelo-planta, como se observa en la Fig. 2. Esta variabilidad constituye la base para interpretar los efectos posteriores de la aplicación de biocarbón.



Fig. 2 Presencia de microplásticos en el cultivo de *R. sativus*.

La incorporación de biocarbón modificó las propiedades químicas del suelo contaminado con microplásticos. En la Fig.

3, se observa la dispersión y medias de los datos por cada variable de estudio respecto a la dosis de biocarbón utilizada. Se obtuvieron las medias más altas en cuanto al pH en los tratamientos del 1% y 5% de biocarbón respecto al peso del suelo, sin diferencias significativas frente al tratamiento al 2% ni al control. Estos resultados concuerdan con la tendencia reportada por la referencia [22], en el que se observaron incrementos ligeros de pH en suelos contaminados con microplásticos tras la aplicación de biocarbón debido a su naturaleza alcalina y la liberación de iones base. De igual forma, los resultados de la referencia [42] demostraron que los microplásticos pueden reducir el pH por la liberación de compuestos ácidos durante su degradación. Tras la aplicación de biocarbón, se registraron valores promedio cercanos a 7.8, inferiores a los registrados por la referencia [43], los cuales fueron de 8.2 a 8.4, en promedio, al aplicar dosis más altas de biocarbón, resultado que los autores atribuyen al contenido de carbonato de calcio del suelo [44].

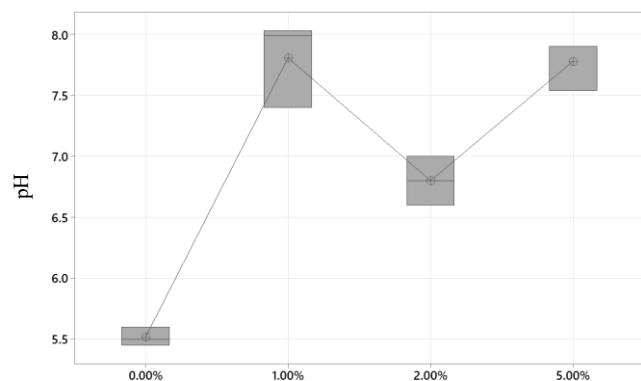
En cuanto a los promedios de la conductividad eléctrica, el tratamiento con 5% de biocarbón alcanzó 440.63 microsiemens por centímetro frente a 95.93 microsiemens por centímetro del control, evidenciando un incremento dependiente de la dosis. Esto se sostuvo con la correlación lineal obtenida, siendo el coeficiente de 0.799, lo que confirma esta tendencia, respaldada teóricamente por la capacidad del biocarbón para liberar cationes básicos y aumentar la disponibilidad iónica del suelo [45]. Estos resultados contrastan con los de la referencia [43], cuyos resultados evidenciaron variaciones mínimas en la conductividad eléctrica debido a la baja solubilidad del biocarbón y a la posible interacción con microplásticos que limitan la movilidad de sales. Del mismo modo, en la referencia [46], no se observó cambios significativos en la conductividad eléctrica en suelos contaminados, lo que se atribuyó a las características intrínsecas del tipo de biocarbón. Se reconoce que los microplásticos presentan una alta capacidad de adsorción de iones metálicos, lo cual puede elevar la conductividad eléctrica, aunque la interacción con el biocarbón limita el intercambio de sales solubles por la adsorción de iones en su superficie [43]. Las discrepancias con la literatura pueden atribuirse al tiempo reducido de experimentación y a la textura del suelo, que favorece respuestas más notorias en suelos de textura gruesa.

El biocarbón también influyó en las variables de crecimiento de *R. sativus*, demostrando correlación lineal positiva. La longitud de raíz alcanzó su mayor valor promedio con 2% de biocarbón, siendo de 204.52 milímetros, con diferencias significativas respecto al tratamiento con 1% y al control. La longitud del brote fue mayor en los tratamientos del 2% y 5% de biocarbón, lo que sugiere un efecto dependiente de la dosis, aunque ambos tratamientos no mostraron diferencias entre sí. El promedio de la biomasa fresca se incrementó desde 1.31 gramos en el control hasta 8.58 gramos con 5% de biocarbón. Las correlaciones para la longitud del brote, raíz y biomasa fresca fueron de 0.799, 0.691 y 0.972, respectivamente. Esto confirma la relación directa entre estas variables y la dosis

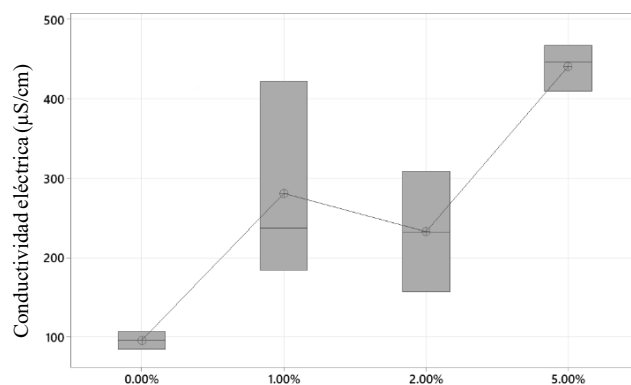
aplicada de biocarbón. En la Fig. 4 se observa la prueba de correlación entre las dosis de biocarbón y las variables mencionadas.

Los valores más bajos obtenidos en el control en todas las variables evaluadas evidencian el efecto negativo de los microplásticos sobre el sistema suelo-planta. Se reportaron reducciones en altura y biomasa en cultivos de *Zea mays*, *Glycine max* y *Arachis hypogaea*, relacionado con inhibición de la actividad enzimática y disminución del contenido de clorofila y azúcares solubles ante la presencia de fibras microplásticas [42],[47]. Se reconoce que las raíces son particularmente susceptibles ante los efectos de microplásticos debido a la adhesión de estos en la rizosfera, lo que puede obstaculizar la absorción de agua [17]. En contraste, en la referencia [48], se documentaron resultados de incremento en la altura de *Glycine max* expuesta a microplásticos derivados de películas agrícolas biodegradables y de polietileno, lo cual se atribuye a la concentración menor de estos en el suelo, siendo de 1%, por lo que los efectos sobre el cultivo no resultaron significativos.

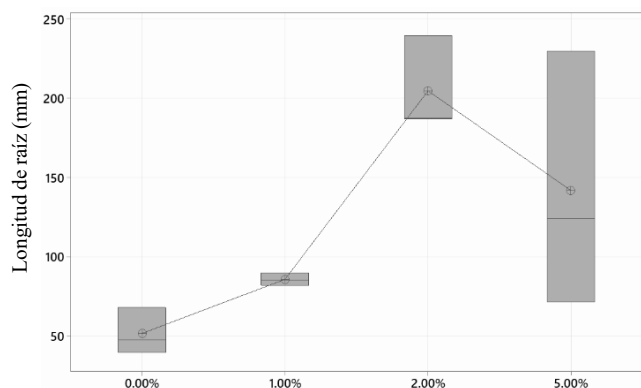
Los resultados confirmaron que el biocarbón favorece tanto al cultivo como al suelo en un entorno contaminado con microplásticos. Esto se sustenta con la mejora de la retención de nutrientes, estimulación de la mineralización de la materia orgánica y promoción del crecimiento radicular reportados en la literatura [49]. En la referencia [42], se destaca que el biocarbón incrementa la retención de agua en suelos contaminados con microplásticos y eleva el contenido de clorofila, lo que es consistente con lo revisado. Se establece una relación entre la presencia de microplásticos en el suelo agrícola y alteraciones fisicoquímicas y biológicas observadas en el sistema suelo- planta, así como la capacidad del biocarbón para modular dichos efectos. La evidencia experimental demostró que las variaciones en pH, conductividad eléctrica y crecimiento del cultivo responden tanto a la contaminación inicial como a la intervención mediante biocarbón, lo que confirma la interacción simultánea de procesos edáficos, fisiológicos y de inmovilización del contaminante. Estos hallazgos contribuyen a la base argumentativa necesaria para sustentar el desempeño del biocarbón en un contexto de contaminación emergente y conducen a plantear implicancias técnicas del estudio hacia el futuro.



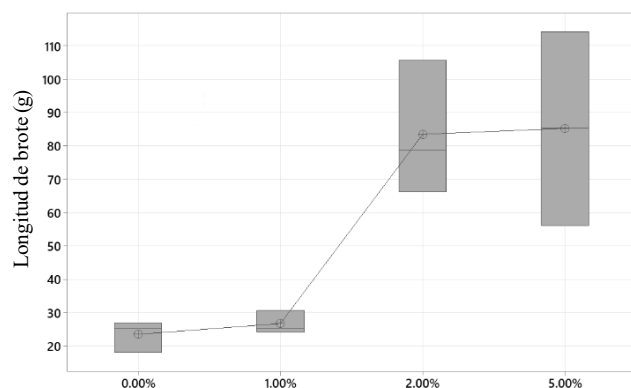
Dosis de biocarbón (% respecto al suelo)



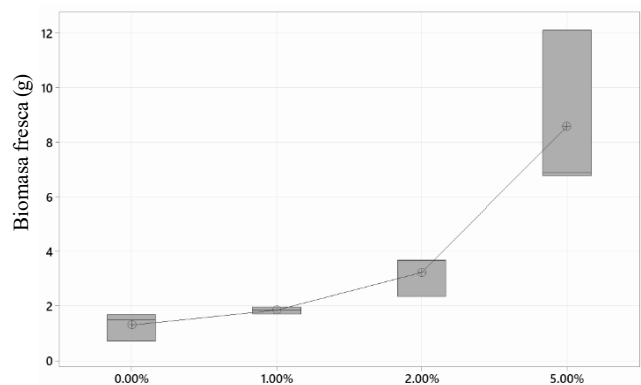
Dosis de biocarbón (% respecto al suelo)



Dosis de biocarbón (% respecto al suelo)



Dosis de biocarbón (% respecto al suelo)



Dosis de biocarbón (% respecto al suelo)

Fig. 3 Efectos de las dosis de biocarbón en las propiedades del suelo y variables de crecimiento vegetal, representados mediante diagramas de cajas: pH, conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), longitud de raíz (mm), longitud de brote (mm) y biomasa fresca (g).

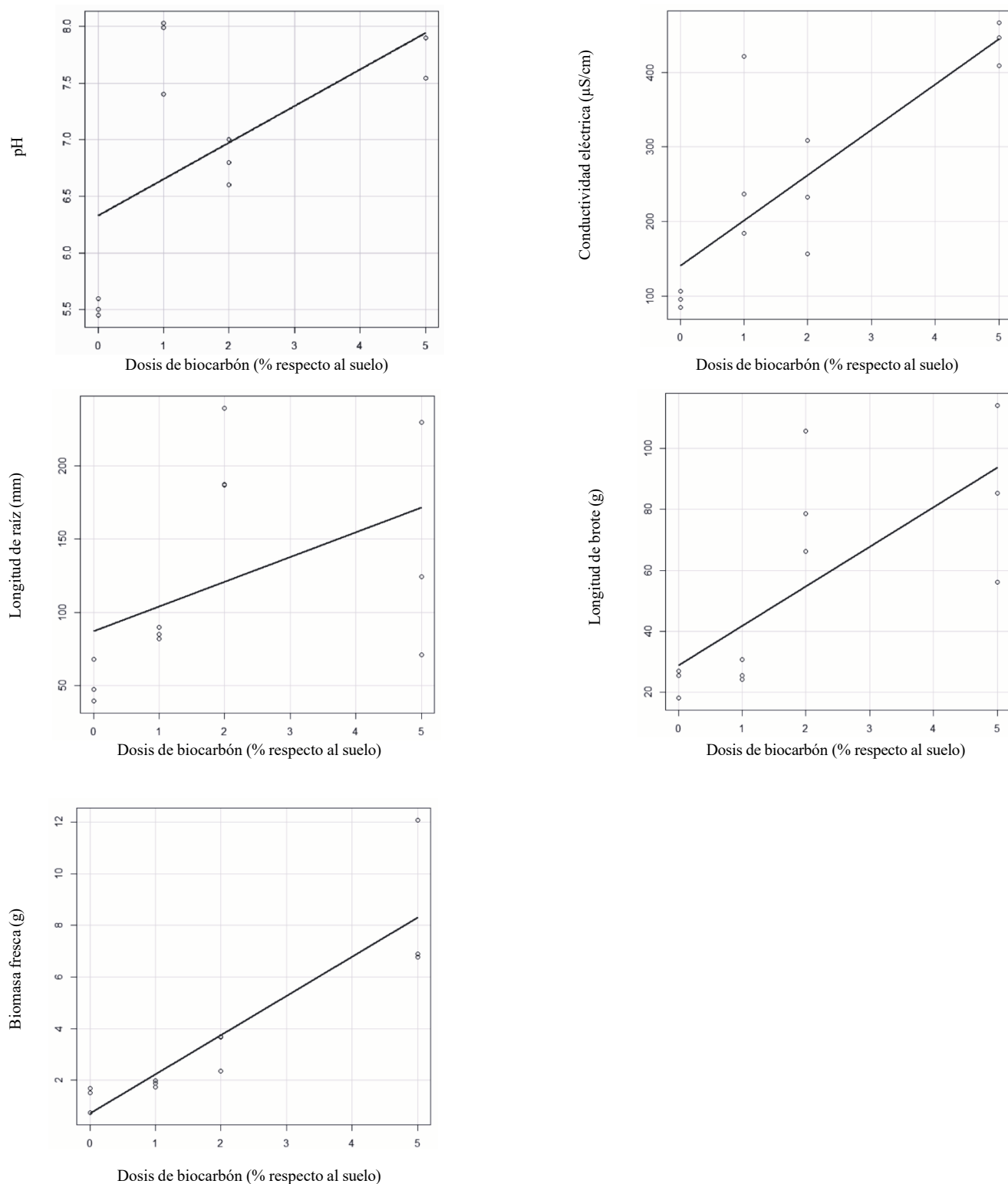


Fig. 4 Prueba de correlación entre las dosis de biocarbón (0%, 1%, 2% y 5% respecto al peso del suelo) y las variables de respuesta del suelo y cultivo en suelo contaminado con microplásticos: conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$), longitud de raíz (mm), longitud del brote (mm) y biomasa fresca (g). Se observaron correlaciones lineales positivas significativas ($r = 0.799$ para conductividad, $r = 0.691$ para longitud de raíz, $r = 0.799$ para longitud del brote, $r = 0.972$ para biomasa fresca; $p < 0.05$).

IV. CONCLUSIONES

El estudio evidenció que el suelo agrícola seleccionado en Carabayllo presenta microplásticos y confirma su translocación hacia las raíces y hojas de *R. sativus*, lo que sugiere un riesgo potencial para la productividad agrícola. La aplicación de biocarbón generó mejoras diferenciadas en las propiedades químicas del suelo seleccionadas y en el crecimiento del cultivo. Con su incorporación, se reguló el pH hacia valores óptimos, se evidenció un incremento sostenido de la conductividad eléctrica y una mejora del crecimiento vegetal, reflejada en el aumento de la longitud radicular, longitud del brote y biomasa fresca; la dosis del 2% de biocarbón respecto al peso del suelo demostró el equilibrio más favorable entre eficiencia y estabilidad de respuesta. Estos resultados corroboraron la capacidad del biocarbón para favorecer la disponibilidad de nutrientes y promover condiciones que amortigüen los efectos asociados a esta contaminación emergente en el suelo agrícola y cultivos. El estudio aporta a las investigaciones relacionadas al uso de biocarbón como enmienda eficaz y potencialmente escalable para mitigar las alteraciones inducidas por microplásticos en suelos agrícolas. Sin embargo, la variabilidad observada entre dosis, propiedades del suelo y respuestas fisiológicas del cultivo sugiere la necesidad de optimizar su aplicación considerando el tipo de suelo, la severidad de la contaminación y la dinámica del cultivo. En este sentido, los resultados dirigen las recomendaciones orientadas a establecer límites máximos permisibles de microplásticos en suelos agrícolas, uso del biocarbón para remediar otros suelos agrícolas previamente medidos en cuanto a la cantidad de microplásticos en el contexto peruano y desarrollo de ensayos de mayor período que permitan evaluar efectos acumulativos, medición de la adsorción en la superficie estructural del biocarbón y posibles interacciones con la microbiota del suelo. Esto genera oportunidades para futuras investigaciones dirigidas a integrar el uso de biocarbón dentro de estrategias de manejo sostenible y remediación de suelos afectados por contaminantes emergentes.

AGRADECIMIENTO

Expresamos nuestro profundo agradecimiento a nuestra asesora, Dra. Carmen Ruiz Huamán, por su dedicación en la guía del presente trabajo. Agradecemos igualmente a la Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas (UPC) y su Facultad de Ingeniería por el acceso a laboratorios y recursos necesarios. No olvidamos el apoyo de los agricultores del sector Chocas Bajo-Carabayllo, cuya colaboración en la inmersión inicial y posterior muestreo de suelos fue clave. Esperamos que estos hallazgos contribuyan al avance en la investigación en torno a la contaminación por microplásticos en suelos agrícolas.

REFERENCIAS

- [1] W. W. Y. Lau *et al.*, "Evaluating scenarios toward zero plastic pollution," *Science*, vol. 369, no. 6509, Sep. 2020, doi: <https://doi.org/10.1126/science.aba9475>
- [2] Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, "Global Plastics Outlook | OECD." Accessed: Jul. 09, 2025. [Online]. Available: https://www.oecd.org/en/publications/global-plastics-outlook_aa1edf33-en.html
- [3] G. Berenstein, P. Córdoba, Y. B. Díaz, N. González, M. B. Ponce, and J. M. Montserrat, "Macro, meso, micro and nanoplastics in horticultural soils in Argentina: Abundance, size distribution and fragmentation mechanism," *Science of The Total Environment*, vol. 906, p. 167672, Jan. 2024, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2023.167672.
- [4] M. N. Hossain, M. M. Rahman, S. Afrin, M. A. Akbor, M. A. B. Siddique, and G. Malafaia, "RETRACTED: Identification and quantification of microplastics in agricultural farmland soil and textile sludge in Bangladesh," *Science of The Total Environment*, vol. 858, p. 160118, Feb. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160118>.
- [5] Grupo de Expertos sobre los Aspectos Científicos de la Protección del Medio Marino, "Sources, fate and effects of microplastics in the marine environment (Part 1)," 2015. Accessed: Aug. 23, 2025. [Online]. Available: <http://www.gesamp.org/publications/reports-and-studies-no-90>
- [6] M. Mondol, P. B. Angon, and A. Roy, "Effects of microplastics on soil physical, chemical and biological properties," *Natural Hazards Research*, vol. 5, no. 1, pp. 14–20, Mar. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2024.02.002>.
- [7] E. Sakin, M. Fatih, and İ. Halil, "Unseen threat: The devastating impact of microplastics on soil health in agricultural lands," *CATENA*, vol. 253, p. 108904, Jun. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.108904>.
- [8] Z. Chen, L. J. Carter, S. A. Banwart, and P. Kay, "Microplastics in Soil-Plant Systems: Current Knowledge, Research Gaps, and Future Directions for Agricultural Sustainability," *Agronomy 2025, Vol. 15, Page 1519*, vol. 15, no. 7, p. 1519, Jun. 2025, doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy15071519>.
- [9] I. Azeem *et al.*, "Uptake and Accumulation of Nano/Microplastics in Plants: A Critical Review," *nanomaterials*, vol. 11, 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/nano11112935>.
- [10] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, "Portal de Suelos de la FAO: Propiedades Químicas." Accessed: Aug. 23, 2025. [Online]. Available: <https://www.fao.org/soils-portal/soil-survey/clasificacion-de-suelos/sistemas-numericos/propiedades-quimicas/es/>
- [11] Y. Sik, N. Bolan, D. Tsang, and J. Novak, "Biochar from Biomass and Waste: Fundamental and Applications," 2019, Accessed: Jul. 09, 2025. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/book/9780128117293/biochar-from-biomass-and-waste?via=ihub>
- [12] A. S. I. Abdoul Magid *et al.*, "Enhanced adsorption of polystyrene nanoplastics (PSNPs) onto oxidized corn cob biochar with high pyrolysis temperature," *Science of The Total Environment*, vol. 784, p. 147115, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147115>.
- [13] B. Chai *et al.*, "Enhancing microplastics removal from soils using wheat straw and cow dung-derived biochars," *Journal of Cleaner Production*, vol. 470, p. 143288, Sep. 2024, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2024.143288.
- [14] X. Zhang *et al.*, "Sycamore bark-derived biochar for diverse microplastic removal: Unraveling mechanisms behind superior efficiency," *Surfaces and Interfaces*, vol. 60, p. 106090, Mar. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2025.106090>.
- [15] G. Ji, Y. Xing, and T. You, "Biochar as adsorbents for environmental microplastics and nanoplastics removal," *Journal of Environmental Chemical Engineering*, vol. 12, no. 5, p. 113377, Oct. 2024, doi: 10.1016/J.JECE.2024.113377.
- [16] B. S. Olubusoye *et al.*, "Removal of microplastics from agricultural runoff using biochar: a column feasibility study," *Frontiers in Environmental Science*, vol. 12, p. 1388606, Jun. 2024, doi: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1388606>.
- [17] L. Yang, P. Shen, H. Liang, and Q. Wu, "Biochar relieves the toxic effects of microplastics on the root-rhizosphere soil system by altering root expression profiles and microbial diversity and functions," *Ecotoxicology*

- and *Environmental Safety*, vol. 271, p. 115935, Feb. 2024, doi: 10.1016/J.ECOENV.2024.115935.
- [18] T. Ran, J. Li, H. Liao, Y. Zhao, G. Yang, and J. Long, "Effects of biochar amendment on bacterial communities and their function predictions in a microplastic-contaminated *Capsicum annuum* L. soil," *Environmental Technology & Innovation*, vol. 31, p. 103174, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.ETI.2023.103174.
- [19] T. S. Ran, J. Long, H. K. Liao, J. Li, G. M. Yang, and Y. X. Zhao, "Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil," *Huanjing Kexue/Environmental Science*, vol. 44, no. 8, pp. 4507–4518, Aug. 2023, doi: 10.13227/J.HJKX.202209166.
- [20] C. Wu *et al.*, "Exploring the potential of biochar for the remediation of microbial communities and element cycling in microplastic-contaminated soil," *Chemosphere*, vol. 362, p. 142698, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2024.142698.
- [21] J. Su *et al.*, "Biochar Influences Polyethylene Microplastic-Contaminated Soil Properties and Enzyme Activities," *Agronomy*, vol. 14, no. 12, p. 2919, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy14122919>.
- [22] K. N. Palansooriya *et al.*, "Contrasting effects of food waste and its biochar on soil properties and lettuce growth in a microplastic-contaminated soil," *Applied Biological Chemistry* 2024 67:1, vol. 67, no. 1, pp. 1–16, Jan. 2024, doi: 10.1186/S13765-023-00851-W.
- [23] Municipalidad Distrital de Carabayllo, "PLAN DISTRITAL DE MANEJO DE RESIDUOS SÓLIDOS MUNICIPALES 2022 - 2026." Accessed: Aug. 23, 2025. [Online]. Available: https://web.municarabayllo.gob.pe/pte/PLAN_DE_MANEJO_DE_RESIDUOS_SOLIDOS_2022-2026.pdf
- [24] Ministerio del Ambiente, "ESTADÍSTICAS NACIONALES DE RESIDUOS PLÁSTICOS." Accessed: Aug. 21, 2025. [Online]. Available: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiZDdiODA4OWMtMmVjYi00MDBlLWFiYjU0MTU5MDM5ZWZWM1OTIwIiwidCI6IjB1MmFiZjRlLWExZjU0NDZiIiwiaWE0LWM5YWE2ZGQ1NTE4MCJ9>
- [25] Ministerio del Ambiente, "INDICADORES RRSS - 2023." Accessed: Aug. 21, 2025. [Online]. Available: <https://app.powerbi.com/view?r=eyJrIjoiY2I4Y2YwNmEtM2U0Zi00NTM2LTlIZWEtNjFINDc5MWVkdMDQwIiwidCI6IjB1MmFiZjRlLWExZjU0NDZiIiwiaWE0LWM5YWE2ZGQ1NTE4MCJ9&pageName=55c508f90ed25db0b4cb>
- [26] Ministerio del Ambiente, "GUÍA PARA EL MUESTREO DE SUELOS." Accessed: Aug. 24, 2025. [Online]. Available: <https://www.minam.gob.pe/calidadambiental/wp-content/uploads/sites/22/2013/10/GUÍA-PARA-EL-MUESTREO-DE-SUELOS-final.pdf>
- [27] H. Sahai *et al.*, "Key insights into microplastic pollution in agricultural soils: A comprehensive review of worldwide trends, sources, distribution, characteristics and analytical approaches," *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, vol. 185, p. 118176, Apr. 2025, doi: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2025.118176>.
- [28] Y. Qiu, S. Zhou, W. Qin, C. Zhang, C. Lv, and M. Zou, "Effects of land use on the distribution of soil microplastics in the Lihe River watershed, China," *Chemosphere*, vol. 324, p. 138292, May 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138292>.
- [29] Y. Zhou *et al.*, "Microplastics in urban soils of Nanjing in eastern China: Occurrence, relationships, and sources," *Chemosphere*, vol. 303, p. 134999, Sep. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134999>.
- [30] F. Radford, L. M. Zapata-Restrepo, A. A. Horton, M. D. Hudson, P. J. Shaw, and I. D. Williams, "Developing a systematic method for extraction of microplastics in soils," *Analytical Methods*, vol. 13, no. 14, pp. 1695–1705, Apr. 2021, doi: 10.1039/D0AY02086A.
- [31] E. Gupta, V. K. Mishra, A. Patel, and P. K. Srivastava, "A modified methodology for extraction and quantification of microplastics in soil," *NanoImpact*, vol. 35, p. 100525, Jul. 2024, doi: 10.1016/J.IMPACT.2024.100525.
- [32] X. He *et al.*, "Identification of factors influencing the microplastic distribution in agricultural soil on Hainan Island," *Science of The Total Environment*, vol. 874, p. 162426, May 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162426>.
- [33] K. En-Nejmy, B. el Hayany, M. Al-Alawi, M. Jemo, M. Hafidi, and L. el Fels, "Microplastics in soil: A comprehensive review of occurrence, sources, fate, analytical techniques and potential impacts," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 288, p. 117332, Dec. 2024, doi: 10.1016/J.ECOENV.2024.117332.
- [34] G. Grause, Y. Kuniyasu, M. F. Chien, and C. Inoue, "Separation of microplastic from soil by centrifugation and its application to agricultural soil," *Chemosphere*, vol. 288, p. 132654, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132654>.
- [35] 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: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.148694>.
- [36] A. Naeem, M. A. Farooq, M. Shafiq, M. Arshad, A. A. Din, and A. A. Alazba, "Quantification and polymeric characterization of microplastics in composts and their accumulation in lettuce," *Chemosphere*, vol. 361, p. 142520, Aug. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.142520>.
- [37] İ. Çelen Erdem, C. Ünek, P. Akkuş Süt, Ö. Karabıyık Acar, M. Yurtsever, and F. Şahin, "Combined approaches for detecting polypropylene microplastics in crop plants," *Journal of Environmental Management*, vol. 347, p. 119258, Dec. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119258>.
- [38] R. Hernández Sampieri, C. Fernández Collado, and M. del P. Baptista Lucio, *Metodología de la Investigación*, 6th ed. México: Mc Graw Hill Education, 2014. Accessed: Oct. 02, 2025. [Online]. Available: <https://www.esup.edu.pe/wp-content/uploads/2020/12/2.%20Hernandez,%20Fernandez%20y%20Baptista-metodolog%C3%ADa%20Investigacion%20Cientifica%206ta%20ed.pdf>
- [39] M. Tunalı and M. C. Rillig, "Vertical distribution of microplastics in soil affects plant response to microplastics," *NanoImpact*, vol. 38, p. 100557, Apr. 2025, doi: 10.1016/J.IMPACT.2025.100557.
- [40] B. Iqbal *et al.*, "Remediation of microplastics-contaminated agricultural soils by unmodified and modified biochar derived from *Solidago canadensis* L.," *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 198, p. 107153, Jun. 2025, doi: 10.1016/J.PSEP.2025.107153.
- [41] B. Sales Dávila *et al.*, "Manual para el análisis de suelos agrícolas y agua para riego," Mar. 2024, Accessed: Jul. 09, 2025. [Online]. Available: <https://hdl.handle.net/20.500.12955/2473>
- [42] W. Zhou, Q. Wang, Z. Wei, J. Jiang, and J. Deng, "Effects of microplastic type on growth and physiology of soil crops: Implications for farmland yield and food quality," *Environmental Pollution*, vol. 326, p. 121512, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.envpol.2023.121512.
- [43] A. Debab, S. Boudjabi, H. Chenchouni, N. Ababsa, and A. Brahimi, "Effects of incorporating biochar on soil quality and barley yield in microplastics-contaminated soils," *Chemosphere*, vol. 368, p. 143760, Nov. 2024, doi: 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2024.143760.
- [44] K. Abhishek *et al.*, "Biochar application for greenhouse gas mitigation, contaminants immobilization and soil fertility enhancement: A state-of-the-art review," *Science of The Total Environment*, vol. 853, p. 158562, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2022.158562.
- [45] A. F. Vargas Ramírez, I. M. Ramírez, and A. F. Arroyave, "Relación entre el PH y las mediciones de conductividad eléctrica en un suelo cultivable ubicado en Medellín, Colombia," *Ingenierías USBMed*, vol. 13, no. 2, pp. 56–62, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.21500/20275846.4706>.
- [46] W. Ahmad, A. Khan, M. Zeeshan, I. Ahmad, M. Adnan, and S. Fahad, "Relative efficiency of biochar particles of different sizes for immobilising heavy metals and improving soil properties," *Crop and Pasture Science*, vol. 74, no. 2, pp. 112–120, Jan. 2022, doi: 10.1071/CP20453.
- [47] Y. Dong, M. Gao, W. Qiu, and Z. Song, "Effect of microplastics and arsenic on nutrients and microorganisms in rice rhizosphere soil," *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 211, p. 111899, Mar. 2021, doi: 10.1016/J.ECOENV.2021.111899.
- [48] H. Z. Li, D. Zhu, J. H. Lindhardt, S. M. Lin, X. Ke, and L. Cui, "Long-Term Fertilization History Alters Effects of Microplastics on Soil Properties, Microbial Communities, and Functions in Diverse Farmland

- Ecosystem,” *Environmental Science and Technology*, vol. 55, no. 8, pp. 4658–4668, Apr. 2021, doi: <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c04849>.
- [49] X. Zhang, X. Feng, N. Chai, Y. Kuzyakov, F. Zhang, and F. M. Li, “Biochar effects on crop yield variability,” *Field Crops Research*, vol. 316, p.109518, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.FCR.2024.109518.