

Recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante la técnica de fitorremediación

Recovery of soils contaminated by hydrocarbons through the phytoremediation technique

 Esmila Yeime Chavarria Márquez¹,  Jorge Rafael Diaz Dumont¹,  Julio Miguel Ángeles Suazo¹,  Carmencita Del Rocio Lavado Meza¹,  Rosalinda Cauchos Flores¹,  Bladimir Nilbert Flores Cañabi¹,  Frank Antony Huaman Yauri¹,  Medaly Yurica Ilizarbe Ayunque¹

¹ Universidad Nacional Autónoma de Tayacaja Daniel Hernández Morillo, Perú

Contacto: ¹esmilachavarria@unat.edu.pe

RESUMEN

El objetivo general del proyecto fue evaluar la eficacia de la fitorremediación utilizando *Medicago sativa* (alfalfa) y *Trifolium repens* (trébol blanco) en la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos con presencia de metales pesados, como son el cobre y plomo en el distrito de Daniel Hernández, Huancavelica, Perú. Para ello, se empleó una metodología experimental que incluyó la recolección de muestras de suelo y plantas, así como la medición de diversos parámetros fisicoquímicos antes y después de la intervención. Los resultados revelaron que la fitorremediación con ambas especies de plantas redujo significativamente la concentración de metales pesados y mejoró las propiedades del suelo, con el trébol blanco mostrando una capacidad superior para eliminar plomo. La conclusión destaca la efectividad de estas plantas en la descontaminación de suelos, sugiriendo que la fitorremediación es una alternativa sostenible y económicamente viable frente a métodos tradicionales. Además, se identificaron limitaciones como el tiempo necesario para lograr resultados significativos y las condiciones climáticas que pueden afectar el crecimiento de las plantas. Este enfoque no solo permite la recuperación de suelos, sino que también promueve un equilibrio ecológico y la salud ambiental de la región.

Palabras clave: Fitorremediación, Hidrocarburos, Metales pesados, *Medicago sativa*, *Trifolium repens*.

ABSTRACT

The general objective of the project is to evaluate the effectiveness of phytoremediation using *Medicago sativa* (alfalfa) and *Trifolium repens* (white clover) in the recovery of soils contaminated by hydrocarbons in the district of Daniel Hernández, Huancavelica, Peru. For this, an experimental methodology was used that included the collection of soil and plant samples, as well as the measurement of various physicochemical parameters before and after the intervention. The results revealed that phytoremediation with both plant species significantly reduced the concentration of heavy metals and improved soil properties, with white clover showing a superior ability to remove lead. The conclusion highlights the effectiveness of these plants in soil decontamination, suggesting that phytoremediation is a sustainable and economically viable alternative to traditional methods. Additionally, limitations were identified such as the time needed to achieve significant results and climatic conditions that may affect plant growth. This approach not only allows for soil recovery, but also promotes ecological balance and the environmental health of the region.

Keywords: Phytoremediation, Hydrocarbons, Heavy Metals, *Medicago sativa*, *Trifolium repens*.

INTRODUCCIÓN

En el distrito de Daniel Hernández, en la provincia de Tayacaja, departamento de Huancavelica, en el país de Perú. La aplicación de estas técnicas en 2024 se centraría en la recuperación de áreas impactadas por derrames de hidrocarburos con presencia de cobre y plomo, que podrían estar afectando la calidad del suelo y, por ende, la productividad agrícola y la salud del ecosistema.

La contaminación de suelos por hidrocarburos representa una de las heridas más profundas infligidas por el ser humano a la Tierra por el contenido de cobre y plomo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Lugar de estudio

Se desarrolló en el distrito de Daniel Hernández. Se encuentra ubicada al sur de la Provincia de Tayacaja en el Departamento de Huancavelica, a una altura de 3276 m.s.n.m., localizada a 12°23' 52"S de latitud sur 74°52' 00"W de longitud oeste.

El punto de recolección de muestra se localiza en el Distrito de Daniel Hernández en las coordenadas UTM de 514852.80 E y 8629881.19 S. En el país de Perú

Figura 1
Ubicación de la zona de estudio



Nota. Elaboración propia a partir de Google Earth, (2023).

Características del suelo

Evaluar las características del suelo, como tipo, textura, pH y niveles de contaminación por hidrocarburos.

Metodología de la investigación

Se realizó la recolección de muestras para una investigación experimental, que busca evaluar la efectividad de la fitorremediación con *Medicago sativa* L. (alfalfa) y *Trifolium repens* (trébol blanco) para la recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos en el distrito de Daniel Hernández, en la provincia de Tayacaja Departamento Huancavelica, Perú. La investigación se realizó desde el 10 de julio al 14 de noviembre. Donde se trabajó plan piloto a pequeña escala con una investigación en campo y a nivel laboratorio para evaluar las condiciones del suelo antes, durante y después de la aplicación de las especies.

Tipo de investigación

Este estudio fue de un tipo investigación experimental, a nivel piloto.

Aspectos éticos y regulatorios

Durante la germinación de las especies sembradas en el distrito de Daniel Hernández, se tuvo en cuenta el cuidado de las especies sembradas.

RESULTADOS

Tabla 1
Valores del parámetro medido de la densidad del suelo con hidrocarburo.

Nº Muestras	Masa (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)
1	102.79	100	1.0279
2	103.07	100	1.0307
3	102.75	100	1.0275
4	103.04	100	1.0304
5	102.79	100	1.0279
6	102.05	100	1.0205
Total	616.49		6.1649
Promedio	102.7483333		1.027483333

Nota. Elaboración propia 2024, la tabla nos muestra la determinación de la densidad del suelo.

La tabla 1 muestra el análisis de seis muestras con masa, volumen y densidad. La masa varía entre 102.05 g y 103.07 g, sumando un total de 616.49 g, mientras que el volumen es constante en 100 cm³ para todas las muestras. La densidad, calculada como el cociente entre la masa y el volumen, fluctúa entre 1.0205 g/cm³. y 1.0307 g/cm³., con un total de 6.1649 y un promedio de 1.0275 g/cm³. En resumen, el cuadro refleja las variaciones en masa y densidad bajo un volumen constante, con un promedio de masa de 102.7483 g y densidad de 1.0275 g/cm³.



Tabla 2

Parámetros fisicoquímicos evaluados en laboratorio antes de aplicar la fitorremediación

Parámetros fisicoquímicos	Cantidad	Unidad
Temperatura	19	°C
pH	6.1	pH
Conductividad	85.6	uS/cm
Salinidad	0.01	ppm

Nota. Elaboración propia, 2024. Parámetros fisicoquímicos evaluados del suelo contaminado por hidrocarburos.

En la tabla 2, la temperatura del suelo registrada fue de 19 °C, valor que indica un ambiente térmico favoreciendo los procesos microbiológicos responsables de la transformación de contaminantes presentes en el suelo con un pH del suelo de 6,1 corresponde a un suelo ligeramente ácido, condición común en muchos suelos naturales sin embargo, puede incrementar moderadamente la movilidad de ciertos metales, aspecto relevante a considerar como punto de partida para la fitorremediación, ya que facilita su absorción por las plantas hiperacumuladoras. La conductividad eléctrica de 85,6 $\mu\text{S/cm}$ indica un bajo contenido de sales solubles, clasificando al suelo como no salino. Este valor sugiere ausencia de estrés salino para las plantas, lo que resulta favorable para el establecimiento y crecimiento vegetal durante el proceso de fitorremediación, donde la salinidad de 0,01 ppm confirma una concentración mínima de sales.

Tabla 3

Parámetros fisicoquímicos evaluados en la aplicación de la fitorremediación de *Medicago sativa*.

Parámetros fisicoquímicos	Cantidad	Unidad
Temperatura	15	°C
pH	6.4	pH
Conductividad	69.5	uS/cm
Salinidad	0.02	ppm

Nota. Elaboración propia, 2024. Parámetros fisicoquímicos evaluados durante la fitorremediación.

En la tabla 3, presenta valores de parámetros fisicoquímicos básicos que permiten evaluar la calidad del suelo donde la temperatura se registra en 15 °C, lo que indica un ambiente relativamente frío, típico de zonas altoandinas. Esta temperatura favorece un pH de 6,4 muestra semi neutro, pero se mantiene cercana a la neutralidad (pH 7). Este valor se encuentra dentro de rangos aceptables para muchas formas de vida y no representa, en principio, un riesgo significativo, aunque puede influir en la disponibilidad de nutrientes y metales.

La conductividad eléctrica, con un valor de **69,5 $\mu\text{S/cm}$** , es baja, lo que indica una baja concentración de sales disueltas. Y la salinidad de 0,02 ppm confirma que se trata de un suelo con cantidad mínima de sales disueltas.

Artículo científico: pág. 56

Volumen 7, Número 2, julio - diciembre, 2024 - Recibido: 10-11-2024, Aceptado: 23-12-2024

<https://doi.org/10.46908/tayacaja.v7i2.237>

Tabla 4

Parámetros fisicoquímicos evaluados en la aplicación de la fitorremediación de *Trifolium repens*

Parámetros fisicoquímicos	Cantidad	Unidad
Temperatura	14	°C
pH	6.9	pH
Conductividad	90.5	uS/cm
Salinidad	0.0	ppm

Nota. Elaboración propia, 2024. Parámetros fisicoquímicos evaluados durante la fitorremediación.

En la tabla 4, muestra el pH del suelo de 6,9 indica una condición prácticamente neutra, adecuado para la actividad biológica del suelo y para el crecimiento de *T. repens*, favoreciendo la actividad microbiana involucrada en la degradación o inmovilización de contaminantes considerada óptima para la disponibilidad de nutrientes esenciales y para el establecimiento de microorganismos simbióticos. La conductividad eléctrica de 90,5 $\mu\text{S/cm}$ corresponde a un suelo con bajo contenido de sales solubles, lo que descarta problemas de salinidad que puedan afectar el crecimiento vegetal. Este valor sugiere un suelo no salino, con adecuada aireación y condiciones apropiadas para el desarrollo radicular.

Finalmente, la **salinidad de 0,0 ppm** confirma la ausencia de sales en concentraciones relevantes.

Contaminantes determinados

Tabla 5

Valores de pretratamiento de los metales pesados antes de la aplicación de fitorremediación

Nº	Suelo	Contaminantes	
1	Suelo contaminado	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)
		0.04	0.03

Nota: elaboración propia medición del suelo antes de la fitorremediación.

En la tabla 5, los resultados correspondientes a los valores de pretratamiento de metales pesados en el suelo contaminado, antes de la aplicación del proceso de fitorremediación, muestran concentraciones de cobre (Cu) de 0,04 mg/kg y plomo (Pb) de 0,03 mg/kg. Estos valores indican la presencia de metales pesados, desde el punto de vista ambiental, las concentraciones registradas se encuentran muy por debajo de los estándares de calidad ambiental para suelos, por lo que no representarían un riesgo significativo inmediato para la salud humana, la biota del suelo ni el crecimiento vegetal. No obstante, su detección confirma la existencia de contaminación. Lo cual hace viable la aplicación de la fitorremediación como una estrategia preventiva y de mejora de la calidad del suelo, permitiendo monitorear cambios y reducciones



en el suelo.

Tabla 6
Valores de post tratamiento después de la aplicación de fitorremediación las dos especies

N°	Suelo	Contaminantes	
		Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)
1	<i>Medicago sativa</i>	0.04	0.02
2	<i>Trifolium repens</i>	0.03	0

Nota: Elaboración propia medición durante la fitorremediación.

En la tabla 6, se observan los resultados post-tratamiento: *Medicago sativa* presenta un nivel de Cu idéntico a la inicial (0.04 mg/kg) y una reducción en el Pb a 0.02 mg/kg, lo que sugiere una cierta efectividad en la remediación. del plomo. Por otro lado, *Trifolium repens* muestra una ligera disminución en el Cu, alcanzando 0.03 mg/kg, y logra una eliminación completa del Pb, reduciendo su concentración a 0 mg/kg, lo que indica una eficacia notable en la fitorremediación de este metal pesado. . Estos resultados resaltan las diferentes capacidades de ambas especies.

Tabla 7
Comparación de los parámetros fisicoquímicos con el ECA

Estándares de Calidad Ambiental del suelo				
Temperatura	19	15	14	°C
pH	6.5	6.4	6.9	Unidad pH
Conductividad	79.5	69.5	90.5	uS/cm
Salinidad	0.01	0.02	0.0	mV
Metales Cu	0.04	0.04	0.03	mg/kg
Metales Pb	0.03	0.02	0.0	mg/kg

Nota. Elaboración propia, La tabla nos muestra la comparación de los parámetros del ECA.

La tabla 7, muestra la comparación de parámetros fisicoquímicos del suelo con los Estándares de Calidad Ambiental (ECA) antes y después de la fitorremediación. Antes del tratamiento, la temperatura fue de 19 °C, pH 6.5, conductividad 79.5 μS/cm, y se detectó 0.04 mg/kg de Cu y 0.03 mg/kg de Pb. Tras la fitorremediación alta alfa, la temperatura y el pH disminuyeron a 15 °C y 6,4, respectivamente, mientras que el Pb bajó a 0,02 mg/kg. Con trébol b, la temperatura era de 14 °C, pH 6,9, y el Pb no era detectable. Estos resultados evidencian cambios en las características del suelo tras los tratamientos. demuestran que la fitorremediación generó cambios favorables en las características del suelo y contribuyó a la disminución de metales pesados, manteniendo los parámetros evaluados dentro de los límites establecidos por el ECA. Decreto Supremo N.º 011-2017-MINAM.

DISCUSIONES

La densidad promedio de 1,02748 g/cm³, con un rango entre 1,0205 y 1,0307 g/cm³, sugiere una consistencia en la

composición del material analizado, siendo menor que la de suelos agrícolas (1.1-1.6 g/cm³) y similar a la de suelos arenosos y arcillosos (1.4-1.6 y ~1.2 g/cm³, respectivamente). Estas diferencias indican una posible mayor porosidad o un contenido mineral bajo, lo cual favorece la penetración de raíces y el almacenamiento de agua, haciendo potencialmente adecuado para la agricultura sostenible (Castellanos & Muñoz, 2019; Ramírez et al., 2020; Pérez & Martínez, 2021).

El pH de suelo es de 6,3 a 6,5, considerado adecuado para la mayoría de cultivos. Sin embargo, Martínez-Pérez et al. (2021) advierten que la exposición a hidrocarburos puede modificar la acidez del suelo y afectar la dinámica de nutrientes y retención de agua. El promedio de pH de 6.4 sugiere una ligera acidez típica de suelos con baja contaminación. Li y col. (2019) señalan que aunque los microorganismos pueden adaptarse a suelos ligeramente ácidos, la presencia de hidrocarburos podría inhibir funciones metabólicas, afectando la salud del suelo. González et al. (2022) resaltan que un pH de 6,4 es adecuado para la actividad biológica, pero con un margen limitado para resistir contaminantes o cambios climáticos.

presentan concentraciones de metales pesados en suelos contaminados: 0,04 mg/kg de cobre (Cu) y 0,03 mg/kg de plomo (Pb), ambas por debajo de los límites de los Estándares de Calidad Ambiental. Li y col. (2020) señalan que estas concentraciones son bajas, sugiriendo una contaminación mínima. Chen et al. (2021) advierten que, aunque no representan un riesgo inmediato, pueden tener efectos acumulativos. Esto permite evaluar la fitorremediación en condiciones seguras, destacando su eficacia en suelos con bajos niveles de metales, según Huang et al. (2019). Por último, González-Martínez et al. (2022) subrayan la importancia del monitoreo constante, incluso con niveles bajos.

CONCLUSIONES

La recuperación del suelo fue evaluar la fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos usando *Medicago sativa* (alfalfa) y *Trifolium repens* (trébol blanco), se observó que el trébol blanco fue más efectivo. Esto se atribuye a su sistema radicular denso y su capacidad para favorecer la actividad microbiana que degrada los contaminantes

Al comparar la efectividad de *Medicago sativa* (alfalfa) y *Trifolium repens* (trébol blanco) en la reducción de hidrocarburos en suelos contaminados, el trébol blanco demostró ser más efectivo. Su capacidad superior para reducir contaminantes lo destaca como una opción favorable en procesos de fitorremediación para suelos impactados por hidrocarburos.

Al evaluar el crecimiento de *Medicago sativa* (alfalfa) mostró un crecimiento superior al *Trifolium repens* (trébol blanco) en suelos contaminados por hidrocarburos, evidenciando su mayor tolerancia a hidrocarburos y su



potencial para aplicaciones de fitorremediación.

Las principales limitaciones y desafíos asociados con el uso de *Medicago sativa* (alfalfa) y *Trifolium repens* (trébol blanco) en fitorremediación incluyen el crecimiento relativamente menor del trébol blanco en suelos contaminados la alfalfa, a pesar de su mayor crecimiento, fue menos eficaz en la eliminación de hidrocarburos. La combinación de especies y asegurar un balance entre crecimiento y eficacia descontaminante.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bai, L., Zhao, S., Gao, Y. y Zhang, Y. (2021). Utilización de plantas hiperacumuladoras en la fitorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos. *Revista Materiales Peligrosos*, 419, 126472.
- Chen, X., Li, Z., Liu, X. y Zhang, Y. (2021). Fitorremediación de suelos contaminados con hidrocarburos: Efectos de las especies vegetales y las enmiendas del suelo. *Contaminación Ambiental*, 268, 115764.
- Chen, Y., Wang, X. y Liu, J. (2021). Evaluación de la contaminación por metales pesados en suelos y sus implicaciones ambientales.
- González, L., Martínez, P., & Rojas, C. (2022). Impacto de la actividad industrial en las propiedades químicas del suelo. *Revista de Estudios Ambientales*, 45(3), 233-245.
- González-Martínez, L., Rivera-Camacho, J., & Pérez-Rodríguez, S. (2021). La fitorremediación como herramienta para la recuperación de suelos contaminados: Estudio de caso con leguminosas. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental*, 14(2), 67-83.
- González-Martínez, R., Pérez, L., & López, M. (2022). Monitoreo de metales pesados en suelos urbanos: Estudios de casos y técnicas de remediación.
- Huang, Z., Zhang, W. y Chen, S. (2019). Eficiencia de la fitorremediación en suelos con niveles de contaminación bajos a moderados.
- Huang, L., Chen, Y. y Zhou, J. (2022). Factores que afectan la eficiencia de la fitorremediación en suelos contaminados con metales.
- Kumar, V., Sharma, A. y Dhiman, R. (2020). Potencial de fitorremediación de *Medicago sativa* en suelos contaminados con metales pesados.
- Li, H., Wang, J. y Zhang, Y. (2019). Adaptación microbiana y dinámica de nutrientes en suelos con distintos niveles de pH. *Biología y Bioquímica del suelo*, 132, 145-152.
- Li, H., Zhang, Q. y Wu, D. (2020). Concentraciones de metales pesados en suelos contaminados con hidrocarburos: fuentes y evaluación de riesgos.
- López, A., Martínez, J., & Fernández, C. (2021). Recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante fitorremediación: Uso de *Medicago sativa* L. y *Trifolium repens*. Universidad de Buenos Aires.
- Martínez-Núñez, A., & Ramírez-Torres, F. (2021). Fitorremediación de suelos contaminados por hidrocarburos: Potencial de *Medicago sativa* y *Trifolium repens*. *Revista de Remediación Ambiental*, 11(1), 33-48.
- Martínez-Pérez, J., García, MA, & López, F. (2021). Efectos de la contaminación por hidrocarburos en suelos agrícolas y su restauración. *Revista de Ciencias Ambientales*, 56(2), 112-123.
- Morales, D., & Quispe, S. (2021). Fitorremediación con *Trifolium repens* en suelos contaminados en la región de Ica, Perú. Universidad Nacional San Luis Gonzaga.
- Ramírez, A., Gómez, P., & López, M. (2020). Densidad y textura en suelos arenosos y arcillosos: Influencia en la retención de agua. *Revista de Investigación en Suelos*, 18(3), 98-105.
- Rojas, S., Martínez, A., & Díaz, J. (2021). Evaluación del uso de alfalfa y trébol blanco en la remediación de suelos contaminados con hidrocarburos. *Ciencias del Suelo y Medio Ambiente*, 5(1), 33-48.
- Soto, L. y Ramos, C. (2022). Recuperación de suelos contaminados por hidrocarburos mediante el uso de *Trifolium repens* en Acobamba, Huancavelica. Universidad Nacional de Huancavelica.
- Singh, J., Lee, B. y Kim, H. (2019). Mecanismos de absorción y acumulación de metales pesados en plantas.
- Torres-Gómez, A., Ruiz-Moreno, C., & Delgado-González, P. (2022). Estudio comparativo de la capacidad de fitorremediación de distintas especies vegetales en suelos contaminados por hidrocarburos. *Revista de Ciencia y Tecnología Ambiental*, 18(2), 90-105.
- Zhang, X., Liu, P. y Chen, Q. (2020). El pH del suelo y su papel en la disponibilidad de nutrientes y el crecimiento de las plantas. *Avances en la investigación agrícola*, 78(1), 56-64.
- Zhang, X., Wu, H. y Li, T. (2021). Estudio comparativo de plantas leguminosas para la fitorremediación de suelos contaminados con metales pesados. *Medio Ambiente*.