

Geranium cultivation: potential use for arsenic (As), cadmium (Cd) and copper (Cu) removal from contaminated soils

Aída Obeso-Obando, Ing.^{1,*}; Ricardo Vejarano, Dr.²

¹ Ingeniería Ambiental, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú. rosariol.obeso@gmail.com

² Dirección de Investigación y Desarrollo, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú. ricardo.vejarano@upn.edu.pe

Abstract– Phytoremediation refers to the use of plants to absorb, accumulate, stabilize or reduce pollutants from contaminated soils, including some heavy metals. The aim of the study was to evaluate the potential of geranium (Pelargonium zonale) to remove metals, such as arsenic (As), cadmium (Cd), and copper (Cu), from contaminated soils. For this, geranium plants cultivation was carried out in a system in ex situ conditions over a 6-week treatment period, in soil samples extracted from El Milagro dump, of the city of Trujillo (Peru). Concentrations of As, Cd and Cu decreased in soil samples through the cultivation period, showing a significant tolerance of the geranium plants towards these metals, with a decrease of As and Cd, up to 74% and 79%, respectively, with respect to the initial concentration, whereas for Cu decreased of up to 55%. The results suggest the removal potential of As, Cd, and Cu by geranium cultivation, as an interesting alternative for the recovery of contaminated soils with this kind of metals.

Keywords: geranium, metals removal, contaminated soils, arsenic, cadmium, copper.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.144>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

Cultivo de geranio: uso potencial para remover arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) de suelos contaminados

Geranium cultivation: potential use for arsenic (As), cadmium (Cd) and copper (Cu) removal from contaminated soils

Aída Obeso-Obando, Ing.^{1,*}; Ricardo Vejarano, Dr.²

¹ Ingeniería Ambiental, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú. rosario1.obeso@gmail.com

² Dirección de Investigación y Desarrollo, Universidad Privada del Norte, Trujillo, Perú. ricardo.vejarano@upn.edu.pe

Resumen– La fitorremediación es una técnica que se basa en la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, estabilizar o reducir diversos contaminantes del suelo, entre ellos algunos metales pesados. El objetivo del estudio fue evaluar la capacidad del geranio (*Pelargonium zonale*) para remover arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) de suelos contaminados. El cultivo del geranio fue realizado en condiciones ex situ, durante un periodo de seis semanas, en muestras de suelo obtenidas del botadero El Milagro de la ciudad de Trujillo (Perú). Las concentraciones de As, Cd y Cu en las muestras de suelo disminuyeron significativamente tras el periodo de prueba, mostrando una tolerancia hacia los metales, con una disminución del As y Cd de hasta 74% y 79%, respectivamente, con respecto a la concentración inicial, mientras que para Cu se logró una reducción de hasta 55%. Los resultados sugieren el potencial de remoción de As, Cd y Cu mediante el cultivo de geranio, como alternativa para la recuperación de suelos contaminados con este tipo de metales.

Palabras clave: geranio, remoción de metales, suelos contaminados, arsénico, cadmio, cobre.

Abstract– Phytoremediation refers to the use of plants to absorb, accumulate, stabilize or reduce pollutants from contaminated soils, including some heavy metals. The aim of the study was to evaluate the potential of geranium (*Pelargonium zonale*) to remove metals, such as arsenic (As), cadmium (Cd), and copper (Cu), from contaminated soils. For this, geranium plants cultivation was carried out in a system in ex situ conditions over a 6-week treatment period, in soil samples extracted from El Milagro dump, of the city of Trujillo (Peru). Concentrations of As, Cd and Cu decreased in soil samples through the cultivation period, showing a significant tolerance of the geranium plants towards these metals, with a decrease of As and Cd, up to 74% and 79%, respectively, with respect to the initial concentration, whereas for Cu decreased of up to 55%. The results suggest the removal potential of As, Cd, and Cu by geranium cultivation, as an interesting alternative for the recovery of contaminated soils with this kind of metals.

Keywords: geranium, metals removal, contaminated soils, arsenic, cadmium, copper.

Digital Object Identifier (DOI):
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.144>
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

I. INTRODUCCIÓN

El impacto ambiental producido por las actividades antropogénicas se ha hecho cada vez más predominante, siendo la contaminación de los suelos por metales pesados uno de los aspectos que mayor preocupación genera debido a las consecuencias que pueden ocasionar en los ecosistemas involucrados. Desde diferentes frentes se ha planteado la recuperación de estos suelos mediante tratamientos de biorremediación, siendo uno de los más promisorios la fitorremediación, técnica que aprovecha la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, estabilizar o reducir los contaminantes del suelo, entre ellos los metales pesados [1].

Existen varios casos significativos de contaminación de suelos por metales pesados, especialmente en zonas con alta actividad industrial. Uno de esos casos ocurre en La Oroya Antigua (región Junín, Perú), donde la presencia de arsénico, cadmio, plomo, mercurio o antimonio en suelos suele superar los estándares permitidos. Por ejemplo, el arsénico supera 393 veces los estándares internacionales [2].

En las grandes ciudades también existe fuentes de contaminación por metales, por ejemplo, los lugares de deposición de residuos urbanos. En Perú, de acuerdo con las estimaciones del Ministerio del Ambiente [3] en el año 2012 se generaron en torno a 7.1 millones de toneladas de residuos sólidos municipales (entre residuos domiciliarios, no domiciliarios y rurales). A los residuos domiciliarios, corresponden aproximadamente 4.6 millones de toneladas, siendo Lima la región que más basura generó, aproximadamente 2 millones de toneladas al año, seguida por La Libertad con 275 mil toneladas, Piura (253 mil toneladas), la región Callao (219 mil toneladas) y Arequipa (202 mil toneladas).

En cuanto a la composición de estos residuos sólidos, un 50.9% corresponde a materia orgánica, 10.1% a plástico, 8.5% a residuos peligrosos, 8.1% a papel y cartón, 7.1% a material inerte, 3.4% a madera y restos de jardín, 3.2% a vidrio, 2.8% a

metales, 1.8% a textiles, 1.6% a caucho y cuero, 0.8% a huesos, 0.6% a tetra pack y 0.45% a aparatos eléctricos y electrónicos [3].

En cuanto a la disposición de estos residuos, el Ministerio de Ambiente estima que solo el 47% fue dispuesto en rellenos sanitarios autorizados, mientras que el porcentaje restante terminó en botaderos a cielo abierto o en lugares no identificados en cifras oficiales [4]. Otros destinos de estos residuos además incluyen la incineración, reciclaje y el vertido en ríos, lagunas o el mar. Las regiones de Áncash, Cajamarca, Puno y Lima concentran la mayor cantidad de municipalidades que depositaron su basura en botaderos a cielo abierto. Si bien existe un registro de 12 rellenos sanitarios autorizados y en funcionamiento para una población que supera los 30 millones de habitantes, esta situación demuestra la inexistencia de infraestructura suficiente para la adecuada disposición final de los residuos urbanos [5].

En el ámbito regional, La Libertad es la segunda región que más desperdicios sólidos genera en el país, concentrándose la mayor producción en la ciudad de Trujillo, donde principalmente los residuos se depositan a cielo abierto, sin ningún control. Ejemplo de ello es el conocido botadero ubicado en El Milagro (distrito de Huanchaco), en el cual se acumulan desperdicios sólidos provenientes de nueve distritos, recibiendo casi 720 toneladas de basura al día (262 mil toneladas al año), desplegadas en casi 58 hectáreas (Figura 1), cuyos montículos de desperdicios pueden alcanzar hasta 15 metros de altura y que en algunos casos son incinerados *in situ*, de acuerdo al informe presentado por el Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental (OEFA) del Ministerio del Ambiente [5]. El botadero de El Milagro se ubica dentro de los 20 más críticos de América Latina [6].



Fig. 1 Toma fotográfica del botadero El Milagro, en la ciudad de Trujillo.

Contaminación por metales en la ciudad de Trujillo

En el botadero El Milagro es recurrente la disposición de residuos con altos contenidos de sustancias contaminantes, entre ellos metales como plomo, arsénico, cadmio, mercurio, entre otros [7], cuya procedencia son residuos de pintura, baterías, electrodomésticos, aparatos electrónicos,

combustibles, etc., cuyo manejo inadecuado y disposición final no están debidamente controlados.

Estos metales pueden filtrarse a través del suelo a las corrientes subterráneas y superficiales de agua, llegando incluso a cultivos alimentarios e incorporarse en la cadena trófica y en última instancia alcanzar al ser humano, con severas consecuencias sobre la salud [8,9], problemática que requiere ser atendida de manera integral, no solo para reducir la presencia de los contaminantes en los suelos, sino también para disminuir o eliminar la fuente de generación de estos.

Tratamientos de remediación de suelos contaminados

Desde diferentes frentes se está planteando la recuperación de suelos contaminados mediante la aplicación de tratamientos de biorremediación, siendo el cultivo de plantas o fitorremediación una de las más interesantes alternativas para solucionar el problema [10,11].

La fitorremediación consiste en el aprovechamiento de la capacidad de ciertas plantas para absorber, acumular, metabolizar, volatilizar o estabilizar contaminantes presentes en el ambiente como metales pesados, sustancias radioactivas o compuestos orgánicos, con demostradas ventajas frente a los métodos convencionales debido a su simplicidad de aplicación y bajo costo [1], además de brindar como resultado una *cobertura verde*, más agradable estéticamente y más aceptable desde el punto de vista ambiental [12].

Son diversas las plantas con potencial para aplicaciones de fitorremediación, las cuales deben presentar un rápido crecimiento y alta productividad de biomasa, además de ser tolerantes y buenas acumuladoras de metales pesados [10,11,13], por ejemplo: geranio, girasol, jacinto, mostaza, alfalfa, ortiga, álamo, nabo, cebada, centeno, entre otras [1,11,14].

De modo que la aplicación de la fitorremediación mediante el cultivo de geranio (*Pelargonium zonale*) [14] se justifica en la necesidad de buscar una alternativa tecnológica que permita reducir el contenido de metales pesados en suelos contaminados del botadero El Milagro de la ciudad de Trujillo, para lo cual se plantea como objetivo el evaluar la capacidad del geranio para la acumulación y consiguiente remoción de arsénico (As), cadmio (Cd) y cobre (Cu) de estos suelos contaminados.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Cultivo de geranio *ex situ* en suelo contaminado

Las muestras de suelo fueron obtenidas del botadero El Milagro de la ciudad de Trujillo, de acuerdo con la metodología descrita en la Guía para Muestreo de Suelos del Ministerio del Ambiente [15], extrayendo aproximadamente 9 kg de suelo a una profundidad de 30 cm (Figura 2a).

Las muestras fueron sometidas a homogenización y cuarteo para el llenado en las macetas y posterior cultivo *ex situ* de tres plantas de geranio en cada maceta (Figura 2b). Los riegos se realizaron tres veces por semana con cantidades de 400 mL de agua por maceta, de acuerdo con lo mostrado en la Figura 1. Los ensayos se realizaron en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Privada del Norte, sede Trujillo.

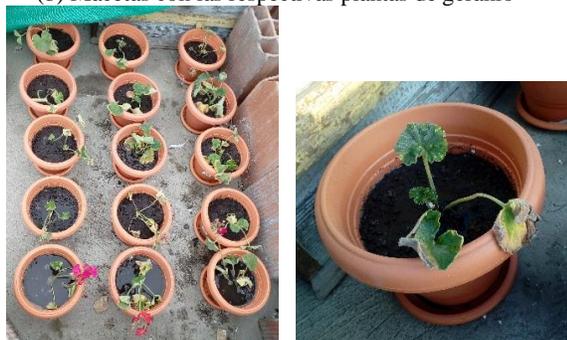
B. Tratamiento pre-análisis de las muestras de suelo contaminado

Las muestras de suelos fueron analizadas cada dos semanas, para lo cual las plantas fueron removidas de las macetas (Figura 2). Las muestras de tierra fueron secadas a una temperatura de 140 °C por 24 horas en una estufa UN55 PLUS (Mettler GmbH Co. KG, Alemania), para ser posteriormente trituradas y almacenadas hasta su análisis.

(a) Muestras de suelo contaminado



(b) Macetas con las respectivas plantas de geranio



(c) Preparación de muestras de suelo para el análisis de metales



Fig. 2 Muestras de suelo contaminado (a), macetas con las plantas de geranio (b) y preparación de las muestras para el análisis de los metales mediante ICP-OES (c).

C. Contenido residual de metales en las muestras de suelo

El análisis del contenido residual de metales en las muestras de suelo se realizó en el Laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de Trujillo, mediante Espectrometría de Emisión Atómica de Plasma Acoplado por Inducción (ICP-OES), en base a la metodología propuesta por Herrero *et al.* [16], para lo cual se pesaron tres gramos de muestra, las cuales fueron incineradas en una mufla modelo FO100CR (Yamato Scientific Co. Ltd., Estados Unidos) a 550 °C por cuatro horas. Luego las cenizas fueron tratadas con una mezcla de HNO₃ y ácido perclórico (2:1 mL: mL). El residuo final fue disuelto en 1 mL de HNO₃, enrasando a 25 mL con agua ultrapura (Figura 2c). Las lecturas de los metales fueron hechas usando un ICP-OES Prodigy de Alta dispersión (ICP Prodigy, Teledyne Leeman Labs., Estados Unidos). Las longitudes de onda seleccionadas para el As, Cd, Cu fueron de 189.042 nm, 226.502 nm y 327.395 nm, respectivamente.

Los resultados obtenidos fueron sometidos a un Análisis de Varianza para identificar diferencias significativas entre replicas y la Prueba de Comparación Múltiple DSH de Tukey (5% de significancia), utilizando el software Statistica 7 (StatSoft Inc., 2004).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran las concentraciones de As, Cd y Cu en las muestras iniciales de suelo (inicio), así como las concentraciones residuales tras el tratamiento en función del tiempo de cultivo de geranio, cuyos análisis fueron hechos por triplicado cada dos semanas, observándose diferencias significativas entre todas las semanas de cultivo, así como en los porcentajes de remoción de cada metal.

TABLA 1
CONCENTRACIONES PROMEDIO DE As, Cd Y Cu (ppm) Y PORCENTAJES DE REMOCIÓN (%) CON RESPECTO A LA CONCENTRACIÓN INICIAL

Semana	Concentración de metal (ppm)		
	Porcentaje de remoción (%)		
	As	Cd	Cu
Inicio	39.500	5.030	0.020
2	21.731 ± 0.53 a 45%	2.140 ± 0.11 a 57%	0.015 ± 0.00 a 23%
4	13.960 ± 0.12 b 65%	1.827 ± 0.05 b 64%	0.011 ± 0.00 b 45%
6	10.323 ± 0.12 c 74%	1.053 ± 0.01 c 79%	0.009 ± 0.00 c 55%

Letras diferentes en la misma columna indican diferencia significativa (DSH de Tukey, $p < 0.05$).

De especial interés es el alto contenido de As en las muestras de suelo evaluadas, lo que indica un peligro para la salud de las poblaciones cercanas a este botadero a cielo abierto, dado que en muchos casos, este metal ha sido detectado en el aire [2], y en el caso específico del botadero El Milagro, los

niveles detectados son comparables a zonas mineras en cuyos suelos se han detectado altas concentraciones que llegan hasta 40 ppm [2], con el riesgo que implica para la población al estar relacionado este metal con diversos casos de cáncer.

En la Figura 3, se observa la evolución del contenido de As, logrando reducir en torno a un 65% en la cuarta semana de cultivo de geranio, a partir de la cual la tasa de remoción empieza a disminuir.

Se conoce que las plantas acumuladoras pueden tolerar altos niveles de ciertos metales en el suelo y acumular entre 100 y 1000 veces los niveles acumulados por la mayoría de otras especies, sin efectos adversos en su crecimiento [17]. En el caso del As, al ser un elemento no esencial para las plantas, en altas concentraciones pueden alterar los procesos metabólicos, pudiendo inhibir el crecimiento y causar la muerte [13], caso que no ocurriría con el geranio, lo cual se evidencia en la afinidad del sistema suelo-planta para este metal y su consiguiente remoción en las muestras de suelo (figuras 3 y 6). La bibliografía reporta la absorción del As hacia diferentes partes de la planta, por ejemplo, las raíces [18].

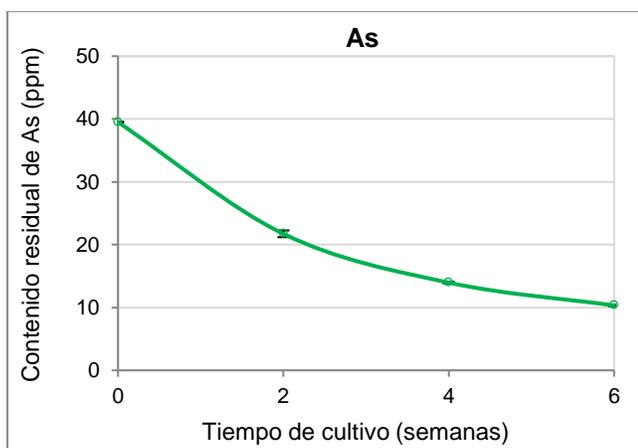


Fig. 3 Concentración de As (ppm) tras las seis semanas de cultivo de la planta de geranio en el suelo contaminado.

Por su parte, en la Figura 4 se observa la evolución del contenido de Cd en las muestras de suelo, alcanzando un 57 % de remoción tan solo en la segunda semana de cultivo, disminuyendo la tasa de remoción hasta la cuarta semana. Este fenómeno podría estar relacionado con una posible saturación de la planta de geranio durante el proceso de absorción de Cd a partir de la semana 2. No obstante, y a pesar de esta ralentización, se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de Cd entre las semanas 2 y 4 (DSH Tukey, $p < 0.05$), lo que indica una adaptación de la planta a la presencia de este metal.

Estudios previos reportan la capacidad de las plantas del género *Pelargonium* para remover del suelo y acumular Cd [11,19], lo cual se refleja en la disminución significativa de la concentración de este metal con respecto a los niveles iniciales en las muestras de suelo (figuras 4 y 6).

Mientras que en la Figura 5 se observa la evolución del contenido de Cu en las muestras de suelo, el cual reduce constantemente hasta alcanzar un 55% de remoción en la sexta semana de cultivo. No obstante, no se obtuvieron diferencias estadísticamente significativas en el contenido de Cu entre la semana 4 y la semana 6 (DSH Tukey, $p < 0.05$), lo que indicaría la limitada capacidad del geranio para remover Cu de muestras de suelo. Ello se evidencia en la Figura 6, donde el porcentaje de remoción de este metal por el geranio es menor que el mostrado para el As y Cd.

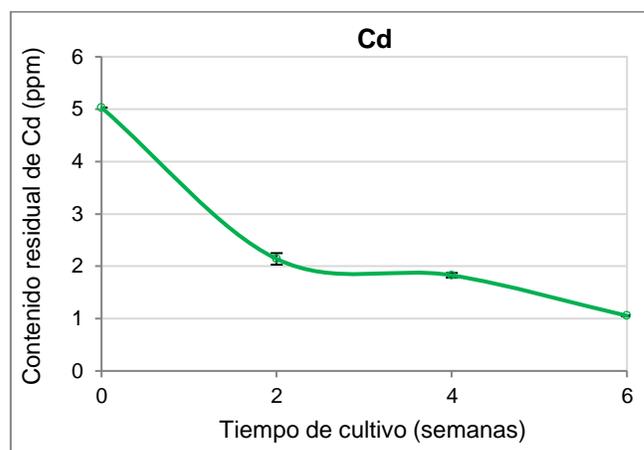


Fig. 4 Concentración de Cd (ppm) tras las seis semanas de cultivo de la planta de geranio en el suelo contaminado.

Se ha reportado que, en el caso del Cu, el mecanismo de absorción estaría relacionado con una absorción pasiva, siempre y cuando las plantas estén expuestas a concentraciones tóxicas del metal [20]. Sin embargo, las concentraciones iniciales de Cu en las muestras de suelo no podrían considerarse como tóxicas para la planta de geranio, de modo que en este caso se trataría de un proceso de absorción activa, donde es muy probable que el metal ingrese a las células de las raíces en formas disociadas a tasas diferentes de absorción.

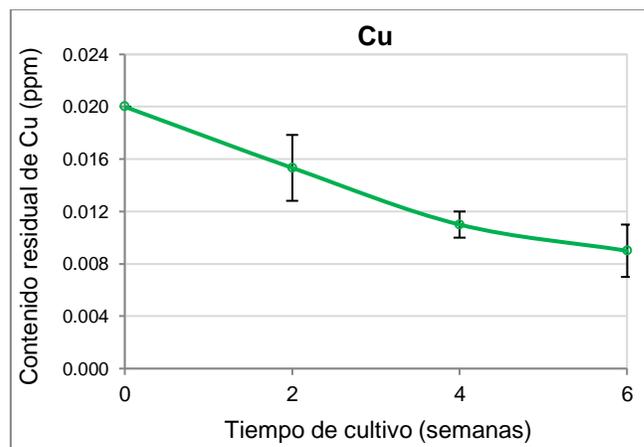


Fig. 5 Concentración de Cu (ppm) tras las seis semanas de cultivo de la planta de geranio en el suelo contaminado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a Alberto Castillo Herrera y Julio César Gurreonero Fernández, del Laboratorio de Análisis Instrumental de UPN, por su asesoría técnica en la ejecución del estudio y los análisis químicos. Así como al personal técnico del Laboratorio de Procesamiento de Minerales de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de Trujillo por los análisis mediante ICP- OES.

REFERENCIAS

- [1] A. Delgadillo-López, C. González-Ramírez, F. Prieto-García, J. Villagómez-Ibarra, and O. Acevedo-Sandoval, "Phytoremediation: an alternative to eliminate pollution," *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, vol. 14, pp. 597-612, 2011.
- [2] W. Díaz, "Estrategia de gestión integrada de suelos contaminados en el Perú," *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – UNMSM*, vol. 19, no. 38, pp. 103-110, 2016.
- [3] MINAM. (2012). Quinto Informe Anual de Residuos Sólidos Municipales y no Municipales en el Perú gestión 2012. [Online]. Disponible: <https://redrrss.minam.gob.pe/material/20140423145035.pdf>
- [4] MINAM. (2014). Sexto Informe Nacional de Residuos Sólidos de la Gestión del Ámbito Municipal y No Municipal 2013. [Online]. Disponible: <http://redrrss.minam.gob.pe/material/20160328155703.pdf>
- [5] OEFA. (2015). Fiscalización ambiental en residuos sólidos de gestión municipal provincial. Informe 2014-2015: Índice de cumplimiento de los municipios provinciales a nivel nacional. Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. [Online]. Disponible: <http://www.oefa.gob.pe/publicaciones/fiscalizacion-ambiental-en-residuos-solidos-en-gestion-municipal-provincial>
- [6] W. Castro. (2016). Botadero el Milagro entre los 20 críticos en el mundo. [Online]. Disponible: <https://larepublica.pe/sociedad/782085-oefa-botadero-de-el-milagro-entre-los-20-criticos-en-el-mundo/>
- [7] MINSA. (2012). Plan de trabajo de vigilancia y control de riesgos por exposición ocupacional a metales pesados. [Online]. Disponible: http://www.digesa.minsa.gob.pe/DSO/PLAN%20DE%20TRA%20BAJO%20EN%20METALES%20PESADOS_2_.pdf
- [8] F. Huaranga, E. Méndez, V. Quilcat, and F. Huaranga, "Contaminación por metales pesados en la cuenca del río Moche, 1980 – 2010, La Libertad – Perú," *Scientia Agropecuaria*, vol. 3, no. 3, pp. 235-247, 2012.
- [9] S. Squadrone, E. Burioli, G. Monaco, M.K. Koya, M. Prearo, S. Gennero, A. Dominici, and A.C. Abete, "Human exposure to metals due to consumption of fish from an artificial lake basin close to an active mining area in Katanga (D.R. Congo)," *Science of the Total Environment*, vol. 568, pp. 679-684, 2016.
- [10] S. Fernández, C. Poschenrieder, C. Marcenò, J.R. Gallego, D. Jiménez-Gámez, A. Bueno, and E. Afif, "Phytoremediation capability of native plant species living on Pb-Zn and Hg-As mining wastes in the Cantabrian range, north of Spain," *Journal of Geochemical Exploration*, vol. 174, pp. 10-20, 2017.

Al comparar las tasas de remoción de los tres metales, se obtuvo una reducción significativa en las concentraciones de As y Cd, y en menor medida de Cu, aprovechando la capacidad de remoción del geranio, debido a que cuenta con una mayor productividad de biomasa, lo cual la hace estar considerada como una planta potencialmente acumuladora de metales [14], inmovilizándolos en sus raíces, tallos y hojas [19], y sin el riesgo posterior de eliminarlos hacia el ambiente. De modo que a partir de los resultados obtenidos, se pueden plantear estrategias orientadas a reducir los niveles de estos metales en botaderos como El Milagro mediante el cultivo de geranio, que además de reducir el potencial riesgo de intoxicación para las poblaciones cercanas a este botadero [2], se contribuya a mejorar el paisaje de la zona con esta planta ornamental [12], como ocurre en el antiguo botadero de Moravia, en la ciudad de Medellín, Colombia [21], como alternativa a los métodos de tratamiento de suelos contaminados actualmente disponibles [22], pero que por la extensión del terreno a tratar podrían verse limitados respecto a su efectividad.

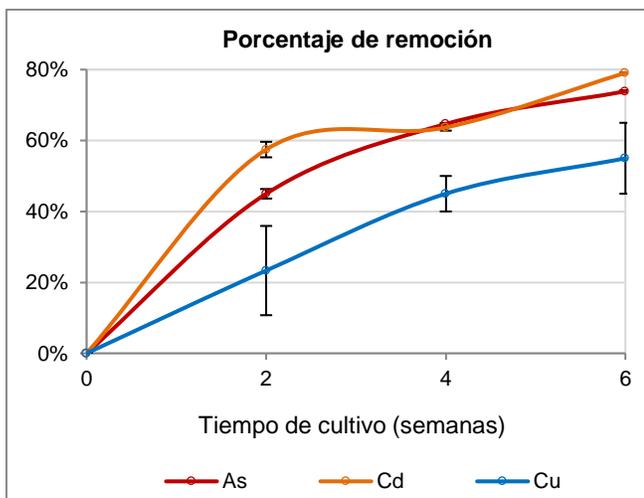


Fig. 6 Porcentajes de remoción de As, Cd y Cu en las muestras de suelo contaminado mediante cultivo de geranio.

IV. CONCLUSIONES

Se obtuvo una disminución de los metales contaminantes del suelo mediante el cultivo de geranio, donde el mayor porcentaje de remoción se logró para el Cd, alcanzando hasta un 79% tras seis semanas de cultivo, y para el As, con un 74% de remoción, mientras que la menor tasa de remoción fue obtenida para el Cu (55%) tras las seis semanas de cultivo. Los resultados obtenidos muestran que la fitorremediación mediante el cultivo de geranio constituye una alternativa a los métodos convencionales de remoción de metales como el As, Cd y Cu de suelos contaminados, por lo que se puede utilizar como una herramienta efectiva y económica, debido a su manejabilidad de cultivo. Finalmente, es necesario considerar que la problemática de contaminación de suelos urbanos, como el estudiado, debe ser atendida desde una manera integral, no solamente por la presencia de los contaminantes, sino también para reducir, o eliminar, la fuente de generación de estos contaminantes.

- [11] A. Patel, and D.D. Patra, "Phytoextraction capacity of *Pelargonium graveolens* L'Hér. grown on soil amended with tannery sludge - Its effect on the antioxidant activity and oil yield," *Ecological Engineering*, vol. 74, pp. 20-27, 2014.
- [12] M.P. Bernal, R. Clemente, S. Vázquez and D.J. Walker, "Aplicación de la fitorremediación a los suelos contaminados por metales pesados en Aznalcóllar," *Ecosistemas. Revista Científica y Técnica de Ecología y Medio Ambiente*, vol. 16, no. 2, pp. 67-7, 2007.
- [13] L.T. Danh, P. Truong, R. Mammucari, and N. Foster, "A critical review of the arsenic uptake mechanisms and phytoremediation potential of *Pteris vittata*," *International Journal of Phytoremediation*, vol. 16, no. 5, pp. 429-453, 2014.
- [14] D.I. Orroño, and R.S. Lavado, "Heavy metal accumulation in *Pelargonium hortorum*: Effects on growth and development," *Phyton*, vol. 78, pp. 75-82, 2009.
- [15] MINAM. (2014). Guía para Muestreo de Suelos. En el marco del D.S. N° 002-2013-MINAM, Estándares de Calidad Ambiental (ECA) para suelo. [Online]. Disponible: http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2014/04/GUIA-MUESTREO-SUELO_MINAM1.pdf
- [16] Z. Herrero, L.A. Valcárcel, A. Montero, J.R. Estevez, J.A. dos Santos, I. Pupo, M. Rodríguez, N. Alberro, D. López, and D. Hernández, "Application of Cold Vapor-Atomic Absorption (CVAAS) Spectrophotometry and Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry methods for cadmium, mercury and lead analyses of fish samples. Validation of the method of CVAAS," *Food Control*, vol. 48, pp. 37-42, 2015.
- [17] M. Prieto, C. Gonzales, A. Román, and F. Prieto, "Contaminación y fitotoxicidad en las plantas por metales pesados provenientes de suelos y agua," *Tropical and subtropical Agroecosystems*, vol. 10, no. 1, pp. 29-44, 2009.
- [18] E. Moreno-Jiménez, E. Esteban, and J.M. Peñalosa, "The fate of arsenic in soil-plant systems," *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*, vol. 215, pp. 1-37, 2012.
- [19] A. Hernández, "Contaminación por cadmio en suelos aledaños a Met-Mex Peñoles y retención de este metal por el geranio (*Pelargonium* spp)," Tesis, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro, Torreón, Coahuila, México, 2008.
- [20] A. Kabata-Pendias, *Trace elements in soils and plants*. Fourth edition, Boca Raton, United States: CRC Press, 2011.
- [21] M. Sánchez, "Contaminación por metales pesados en el botadero de basuras de Moravia en Medellín transferencia a flora y fauna y evaluación del potencial fitorremediador de especies nativas e introducidas," Tesis, Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá, Colombia, 2010.
- [22] E.J. Kim, and K. Baek, "Selective recovery of ferrous oxalate and removal of arsenic and other metals from soil-washing wastewater using a reduction reaction," *Journal of Cleaner Production*, vol. 221, pp. 635-643, 2019.