

# Fitorremediación con *Enterolobium cyclocarpum* en arenas de relaves procedentes de minería de oro informal contaminadas con arsénico y cadmio

## Phytoremediation with *Enterolobium cyclocarpum* in tailing sands from informal gold mining contaminated with arsenic and cadmium

Bibiana Caballero-Mejía<sup>1,2</sup>, Alberto Cabezas-López<sup>1</sup>, Javier Pérez-Esteban<sup>3</sup>, Chiquinquirá Hontoria<sup>1</sup> & Ana Moliner<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Dpto. Producción Agraria, Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica Alimentaria y de Biosistemas, Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Puerta de Hierro, 2, 28040 Madrid, España

<sup>2</sup> Facultad de Ciencias, Escuela de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia (Medellín), Colombia

<sup>3</sup> Dpto. Química Orgánica y Biorgánica, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional de Educación a Distancia. Paseo de Senda del Rey, 9, 28040 Madrid, España

(\*E-mail: ana.moliner@upm.es)

<https://doi.org/10.19084/rca.28702>

### RESUMEN

La minería informal supone un riesgo para la salud de los ecosistemas. Con el objetivo de restaurar las zonas afectadas por este tipo de actividad de una forma sostenible, se realizó un ensayo en microcosmos durante ocho meses con *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. 1960, inoculadas con microorganismos promotores del crecimiento en arenas de relave procedentes de minería informal. Este estudio se hizo dentro de un invernadero ubicado en el municipio de Buriticá del departamento de Antioquia (dentro de los predios de Zijin - Continental Gold). La especie vegetal fue plantada en macetas de 10 L, conteniendo aproximadamente 14 kg de arenas de relave (A) o arenas de relave mezclada con materia orgánica [5% p/p de gallinaza compostada (A+MO)]. Se ensayó el efecto de microorganismos comerciales. En cada maceta se añadieron Micorrizas (0 g ó 50 g Mycorfos®), ó Rizobium (0 cm<sup>3</sup> ó 0,5 cm<sup>3</sup> de Rhizobiol®) ó la mezcla de los 2 en las mismas dosis. En total hubo 24 macetas. A pesar de los altos niveles de elementos traza (ET) totales en las arenas de relave (As 269 mg/kg; Cd 461 mg/kg), el *Enterolobium cyclocarpum* se adaptó a las condiciones de los sustratos, presentando en el tratamiento de arena con micorrizas, la mayor concentración de As y Cd acumulado en las partes aéreas de las plantas. Por su parte, en los tratamientos sin enmienda orgánica que llevaban incorporados hongos micorrícicos, A+M y A+FN+M, la mayor concentración de As y Cd se presentó en la raíz.

**Palabras clave:** Fitorremediación, rizhobium, micorrizas, *Enterolobium cyclocarpum*.

### ABSTRACT

Informal mining poses a risk to ecosystem health. With the aim of restoring the areas affected by this type of activity in a sustainable way, a microcosm trial was carried out for eight months with *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb. 1960, inoculated with growth-promoting microorganisms in tailings sands from informal mining. This study was carried out in a greenhouse located in the municipality of Buriticá in the department of Antioquia (on the premises of Zijin - Continental Gold). The plant species were planted in 10 L pots, containing approximately 14 kg of tailings sand (A) or tailings sand mixed with organic matter [5% w/w composted poultry manure (A+MO)]. The effect of commercial micro-organisms was tested. Mycorrhizae (0 g or 50 g Mycorfos®), or Rhizobium (0 cm<sup>3</sup> or 0.5 cm<sup>3</sup> of Rhizobiol®) or a mixture of the two at the same doses were added to each pot. In total there were 24 pots. Despite the high levels of total trace elements in the tailings sand (As 269 mg/kg; Cd 461 mg/kg), *Enterolobium cyclocarpum* adapted to the substrate conditions, with the highest concentration of As and Cd accumulated in the aerial parts of the plants in the mycorrhizal sand treatment. On the other hand, in the treatments without organic amendment that incorporated mycorrhizal fungi, A+M and A+FN+M, the highest concentrations of As and Cd were found in the roots.

**Keywords:** Phytoremediation, rhizobium, mycorrhiza, *Enterolobium cyclocarpum*.

## INTRODUCCIÓN

La minería informal hace referencia a aquella actividad de extracción que se lleva a cabo sin tener un título minero debidamente registrado en el Catastro Minero. Asimismo, el concepto aludido de informalidad se concentra sólo en la falta de registro y no en otros márgenes, como por ejemplo, el cumplimiento de regulaciones de otra índole como tributarias, sanitarias, de seguridad en el trabajo, medioambientales, pagos de beneficios sociales a trabajadores, etc. (Goñi *et al.*, 2014)

La actividad minera es fuente importante de contaminación por elementos traza (ET), que pueden causar estrés oxidante en plantas (Fayiga *et al.*, 2004), además de ser vehículo de paso a la cadena alimentaria.

Considerando que la fitoestabilización se basa en la inactivación de metales por parte de la planta, principalmente por absorción en la raíz, o por precipitación en la rizosfera (Kidd *et al.*, 2009), esta técnica se puede utilizar para inmovilizar los contaminantes presentes en el suelo, a la vez que para frenar la erosión.

El *Enterolobium cyclocarpum* es una especie arbórea de rápido crecimiento que puede llegar hasta los 20-30 m de altura (Galindo *et al.*, 2001), y ha sido empleada ampliamente en restauración de ecosistemas degradados para la conservación y control de la erosión en los suelos (Martínez-Pacheco *et al.*, 2012).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la capacidad de *Enterolobium cyclocarpum* asistido por microorganismos para estabilizar arsénico y cadmio presentes en las arenas de relave procedentes de la actividad minera informal de oro.

## MATERIAL Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en Buriticá, situado al NO de Medellín, en los predios de Zijin - Continental Gold cuyos alrededores están afectados por minería informal. Los veranos son cortos y calurosos, los inviernos son cortos y agradables, teniendo precipitaciones y nubosidad todo el año. Durante el transcurso del año, la temperatura generalmente varía de 16 °C a 25 °C.

Inicialmente se hizo un muestreo al azar de los 30 cm superiores de las arenas de relave, para conocer el contenido en elementos traza. Las muestras se homogenizaron, se secaron y después de su digestión con agua regia en microondas, se determinó el contenido en elementos traza mediante ICP-OES.

El ensayo de fitorremediación se llevó a cabo durante ocho meses en macetas de 10 L en un invernadero cubierto, ubicado dentro de la empresa. Se utilizó como sustrato en la mitad de ellas aprox. 14 kg de la arena de relave (A) y en la otra, arena de relave más 5% de compost (A+MO). En cada maceta se añadieron Micorrizas (0 g ó 50 g Mycorfos®), ó Rizobium (0 cm<sup>3</sup> ó 0,5 cm<sup>3</sup> de Rhizobiol® ó la mezcla de los 2 en las mismas dosis que en los tratamientos individuales. Se utilizó una plántula por maceta de *Enterolobium cyclocarpum* de 15 cm (2 meses) desarrolladas en el vivero de la empresa minera y utilizando como sustrato el mismo material que se usó como enmienda de las arenas de relave. Al final del ensayo se evaluó el peso fresco y seco de la parte aérea y radicular, así como la cantidad de arsénico y cadmio acumulado en el tejido vegetal (raíz y brotes).

Tanto la enmienda orgánica que se utilizó, como los inóculos fueron productos comerciales con el fin de garantizar la homogeneidad del material y la posibilidad de replicarlo en campo.

El análisis estadístico se realizó con el programa Statgraphics 19, utilizando un ANOVA de 3 factores mediante el Modelo Lineal General ( $p < 0,05$ ). La distribución normal se comprobó con el test de Shapiro-Wilk's y la homogeneidad de la varianza usando el test de Levene.

Se utilizó como método de comparación entre los diferentes tratamientos un ANOVA con test de Tukey y un nivel de significación de 0,05. Y para las comparaciones entre los tratamientos con y sin aplicación de la materia orgánica, se realizó una prueba t de Student con nivel de significación de 0,05.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presenta el contenido total de elementos traza de la muestra compuesta procedente

de arenas de relave de la actividad de minería informal. Las concentraciones de ET analizados en la muestra, excepto el Cr, superan los niveles de toxicidad que plantean organismos de referencia mundial (Tóth *et al.*, 2016).

**Tabla 1** - Contenido total en elementos traza (ET) de las arenas de relave de minería informal y valores de referencia

Elemento	Contenido ET en arenas* mg/kg	Valores de referencia MEF** mg/kg	
		Bajo	Alto
		As	269
Cr	208	200	300
Cu	4461	150	200
Cd	461	10	20
Hg	121	2	5
Pb	1242	200	750
Zn	22045	250	400

\* Arenas de relave (Buritica)

\*\* Valores de referencia del Ministerio de Medioambiente de Finlandia (MEF, citado por Toth *et al.*, 2016)

En la Tabla 2 se presenta el peso del material vegetal seco, tanto de raíz como de la parte aérea. Se observa que el *Enterolobium cyclocarpum*, fue capaz de desarrollarse en ausencia de enmienda orgánica o inoculantes, mostrando una capacidad potencial para ser utilizada en relaves de minería de oro sin ningún tratamiento químico o biológico. Sin embargo, hay que tener en cuenta que los datos obtenidos se refieren al ensayo en el que se utilizaron plantones de 15 cm, ya que las semillas no llegaron a germinar. Al observar las raíces de las plantas, se detecta que éstas prácticamente limitaron su desarrollo al bulbo que arrastraban del sustrato orgánico del plantón y no exploraron mucho el resto de la maceta donde se encontraba las arenas.

En las macetas donde no se adicionó materia orgánica pero sí una mezcla de inoculantes (Tabla 2), se observa el efecto que tiene la interacción de los microorganismos utilizados incrementando la biomasa total. Además, para el tratamiento donde no se aplicó la enmienda se logró un desarrollo incipiente, al compararlo con el obtenido para estos mismos tratamientos, con la adición de materia orgánica. Esto puede deberse a que la materia

orgánica aumenta la capacidad de retención de algunos elementos, lo que también puede reducir la disponibilidad y, por ende, favorecer el desarrollo vegetal.

**Tabla 2** - Valores medios de biomasa seca (g) y número de plantas de *Enterolobium cyclocarpum* que sobrevivieron al final del ensayo

SUST	FN	M	Nº PLANTAS	BIOMASA SECA		
				BROTOS	RAIZ	TOTAL
A	0	0	3	1,77	1,26	3,03
	0	M	3	1,03	0,62	1,65
	FN	0	2	1,42	0,83	2,25
	FN	M	3	1,66	1,93	3,59
A+MO	0	0	3	2,08	1,12	3,20
	0	M	2	2,09	1,02	3,10
	FN	0	3	0,96	0,75	1,71
	FN	M	1	4,87	2,70	7,57

Tratamientos: FN Fijador de nitrógeno (Rhizobium); M Micorriza; A: arena; MO: materia orgánica.

Sin embargo, estas diferencias dentro de cada sustrato no fueron significativas. Tampoco se hallaron diferencias significativas al comparar el mismo inóculo en diferente sustrato, debido a la gran variabilidad existente. Por otra parte, en el tratamiento con materia orgánica y ambos inóculos, sólo se desarrolló la planta de una de las macetas y esta tuvo una biomasa muy superior al resto. Al relacionarlo con el contenido de metales en planta, se observa una menor concentración de As en dicho tratamiento.

En la Tabla 3 se observa que hubo una mayor acumulación de As en raíz que en brotes para todos los tratamientos. Además, en la arena sin enmendar con adición de micorriza (A+M) es donde mayor concentración de elementos traza se acumuló en los brotes (As 25,99 mg kg<sup>-1</sup>), lo que podría dar lugar a su paso a la cadena trófica. Un efecto similar se encontró en ensayos de fitoextracción con *Pteris vittata* (Cantamessa *et al.*, 2020).

Respecto al cadmio, también se detectó una mayor concentración en raíz que en brotes para todos los tratamientos (Wang *et al.*, 2021). En arena sin enmendar, el tratamiento sin inóculos presentó la menor concentración de Cd en brotes, lo que es deseable en estudios de fitoestabilización.

La aplicación de micorrizas supuso un aumento del contenido de Cd en brotes en el sustrato sin enmendar, tanto cuando el hongo se aplicó solo, como en consorcio con el *Rhizobium*, efecto observado por otros autores (Guo *et al.*, 1996).

**Tabla 3** - Valores promedios de arsénico y cadmio acumulado ( $\text{mg kg}^{-1}$ ) en *Enterolobium cyclo carpum*

SUST	FN	M	As		Cd	
			brotes	raíces	brotes	raíces
A	0	0	4,87	7,07	1,47	9,15
	0	M	25,99	26,30	3,35	4,34
	FN	0	10,27	11,24	2,58	7,18
	FN	M	6,28	10,19	3,36	17,85
A+MO	0	0	4,85	5,78	2,82	5,79
	0	M	1,55	11,18	2,23	10,37
	FN	0	5,82	31,95	6,72	29,03
	FN	M	0,69	4,37	0,72	13,53

Los tratamientos que presentaron la mayor concentración de As y Cd en la raíz fueron aquellos inoculados con hongos micorrízicos (A+M y A+FN+M). En el caso del comportamiento del Cd concuerdan con lo obtenido en otros estudios, donde las plantas que fueron inoculadas con *Rhizobium* y/o hongos micorrízicos presentaban una mayor acumulación de metales en raíces que aquellos sin ningún tipo de inóculo (Khan, 2001).

## CONCLUSIONES

A pesar de los altos niveles totales de elementos traza en las arenas de relave procedentes de la minería informal, el *Enterolobium cyclo carpum* se adaptó a las condiciones de los sustratos, presentando en el tratamiento de arena con micorrizas, la mayor concentración de As y Cd acumulado en las partes aéreas de las plantas. En ausencia de la enmienda orgánica el tratamiento con menor cantidad de metales en brotes fue el de las arenas sin inóculos. Por su parte, en el sustrato enmendado con materia orgánica los tratamientos con micorrizas (A+M y A+FN+M), estabilizaron la mayor cantidad de As y Cd en la raíz. Toda parece indicar que la enmienda orgánica es fundamental para la implantación de *Enterolobium cyclo carpum* en arenas de relave. Las micorrizas, por otra parte, tienen mejores resultados cuando se aplican con enmienda orgánica ya que se reduce la exportación de ET a los brotes.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la empresa Zijin Continental Gold, Buriticá (Colombia), la cooperación del personal de la empresa, así como el uso de sus instalaciones para el ensayo. También agradecen el apoyo económico y la beca de la plataforma LAC (Ltd-UPM) a uno de los investigadores.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cantamessa, S.; Massa, N.; Gamalero, E. & Berta, G. (2020) - Phytoremediation of a highly arsenic polluted site, using *Pteris vittata* L. and arbuscular mycorrhizal fungi. *Plants*, vol. 9, n. 9, art. 1211. <https://doi.org/10.3390/plants9091211>
- Fayiga, A.O.; Ma, L.Q.; Cao, X. & Rathinasabapathi, B. (2004) - Effects of heavy metals on growth and arsenic accumulation in the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L. *Environmental Pollution*, vol. 132, n. 2, p. 289-296. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2004.04.020>
- Galindo, J.; González, N.; Aldama, A.I. & Marrero, Y. (2001) - Efecto de *Enterolobium cyclocarpum* en la población microbiana ruminal y su actividad en condiciones *in vitro*. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola*, vol. 35, n. 3, art. 241.
- Goñi, E.; Sabogal, S. & Asmat, R. (2014) - *Minería Informal Aurífera en Colombia: Principales Resultados del Levantamiento de la Línea Debase*. Bogotá: Fedesarrollo and IDB.
- Guo, Y.; George, E. & Marschner, H. (1996) - Contribution of an arbuscular mycorrhizal fungus to the uptake of cadmium and nickel in bean and maize plants. *Plant and Soil*, vol. 184, p. 195-205. <https://doi.org/10.1007/BF00010449>
- Khan, A.G. (2001) - Relationships between chromium biomagnification ratio, accumulation factor, and mycorrhizae in plants growing on tannery effluent-polluted soil. *Environment International*, vol. 26, n. 5-6, p. 417-423. [https://doi.org/10.1016/s0160-4120\(01\)00022-8](https://doi.org/10.1016/s0160-4120(01)00022-8)
- Kidd, P.; Barceló, J.; Berna, M.P.; Navari-Izzo, F.; Poschenrieder, C.; Shilev, S. & Monterroso, C. (2009) - Trace element behaviour at the root-soil interface: implications in phytoremediation. *Environmental and Experimental Botany*, vol. 67, n. 1, p. 243-259. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.013>
- Martínez-Pacheco, M.M.; del Río, R.; Flores-García, A.; Martínez-Muñoz, R.E.; Ron-Echeverría, O.A. & Raya-González, D. (2012) - *Enterolobium cyclocarpum* (Jacq.) Griseb.: The biotechnological profile of a tropical tree. *Boletín Latinoamericano y del Caribe de Plantas Medicinales y Aromáticas*, vol. 11, n. 5, p. 385-399.
- Tóth, G.; Hermann, T.; Da Silva, M.R. & Montanarella, L. (2016) - Heavy metals in agricultural soils of the European Union with implications for food safety. *Environment International*, vol. 88, p. 299-309. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2015.12.017>
- Wang, X.; Fang, L.; Beiyuan, J.; Cui, Y.; Peng, Q.; Zhu, S.; Wang, M. & Zhang, X. (2021) - Improvement of alfalfa resistance against Cd stress through rhizobia and arbuscular mycorrhiza fungi co-inoculation in Cd-contaminated soil. *Environmental Pollution*, vol. 277, art. 116758. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116758>