

ABSORBER, INMOVILIZAR O ATRAPAR: FUNCIONES DE LAS PLANTAS EN LA REMEDIACIÓN DE SITIOS CONTAMINADOS POR ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS

ABSORBING, IMMOBILIZING OR TRAPPING: FUNCTIONS OF PLANTS IN THE REMEDIATION OF SITES CONTAMINATED BY POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS

Sánchez-López, A.S.¹; González-Chávez, M.C.A.^{2*}; Carrillo-González, R.²

¹Universidad Autónoma de Baja California, Bioingeniería; ²Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Postgrado en Edafología; Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México C.P. 56230.

*Autor de correspondencia: Email: carmeng@colpos.mx

RESUMEN

Para evaluar el potencial de diferentes especies vegetales silvestres en la remediación de sitios contaminados por elementos potencialmente tóxicos (EPT) se recolectaron plantas establecidas naturalmente en residuos de mina. Se determinaron las concentraciones de Zn, Cd, Pb, Cu, Ni y Co en tejidos vegetales y en residuos de mina rizosféricos. Basándose en los factores de bioconcentración y translocación, así como en el límite de fitotoxicidad se identificaron algunas especies para su uso potencial como extractoras o estabilizadoras de EPT. *Aster gymnocephalus* se clasificó como planta extractora de Zn, Cd, Pb y Cu, al igual que *Gnaphalium* sp., para Cu y *Crotalaria pumila* para Zn. *Pteridium* sp., es adecuada para fitoestabilización de Zn y Cd. Para estudiar la función de las plantas como barrera física que disminuye la dispersión de partículas que contienen EPT se compararon las concentraciones de dichos contaminantes en muestras de parte aérea de plantas lavadas y sin lavar. Se mostró que todas las especies retuvieron en sus hojas partículas que contienen EPT. En *Dichondra argentea* y *Viguiera dentata* la concentración de Zn en plantas no lavadas fue 14 veces mayor que en la de las lavadas. Las cubiertas vegetales compuestas por diversas especies vegetales presentaron al menos tres diferentes vías de remediación de suelos contaminados por EPT: i) estabilización en la raíz o en rizósfera, ii) acumulación en parte aérea y iii) retención de partículas que contienen EPT.

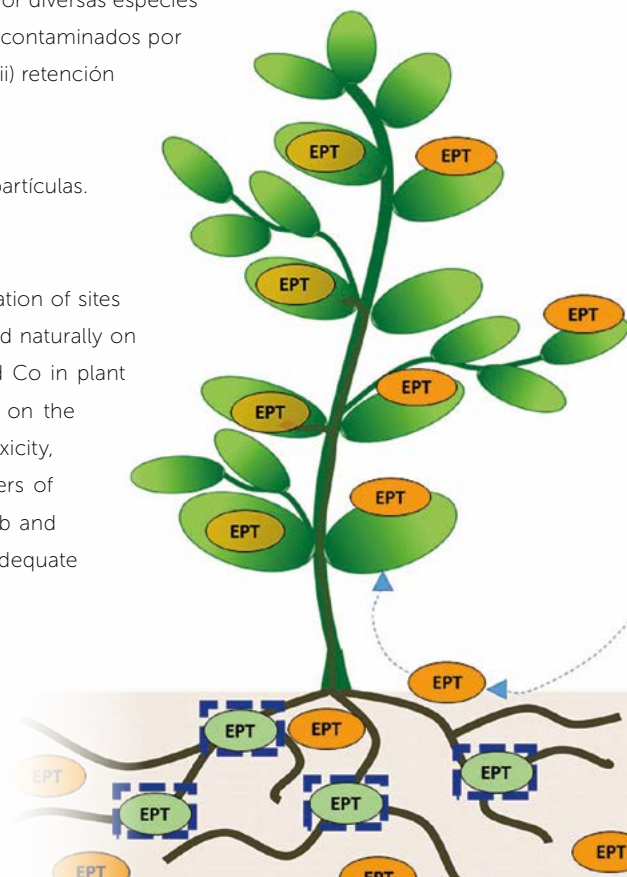
Palabras clave: fitoextracción, fitoestabilización, metales pesados, retención de partículas.

ABSTRACT

In order to evaluate the potential of different wild plant species in the remediation of sites contaminated by potentially toxic elements (PTEs), plants that were established naturally on mine residues were collected. The concentrations of Zn, Cd, Pb, Cu, Ni and Co in plant tissues were determined, as well as rhizosphere eden mine residues. Based on the factors of bioconcentration and translocation, as well as the limit of phytotoxicity, some species were identified for their potential use as extractors or stabilizers of PTEs. *Aster gymnocephalus* was classified as an extractor plant of Zn, Cd, Pb and Cu; and *Gnaphalium* sp., for Cu and *Crotalaria pumila* for Zn. *Pteridium* sp. is adequate

Agroproductividad: Vol. 10, Núm. 4, abril. 2017. pp: 80-86.

Recibido: enero, 2017. **Aceptado:** marzo, 2017.



for phytostabilization of Zn and Cd. To study the function of the plants as a physical barrier that decreases the dispersion of particles that contain PTE, the concentrations of these contaminants in samples from the aerial part of washed and unwashed plants were compared. It was shown that all the species retained on their leaves particles that contain PTEs. In *Dichondra argentea* and *Viguiera dentata* the concentration of Zn in unwashed plants was 14 times higher than the concentration on washed plants. The plant coverages composed by various plant species presented at least three different paths of remediation of soils contaminated by PTEs: i) stabilization on the root or the rhizosphere; ii) accumulation in the aerial part; and iii) retention of particles that contain PTEs.

Keywords: phytoextraction; phytostabilization; heavy metals; particle retention.

INTRODUCCIÓN

Como resultado de la explotación minera, se genera continuamente gran cantidad de residuos o jales. Estos se caracterizan generalmente por presentar concentraciones muy elevadas de diversos elementos potencialmente tóxicos (EPT) que pueden ser tóxicos (Zn, Cd, Pb, As, Cu, entre otros). Al permanecer continuamente expuestos a las condiciones ambientales su dispersión se presenta por viento, arrastre durante lluvias o lixiviación (Vangronsveld *et al.*, 1995 a, b; Jonathan *et al.*, 2010). Ante la problemática que causa la contaminación por EPT surge la fitorremediación como una alternativa viable para disminuir el riesgo de estos contaminantes (Peuke y Rennenberg, 2005). Esta consiste en el establecimiento de cubiertas vegetales, ya sea para evitar o disminuir la movilidad de los contaminantes, atrapándolos en la raíz de las plantas o en la rizósfera (fitoestabilización), o bien para extraer los contaminantes empleando especies que los acumulen en su tejido aéreo en altas concentraciones (fitoextracción) (Arthur *et al.*, 2005). Frecuentemente, los sitios contaminados presentan condiciones desfavorables para el establecimiento y desarrollo de las plantas, por lo que solamente algunas especies pueden crecer en esas condiciones (González y González-Chávez, 2006). Debido a ello, toma importancia la búsqueda de especies vegetales con la capacidad de establecerse

en sitios contaminados por EPT. Adicionalmente, se ha mencionado que la superficie de las plantas actúa como depósito de contaminantes en zonas urbanas (Nowak *et al.*, 2006). Sin embargo, poco se sabe acerca de esta función respecto a la retención de EPT provenientes de residuos de minas, por lo que el objetivo del presente trabajo fue estudiar diferentes vías en las que las plantas contribuyen en la remediación de sitios contaminados por EPT.

MATERIALES Y MÉTODOS

La recolecta de plantas y residuos de mina se realizó en los depósitos conocidos como San Francisco y Santa María en el municipio minero de Zimapán, Hidalgo, México. El material colectado consistió de plantas completas y residuos de mina de la zona radical (rizósfera). Los EPT (Zn, Cd, Pb, Cu, Ni y Co) disponibles y totales en la rizósfera se determinaron por extracción con DTPA (DTPA-TEA-CaCl₂) y digestión en HNO₃, respectivamente. Las concentraciones se midieron en un espectrofotómetro de absorción atómica. En cuanto a las plantas, cada muestra se dividió en raíz y parte aérea. Esta última a su vez se subdividió en lavada y sin lavar. El procedimiento del lavado de la parte aérea fue: agua corriente (10 min), detergente libre de P (5 min), agua destilada (5 min), HCl 10% (10 min) y agua desionizada (10 min). Las raíces se lavaron siguiendo el mismo protocolo, pero el tiempo en agua corriente y en HCl 10% se incrementó al doble. Una vez secas (64 °C, 72 h) y molidas, los tres tipos de muestra vegetal se digirieron en medio ácido: H₂O₂ y solución H₂SO₄:HClO₄. A partir de la concentración de EPT en raíz, parte aérea y rizósfera se calcularon los factores de bioconcentración (FBC) y translocación (FT) mediante fórmula:

$$FBC = \frac{\text{Concentración de EPT en parte aérea lavada}}{\text{Concentración de EPT extraída con DTPA en rizósfera}}$$

$$FT = \frac{\text{Concentración de EPT en parte aérea lavada}}{\text{Concentración de EPT en raíz}}$$

Para el análisis de partículas en la superficie de las hojas, previo secarlas y molerlas, de muestras lavadas y sin lavar se removieron y cuantificaron las partículas retenidas en éstas, mediante imágenes (150x) obtenidas en el microscopio electrónico de barrido y la composición

de las mismas se determinó empleando un microanalizador de rayos X.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

EPT en residuos de mina rizosféricos

La concentración de EPT en los residuos de mina rizosféricos fue variable entre sitios y especies vegetales; sin embargo, las que se observaron sugieren que son limitantes para su desarrollo. A pesar de ello fue posible encontrar especies vegetales, las cuales son potencialmente útiles en fitoremediación. En total, en ambos sitios se identificaron 12 especies vegetales, de las cuales cuatro se observaron en ambos sitios (Cuadro 1). Tomando en cuenta la concentración total de EPT en los residuos rizosféricos, el orden de abundancia fue Zn>Pb>Cu>Co>Ni>Cd. En el caso de las concentraciones totales de Pb todas las muestras superaron el límite máximo (800 mg kg⁻¹) para

suelo de uso industrial en México (NOM-147-SEMARNAT/SSA1, 2004), excepto por *Cuphea lanceolata* de San Francisco, *Crotalaria pumila*, *Flaveria trinervia* y *Dichondra argentea* del sitio Santa María, las rizósferas tuvieron concentraciones de Cd superiores al límite (37 mg kg⁻¹) señalado en la misma norma. Esta información confirma que los residuos de mina estudiados se pueden considerar como contaminados por EPT de acuerdo a la regulación mexicana. En la rizosfera de *Juniperus sp.* y *Dalea bicolor* en San Francisco, la concentración de Cd extraída con DTPA fue mayor que el límite indicado como peligroso para las plantas en la NOM-021-SEMARNAT-2002 (5 mg kg⁻¹). Las rizósferas de *Juniperus sp.*, *Brickellia veronicifolia*, ambas de San Francisco, y *Gnaphalium sp.* de Santa María, tuvieron concentración de Pb superior a la indicada (100 mg kg⁻¹) en la norma en mención.

Concentraciones de EPT en planta

La concentración de EPT en tejidos vegetales es útil para identificar plantas que acumulan o excluyen dichos contaminantes. Sin embargo, mejor aproximación representan los FBC y FT. El primero es la relación entre la concentración de EPT en el substrato y la concentración de este en la parte aérea de la planta. El FT es el cociente de la concentración de EPT en la parte aérea y en la raíz. Si el valor de ambos factores, FBC y FT es >1, la planta se considera extractora; si los valores son <1 hay mayor acumulación de EPT en la raíz y la planta se clasifica como estabilizadora (Yoon et al., 2006). Algunos autores han propuesto límites de fitotoxicidad para EPT (Vameralli et al., 2010), a partir de los cuales la mayoría de las plantas no podría desarrollarse adecuadamente. Tomando en cuenta los FBC y FT (Cuadro 1), así como los límites de fitotoxicidad (Figura 1),

Cuadro 1. Factores de Bioconcentración (FBC) y Transferencia (FT) de EPT en plantas creciendo en residuos de mina.

Especie/sitio	Zn		Cd		Pb		Cu		Ni		Co	
	FBC	FT	FBC	FT	FBC	FT	FBC	FT	FBC	FT	FBC	FT
San Francisco												
<i>Pteridium sp.</i>	0.7	0.2	1.1	0.1	2.6	0.2	10.0	0.4	7.7	0.4	14.0	0.4
<i>Juniperus sp.</i>	0.9	17.0	1.6	0.8	0.5	1.1	7.4	3.0	5.3	0.7	20.0	0.5
<i>Cuphea lanceolata</i>	7.7	6.7	4.6	0.6	2.4	0.6	30.0	3.9	1.6	0.5	170.0	0.6
<i>Dichondra argentea</i>	1.0	3.4	1.7	0.2	2.3	0.6	35.0	7.1	4.1	0.3	16.0	0.3
<i>Brickellia veronicifolia</i>	0.4	1.4	1.0	0.4	0.5	0.6	9.3	2.8	3.0	0.6	4.1	0.7
<i>Ruta graveolens</i>	0.4	2.5	2.4	0.3	2.2	1.0	11.0	2.9	4.8	0.8	20.0	0.7
<i>Dalea bicolor</i>	0.3	2.3	0.4	0.3	1.9	0.6	4.1	1.0	1.6	0.6	11.0	0.5
<i>Viguiera dentata</i>	0.6	0.9	2.0	0.2	2.6	0.5	10.0	1.2	2.6	0.6	10.0	0.5
Santa María												
<i>Aster gymnocephalus</i>	5.7	21.0	23.0	1.7	4.6	2.0	28.0	13.0	8.2	0.7	373.0	0.7
<i>Gnaphalium sp.</i>	8.6	21.0	27.0	1.2	1.7	1.6	125.0	28.0	7.3	0.8	31.0	1.2
<i>Viguiera dentata</i>	2.3	2.0	17.0	1.3	2.8	0.6	8.6	1.0	7.5	0.4	16.0	0.5
<i>Dalea bicolor</i>	2.7	3.3	32.0	1.3	4.6	0.9	8.0	1.6	8.6	0.5	7.8	0.5
<i>Crotalaria pumila</i>	27.0	12.0	20.0	1.4	12.3	1.1	6.6	9.2	7.4	0.6	9.8	0.6
<i>Brickellia veronicifolia</i>	2.2	4.2	16.0	1.4	4.2	1.3	3.8	1.4	4.7	0.5	12.0	0.5
<i>Flaveria trinervia</i>	4.8	11.0	75.0	1.1	8.6	1.0	55.0	5.6	11.0	0.5	45.0	0.6
<i>Dichondra argentea</i>	25.7	1.3	52.0	1.0	18.4	0.8	70.0	7.2	18.0	0.4	56.0	0.6

en este trabajo fue posible identificar especies potenciales en fitoextracción: *Aster gymnocephalus* para Zn, Cd, Pb, y Cu, *Gnaphalium* sp. para Cu y *C. pumila* para Zn. *Pteridium* sp. se clasificó como estabilizadora de Zn y Cd. Especies como *B. veronicifolia* y *Viguiera dentata* han sido reportadas como acumuladoras de Zn y Cu (Franco-Hernández et al. 2010; González and González-Chávez, 2006); *A. gymnocephalus* y *D. bicolor* como acumuladores de Pb y Zn, respectivamente (González and González-Chávez, 2006). Este hecho sugiere que dichas especies son altamente tolerantes a las condiciones de contaminación por EPT.

Retención de EPT en la superficie de las hojas

Los resultados de la concentración de EPT en parte aérea

rea sin lavar (Figura 1), así como el conteo y el análisis de partículas retenidas en hojas (Figura 2) mostraron que las plantas actúan como barrera física, evitando la dispersión de EPT. La concentración de EPT en muestras sin lavar registró hasta 14 veces más su valor que en muestras lavadas; por ejemplo: *D. argentea* de Santa María y *V. dentata* de San Francisco, ambas para Zn (Figura 1). En el caso de otros EPT, *C. lanceolata* fue la especie que retuvo la mayor proporción de Pb en sus hojas, mientras que *Pteridium* sp. y *V. dentata* de San Francisco retuvieron más Cd y Cu, respectivamente (Figura 1).

La cantidad de partículas retenidas en la superficie de hojas, fue mayor en plantas sin lavar que en lavadas

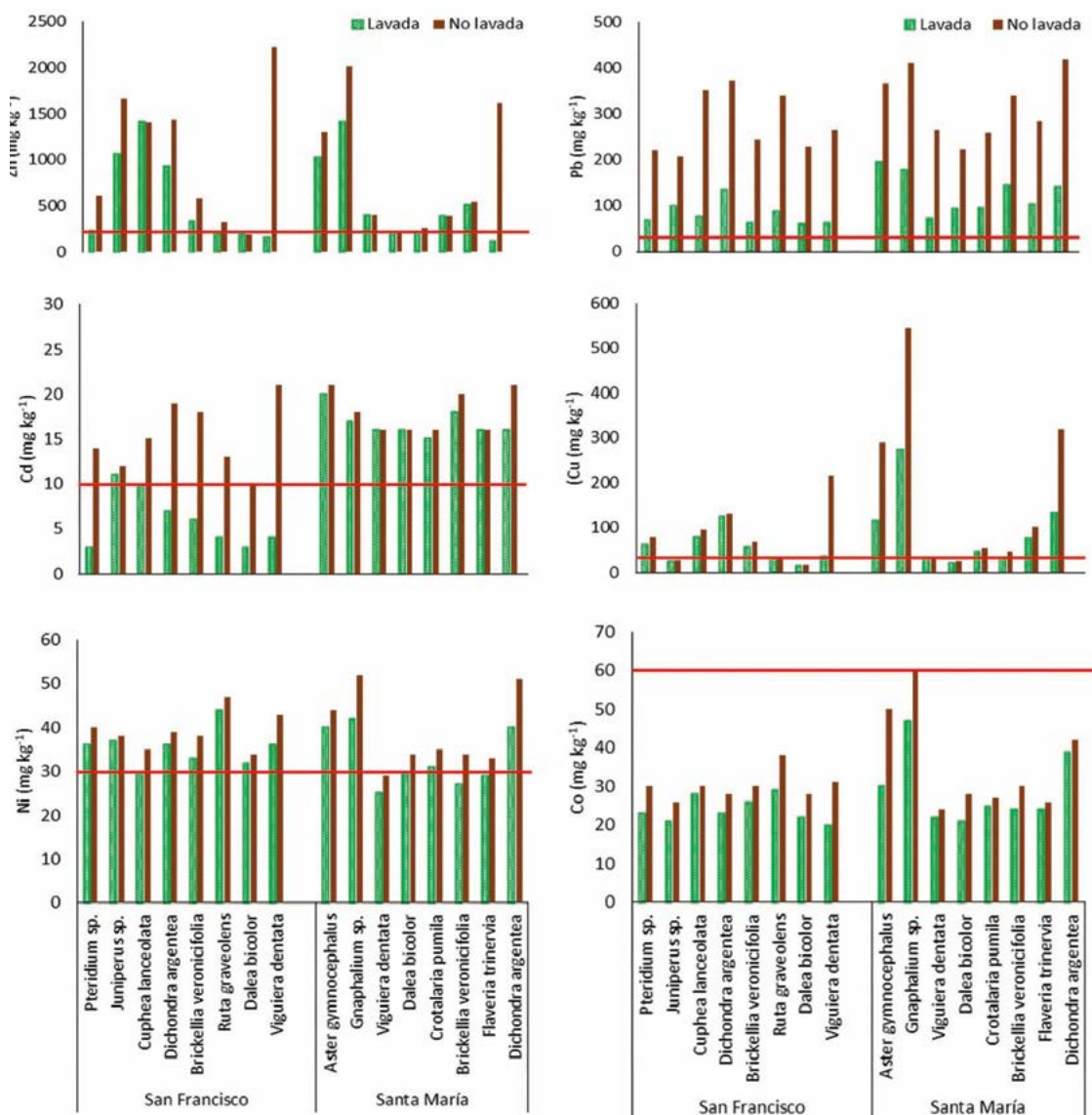


Figura 1. Concentración de EPT (mg kg⁻¹) en parte aérea de plantas encontradas en residuos de mina. Línea roja indica límite de fitotoxicidad, según reportes de Vamerli et al. (2010).

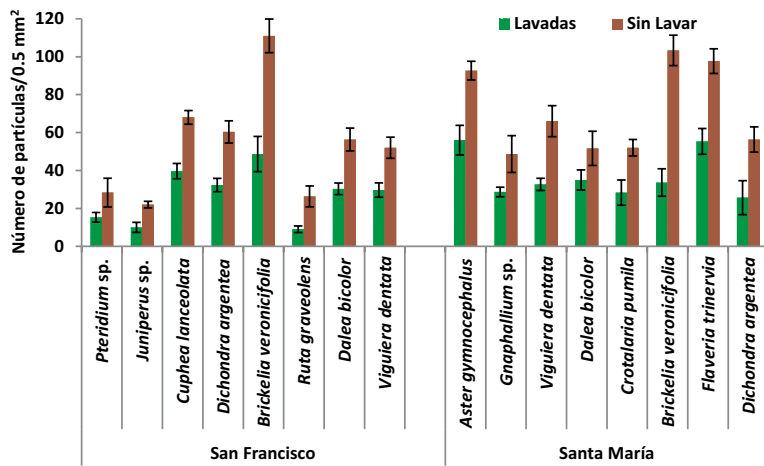


Figura 2. Cantidad de partículas en superficie de hojas de plantas encontradas en residuos de mina.

(Figura 2; Figura 3 A y B). La cantidad de partículas varió de acuerdo con las características morfológicas de las hojas de cada especie vegetal, principalmente la presencia y abundancia de tricomas, como en el caso de *D. argentea*, *A. gymnocephalus* y *Gnaphalium* sp. (Figura 3 C, D y E). Las partículas también se observaron retenidas por otras estructuras que forman cavidades en la superficie; por ejemplo: venas y estomas (Figura 3 F y G). Además de las características de las hojas, también se observó micelio fúngico reteniendo partículas en su superficie (Figura 3C). El análisis con rayos X (Figura 4) demostró que las partículas retenidas en hojas contienen EPT.

Previamente se ha documentado la importancia de las plantas en la retención de contaminantes como óxidos de nitrógeno y azufre (Nowak et al., 2006), y materia particulada en ambientes urbanos (Fujiwara et al. 2011), y con base en las evidencia aquí mostradas, este trabajo constituye el primer reporte respecto a la función de las plantas como barrera física, evitando la dispersión de EPT provenientes de residuos de mina.

CONCLUSIONES

Las plantas que crecen en residuos de minas son una alternativa para su uso en fitorremediación. En este trabajo se reconocen tres principales vías, por las cuales las plantas actúan en la remediación de los residuos de mina (Figura 5): acumulación de EPT en tejido aéreo, estabilización en la raíz y en la rizósfera, y como barreras físicas, lo cual disminuye la dispersión de partículas que contienen EPT.

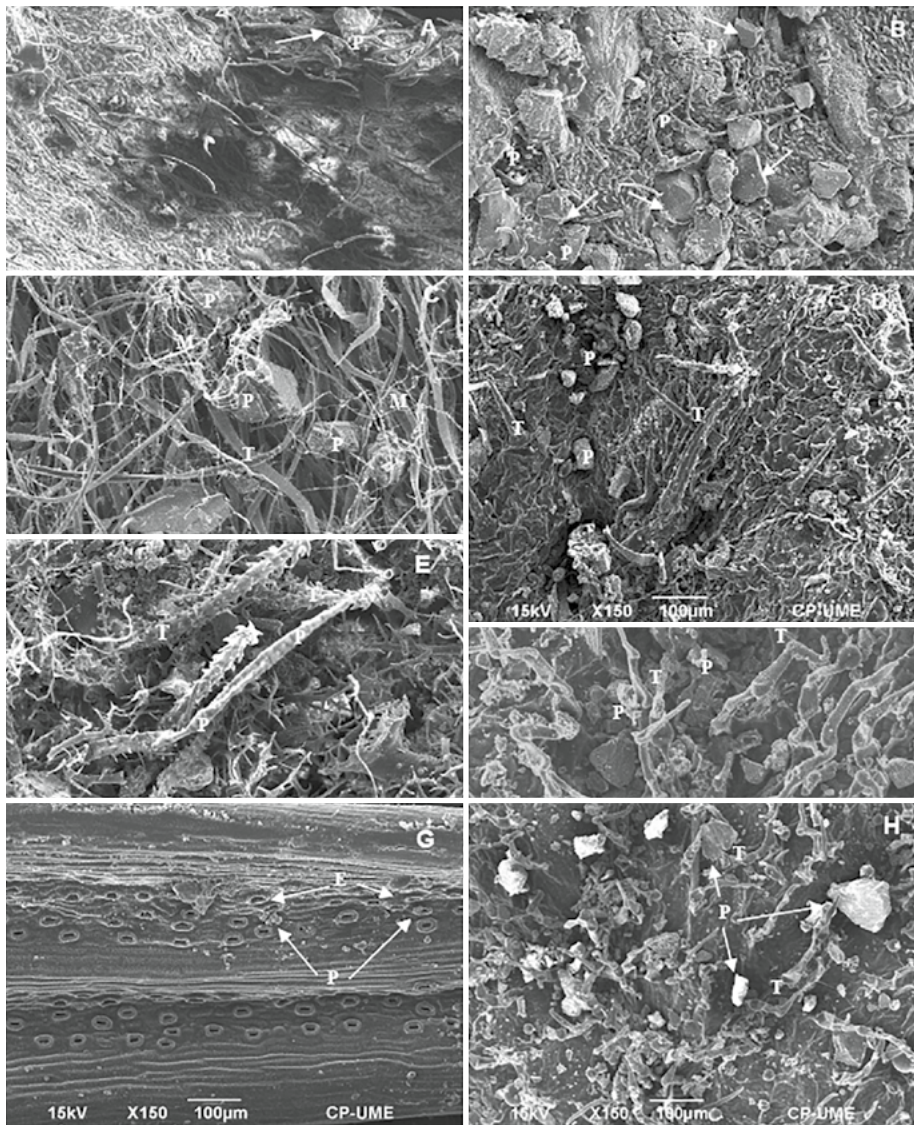


Figura 3. Presencia de partículas en la superficie de hojas de plantas creciendo en residuos de mina. *D. bicolor* lavada (A) y sin lavar (B); *D. argentea* (C), *A. gymnocephalus* (D), *Gnaphalium* sp. (E), *Juniperus* sp. (G) y *C. lanceolata* (H); P: partículas; T: tricomas; V: vena; E: estomas; M: micelio.

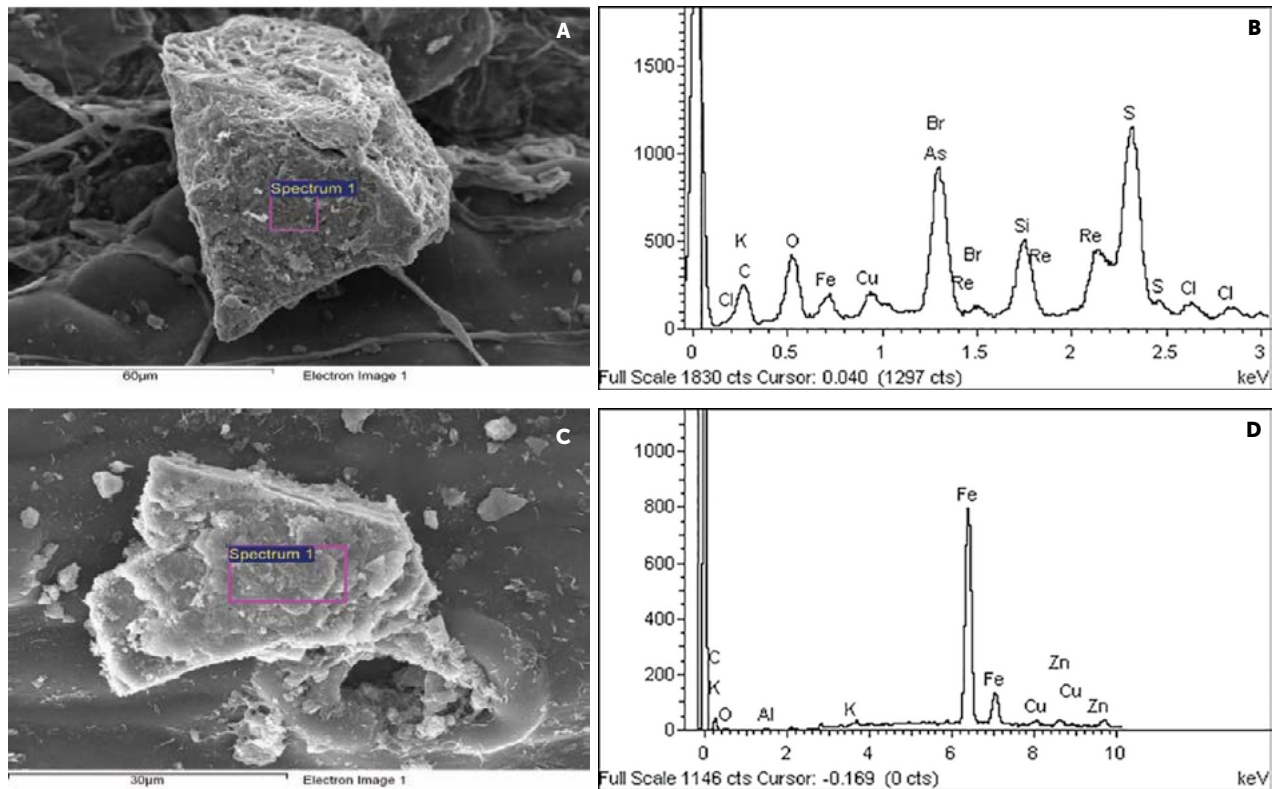
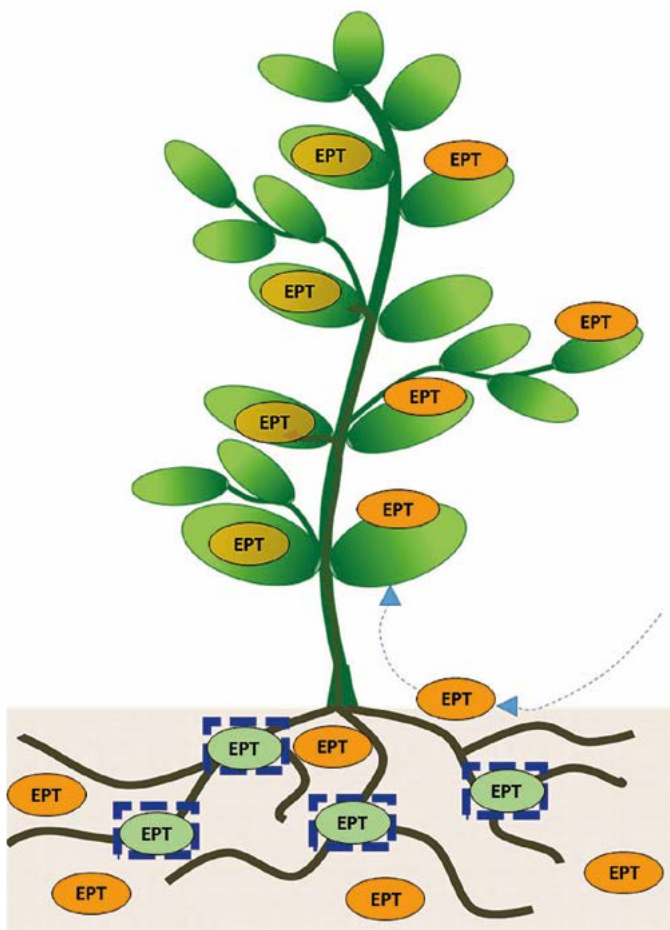


Figura 4. Imágenes y composición de partículas retenidas en hojas sin lavar de *V. dentata* (A, B) y *Juniperus* sp. (C, D), creciendo en residuos de mina. Rectángulos rosas muestran en área específica en donde se realizó análisis de con rayos X.



LITERATURA CITADA

- Arthur E.L., Rice P.J., Rice P.J., Anderson T.A., Baladi S.M., Henderson K.L.D., Coats J.R. 2005. Phytoremediation-an overview. *Critical Reviews in Plant Science* 24,109–122.
- Franco-Hernández M.O., Vásquez-Murrieta M.S., Patiño-Sicialiano A., Dendooven L. 2010. Heavy metals concentration in plants growing on mine tailings in Central Mexico. *Bioresource Technology* 101, 3864–3869.
- Fujiwara F.G., Gómez D.R., Dawidowski L., Perelman P., Faggi A. 2011. Metals associated with airborne particulate matter in road dust and tree bark collected in a megacity (Buenos Aires, Argentina). *Ecological Indicators* 11, 240–247.
- González R., González-Chávez M.C.A. 2006. Metal accumulation in wild plants surrounding mining wastes. *Environmental Pollution* 144, 84-92.
- Jonathan M.P., Jayaprakash M., Srinivasalu S., Roy P.D., Thangadurai N., Muthuraj S., Stephen-Pitchaimani V. 2010. Evaluation of acid leachable trace metals in soils around a five centuries old mining district in Hidalgo, Central Mexico. *Water, Air and Soil Pollution* 205, 227-236.

Figura 5. Vías de remediación vegetal (fitorremediación) de sitios contaminados por EPT:

- Estabilización de EPT en la raíz y en la rizósfera (fitoestabilización)
- Acumulación de EPT en la parte aérea de la planta (fitoextracción)
- Depósito externa de partículas que contienen EPT en hojas (fitobarreras)

- Nowak D.J., Crane D.E., Stevens J.C. 2006. Air pollution removal by urban trees and shrubs in the United States. *Urban Forestry & Urban Greening* 4, 115–123.
- Peuke A.D., Rennenberg H. 2005. Phytoremediation. *EMBO Reports* 6:497–501.
- Vamerli T., Bandiera M., Mosca G. 2010. Field crops for phytoremediation of metal-contaminated land. A review. *Environmental Chemical Letters* 8, 1–17.
- Vangronsveld J., Sterckx J., Van Assche F., Clijsters H. 1995a. Rehabilitation studies on an old non-ferrous waste dumping ground: effects of revegetation and metal immobilization by beringite. *Journal of Geochemical Exploration* 52, 221-229.
- Vangronsveld J., Van Assche F., Clijsters H. 1995b. Reclamation of a bare industrial area contaminated by non-ferrous metals: in situ metal immobilization and revegetation. *Environmental Pollution* 87, 51-59.
- Yoon J., Cao X., Zhou Q., Ma L.Q. 2006. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. *Science of the Total Environment* 368, 456-464.

