

FACTORES QUE CONDICIONAN LA DISPONIBILIDAD DE ELEMENTOS TRAZA DEL SUELO EN REPOBLACIONES FORESTALES DE LA CUENCA DEL RÍO GUADIAMAR (SEVILLA)

María Teresa Domínguez Núñez*, Fernando Madrid Díaz, Teodoro Marañón Arana y José Manuel Murillo Carpio

IRNAS, CSIC. Av. Reina Mercedes 10. 41012-SEVILLA (España). *Correo electrónico: maitedn@imase.csic.es

Resumen

En este trabajo se analizan los patrones de biodisponibilidad de elementos traza (ET) en suelos contaminados por un vertido minero y que han sido reforestados en la Cuenca del Guadamar (Sevilla). A lo largo de un gradiente de contaminación, se analizaron los contenidos totales de elementos traza del suelo, así como los niveles biodisponibles y otros factores físico-químicos (textura, pH, nivel de carbonatos y materia orgánica, y capacidad de cambio) y se compararon con los niveles acumulados de ET en las hojas de plantones de encina (*Quercus ilex* subsp. *ballota*) y álamo blanco (*Populus alba*), plantados en los suelos analizados. De todos los factores analizados, el pH fue el que más influyó sobre los niveles biodisponibles de elementos traza del suelo. Sin embargo, estos niveles tuvieron escasa influencia en la acumulación foliar de elementos traza de las especies estudiadas, con excepción del Zn en las hojas del álamo blanco. Los resultados sugieren que, a pesar de que los factores edáficos pueden controlar los niveles disponibles de estos elementos en el suelo, distintos mecanismos fisiológicos a nivel de especie (como la capacidad de retención de ET en la raíz) pueden resultar más determinantes para la traslocación y acumulación de los elementos traza en las hojas, donde podrían causar distintos efectos ecotóxicos.

Palabras clave: Metales pesados, Biodisponibilidad, pH, *Quercus ilex*, *Populus alba*, Reforestación

INTRODUCCIÓN

La contaminación del suelo puede contribuir al decaimiento forestal, y disminuir el éxito de las repoblaciones forestales en zonas degradadas. Los elementos traza (ET) tienen normalmente concentraciones muy bajas en los suelos, pero distintas actividades antrópicas han alterado sus ciclos biogeoquímicos y han aumentado sus concentraciones tanto en suelos agrícolas como forestales en las últimas décadas (ADRIANO, 2001). En sistemas forestales, la

contaminación por ET puede tener distintas consecuencias ecológicas, desde la inhibición de la actividad de los microorganismos del suelo y la micorrización (JENTSKE & GOLDBOLD, 2000) hasta alteraciones en la nutrición de los árboles, por la toxicidad causada a nivel de raíz (NAIDU et al., 2001). Estos posibles efectos dependen de los niveles biodisponibles (relativamente móviles) de ET en los suelos, que pueden ser muy distintos a los niveles totales, en función de distintos factores edáficos como la textura, pH, contenido en

carbonatos y materia orgánica, o capacidad de intercambio catiónico (GREGER, 1999).

En este trabajo estudiamos cuál es la influencia relativa de estos factores edáficos en los niveles de biodisponibilidad de algunos elementos traza potencialmente tóxicos (Cd, Cu, Pb y Zn), en suelos contaminados de la cuenca del Guadamar (Sevilla), que fueron reforestados con especies leñosas mediterráneas tras el accidente minero de 1998. Se compararon los patrones de biodisponibilidad en los suelos con los de acumulación foliar en dos de las especies arbóreas más importantes de la zona, como son *Quercus ilex* subsp. *ballota* (encina) y *Populus alba* (álamo blanco). Con todo ello pretendíamos: 1) conocer cuales son las variables del suelo que pueden condicionar en mayor grado la posible toxicidad de los elementos traza; 2) conocer la respuesta de las principales especies forestales de la zona a la contaminación residual del suelo, en lo que se refiere a la bioacumulación en la biomasa aérea y 3) extraer conclusiones útiles para la gestión de la zona con la información obtenida.

MATERIAL Y MÉTODOS

Durante el otoño de 2005, realizamos un muestreo de suelos y plantas en 19 puntos a lo largo del Corredor Verde del Guadamar (Sevilla), analizando un total de 234 muestras de suelo y 117 de plantas (DOMÍNGUEZ et al., 2007). Para este estudio se han seleccionado 18 individuos de *Q. ilex* y 18 de *P. alba*, de los que cogimos muestras de hojas de la parte exterior de la copa, y tomamos muestras del suelo (profundidad 0-25 cm) alrededor de cada árbol seleccionado. Las muestras de suelo fueron secadas, molidas y tamizadas (< 2 mm), y se analizaron las siguientes variables: pH (extracto suelo:agua 1:2,5), contenido en carbonatos (mediante calcímetro de Bernard), materia orgánica (oxidación con dicromato potásico) y capacidad de intercambio catiónico (método del acetato amónico). Para el análisis las concentraciones totales de Cd, Cu, Pb y Zn una parte de cada muestra fue molida hasta polvo impalpable (< 1mm) y digerida con HNO₃ y HCL (agua regia); los elementos traza fueron determinados

por espectroscopia de masas con plasma acoplado inductivamente (ICP-MS). Los niveles biodisponibles de elementos traza del suelo fueron analizados mediante extracción con nitrato amónico 1M y determinación por absorción atómica. Las muestras de plantas fueron secadas, molidas y digeridas con HNO₃; las concentraciones de elementos traza fueron determinadas por ICP-MS.

La relación entre las distintas variables del suelo estudiadas (pH, carbonatos, materia orgánica, capacidad de cambio y concentraciones totales de elementos traza) y los niveles disponibles de dichos elementos fue analizada mediante modelos lineales de regresión múltiple. Previamente se realizaron transformaciones logarítmicas para mejorar la normalidad de las variables. Se calcularon los coeficientes de transferencia suelo-planta (CT) para cada especie y elemento, como los cocientes entre las concentraciones totales en suelos y las concentraciones de los mismos elementos en hojas. Las relaciones entre la acumulación en las hojas (concentraciones foliares y CT) y los factores del suelo (principalmente pH y niveles biodisponibles de elementos traza) fueron analizadas mediante correlaciones lineales simples.

RESULTADOS

Los suelos estudiados presentaron una amplia heterogeneidad en los factores que, potencialmente, pueden condicionar la disponibilidad de elementos traza (Tabla 1).

Por ejemplo, los valores de pH oscilaron desde 2,4 (suelos extremadamente ácidos) a 8,2. Esta acidificación observada en algunos suelos puede estar originada en la oxidación de la piritita contenida en los restos de lodo aun presentes en la zona. El contenido en carbonatos también presentó una amplia variabilidad (con un coeficiente de variación superior a 130%), así como los niveles de materia orgánica. Las amplias variaciones en la capacidad de intercambio catiónico pueden estar originadas en los distintos tipos de textura de los suelos a lo largo de la zona de estudio, siendo los suelos mayoritariamente franco-arenosos en las zonas más situadas al norte del Corredor Verde, francos en las zonas

Factores edáficos		Elementos traza totales (mg kg ⁻¹)		Elementos traza disponibles (mg kg ⁻¹)	
pH	6,4 ± 0,3 (28%)	Cd	1,24 ± 0,17 (80%)	Cd	0,12 ± 0,02 (116%)
Carbonatos (%)	3,2 ± 0,7 (133%)	Cu	130 ± 10,8 (50%)	Cu	4,57 ± 1,76 (230%)
Materia orgánica (%)	2,3 ± 0,2 (40%)	Pb	283 ± 61 (130%)	Pb	0,45 ± 0,05 (68%)
CIC	19,3 ± 2,4 (74%)	Zn	420 ± 48 (69%)	Zn	17,6 ± 6,3 (216%)

Tabla 1. Valores de las distintas variables del suelo estudiada (media ± error estándar). Se indica entre paréntesis el coeficiente de variación (CV) de cada variable. CIC: capacidad de intercambio catiónico

centrales y franco-arcillosos en las zonas más al sur, próximas al Espacio Natural de Doñana.

Al tratarse de zonas afectadas por el vertido minero, las concentraciones totales de elementos traza fueron relativamente altas (Tabla 1), en particular las de Pb y Zn, que superaron los niveles de intervención propuestos para Andalucía por AGUILAR *et al.* (1999) (200 y 300 mg.kg⁻¹ respectivamente).

La mayor heterogeneidad (indicada por el coeficiente de variación) se observó en los niveles disponibles de elementos traza. Los mayores niveles se registraron en los suelos ácidos, donde las concentraciones de Cu, Pb y Zn fueron de 32, 44 y 80 mg.kg⁻¹, respectivamente, mientras que en la mayoría de los suelos neutros o básicos las concentraciones disponibles fueron inferiores a 1 mg.kg⁻¹.

De los factores estudiados, el pH fue con diferencia la variable con mayor influencia en los niveles disponibles (Tabla 2). Los modelos de regresión múltiple obtenidos para Cd, Cu y Zn fueron bastante explicativos de la variabilidad de las concentraciones disponibles ($r^2 > 0,70$), y en ellos el pH fue la variable predictora con mayor importancia relativa (indicado por el coeficiente en la ecuación de la regresión, de signo negativo). En el caso de Cd y Cu, los modelos incluyeron también la capacidad de cambio catiónico y el contenido en carbonatos,

respectivamente, aunque su influencia relativa fue mucho menor que la del pH del suelo. Sólo en caso del Pb, el pH no fue significativamente un factor explicativo de los niveles de disponibilidad en los suelos.

Las concentraciones en las hojas de las especies estudiadas siguieron distintos patrones, dependiendo de la especie. Para *Q. ilex*, las concentraciones de Cd, Cu, Pb y Zn fueron relativamente bajas (0,20; 10,7; 2,66 y 75,7 mg.kg⁻¹, respectivamente), y se mantuvieron dentro de los niveles considerados normales para plantas superiores (CHANEY, 1989). Por el contrario, las hojas de *P. alba* presentaron concentraciones de Cd y Zn de hasta 3,5 y 514 mg.kg⁻¹, respectivamente, niveles que superan los rangos normales en plantas superiores. Cadmio y Zn fueron los elementos con una mayor movilidad en el sistema suelo-planta, indicado por el Coeficiente de Transferencia (CT, Figura 1). En particular, la transferencia de Cd y Zn a las hojas de *P. alba* fue especialmente alta, mostrando esta especie CT mayores que 1 para estos elementos, lo cual indica que las concentraciones en hojas fueron mayores que las respectivas concentraciones en suelos.

Las concentraciones disponibles de elementos traza en suelos, extraídas con nitrato amónico, estuvieron escasamente relacionadas con las concentraciones en las hojas de las especies estudiadas. Tan sólo en el caso del Zn en *P. alba*

Variable	Regresión múltiple	r^2	p
Cd _{disp}	-2,14·pH + 0,25·CIC + 0,37·Cd _{total} + 0,32	0,73	<0,0001
Cu _{disp}	-4,35·pH + 0,14·CO ₃ + 0,27·Cu _{total} + 1,48	0,86	<0,0001
Pb _{disp}	0,95·Pb _{total} + 0,43	0,43	0,0002
Zn _{disp}	-6,40·pH + 1,32·Zn _{total}	0,78	<0,0001

Tabla 2. Resultados de los modelos de regresión múltiple entre las concentraciones disponibles (_{disp}) de elementos traza (variables dependientes) y el resto de factores de suelo estudiados (variables predictoras). CO₃: contenido en carbonatos; CIC: capacidad de intercambio catiónico

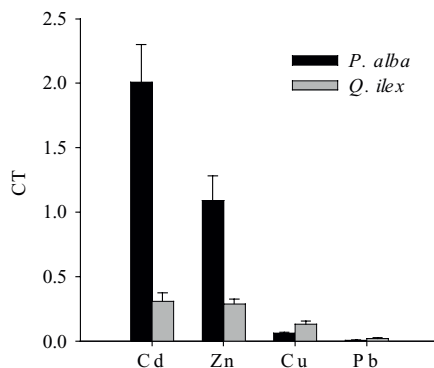


Figura 1. Coeficientes de transferencia (CT) suelo-planta para cada elemento y especie (media y barra de error estándar)

hubo una correlación positiva y significativa entre la disponibilidad en los suelos y la acumulación en las hojas ($r = 0.50$, $p=0,036$). Asimismo, los coeficientes de transferencia estuvieron escasamente relacionados con el pH del suelo (factor decisivo en la disponibilidad de elementos traza); de nuevo, la única relación significativa entre pH y CT tuvo lugar para el Zn en las hojas de *P. alba* ($r = -0,58$, $p=0,011$).

DISCUSIÓN

El pH del suelo es el factor que más condiciona la disponibilidad de elementos traza potencialmente tóxicos en los suelos reforestados de la cuenca del Guadiamar, en especial de Cd, Cu y Zn, que son los elementos que muestran una mayor transferencia suelo-planta. Estos resultados coinciden con trabajos de otros autores, en los que se muestra que Cd, Zn, y en menor medida Cu, son elementos con una alta movilidad en los suelos, y que dicha movilidad es dependiente del pH (BURGOS et al., 2006; PODLESÁKOVÁ et al., 2001).

Sin embargo, las concentraciones de estos elementos en las hojas de los árboles no siguieron el mismo patrón de variación que los niveles disponibles en los suelos. Por el contrario, sólo hubo una correlación significativa entre las concentraciones foliares y las concentraciones disponibles en los suelos (Zn en *P. alba*), y los coeficientes de transferencia suelo-planta de los elementos potencialmente más móviles (Cd, Cu

y Zn) estuvieron escasamente influenciados por el pH del suelo. A pesar de los aumentos en la disponibilidad de elementos traza a nivel de suelo, la concentración foliar está influida por la fisiología de cada especie, que determina las tasas de entrada, transporte y acumulación de estos elementos en la biomasa aérea. Los mecanismos fisiológicos que determinan la acumulación en las hojas de elementos traza pueden ser muy distintos en función de la especie y el elemento. Por ejemplo, en otros estudios hemos comprobado que, para *Q. ilex*, la retención en la raíz parece ser el principal mecanismo que evita el transporte de Cd hacia los tejidos fotosintéticos, mientras que el Tl es escasamente retenido y se transporta en mayor medida hacia las hojas, donde puede provocar mayor toxicidad.

El riesgo de acumulación de estos elementos en la biomasa aérea de las plantas, y por tanto, de transferencia a lo largo de la red trófica puede depender de estas diferencias fisiológicas. Para una mayoría de especies leñosas mediterráneas, el riesgo de acumulación de elementos traza en condiciones semiáridas es bajo (DOMÍNGUEZ et al., 2007). Sin embargo, las hojas de *P. alba* pueden acumular Cd y Zn hasta concentraciones superiores a las del suelo (véanse también MADEJÓN et al., 2004; ROBINSON et al., 2000). Este aspecto debería ser considerado a la hora de planificar la plantación de individuos de *P. alba* en suelos contaminados por Cd y Zn.

El hecho de que la traslocación de elementos traza a la parte aérea sea, salvo excepciones, baja no excluye que puedan provocarse daños a

nivel de raíz. Descensos en el pH del suelo pueden provocar toxicidad en la raíz, resultando en deficiencias en la asimilación de varios nutrientes, como P, Ca o Mg (BAKKER et al., 1999, CARREIRA et al., 1997). Además, existe un mayor riesgo de lixiviación de elementos traza solubles, hacia las aguas subterráneas o superficiales, al haber condiciones de extrema acidez que incrementan la solubilidad de los elementos traza estudiados.

CONCLUSIONES

El pH del suelo es el factor que condiciona en mayor medida la disponibilidad de elementos traza, potencialmente tóxicos, en los suelos reforestados de la cuenca del Guadiamar (Sevilla). Condiciones de acidez extrema, como las observadas en algunos de los suelos muestreados, incrementan, por tanto, el riesgo de lixiviación de estos elementos y el riesgo de toxicidad para las plantas a nivel de raíz. A nivel de hoja, sin embargo, las concentraciones de elementos traza no reflejan, salvo en el caso del Zn en *P. alba*, las condiciones de acidez/disponibilidad del suelo. Para la gestión del Corredor Verde, así como de otras zonas contaminadas por elementos traza, sería muy recomendable la monitorización de las condiciones de pH, y la corrección de situaciones de extrema acidez. Asimismo, se debería considerar la transferencia suelo-planta de elementos traza de cada especie, fomentando la utilización de aquellas especies que mantengan bajos niveles de estos elementos en las partes aéreas, para minimizar los riesgos de transferencia a la cadena trófica.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del proyecto SECOVER (Seguimiento Ecorregional del Corredor Verde del Guadiamar), de la Consejería de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. MTD ha disfrutado de una beca FPU del Ministerio de Educación y Ciencia. Esta investigación forma parte de las redes de ecología forestal REDBOME (en Andalucía) y GLOBIMED (en España).

BIBLIOGRAFÍA

- ADRIANO, D.C. 2001; *Trace Elements in Terrestrial Environments: Biochemistry, Bioavailability and Risks of Metals*. Springer-Verlag. Nueva York.
- AGUILAR, J.; DORRONSORO, C.; GÓMEZ-ARIZA, J.L. & GALÁN, E.; 1999. *Los criterios y estándares para declarar un suelo contaminado en Andalucía y la metodología y técnicas de toma de muestras y análisis para su investigación*. Investigación y Desarrollo Medioambiental en Andalucía. Sevilla.
- BAKKER, M.R.; KERISIT, R.; VERBIST, K. & NYS, C.; 1999. Effects of liming on rhizosphere chemistry and growth of fine roots and of shoots of sessile oak (*Quercus petraea*). *Plant Soil* 217: 243–255.
- BURGOS, P.; MADEJÓN, E.; PÉREZ-DE-MORA, A. & CABRERA, F.; 2006. Spatial variability of the chemical characteristics of a trace-element-contaminated soil before and after remediation. *Geoderma* 130: 157-175.
- CARREIRA, J.A.; HARRISON, A.F.; SHEPPARD, L.J. & WOODS, C.; 1997. Reduced soil P availability in a Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong. 1 Carr) plantation induced by applied acid-mist: significance in forest decline. *Forest Ecol. Manage* 92: 153-166.
- CHANEY, R.L.; 1989. Toxic element accumulation in soils and crops: protecting soil fertility and agricultural food chains. In: B. Bar-Yosef, N.J. Barrow & J. Goldshmid (eds.), *Inorganic Contaminants in the Vadose Zone*: 140-158. Springer-Verlag. Berlín.
- DOMÍNGUEZ, M.T.; MARAÑÓN, T.; MURILLO, J.M.; SCHULIN, R. & ROBINSON, B.H.; 2007. Trace element accumulation in woody plants of the Guadiamar valley, SW Spain: a large scale phytomanagement case study. *Env. Poll.* (en prensa, doi:10.1016/j.envpol.2007.05.021).
- GREGER, M.; 1999. Metal availability and bio-concentration in plants. In: M.N.V. Prasad & J. Hagemeyer (eds.), *Metals in the environment. Analysis by biodiversity*: 1-27. Marcel Dekker. Nueva York.
- JENTSCHKE, G. & GODBOLD, D.L.; 2000. Metal toxicity and ectomycorrhizas. *Physiologia Plantarum* 109: 107–116.

- MADEJÓN, P.; MARAÑÓN, T.; MURILLO, J.M. & ROBINSON, B.; 2004. White poplar (*Populus alba*) as a biomonitor of trace elements in contaminated riparian forests. *Env. Poll.* 132: 145-155.
- NAIDU R.; KRISHNAMURTI, G.S.R.; BOLAN, N.S.; WENZEL, W. & MEGHARAJ, M. 2001. Heavy metal interaction in soils and implications for soil microbial biodiversity. In: M.N.V Prasad & J. Hagemeyer (eds.), *Metals in the environment. Analysis by biodiversity*: 401-432 Marcel Dekker. Nueva York.
- PODLESÁKOVÁ, E., NEMECEK, J. & VÁCHA, R. 2001, Mobility and bioavailability of trace elements in soils. In: I.K. Iskandar & M.B. Kirkham, (eds.). *Trace elements in soils: bioavailability, flux and transfer*: 21-42. Lewis Publishers. Boca Raton, Florida.
- ROBINSON, B.H.; MILLS, T.M.; PETIT, D.; FUNG, L.E.; GREEN, S.R. & CLOTHIER, B; 2000. Natural and induced cadmium-accumulation in poplar and willow: Implications for phytoremediation. *Plant and Soil* 227: 301-306.