



Congreso Nacional del Medio Ambiente
Cumbre del Desarrollo Sostenible

COMUNICACIÓN TÉCNICA

Contenidos de metales pesados en gramíneas de ecosistemas desarrollados sobre antiguas minas abandonadas de Madrid y Castilla-La Mancha

Autor: Jesús Pastor Piñeiro

Institución: Departamento de Ecología de Sistemas, Instituto de Recursos
Naturales, Centro de Ciencias Mediambientales del CSIC
E-mail: jpastor@ccma.csic.es

Otros autores: Ana Jesús Hernández (Dpto. de Ecología, Universidad de Alcalá)

RESUMEN:

Con miras a obtener pautas para la remediación de los suelos que presentan problemas de metales pesados, este trabajo se centra en el estudio de 600 muestras de especies de gramíneas, pertenecientes a más de 23 géneros y que hemos recogido en los siguientes emplazamientos: a) ecosistemas sobre antiguas minas abandonadas, b) ecosistemas con suelos antropizados por diversas causas, así como en c) ecosistemas de los entornos de los emplazamientos a y b, que nos van a servir de referencia para el estudio, ya que se corresponden generalmente con pastizales seminaturales sin contaminación. En los resultados expuestos para los metales pesados de la parte aérea de 35 especies de gramíneas que crecen en estos medios, hemos observado lo que se destaca a continuación: (1) mejor comportamiento de las especies de esta familia botánica, respecto a metales como el Zn, que con respecto a otros, como Cu, Pb, Cr, Cd, As; (2) *Agrostis castellana*, *Vulpia bromoides*, *V. myuros*, *Holcus setiglumis* y *H. lanatus*, presentan un interesante potencial, no sólo como plantas tolerantes, sino como acumuladoras de Zn; (3) especies del género *Bromus* también presentan interés, especialmente por lo bien y abundantemente que crecen en suelos antropizados, así como en los de cubrición de escombreras y vertederos, aunque con menores niveles de este elemento, que los que presentan los suelos de las minas; (4) es también muy destacable el comportamiento de *Corynephorus canescens* respecto al Cu, por su relevante acumulación de este metal en la parte aérea y por su constancia, es decir siempre con valores a tener en cuenta en todas las muestras recogidas. Estos resultados nos llevan a concluir el interés que tiene para nuestro país el conocimiento de la acumulación de metales pesados en la vegetación autóctona que crece en las condiciones normales de campo para ser referentes, en cuanto a acciones restauradoras, del impacto de la contaminación. Por otra parte, ello ha de tenerse en cuenta respecto a que dichas especies pueden ser importantes en la red trófica, implicando problemas de sanidad en herbívoros (ovino y vacuno) que pastan en emplazamientos de minas abandonadas y, en consecuencia, para nuestra propia especie. Agradecimientos: A los Proyectos CTM2005-02165/TECNO del Ministerio de Educación y Ciencia y al CTM2008-04827 Del Ministerio de Ciencia e Innovación así como al Programa EIADES de la Comunidad de Madrid.

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, cantidades importantes de suelos se encuentran contaminados por metales pesados en España, Europa y resto del mundo. En nuestro país, como consecuencia de la existencia de antiguos vertederos de residuos, adición de lodos con exceso de metales a suelos agrícolas, diferentes actividades industriales y explotaciones mineras actuales y abandonadas, e incluso por causas naturales, como es el afloramiento en superficie de rocas que contienen metales pesados que posteriormente pasan al suelo por la acción de la erosión.

Dichos suelos necesitan ser recuperados y revegetados por diferentes medios (Jordan, 1987; Hester and Harrison, 1997; McCutcheon, 2003). Este tema suscita un interés creciente (López-Arias y Grau, 2005), y va a exigir un esfuerzo por las autoridades españolas en los próximos años, como consecuencia de las nuevas directivas sobre protección de suelos, emanadas de la UE (Directiva 2004/35/EC).

Para ser realistas en la gestión de la descontaminación de suelos en los escenarios aludidos anteriormente, pensamos en la posibilidad que pueden tener especies de gramíneas silvestres (anuales y perennes) para ser utilizadas, tanto en técnicas de fitoacumulación o fitoestabilización de metales, como de revegetación. Lógicamente, la primera aproximación a esta investigación radica en el conocimiento de los niveles de dos de los metales (Zn y Cu), de los que se considera, por ese orden, que son los más frecuentes en los suelos contaminados industriales y urbanos del centro de España (M.O.P.T.M.A. 1994) y también principalmente en la Comunidad de Madrid, según un estudio realizado en 1998, y en antiguas zonas mineras (González de Tanago-Chanrai, J. y González de Tanago-Del Rio, 2002).

Las gramíneas son especies frecuentes en los ecosistemas que se ubican en estos suelos y, por tanto, conocer sus niveles de acumulación de metales significa saber su potencialidad para que estas especies puedan ser utilizadas en labores de revegetación o descontaminación de los mismos.

Las hipótesis principales de partida que deseamos comprobar en una investigación más amplia a los objetivos abordados en este trabajo, son:

- 1) Si nuestro conocimiento de las gramíneas como grupo de la ecología funcional en los sistemas de pastos mediterráneos, puede ponerse al servicio de la descontaminación de suelos afectados por metales pesados (sistemas radiculares, autoecología, ecofisiología de la nutrición mineral, estrategias adaptativas en las etapas sucesionales), y
- 2) Probar si existe una relación entre el comportamiento de los metales pesados de la capa superficial del suelo y la respuesta de especies de gramíneas de las etapas pioneras y maduras de la sucesión ecológica, que pueda permitirnos el reducir el tiempo necesario para la limpieza de suelos con técnicas de fitorremediación.

En línea de continuidad con trabajos anteriores (Adarve et al., 1998; Hernández et al., 1998a), pretendemos conocer los contenidos de metales pesados que presentan especies de gramíneas que crecen en ecosistemas desarrollados en emplazamientos de minas abandonadas, comparándolos con los que presentan esas mismas especies al crecer en las cubiertas de vertederos sellados y, siempre teniendo en cuenta los niveles que se alcanzan en esas mismas plantas al crecer en suelos de escenarios que no sufren contaminación, pero situados en los mismos entornos ambientales.

La decisión se fundamenta en que diferentes especies silvestres de esta familia botánica, reputada por ser una de las que presenta mayor número de especies tolerantes o acumuladoras de metales pesados, se encuentran entre las más frecuentes y abundantes entre las halladas en los diferentes escenarios concernidos (Pastor y



Hernández, 2002), aunque éstos presenten altas concentraciones de metales pesados (Cu, Zn, Cd, Pb y Cr) y, en la mayoría de los casos, con más de uno de estos metales. Lógicamente, si conocemos algunas especies acumuladoras de los mismos, podríamos tenerlas en cuenta para fines de descontaminación de los suelos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Escenarios de estudio. Los escenarios de estudio seleccionados se sitúan en la Zona Centro Peninsular, especialmente en el Sistema Central, ya que es el área que presenta suelos con un mayor nivel de contaminación por metales pesados, debido a la existencia de antiguas explotaciones mineras, muchas de ellas de cobre y plata, pero también de bario y otros metales, y por ello con existencia de diferentes metales pesados en los suelos (Hernández y Pastor, 2007). El segundo escenario corresponde a antiguos vertederos sellados de carácter mixto (de residuos urbanos e industriales) ubicados principalmente, en las zonas centro y sur de la Comunidad de Madrid y de los que tenemos estudiados los suelos (Pastor et al., 1993 y Hernández et al., 1998b).

Los emplazamientos correspondientes a las antiguas minas se sitúan en zonas de Navalagamella, Bustarviejo y Garganta de los Montes, en la provincia de Madrid y en la cuenca del río Guajaraz, en la provincia de Toledo.

Análisis de suelos y plantas. Los niveles de elementos pseudototales en suelos son analizados mediante espectrofotometría de emisión de plasma, tras moler los suelos en mortero de ágata y someterlos a ataque ácido con HNO_3 y HClO_4 en proporción 4:1; este método es también el utilizado para medir los niveles que presentan los metales en planta. El contenido de As de los suelos se determinó por fluorescencia de Rayos X.

El As en las plantas únicamente se determinó en aquellas especies de mayor abundancia en las parcelas de la mina de Bustarviejo, cuyos suelos analizados presentaron contenidos elevados de As (cercaos y superiores a 1000 mg/kg). La digestión de las muestras se realizó en horno de microondas (200 ° C durante 10 minutos) con 10 mL de HNO_3 (70%, v/v), seguida de una posterior dilución a 25 mL con H_2O desionizada.

El pH de los suelos en agua se ha medido en pasta saturada.

Para el estudio de las gramíneas que crecen en los diferentes escenarios aludidos, se ha llevado a cabo una recogida de muestras de aquellas especies que presentaban mayor abundancia en los emplazamientos aludidos de minas abandonadas, así como de vertederos sellados en el mismo territorio y teniendo en cuenta recolectar las mismas especies creciendo en ecosistemas análogos del entorno, pero sin ser afectados por la contaminación de los suelos, según la metodología contrastada por nosotros (Hernández y Pastor, 2008a).

Los datos los hemos agrupado en bloques: i) dos antiguas minas de plata, donde predominan Zn y Pb en los suelos, pero también existen cantidades elevadas de arsénico en una de ellas; ii) una antigua mina de cobre, en donde este metal alcanza valores elevados, mientras que el cinc se mantiene en niveles discretos y hay presencia de cadmio; iii) una antigua mina de bario, con contenidos discretos de Zn y Pb.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1a, se expone una panorámica de los rangos de pH, de los contenidos de As y de los principales metales pesados de los suelos del área de estudio, obtenidos a partir de nuestros muestreos y apoyada con fuentes bibliográficas (Kabata Pendias, 1993; De Miguel et al., 2002; Lopez-Arias y Grau, 2005).

Destacan la variabilidad de pH de los suelos de las minas de Guajaraz y de Garganta de los Montes, frente a los suelos de Bustarviejo y de Navas del Rey, al igual que ocurre respecto a la variabilidad de los contenidos de Zn en las minas de Guajaraz y Bustarviejo, de Cu en Garganta de los Montes y Bustarviejo, y de Pb en Guajaraz y Bustarviejo. Y en menor grado de variabilidad se encuentra el Cd en Garganta y Bustarviejo, el Mn en Garganta y el As en Bustarviejo.

El emplazamiento de esta última mina abandonada es por tanto el que presenta mayores diferencias entre los valores máximo y mínimo respecto a los metales pesados entre las cuatro minas estudiadas. Así podemos decir que los pH en agua de los suelos de la mina de Bustarviejo van desde muy ácidos a casi neutros (4,0-6,2); los contenidos de As total son muy elevados, salvo en dos muestras de los suelos de dicho emplazamiento, pero que en once de ellos superan los 1000 mg/kg, en ocho superan valores cercanos a 2000 mg/kg y en cinco, valores similares o superiores a 5000 mg/kg. Estos valores son superiores a los encontrados en suelos no cultivados de un área minera del sur de la provincia de Salamanca, en los que se estudió la distribución de este elemento en los suelos (Alonso *et al.* 2007).

Tabla 1a. Rangos de pH y de los contenidos de metales y As (mg/kg) en los suelos de los escenarios estudiados (minas) y valores medios de los suelos de referencia del área.

| Rango | Guajaraz | | Garganta de los Montes | | Bustarviejo | | Navas del Rey | |
|--------------|---------------|------------------|------------------------|------------------|---------------|------------------|---------------|------------------|
| pH y Metales | Mina de plata | Suelo referencia | Mina de cobre | Suelo referencia | Mina de plata | Suelo referencia | Mina de bario | Suelo referencia |
| pH (agua) | 3,3 a 7,9 | 5,5 | 4,6 a 7,5 | 5,1 | 4,0 a 6,0 | 5,5 | 6,0 a 6,7 | 5,9 |
| Zn | 170 a 4950 | 62 | 110 a 478 | 103 | 210 a 11010 | 146 | 107 a 796 | 37 |
| Cu | n.d. a 190 | 9 | 80 a 3800 | 46 | 117 a 2070 | 45 | 5 a 170 | 12 |
| Pb | 180 a 4250 | 20 | 70 a 199 | 99 | 67 a 3953 | 40 | 104 a 249 | 11 |
| Cd | n.d. a 26 | n.d. | 3 a 340 | 2 | 5 a 263 | 3 | n.d. a 6,0 | 0 |
| Cr | n.d. a 55 | n.d. | 1,5 a 3,0 | 2,5 | 3 a 12 | 2 | n.d. a 21 | n.d. |
| Ni | 9,0 a 25 | 5,5 | 9,0 a 26 | 8 | 3 a 6 | 1 | n.d. a 32 | n.d. |
| Mn | 185 a 20375 | 160 | 362 a 1450 | 395 | 230 a 690 | 200 | 135 a 605 | 130 |
| As * | 135 a 534 | n.d. | n.d. a 115 | n.d. | 205 a 15436 | n.d. | n.d. | n.d. |

n.d., no detectable

Para conseguir una mayor perspectiva acerca del significado de estos valores respecto a los metales pesados de mayor incidencia en los suelos contaminados del área (Zn y Cu), presentamos en la Tabla 1b los contenidos medios que éstos alcanzan en los suelos antropizados de los antiguos vertederos mixtos de la zona. En dicha tabla podemos observar para estos metales más comunes, que sus valores medios en los vertederos sellados están en general por debajo de los valores mínimos que alcanzan en los suelos de las minas abandonadas.

Tabla 1b. Valores medios de los contenidos (mg/kg) de los metales de mayor frecuencia y abundancia (Zn y Cu) en suelos antropizados (vertederos mixtos) y en los suelos de referencia del entorno.

| Metales | Granitos y gneis | | Sustratos arcósicos | | Calizas y Margas | |
|---------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|---------------------|----------------------|
| | Suelos antropizados | Suelos de referencia | Suelos antropizados | Suelos de referencia | Suelos antropizados | Suelos de referencia |
| Zn | 49,6±16,6 | | 27,7±12,8 | | 31,2±9,8 | |
| Cu | 8,7±14,8 | | 6,3±3,8 | | 10,1±2,4 | |
| Zn | 125,5 ± 69,8 | 74,0 ± 30,5 | 83,5 ± 146,0 | 31,9 ± 9,6 | 57,5 ± 10,5 | 31,0 ± 9,0 |
| Cu | 8,7 ± 19,4 | n.d. | 150,9 ± 730,2 | 18,5 ± 29,8 | 13,0 ± 11,0 | 0±0 |

n.d., no detectable

En las Tablas 2 y 3, vemos los valores de los contenidos de Zn en gramíneas creciendo en los suelos de los emplazamientos de Guajaraz (Toledo) y de Garganta de los Montes (Madrid) respectivamente, donde este metal presenta una mayor incidencia. En aquellas especies donde los contenidos de Zn son elevados en muchos puntos (Tabla 2), los contenidos medios en las plantas, van desde 87,1 mg/kg en *Dactylis glomerata*, hasta los 618,2 mg/kg que alcanza *Vulpia bromoides*; si bien existen valores menores y mayores que los mencionados, en otras especies de gramíneas menos abundantes en el escenario estudiado. Una especie con un contenido medio elevado es *Holcus setiglumis* (443,2 mg/kg), pero como puede observarse, son bastantes las especies que superan los 200 mg/kg.

Tabla 2. Contenidos de Zn de las especies de gramíneas que crecen en el emplazamiento de una antigua mina de plata de la cuenca del río Guajaraz (Toledo) en el que predomina Zn y Pb en los suelos.

| Especies | Pastos afectados por la mina | | Pastos de referencia |
|-------------------------------|------------------------------|--------------|----------------------|
| | X ± d.t | Valor máximo | X ± d.t |
| <i>Agrostis castellana</i> | 334,3 ± 263,8 | 940,0 | 11,5 ± 1,2 |
| <i>Arrhenatherum bulbosum</i> | 58,0 | 58,0 | 28,0 |
| <i>Avena barbata</i> | 103,0 | 103,0 | |
| <i>Bromus diandrus</i> | 61,8 | 61,8 | 35,3 ± 8,4 |
| <i>Bromus hordeaceus</i> | 221,5± | 300,0 | 18,5 ± 6,1 |
| <i>Bromus madritensis</i> | 720,0 | 720,0 | 26,0 ± 8,3 |
| <i>Bromus tectorum</i> | 229,1 ± 220,5 | 385,0 | 46,5 ± 1,6 |
| <i>Dactylis glomerata</i> | 87,1 ± 41,1 | 115,0 | 14,1 ± 4,8 |
| <i>Festuca rubra</i> | 220,0 ± 89,1 | 283,0 | 14,6 ± 7,0 |
| <i>Holcus setiglumis</i> | 443,2 ± 249,5 | 954,0 | 201,5 ± 6,4 |
| <i>Melica ciliata</i> | 200,7 ± 8,0 | 206,0 | |
| <i>Poa bulbosa</i> | 260,7 | 260,7 | 17,8 ± 3,5 |
| <i>Stipa lagascae</i> | 241,8 ± 134,6 | 377,6 | 25,6 ± 5,4 |
| <i>Vulpia bromoides</i> | 618,2 ± 387,5 | 892,0 | 15,8 ± 10,1 |

Tabla 3. Contenidos de Zn (mg/kg) de las especies de gramíneas que crecen en el emplazamiento de una antigua mina de Garganta de los Montes (Madrid).

| Especies | Pastos afectados por la mina | | Pastos de referencia |
|-----------------------------------|------------------------------|--------------|----------------------|
| | X \pm d.t | Valor máximo | X \pm d.t |
| <i>Aegilops triuncialis</i> | 90,8 | 90,8 | 27,6 |
| <i>Agrostis castellana</i> | 77,8 \pm 62,2 | 330,0 | 11,5 \pm 1,2 |
| <i>Aira caryophylla</i> | 39,0 | 39,0 | |
| <i>Anthoxanthum aristatum</i> | 50,0 | 50,0 | 23,1 \pm 4,3 |
| <i>Arrhenatherum bulbosum</i> | 38,4 \pm 12,7 | 130,2 | 28,0 |
| <i>Arrhenatherum elatius</i> | 35,0 \pm 21,2 | 50,0 | |
| <i>Avena sterilis</i> | 14,2 | 14,2 | n.d. |
| <i>Bromus diandrus</i> | 62,5 \pm 33,9 | 127,0 | 35,3 \pm 8,4 |
| <i>Bromus hordeaceus</i> | 81,7 \pm 64,6 | 210,0 | 18,5 \pm 6,1 |
| <i>Bromus tectorum</i> | 54,1 \pm 13,8 | 70,0 | 46,5 \pm 1,6 |
| <i>Corynephorus canescens</i> | 70,8 \pm 17,2 | 94,0 | 54,1 \pm 4,2 |
| <i>Cynodon dactylon</i> | 30,0 | 30,0 | 22,8 \pm 5,3 |
| <i>Cynosurus cristatus</i> | 37,0 | 37,0 | |
| <i>Cynosurus echinatus</i> | 54,4 \pm 6,3 | 56,0 | |
| <i>Dactylis glomerata</i> | 54,6 \pm 21,9 | 86,4 | 14,1 \pm 4,8 |
| <i>Festuca rubra</i> | 22,0 | 22,0 | 14,6 \pm 7,0 |
| <i>Holcus lanatus</i> | 161,9 \pm 204,1 | 540,0 | 20,4 \pm 4,4 |
| <i>Hordeum murinum</i> | 94,9 | 94,9 | 15,9 \pm 4,7 |
| <i>Koeleria caudata</i> | 45,0 \pm 21,6 | 71,0 | 29,0 \pm 1,4 |
| <i>Lolium multiflorum</i> | 255,0 | 255,0 | 38,3 \pm 5,9 |
| <i>Melica ciliata</i> | 24,3 | 24,3 | |
| <i>Molineriella laevis</i> | 84,6 \pm 37,3 | 180,0 | 44,1 \pm 4,3 |
| <i>Phleum pratense</i> | 52,2 \pm 22,3 | 68,0 | 36,2 \pm 6,1 |
| <i>Poa bulbosa</i> | 48,0 \pm 6,1 | 54,2 | 17,8 \pm 3,5 |
| <i>Stipa lagascae</i> | 35,9 \pm 10,8 | 47,2 | 25,6 \pm 5,4 |
| <i>Taeniatherum caput-medusae</i> | 80,8 \pm 62,8 | 152,0 | 34,0 \pm 3,2 |
| <i>Vulpia membranacea</i> | 94,3 | 94,3 | |

n.d., no detectable

Los valores máximos de Zn alcanzados corresponden a 954 mg/kg de *Holcus setiglumis*, 940 mg/kg de *Agrostis castellana* y 896 mg/kg de *Vulpia bromoides*. Es decir en algunos sitios del emplazamiento de esta mina de la provincia de Toledo hay suelos en los que se encuentran las especies mencionadas alcanzando valores cercanos a 1000 mg/kg de Zn. Todos los contenidos de Zn en las gramíneas son lógicos y claramente más elevados que los que alcanzan dichas especies en los suelos de los pastos de referencia del área. En este caso, los valores medios de Zn, alcanzados por las gramíneas en la mina de plata del Guajaraz, con respecto al alcanzado en los pastizales, si bien a veces duplican los contenidos, en varias ocasiones los multiplican por 10, 20 o más. De Kae et al. (1994), ya señalaron el buen comportamiento acumulador de una de estas especies, *Agrostis castellana*, junto con *A. delicatula*, con respecto a los metales pesados en suelos portugueses.

En la Tabla 3, vemos que en las gramíneas del emplazamiento de la mina de Garganta de los Montes hay mucha menor presencia de Zn, ya que los contenidos de este elemento en los suelos son menores, y por ello los contenidos medios en las plantas

oscilan de 35,0 mg/kg en *Arrhenatherum elatius*, hasta 161,9 mg/kg en *Holcus lanatus*. Los valores máximos los alcanza también esta última especie, 540,0 mg/kg; seguida de *Agrostis castellana* con 330,0.

Tabla 4. Contenidos de Cu (mg/kg) de las especies de gramíneas, que crecen en el emplazamiento de Garganta de los Montes (Madrid).en el que predomina este metal en los suelos.

| Especies | Pastos afectados por la mina | | Pastos de referencia |
|-----------------------------------|------------------------------|--------------|----------------------|
| | X ± d.t | Valor máximo | X ± d.t |
| <i>Aegilops triuncialis</i> | 6,7 | 6,7 | 2,0 ± 2,8 |
| <i>Agrostis castellana</i> | 33,3 ± 61,3 | 278,5 | 4,9 ± 0,5 |
| <i>Aira caryophylla</i> | 0,8 | 0,8 | |
| <i>Anthoxanthum aristatum</i> | 0,7 | 0,7 | |
| <i>Arrhenatherum bulbosum</i> | 35,5 ± 63,2 | 130,2 | |
| <i>Arrhenatherum elatius</i> | 1,8 ± 2,6 | 3,7 | |
| <i>Avena sterilis</i> | 7,3 | 7,3 | n.d. |
| <i>Bromus diandrus</i> | 8,0 ± 4,3 | 14,3 | 4,6 ± 3,1 |
| <i>Bromus hordeaceus</i> | 11,6 ± 19,1 | 64,4 | 8,9 ± 1,8 |
| <i>Bromus tectorum</i> | 9,5 ± 2,0 | 10,9 | 6,8 ± 0,6 |
| <i>Corynephorus canescens</i> | 388,6 ± 427,2 | 845,8 | 2,2 ± 2,9 |
| <i>Cynodon dactylon</i> | 19,2 | 19,2 | 2,3 ± 2,5 |
| <i>Cynosurus cristatus</i> | 3,5 | 3,5 | |
| <i>Cynosurus echinatus</i> | 7,4 ± 4,4 | 12,4 | 3,1 ± 1,8 |
| <i>Dactylis glomerata</i> | 6,5 ± 6,7 | 13,4 | 4,9 ± 0,8 |
| <i>Festuca rubra</i> | 6,2 | 6,2 | 6,0 ± 3,2 |
| <i>Holcus lanatus</i> | 13,3 ± 9,0 | 27 | 4,6 ± 1,3 |
| <i>Hordeum murinum</i> | 12,6 | 12,6 | 6,7 ± 1,2 |
| <i>Koeleria caudata</i> | 4,3 ± 6,9 | 16,6 | 0,6 ± 0,5 |
| <i>Lolium multiflorum</i> | 26,9 | 26,9 | 5,5 ± 0,3 |
| <i>Melica ciliata</i> | 7,0 | 7,0 | 1,9 ± 2,3 |
| <i>Molineriella laevis</i> | 36,9 ± 22,5 | 74,0 | 6,1 ± 1,3 |
| <i>Phleum pratense</i> | 3,1 ± 2,2 | 4,6 | 1,5 ± 0,8 |
| <i>Poa bulbosa</i> | 5,5 ± 3,1 | 7,7 | 7,8 ± 5,3 |
| <i>Stipa lagascae</i> | 12,7 ± 2,8 | 15,8 | |
| <i>Taeniatherum caput-medusae</i> | 4,3 ± 3,2 | 12,1 | 1,5 ± 1,4 |
| <i>Vulpia myuros</i> | 3,3 ± 2,8 | 10,3 | 2,6 ± 1,2 |

n.d., no detectable

Coincidimos con la bibliografía en que *Holcus lanatus* es una de las especies de comportamiento más interesante con respecto a los metales pesados, por su tolerancia y capacidad acumuladora, con la ventaja de ser muy frecuente en nuestro país. Este resultado es análogo a los expuestos por Baker et al. (1986), Meharg y MacNair (1991). Finalmente, las diferencias de los contenidos medios de los metales en las plantas correspondientes a dicho emplazamiento, no son muy acusadas en relación a los contenidos que presentan las plantas en los pastizales de referencia; en bastantes casos apenas los duplican.

En la Tabla 4, vemos los contenidos medios y los valores máximos de Cu en las gramíneas de los suelos afectados por la explotación minera en la mina de cobre de Garganta de los Montes. Los contenidos medios van desde 1,8 mg/kg en *Arrhenatherum elatius* hasta 338,6 mg/kg en *Corynephorus canescens*. El valor máximo, más elevado, 845,8 mg/kg se presenta igualmente en esta especie. Otros valores destacados son 278,5 mg/kg en *Agrostis castellana* y 130,2 mg/kg en *Arrhenatherum bulbosum*.

Al comparar los valores obtenidos para este oligoelemento en las especies de los pastizales del entorno, vemos que generalmente, aunque no siempre, son más elevados, si bien de forma variable, al crecer en los suelos de la mina de cobre, donde este metal predomina.

Cuando la incidencia de dicho metal en los suelos es mucho menor, caso de los suelos de la mina del Guajaraz (Tabla 5) vemos que los contenidos medios van desde 4,5 mg/kg en *Vulpia bromoides* y *Festuca rubra* hasta 14,5 en *Bromus hordeaceus*. Estos valores son del mismo orden o algo más elevados en las especies de la mina que en los pastizales de referencia. El valor medio máximo es de 32,5 mg/kg en *Holcus setiglumis*.

Tabla 5. Contenidos de Cu (mg/kg) de las especies de gramíneas que crecen en los emplazamientos de una antigua mina de plata de la cuenca del río Guajaraz (Toledo).

| Especies | Pastos afectados por la mina | | Pastos de referencia |
|-------------------------------|------------------------------|--------------|----------------------|
| | X ± d.t | Valor máximo | X ± d.t |
| <i>Agrostis castellana</i> | 6,1 ± 3,0 | 12,3 | 4,9 ± 0,5 |
| <i>Arrhenatherum bulbosum</i> | 0,7 | 0,7 | n.d. |
| <i>Avena barbata</i> | n.d. | n.d. | n.d. |
| <i>Avena sterilis</i> | n.d. | n.d. | n.d. |
| <i>Bromus diandrus</i> | 17,8 | 17,8 | 4,6 ± 3,1 |
| <i>Bromus hordeaceus</i> | 14,5 ± 3,5 | 17,0 | 8,9 ± 1,8 |
| <i>Bromus madritensis</i> | 17,4 | 17,4 | 1,3 ± 2,2 |
| <i>Bromus tectorum</i> | 9,7 ± 4,7 | 13,3 | 6,8 ± 0,6 |
| <i>Dactylis glomerata</i> | 5,9 ± 6,1 | 16,3 | 4,9 ± 0,8 |
| <i>Festuca rubra</i> | 4,5 ± 0,7 | 5,1 | 6,0 ± 3,2 |
| <i>Holcus setiglumis</i> | 8,1 ± 8,4 | 32,5 | 2,4 |
| <i>Melica ciliata</i> | 6,0 ± 5,7 | 10,2 | 1,9 ± 2,3 |
| <i>Poa bulbosa</i> | 6,0 | 6,0 | 7,8 ± 5,3 |
| <i>Stipa lagascae</i> | 11,5 ± 7,7 | 19,1 | |
| <i>Vulpia bromoides</i> | 4,5 ± 2,1 | 6,0 | 5,4 ± 1,3 |
| <i>Vulpia myuros</i> | 10,7 ± 4,1 | 15,0 | 2,6 ± 1,2 |

n.d., no detectable

En la Tabla 6 se muestran los contenidos de Zn y Cu que contienen algunas de las especies de gramíneas que crecen en los otros dos emplazamientos estudiados (Bustarviejo y Navas del Rey), así como en los pastos de referencia. Los contenidos más elevados de Zn corresponden a *Arrhenatherum elatius*, 364 mg/kg y a *Agrostis castellana* 269 mg/kg en la mina de Bustarviejo y *Bromus hordeaceus*, 300 mg/kg en la mina de Navas del Rey. En cuanto a los contenidos de Cu, lo más destacable es el de 58 mg/kg de *Arrhenatherum elatius* en la mina de Bustarviejo.

Tabla 6. Contenidos de Zn y Cu (mg/kg) de las especies de gramíneas, que crecen en la antigua mina de plata del Cerro de la Plata (Bustarviejo) y en una antigua mina de bario en Navas del Rey.

| Metales | Bustarviejo | | | Navas del Rey | | | Pastos de referencia |
|-------------------------------|-------------------------------|----------------------------|--------------|--------------------------|---------|--------------|----------------------|
| | Especie | X ± d.t | Valor máximo | Especie | X ± d.t | Valor máximo | X ± d.t |
| Zn | <i>Agrostis castellana</i> | 134±80 | 269 | | | | 11,5±1,2 |
| | <i>Arrhenatherum elatius</i> | 141±151 | 364 | | | | |
| | <i>Bromus hordeaceus</i> | 39 | 39 | <i>Bromus hordeaceus</i> | 300 | 300 | 18,5±6,1 |
| | <i>Bromus tectorum</i> | 34 | 34 | | | | 46,5±1,6 |
| | <i>Corynephorus canescens</i> | 108 | 108 | | | | 54,1±4,2 |
| | <i>Micropyrum tenellum</i> | 79±28 | 102 | | | | |
| | <i>Phalaris minor</i> | 100±38 | 127 | | | | |
| | <i>Trisetum ovatum</i> | 109 | 109 | | | | |
| | Gramínea sp. | 79 | 79 | | | | |
| | Cu | <i>Agrostis castellana</i> | 4,6±2,9 | 8 | | | |
| <i>Arrhenatherum elatius</i> | | 17±27 | 58 | | | | 0 |
| <i>Bromus hordeaceus</i> | | 2,8 | 2,8 | | | | 8,9±1,8 |
| <i>Bromus tectorum</i> | | 3,6 | 3,6 | | | | 6,8±0,6 |
| <i>Corynephorus canescens</i> | | 11 | 11 | | | | 2,2±2,9 |
| <i>Micropyrum tenellum</i> | | 4,9±2,4 | 7,6 | | | | |
| <i>Phalaris minor</i> | | 6 | 6 | | | | |
| <i>Trisetum ovatum</i> | | 7,2 | 7,2 | | | | |

Los resultados nos permiten decir que la mayoría de las especies analizadas toleran y no acumulan Cu en la parte aérea. Este metal ha generado suficiente interés (Kluckerberg et al. 1972; Merri et al., 1986; Poschenrieder et al., 2001) y sigue siendo muy estudiado, ya que es uno de los metales que resulta más tóxico para las plantas que por ello, suelen retenerlo muchas de ellas en sus raíces.

Vistos los valores alcanzados por las especies de gramíneas que crecen en las zonas mineras (Tabla 7), podemos observar los contenidos medios y los valores máximos de estos metales más frecuentes (Zn y Cu), alcanzados en suelos antropizados correspondientes a vertederos sellados, por parte de 14 especies de gramíneas. Los valores medios más elevados de Zn, en dichos suelos, oscilaron desde 10,1 en *Vulpia myuros* a 96,9 mg/kg, que alcanzaron *Bromus rubens* y *Cynodon dactylon*. Los valores máximos fueron 260 mg/kg en *Bromus hordeaceus*, 240,0 en *Lolium rigidum* y 238,0 mg/kg en *Bromus rubens*.

En la mayoría de las especies, los contenidos medios de Zn, alcanzados por las plantas en los suelos antropizados, en relación con los obtenidos en los pastizales de sus correspondientes entornos (ecosistemas de referencia), duplican generalmente y a veces triplican o cuadruplican y más, los contenidos de las plantas cuando crecen en los pastizales de referencia. Aunque muchas de estas especies son por lo general distintas a las que crecían en los emplazamientos de las minas abandonadas, alcanzan niveles de metales pesados menos elevados que los encontrados en las gramíneas de las minas, ya que los suelos tienen menores contenidos de metales que éstas, pese a ello el que varias especies se acerquen o superen el contenido de 200 mg/kg, nos debe hacer reflexionar y animarnos a investigar sobre su eficacia como acumuladoras de Zn en los suelos de minas y en suelos antropizados cercanos a las ciudades, pues podríamos

quizá ver que la eficacia de algunas de estas especies, en relación con la absorción de este metal, puede ser más importante de lo que pudiéramos pensar a priori.

Tabla 7. Contenidos medios y máximos de Zn (mg/kg) en las principales especies de gramíneas que crecen en suelos antropizados (de vertederos sellados y escombreras) y contenidos medios de estos metales cuando estas especies crecen en los ecosistemas de referencia del entorno.

| Especies | Zn | | |
|-----------------------------|--|--------------|----------------------|
| | Herbazales y pastos de suelos antropizados | | Pastos de referencia |
| | X ± d.t | Valor máximo | X ± d.t |
| <i>Aegilops geniculata</i> | 68,1 ± 29,3 | 121,0 | 29,8 ± 8,1 |
| <i>Aegilops triuncialis</i> | 55,0 ± 22,2 | 92,0 | 31,0 ± 7,9 |
| <i>Agrostis castellana</i> | 29,3 | 29,3 | 24,0 ± 6,8 |
| <i>Bromus diandrus</i> | 81,0 ± 47,3 | 179,0 | 26,1 ± 7,2 |
| <i>Bromus hordeaceus</i> | 72,5 ± 40,2 | 260,0 | 17,0 ± 0,6 |
| <i>Bromus madritensis</i> | 98,0 | 98,0 | 32,2 ± 7,3 |
| <i>Bromus rubens</i> | 96,9 ± 50,4 | 238,0 | 25,5 ± 5,5 |
| <i>Bromus squarrosus</i> | 78,5 ± 10,6 | 86,0 | 14,0 ± 3,8 |
| <i>Cynodon dactylon</i> | 96,9 ± 34,1 | 162,0 | 45,4 ± 23,6 |
| <i>Dactylis glomerata</i> | 64,6 ± 21,9 | 115,0 | 30,8 ± 5,2 |
| <i>Elymus hispanicus</i> | 71,7 ± 2,1 | 69,0 | |
| <i>Elymus repens</i> | 51,2 ± 24,7 | 87,0 | 18,5 ± 2,1 |
| <i>Hordeum murinum</i> | 84,1 ± 32,9 | 199,0 | 39,0 ± 4,8 |
| <i>Lolium rigidum</i> | 77,4 ± 43,7 | 240,0 | 72,0 ± 36,7 |
| <i>Vulpia myuros</i> | 10,1 ± 2,1 | 12,0 | 26,2 ± 1,7 |

Tabla 8. Contenidos medios y máximos de Cu (mg/kg) en las principales especies de gramíneas que crecen en suelos antropizados y contenidos medios de estos metales cuando estas especies crecen en los ecosistemas de referencia del entorno.

| Especies | Cu | | |
|-----------------------------|--|--------------|----------------------|
| | Herbazales y pastos de suelos antropizados | | Pastos de referencia |
| | X ± d.t | Valor máximo | X ± d.t |
| <i>Aegilops geniculata</i> | 18,0 | 18,0 | 5,8 ± 6,3 |
| <i>Aegilops triuncialis</i> | 7,0 | 7,0 | 6,7 ± 1,5 |
| <i>Bromus diandrus</i> | 2,4 ± 4,4 | 10,0 | 9,1 ± 4,2 |
| <i>Bromus hordeaceus</i> | 5,0 ± 14,5 | 50,0 | 5,5 ± 0,7 |
| <i>Bromus madritensis</i> | 10,0 | 10,0 | 2,0 ± 1,3 |
| <i>Bromus rubens</i> | 0,6 ± 2,5 | 10,0 | 1,0 ± 2,0 |
| <i>Bromus squarrosus</i> | 1,7 ± 2,9 | 5,0 | |
| <i>Cynodon dactylon</i> | 1,3 ± 4,7 | 20,0 | 3,4 ± 1,4 |
| <i>Elymus hispanicus</i> | 3,3 ± 5,8 | 10,0 | 0,0 ± 0,0 |
| <i>Hordeum murinum</i> | 0,6 ± 3,2 | 4,0 | 1,1 ± 3,3 |
| <i>Lolium rigidum</i> | 0,5 ± 2,3 | 11,0 | 5,4 ± 2,0 |
| <i>Vulpia myuros</i> | 2,0 ± 1,5 | 3,0 | 1,5 ± 0,7 |

En cuanto a los contenidos medios de Cu, oscilaron desde casi “no detectables” hasta 10,0 mg/kg en *Bromus madritensis*. El valor máximo fue de 50,0 mg/kg en *Bromus hordeaceus*, y los contenidos de las plantas en los suelos de vertederos, fueron generalmente del mismo orden que los alcanzados en los suelos de los pastizales.

A continuación, en las tablas siguientes, podemos observar los contenidos de los otros metales encontrados en algunas de las especies de gramíneas que crecen en las cuatro minas estudiadas. Así, en la Tabla 9, se muestran los valores correspondientes a los emplazamientos de las minas del Guajaraz y de Garganta de los Montes. Aunque no hay resultados destacables, podemos señalar el contenido de Pb de *Agrostis castellana* (169 mg/kg) en Guajaraz, y los valores elevados de Mn de esta especie, de *Holcus lanatus* (1140 mg/kg) y de *Arrhenatherum elatius* (49 mg/kg).

Tabla 9. Contenidos de otros metales (mg/kg) en las especies de gramíneas, que crecen en las antiguas minas de plata del Guajaraz y de cobre en Garganta de los Montes.

| Metales | Guajaraz | | | Garganta de los Montes | | |
|---------|------------------------------|---------|--------------|-------------------------------|---------|--------------|
| | Especie | X ± d.t | Valor máximo | Especie | X ± d.t | Valor máximo |
| Pb | <i>Agrostis castellana</i> | 169 | 169 | <i>Arrhenatherum elatius</i> | 49 | 49 |
| | | | | <i>Bromus hordeaceus</i> | 4 | 4 |
| Cd | | | | <i>Lolium multiflorum</i> | 3 | 3 |
| | | | | <i>Aira caryophylla</i> | 2 | 2 |
| Cr | | | | <i>Aira caryophylla</i> | 37 | 37 |
| | | | | <i>Koeleria caudata</i> | 13 | 13 |
| | | | | <i>Dactylis glomerata</i> | 10 | 10 |
| | | | | <i>Bromus sterilis</i> | 7 | 7 |
| | | | | <i>Phleum pratense</i> | 6 | 6 |
| | | | | <i>Vulpia myuros</i> | 5 | 5 |
| | | | | <i>Cynosurus cristatus</i> | 5 | 5 |
| | | | | <i>Cynosurus echinatus</i> | 5 | 5 |
| | | | | <i>Arrhenatherum bulbosum</i> | 3 | 3 |
| Ni | <i>Bromus tectorum</i> | | | | 56 | |
| | | | | <i>Vulpia bromoides</i> | 25 | |
| | | | | <i>Holcus setiglumis</i> | 24 | |
| | | | | <i>Vulpia myuros</i> | 5 | |
| Mn | <i>Arrhenatherum elatius</i> | 373 | 373 | <i>Holcus lanatus</i> | 990±212 | 1140 |
| | <i>Agrostis castellana</i> | 318 | 318 | <i>Agrostis castellana</i> | 365 | 365 |

Tampoco hay valores destacables en los obtenidos en Bustarviejo, fuera de los 18 mg/kg de Cd que presenta una planta común y abundante como es *Vulpia myuros*, o los 563 mg/kg de *Bromus hordeaceus* en la mina de Navas del Rey, y los 45 mg/kg de Cr de *Arrhenatherum elatius* en Bustarviejo (Tabla 10).

Los contenidos de los otros metales en esta mina, como hemos dicho, fueron menos relevantes, pero 16 especies (no solo gramíneas) tuvieron contenidos de Zn superiores a 200 mg/kg; 11 niveles de Cu superiores a 20 mg/kg y 8 valores de Cd superiores a 4 mg/kg. Una muestra tuvo un contenido de Pb de 184 mg/kg y otra uno de Cr de 45 mg/kg.

Cosa diferente puede verse en relación a los valores que alcanza el arsénico (Tabla 11) donde sí, podemos observar la existencia de contenidos elevados y destacables en los suelos de la mina del Cerro de la plata de Bustarviejo. De las 44 muestras de especies de plantas analizadas en este emplazamiento (Pastor et al., 2008), no correspondientes solamente a las gramíneas, son precisamente las especies de esta familia botánica las que alcanzan mayores cantidades de As: *Arrhenatherum elatius* con contenidos superiores a 60 mg/kg en varios suelos y *Trisetum ovatum*, que supera los 40 mg/kg. *Bromus tectorum*, *Microphyrum tenellum*, *Phalaris minor*, *Agrostis castellana* y *Corynephorus canescens* superan en varios casos los 20 mg/kg y *Bromus hordeaceus* supera los 10.

Tabla 10. Contenidos (mg/kg) de otros metales en las especies de gramíneas, que crecen en las antiguas minas de plata de Bustarviejo y de bario en Navas del Rey (ambas en la provincia de Madrid).

| Metales | Bustarviejo | | | Navas del Rey | | |
|---------|-------------------------------|----------|--------------|----------------------------|---------|--------------|
| | Especie | X ± d.t | Valor máximo | Especie | X ± d.t | Valor máximo |
| Pb | <i>Agrostis castellana</i> | 3,3 | 3,3 | <i>Bromus hordeaceus</i> | 4 | 4 |
| | <i>Micropyrum tenellum</i> | 1,2 | 1,2 | | | |
| Cd | <i>Arrhenatherum elatius</i> | 4 | 4 | <i>Vulpia myuros</i> | 18 | 18 |
| | <i>Agrostis castellana</i> | 0,7 | 0,7 | | | |
| | <i>Corynephorus canescens</i> | 0,4 | 0,4 | | | |
| | <i>Trisetum ovatum</i> | 0,3 | 0,3 | | | |
| Cr | <i>Agrostis castellana</i> | 2,4±2,4 | 5 | <i>Bromus hordeaceus</i> | 11 | 11 |
| | <i>Arrhenatherum elatius</i> | 45 | 45 | | | |
| | <i>Micropyrum tenellum</i> | 1,5±0,42 | 1,8 | | | |
| | <i>Trisetum ovatum</i> | 1,9 | 1,9 | | | |
| | <i>Corynephorus canescens</i> | 3,1 | 3,1 | | | |
| | | | | | | |
| Ni | <i>Arrhenatherum elatius</i> | 7 | 7 | <i>Agrostis castellana</i> | 12 | 12 |
| | <i>Micropyrum tenellum</i> | 0,7 | 0,7 | <i>Bromus hordeaceus</i> | 5 | 5 |
| | | | | | | |
| Mn | | | | <i>Bromus hordeaceus</i> | 563 | 563 |

Tabla 11. Contenidos de arsénico (mg/kg) en las especies de gramíneas que crecen en la antigua mina de plata de Bustarviejo.

| Especie | X ± d.t | Valor máximo |
|-------------------------------|-------------|--------------|
| <i>Agrostis castellana</i> | 16,8 ± 8,2 | 33 |
| <i>Arrhenatherum elatius</i> | 20,7 ± 36,2 | 87 |
| <i>Bromus hordeaceus</i> L. | 10 ± 4 | 14 |
| <i>Bromus tectorum</i> L. | 23 ± 6 | 29 |
| <i>Corynephorus canescens</i> | 32 ± 9 | 41 |
| <i>Micropyrum tenellum</i> | 22 ± 8,2 | 34 |
| <i>Phalaris minor</i> | 26 ± 7,8 | 37 |
| <i>Trisetum ovatum</i> | 49 ± 7 | 56 |
| Gramínea sp. | 4,4 ± 2,4 | 7 |



Las plantas han podido acumular el As, tanto por captación a través de las raíces como por adsorción en las hojas de As aerotransportado, lo absorben con cierta facilidad bajo la forma de As orgánico, menos dañina. Los contenidos de As que presentan las especies estudiadas, son en la mayoría de los casos relevantes. Pratas *et al.* (2005), encontraron contenidos de As bastante menores en plantas muestreadas en minas abandonadas portuguesas.

Sabemos que los niveles de As en alimentos varían entre 20 y 140 ppb (aunque los niveles de As inorgánico son mucho más bajos). Según la OMS, el consumo de 1 mg de As inorgánico diario es peligroso y puede producir efectos dañinos en pocos años. La ingesta máxima tolerable diaria se ha establecido de forma provisional en unos 120 µg de As inorgánico, según el Ministerio de Agricultura Británico, y en unos 2 µg por kilo de peso según la OMS, lo que en un adulto vendría a ser entre 110 y 130 µg diarios. El problema en muchos casos, no es tanto la cantidad, sino sus efectos a largo plazo tras un consumo continuado en pequeñas cantidades. La cantidad total que entra al cuerpo a través de estas fuentes es aproximadamente 50 microgramos al día (García-Vargas y Cebrián, 1996).

CONCLUSIONES

Destacamos en primer lugar, el esperado mejor comportamiento respecto al Zn que respecto al Cu de las especies de gramíneas. Especies como *Agrostis castellana*, *Vulpia bromoides*, *V. myuros*, *Holcus setiglumis* y *H. lanatus*, presentan potencial como plantas tolerantes y posibles acumuladoras de este metal en los suelos de minas. Otras especies, pioneras de la sucesión ecológica, como son las del género *Bromus*, pueden ser interesantes en los suelos antropizados de vertederos y escombreras.

Con respecto al Cu, es muy destacable el comportamiento de *Corynephorus canescens*, por su acumulación en la parte aérea, siempre con valores destacables en las muestras recogidas, seguida a considerable distancia por *Agrostis castellana*, *Arrhenatherum bulbosum* y *Molineriella laevis*. Igualmente, queremos resaltar, el comportamiento de *Dactylis glomerata*, frecuente en estos lugares, por su carácter de perenne y de gran capacidad encespedadora, características muy positivas para evitar la erosión del suelo, y además, porque no acumula cantidades importantes de metales pesados que podrían ser nocivos para los animales herbívoros, ya que es una planta muy apetecida tanto por vacas como por ovejas.

Los elevados contenidos de As en los suelos, unidos a los contenidos de éste y de otros metales detectados en las plantas, y el clima fuertemente ventoso del entorno de la mina de Bustarviejo, que puede arrastrar partículas de polvo de suelos y escombreras, hacen a los ecosistemas pascícolas que se desarrollan sobre los suelos de este emplazamiento, un lugar poco saludables tanto para los animales como para los visitantes que frecuentan la zona.

Agradecimientos: A los Proyectos CTM2005-02165/TECNO del Ministerio de Educación y Ciencia y al CTM2008-04827 del Ministerio de Ciencia e Innovación, así como al Programa EIADES financiado por la Comunidad de Madrid.



BIBLIOGRAFÍA

- ADARVE, M^a J.; HERNÁNDEZ, A. J.; GIL, A.; PASTOR, J. 1998. B. Zn, Fe and Mn content in four grassland species exposed to landfill leachates. *Journal Environmental Quality*, 27: 1286-1293.
- ALONSO, P.; GARCÍA-SÁNCHEZ, A.; SANTOS, F.; MOGOLLÓN, M., 2007. Distribución de As en suelos no cultivados de un área minera del sur de la provincia de Salamanca. *Actas XVII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo*. León, Gto., México, 4 pp.
- BAKER, A.J.M.; GRANT C.J.; MARTIN, M.H.; SHAW, S.C.; WHITERBROOK, J., 1986. Induction and loss of cadmium tolerance in *Holcus lanatus* L. and other grasses. *New Phytologist*, 102: 575-587.
- COMUNIDAD DE MADRID. 1998. *Inventario y caracterización de suelos contaminados*. Informe técnico, nº ref. 69/98. Técnicas de Protección Ambiental S.A., Madrid.
- DE KAE, T., et al. 1994. *Agrostis castellana* and *Agrostis delicatula* on heavy metal and arsenic enriched sites in NE Portugal. *Science of the total environment*, 145 (1-2): 103-109.
- DE MIGUEL, E. et al. 2002. *Determinación de niveles de fondo y niveles de referencia de metales pesados y otros elementos traza en suelos de la Comunidad de Madrid*. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.
- GARCÍA-VARGAS, G.; CEBRIÁN, M.E. 1996. Health Effects of Arsenic. In: *Toxicology of metals*, 423-38. Chang, L.W. (ed.). Lewis Publishers, Boca Raton.
- GONZÁLEZ DEL TANAGO-CHANRAI, J.; GONZÁLEZ DEL TANAGO-DEL RIO, J. 2002. *Minerales y Minas de Madrid*. Mundi-Prensa., Madrid.
- HERNÁNDEZ, A.J.; ADARVE, M^a J.; GIL, A.; PASTOR, J. 1998a. Soil salination from landfill leachates: effects on the macronutrient content and plant growth of four grassland species. *Chemosphere*, 38:1693-1711.
- HERNÁNDEZ, A.J.; ADARVE, M^a J.; PASTOR, J. 1998b. Some impacts of urban waste landfills on Mediterranean soils. *Land Degradation & Development*, 9: 21-33.
- HERNÁNDEZ, A. J.; PASTOR, J. 2007. Ecosystems health and geochemistry: concepts and methods applied to abandoned mine sites. *The 23rd International Applied Geochemistry Symposium (IAGS 2007)* J. Loredó (ed). Universidad de Oviedo, pp. 219-231.
- HERNÁNDEZ, A. J.; PASTOR, J. 2008a. Relationship between plant biodiversity and heavy metal bioavailability in grasslands overlying an abandoned mine. *Environmental Geochemistry and Health*, 30:127-133.
- HERNÁNDEZ, A.J.; PASTOR, J. 2008b. Validated Approaches to Restoring the Health of Ecosystems Affected by Soil Pollution In: J. B. Dominguez & Frank Columbus (Eds.). *Soil Contamination Research Trends*, pp. 51-72. Nova Science Publishers, Inc., Hauppauge, NY USA.
- HESTER, R.E.; HARRISON, R.M. 1997. *Contaminated Land and its Reclamation*. Thomas Telford Publishers, London.
- JORDAN, W.R., 1987. *Restoration Ecology: a Synthetic Approach to Ecological Research*. Cambridge University Press.



- KABATA-PENDIAS, A. 1993. Behavioural properties of trace metals in soils. *Applied Geochemistry*. Suppl. Issue. 2: 3-9.
- KRUCKEBERG, A.L., et al. 1992. Copper tolerance and copper accumulation of herbaceous plants colonizing inactive California copper mines. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 23(3): 307-320.
- LOPEZ-ARIAS, M.; GRAU, J.M. 2005. *Metales pesados, materia orgánica y otros parámetros de la capa superficial de suelos agrícolas y de pastos en la España peninsular*, INIA.
- MCCUTCHEON, S. et al. (Eds). 2003. *Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants*. J. Wiley, Hoboken, NJ.
- MEHARG, A.A.; MACNAIR, M.R., 1991. Uptake, accumulation, and translocation of arsenate in arsenate-tolerant and non-tolerant *Holcus lanatus* L. *New Phytologist*, 117: 225-231.
- MERRI, R.H., et al. 1986. The effects of contamination of soil with copper, lead and arsenic on the growth and composition of plants. I. Effects of season, genotype, soil temperature and fertilizers. *Plant and Soil*, 91: 115-129.
- M.O.P.T.M.A. 1994. *Inventario Nacional de espacios contaminados*. Fase II. UTE-INITEC-ADARO-COVITECMA.
- PASTOR, J.; URCELAY, A.; OLIVER, S. y HERNÁNDEZ, A. J. 1993. Impact of Municipal Waste on Mediterranean Dry Environments. *Geomicrobiology Journal*, 11: 247-260.
- PASTOR, J.; HERNANDEZ, A. J., 2002. Estudio de suelos de vertederos sellados y de sus especies vegetales espontáneas para la fitorrecuperación de suelos degradados y contaminados del centro de España. *Anales de Biología*, 24: 145-153.
- PASTOR, J.; GARCÍA-SALGADO, S.; HERNÁNDEZ, A. J.; QUIJANO, M^a A. y BONILLA, M.M. 2008. Arsénico y otros metales pesados en plantas de comunidades de pastos del cerro de la plata (Bustarviejo, Madrid). En: *Pastos, clave en la gestión de los territorios*. P. Fdez. Rebollo et al. (Eds.), pp. 91-97. Consejería de Agricultura y Pesca, Junta de Andalucía.
- POSCHENRIEDER, C., BECH, J., LLUGANY, M., PACE, A., FENÉS, E., BARCELÓ, J. 2001. Copper in plant species in a copper gradient in Catalonia (North East Spain) and their potential for phytoremediation, *Plant and soil*. 230: 247-256.
- PRATAS, J.; PRASAD, M. N. V.; FREITAS, H.; CONDE, L, 2005. Plants growing in abandoned mines of Portugal are useful for biogeochemical exploration of arsenic, antimony, tungsten and mine reclamation. *Journal Geochemical Exploration*, 85, 99-107.
- UE 2004. Proposal for a directive of the European Parliament and of the Council establishing a framework for the protection of soil and amending Directive 2004/35/EC. Commission of the European Communities, Brussels.