

Fitorremediación de residuos de minas contaminados con metales pesados

Alma Victoria Amezcua-Ávila, Elizabeth Hernández-Acosta y Prócoro Díaz Vargas

Departamento de Suelos
Universidad Autónoma Chapingo
Texcoco, Méx.; México
elizahac@yahoo.com.mx

Abstract — Mine tailings present high heavy metals content making them an environmental and health problem, therefore it is necessary to develop strategies that allow its sanitation. This study evaluated phytoremediation capacity of *Lolium perenne* and *Poa pratensis* established in mine tailings with the addition of compost. The experimental work was carried out in the field, with a completely random design. *L. perenne* was established for 103 days and *P. pratensis* for 80 days. Compost treatments favored metal extraction and produced more biomass. *L. perenne* presented the highest growth and the greatest amount of manganese and copper. The addition of compost and *L. perenne* is recommended for mine tailings sanitation.

Keyword — *Lolium perenne*, *Poa pratensis*, compost, extraction, tailings

Resumen — Los jales de mina presentan alto contenido de metales pesados convirtiéndolos en un problema ambiental y de salud, por lo que es preciso desarrollar estrategias que permitan su saneamiento. En este estudio se evaluó la capacidad fitorremediadora de *Lolium perenne* y *Poa pratensis* establecidos en jales mineros con la adición de composta. El trabajo experimental se desarrolló en campo, con un diseño completamente aleatorio. *L. perenne* se estableció durante 103 días y *P. pratensis* durante 80 días. Los tratamientos con composta favorecieron la extracción de metales y produjeron mayor biomasa. *L. perenne* fue la especie que presentó mayor crecimiento y mayor cantidad de manganeso y cobre. Se recomienda la adición de composta y *L. perenne* para el saneamiento de jales.

Palabras claves — *Lolium perenne*, *Poa pratensis*, composta, extracción, jal

I. INTRODUCCIÓN

En México la historia de la minería comercial se remonta desde hace más de 500 años, sin embargo, esta actividad es causante de fuertes impactos ambientales en el suelo, generando grandes volúmenes de materiales conocidos como jales o relaves, que son residuos (roca, agua y reactivos químicos) que se originan y permanecen después de triturar la roca y extraer el metal de importancia económica (Paradelo, 2013; Worldwide Environmental Law Alliance (ELAW), 2010). Estos residuos al depositarse quedan expuestos a los factores ambientales, ocasionando su dispersión a través de la erosión eólica y los escurrimientos superficiales, que junto con los procesos químicos (óxido-reducción, hidrólisis, ácido-base, pueden impactar en la toxicidad de los metales) incrementan la peligrosidad del jal (De la O-Villanueva *et al.*, 2013; Ramos-Gómez *et al.*, 2012).

Entre las características de los jales destacan la falta de nutrientes necesarios para el establecimiento de la vegetación, el bajo contenido de materia orgánica, un intervalo de pH de 2 a 9 y un alto contenido de elementos potencialmente tóxicos (EPT) (De la O-Villanueva *et al.*, 2013; Méndez & Maier, 2008). La presencia de éstos en el ecosistema se considera un problema de salud pública y ambiental (Hernández-Acosta, Mondragón-Romero, Cristóbal-Acevedo, Rubiños-Panta & Robledo-Santoyo, 2009). Por lo anterior, se buscan estrategias que minimicen el riesgo a la salud. Una solución amigable con el ambiente y relativamente barata, es la fitorremediación, la cual tiene como objetivo evitar la dispersión de partículas contaminantes por erosión eólica e hídrica, además de degradar, extraer o aislar

las sustancias tóxicas. Es una alternativa ampliamente útil en suelos y residuos contaminados (Sánchez-López, González-Chávez, Carrillo-González, Vangronsveld & Díaz-Garduño, 2015; Wang, Yuan, Zhao, Wang & Chen, 2015).

En estudios realizados, evaluaron el potencial de fitorremediación de las especies *Lolium perenne* L. (Lp) y *Poa pratensis* L. (Pp), en suelos contaminados (Arienzo, Adamo & Cozzolino, 2004; Padmavathiamma & Li, 2010a), sin embargo, las características propias del jal, dificultan el desarrollo de la vegetación, por lo que es necesario corregirlas de manera simultánea; esto se puede conseguir con la adición de enmiendas orgánicas, como las compostas, que contienen altas cantidades de nutrientes y materia orgánica, que favorecen el establecimiento de una cubierta vegetal (Paradelo, 2013).

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la extracción de metales pesados (cobre, zinc, manganeso, cadmio, níquel y plomo) en un jal de mina, utilizando a las especies *L. perenne* y *P. pratensis* en diferentes condiciones de crecimiento.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

La investigación se realizó en el distrito minero Pachuca-Real del Monte, específicamente en el jal de mina Dos Carlos, situado en la parte sureste de la ciudad de Pachuca, con coordenadas 20° 06' latitud norte y 98° 43' longitud oeste, cuenta con una superficie aproximada de 23 ha, un volumen de 14 333 492 t y una altura promedio de 20 m (Hernández-Acosta, Mondragón-Romero, Cristóbal-Acevedo, Rubiños-Panta & Robledo-Santoyo, 2009). De acuerdo a la clasificación climática de Köppen, modificada por García (2004), el clima se clasifica como BS1kw, que corresponde a un tipo semiárido, templado con lluvias en verano, su precipitación pluvial es de 400 a 800 mm anual, con vientos que oscilan de 100 a 130 km h⁻¹.

Previo al establecimiento de los experimentos se tomaron muestras simples para formar muestras compuestas del jal a una profundidad de 0 a 10 cm, siguiendo un diseño semialineado. De acuerdo con las metodologías que establece la NOM-021-SEMARNAT-2000 se determinó la densidad aparente (método de probeta), textura (hidrómetro de Bouyoucos), pH (potenciómetro relación suelo-agua 1:2), materia orgánica (Walkley y Black), nitrógeno inorgánico (extraído con cloruro de potasio 2N y determinado por arrastre de vapor), fósforo (Bray P1, Olsen) y cationes intercambiables (acetato de amonio 1 N, pH 7.0, por espectrofotometría de emisión de flama).

Los metales pesados fueron extraídos con DTPA relación 1:4 y determinados en un espectrofotómetro de absorción atómica Marca GBC, Modelo Avanta, las curvas de calibración utilizadas para el equipo presentaron los siguiente límites de detección: cobre (Cu) (de 0 a 5 mg kg⁻¹), zinc (Zn) (de 0-1.5 mg kg⁻¹), manganeso (Mn) (de 0-20 mg kg⁻¹), cadmio (Cd) (de 0-1.8 mg kg⁻¹), níquel (Ni) (de 0-8 mg kg⁻¹) y plomo (Pb) (de 0-20 mg kg⁻¹).

La composta se originó a partir de alfalfa y excreta de borrego, y presentó las siguientes características físicas y químicas: pH= 8.5, porcentaje de materia orgánica 9.6, porcentaje de carbono 5.6, porcentaje de nitrógeno total 0.31, fósforo Olsen 346 mg kg⁻¹, CO₂ 0.90 mg/g composta y relación carbono/nitrógeno (C/N) 18. Las concentraciones de metales pesados fueron: Cd (0.05 mg kg⁻¹), Cu (3.43 mg kg⁻¹), Mn (12.32 mg kg⁻¹), Ni (1.03 mg kg⁻¹), Pb (1.40 mg kg⁻¹) y Zn (19.64 mg kg⁻¹), valores por debajo de los límites reportados en países europeos (Ramos-Arroyo & Siebe-Grabach, 2006; Ruíz, 2009).

El jal tiene condiciones heterogéneas originadas a partir de actividades humanas, por lo que es posible encontrar zonas sin elementos ajenos al relave, materiales de construcción que se incorporaron al jal y adición de suelo en una parte de la superficie. Debido a lo anterior se escogieron tres zonas para el establecimiento de los experimentos. Cada experimento consistió en la siembra de la especie vegetal con

la ausencia o presencia de enmiendas orgánicas, lo que originó seis tratamientos por especie con dos repeticiones cada uno. En los tratamientos con enmiendas orgánicas, se adicionó composta en una dosis de 80 t ha⁻¹ en los primeros 10 cm del jal. *L. perenne* se sembró a una densidad de 357 kg ha⁻¹ y *P. pratensis* a 328.5 kg ha⁻¹ (Alvarenga *et al.*, 2008; Jordan, Mullen & Courtney, 2008; Kacprzak, Grobelak, Grosser & Prasad, 2014) (Tabla I). El experimento se realizó en época de lluvias, del 22 julio al 22 octubre del 2014.

Tabla I. Tratamientos aplicados

Tratamiento
<i>Lolium perenne</i> (Lp)
<i>Lolium perenne</i> + Composta (Lp+Composta)
<i>Lolium perenne</i> + Residuo (Lp+Residuo)
<i>Lolium perenne</i> + Residuo + Composta (Lp + Residuos + Composta)
<i>Lolium perenne</i> + Suelo (Lp + Suelo)
<i>Lolium perenne</i> + Suelo + Composta (Lp + Suelo + Composta)
<i>Poa pratensis</i> (Pp)
<i>Poa pratensis</i> + Composta (Pp+Composta)
<i>Poa pratensis</i> + Residuo (Pp+Residuo)
<i>Poa pratensis</i> + Residuo + Composta (Pp + Residuos + Composta)
<i>Poa pratensis</i> + Suelo (Pp + Suelo)
<i>Poa pratensis</i> + Suelo + Composta (Pp + Suelo + Composta)

La cosecha de *L. perenne* se realizó a los 103 días después de la siembra (dds) y la de *P. pratensis* a 80 dds. El material vegetal que se cosechó fue separado en parte aérea y raíz, a partir del cual se obtuvo el volumen radical con el método de desplazamiento en probeta graduada. Tanto las hojas como las raíces de las plantas se secaron en una estufa de secado a 75 °C hasta obtener peso constante y determinar el peso seco, posteriormente se molieron y tamizaron con una malla de 1 mm.

Para la extracción de Cu, Zn, Mn, Cd, Ni y Pb se realizó una digestión con mezcla de ácido perclórico (HClO₄) y ácido sulfúrico (H₂SO₄) en proporción 1:4 (v/v). En seguida por espectrometría de absorción atómica se cuantificó el contenido de los metales, utilizando el equipo y la misma curva de calibración citados en párrafos anteriores.

Siguiendo lo propuesto por Jordan, Mullen y Courtney, (2009) y Padmavathiamma y Li (2010a), la absorción de metales en la planta se calculó multiplicando el peso seco de las hojas por la concentración de los metales obtenido en las hojas, lo mismo se aplicó para calcular la absorción de metales por la raíz. Posteriormente se sumaron los resultados, para obtener la extracción total de metales pesados en la planta.

Los datos se evaluaron estadísticamente con el programa SAS 9.0 (SAS v. 9.0, SAS Institute Inc., 2004) aplicando un análisis de varianza de un factor, además de una prueba media de Tukey $\alpha = 0.05$, finalmente se realizó un análisis de correlación de Pearson para conocer la relación lineal entre la biomasa producida y la absorción de metales.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Características físicas y químicas del jal

La densidad aparente que presentó el jal antes del experimento fue de 1.20 a 1.45 g/cm³, propias de suelos francos y arenosos. La textura se clasificó como franco-arenosa, el pH inicial se presentó de 3.4 a 7.9 (intervalo de fuertemente ácido a medianamente alcalino) y el pH al final de la cosecha fue de 3.8 a 7.3. La concentración más alta que se obtuvo de materia orgánica fue de 0.27%, valor catalogado como muy bajo (SEMARNAT, 2000).

Los valores de nitrógeno inorgánico fueron de 5.6 a 24.1 mg kg⁻¹, éstos se encuentran en las clases de muy baja y media, en tanto que la concentración de fósforo fue de 1.2 a 18 mg kg⁻¹ (clasificadas de bajo a medio). En cuanto a cationes intercambiables, para potasio, la concentración que se obtuvo fue de 32 a 252 mg kg⁻¹ (muy bajo a medio), para calcio de 3672 a 10521 mg kg⁻¹ (moderadamente altos a muy altos) y para magnesio de 64 a 679 mg kg⁻¹ (bajo a moderadamente alto) (SEMARNAT, 2000; Castellanos, Uvalle-Bueno & Aguilar-Santelises, 2000). Ramos-Arroyo y Siebe-Grabach (2006) reportan pH alcalinos y bajos contenidos de materia orgánica en jales del Distrito Minero de Guanajuato.

De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000 el contenido adecuado de metales oscila entre 3.7 y 9.5 mg kg⁻¹ para Cu, de 31 a 91.5 mg kg⁻¹ para Zn y para Mn los valores se encuentran entre 26 y 61.5 mg kg⁻¹. Las concentraciones de Cd (0.05-1.42 mg kg⁻¹) superaron la clase catalogada como normal, pero no entra en la clase peligrosa. El Ni (0.11-2.17 mg kg⁻¹) y el Pb (0.08-7.01 mg kg⁻¹) se encuentran en la clase normal.

Los valores obtenidos se encuentran dentro de lo reportado en estudios realizados en jales mineros de México, los cuales se encuentran catalogados en las categorías de medias a altas, lo que podría representar un peligro para el entorno (Ramos-Arroyo & Siebe-Grabach, 2006; Romero & Gutiérrez, 2010).

Debido a las condiciones ambientales, las características de un jal pueden verse modificadas, desde el año 2009 al 2014 las características del jal Dos Carlos se vieron modificadas, el pH aumentó, la densidad aparente varió de 1.5 a 1.3 g/cm³ y las concentraciones de metales pesados también variaron: Cd de 1.079 a 0.73 mg kg⁻¹, Pb de 2.68 a 14.34, Zn de 59.85 a 57.88 mg kg⁻¹, Ni de 1.192 a 1.05 mg kg⁻¹, Cu de 5 mg kg⁻¹ a 6.51 mg kg⁻¹ y finalmente Mn de 8 mg kg⁻¹ a 68.87 mg kg⁻¹ (Hernández-Acosta, Mondragón-Romero, Cristobal-Acevedo, Rubiños-Panta & Robledo-Santoyo, 2009).

Con relación a las variaciones en las propiedades físicas y químicas del jal, los factores que pueden intervenir son la movilidad, la toxicidad y biodisponibilidad de los metales presentes en los jales, puede verse afectadas por diferentes procesos que resultan de su exposición al intemperismo (Ramos-Gómez *et al.*, 2012), de igual manera hay variaciones verticales y horizontales debidas a la estratificación (Paradelo, 2013). De manera general, se aprecia que aún con el paso de los años, las condiciones que se presentan en el jal de mina Dos Carlos limitan el crecimiento y desarrollo de las plantas.

B. Volumen radical y peso seco de las plantas

Para la especie *L. perenne* el tratamiento Lp+composta, presentó las mejores medias estadísticas (1414 cm³ de volumen radical y 773.96 g de peso seco). Para *P. pratensis*, el tratamiento que presentó la mejor media estadística y valor más alto para la variable volumen radical fue Pp+composta con 225.0 cm³; y el tratamiento Pp+suelo+composta obtuvo el valor más alto para la variable peso seco con 121.37 g (Tabla II). Se apreció en general, que los tratamientos a los que se adiciono composta, presentaron los valores más altos en ambas variables, esto puede deberse a los componentes químicos y físicos que trae

consigo; por ejemplo, el aporte de nutrientes, la retención de metales pesados, la neutralización del pH y el aumento de la materia orgánica (Paradelo, 2013).

Tabla II. Peso seco y volumen radical de *L. perenne* y *P. pratensis* cultivado en los seis diferentes tratamientos

Tratamiento	Volumen radical (cm ³)	Peso seco (g)
EXPERIMENTO 1		
Lp	107.50 ^b ±95.5	57.30 ^d ±16.1
Lp + Composta	1414.00 ^a ±694.4	773.96 ^a ±177.3
Lp + Residuo ¹	178.00 ^b ±108.9	120.85 ^{cd} ±43.3
Lp + Residuo + Composta	926.00 ^{ab} ±203.6	585.41 ^{ab} ±44.3
Lp + Suelo ²	220.50 ^b ±7.8	105.22 ^{cd} ±21.6
Lp perenne + Suelo + Composta	616.50 ^{ab} ±188.8	358.02 ^{bc} ±24.8
EXPERIMENTO 2		
Pp	3.50 ^b ±2.1	1.04 ^b ±0.3
Pp + Composta	225.00 ^a ±21.2	118.7 ^a ±20.5
Pp + Residuo ¹	2.25 ^b ±1.1	1.91 ^b ±0.3
Pp + Residuo + composta	17.50 ^b ±3.5	10.16 ^b ±5.9
Pp + Suelo ²	39.00 ^b ±5.7	11.69 ^b ±2.6
Pp + Suelo + composta	223.50 ^a ±4.9	121.37 ^a ±5.5

Medias en la misma columna con diferente letra son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha=0.05$).

Pp = *P. pratensis*; Lp = *L. perenne*; ¹Suelo presente en el jal; ²Residuos de construcción. Datos obtenidos en 3.055 m.

En lo que respecta a la variable peso seco, los valores obtenidos en la presente investigación se compararon con el rendimiento que se obtiene en campo con la especie *L. perenne*, y se produjo 66% menos materia seca (1.49 ton ha⁻¹) que la producida en suelos agrícolas (3.38 ton ha⁻¹) (Comisión Técnico Consultiva de Coeficientes de Agostadero (COTECOCA), 2001). A pesar de que la producción fue menor, se considera una producción de biomasa vegetal importante, debido a las condiciones desfavorables del jal. Es importante señalar que *L. perenne* desarrolló un sistema radical vigoroso en el jal, por lo que se recomienda su uso con fines de revegetación.

En un estudio similar realizado por Santibañez, Verdugo y Ginocchio (2008), a nivel invernadero, estudiaron el desarrollo de *L. perenne* en relaves con la adición de biosólido. Sus resultados mostraron que las plantas incrementaron la producción en biomasa seca, a la vez que se incrementó la concentración de Cu y Zn, por lo que dicha estrategia puede utilizarse en programas de fitoestabilización de residuos mineros. Cabe señalar que, a diferencia del trabajo realizado por Santibañez, Verdugo y Ginocchio (2008), la presente investigación se hizo en campo, por lo que la eficiencia de *L. perenne* en cuanto a su adaptación, tolerancia y capacidad extractora de metales se demostró. Karami, Clemente, Moreno-Jiménez, Lepp y Beesley, (2011) indicaron que *L. perenne* es capaz de presentar buen desarrollo en jales de mina, y de extraer cantidades importantes de cobre y plomo.

Respecto al uso de la especie *P. pratensis* para revegetar jales de mina y extraer metales, es importante destacar que este tipo de pasto es capaz de establecerse de manera natural. La producción de materia seca de *P. pratensis* en el jal fue 65.7% menor (0.14 ton ha⁻¹) a la reportada por Padmavathamma y Li (2010a), con 0.70 ton ha⁻¹ en 90 dds. El desarrollo del sistema radical fue escaso,

y directamente proporcional a la producción de materia seca. Las condiciones desfavorables en el jal pudieron impedir el adecuado crecimiento y desarrollo radical de dicha especie.

P. pratensis presentó valores bajos de producción, se cita que la especie es buena acumuladora de metales como Pb, Cd y Mn, sin embargo, debido a la baja producción de biomasa, no es una planta adecuada para la fitorremediación del jal (Yun-Guo, Hui-Zhi, Guang-Ming, Bao-Rong & Xin, 2006).

C. Metales en raíz y hojas de las plantas

El sistema radicular de *L. perenne* extrajo la mayor cantidad de Cu con el tratamiento Lp (99.70 mg kg⁻¹), para Mn y Cd fue el tratamiento Lp+Suelo+Composta con 3793.40 mg kg⁻¹ y 6.95 mg kg⁻¹ respectivamente y para plomo fue Lp+Composta con 57.10 mg kg⁻¹. En la hoja, el valor más alto para Cu se presentó en Lp (57.60 mg kg⁻¹). En general, los datos mostraron que con Cu, Zn y Mn se rebasan los valores adecuados para *L. perenne* de acuerdo con lo reportado por Fageria, Baligar y Jones (1997). En tanto que las concentraciones encontradas de Cd y Pb, Kabata-Pendias (2010) las clasifica como excesivas (Tabla III). Cabe señalar que, aunque no existieron diferencias significativas para Ni, los valores obtenidos en Lp+Suelo+Composta y Lp coinciden con Kabata-Pendias (2010), indicando que son excesivas.

En el caso de *P. pratensis* en la parte de la raíz, el tratamiento que mostró el valor más alto para Cu fue Pp con 87.45 mg kg⁻¹ y para Mn fue Pp+Suelo+Composta con 2327.60 mg kg⁻¹. En la hoja, el tratamiento Pp con 42.95 mg kg⁻¹ fue el valor más alto para Cu. El Cu, Zn y Mn rebasan los valores que Kabata-Pendias (2010) clasifica como excesivos (Tabla IV). Las concentraciones de Ni, aunque no presentaron diferencias significativas entre tratamientos, existió un contenido excesivo en Pp+Suelo y Pp+Residuo+Composta.

Los resultados obtenidos en la presente investigación mostraron que ambas especies tanto en raíz como en la hoja, son capaces de extraer metales pesados de manera significativa, sobre todo cuando crecen en el jal acondicionado con composta.

La materia orgánica contribuye al descenso del pH, lo cual origina el incremento de la solubilidad de los metales, siendo móviles a pH ácido, mientras que a pH alcalino los minerales son poco solubles, de manera general la movilidad es inversamente proporcional al pH (Volke, Velasco & de la Rosa, 2005; Ramos-Gómez *et al.*, 2012). En el presente estudio, al final del experimento se observó un decremento, aunque mínimo, en el pH (de 7.89 a 0 dds a 7.3 a 103 dds). Al respecto, Paradelo (2013) menciona que la adición de composta corrige valores extremos de pH en residuos mineros, debido al contenido de materia orgánica y su capacidad amortiguadora, la cual se debe a la presencia de grupos funcionales como los carboxilos, fenoles y aminas (Nieder & Bendi, 2008).

Padmavathiamma y Li (2010a, 2010b) evaluaron la extracción de Pb, Mn, Cu y Zn por raíces y follaje de *L. perenne* y *P. pratensis*, reportaron valores inferiores en raíz para Pb (49 mg kg⁻¹), Mn (1143 mg kg⁻¹) y valores dentro del intervalo de los datos obtenidos en el presente estudio para Zn (600 mg kg⁻¹) y Cu (80 mg kg⁻¹). En follaje Pb (16 mg kg⁻¹) y Mn (1178 mg kg⁻¹) son ligeramente inferiores a los observados en el presente trabajo.

Tabla III. Concentración de metales pesados en la raíz y parte área de *L. perenne*

Tratamiento	Cu	Zn	Mn	Cd	Ni	Pb
mg kg ⁻¹						
Raíz						
Lp	99.70 ^a	468.60 ^a	701.30 ^b	2.90 ^{ab}	31.95 ^a	43.00 ^{ab}
	±19.9	±146.2	±319.7	±0.1	±31.2	±1.5
Lp+Composta	81.65 ^a	589.10 ^a	1164.90 ^{ab}	3.40 ^{ab}	13.60 ^a	57.10 ^a
	±16.5	±255.9	±1039.2	±2.4	±6.8	±3.8
Lp+Residuo	33.25 ^b	364.10 ^a	1415.20 ^{ab}	2.25 ^b	1.90 ^a	11.65 ^{ab}
	±5.0	±7.8	±63.0	±0.5	±0.4	±0.8
Lp+Residuo+Composta	36.40 ^b	351.50 ^a	1409.70 ^{ab}	2.40 ^{ab}	5.45 ^a	10.15 ^b
	±8.2	±33.4	±212.3	±0.4	±1.3	±1.3
Lp+Suelo	74.55 ^a	721.10 ^a	2889.70 ^{ab}	6.60 ^{ab}	21.10 ^a	50.45 ^{ab}
	±4.7	±229.5	±815.2	±0.0	±5.7	±25.5
Lp+Suelo+Composta	89.60 ^a	783.20 ^a	3793.40 ^a	6.95 ^a	27.50 ^a	24.65 ^{ab}
	±11.0	±178.9	±397.5	±0.2	±8.6	±7.0
Hoja						
Lp	57.60 ^a	453.80 ^a	1281.50 ^a	2.90 ^a	11.20 ^a	24.50 ^a
	±27.0	±0.8	±118.2	±0.3	±3.3	±6.6
Lp+Composta	29.45 ^{ab}	306.40 ^a	1227.60 ^a	6.25 ^a	6.20 ^a	28.50 ^a ±4.9
	±5.9	±142.3	±602.0	±4.3	±4.7	
Lp+Residuo	17.55 ^{ab}	261.80 ^a	1328.30 ^a	1.85 ^a	1.05 ^a	28.85 ^a
	±6.0	±152.5	±680.6	±0.8	±1.2	±8.4
Lp+Residuo+Composta	13.95 ^b	186.50 ^a	1193.50 ^a	1.45 ^a	0.60 ^a	9.45 ^a ±5.7
	±1.1	±24.1	±283.1	±0.2	±0.4	
Lp+Suelo	16.15 ^{ab}	395.50 ^a	1767.20 ^a	3.90 ^a	5.85 ^a	18.85 ^a
	±1.5	±139.2	±444.1	±1.4	±3.7	±9.0
Lp+Suelo+Composta	26.65 ^{ab}	328.90 ^a	2071.30 ^a	6.70 ^a	41.80 ^a	14.85 ^a
	±9.8	±51.3	±650.3	±3.8	±34.6	±4.3
Cantidad excesiva ¹	20-100	100-400	400-1000	5-30	10-100	30-300
Adecuado ²	5-12	15-50	50-300	NR	NR	NR

Medias en la misma columna con diferente letra son estadísticamente diferentes (Tukey, α=0.05); ¹Cantidades excesivas o tóxicas para la mayoría de las especies de plantas (Kabata-Pendias, 2010), ²Concentraciones adecuadas para *L. perenne* (Fageria, Baligar & Jones 1997).

Tabla IV. CONCENTRACIÓN DE METALES PESADOS EN LA RAÍZ Y PARTE ÁREA DE *P. PRATENSIS*

Tratamiento	Cu	Zn	Mn	Cd	Ni	Pb
Mg kg ⁻¹						
Raíz						
Pp	87.45 ^a ±10.0	247.00 ^a ±103.4	391.10 ^b ±16.3	1.55 ^a ±0.1	6.30 ^a ±3.5	53.95 ^a ±8.0
Pp+Composta	68.50 ^{ab} 11.7	402.10 ^a ±31.9	1510.30 ^{ab} ±258.2	2.75 ^a ±0.2	13.80 ^a ±2.7	59.15 ^a ±3.0
Pp+Residuo	61.05 ^{ab} ±3.7	353.10 ^a ±101.1	1365.10 ^{ab} ±247.3	11.00 ^a ±11.7	40.65 ^a ±39.0	47.85 ^a ±16.6
Pp+Residuo+Composta	45.00 ^b ±7.9	286.00 ^a ±31.1	1237.5 ^{ab} ±354.7	5.05 ^a ±2.6	5.55 ^a ±3.3	10.00 ^a ±4.0
Pp+Suelo	68.00 ^{ab} ±8.1	503.80 ^a ±266.0	2196.70 ^a ±768.5	3.75 ^a ±0.9	8.60 ^a ±5.4	55.90 ^a ±31.0
Pp+Suelo+Composta	82.40 ^a ±7.6	490.10 ^a ±87.9	2327.60 ^a ±451.1	3.75 ^a ±0.9	12.45 ^a ±0.9	38.05 ^a ±2.3
Hoja						
Pp	42.95 ^a ±0.1	300.85 ^a ±2.3	827.80 ^a ±78.6	2.45 ^a ±0.8	2.25 ^a ±0.5	23.85 ^a ±23.0
Pp+Composta	22.20 ^b ±4.0	268.95 ^a ±21.0	1341.50 ^a ±72.3	2.10 ^a ±0.0	5.35 ^a ±0.8	27.10 ^a ±13.9
Pp+Residuo	22.35 ^b ±4.6	286.55 ^a ±72.3	1287.60 ^a ±287.0	2.40 ^a ±0.3	5.90 ^a ±6.9	8.25 ^a ±3.3
Pp+Residuo+Composta	21.75 ^b ±1.6	159.50 ^a ±24.9	731.00 ^a ±276.1	6.45 ^a ±5.9	15.75 ^a ±19.6	9.45 ^a ±5.3
Pp+Suelo	28.90 ^b ±7.9	267.30 ^a ±56.0	1205.60 ^a ±60.7	7.00 ^a ±7.1	38.25 ^a ±48.7	13.85 ^a ±6.4
Pp+Suelo+Composta	20.45 ^b ±1.2	149.60 ^a ±49.8	1056.60 ^a ±260.6	1.70 ^a ±0.3	3.50 ^a ±2.5	7.25 ^a ±0.6
Cantidad excesiva ¹	20-100	100-400	400-1000	5-30	10-100	30-300

Medias en la misma columna con diferente letra son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha=0.05$); 1Cantidades excesivas o tóxicas para la mayoría de las especies de plantas (Kabata-Pendias, 2010).

D. Relación de metales pesados absorbidos por la planta respecto a su biomasa obtenida

Para *L. perenne* los elementos Cu, Zn, Mn, Ni y Pb presentaron diferencia estadística significativa entre tratamientos. El tratamiento Lp+Composta fue significativamente mayor en absorción de Cu y Zn; con el tratamiento Lp+Suelo+Composta la absorción de Mn y Zn fue mayor, finalmente para Pb el tratamiento Lp+Composta obtuvo mejores resultados (Tabla V).

El pasto *P. pratensis* con el tratamiento Pp+Suelo+Composta presentó una mayor absorción de Cu, Mn, Cd, sin embargo, para Zn y Ni y Pb fue el tratamiento Pp+Composta el que presentó valores más altos (Tabla V). En ambos pastos la relación de metales absorbidos fue mayor con la presencia de composta.

Tabla V. Relación de metales pesados absorbidos por la planta respecto a su biomasa en los diferentes tratamientos

Tratamiento	Cu	Zn	Mn	Cd	Ni	Pb
mg en 3.055 m ²						
Lp	4.66 ^b	26.40 ^b	56.7 ^b	0.16 ^a	1.18 ^b	1.95 ^b
	±2.3	±3.3	±8.3	±0.03	±0.9	±0.6
Lp+Composta	39.94 ^a	314.57 ^a	876.8 ^{ab}	4.31 ^a	6.74 ^{ab}	31.61 ^a
	±13.1	±92.0	±387.6	±2.3	±3.2	±6.1
Lp+Residuo	2.89 ^b	39.15 ^b	178.8 ^{ab}	0.25 ^a	1.18 ^b	2.96 ^b
	±1.4	±23.8	±114.4	±0.2	±0.1	±1.9
Lp+Residuo+Composta	12.53 ^b	140.53 ^{ab}	734.2 ^{ab}	1.02 ^a	1.28 ^b	5.78 ^b
	±0.6	±7.7	±99.1	±0.1	±0.1	±2.4
Lp+Suelo	4.46 ^b	55.63 ^b	234.7 ^{ab}	0.52 ^a	1.30 ^b	3.56 ^b
	±0.04	±10.4	±26.2	±0.003	±0.2	±2.1
Lp+Suelo+Composta	20.92 ^{ab}	199.64 ^{ab}	1057.6 ^a	2.39 ^a	11.97 ^a	7.12 ^b
	±4.4	±14.6	±238.9	±0.6	±3.6	±2.4
Pp	0.06 ^b	0.29 ^b	0.67 ^b	0.002 ^c	0.003 ^b	0.04 ^b
	±0.01	±0.1	±0.2	±0.0003	±0.002	±0.02
Pp+Composta	4.67 ^a	37.88 ^a	165.78 ^a	0.27 ^{ab}	1.008 ^a	
	±1.3	±8.5	±33.2	±0.1	±0.3	4.74 ^a ±1.5
Pp+Residuo	0.06 ^b	0.59 ^b	2.54 ^b	0.009 ^c	0.033 ^b	0.04 ^b
	±0.01	±0.2	±0.9	±0.01	±0.01	±0.004
Pp+Residuo+Composta	0.24 ^b	1.67 ^b	7.14 ^b	0.08 ^{bc}	0.207 ^{ab}	0.08 ^b
	±0.1	±0.7	±1.4	±0.1	±0.3	±0.004
Pp+Suelo	0.53 ^b	4.29 ^b	19.22 ^b	0.05 ^c	0.229 ^{ab}	0.37 ^b
	±0.02	±1.1	±1.3	±0.03	±0.2	±0.2
Pp+Suelo+Composta	5.46 ^a	34.68 ^a	190.15 ^a	0.30 ^a	0.862 ^{ab}	2.36 ^{ab}
	±0.3	±8.7	±46.6	±0.03	±0.2	±0.2

En la Tabla VI se muestran las correlaciones entre el volumen radical, el peso seco y las concentraciones de metales extraídos. En general, los valores de correlación fueron positivos ($R= 0.7$ a 0.9) en las dos especies de pastos; para las variables peso seco y volumen radical en *L. perenne* la correlación con la extracción de metales fue altamente significativa ($\alpha=0.01$) y para *P. pratensis* fue significativa ($\alpha=0.05$). Con lo anterior se demuestra que, a mayor volumen radical y peso seco, existió una mayor concentración de metales en la planta.

Lo anterior es apoyado por Barajas-Aceves, Caramillo-Ravelo y Rodríguez-Vázquez (2015) y Sharma y Dubye (2005) quienes citan que la extracción de metales como el Pb depende de la materia orgánica, pH, área radical y exudados radicales, la absorción de este metal aumenta a un pH de 3 a 8.5.

Se observó que los tratamientos a los cuales se adicionaron composta, presentaron mayor biomasa y que la extracción más alta de metales pesados ocurrió para Mn y Zn. Jordan, Mullen y Courtney (2009), estudiaron el efecto de la incorporación de diferentes dosis de composta en la extracción de Cu, Zn y Pb en relave utilizando *L. perenne*. Los autores refieren que, a mayor dosis de composta, existió mayor producción de biomasa y mayor extracción de metales.

También se encontró que las concentraciones obtenidas para Zn, Cd y Pb en este estudio, rebasan la tolerancia máxima de la planta de acuerdo con lo reportado por Jordan, Mullen y Courtney (2009) (Zn

>375 mg kg⁻¹, Cd 1 mg kg⁻¹ y Pb 10 mg kg⁻¹). Resultados similares fueron obtenidos por Padmavathiamma y Li (2010a, 2010b) quienes estudiaron el efecto de la incorporación de diversas enmiendas en suelos contaminados con metales pesados. Los autores encontraron que la adición de composta originaba la mayor cantidad de biomasa en *P. pratensis* y que provocaba un incremento significativo en la extracción de Cu, Zn, Pb y Mn en *L. perenne* y *P. pratensis*.

Tabla VI. Correlaciones de Person para volumen, peso seco y extracción de metales.

	Volumen	Peso Seco	Cu	Zn	Mn	Cd	Ni	Pb
<i>L. perenne</i>								
Vol	1.00	0.99**	0.99**	0.99**	0.99**	0.98**	0.98**	0.92**
PS		1.00	0.99**	0.99**	0.99**	0.98**	0.98**	0.91**
Cu			1.00	0.98**	0.99**	0.98**	0.96**	0.87*
Zn				1.00	0.98**	0.97**	0.98**	0.94**
Mn					1.00	0.98**	0.96**	0.88*
Cd						1.00	0.98**	0.87*
Ni							1.00	0.94**
Pb								1.00
<i>P. pratensis</i>								
Vol	1.00	0.99**	0.91*	0.93**	0.78	0.88*	0.43	0.86*
PS		1.00	0.87*	0.90*	0.79*	0.83*	0.40	0.81*
Cu			1.00	0.98**	0.78	0.99**	0.66	0.94**
Zn				1.00	0.87*	0.98**	0.70	0.89*
Mn					1.00	0.79	0.81*	0.55
Cd						1.00	0.71	0.93**
Ni							1.00	0.42

*p < 0.05; ** p<0.01

Existen pocos trabajos realizados en campo que informen sobre la respuesta de *L. perenne* y *P. pratensis* a la siembra directa en jales y a la eficiencia en la extracción de metales pesados. Sin embargo, en condiciones de invernadero, algunos reportes señalan que *L. perenne* es capaz de concentrar altas cantidades de Cd, Cu, Zn, Mn, Mo, Ni y Pb, cuando la especie se siembra en jales (Bautista-Gabriel *et al.*, 2016; Santibañez, Verdugo & Ginocchio, 2008).

IV. CONCLUSIONES

La adición de composta en el jal de mina permitió la germinación, el crecimiento y desarrollo de las plantas, así como una mayor producción de biomasa. La extracción de metales pesados en el jal de mina con *L. perenne* (cadmio >manganeso >plomo >zinc >níquel >cobre) y *P. pratensis* (níquel>manganeso>cadmio>zinc>plomo>cobre) varió dependiendo del tratamiento y del elemento, acumulándose principalmente en la parte radicular de las plantas. Se recomienda ampliamente en la revegetación de jales de mina el establecimiento de *L. perenne*, por su buen desarrollo y por su capacidad de extracción de metales pesados.

V. REFERENCIAS

- [1] Paradelo, R. (2013). Utilización de materiales compostados en la rehabilitación potencial de espacios afectados por residuos mineros y suelos de mina. *Boletín Geológico y Minero*, 124(3), 405-419. Obtenido en: http://aguas.igme.es/Boletin/2013/124_3/5_ARTICULO%204.pdf
- [2] Worldwide, Environmental Law Alliance (ELAW). (2010). Guía para evaluar EIAs de proyectos mineros. Oregón, E.U. <https://www.elaw.org/files/mining-eia-guidebook/Guia%20%20para%20Evaluar%20EIAs%20de%20Proyectos%20Mineros.pdf>
- [3] De la O-Villanueva, M., Meza-Figueroa, D., Maier, R. M., Moreno, D., Gómez-Álvarez, A., Del Río-Salas, D., Mendívil, H. & Montijo, A. (2013). Procesos erosivos en jales de la Presa I de Nacozari de García, Sonora y su efecto en la dispersión de contaminantes. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 65(1), 27-38. Obtenido en <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v65n1/v65n1a4.pdf>
- [4] Ramos-Gómez, M., Avelar J., Medel-Reyes, A., Yamamoto L., Godínez L., Ramírez M., Guerra R. & Rodríguez, F. (2012). Movilidad de metales en jales procedentes del distrito minero de Guanajuato, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 28(1), 49-59. Obtenido en <http://www.scielo.org.mx/pdf/rica/v28n1/v28n1a5.pdf>
- [5] Mendez, M. O. & Maier, R. M. (2008). Phytoremediation of mine tailings in temperate and arid environments. *Environmental Science and Bio/Technology*, 7(1), 47-59. doi: 10.1007/s11157-007-9125-4
- [6] Hernández-Acosta, E., Mondragón-Romero, E., Cristóbal-Acebedo, D., Rubiños-Panta, J. E., & Robledo-Santoyo, E. (2009). Vegetación, residuos de mina y elementos potencialmente tóxicos de un jal de Pachuca, Hidalgo, México. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*, 15(2), 109-114. Obtenido en <http://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v15n2/v15n2a4.pdf>
- [7] Sánchez-López, A. S., González-Chávez, M. A., Carrillo-González, R., Vangronsveld, J. & Díaz-Garduño, M. (2015). Wild flora of mine tailings: perspectives for use in phytoremediation of potentially toxic elements in a semi-arid region in México. *International Journal of Phytoremediation*, 17(5), 476-484. doi: 10.1080/15226514.2014.922922
- [8] Wang, B., Yuan, X., Zhao, X., Wang, S. & Chen, H. (2015). Uptake of trace metals by *Imperata cylindrical* in pot experiments with mafic tailings and its significance for phytoremediation. *Applied Mechanics and Materials*, 737, 627-632. doi: 10.4028/www.scientific.net/AMM.737.627
- [9] Arienzo, M., Adamo, P., & Cozzolino, V. (2004). The potential of *Lolium perenne* for revegetation of contaminated soil from a metallurgical site. *The Science of The Total Environment*, 319(1-3), 13-25. doi: 10.1016/S0048-9697(03)00435-2
- [10] Padmavathiamma, P. K. & Li, L. Y. (2010a). Effect of amendments on phytoavailability and fractionation of copper and zinc in a contaminated soil. *International Journal of Phytoremediation*, 12(7), 697-715. doi:10.1080/15226510903353179
- [11] García, M. E. (2004). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (5a ed.). México: Instituto de Geografía UNAM. http://www.igeograf.unam.mx/sigg/utilidades/docs/pdfs/publicaciones/geo_siglo21/serie_lib/modific_al_sis.pdf

- [12] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelo, estudio, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. 7 de diciembre de 2001. <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>
- [13] Ramos-Arroyo, Y. R. & Siebe-Grabach, C. D. (2006). Estrategia para identificar jales con potencial de riesgo ambiental en un distrito minero: estudio de caso en el Distrito de Guanajuato, México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 23(1), 54-74. Obtenido en <http://www.scielo.org.mx/pdf/rmcg/v23n1/v23n1a4.pdf>
- [14] Ruíz Figueroa, J. F. (2009). Ingeniería del compostaje. México: Universidad Autónoma Chapingo.
- [15] Alvarenga, P., Gonçalves, A. P., Fernández, R. M., de Varennes, A., Vallini, G., Duarte, E. & Cunha-Queda, A. C. (2008). Evaluation of composts and liming materials in the phytostabilization of a mine soil using perennial ryegrass. *Science of the Total Environment*, 406, 43-56. doi: 10.1016/j.scitotenv.2008.07.061
- [16] Jordan, S. N., Mullen, G. J. & Courtney, R. G. (2008). Utilization of spent mushroom compost for the revegetation of lead-zinc tailings: Effects on physico-chemical properties of tailings and growth of *Lolium perenne*. *Bioresource technology*, 99(17), 8125-8129. doi: 10.1016/j.biortech.2008.03.054
- [17] Kacprzak, M., Grobelak, A., Grosser, A. & Prasad, M. N. (2014). Efficacy of Biosolids in Assisted Phytostabilization of Metalliferous Acidic Sandy Soils with Five Grass Species. *International journal of phytoremediation*, 16(6), 593-608. doi: 10.1080/15226514.2013.798625
- [18] Jordan, S. N., Mullen G. J. & Courtney R. G. (2009). Metal uptake in *Lolium perenne* established on spent mushroom compost amended lead-zinc tailings. *Land Degradation & Development*, 20(3), 277-282. doi: 10.1002/ldr.909
- [19] Castellanos, J. Z., Uvalle-Bueno, J. X. & Aguilar-Santelises, A. (2000). Manual de interpretación de análisis de suelos y aguas (2a ed). Instituto de Capacitación para la Productividad Agrícola. Colección INCAPA. Celaya, Guanajuato, México.
- [20] Romero, F. M. y Gutiérrez Ruíz, M. (2010). Estudio comparativo de la peligrosidad de jales en dos zonas mineras localizadas en el sur y centro de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 62(1), 43-43. Obtenido en <http://www.scielo.org.mx/pdf/bsgm/v62n1/v62n1a4.pdf>
- [21] Comisión Técnico Consultiva de Coeficientes de Agostadero (COTECOCA). (2001). Gramíneas recomendadas para zonas áridas, semiáridas y templadas: rye grass perenne (*Lolium perenne*). México.
- [22] Santibáñez, C., Verdugo C., & Ginocchio R. (2008). Phytostabilization of copper mine tailings with biosolids: implications for metal uptake and productivity of *Lolium perenne*. *Science of the Total Environment*, 395(1), 1-10. doi:10.1016/j.scitotenv.2007.12.033
- [23] Karami, N., Clemente R., Moreno-Jiménez E., Lepp W. N. & Beesley, L. (2011). Efficiency of green waste compost and biochar soil amendments for reducing lead and copper mobility and uptake to ryegrass. *Journal of hazardous material*, 191(1-3), 41-48. doi:10.1016/j.jhazmat.2011.04.025

- [24] Yun-Gou, L. I. U., Hui-Zhi Z., Guang-Ming Z., Bao-Rong H. & Xin, L. (2006). Heavy metal accumulation in plants on Mn mine tailings. *Pedosphere*, 16(1), 131-136. doi: 10.1016/S1002-0160(06)60035-0
- [25] Fageria, N. K., Baligar V. C. & Jones C. A. (1997). *Growth and mineral nutrition of field crops*. Boca Raton, Florida: CRC Press. <https://www.crcpress.com/Growth-and-Mineral-Nutrition-of-Field-Crops/Fageria-Baligar-Jones/p/book/9781439816950>
- [26] Kabata-Pendias, A. (2010). *Trace elements in soils and plants* (4a ed.). Florida, EUA: CRC Press. <https://www.crcpress.com/Trace-Elements-in-Soils-and-Plants/Kabata-Pendias/p/book/9781420093681>
- [27] Volke, Sepúlveda, T., Velasco Trejo, J. A. & De la Rosa Pérez, D. A. (2005). *Suelos contaminados por metales y metaloides: muestreo y alternativas para su remediación*. D.F., México: Instituto Nacional de Ecología. <https://www.worldcat.org/title/suelos-contaminados-por-metales-y-metaloides-muestreo-y-alternativas-para-su-remediacion/oclc/99997022>
- [28] Nieder, R., & Bendi, D. K. (2008). *Carbon and nitrogen in the terrestrial environment*. New York, EUA: Springer Science & Bussiness Media. <https://www.springer.com/la/book/9781402084324>
- [29] Padmavathiamma, P. K. & Li, L. Y. (2010b). Phytoavailability and fractionation of lead and manganese in a contaminated soil after application of three amendments. *Bioresource Technology*, 101(14), 5667-5676. doi: 10.1016/j.biortech.2010.01.149
- [30] Barajas-Aceves, M., Camarillo-Ravelo, D., & Rodríguez-Vázquez, R. (2015). Mobility and translocation of heavy metals from mine tailings in three plant species after amendment with compost and biosurfactant. *Soil and Sediment Contamination: An International Journal*, 24(3), 223-249. doi:10.1080/15320383.2015.946593
- [31] Sharma, P. & Dubey, R. S. (2005). Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(1), 35-52. Obtenido en <http://www.scielo.br/pdf/bjpp/v17n1/a04v17n1.pdf>
- [32] Bautista-Gabriel, E. J., Hernández-Acosta, E., Cristóbal-Acevedo, D., Quintero-Lizaola, R., Díaz-Vargas, P. & Robledo-Satoyo, E. 2016. Extracción de metales pesados por *Lolium perenne* en residuos de mina. *Revista Iberoamericana de Ciencias*, 1-16. Obtenido en <http://www.reibci.org/publicados/2016/oct/1600106.pdf>