

EFFECTOS DE LA APLICACIÓN DE LODOS DE DEPURADORA EN LA RESTAURACIÓN DE SUELOS DE CANTERAS DE PIEDRA CALIZA SOBRE LA FERTILIDAD DE LOS SUSTRATOS

A. HERETER¹, M. JORBA², R. JOSA³

¹ ESAB. UPC. Urgell 187. 08036 Barcelona. e-mail: agnes.hereter@upc.es.

² Biología. UB. Diagonal 645. 08028. Barcelona.

³ DEAB. UPC. Urgell 187. 08036 Barcelona.

Abstract. The results of a retrospective study of sewage sludge application on minerals materials of restored open cut calcareous mines on Catalonia are presented. They are compared with the evolution of soils without any treatment and also with soils sowed with herbaceous species. The organic amendment improves critical properties necessities for the revegetation successful on this edaphic material with low quality: best conditions of the pH values and both soil organic matter and available phosphorus increments. Moreover, physical characteristics related with the hydrologic behaviour of the substrates are also enhanced. The use of sewage sludge favours the development of the vegetation on the firsts phases of the restoration.

Key words: sewage sludge, open calcareous mines, fertility, revegetation.

Resumen. Se presentan los resultados obtenidos en el estudio retrospectivo de la aportación de lodos de depuradora a materiales minerales de reposición en canteras de caliza de Catalunya en las que se realizan restauraciones integrales. Se compara con la evolución de suelos sin tratamiento y con siembras de herbáceas. En la utilización de estos materiales edáficos de baja calidad, la adición de enmiendas orgánicas mejora propiedades críticas del sustrato para el buen desarrollo de la revegetación, como son: mejores condiciones en el rango de pH, incrementos del contenido de materia orgánica y de fósforo asimilable y unas características físicas más favorables en relación con el comportamiento hidrológico. La utilización de lodos favorece así el desarrollo de la vegetación en las primeras etapas de restauración.

Palabras clave: lodos de depuradora, canteras de caliza, fertilidad, revegetación.

INTRODUCCIÓN

La revegetación de las zonas afectadas por actividades mineras después de su fase productiva es una de los objetivos principales para evitar su degradación, como míni-

mo en las primeras etapas de restauración.

El éxito en la revegetación, entre otros factores biogeográficos, está ligado a la reconstrucción del medio edáfico, como una de las etapas para la reconstrucción del sistema natural (Jasper, 2002). El material

mineral de reposición que se utiliza como sustrato en estos procesos, de procedencia diversa, suele presentar una calidad deficiente para proporcionar condiciones adecuadas para el desarrollo de la vegetación y, normalmente, son necesarias utilizar técnicas de corrección y mejora de estos materiales (Dollhopf, 2002; Josa *et al.*, 2003).

En Catalunya, desde el año 1988, existe una normativa específica de restauración por la que se pretende minimizar el impacto ambiental que ocasionan las explotaciones y conseguir que estas áreas queden integradas en el conjunto natural que les rodean. Para ello, se han desarrollado actuaciones de restauración integral que utilizan como sustrato materiales de diferente origen, generados en la propia explotación o bien de origen externo, para restaurar paralelamente las zonas ya explotadas. Los tratamientos de revegetación que se han realizado en los diferentes ensayos abarcan desde plantaciones intensivas de especies arbóreas en los primeros años de restauración, a siembras para asegurar la estabilización de los sustratos, además de la aplicación de biosólidos (lodos de depuradora), que es el tratamiento más reciente pero más extendido actualmente en el sector.

Los lodos de depuradora son subproductos con alto contenido en materia orgánica (40-70%) y con cantidades importantes de nutrientes como nitrógeno, fósforo y oligoelementos. El uso de esta enmienda orgánica puede mejorar las propiedades físicas y biológicas del sustrato, aumentar la CIC y proporcionar suficiente materia orgánica y nutrientes para soportar la vegetación introducida hasta que se pueda restablecer la vegetación natural del entorno (EPA, 1997).

En este trabajo se analizan los efectos del aporte de lodos de EDAR sobre características edáficas de los sustratos de restauración de canteras de Catalunya, en tratamientos que abarcan los últimos 13 años, y su influencia sobre la revegetación de estas áreas degradadas.

MATERIAL Y MÉTODOS

La zona de estudio comprende diversas áreas de Catalunya, centrándose en las explotaciones de caliza del eje NE-SW. En 15 explotaciones activas, ubicadas en zonas con clima Thornthwaite seco subhúmedo y subhúmedo, se han seleccionado 48 parcelas de 300 m², principalmente taludes con pendientes mayoritariamente superiores a 30°, por ser la situación más habitual en la restauración a cielo abierto.

Los tratamientos estudiados corresponden a tres actuaciones de restauración: a) Aplicación de lodos de depuradora con dosis entre 150-350 t/ha en peso seco, b) Siembra de herbáceas (*Lolium perenne*, *Festuca arundinacea*, *Dactylis glomerata*, *Medicago sativa* y *Onobrichys sp.* son las especies más utilizadas) y c) Aporte de lodos conjuntamente con siembra. Como parcelas control se han utilizado zonas marginales de las mismas explotaciones con materiales de origen diverso, sin aplicación de enmienda ni otros tratamientos (Tabla 1).

La metodología analítica utilizada ha sido la siguiente: Granulometría y textura (USDA) por tamizado los elementos gruesos y en la tierra fina por tamizado en húmedo las arenas y por Pipeta de Robinson las restantes fracciones. Carbonatos totales con Calcímetro de Bernard; Medida del pH en una suspensión acuosa 1:2.5; Materia orgánica por Walkley & Black; Fósforo asimilable por el método Olsen. Para la caracterización física e hidrológica de los sustratos restaurados se ha determinado: Diámetro medio ponderado de los agregados menores de 4 mm; Conductividad hidráulica a saturación en columna de suelo alterada; Retención de agua a saturación e Impedancia mecánica del suelo en los primeros centímetros, con un penetrómetro estático manual.

Se ha utilizado el paquete estadístico SAS para realizar análisis de la varianza de

TABLA 1: Características generales de las parcelas.

TRATAMIENTO	CLIMA THORNTHWAITE	ANTIGÜEDAD AÑOS	NÚMERO PARCELAS	TOTAL PARCELAS
Control	seco subhúmedo	2-10	6	14
	subhúmedo	6-12	8	
Lodos	seco subhúmedo	3	1	6
	subhúmedo	2-6	5	
Lodos + siembra	seco subhúmedo	3-4	5	9
	subhúmedo	2-4	4	
Siembra	seco subhúmedo	2-10	14	19
	subhúmedo	2-13	5	

uno o dos factores (ANOVA) y el test de separación de medias Student-Newman-Keals, a un nivel de probabilidad de 0.05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El horizonte más superficial, en general de mejor calidad, presenta un espesor medio de 30 cm medido con técnicas de georadar. Como consecuencia de la naturaleza del material mineral aportado, son suelos muy pedregosos en superficie (Tabla 2). Los materiales utilizados para la restauración tienen diversas procedencias desde residuos minerales procedentes de la extracción y/o de la trituración de áridos (un 40% del total de parcelas estudiado) hasta un origen externo y diverso frecuentemente mezclado con los rechazos anteriores.

Los sustratos presentan texturas USDA mayoritariamente de las clases francas y dominan las partículas con $\varnothing$ superior a 0.002 mm. Las parcelas con siembra de herbáceas tienen un contenido medio mayor de arcillas (23 %), aunque no son estadísticamente diferentes a los otros tratamientos (test ANOVA para $p < 0.05$). Los contenidos de CaCO_3 totales son variables en todos los grupos de parcelas, reflejando el origen poco homogéneo de los materiales aporta-

dos (Tabla 3). Los valores significativamente superiores de las parcelas tratadas con lodos+siembra, son atribuibles a la naturaleza del material en este tratamiento (rechazo de trituración) que es el más carbonatado (Jorba *et al.*, 2002).

Características químicas

La aplicación de lodos afecta significativamente a los valores de pH, provocando que los suelos de las parcelas donde se han aportado sean los menos básicos, en las dos situaciones climáticas estudiadas. Asimismo, los niveles de fósforo asimilable varían, en este caso produciendo un aumento significativo (para $p < 0.05$) en el contenido de este nutriente respecto a los otros grupos de parcelas (Tabla 3). Cabe destacar sin embargo, la alta variabilidad de este parámetro en los tratamientos control y siembra, en los que el contenido de fósforo oscila entre 1 y 60 mg P/kg. El incremento de fósforo se produce en las parcelas con lodos en las dos condiciones climáticas consideradas.

El porcentaje medio de materia orgánica mejora significativamente con la aportación de lodos a los suelos. Hay que considerar sin embargo que los tratamientos en los que se ha aplicado lodos únicamente o lodos + siembra son los más recientes en las canteras

TABLA 2: Características generales de las muestras superficiales de los suelos de las parcelas según

	PROFUNDIDAD cm			DENSIDAD APARENTE	ELEMENTOS GRUESOS		TIERRA FINA		ARC / (L+ARE)	
TRATAMIENTO	Media	Max.	Min.	Mg m ⁻³	%	% CV	%	% CV		% CV
Control	16.9	26.0	13.3	1.69	44.5	55.2	55.5	44.4	0.290	40.0
Lodos	18.3	20.6	16.4	1.31	48.1	18.6	51.9	17.3	0.292	26.5
Lodos + siembra	21.1	41.0	13.0	1.49	58.0	20.7	42.0	26.0	0.259	21.5
Siembra	19.3	23.3	13.3	1.57	43.8	43.4	57.2	34.9	0.358	39.1

CV= Coeficiente de variación; Arc: % arcilla; L: % limo; Are: % arena

evaluadas (6 años de antigüedad como máximo). Para evaluar el posible efecto del tiempo transcurrido desde la restauración en el contenido de materia orgánica se ha realizado un análisis de la varianza, introduciendo el factor tiempo como variable, con el resultado de la separación (valores más altos) de las parcelas con lodos, de los otros grupos de tratamientos. En consecuencia, para valorar los efectos positivos de la aplicación de lodos en el contenido de materia orgánica de los suelos se cree necesario un tiempo más prolongado de seguimiento de las intervenciones realizadas. Por el contrario, el tipo de clima, teniendo en cuenta la limitación de la poca representatividad del tratamiento con lodos en clima seco (una cantera), no influye en las diferencias encontradas entre los tratamientos estudiados.

Dada la importante cantidad de elementos gruesos presentes en estos materiales, se han transformado los niveles de materia orgánica y fósforo a riqueza en la tierra fina por unidad de superficie, considerando el contenido en gravas, la densidad aparente y el espesor del suelo (Fig. 1). Los resultados muestran que la aplicación de biosólidos duplica el contenido medio de materia orgánica por unidad de superficie respecto a los sustratos sin tratar. Incluso en las parcelas tratadas con lodo más siembra, que en comparación con las control tienen menor contenido en tierra fina (13% inferiores), no se

produce un descenso proporcional. Las diferencias entre los niveles de fósforo asimilable confirman que los tratamientos de lodos y lodos+siembra, incrementan significativamente los contenidos de este nutriente en la fracción fina cuando se compara con los otros tratamientos.

Características físicas y desarrollo de la revegetación

En la figura 2 y la Tabla 4 se han resumido los resultados de la caracterización de parámetros físicos. El tratamiento que, en comparación con las parcelas en las que no se ha realizado ninguna actuación, mejora estadísticamente en general todos los indicadores estudiados es la aportación de lodos: se incrementa la estabilidad estructural al aumentar el tamaño medio de los agregados, así como la facilidad de recarga hídrica (Ks superior) y la capacidad de almacenamiento de agua. Igualmente, presenta condiciones mejores de resistencia a la penetración, aunque en este caso no de manera estadísticamente significativa.

En el proceso de restauración integral, se puede evaluar las consecuencias que tiene el incremento de la calidad de los sustratos en el desarrollo de la revegetación, con indicadores como las características de la vegetación y el grado de madurez del sistema creado. En nuestro estudio, el aumento del contenido de

TABLA 3: Características químicas de los suelos de las parcelas.

	%CaCO ₃		pH H ₂ O		% MO		P mg/kg	
TRATAMIENTO	media	%CV	media	%CV	media	%CV	media	%CV
Control	42 b	39	8.4 a	2.9	1.6 b	61.4	20 c	220
Lodos	29 b	72	7.9 b	1.9	3.9 a	66.8	185 b	46
Lodos + siembra	67 a	25	8.0 b	3.6	2.5 b	53.6	256 a	57
Siembra	35 b	59	8.3 a	2.3	2.2 b	63.2	13 c	128

Para cada parámetro, los valores medios de los tratamientos con distinta letra presentan diferencias significativas, para $p < 0.05$, en el análisis de la varianza y el test de Student-Newman-Keuls.

materia orgánica de los suelos de las parcelas se relaciona positivamente con el recubrimiento y la biomasa vegetal, por lo que en los sustratos tratados con lodos se ha observado que el recubrimiento vegetal y los valores de biomasa son superiores al

resto de los tratamientos. Sin embargo, la adición de lodos determina un mayor número de especies ruderales y valores menores de diversidad respecto a los controles (Jorba *et al.*, 2002; Moreno, 2000). Las áreas tratadas presentan todavía así

TABLA 4: Valores medios de parámetros físicos de los suelos en las parcelas con aplicación de lodos y en las que no incluyen esta enmienda orgánica.

Parámetro	CON LODOS	SIN LODOS
Diámetro medio Ponderado (mm)	1.53 a	1.36 b
Ks (cm/h)	57.6 a	36.0 b
Impedancia Mecánica (MPa)	1.98 a	1.72 a
Retención agua saturación % (peso)	48.59 a	46.98 b

Para cada parámetro, los valores medios de los tratamientos con distinta letra presentan diferencias significativas, para $p < 0.05$, en el análisis de la varianza y el test de Student-Newman-Keuls.

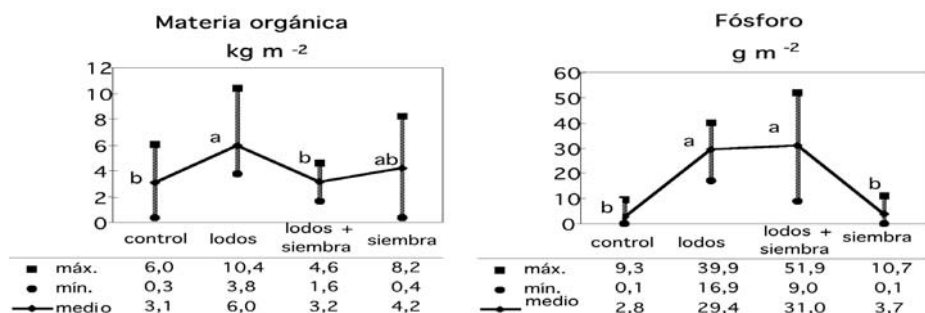


FIGURA 1: Contenidos de materia orgánica y fósforo en la tierra fina de los suelos de los diferentes tratamientos.

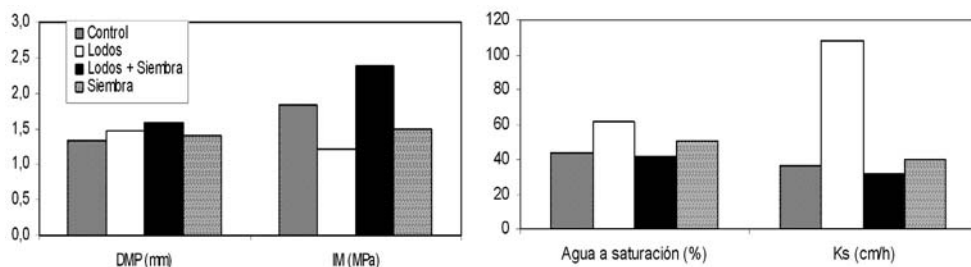


FIGURA 2: Valores medios en los diferentes tratamientos de los parámetros físicos evaluados. DMP: Diámetro medio ponderado de los agregados; IM: Impedancia mecánica; Ks: Conductividad hidráulica.

poca similitud con el entorno natural no perturbado, pero se consigue mejorar dos aspectos: disminuir el impacto visual de los taludes si se compara con situaciones en las que no se realizan intervenciones, y contribuir a evitar la degradación del suelo al propiciar mayores cubiertas vegetales en la superficie que protegen el suelo de los procesos erosivos.

Sin embargo, conviene no ignorar los potenciales efectos negativos de la aportación de lodos en los sustratos resultantes, que, por lo menos temporalmente, pueden convertir las áreas restauradas en puntos con concentraciones anormalmente elevadas de nutrientes, metales pesados y contaminantes orgánicos por lo que es conveniente controlar su composición y adecuar las dosis aportadas (Düring y Gäth, 2002).

CONCLUSIONES

La incorporación de enmiendas orgánicas en forma de lodos de depuradora fomenta una mejora de las condiciones de fertilidad del sustrato edáfico utilizado en restauraciones de canteras de caliza a cielo abierto. Los valores de pH de los materiales tratados disminuyen en media unidad y aumenta significativamente los contenidos de materia orgánica y fósforo asimilable en comparación con las áreas donde sólo se repone sustrato. Se mejora también la retención hídrica e incrementa

las reservas de agua en el suelo, representando una reducción del período de sequía efectiva para la vegetación. Además de contribuir a mejorar la baja calidad edáfica de los materiales de reposición, estas intervenciones permiten una mejor conservación del suelo ya que favorecen el desarrollo de la vegetación en las etapas más críticas de la revegetación. No obstante, a pesar de los beneficios que supone su aplicación, su uso debe restringirse a acciones limitadas en el tiempo y de manera controlada, con la finalidad de favorecer los estadios iniciales de la revegetación, dado el riesgo potencial que su aportación continuada puede originar en el medio circundante.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Proyecto I+D+I 2FD97-1644-CO3-01 del Ministerio de Ciencia y Tecnología y fondos FEDER.

REFERENCIAS

- Dollhopf, D.J. (2002): Rehabilitation after open cut mines. En: Lal, R. (Ed). Encyclopedia of Soil Science, 1111-1114. Marcel Dekker Inc. New York.
- Düring, R.A., Gäth, S. (2002): Utilization of municipal organic wastes in agriculture: where do we stand, where will we go?.

- Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 165, 544-556.
- Environmental Protection Agency. (1997): Land application of biosolids. Process design manual. Technomic Publishing Company. Inc. USA, 290 p.
- Jasper, D. (2002): Indicators and monitoring of rehabilitation. En: Lal, R. (Ed). *Encyclopedia of Soil Science*, 1101-1103. Marcel Dekker Inc. New York.
- Josa, R., Jorba, M., Hereter, A., Vallejo, R. (2003): Los rechazos minerales procedentes de la explotación de calizas. Limitaciones para su uso como sustrato para la restauración ecológica. *Ingeopres* 116, 42-47.
- Jorba, M., Romanyà, J., Rovira, P., Hereter, A., Josa, R., Vallejo, R. (2002): La restauración ecológica aplicada a la minería a cielo abierto en Cataluña. *Ingeopres* 106, 56-63.
- Moreno, R. (2000): Aplicación de lodos de depuradora en la restauración de canteras: efectos sobre la comunidad vegetal. DEA. UAB. Barcelona.