

Caracterización del medio físico y biótico de la escombrera de Las Minas de Alquife (Granada)

A. SEVILLA-PEREA¹, J. FERNÁNDEZ-GÁLVEZ¹, S. ROSSINI OLIVA², C. CANO^{3,4}, A. BAGO^{3,4}, M.D. MINGORANCE¹

¹Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra (CSIC-UGR), Profesor Albareda 1, 18008 Granada (España), ana.sevilla@eez.csic.es

²Departamento de Biología Vegetal y Ecología, Universidad de Sevilla, Avda. Reina Mercedes s/n, 41012 Sevilla (España)

³Laboratorio de Micorrizas in vitro, Estación Experimental del Zaidín (CSIC), Profesor Albareda 1, 18008 Granada (España)

⁴Mycovitro SL, Avda. Jacobo Camarero s/n, Esc. Empresas Nave 3, 18220-Albolote, Granada(España), www.mycovitro.com

Resumen

La actividad minera, siempre que se produzca con una cierta intensidad, provoca alteraciones en el medio natural, desde las más imperceptibles hasta las que representan claros impactos sobre el medio en que se desarrollan. Este es el caso de la formación de escombreras por el acopio de materiales procedentes de las actividades extractivas sobre la superficie del suelo. La tendencia actual en materia medioambiental promueve la integración de estos espacios en el paisaje, al mismo tiempo que su reutilización con fines socio-económicos. Una de las actuaciones primordiales para conseguir estos fines es la recuperación del suelo y la implantación de cubierta vegetal. Previamente al plan de actuación, se lleva a cabo la caracterización de la situación actual en la que se encuentra el ecosistema. En este emplazamiento, los suelos, de textura arenosa, presentan un pH alcalino, una baja capacidad de intercambio catiónico y bajo contenido en materia orgánica. La vegetación es escasa, dispersa y dominan las especies herbáceas seguidas de las arbustivas. Dentro de las especies herbáceas los representantes más abundantes pertenecen a las familias de Gramíneas, Compuestas y Labiadas. Adicionalmente, se ha evaluado la presencia de micorrizas en las raíces de las especies dominantes, como indicador del equilibrio microbiológico y potencial bioestabilizador del suelo, detectándose colonización micorrícica en la mayoría de ellas, si bien su promedio es muy bajo (5%).

Palabras clave

Tecnosuelo, cobertura vegetal, especies vegetales, micorrizas, suelo degradado, calidad del suelo

1. Introducción

Las Minas de Alquife o Minas del Marquesado del Zenete fueron las minas de Fe, a cielo abierto, más importantes de Europa que finalizaron su actividad en 1996. Este complejo minero se encuentra en trámites para su catalogación como Bien de Interés Cultural con la categoría de “Lugar de Interés Industrial”, según la Ley 14/2007 del patrimonio Histórico de Andalucía. La escombrera de dicha mina representa uno de los elementos de mayor interés, tanto por el grado de alteración del medio físico que

presentan, como por las posibilidades de recuperación y reutilización para actividades de diversa naturaleza.

La reactivación de estos terrenos baldíos para diversos usos, tanto agrícolas como de ocio, constituye una oportunidad de desarrollo, de fuente de ingresos y de mejora de la calidad de vida de la población (FERNÁNDEZ SÁNCHEZ, 2002). En los últimos tiempos, se han llevado a cabo investigaciones con el fin de lograr la restauración de las escombreras. Algunos ejemplos, que muestran el interés por la recuperación de estos espacios en España, son los estudios realizados en las escombreras de minas ricas en sulfuros metálicos en Galicia, (ASENSIO FANDIÑO et al., 2008), las minas de Fe, Pb y Zn en Cartagena (Murcia) (CONESA et al., 2007; ZANUZZI et al., 2009), y las minas de uranio del centro peninsular (MARTÍNEZ RUIZ & FERNÁNDEZ SANTOS, 2005).

La clave del éxito de la restauración y reutilización de las escombreras abandonadas consiste en identificar su potencial de uso, por ejemplo, agrícola, ambiental y/o recreativo (HOSSEIN et al., 2010). Es importante destacar que la disponibilidad de nutrientes, la presencia de elementos tóxicos, la capacidad de retención de agua, etc., son algunas de las características del suelo que determinarán el desarrollo y el tipo de vegetación que puede instaurarse. Del mismo modo, el crecimiento de la vegetación favorece el desarrollo del suelo. Por ello, una de las actuaciones primordiales para alcanzar los fines de la restauración es la recuperación del suelo y, con ello, la implantación de cubierta vegetal. Por tanto, el conocimiento del estado actual del ecosistema, previo a la actuación, a través de indicadores de calidad del suelo de la escombrera y la caracterización de las especies vegetales establecidas de forma natural, constituye uno de los pilares para el éxito de la restauración.

2. Objetivos

El objetivo del presente trabajo es la caracterización del suelo y la vegetación de la escombrera de las Minas de Alquife (Granada, España) con el fin de realizar un diagnóstico que contribuya a identificar su potencial de uso, previo al inicio de un plan de actuación.

3. Metodología

El área de estudio se localiza en el sureste de la Península Ibérica, entre las coordenadas 37,192936° N- 3,107260° O y 37,206815° N - 3,095492° O. La zona presenta un clima Mediterráneo continental, con una precipitación anual media de 357 mm, que tiene lugar durante las estaciones de otoño y primavera principalmente. Los veranos son extremadamente secos con máximos de temperaturas de 35°C. Los inviernos son fríos con heladas frecuentes y temperaturas por debajo de los 0°C. La oscilación térmica durante el día es bastante alta durante el año, a menudo alcanza los 20°C.

3.1. Caracterización del suelo

La superficie de la escombrera es de 260 ha aproximadamente y la altura oscila entre los 80 y los 60 m sobre el nivel del suelo base. En concreto, la altitud de la escombrera se sitúa por encima de los 1200 m sobre el nivel del mar. Se realizó un

muestreo preliminar en rejilla de 300 m de lado constituido por 12 muestras compuestas (0-15 cm).

Una vez recogidas las muestras de suelo, se secaron al aire y se tamizaron para obtener la fracción de tierra fina (< 2 mm). La grava se pesó y se determinó su porcentaje. La caracterización de las muestras de suelo (< 2 mm) fueron realizados según métodos clásicos (SOIL CONSERVATION SERVICE, 1972): análisis granulométrico (pipeta de Robinson); pH y conductividad eléctrica (CE) del extracto acuoso 1:2,5 (p/v); capacidad de campo (CC) mediante las placas de Richard; fósforo disponible (método Olsen); óxidos de Fe (extracción con ditionito sódico); y densidad aparente por medio de la excavación de un volumen de suelo conocido. Carbono orgánico (CO) por el método modificado de Walkley&Black (MINGORANCE et al., 2007), capacidad de intercambio catiónico (CIC) por intercambio con el complejo Trien-Cu (MEIER AND KAHR, 1999), C y N total mediante analizador elemental, y nutrientes mediante ICP-OES. La composición mineralógica se llevó a cabo mediante DRX.

3.2. Caracterización de la cubierta vegetal

En cuanto a la vegetación, se realizó un inventario florístico a través de la recolección de algunos ejemplares y posterior identificación, así como una estimación visual de la densidad de cobertura vegetal.

Para la estimación del nivel de micorrización del ecosistema se tomaron muestras de raíz y suelo rizosférico en las zonas de parches vegetales de diferentes especies, anotando en cada caso, la comunidad vegetal presente en la zona de muestreo.

En las muestras de suelo rizosférico se realizó un primer análisis del contenido en propágulos micorrícicos mediante el método del tamizado húmedo y decantación, seguido de la observación al microscopio estereoscópico del tamizado obtenido.

El análisis de micorrización en raíz se realizó mediante el método de tinción de raíces en azul tripán de Giovannetti y Mosse. Brevemente, se extrajeron las raíces presentes en las diversas muestras y se lavaron con agua del grifo, manteniéndose a continuación en una solución al 10% de KOH a 90°C, durante el tiempo suficiente para su ablandamiento. Posteriormente, se lavaron brevemente (1 min) con una solución de ClH 0,1N y se pasaron a una solución del colorante azul tripán en ácido láctico durante unos 20 min a 90°C. La cuantificación de la colonización radical se llevó a cabo al microscopio óptico (40x), utilizando el método de análisis de la intensidad de micorrización arbuscular (Trouvelot et al. 1986).

3.3. Análisis de los datos

Para el análisis exploratorio de los datos se ha utilizado el análisis cluster o de conglomerados, que permite encontrar asociaciones y estructuras en un grupo de datos, de forma que el grado de asociación/similitud entre miembros del mismo cluster sea más fuerte que el grado de asociación/similitud entre miembros de diferentes clusters. El método de agrupamiento ha sido el de Ward y, como medida de similitudes, se ha utilizado la correlación para las variables y el cuadrado de la distancia euclidiana para las muestras.

4. Resultados y discusión

En la Tabla 1 se encuentran las principales propiedades de las muestras de suelo. De forma general, se puede decir que se trata de un suelo de textura franco arenosa, contiene un 42% de fragmentos gruesos, de pH alcalino y una capacidad de campo del 18%. La densidad aparente determinada a dos profundidades, 0-15 cm (1.66 g/cm^3) y 15-30 cm (1.68 g/cm^3), indica un índice de compactación alto, que genera un medio hostil para el desarrollo de raíces y microorganismos del suelo. De acuerdo a las directrices de la FAO (2006), este suelo se clasifica como “tecnosol”. El análisis mineralógico nos muestra que el 90% del suelo está formado por óxidos de Fe, calcita y SiO_2 y en algunas de ellas, aparecen trazas de otros minerales de arcillas (moscovita, illita).

Tabla 1. Propiedades generales del suelo de la escombrera

Parámetro	Máx.	Min.	Media	Mediana
pH	8,5	7,6	8,0	8,0
CE ($\mu\text{s/cm}$)	147	63	95	94
CO (%)	0,39	0,15	0,25	0,20
Carbonatos (%)	28	0,2	6,73	1,93
CIC ($\text{meq}_z/100\text{g}$)	3,1	0,8	2,2	2,6
CC (%)	20	14	17	17
Óxidos de Fe (%)	23,9	2,3	8,6	4,6
P-Olsen (mg/kg)	9,3	2,4	6,9	7,7
N (%)	0,14	0,02	0,10	0,10
Ca (%)	15,9	0,3	3,7	0,9
S (mg/kg)	1064	62	309	126
K (%)	0,46	0,23	0,37	0,39
Mg (%)	0,67	0,40	0,52	0,51
Na (%)	0,092	0,026	0,067	0,074
B (mg/kg)	11,5	1,5	5,6	6,2

CC: capacidad de campo; CE: conductividad eléctrica; CO: carbono orgánico; CIC: capacidad de intercambio catiónico

La tasa de infiltración, de acuerdo a su textura, se estima en 25 mm/h, valor relativamente alto que contribuye a que las pérdidas de suelo se vean reducidas ante la presencia de eventos extremos de precipitación, pero puede presentar un riesgo de llegada de contaminantes al acuífero. La conductividad eléctrica, muy por debajo del valor considerado normal en el suelo (4 dS/m), indica que es un suelo no salino, y da idea del bajo estado de saturación del suelo, como corresponde debido a la relativamente alta tasa de infiltración.

Desde el punto de vista de la fertilidad, los indicadores fundamentales son la materia orgánica (<1%), que revela poca capacidad para producir biomasa, para retener agua y para dar estructura al suelo; y la capacidad de cambio (<3 $\text{meq}_z/100\text{g}$), que indica que el suelo tiene una baja la capacidad de almacenamiento del complejo de cambio del suelo, así como una escasa disponibilidad de nutrientes para la plantas. El contenido de N total está dentro de los niveles medios (0.10-0.13 mg/kg) en algunos puntos, extremadamente pobre (<0.03 mg/kg) o medianamente pobre (0.06-0.1), en otros. El N tiene doble importancia, primero, porque es un elemento esencial para el

crecimiento de las plantas y, segundo, porque la relación C/N (2-12) permite valorar distintas características biológicas de los suelos, indicando que la materia orgánica tiene un buen grado de mineralización. El contenido en P asimilable, en la mayoría de las muestras está dentro del nivel medio (5,5-11%) y representa como máximo el 2% del P total.

Como consecuencia de las actividades mineras, los sólidos que han dado lugar a la escombrera han aportado al suelo cantidades de óxidos de Fe entre 2 y 24% (Tabla 1).

Las comunidades vegetales aparecen dominadas por especies herbáceas y matas de bajo porte (altura media de 25 cm), cuya densidad depende de las zonas, llegando en algunos caso a una cobertura del 80%. Las Labiadas están representada por un solo género, el *Thymus*, con dos representantes, *T. mastichina* muy abundante en toda el área y *T. zygis* que se encuentra solo en algunos puntos. En todo el conjunto, la especies vegetales colonizadoras presentan un aspecto empobrecido.

Es bien conocido que las diferentes comunidades vegetales presente en la zona del muestreo son las que determinan, e incluso pueden seleccionar, las especies de hongo micorrícico arbuscular presentes en su rizosfera. Por tanto, se procedió, en primer lugar, a la prospección de las raíces y suelo rizosférico, encontrándose que en ninguna de las muestras analizadas se obtuvo propágulo micorrícico alguno, lo que confirmaba la primera impresión de que el suelo de la escombrera, desde el punto de vista de la biodiversidad, se encuentra bajo mínimos. El siguiente paso fue realizar la cuantificación del nivel de micorrización arbuscular (MA) en plantas susceptibles de presentar este tipo de micorrizas, ya que la ausencia de propágulos en suelo no tiene que indicar forzosamente ausencia de micorrizas, sino sólo ausencia de una micorrización bien establecida y sostenida. Los parámetros evaluados en el análisis de la presencia endomicorrícica fueron: i) porcentaje total de MA (intensidad de colonización); ii) identificación de estructuras simbióticas MA; y iii) detección de colonización fúngica no MA (presencia de otros hongos no MA). Los resultados se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Evaluación de la colonización micorrícica arbuscular (MA) en la escombrera de las minas de Alquife.

VEGETACIÓN ASOCIADA	% MICORRIZACIÓN
Compuesta, <i>Brachypodium</i>	10,0%
Retama, <i>Brachypodium</i>	Hongo no identificado, no MA
Daphne, Tomillo	70%
<i>Brachypodium</i> , <i>Cistus</i>	Hongo no identificado, no MA
Tomillo, <i>Brachypodium</i> ,	5%
Tomillo	5%
Tomillo muy empobrecido	Hongo no identificado (no MA)
Tomillo, Mejorana, <i>Brachypodium</i>	0%
Retama, Daphne, <i>Brachypodium</i> (zona retamar hundida)	10%
Zona sin vegetación	No raíces
Lavanda, Tomillo, <i>Brachypodium</i>	Aprox. 5%
Cardo, Daphne, Tomillo (muy abundante), <i>Brachypodium</i>	Aprox. 5%
<i>Brachipodium</i> , Tomillo	Aprox 5% y hongo no identificado
Compuesta, Tomillo, <i>Brachipodium</i>	2%
Umbelífera, Tomillo, Lavanda	3-4%
Pino mediano, Tomillo, Lavanda	Hongo no identificado (no MA)
Tomillo, <i>Brachipodium</i> , Lavanda??	Aprox. 5%
Cardo, <i>Brachipodium</i> , Tomillo, Daphne, Lavanda	2-3%

Como se puede observar, de las raíces analizadas sólo un 50% presentaban estructuras características de la simbiosis micorrícica arbuscular, y en esos casos (y salvo una excepción), en unos porcentajes de colonización muy bajos (< 10%). Teniendo en cuenta que el promedio de la micorrización de un suelo natural oscila entre un 40 y un 60%, podemos calificar como muy baja la presencia de hongos micorrícicos en la zona. En el muestreo, sin embargo, se observa una notable excepción en uno de los puntos (Tabla 2), en la que se obtuvo un 70% de colonización micorrícica. Estos resultados indican que, tal y como se ha descrito anteriormente, la recuperación natural del suelo de la escombrera se realiza a través de lo que se conoce como “islas de fertilidad”, es decir, espacios puntuales y no homogéneos que comienzan a recuperarse y a extenderse hasta solaparse unos con otros.

No se ha encontrado una relación entre el tipo de vegetación presente en los puntos muestreados y el nivel de MA. Sin embargo, de la Figura 1 se desprende que las propiedades del suelo y el estado de micorrización se encuentran asociadas. Por un lado, las propiedades relativas a la disponibilidad de nutrientes forman el conglomerado A y, por otro, las relativas a la estructura del suelo junto con el porcentaje de MA forman el conglomerado B.

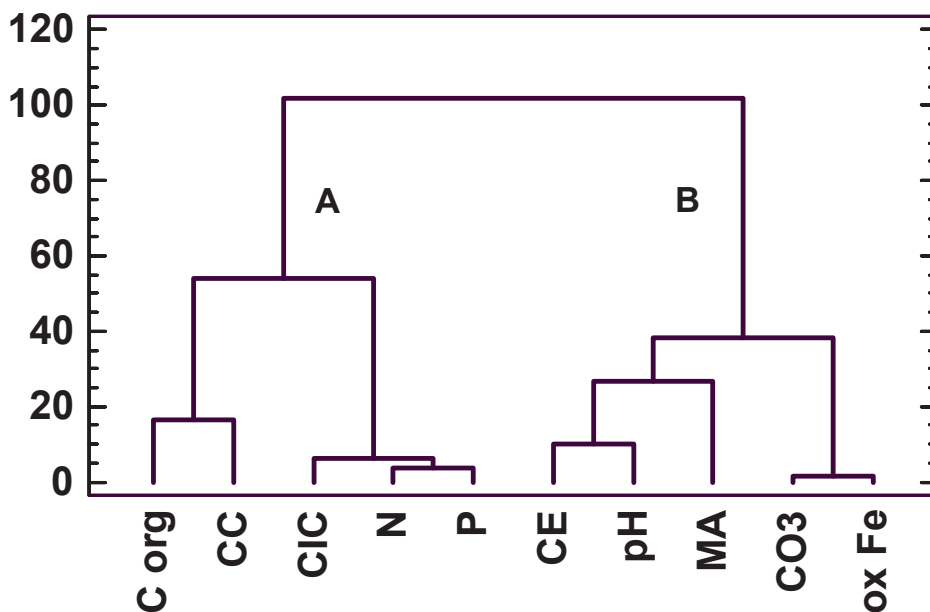


Figura 1. Dendrograma representativo de la asociación entre propiedades del suelo y nivel de micorrización (MA). CC: capacidad de campo; CIC: capacidad de intercambio catiónico; CE: conductividad eléctrica.

La agrupación de las muestras de suelo se ha realizado en función de las variables relacionadas con fertilidad con el fin de caracterizar el entorno. Los dendogramas de la figura 2 muestran que los puntos muestreados, que forman parte de los conglomerados A, presentan un bajo contenido en los parámetros correspondientes, y las que forman el conglomerado B, son las de mayor índice de fertilidad.



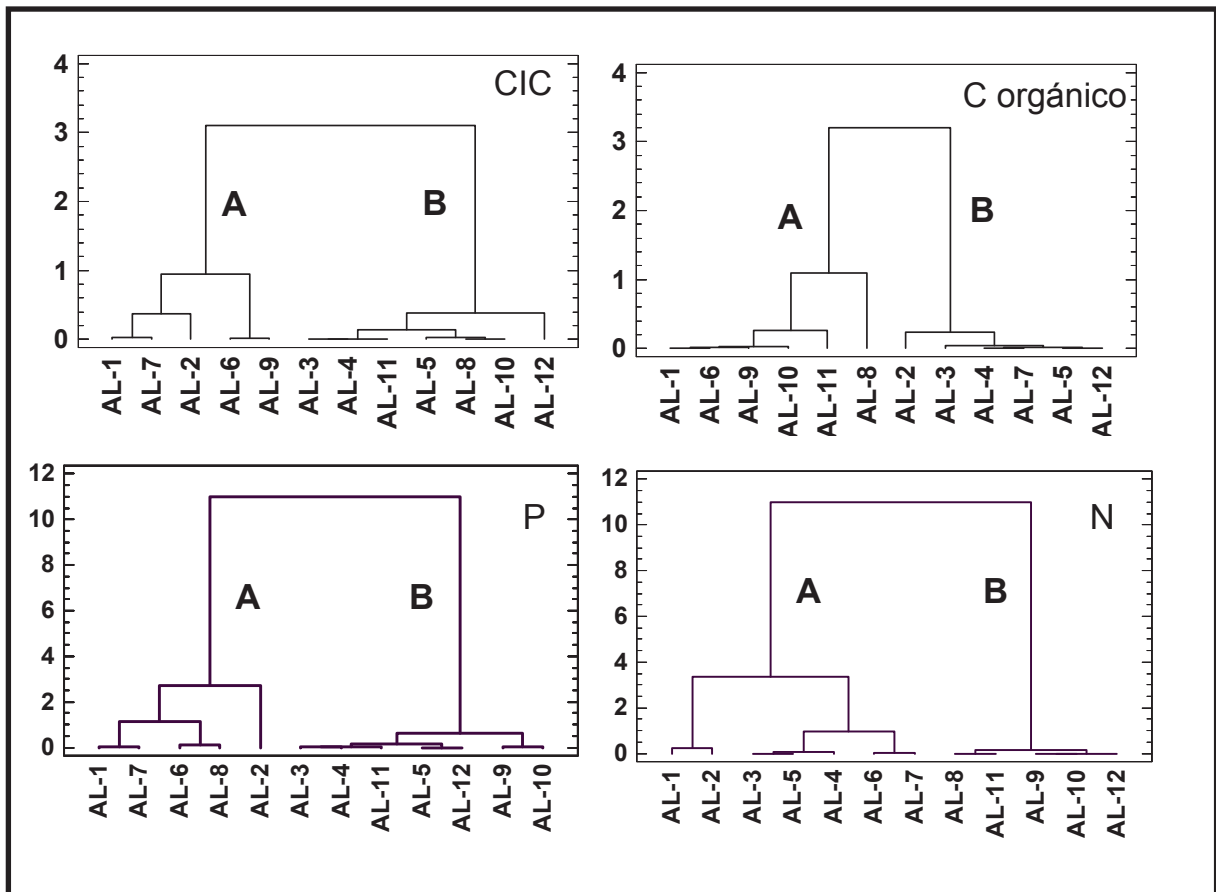


Figura 2. Dendrograma para algunos indicadores de calidad del suelo de la escombrera

5. Conclusiones

Los indicadores físicos indican que es un suelo con escasa estructura, formado por aportes de sólidos con diferentes grados de cementación, donde no existe un perfil definido. Su textura es otro factor limitante en estos suelos, el alto porcentaje de arena con excesivo grado de compactación dificulta el desarrollo de una estructura adecuada para el desarrollo radicular.

Los indicadores químicos muestran que es un suelo con una baja fertilidad pero con potencial para mejorar sus condiciones tras un manejo adecuado. La velocidad de recuperación del suelo de la escombrera es muy baja, por lo que está claramente indicada la realización de inoculación controlada con inoculantes micorrícicos para colaborar en la rapidez de esta recuperación. Dichos inoculantes deberían contener hongos micorrícicos autóctonos, compatibles con las características edafoclimáticas y de la vegetación de la zona, que tuviesen un “efecto llamada” de otros microorganismos beneficiosos, y así recuperar la estructura y biodiversidad del suelo. Esta estrategia junto con la mejora en las condiciones abióticas del sustrato conducirá al establecimiento de una cubierta vegetal de mayor vigor y con una sucesión vegetal más rápida.

6. Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por la Junta de Andalucía a través del proyecto RNM-3526. Se agradece a M.J. Civantos su colaboración en los análisis de DRX.

7. Bibliografía

ASENSIO FANDIÑO, V., CERQUEIRA CANDELO, B., ANDRADE COUCE, M. L., ALONSO VEGA, F., FERNÁNDEZ COVELO, E., 2008. Efecto del tratamiento con tecnosoles en la recuperación de escombreras de minas ricas en sulfuros metálicos. *Revista de la SEM* 10, 107-110.

CONESA, H. M., FAZ, A., ARNALDOS, R., 2007. Initial studies for the phytostabilization of a mine tailing from the Catagena-La Union mining district (SE Spain). *Chemosphere* 66, 38 – 44.

FAO, 2006. IUSS Working Group WRB. World reference base for soil resources. 2nd edition. World Soil Resources Reports N° 103. FAO, Rome.

FERNÁNDEZ SÁNCHEZ, N, 2002. La política de reutilización de suelos minero-industriales en la cuenca de Ruhr. *Ería* 59, 371 – 385.

HOSSEIN, S.M., MORTEZA O., ABBAS, G.B., 2010. An analytical approach with a reliable logic and a ranking policy for post-mining land-use determination. *Land Use Policy* 27, 364 – 372.

MARTÍNEZ-RUIZ, C., FERNÁNDEZ-SANTOS, B., 2005. Natural revegetation on topsoiled mining-spoils according to the exposure. *Acta Oecologica* 28, 231 – 238.

MEIER, L.P.M, KAHR, G. 1999. Determination of the cation exchange capacity (CEC) of clay minerals using the complexes of copper(II) ion with triethylenetetramine and tetraethylenepentamine. *Clays Clay Miner.* 47: 386–388.

MINGORANCE, M.D., BARAHONA, E., FERNÁNDEZ-GÁLVEZ, J. 2007. Guidelines for improving organic carbon recovery by the wet oxidation method. *Chemosphere* 68, 409–413.

SOIL CONSERVATION SERVICE. 1972. Soil survey laboratory methods and procedures for collecting samples. USDA, Washington, DC.

TROUVELOT, A., KOUGH, J.L., GIANINAZZI-PEARSON, V. 1986. Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. En: Gianinazzi-Pearson and S. Gianinazzi (eds): *Physiological and Genetical Aspects of Mycorrhizae*. 217-221. INRA Press, Paris.

ZANUZZI, A., AROCENA, J. M., FAZ CANO, A., 2009. Amendments with organic and industrial wastes stimulate soil formation in mine tailings as revealed by micromorphology. *Geoderma* 154, 69–75.