

Estrategia de cierre con Tecnosoles para la recuperación ambiental de la Mina de São Domingos

Closure strategy with Technosols for the environmental recovery of São Domingos mining area

Diego Arán^{1,2,*}, Maria Manuela Abreu², Catarina Diamantino³, Edgar Carvalho³ & Erika Santos²

¹Inproyen Consulting, C/ Lugo 18, 15840 Santa Comba, A Coruña, España

²LEAF—Linking Landscape, Environment, Agriculture and Food—Research Center, Associated Laboratory TERRA, Instituto Superior de Agronomia, Universidade de Lisboa, Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, Portugal

³EDM - Empresa de Desenvolvimento Mineiro, R. Sampaio e Pina 1, 1070-248 Lisboa, Portugal

(*E-mail: diegoaran@inproyen.com)

<https://doi.org/10.19084/rca.28634>

RESUMEN

La existencia de minas abandonadas sin gestión ni responsabilidad ambiental, principalmente explotadas antes de los años 80, son un gran problema para las administraciones públicas, cuya prioridad estratégica es minimizar los impactos generados. Bajo este contexto, en la mina de São Domingos (Portugal), la EDM - Empresa de Desenvolvimento Mineiro (EDM) desarrolló un proyecto de recuperación ambiental con aplicación de Tecnosoles, integrando las intervenciones de rehabilitación ambiental definidas en el Plan Director para esta área. Este proyecto permitió evaluar, en un ensayo piloto de 1,5 ha en condiciones de campo, la efectividad a largo plazo (tras 12 meses) de esta tecnología en la mejora de materiales sujetos al lavado continuo por drenaje ácido. Se implementó una cobertura de 35 cm de Tecnosol, el cual fue diseñado con las propiedades alcalinas y eutróficas en respuesta de la necesidad determinada de los materiales en estudios previos. Tras la aplicación del Tecnosol y siembra de una cobertura de herbáceas, se evaluó la mejora de la calidad físico-química de los Tecnosoles, material de una area control (sin aplicación de Tecnosol) y material subyacente al Tecnosol. También la cobertura vegetal fue evaluada a lo largo del tiempo. Los resultados mostraron que los Tecnosoles son una alternativa eficaz que permite aumentar el pH y la fertilidad, soportar una cobertura vegetal estable y densa, así como reducir en más del 80% la disponibilidad de contaminantes de los materiales contaminados permitiendo obtener zonas para futuros aprovechamientos sin riesgos para el ambiente.

Palabras clave: Propiedades alcalinas y eutróficas, Mina de São Domingos, Faja Piritica Ibérica, Recuperación ambiental

ABSTRACT

The existence of abandoned mines without management or environmental responsibility, mainly exploited before the 1980s, is an important problem for public administrations, whose strategic priority is to minimize the impacts generated. In this context, in the São Domingos mining area (Portugal), the EDM - Empresa de Desenvolvimento Mineiro developed a project of environmental rehabilitation with Technosols integrating the environmental rehabilitation interventions defined in the Master Plan for this large area. This project allowed the evaluation, in pilot assay with 1.5 ha and under field conditions, the long-term effectiveness (after 12 months) of this technology. A layer with 35 cm of Technosol, which was designed with alkaline and eutrophic properties due to the needs of the materials, was applied. After the Technosol application and herbaceous sowing, the physical-chemical quality of the Technosols, material from a control area (without Technosol application) and contaminated material located below the Technosol was evaluated. The results showed that Technosols are an effective alternative that allows the increasing of the pH and fertility, support a dense and stable plant cover as well as the diminution (more than 80 %) of the availability of contaminants from the contaminated materials, allowing future land uses (agricultural, forestry, etc.) without environmental risk.

Keywords: Alkaline and eutrophic properties, São Domingos Mine, Iberian Pyrite Belt, Environmental recovery

INTRODUCCIÓN

En Portugal, así como en otros lugares del mundo, existen numerosas minas que han sido abandonadas y no presentan una adecuada gestión ambiental. En estas minas, la presencia de sulfuros metálicos y condiciones extremas del estado de los residuos mineros conllevan a la generación de drenajes ácidos ricos en elementos potencialmente tóxicos (EPT) cuya dispersión no controlada contribuye a grandes problemas ambientales (Lottermoser, 2010).

En la actualidad, las estrategias de rehabilitación implementadas en las áreas mineras abandonadas enfocan, principalmente, la seguridad y contención de la dispersión del drenaje ácido. Además, pocos son los proyectos que presentan estrategias de una recuperación ambiental que permita trazar objetivos de sostenibilidad para estos espacios, siendo uno de los principales desafíos para el cierre de este tipo de minas la disponibilidad de coberturas edáficas.

En este contexto surge la idea de evaluar, en áreas mineras abandonadas de la parte Portuguesa de la Faja Pirítica Ibérica, la aplicación de tecnologías de remediación innovadoras, sostenibles y que promuevan la economía circular, como son los Tecnosoles.

La aplicación de Tecnosoles diseñados es una tecnología que ya ha sido evaluada en diferentes condiciones ambientales y escalas que van desde ensayos de micro- y meso-cosmos con residuos mineros ricos en sulfuros de la Península Ibérica hasta ensayos a gran escala para el cierre de depósitos en Perú. Los resultados en todos los casos demuestran mejoras significativas de las características físico-químicas y biológicas de los materiales degradados y sus lixiviados (ej. Monterroso *et al.*, 1998; Macías *et al.*, 2011; Santos *et al.*, 2016, 2020; Arán *et al.*, 2016, 2022).

Dependiendo de las características de diseño, los Tecnosoles pueden promover el establecimiento de una cobertura vegetal diversa y productiva, al mismo tiempo que estimulan los procesos biogeoquímicos y edáficos (ej. neutralizar ácidos, disminuir la oxidación de sulfuros y dispersión de sulfatos y EPT, incrementar la fertilidad) y los servicios

ecosistémicos, generando una mejora integral del sistema (ej. Rodríguez-Vila *et al.*, 2016; Santos *et al.*, 2016, 2020; Arán *et al.*, 2016, 2022).

Este trabajo tuvo como objetivo evaluar, a largo plazo, la eficiencia de la aplicación superficial de un Tecnosol en la mejora físico-química de los materiales presentes en las áreas de lavado con drenajes ácidos.

MATERIAL Y MÉTODOS

La mina São Domingos, ubicada en la Faja Pirítica Ibérica, SE de Portugal, presenta un nivel máximo de riesgo ambiental (Matos y Martins, 2006). Durante el período de explotación se generó una acumulación dispersa de residuos mineros en diferentes escombreras, así como se construyeron canales perimetrales cuya función era conducir el agua ácida generada y descargarla por los taludes con el objetivo de promover los procesos de evaporación disminuyendo el aporte de lixiviados y carga de EPT a los cuerpos de agua (Quental *et al.*, 2002).

Estas áreas, que estuvieron sujetas a condiciones de lavado continuo con drenajes ácidos de mina, además de su gran extensión, representan zonas de enriquecimiento multielemental y de mayor movilidad de EPT al medio. En una de estas zonas fue donde se implementó un ensayo piloto ($\approx 1,5$ ha) con la aplicación superficial de un Tecnosol con propiedades alcalinas y eutróficas (espesor de ~ 35 cm). El Tecnosol se elaboró a partir de residuos agroindustriales y urbanos que permitieron obtener las propiedades de diseño requeridas. Un área adyacente sin aplicación del Tecnosol fue usada como control.

En las áreas con aplicación de Tecnosol y Control fueron sembradas una mezcla comercial de herbáceas. El porcentaje de cobertura fue evaluado al largo del tiempo (15 días, 1, 3, 6 y 12 meses).

Tras 6 y 12 meses de la aplicación, muestras compuestas del Tecnosol (TEC, $n=60$, 0-35 cm de profundidad), Material contaminado localizado abajo del Tecnosol (EscR, $n=8$, sólo a los 12 meses) y Material sin recuperar (Esc, $n=24$; 0-20 cm de profundidad) fueron recogidas para la evaluación de su calidad físico-química. Los materiales (fracción < 2 mm)

se caracterizaron para: pH, potencial redox y conductividad eléctrica (1:2,5 m.V); P disponible (método Olsen); N total (analizador LECO), C orgánico (digestión por vía húmeda) y capacidad de intercambio catiónico (Peech *et al.*, 1947). La concentración multielementar en la fracción total (extracción agua regia) y en la disolución de equilibrio que simula el agua de poro se determinaron por ICP-MS.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El área Control presentó una importante degradación ambiental caracterizada por la pérdida total de la cubierta edáfica, y alteración del material geológico presente por la acción continuada de las aguas ácidas que provocaron intensos procesos de hidrólisis ácida y conllevaron a que, actualmente, el material se encuentre completamente meteorizado y degradado.

Los materiales del área Control presentaron pH ácidos, oxidantes, muy baja fertilidad (Tabla 1), así como elevada tendencia oxidativa. Las concentraciones totales de varios EPT (ej. - mg/kg; As: 403-1720; Cu: 100-473; Pb: 174-1080; Sb: 1,9-26,4) exceden los valores de referencia establecidos por la legislación portuguesa de suelos para diferentes usos (APA, 2021). Bajo estas condiciones pH-Eh, las áreas Control contribuyen para la dispersión de varios EPT (Ej. Al, As, Cu, Fe, Mn, Pb, Sb y Zn), principalmente en sus formas catiónicas libres.

Después de 12 meses de la aplicación del Tecnosol y siembra del estrato herbáceo, los materiales contaminados situados por debajo del Tecnosol presentaron significativas mejoras caracterizadas por el aumento del pH y disminución del Eh, incremento de la fertilidad y reducción de la disponibilidad de los EPT (80 % para As y Fe, 87 % para Al y >95% para Cu, Pb y Sb) comparativamente al Control.

Por último, las muestras de Tecnosol presentaron durante todo el período de monitorización (hasta 12 meses) condiciones de reacción neutra a alcalina con potenciales redox bajos y una elevada fertilidad (Tabla 1). Su textura, franca a franco-arenosa, y elevada capacidad de neutralización de ácidos permitió modificar las condiciones de los materiales subyacentes, tanto en la reducción de movilidad

de los contaminantes como incremento de la fertilidad. Estos cambios permiten a las plantas profundizar su enraizamiento.

Tabla 1 - Características químicas de los materiales (media±DP) recogidos a los 12 meses

	Esc	EscR	TEC
pH _(H2O)	3,5 – 4,5	4,7 – 8,2	7,6 – 8,4
Eh (mV)	363 – 478	190 – 378	193 – 293
C _{Orgánico} (g/kg)	1,2 – 3,6	2,5 – 20,0	57,8 – 116,2
N _{Total} (g/kg)	0,7 – 1,1	0,7 – 2,3	4,7 – 8,8
P _{Extrahible} (mg/kg)	0,8 – 3,5	0,6 – 82,3	141 – 285
CIC (cmol/kg)	4,4 – 9,6	13,6 – 32,5	30,0 – 56,9

Esc: Material sin recuperar (control); EscR: Material contaminado localizada abajo del Tecnosol; TEC: Tecnosol; CIC: Capacidad de intercambio catiónico.

La cobertura de herbáceas en las áreas Control fue muy baja (<10 %), a pesar de la mayor cantidad de semillas aplicadas (10 veces más que para las áreas con Tecnosol). Además, las especies que lograron estar presentes durante todo el período evaluado fueron siempre las naturales espontáneas, principalmente, la especie *Spergularia purpurea*. La contribución del estrato sembrado fue prácticamente nula.

En las áreas con aplicación de Tecnosol, la germinación fue rápida obteniéndose una cobertura densa (>90 %) y estable (Figura 1) que tras completar su ciclo vegetativo volvió a germinar.



Figura 1 - Área con aplicación de Tecnosoles (con vegetación) y Control (sin vegetación) al tercer mes de la aplicación.

CONCLUSIONES

La aplicación del Technosol diseñado con propiedades alcalinas y eutróficas contribuyó a la recuperación ambiental del espacio minero a largo plazo, reduciendo la generación de drenaje ácido y minimizando la dispersión de los contaminantes. Esta tecnología permitió implantar nuevamente un sistema edáfico con todas las propiedades y funciones de los suelos, generando un espacio productivo con valor para otros usos. Además, permitió el establecimiento de una cobertura vegetal densa y vigorosa que contribuye para la disminución de los procesos erosivos.

Esta tecnología verde es una solución efectiva para la conversión de áreas no productivas en áreas productivas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue ejecutado para la Empresa de Desenvolvimento Mineiro (EDM) mediante el contrato de concesión para la remediación ambiental de minas abandonadas en Portugal, por el ISA-ULisboa, LEAF y Inproyen, siendo financiado por los Fondos de Cohesión de la Comunidad Europea POSEUR (145/POSEUR/2020). Este trabajo está dentro de los alcances del proyecto LEAF (UID/AGR/04129/2020) financiado por fondos nacionales de la Fundação para a Ciência e Tecnologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Arán, D.; Antelo, J. & Macías, F. (2016) - Uso de Tecnosuelos para la mejora en la calidad química de aguas de escorrentía de la mina Fé (Ciudad Rodrigo, Salamanca). *In: Livro de Actas do VII Congresso Ibérico das Ciências do Solo*, p. 337–340. Beja: Sociedade Portuguesa de Ciência do Solo.
- Arán, D.; Santos, E.S.; Abreu, M.M.; Antelo, J. & Macías, F. (2022) - Use of combined tools for effectiveness evaluation of tailings rehabilitated with designed Technosol. *Environmental Geochemistry and Health*, vol. 44, p. 1857–1873. <https://doi.org/10.1007/s10653-021-01118-3>
- Lottermoser, B.G. (2010) - *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*. Berlin Heidelberg: Springer.
- Macías, F.; Macías-García, F.; Nieto, C.; Verde, J.R.; Pérez, C.; Bao, M. & Camps-Arbestain, M., (2011) - Gestión de residuos y cambio climático. *In: Mosquera, M.E.L. & Osés, M.J.S. (Eds.) - Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola*, p. 11-24. Santiago de Compostela: Servizo de Publicacións e Intercambio Científico de la Universidad de Santiago de Compostela.
- Matos, J.X. & Martins, L.P. (2006) - Reabilitação ambiental de áreas mineiras do sector português da Faixa Piritosa Ibérica: Estado da Arte e Perspectivas Futuras. *Boletín Geológico y Minero*, vol. 117, p. 289–304.
- Monterroso, C.; Macías, F.; Gil Bueno, A. & Val Caballero, C. (1998) - Evaluation of the land reclamation project at the As Pontes Mine (NW Spain) in relation to the suitability of the soil for plant growth. *Land Degradation & Development*, vol. 9, n. 5, p. 441-451. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-145X\(199809/10\)9:5%3C441::AID-LDR299%3E3.0.CO;2-U](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-145X(199809/10)9:5%3C441::AID-LDR299%3E3.0.CO;2-U)
- Peech, M.; Alexander, L.T.; Dean, L.A. & Reed, J.F. (1947) - *Methods of soil analysis for soil fertility investigations*. USDA 575. Washington: U.S.Gov. Print. Office.
- Quental, L.; Bourguignon, A.; Sousa, A.J.; Batista, M.J.; Brito, M.G.; Tavares, T.; Abreu, M.M.; Vairinho, M. & Cottard, F. (2002) - *MINEO Southern Europe environment test site. Contamination impact mapping and modelling—Final Report*. Assessing and monitoring the environmental impact of mining activities in Europe using advanced Earth Observation Techniques (MINEO) 5yth FP-IST-1999-10337.
- Rodríguez-Vila, A.; Asensio, V.; Forján, R. & Covelo, E.F. (2016) - Assessing the influence of Technosol and biochar amendments combined with *Brassica juncea* L. on the fractionation of Cu, Ni, Pb and Zn in a polluted mine soil. *Journal of Soils and Sediments*, vol. 16, n. 2, p. 339-348. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1222-3>
- Santos, E.S.; Abreu, M.M.; Macías, F. & de Varennes, A., (2016) - Chemical quality of leachates and enzymatic activities in Technosols with gossan and sulfide wastes from the São Domingos mine. *Journal of Soils and Sediments*, vol. 16, n. 4, p. 1366–1382. <https://doi.org/10.1007/s11368-015-1068-8>
- Santos, E.; Cornejo, M.; Arán, D. & Gallardo, A. (2020) - *Risk assessment of the land recovery to pastures on sulfide tailings closed with different systems: Conventional Vs Technosol*. EGU General Assembly 2020.