

“Trabajando para la sociedad”

LAS MEJORES RESTAURACIONES MINERAS POSIBLES COMO GARANTÍA DE UN VERDADERO DESARROLLO SOSTENIBLE Y DE UNA ACEPTACIÓN SOCIAL INEQUÍVOCA – EL PROYECTO LIFE RIBERMINE

Cristina Martín Moreno, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, Calle José Antonio Nováis 12, 28040, Madrid, 91 394 48 58,
crismart@ucom.es

Javier de La Villa Albares, Consejería de Desarrollo Sostenible, Junta de Comunidades de Castilla – La Mancha, Avenida Río Estenilla s/n, 45071 Toledo, 925 267875,
jvilla@jccm.es

María Tejedor Palomino, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, Calle José Antonio Nováis 12, 28040, Madrid, 91 3944857,
mariatejedor@ucom.es

José F. Martín Duque, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense de Madrid, Calle José Antonio Nováis 12, 28040, Madrid, 91 3944857,
josefco@ucom.es

Pedro Villar Salvador, Universidad de Alcalá, Grupo de Ecología y Restauración Forestal (FORECO), Departamento de Ciencias de la Vida, 28805 Alcalá de Henares, Madrid, 918854913 pedro.villar@uah.es

Resumen – El proyecto LIFE RIBERMINE ha desarrollado toda una batería de “mejores técnicas disponibles” de restauración y remediación en minería, en dos escenarios de la península Ibérica: España (mina inactiva de caolín, Peñalén, Guadalajara) y Portugal (antigua mina de pirita, Lousal, Grândola). Todo ello desde un enfoque ecológico e integral, dirigido a construir ecosistemas y paisajes post-mineros equivalentes a los naturales, y a mejorar la calidad de los ecosistemas acuáticos situados aguas abajo. LIFE RIBERMINE ha combinado técnicas de: (a) restauración geomorfológica (GeoFluv-Natural Regrade y Talud Royal); (b) remediación química (diseño de cubiertas edáficas ad hoc y canales abiertos de calizas); (c) modelos de evolución del paisaje para predecir la erosión hídrica (SIBERIA); (d) distintas técnicas de remediación: técnicas de manejo, laboreo, protección y mejora del suelo; (e) revegetación, adaptada a las condiciones de partida (uso de acolchados de siega de pastos, trasplante de banco de semillas, siembras de herbáceas, plantación); (f) manejo de fauna. El proyecto incluye también un plan de seguimiento consistente en la medición de la erosión mediante técnicas fotogramétricas, cuantificación de la emisión de sedimentos con diques de retención de sedimentos; medición de sólidos en suspensión y calidad del agua mediante muestreos y piezómetros, y seguimiento de la respiración y humedad del suelo. También se ha realizado un seguimiento detallado de la evolución de la comunidad vegetal y de la recolonización por la fauna. El resultado más importante es la reducción de las tasas de erosión en Peñalén desde $353 \text{ t ha}^{-1}\text{a}^{-1}$ (pre-restauración) hasta $3,8 \text{ t ha}^{-1}\text{a}^{-1}$. El valor añadido de este proyecto, respecto al estado del arte previo, se evidencia en que: (a) es la mayor restauración geomorfológica ejecutada en Europa; (b) es un proyecto pionero a nivel europeo en el uso de Modelos de Evolución del paisaje en restauraciones mineras y en la combinación de técnicas de restauración geomorfológica y remediación química; (c) es la primera vez que se utiliza, a nivel mundial, el método del Talud Royal en minería; (d) se han aplicado técnicas innovadoras nunca antes aplicadas en minería disponibles para la recuperación del suelo y revegetación.

“Trabajando para la sociedad”

1. INTRODUCCIÓN

El mundo actual tiene una absoluta dependencia de las actividades extractivas. Máxime en el escenario vigente de transición energética, donde ciertos metales y tierras raras son indispensables para el desarrollo de las energías renovables. Según el documental “*Responsible Mining in Europe: A new paradigm to counter Climate Change*” (Sultan 2020 Project), se estima que para 2030 serán necesarias a nivel mundial más de 100 minas de minerales estratégicos. Por tanto, la minería afectará a paisajes cada vez más sensibles, con efectos potenciales negativos sobre bienes y servicios ecosistémicos, de los cuales también depende nuestra supervivencia y calidad de vida.

Ante ese escenario, sólo existe una solución, utilizar el mejor conocimiento y técnicas disponibles para llevar a cabo una actividad extractiva moderna, impecable respecto a su responsabilidad social e integración ambiental y vertebrada en torno a la economía circular. Entre esas soluciones, se han desarrollado en las últimas décadas toda una serie de técnicas denominadas de ‘restauración geomorfológica’, que persiguen conseguir unas morfologías “naturales” en los espacios mineros restaurados, similares a los del entorno en el que se insertan. Aunque pudiera parecerlo, el principal objetivo no es estético sino funcional. Se trata de integrar el espacio restaurado en el contexto hidrográfico afectado, conectándolo con las redes hidrográficas modificadas. La adopción de medidas adecuadas de reposición del suelo y vegetación con un enfoque ecológico, permiten restituir los bienes y servicios que nos proporcionan los ecosistemas: formación de suelos que almacenan CO₂, regulación hidrológica, producción de alimentos y/o madera, o recuperación de la biodiversidad. Obviamente, los usos futuros de un espacio inicialmente minero pueden acoger otras actividades muy distintas, también al servicio de la sociedad como los usos turísticos o equipamientos.

Actualmente sólo existen unas pocas técnicas de restauración geomorfológica que son: 1) *GeoFluv™ – Natural Regrade* (<https://www.geofluv.com/>), ampliamente utilizado en Estados Unidos, y con un desarrollo creciente en Australia y la Unión Europea. Utiliza la cuenca hidrográfica como unidad básica de restauración; 2) la aproximación geomorfológica ‘canadiense’, utilizada durante 25 años en la restauración de las Oil Sands de Canadá. También utiliza la cuenca hidrográfica como unidad básica de restauración, y tienen una importante componente de geomorfología fluvial; 3) el método de restauración de ríos de Rosgen, a través del software ‘RiverMorph’ (<http://www.rivermorph.com/>) que, si bien se utiliza en todo tipo de contextos, se ha utilizado sobre todo para restaurar cursos fluviales en minas de Estados Unidos; 4) el método de réplica de acantilados naturales en canteras de roca caliza, desarrollado en el Reino Unido, que ha permitido diseñar y construir, verdaderos escarpes naturales en canteras de roca ‘dura’; y 5) el método del Talud ROYAL® creado en Francia (<https://www.2g.fr/>), que también replica escarpes rocosos naturales en frentes rocosos mineros, si bien este método fue inicialmente desarrollado para taludes de carretera.

En este contexto, el proyecto LIFE RIBERMINE (<https://liferibermine.com/es/>) ha desarrollado toda una batería de “mejores técnicas disponibles” de restauración y remediación en minería, en dos escenarios de la península ibérica: España (mina inactiva de caolín, Peñalén, Guadalajara) y Portugal (antigua mina de piritita, Lousal, Grândola). Todo ello desde un enfoque ecológico e integral, dirigido a construir ecosistemas y paisajes post-mineros equivalentes a los naturales, y con el objetivo principal de mejorar la calidad de los ecosistemas acuáticos situados aguas abajo. LIFE RIBERMINE empezó en septiembre de 2019 y finalizará en marzo de 2024. Tiene un presupuesto de 2.941.280 € (54,99% subvencionado por la UE). Está coordinado por la por la Consejería de Desarrollo Sostenible, a través de la Dirección General de Transición Energética del Gobierno de Castilla-La Mancha (<https://mineriaclm.castillalamancha.es/>) incluyendo funcionarios de dos órganos distintos: minería y áreas protegidas. Otros socios del proyecto son la Universidad Complutense de Madrid que aglutina y coordina la actividad de técnicos de varias Universidades españolas: Universidad de Castilla-La Mancha, Universidad de Alcalá, Universidad de Zaragoza, Universidad Politécnica de Madrid y Universidad Rey Juan Carlos, la empresa minera CAOBAR S.A, la empresa pública GEACAM, S.A. (Gestión Ambiental de Castilla-La Mancha, S.A.) y la Asociación Centro Ciencia Viva de Lousal (*Associação Centro Ciência Viva do Lousal* – <https://www.lousal.cienciaviva.pt/>) de Portugal.

“Trabajando para la sociedad”

2. LOCALIZACIÓN

El proyecto LIFE RIBERMINE se desarrolla en dos antiguas zonas mineras de la Península Ibérica, Lousal (Grândola, Portugal) y Peñalén (Guadalajara, España) (Figura 1).

En Lousal (550381E - 4209931N) se han restaurado 1,5 hectáreas pertenecientes a una antigua mina de pirita de la faja pirítica ibérica. Esta actuación corresponde a un proyecto 'piloto', en el que se han adaptado, replicado y transferido las mejores técnicas disponibles de restauración minera a las condiciones de la minería metálica, desarrollando soluciones específicas para el drenaje ácido de mina (DAM). Todo ello con el objetivo de mejorar la calidad del agua en el río Ribeira de Corona (cuenca del río Sado).

En Peñalén (579535E; 4502213N) las actuaciones de restauración se han desarrollado en la antigua mina de caolín Santa Engracia, en sus dos frentes de explotación y escombreras asociadas y en la escombrera de Hoya Grande generada también durante la explotación de la mina. En este escenario se están restaurando y mejorando un total de 30 hectáreas con el objetivo de solucionar el principal problema ambiental del Parque Natural del Alto Tajo, la degradación de hábitats fluviales por contaminación física causada por la emisión de sedimentos. A finales de 2023, se habrán finalizado todas las labores de restauración, habiéndose recuperado los principales focos de emisión de sedimentos.

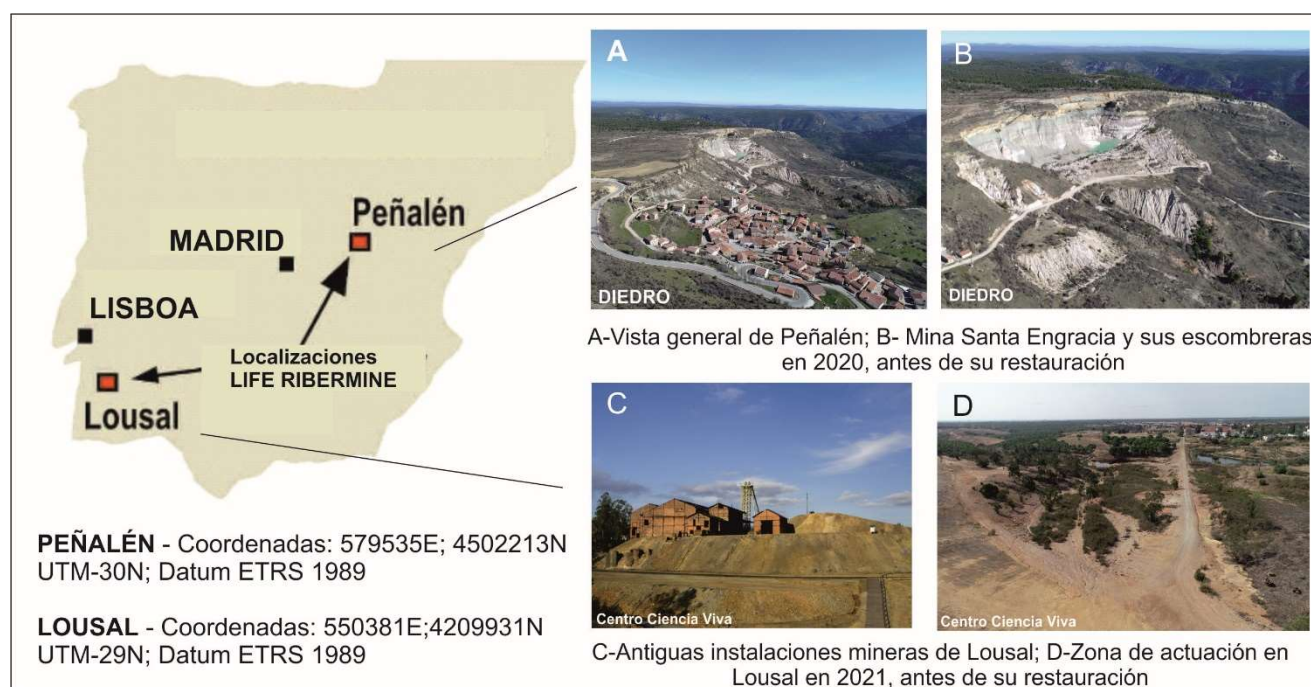


Figura 1 Localización de las zonas de actuación del proyecto LIFE RIBERMINE.

3. MEJORES TÉCNICAS DISPONIBLES PARA LA RESTAURACIÓN MINERA

Las técnicas de restauración minera usadas en LIFE RIBERMINE abarcan todos los ámbitos de restauración del paisaje: topografía, evaluada mediante modelos de evolución del paisaje (SIBERIA) para predecir la erosión hídrica, sustratos y suelos, y revegetación. Estas técnicas han permitido recuperar la conexión hidrológica natural. Además, se ha realizado una serie de medidas para favorecer la fauna. A continuación, se detallan las técnicas aplicadas.

“Trabajando para la sociedad”

3.1. Técnicas de Restauración geomorfológica y Modelos de Evolución del Paisaje

La Restauración Geomorfológica es la fase inicial de la recuperación de espacios mineros. Este nuevo enfoque de restauración opera en la topografía y en la red de drenaje, así como en la reestructuración de sustratos. En LIFE RIBERMINE se ha usado el método GeoFluv™ – Natural Regrade que permite diseñar geoformas (cauces, lomas, vaguadas, divisorias) integradas en cuencas hidrográficas que constituyen las unidades básicas de restauración (ver Bugosh y Epp, 2019 para más detalles). Este método se utiliza en España desde 2010 (Zapico et al., 2018; Martín Duque et al., 2020, 2021). Este proyecto constituye el caso más completo de los que se han diseñado y construido en la península ibérica, tanto por su extensión como por la dificultad del punto de partida, con un escenario de pendientes muy elevadas y poco espacio para la acumulación de escombreras, sobre materiales muy erosivos, y con un régimen climático severo. Además, ha sido la primera vez que se emplea junto con técnicas para el control del DAM, en este caso en el escenario portugués.

La construcción de nuevos relieves mediante GeoFluv™ ha incluido también el suministro de carga de fondo (‘armado’) a los cauces fluviales construidos. Este proceso pretende restablecer una funcionalidad fluvial completa en los paisajes post-mineros. En el caso portugués, los canales fueron también recubiertos con grava de caliza (canales abiertos de caliza) con una doble función: 1) aumentar la rugosidad para reducir la erosión hídrica, y 2) neutralizar o minimizar el DAM.

Con el objetivo de confirmar su estabilidad, los diseños generados con GeoFluv™ para las escombreras exteriores fueron verificados antes de su construcción con el modelo de evolución del paisaje SIBERIA. Este modelo permite predecir tanto la erosión, como la visualización y localización exacta donde se producirán las formas erosivas tras el paso del tiempo. Los valores de erosión pueden obtenerse tanto en $t\ ha^{-1}\ a^{-1}$ como en estimación media de denudación ($mm\ a^{-1}$). El modelo puede simular desde el corto plazo (décadas) hasta siglos e incluso milenios (detalles del método en Hancock y Willgoose, 2018). SIBERIA ha sido ampliamente utilizado por la industria minera desde la década de 1990, sobre todo en Australia (Willgoose y Riley, 1998). LIFE RIBERMINE es el proyecto de restauración minera que utiliza SIBERIA por primera vez en Europa.

Para la recuperación de los antiguos frentes de explotación, y de forma pionera a nivel mundial en el contexto de restauración minera, se ha empleado el método Talud ROYAL®. Este método desarrollado por el geólogo francés Paul Royal, ‘reproduce’ configuraciones de acantilados naturales, otorgando a estas superficies antes muy verticales y artificiales una alta estabilidad e integración ecológica y visual. Para ello se realizan voladuras específicas y muy controladas, y el uso de maquinaria pesada (y a veces manualmente) para la retirada de los fragmentos de roca.

3.2. Recuperación de sustratos y favorecimiento de procesos edafológicos

La segunda fase de la restauración la constituye la recuperación de los suelos o sustratos y la activación de procesos edafogénicos. Esta fase es esencial para garantizar una verdadera restauración ecológica con el establecimiento de una comunidad vegetal autosostenible. En LIFE RIBERMINE se han empleado múltiples técnicas adaptadas a las condiciones de partida, a la topografía y a la disponibilidad de sustratos o suelos y enmiendas.

En la Mina Santa Engracia y escombreras asociadas, las actuaciones han sido: 1) extendido de formaciones superficiales, tipo coluvión carbonático, sobre las nuevas superficies construidas con estériles mineros carentes de adecuadas propiedades edáficas. El coluvión disponible en la mina o en su entorno más próximo, permite iniciar la reconstrucción de la estructura del perfil edáfico tal y como se encuentra en las laderas naturales. Los coluviones carbonáticos poseen una textura edáfica equilibrada, un pH ligeramente básico y un alto nivel de pedregosidad; 2) uso de técnicas de manejo, laboreo, protección y mejora, y descompactación del suelo con el objetivo de incrementar la rugosidad superficial, favorecer la infiltración y crear microtopografías que sirvan de “trampas” para las semillas. El aumento de la infiltración se traduce, además, en un aumento de la humedad edáfica y, por tanto, una mayor disponibilidad de agua para las plantas, disminuyendo el flujo de agua a la red de drenaje. La descompactación se ha realizado en zonas puntuales donde se ha observado la presencia de una

“Trabajando para la sociedad”

costra superficial usando un apero diseñado y patentado específicamente para esta función; 3) protección inicial del suelo desnudo mediante el tumbado de cereales previamente crecidos sobre las superficies recién restauradas. A nivel pionero —hasta donde hemos podido llegar a conocer—, LIFE RIBERMINE ha sido el primer proyecto de restauración minera en aplicar esta práctica de tumbado de cereales. Esta medida permite crear un acolchado (mulch), que protege ante la erosión de la lluvia, minimiza la evapotranspiración del suelo al reducir su insolación, y favorece la acumulación de semillas dispersadas sobre estas superficies; y 4) trasposición de banco de semillas de pastizales y matorrales naturales aledaños a la mina mediante el decapado del suelo con el fin de establecer pastizales naturales en la mina. La técnica consiste en extraer con una retroexcavadora los 1-2 cm superficiales del suelo de los pastizales y matorrales naturales en lugares llanos. El horizonte superficial del suelo contiene grandes cantidades de semillas de plantas adaptadas a las condiciones ambientales locales, además de microorganismos y materia orgánica beneficiosa para el establecimiento de la vegetación. Este material se ha extendido sobre algunas zonas restauradas, especialmente en las lomas y pendientes suaves. Algunas zonas decapadas se usaron también para la extracción del coluvión tras el decapado.

En el escenario portugués, los tratamientos de sustratos y suelos han estado enfocados a minimizar el drenaje ácido de mina y han consistido en: 1) en primer lugar, extender sobre la nueva topografía una capa de arcilla (< 10% de esmectita) y otra de grava de caliza para: a) neutralizar el agua ácida, b) facilitar la circulación de flujos subsuperficiales, y c) ayudar a la retención de agua para promover el crecimiento de las plantas; y 2) sobre el horizonte mineral subsuperficial se extendió una mezcla de gallinaza, estiércol de caballo y tierra vegetal constituyendo un horizonte orgánico.

3.3. Técnicas de revegetación y actuaciones para favorecer la reincorporación de la fauna

La revegetación es el último paso de la restauración o recuperación del espacio minero. En LIFE RIBERMINE la revegetación se fundamenta sobre los siguientes aspectos: a) asegurar previamente la estabilidad del sustrato frente a la erosión (técnicas explicadas en 3.2), b) promover la actividad biológica en el suelo, c) integrar paisajísticamente la mina en el entorno más próximo, y d) las especies vegetales introducidas deben ser autóctonas y estar adaptadas a las condiciones climáticas. Además, deben ser especies facilitadoras que favorezcan el ensamblaje de la comunidad vegetal objetivo y atraigan a determinada fauna de la zona.

En la mina Santa Engracia y sus escombreras asociadas, durante el proyecto se han realizado toda una serie de medidas de revegetación activas que sientan la base para el desarrollo autónomo de la comunidad vegetal objetivo a la que se quiere llegar a largo plazo, —pastizales y bosques mixtos ralos de pino y quejigo—, si bien, también se cuenta con el efecto de la colonización pasiva desde los bosques del entorno con la atracción de la fauna frugívora dispersora de semillas. La revegetación se desarrolla en dos etapas. En la primera se establecen las herbáceas y caméfitos (arbustos de porte bajo) con el fin de estabilizar la erosión y mejorar las propiedades del suelo. En la segunda etapa, 1 o 2 años más tarde se han plantado los árboles y matorrales grandes.

La revegetación se ha adaptado a la nueva topografía y sustratos presentes. En las zonas de mayor riesgo de erosión (pendientes > 30-35°) se ha aplicado el método de “acolchado-semillado”, que consta de los siguientes pasos: 1) adición de estiércol de oveja y gallinaza al coluvión; 2) extendido de material (semillas y fragmentos de planta) procedente de la siega de pastos naturales del entorno. Este material, además de proporcionar propágulos actúa como acolchado (mulch) que protege de la erosión y aporta al suelo materia orgánica de alta calidad; 3) extendido sobre el acolchado de una red orgánica de fibra de yute y coco que evita que el acolchado sea arrastrado por el viento y genera un microclima favorable para el germinado.

En las zonas con pendientes (< 30°) —pero, aun así, con riesgo importante de erosión— el esquema de actuación ha sido: 1) adición de estiércol de oveja y gallinaza y de abono químico; 2) siembra de herbáceas y caméfitos, reforzada con la siembra de trigo y esparceta para el control de la erosión (sólo el primer año); 3) en alguna ladera larga con mayor riesgo de erosión se ha extendido

“Trabajando para la sociedad”

una manta orgánica de paja y fibra de coco. Posteriormente, se ha realizado una plantación de árboles y arbustos por módulos. En las zonas donde se ha optado por la extensión del trasplante de banco de semillas (ver apartado 3.2) no se ha realizado ningún tipo de semillado, sólo la plantación de árboles y arbustos, ya que se ha confiado en el banco de semillas disponible en el material decapado para la recuperación de la vegetación herbácea.

Las especies de herbáceas y caméfitos introducidas se han seleccionado a partir de inventarios de vegetación de los ecosistemas de referencia de la zona. Se han sembrado a voleo seis herbáceas entre las que destacan *Anthyllis vulneraria*, *Brachypodium phoenicoides*, *Dactylis glomerata* y *Festuca ovina*. Los caméfitos, algunos facilitadores y otros protectores del suelo y/o generadores de estructura de la comunidad son: *Genista scorpius*, *Lavandula latifolia*, *Santolina chamaecyparissus* y *Thymus vulgaris*. La plantación arbórea y de arbustos se ha realizado en módulos diseminados a una densidad media por el conjunto de la superficie restaurada que, a largo plazo, actuarán como focos de colonización posterior. Se han seleccionado 10-13 especies dependiendo del año entre las que destacan *Pinus nigra* subsp. *salzmannii*, *Quercus faginea*, *Juniperus thurifera*, *Acer monspessulanum*, *Rosa canina*, *Buxus sempervirens*, *Salix* spp. Un aspecto original del proyecto es que la plantación se ha ajustado a la distribución espacial de la humedad en el paisaje. Para ello se han diseñado cuatro módulos de plantación con composiciones y densidades ajustados a este fin. El diseño de los módulos también ha tenido en cuenta la herbivoría de ungulados, presentando cada módulo una orla de arbustos espinosos. Previa a la plantación, se han abierto hoyos con moto-ahoyadora con barrena helicoidal en los que se han añadido 200-300 g de estiércol. Como parte de la colaboración con el proyecto LignoBioLife se ha probado la aplicación de biochar en los hoyos. Los plantones de *Quercus ilex*, *Q. faginea*, *Fraxinus angustifolia* y *A. monspessulanum* fueron protegidos con tubos protectores y los de *P. nigra* con malla negra.

En el caso de Lousal, el objetivo era conseguir una cubierta vegetal de herbáceas y arbustos, sin presencia de vegetación leñosa forestal. Para garantizar el establecimiento de esta cubierta vegetal, se eligieron herbáceas pioneras autóctonas con un amplio rango ecológico, capaces de sobrevivir en diferentes condiciones ambientales y de sustrato, sembradas a voleo. Algunas de las especies introducidas fueron: *Brisa maxima*, *Brachypodium phoenicoides*, *Lupinus luteus*, *Lupinus angustifolius*, *Trifolium pratense*, *Papaver rhoeas*, y *Calendula arvensis*. En Sánchez Donoso et al. (2023) se describe en detalle el proceso de restauración de la mina de Lousal.

Por último, se han llevado a cabo también actuaciones para favorecer el uso de los espacios restaurado por la fauna. Para ello, por ejemplo, se han instalado perchas como posaderos para aves, pequeños refugios y la revegetación se ha enfocado también para la atracción de animales dispersores de semillas.

4. SEGUIMIENTO DE LOS ESPACIOS RESTAURADOS Y EFECTOS EN EL ENTORNO

El proyecto incluye también un ambicioso plan de seguimiento de todos los ámbitos de la restauración, así como de los efectos aguas abajo. Este seguimiento no es habitual en los trabajos de restauración, si bien empieza a considerarse un aspecto clave para evaluar si se alcanzan los objetivos esperados y diseñar actuaciones para solucionar las posibles desviaciones detectadas.

En Peñalén se está realizando un seguimiento de la erosión mediante técnicas fotogramétricas y la cuantificación de la emisión de sedimentos a partir de diques de retención de sedimentos. También se toman muestras periódicamente para calcular los sólidos en suspensión. El seguimiento de la evolución del suelo incluye su caracterización físico-química con la toma de muestras de toda la superficie, la medición de la respiración del suelo como bioindicador de la actividad biológica, así como la humedad del suelo para evaluar la infiltración del agua en topografías y tratamientos diferentes. En relación con la vegetación herbácea, se está realizando un seguimiento detallado de la

"Trabajando para la sociedad"

evolución de la comunidad vegetal, con énfasis en la cobertura de las especies sembradas y la composición de especies. Asimismo, se está estudiando la evolución del banco de semillas del suelo y la regeneración natural de los pastizales decapados. Respecto a la plantación, se cuantifica la supervivencia y crecimiento de los plantones. También se realiza un estudio anual para evaluar la recolonización por la fauna.

El seguimiento de los medios acuáticos se inició antes de las labores de restauración para tener información pre-restauración y poder evaluar si las actuaciones del proyecto consiguen el objetivo marcado de mejora de los hábitats fluviales. Los estudios se han centrado en indicadores bióticos y la hidromorfología del río Tajo en el tramo más próximo a la zona de restauración.

En Portugal el seguimiento se centra en el estudio de la calidad del agua a partir de muestreos y piezómetros (para la determinación de parámetros hidrogeoquímicos). También se toman muestras vegetales para estudiar su asimilación de metales pesados y se realiza un seguimiento de la evolución de las especies herbáceas sembradas.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las técnicas aplicadas han permitido conseguir paisajes funcionales y visualmente mejor integrados en el entorno, así como recuperar la conexión hidrológica natural. Se ha reducido la susceptibilidad a la erosión, lo que minimiza los aportes de sedimentos a la red fluvial del entorno, permitiendo así la recuperación de los hábitats acuáticos afectados. La Figura 2 muestra el aspecto de los escenarios restaurados antes y después de estas actuaciones, tanto en España como en Portugal.

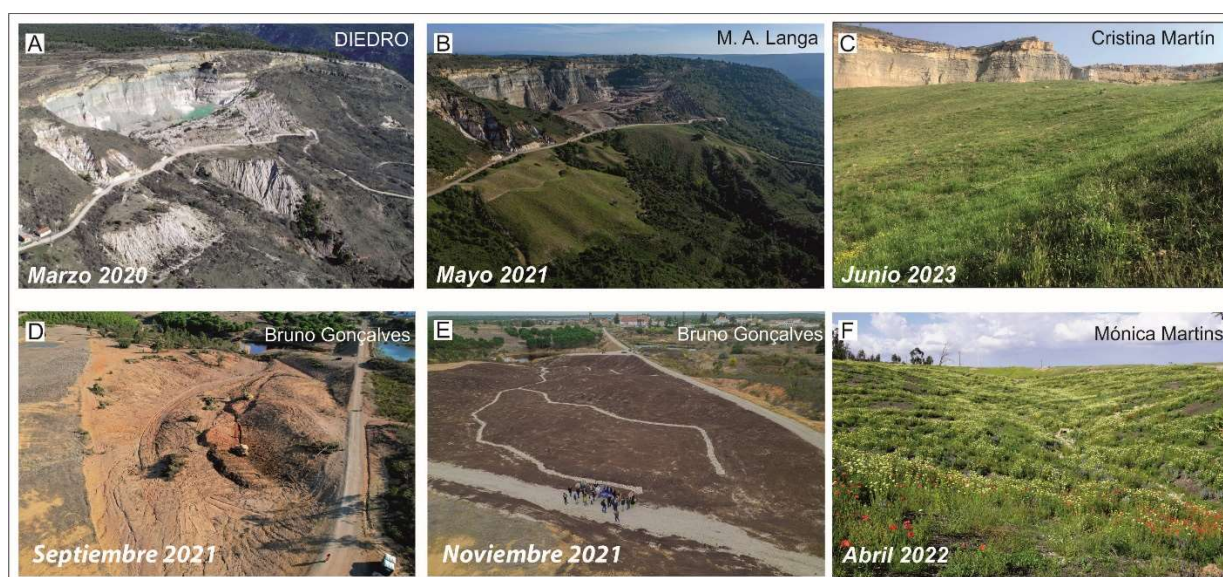


Figura 2 Escenarijos restaurados en el marco del proyecto LIFE RIBERMINE. Arriba, Mina Santa Engracia (Peñalén): A) pre-restauración, B) post-restauración y C) detalle de una escombrera restaurada. Abajo, zona restaurada en Lousal: D) pre-restauración, E) nada más terminar la restauración y F) detalle de la zona restaurada.

En el escenario español, el resultado más importante es la reducción de las tasas de erosión desde $353 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ antes de la restauración hasta $3,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ según las medidas directas realizadas en los diques para retención de sedimentos. Este valor es inferior al estimado por SIBERIA, que predijo tasas de erosión en 100 años de 5,2, 6,3 y $15,2 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ para las tres escombreras exteriores. La Tabla 1 muestra una comparación de los valores de erosión obtenidos mediante medidas directas e indirectas y con bibliografía.

“Trabajando para la sociedad”

El seguimiento del suelo muestra una evolución adecuada, habiéndose medido valores de respiración del suelo incluso mayores que en suelos naturales. Se espera que esos valores disminuyan con el tiempo y se alcancen valores equivalentes a los naturales. La humedad del suelo es más elevada en las zonas con aporte orgánico y es dependiente de la topografía generada, lo que favorece también una mayor heterogeneidad y biodiversidad. El banco de semillas es abundante, especialmente en las zonas donde se ha extendido el suelo decapado y el tratamiento de acolchado.

Tabla 1. Tasas de erosión medidas y estimadas para la mina Santa Engracia y comparación con valores disponibles en la bibliografía. Se incluyen valores medios.

Erosión pre-restauración (Martín Moreno et al, 2018)	Erosión real - medida en diques	Predicción SIBERIA	Erosión en mina con restauración similar (Zapico et al, 2018)	Erosión aceptable en minería (Hancock et al., 2019)
t ha ⁻¹ a ⁻¹	t ha ⁻¹ a ⁻¹	t ha ⁻¹ a ⁻¹	t ha ⁻¹ a ⁻¹	t ha ⁻¹ a ⁻¹
353	3,8	8,9	4	12-40

La cobertura y riqueza de plantas es mayor en las superficies con acolchado y trasplante del banco de semillas, mientras que las zonas sin tratamiento orgánico (extendido de estiércol) es baja. La supervivencia de los plantones es > 85% con la excepción de *Salix* spp. que es < 50%. El ecosistema fluvial muestra una ligera mejora, si bien será necesario que transcurra más tiempo para que la reducción de sedimentos se vea reflejada de una manera clara en la comunidad acuática. Además, se observa un efecto cascada sobre la abundancia de peces por la escasa presencia de macroinvertebrados bentónicos. Por último, se ha observado un uso continuado de los espacios restaurados por la fauna. Algunas especies de animales son sensibles a las alteraciones y presencia de maquinaria, sin haberse recuperado aún los valores iniciales de algunos anfibios y mamíferos. Se ha incrementado la presencia de aves, mientras que los reptiles no muestran cambios.

Las acciones en Lousal han mejorado significativamente el valor ecológico y la calidad del agua. Después de cinco meses, la laguna de agua ácida situada aguas abajo ha pasado de un color rojizo, propio del DAM, a un verde turquesa. Además, ha comenzado a establecerse una cubierta vegetal rica en especies, consistente con el plan de revegetación. Las especies invasoras y exóticas que se eliminaron al inicio como el eucalipto y alguna nativa muy competitiva como *Cistus ladanifer* no han vuelto a establecerse en la zona de intervención.

6. CONCLUSIONES

La principal conclusión de este proyecto es que existe tecnología, programas informáticos, conocimiento y experiencia suficiente para realizar restauraciones mineras funcionales, integradas en el entorno y autosostenibles. Este hecho demuestra que es posible una minería sostenible y con una mayor aceptación por parte de la sociedad.

El valor añadido de este proyecto, respecto al estado previo del arte, es que trata de: (a) la mayor restauración geomorfológica ejecutada en Europa; (b) un proyecto pionero a nivel europeo en el uso de Modelos de Evolución del paisaje en restauraciones mineras y en la combinación de técnicas de restauración geomorfológica y remediación química; (c) la primera vez que se utiliza, a nivel mundial, el método del Talud ROYAL® en minería; y (d) integra la revegetación, el sustrato y las formas de relieve para optimizar el uso del agua por las plantas y la recuperación de los servicios ecosistémicos en espacios transformados por actividades extractivas, superando el enfoque ‘corrector’ y ‘rehabilitador’ aún dominante.

“Trabajando para la sociedad”

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a la UE la financiación del proyecto LIFE 18 ENV/ES/000181 mediante su programa LIFE. RIBERMINE es un proyecto multidisciplinar y complejo en que intervienen numerosos expertos y técnicos. Por limitaciones de espacio no podemos nombrar a todos ellos. Hacemos extensible el agradecimiento a través de las instituciones y empresas socias del proyecto que los representan, mencionadas en la introducción. Agradecemos también a las empresas Excavaciones Félix Moya, S.L. y Albar Forestal S.L., y a los expertos: Nicholas Bugosh, (GeoFluv, Estados Unidos), Paul Royal, (Génie Géologique, Francia), Gregory R. Hancock, (Universidad de Newcastle, Australia), José María Iraizoz y sus colaboradores, (Universidad de Castilla–La Mancha), Avelino García (Científico Titular), Tíscar Espigares, (Universidad de Alcalá), Jaume Tormo y José Manuel Nicolau (Universidad de Zaragoza), Diego García de Jalón, Carlos Alonso González y su equipo (Universidad Politécnica de Madrid), Miguel Ángel Langa (Fotolanga.es) y Javier Lillo (Universidad Rey Juan Carlos). Por último, agradecemos las facilidades dadas por el Ayuntamiento de Peñalén, a su alcaldesa previa, Esther Rubio, y al alcalde actual, Javier Cascajero, así como a la Junta de Propiedades de Peñalén y algunos propietarios de terrenos privados por su magnífica disposición y colaboración.

REFERENCIAS

- Bugosh, N., Epp, E. (2019): Evaluating sediment production from native and fluvial geomorphic reclamation watersheds at La Plata Mine. *Catena*, 174: 383–398.
- Hancock, G.R., Willgoose, G.R. (2018): Sustainable Mine Rehabilitation – 25 Years of the SIBERIA Landform Evolution and Long-term Erosion Model. From start to finish: a life-of-mine perspective, Australian Institute of Mining and Metallurgy.
- Hancock, G.R., Martín Duque, J.F., Willgoose, G.R. (2019): Geomorphic design and modelling at catchment scale for best mine rehabilitation – the Drayton mine example (New South Wales, Australia). *Environmental Modelling and Software*, 114: 140–151.
- Martín Duque, J.F., Tejedor, M., Martín Moreno, C., Nicolau, J.M., Sanz Santos, M.A., Sánchez Donoso, R., Gómez Díaz, J.M. (2020): Geomorphic landscape design integrated with progressive mine restoration in clay quarries of Catalonia. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 35(6): 399–420.
- Martín Duque, J.F., Zapico, I., Bugosh, N., Tejedor, M., Delgado, F., Martín-Moreno, C., Nicolau, J.M. (2021): A Somolinos quarry land stewardship history: From ancient and recent land degradation to sensitive geomorphic-ecological restoration and its monitoring. *Ecological Engineering*, 170, 106359: 1–18.
- Martín-Moreno C., Martín Duque J.F., Nicolau J.M., Muñoz A., Zapico I. 2018. Waste dump erosional landform stability – a critical issue for mountain mining. *Earth Surface Processes and Landforms* 43: 1431–1450.
- Sánchez Donoso, R., Martins, M., Tejedor Palomino, M., Esbrí Víctor, J.M., Lillo Ramos, F.J., Pereira, A. M., Pinto, A. M., Relvas, J. M., Martín Duque, J.F. (2023): Geomorphic-based mine rehabilitation coupled with AMD chemical stabilisation in sulphide-rich ore deposits and soils: insights from a pioneering intervention at the Lousal mine, Iberian pyrite Belt. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, DOI: 10.1080/17480930.2023.2247698
- Willgoose, G.R., Riley, S. (1998): The long-term stability of engineered landforms of the Ranger Uranium Mine, Northern Territory, Australia: application of a catchment evolution model. *Earth Surface Processes and Landforms*. 23(3): 237–259.
- Zapico, I., Martín Duque, J.F., Bugosh, N., Laronne, J.B., Ortega, A., Molina, A., Martín-Moreno, C., Nicolau, J.M., Sánchez, L. (2018): Geomorphic Reclamation for reestablishment of landform stability at a watershed scale in mined sites: the Alto Tajo Natural Park, Spain. *Ecological Engineering* 111: 110–116.