

Hacia una Minería Sostenible en el entorno del Parque Natural del Alto Tajo. La escombrera experimental de la mina 'El Machorro' (Poveda de la Sierra, Guadalajara)

Néstor Hernando¹, Cristina Martín Moreno², Lázaro Sánchez Castillo³, José Francisco Martín Duque⁴, Miguel Ángel Sanz⁵, José Manuel Nicolau⁶

Resumen

Por su situación en el entorno de un espacio natural protegido, y sobre una ladera de pendiente y longitud elevadas, la restauración de la mina El Machorro constituye un importante reto científico y profesional. La empresa propietaria de esta mina, CAOBAR S.A., tiene entre sus objetivos demostrar la compatibilidad de la actividad minera con la conservación del medio ambiente. Por todo ello está acometiendo sucesivas revisiones de su Plan de Restauración del Espacio Natural (PREN), tratando de incorporar las mejores prácticas internacionales al respecto. Todo ello en colaboración con las universidades Complutense y de Alcalá (Madrid) y bajo la supervisión de la Dirección del Parque Natural del Alto Tajo.

Una de las acciones más destacadas a ese respecto ha sido la construcción de una escombrera experimental, específicamente diseñada para mejorar la restauración de los terrenos afectados por la mina. En ella se estudia el comportamiento erosivo que tienen diferentes diseños de escombreras mediante la combinación de: (a) distintas topografías (cóncava y en terrazas); (b) distintos tipos de sustrato (estériles, coluviones y suelos originales); y (c) distintos tipos de revegetación (como hidrosiembras).

En la comunicación se describen los detalles de la puesta en funcionamiento de esta escombrera experimental, así como los resultados obtenidos para el periodo 1 de noviembre de 2008 a 31 de marzo de 2009.

Palabras clave: restauración minera, erosión del suelo, barreras de sedimentos, Alto Tajo.

1 Dpto. Geodinámica UCM. C/José Antonio Novais 2, 28040 Madrid reddiffusion@hotmail.com

2 Dpto. Geodinámica UCM. C/José Antonio Novais 2, 28040 Madrid. crismartin@geo.ucm.es

3 Director Técnico CAOBAR S.A. Carr. Nac. II, km 60, Guadalajara 19193. Dpto. Ingeniería Geológica UPM Ríos Rosas, 21 28003 Madrid lazaro.sanchez@upm.es

4 Dpto. Geodinámica UCM. C/José Antonio Novais 2, 28040 Madrid. josefco@geo.ucm.es

5 Dpto. Geodinámica UCM. C/José Antonio Novais 2, 28040 Madrid. massinfo@geo.ucm.es

6 Dpto. Ecología UAH. Ctra. Madrid-Barcelona, km. 33, 28871, Alcalá de Henares, Madrid josem.nicolau@uah.es



Towards a Sustainable Mining Activity at the Edge of the Upper Tagus Natural Park. The Experimental Spoil Heap of the El Machorro mine (Guadalajara, Spain)

Abstract

Due to its location at the edge of a natural protected area, and of a slope of long and steep gradients, the reclamation of El Machorro mine constitutes an important scientific and professional challenge. The owner of the mine, CAOBAR S.A., has among its objectives to demonstrate that it is possible to reconcile the mining exploitation with the environment conservation. Therefore, they are undertaking consecutive improvements of El Machorro Reclamation Plan, trying to incorporate the best international practises about mining reclamation. All that in collaboration with the Complutense and Alcala universities of Madrid and under the supervision of the Upper Tagus Natural Park direction.

One of the most outstanding initiatives of this Plan of Action is the construction of an experimental spoil heap, specifically designed for improving the reclamation of the lands affected by the mining activity at this site. At that experimental spoil heap, the erosive behaviour of diverse spoil heaps solutions is being studied. Those solutions combine: (a) different topographies (terraced and concave); (b) different substrata types (sandy spoils, carbonatic colluvion and original soils); and (c) different re-vegetation types (with and without hydroseeding).

Key words: mining reclamation, soil erosion, sediment fence, Upper Tagus (Guadalajara, Spain).

Introducción

En el entorno del Parque Natural del Alto Tajo (municipios de Peñalén y Poveda de la Sierra) se ubican una serie de importantes explotaciones mineras (activas y abandonadas) de caolín. Una de las minas activas es 'El Machorro', propiedad de la empresa CAOBAR S.A. Esta mina se sitúa sobre las laderas arenosas de un relieve de tipo mesa, culminado por rocas carbonáticas (calizas y dolomías).

La empresa propietaria de la mina pretende compatibilizar las actividades mineras con una mínima afección al medio ambiente. Con este propósito, está acometiendo sucesivas revisiones de su Plan de Restauración del Espacio Natural (PREN), tratando de incorporar las mejores prácticas internacionales en esta materia. Todo ello bajo la supervisión de la Dirección del Parque Natural del Alto Tajo y en colaboración con las universidades Complutense y de Alcalá de Madrid, a través de un contrato de investigación específico sobre este tema.

La restauración de la mina El Machorro presenta dificultades específicas, debidas a la existencia de unas laderas de longitud y pendientes elevadas, que favorecen la inestabilidad geomorfológica, tanto por la ocurrencia de movimientos en masa como por la erosión hídrica.

Los elementos que caracterizan este tipo de minería 'de ladera' o 'contorno' son: (i) frentes de explotación (verticales o en bancos o terrazas); (ii) plataformas o plazas mineras; (iii) pistas; (iv) bancos de estériles o escombreras. Y los problemas específicos de restauración son: (i) la inestabilidad del frente de explotación (fundamentalmente ante procesos gravitacionales); (ii) la inestabilidad de las escombreras (ante procesos gravitacionales y de erosión hídrica); (iii) el manejo de la escorrentía y el movimiento de sedimentos dentro de la mina; (iv) el impacto visual del frente de explotación.

Las prácticas mineras actuales (tanto en general como en este caso particular) y las distintas normativas sobre seguridad minera

garantizan la estabilidad geotécnica de los elementos morfológicos de las explotaciones. A su vez, progresivamente se ido incorporando la reducción del impacto visual en los planes de restauración. Sin embargo, existe mucho menos conocimiento sobre cómo reducir la escorrentía y la emisión de sedimentos desde el interior de las superficies mineras, y en particular sobre cómo diseñar escombreras que sean estables ante la erosión hídrica a largo plazo. En este sentido, cualquier avance que se produzca a este respecto supondrá una mejora simultánea en términos ecológicos y económicos (Sawatsky *et al.*, 1998).

En alguno de nuestros trabajos previos (Martín Duque *et al.*, 2008; Martín Moreno *et al.*, 2008) se ha venido insistiendo en que el factor principal a considerar en la restauración de la mina El Machorro no es de tipo visual (su cuenca visual apenas es visible), sino la reducción de la vulnerabilidad a la erosión hídrica.

Ante la situación expuesta, la empresa CAO-BAR S. A. las universidades Complutense y de Alcalá y la dirección del Parque Natural del Alto Tajo acordaron construir una escombrera experimental en el interior de la mina El Machorro. El objetivo de esa escombrera experimental está dirigido a determinar qué tipo de diseño de escombrera emite menos sedimentos, haciendo posible a su vez un mejor desarrollo de los suelos y de la vegetación. Con ello se determinará qué solución es más estable a largo plazo desde un punto de vista hidrogeomorfológico, y por tanto más adecuada para la restauración final de los terrenos afectados por la explotación minera El Machorro. Con esta escombrera experimental, y mediante la medición directa de la emisión de sedimentos desde distintas 'soluciones' de acabado, también se pretende

validar la idoneidad o no algunos modelos empíricos utilizados para determinar la emisión de sedimentos desde este tipo de superficies, tales como RUSLE 1.06 (Toy y Foster, 1998) y RUSLE 2.0 (Foster y Toy, 2003).

En esta contribución se realiza una descripción detallada del diseño metodológico puesto en marcha en esta escombrera experimental, construida en octubre de 2008. Dado el escaso tiempo transcurrido desde el inicio del experimento, aún no es posible ofrecer resultados concluyentes, y se estima que el seguimiento durante un año sería el mínimo necesario para poder obtener alguna conclusión relevante. En todo caso, ya se observan pautas claras de comportamiento diferencial de los distintos acabados, los cuales tienen una respuesta erosiva diferente ante los distintos eventos de precipitación, lo cual se describe en este trabajo.

Área de estudio

La mina El Machorro se ubica en el término municipal de Poveda de la Sierra, provincia de Guadalajara, en la Comunidad Autónoma de Castilla-La Mancha. Concretamente en la Zona Periférica de Protección (ZPP) del Parque Natural del Alto Tajo.

El Parque Natural del Alto Tajo y su entorno se sitúan en la Rama Castellana de la Cordillera Ibérica, en las estribaciones noroccidentales de la Serranía de Cuenca. En el área de Poveda de la Sierra dominan rocas de edad Cretácico, y los yacimientos de coque explotados se sitúan dentro de la Formación Arenas de Utrillas (IGME 1981, 1991).

La actividad tectónica en este área ha dado como resultado la formación de grandes pliegues, que fueron arrasados por una superficie de erosión que actualmente constituye



extensas parameras (Amuchastegui, 1993). El paisaje actual y sus elementos (cañones, mesas, muelas, cuevas, *hog-backs* y crestas), son el resultado de la erosión y encajamiento del río Tajo en este entorno durante el Cuaternario. Este proceso ha permitido la formación de una de las redes de hoces y cañones más extensas de la Península Ibérica, con más de 100 kilómetros de longitud.

El clima del área Poveda puede clasificarse como *Mediterráneo Templado Fresco*. La precipitación media anual está próxima a los 800 mm y la temperatura media anual es de 10 °C. En estas parameras, los suelos más abundantes son los cambisoles cálcicos, que también se desarrollan sobre los recubrimientos coluvionares de las laderas. La vegetación principal está constituida por extensos pinares de pino laricio y silvestre, junto con abundantes masas de quejigos.

Materiales y métodos

Como ya se indicó en la introducción, la construcción de la escombrera experimental del Machorro tiene por objetivo determinar qué tipo de diseño de escombrera sufre menos erosión frente a la lluvia y a la fusión de la nieve.

La escombrera se construyó durante el mes de octubre de 2008 con estériles producto de la explotación de la mina, en su mayoría de naturaleza arenosa no consolidada. Sobre esta base de estériles se realizaron diferentes diseños de acabado, mediante la combinación de: (a) distintas topografías; y (b) distintos tipos de sustrato. El diseño incorporaba también un tipo de revegetación, hidrosiembra convencional, pero ésta no pudo realizarse debido a las condiciones meteorológicas.

Por lo que respecta al modelado topográfico, se han construido dos morfologías; la primera de ellas consiste en el modelo habitual en terrazas para escombreras (sistema taludberma) y la segunda introduce un elemento innovador en el diseño de escombreras: se trata de la construcción de laderas cóncavas según criterios morfológicos basados en la geomorfología regional. Este tipo de diseños han demostrado ser muy estables, dado que a medida que la cuenca hidrográfica aumenta, la pendiente disminuye, lo que reduce la velocidad de la escorrentía y su potencial erosivo (Hancock *et al.*, 2003).

En cuanto a los tipos de sustratos, se han utilizado los tres materiales que están disponibles en la mina: estériles arenosos, coluviones carbonáticos (que recubren los materiales explotados en las laderas originales) y tierra vegetal (suelo original). En el caso de los coluviones y de la tierra vegetal, el espesor de los materiales va desde un mínimo de 30 cm hasta un máximo de 75 cm, al haberse extendido por vertido directo.

Finalmente, la incorporación del factor revegetación estaba contemplada sobre una topografía en terrazas de sustrato coluvionar, al ser éste uno de los acabados incluidos en el Plan de Restauración. Sin embargo, este ensayo no se pudo realizar, ya que las características meteorológicas del otoño e invierno del año hidrológico 2008-2009 no lo permitieron. Este ensayo está pendiente de realización en el otoño de 2009.

En definitiva, el número total de acabados estudiados ha sido de seis, si bien uno de ellos está repetido, al no haberse realizado la hidrosiembra, y son: 1, ladera cóncava con tierra vegetal; 2, ladera cóncava con coluvión; 3, talud recto con coluvión (con hidrosiembra prevista); 4, talud recto con tierra

vegetal; 5, talud recto con estériles arenosos; y 6, talud recto con coluvión (similar a 3, ya que aquél no se hidrosembró).

En cada uno de los acabados de escombrera se han definido tres parcelas abiertas, obteniéndose un total de 18 parcelas de estudio (Tabla 1). Cada una de estas parcelas consta de una trampa de sedimento (*sediment fence*) de 3 metros de anchura, en la que se miden de forma directa los materiales erosionados desde las laderas suprayacentes a las barreras. Estas barreras consisten en un geotextil sintético poroso, sujeto a barras verticales de ferralla, que están clavadas en el suelo (Foto 1). El sedimento arrastrado ladera abajo por la

erosión queda retenido en la barrera de geotextil, mientras que las características de este material permiten que el agua se escape poco a poco. Este tipo de trampas son baratas, y de fácil construcción y mantenimiento (Dissmeyer 1982; Robichaud y Brown, 2002).

Mediante la utilización de un GPS diferencial (*Leica 1200*) se ha realizado un levantamiento topográfico detallado de la escombrera, con el que se ha obtenido un Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la misma, y se han medido las superficies vertientes a cada *sediment fence*. Las áreas de captación de sedimentos son diferentes para cada parcela y ofrecen valores comprendidos entre 23,54 y 83,70 m².

ACABADOS (topografía + recubrimiento)	Nº DE PARCELA	MUESTRA
1 Ladera cóncava con tierra vegetal (LC-TV)	1	LC-TV-1
	2	LC-TV-2
	3	LC-TV-3
2 Ladera cóncava con coluvión (LC-C)	4	LC-C-1
	5	LC-C-2
	6	LC-C-3
3 Talud recto con coluvión (+ hidrosiembra*) (TR-C1+H)	7	TR-C1+H-1
	8	TR-C1+H-2
	9	TR-C1+H-3
4 Talud recto con tierra vegetal (TR-TV)	10	TR-TV-1
	11	TR-TV-2
	12	TR-TV-3
5 Talud recto con estériles arenosos (TR-E)	13	TR-E-1
	14	TR-E-2
	15	TR-E-3
6 Talud recto con coluvión (TR-C2)	16	TR-C2-1
	17	TR-C2-2
	18	TR-C2-3



Tabla 1: Acabados y parcelas estudiadas en la escombrera experimental. (*Hidrosiembra pendiente de realización, actualmente funciona igual que el acabado nº 6).

Foto 1: Trampa de sedimento, sediment fence, instalada en una parcela de talud recto con tierra vegetal.

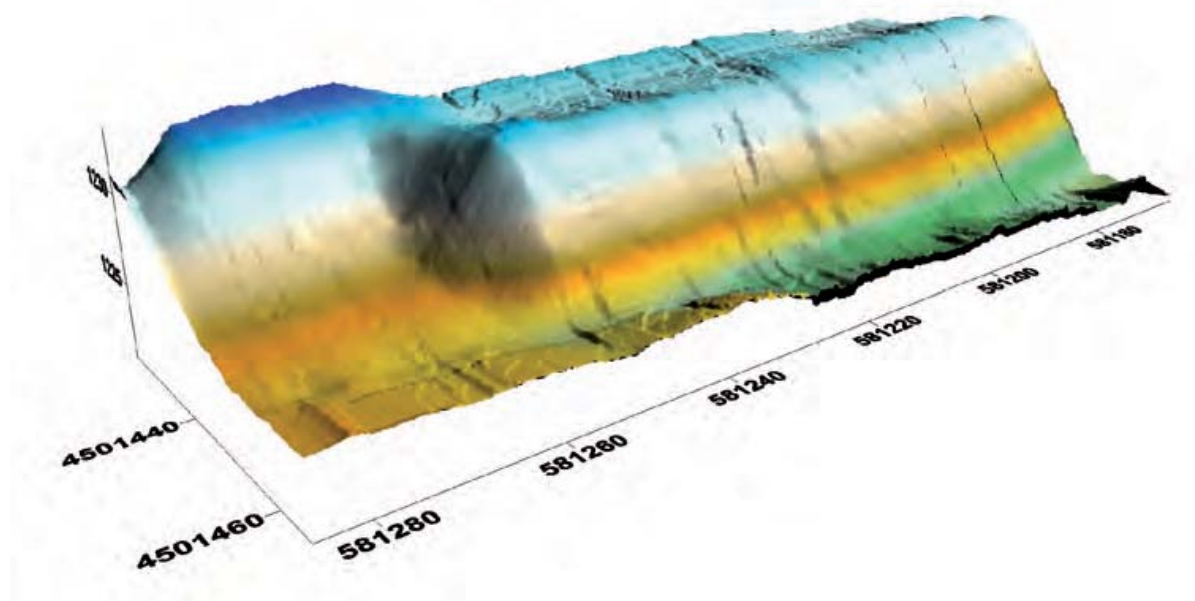


Figura 1: Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la base de la escombrera experimental. Datos obtenidos mediante GPS diferencial Leica 1200 y tratados mediante el software Surfer 8.

Tras cada evento de precipitación se procedía a la limpieza de las trampas y al pesado de los materiales depositados en las mismas. Para ello se ha empleado una báscula portátil sujeta mediante un gancho a un brazo metálico, construido específicamente para este fin. Posteriormente se tomaba una muestra húmeda de los materiales de cada una de las trampas. Para que estas muestras fueran representativas, se procedía a homogeneizar los sedimentos recogidos. Las muestras tomadas eran llevadas después al laboratorio, para obtener su peso seco. La relación entre peso seco y superficie vertiente a cada *sediment fence* permite obtener resultados en términos de Mg ha^{-1} . Y cuando se complete el año completo, muy próximo al año hidrológico, será posible hacerlo en $\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Finalmente, la medición de la cantidad e intensidad de la precipitación en la escombrera, con el objetivo de correlacionarlas con la producción de sedimentos, se está llevando a cabo a partir de un pluviógrafo de cazo-

letas tipo HOBO. Este pluviógrafo es revisado, descargado y puesto en marcha con la ayuda de un *HOBO Shuttle* cada vez que se vacían las trampas.

Uno de los objetivos principales de este trabajo es la comparación y validación, en un futuro, de los modelos RUSLE 1.06 (Toy y Foster, 1998) y RUSLE 2.0 (Foster y Toy, 2003), al objeto de conocer si serían aplicables a estos entornos mineros. Para la obtención de la información requerida por dicho programa ya se ha procedido a la toma de muestras de los distintos sustratos (tres muestras compuestas para cada tipo de acabado). Estas muestras están siendo analizadas en laboratorio, para obtener datos de textura y materia orgánica que necesita el programa. Así mismo, se han descrito en campo los parámetros necesarios para la aplicación de los modelos, tales como la estructura, la rugosidad, la cobertura vegetal o la pedregosidad.

Resultados

El periodo de toma de datos va del 1 de noviembre de 2008 al 31 de marzo de 2009. Los resultados obtenidos hasta el momento son, por tanto, muy preliminares. Aún así, ya se han observado diferencias importantes en el comportamiento de las formas y materiales estudiados. Estos resultados pueden dividirse en dos grupos: cualitativos, referidos al comportamiento diferencial de los distintos materiales y formas de escombrera ante los mismos eventos de lluvia y nieve; y cuantitativos, reflejados en los valores de erosión obtenidos hasta la fecha.

Datos cualitativos

Se han observado diferencias sustanciales en el comportamiento de las distintas formas y recubrimientos estudiados. Así, las laderas cóncavas (con independencia de su sustrato, coluvionar o de tierra vegetal), no han sufrido erosión hídrica alguna, y por tanto no han producido aporte de sedimentos. La única incidencia destacada en estas parcelas ha sido la entrada de escorrentía exterior (*run-on*) desde la berma superior. Todo ello ha producido una sedimentación en forma

de pequeños conos aluviales en uno de los acabados (ladera cóncava + coluvión), atribuible únicamente a un fallo en la zona más elevada de la escombrera, pero no a la solución de acabado que se pretendía estudiar. Este fallo se ha debido a que no se pudo finalizar la construcción de la parte superior de la escombrera, por la llegada de las lluvias de otoño – invierno.

Los taludes rectos han tenido una distinta respuesta erosiva en función de su recubrimiento. A modo de síntesis, la tierra vegetal no ha sufrido procesos erosivos, los estériles arenosos han desarrollado una red de regueros o surcos (*rills*) bien definida y los sustratos coluvionares han sufrido algunos procesos de flujo de barro (*mudflow*) y una erosión hídrica incipiente. Las tablas 2 y 3 reflejan las modificaciones observadas.

Respecto a la temporalidad de la evolución geomorfológica, se ha registrado una alta inestabilidad en las fases iniciales (tras las primeras lluvias del otoño). Tras esas fases iniciales de reajuste a las nuevas condiciones, los distintos acabados han evolucionado muy poco.

95


ACABADOS DE ESCOMBRERA	ASPECTO INICIAL (OCTUBRE 2008)	EVOLUCIÓN GEOMORFOLÓGICA
<p>Vista general de la escombrera de talud recto</p>		
<p>Talud recto + coluvión (TR-C1 y TR-C2) 3</p>		
<p>Talud recto + estériles arenosos 5</p>		

Tabla 2: Principales variaciones morfológicas acaecidas en la escombrera experimental: ocurrencia de *mudflows* en taludes rectos con recubrimiento de coluvión, y erosión en surcos o regueros (*rills*) en el talud recto arenoso. El talud recto con recubrimiento vegetal y los taludes cóncavos (con independencia del sustrato) no han sufrido variación morfológica alguna.

Diseños de acabado	Modificaciones geomorfológicas observadas
Ladera cóncava + tierra vegetal 1	No se han observado formas erosivas o de sedimentación significativas desde su construcción.
Ladera cóncava + coluvión 2	No se han observado formas erosivas o de sedimentación significativas desde su construcción. Únicamente se han recogido sedimentos en una parcela, pero estos sedimentos proceden de la rotura de la berma superior (proceso de <i>run-on</i>), que ha ocasionado la formación de un cono aluvial sobre esta parcela.
Talud recto + coluvión (1) 3	Ha habido movilización de materiales por procesos gravitacionales de tipo flujos de barro, <i>mudflow</i> , con la aparición de canales erosivos en el talud y lóbulos o lenguas al pie del mismo. En algunas zonas del talud se aprecia la formación de surcos o regueros (<i>rills</i>) poco encajados, de 30-40 cm de ancho y 10 cm de profundidad de media.
Talud recto + tierra vegetal 4	No se ha observado ningún cambio significativo. La superficie del talud es muy irregular y heterogénea, debido a la presencia de fragmentos de roca y restos vegetales.
Talud recto + estériles arenosos 5	Se ha desarrollado una red de regueros o surcos (<i>rills</i>) a lo largo de todo el talud. Los <i>rills</i> son estrechos y profundos, y muy numerosos. A la salida de estos surcos, al pie del talud, se han formado conos arenosos. También se ha registrado una progresiva desintegración de terrones sobre la superficie del talud.
Talud recto + coluvión (2) 6	Su comportamiento es el mismo que en el acabado 3, ya que se trata de los mismos materiales.

Tabla 3: Comportamiento diferencial de los distintos diseños de acabado de la escombrera experimental de la mina El Machorro para el periodo 1 de noviembre de 2008 a 31 de marzo de 2009.

Datos cuantitativos

La figura 2 representa la producción específica de sedimentos de los seis diseños de acabado de escombrera (numerados de 1 a 6, ver Tablas 1 y 2) para el periodo 1 de noviembre de 2008 a 31 de marzo de 2009. Para obtener estos valores se ha realizado la media de las tres parcelas instaladas en cada uno de los diseños. Los valores más altos están próximos a los 200 Mg ha⁻¹ y co-

rresponden a los taludes rectos de estériles areno-arcillosos; este valor es prácticamente el doble que los obtenidos para los taludes rectos con coluvión (1 y 2). En los taludes rectos con tierra vegetal se han obtenido valores muy bajos (entorno a 10 Mg ha⁻¹), mientras que en las laderas cóncavas (con independencia de su sustrato) no han emitido sedimentos hasta la fecha.

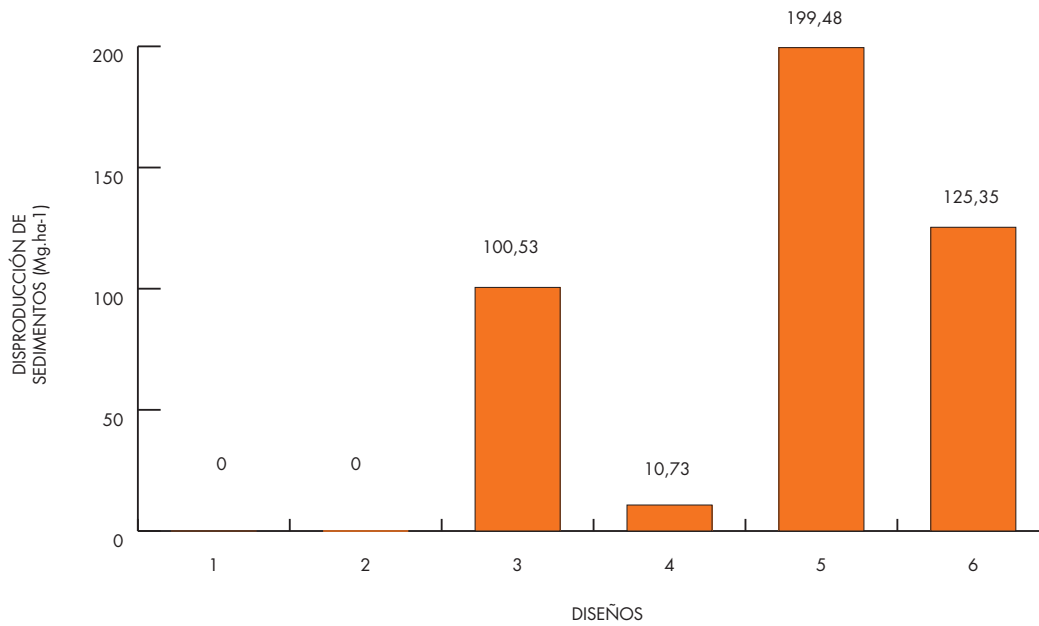


Figura 2: Producción específica de sedimento para cada uno de los diseños de acabado: 1, Ladera cóncava con tierra vegetal; 2, Ladera cóncava con coluvión; 3, Talud recto con coluvión (1); 4, Talud recto con tierra vegetal; 5, Talud recto con estériles arenosos; 6. Talud recto con coluvión (2).

La producción específica de sedimentos para cada uno de los acabados ha ocurrido para una precipitación total acumulada de 198 mm, referida al periodo 1 de noviembre de 2008 a 31 de marzo de 2009 (para una media anual de 800 mm/año). La Figura 3 compara la precipitación recogida durante el periodo noviembre de 2008 a marzo de 2009 con la precipitación media de cada mes para esta localización. Para realizar el cálculo de las precipitaciones medias se ha usado una

serie de datos de 30 años correspondientes a la estación meteorológica de Peralejos de las Truchas (Guadalajara), municipio cercano a la zona de estudio (datos facilitados por la Agencia Estatal de Meteorología). La Figura 3 muestra un patrón de precipitaciones alejado de las medias mensuales correspondientes, con un mes de diciembre en el que la precipitación ha sido casi el doble que la media, mientras que el resto de los meses se sitúan por debajo de la media.

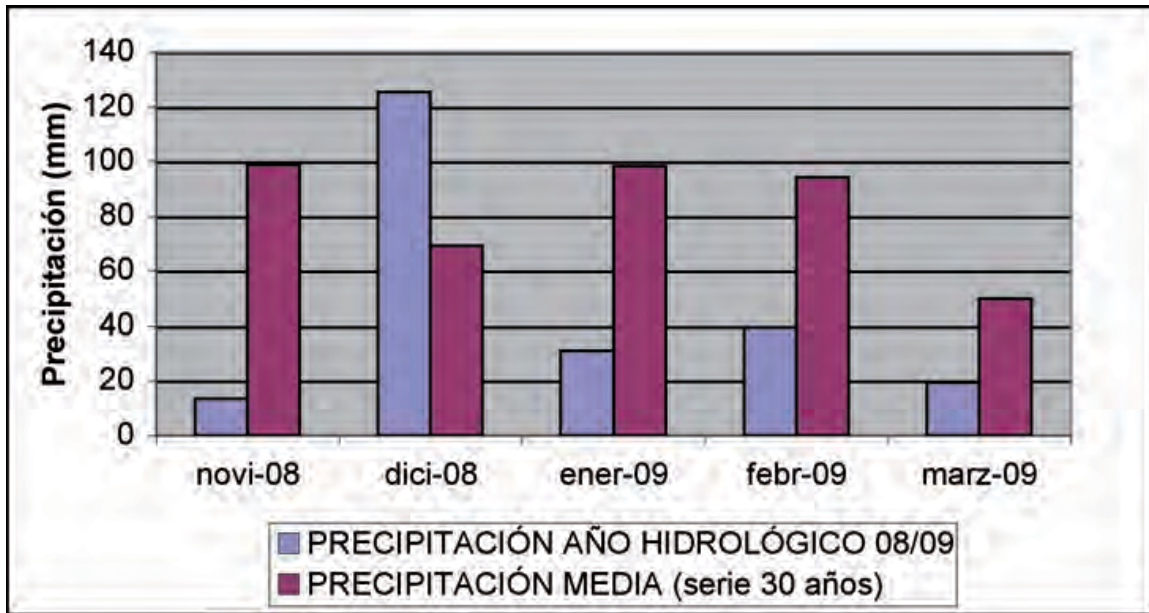


Figura 3: Comparación entre la precipitación mensual ocurrida para el periodo noviembre de 2008 a marzo de 2009 (registrada mediante un pluviógrafo situado en la propia escombrera experimental) y los datos de precipitación media mensual (obtenidos a partir de una serie de 30 años en la estación meteorológica de Peralejos de las Truchas, proporcionados por la Agencia Estatal de Meteorología).

Discusión y conclusiones

Los resultados obtenidos hasta la fecha son claramente preliminares, y precisan de una continuación de su seguimiento para que puedan ser mínimamente representativos. Aún así, es posible establecer algunas pautas de comportamiento de las distintas escombreras ante unas mismas condiciones de precipitación y orientación de ladera. Estas pautas son las siguientes:

- Las laderas cóncavas, con independencia de su sustrato, han mostrado una gran estabilidad, al no haber sufrido procesos erosivos ni haber emitido sedimentos.
- En el caso de los taludes rectos, existe un comportamiento muy diferente en función del recubrimiento empleado, siendo el recubrimiento de tierra vegetal el más estable de todos, con mucha diferencia sobre los otros dos acabados.
- Los taludes rectos con recubrimiento de material coluvionar, si bien muestran valores muy altos de erosión, es preciso aclarar que buena parte de la movilización del material se ha producido a partir de movimientos en masa. Estos movimientos en masa no son frecuentes en este tipo de escombreras, si bien en este caso interpretamos que han ocurrido como consecuencia de la coincidencia de un mes de diciembre muy húmedo, con nevadas frecuentes, inmediatamente después de la construcción de la escombrera (y por tanto cuando ésta era muy inestable). A partir de la inestabilidad inicial, la producción específica de sedimentos en estos taludes ha descendido de manera muy significativa.
- El diseño de acabado 5, talud recto con recubrimiento arenoso, muestra unos valores realmente elevados (próximos a 200 Mg ha⁻¹), lo que demuestra su gran inestabilidad geomorfológica. En este sentido,

es preciso aclarar que este tipo de diseño nunca se emplea como acabado final de las escombreras de la mina El Machorro, debido precisamente a esa gran inestabilidad. Su utilización en este diseño tiene por objetivo constituir una especie de 'control', o nivel de referencia sobre el que comparar el resto de acabados.

- El mecanismo que introduce mayor inestabilidad en las escombreras se debe a la entrada de aguas desde las bermas superiores (run-on). Este proceso denota que el proceso de construcción de las bermas es clave para garantizar la estabilidad geomorfológica del conjunto. La ocurrencia de estos procesos en esta escombrera se debió a la imposibilidad de un acabado adecuado, por la llegada de las lluvias de otoño-invierno.

Todo ello pone de manifiesto que la construcción de morfologías cóncavas y la utilización de tierra vegetal (retirada, almacenamiento y extendido de los suelos originales) puede

ayudar a minimizar, de manera muy considerable, la emisión de sedimentos desde las zonas restauradas de la mina El Machorro.

Divulgación científica

El marco de colaboración que se ha establecido entorno a esta escombrera experimental de El Machorro, en el que están implicados de manera conjunta la empresa minera CAO-BAR S.A., las universidades Complutense y de Alcalá de Madrid, y los gestores de un espacio natural (Parque Natural del Alto Tajo), así como el esfuerzo realizado por compatibilizar la actividad minera en el entorno de un espacio natural protegido, han puesto de manifiesto la conveniencia de desarrollar al máximo la vertiente divulgativa de todo este proceso. Para ello, se ha instalado un cartel (Figura 4) en las inmediaciones de la escombrera, el cual explica los estudios que se están realizando en esta localización a los numerosos visitantes que ya recibe esta escombrera, entre los cuales se encuentra un número importante de estudiantes universitarios (Figura 5).



Figura 4: Cartel explicativo de la escombrera experimental 'El Machorro'.



Agradecimientos

Los trabajos descritos forman parte de dos proyectos de investigación: el proyecto CGL-2006-0727 del Plan Nacional (Ministerio de Ciencia e Innovación) y del contrato de investigación UCM 234/2007 entre la em-

presa CAOBAR S.A. y un grupo de investigadores de las Universidades Complutense y Alcalá de Madrid. Queremos agradecer la dedicación de la empresa Félix Moya S.L. en la construcción de la escombrera experimental y en el apoyo de diversas labores de tipo logístico.



Figura 5: Prácticas de campo de estudiantes de la Universidad Complutense en la escombrera experimental de la mina El Machorro.

Bibliografía

Amuchastegui, M.J. 1993. *Geomorfología del Alto Tajo en el sector de Molina de Aragón*. Universidad Autónoma de Madrid, Madrid.

Dissmeyer, G.E. 1982. *How to use fabric dams to compare erosion from forestry practices*. Forestry Rp. SA-FR 13, Atlanta, GA: US Department of Agriculture, Forest Service, Southeast Areas, 11 p.

Foster, G., and Toy T. 2003. *RUSLE 2*

User Manual for Highly Disturbed Lands: Construction, Reclaimed, Mined, Landfills, Military Training Grounds and Similar Lands. www.sedlab.olemiss.edu/rusl.

Hancock GR, Loch RJ, Willgoose GR. 2003. The design of post-mining landscapes using geomorphic principles. *Earth Surface Processes and Landforms* **28**(10): 1097-1110. DOI:10.1002/esp.518

IGME 1981. *Mapa Geológico de España, Escala 1:50.000*. Taravilla (514). Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.

IGME 1989. *Mapa Geológico de España, Escala 1:50.000*. Peralejo de las Truchas (539). Instituto Tecnológico GeoMinero de España, Madrid.

Martín Duque, J.F., Nicolau, J.M., Martín Moreno, C, Sánchez, L., Ruiz, R., Sanz, M.A., Lucía, A. 2008. Geomorfología y gestión del Parque Natural del Alto Tajo (1). Condicionantes y criterios geomorfológicos para la restauración de minas de caolín. En: Benavente, J. y Gracia, F.J. (Eds.) *Trabajos de Geomorfología en España, 2006-2008*, pp. 459-462, Univ. Cádiz.

Martín Moreno, C., Martín Duque, J.F., Nicolau, J.M., Sánchez, L., Ruiz, R., Sanz, M.A., Lucía, A. 2008. A geomorphic approach for the ecological restoration of kaolin mines at the Upper Tagus Natural Park (Spain). *6th European Conference on Ecological*

Restoration, September 2008, Ghent, Belgium, pp. 1-4.

Robichaud, PR; Brown, PR 2002. *Silt fences: An economical technique for measuring hillslope erosion*. Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-94. Rocky Mountain Research Station, USDA Forest Service; 25 p.

Sawatsky LF, Beckstead G, Long D. 1998. Integrated mine water management planning for environmental protection and mine profitability. *International Journal of Surface Mining Reclamation and Environment* **12**(1): 37-39. DOI:10.1080/09208119808944019

Toy, T.J. and Foster, G.R. 1998. *Guidelines for the Use of the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE) version 1.06 on Mined Lands, Construction Sites and Reclaimed Lands*. Office of Surface Mining, Denver, USA, 103 pp.

MineríaSostenible

INTERNATIONAL CONFERENCE

SustainableMining

CONFERENCIA INTERNACIONAL

MinaríaSostible

09



LIBRO DE ACTAS

Toda la documentación contenida en este libro está disponible en www.cims2009.com

Toda a documentación contida neste libro está dispoñible en www.cims2009.com

All the information in this book is available at www.cims2009.com

Edita / Edita / Editor: Cámara Oficial Mineira de Galicia, A Coruña 2009.

Depósito legal: C 2784-2009

ISBN: 978-84-692-3936-0



Toda la documentación contenida en este libro está disponible en www.cims2009.com

Toda a documentación contida neste libro está dispoñible en www.cims2009.com

All the information in this book is available at www.cims2009.com

Edita / Edita / Editor: Cámara Oficial Mineira de Galicia, A Coruña 2009.

Depósito legal: C 2784-2009

ISBN: 978-84-692-3936-0

