



**IMPACTO HIDROGEOMORFOLÓGICO DE LAS MINAS
Y ESCOMBRERAS DE PEÑALÉN (GUADALAJARA)
SOBRE EL PARQUE NATURAL DEL ALTO TAJO**

*Hydrogeomorphic impact of the Peñalén (Guadalajara) mines and spoil heaps
on the Upper Tagus Natural Park*

J.F. Martín Duque¹, C. Martín Moreno¹, J.M. Nicolau², M.A. Sanz¹ & A. Lucía¹

*1 Departamento de Geodinámica, Facultad de Ciencias Geológicas, Universidad Complutense
de Madrid, C/José Antonio Novais, 2; 28040, Madrid. josefco@geo.ucm.es*

*2 Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad de Alcalá de Henares,
Campus Universitario, Carretera Madrid-Barcelona, km. 33,6; 28871, Alcalá de Henares, Madrid*

Resumen: El municipio de Peñalén (Guadalajara) alberga un conjunto de minas y escombreras degradadas, cuyo impacto ambiental sobre el inmediato Parque Natural del Alto Tajo es objeto de constante discusión. En este trabajo se ha llevado a cabo una primera aproximación al problema, tratando de caracterizar los condicionantes geomorfológicos del impacto hidrológico, de identificar las principales fuentes de sedimentos y de cuantificar los sedimentos que son emitidos desde estas zonas mineras y desde sus alrededores a la red fluvial. Esta aproximación ha puesto de manifiesto tres evidencias claras: (i) las zonas mineras de Peñalén se sitúan en localizaciones muy vulnerables a la erosión hídrica; (ii) los procesos erosivos y de emisión de sedimentos hacia el río Tajo son muy importantes desde esas zonas mineras y desde cárcavas naturales; (iii) existe una conexión hidrológica directa entre las fuentes de sedimentos de las zonas mineras degradadas de Peñalén y el río Tajo.

Palabras clave: geomorfología, espacios naturales, impacto hidrológico, minería de caolín, Parque Natural del Alto Tajo, RUSLE 1.06.

Abstract: The Peñalén municipality (Guadalajara Province) houses a series of derelict kaolin mines. The environmental impact of these mined lands upon the close Upper Tagus Natural Park is subject to constant discussion. This work shows a characterization of the geomorphic setting of the mines, as a main determining factor of the hydrological impact. In addition, an evaluation of the soil erosion rates of the Peñalén catchment was carried through RUSLE 1.06, to identify the main sediment sources. Additionally, sediment yield quantification was feasible from the evaluation of the stored sediments at a check-dam located at the the Peñalén catchment's mouth. Finally, a descriptive analysis of the erosive landforms at these mined areas has been made both from field work and a combination of oblique aerial photos of different times. The higher erosion rates obtained by RUSLE 1.06 are: highwall (202.54 Mg ha⁻¹ year⁻¹); highwall's debris slope deposits (87.55 Mg ha⁻¹ year⁻¹); outslope spoil heaps (86.12 Mg ha⁻¹ year⁻¹) and natural gullies (197.93 Mg ha⁻¹ year⁻¹). The quantification from the check-dam sedimentation offers a realistic value of the sedi-



J.F. Martín Duque, C. Martín Moreno, J.M. Nicolau, M.A. Sanz & A. Lucía (2009). Impacto hidrogeomorfológico de las minas y escombreras de Peñalén (Guadalajara) sobre el Parque Natural del Alto Tajo. *Rev. C. & G.*, 23 (3-4), 27-44.

ments that are being emitted from the Peñalén catchment to the Tagus River (approximately 3200 Mg year⁻¹). Finally, the geomorphic analysis from oblique aerial photos and field work shows that the outslope spoil heaps of Santa Engracia mine are the main source of sediments, in contradiction with the RUSLE 1.06. From these results, three evidences are noticeable: (i) the derelict mined areas of Peñalén are located in very vulnerable topographical positions to the hydric erosion; (ii) these mined areas are subject to very high erosion rates; (iii) there is a direct hydrological connection between the sediment sources of these mined areas and the Tagus River within the protected area, and therefore a permanent and severe ecohydrologic impact is taking place.

Keywords: geomorphology, protected areas, hydrological impact, kaolin mines, Upper Tagus Natural Park, RUSLE 1.06.

1. Introducción

El Parque Natural del Alto Tajo fue declarado el 6 de abril de 2000. Tiene una superficie de 105.721 hectáreas, dentro de las provincias de Guadalajara y Cuenca, y cuenta con una Zona Periférica de Protección de 70.544 hectáreas.

Entre los valores más destacados de este Parque Natural destacan la calidad de las aguas de sus ríos y las excelentes poblaciones de especies de fauna ligadas al medio fluvial, así como el buen estado de conservación de las formaciones vegetales riparias y de flora acuática. Todo ello le ha hecho merecedor, además de la figura de Parque Natural, de dos categorías de hábitats protegidos de la Red Natura 2000: una Zona de Especial Protección para las Aves (ZEPA) y un Lugar de Interés Comunitario (LIC).

En la Zona Periférica de Protección del Parque, en los municipios de Poveda de la Sierra y Peñalén (Guadalajara), se localizan diversas explotaciones mineras de caolín, tanto activas como inactivas, anteriores a la declaración del espacio protegido. El problema surge porque la extracción del caolín ha generado, y es susceptible de generar, consecuencias adversas sobre los recursos naturales del espacio y los hábitats protegidos. Aunque el efecto más evidente para un visitante pueda ser su ‘impacto visual’, puede afirmarse que la principal secuela ambiental de esta actividad es de tipo hidrológico.

Tras una prospectiva inicial, el entorno minero de la localidad de Peñalén ha sido identificado como el punto más conflictivo de esta problemática hidrológica. Ello es así porque en este municipio se localizan dos explotaciones mineras (Santa Engracia y Santa Engracia 2) y una gran escombrera (Hoya Grande) en situación de suspensión de

labores desde 1990, las cuales carecen de medidas efectivas para evitar la emisión de sedimentos a la red fluvial. En efecto, las superficies mineras del entorno de Peñalén están desprovistas de suelo y vegetación, lo que unido a la alta erosionabilidad de los materiales, arenas, provoca una erosión hídrica muy intensa dentro de las propias superficies mineras (*on-site effects*). A su vez, la ausencia de medidas de protección eficaces provoca una emisión continuada de sedimentos a la red fluvial directamente afluente al río Tajo, fuera de las superficies mineras y dentro ya del Parque Natural (*off-site effects*). En el caso de la mina Santa Engracia, la emisión de sedimentos se produce sobre el arroyo Merdero, afluente a su vez del río Tajo (Fig. 1). La mina Santa Engracia 2 tiene una conexión hidrológica rápida y directa con el arroyo de Peñalén, el cual vierte sus aguas al citado arroyo Merdero. Finalmente, la escombrera Hoya Grande emite sedimentos al Barranco del Puente, afluente del río Tajo.

Es importante establecer la diferencia entre estas superficies mineras degradadas (inactivas desde 1990) y las zonas mineras activas del entorno (Minas Nuria, María José y Machorro, en el municipio de Poveda de la Sierra), puesto que éstas cuentan con balsas de decantación para evitar las emisiones de sedimentos. Y si bien su funcionamiento puede presentar deficiencias en algún momento, éste es susceptible de ser corregido. Sin embargo, las emisiones de sedimentos desde las zonas mineras del entorno de Peñalén llegan directamente a la red fluvial, sin ningún tipo de barrera. Paradójicamente, el hecho de que estas minas y escombreras se encuentren inactivas hace que no sean objeto de vigilancia regular “por vertido”.

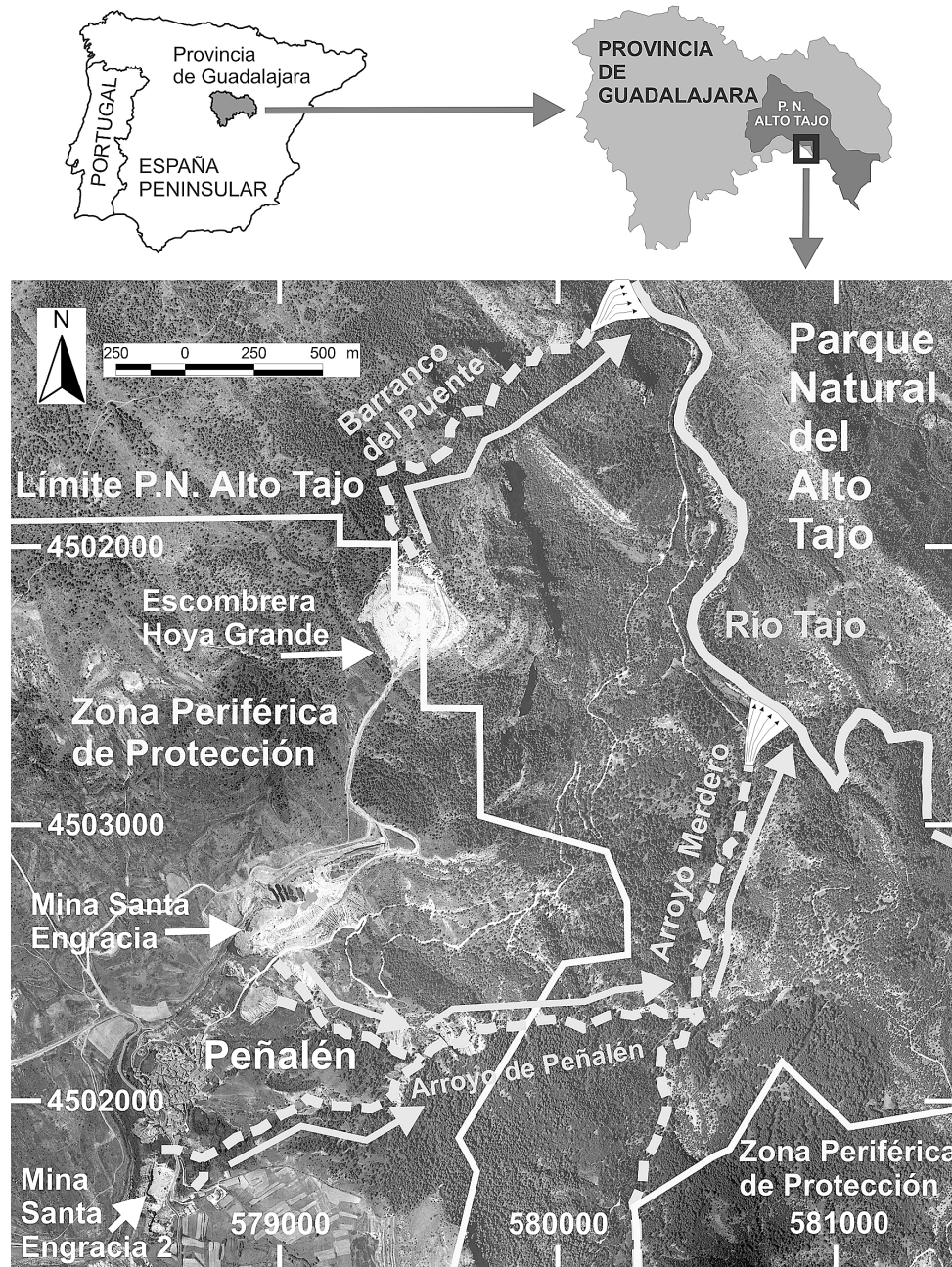


Figura 1. Situación geográfica y contexto espacial del impacto hidrogeomorfológico descrito (coordenadas UTM, huso 30). Las flechas que siguen el trazado de la red hidrográfica (línea gris discontinua) muestran la conexión hidrológica directa entre las zonas mineras del entorno de Peñalén y el río Tajo (línea gris continua y gruesa). Nótese los dos conos aluviales formados en la desembocadura de los arroyos Merdero y Barranco del Puente al río Tajo. Composición sobre ortofoto del PNOA del año 2006 (del Instituto Geográfico Nacional).

Figure 1. Geographical situation and spatial framework of the described hydrogeomorphological impact (coordinate UTM, zone 30). The arrows which follow the route of the hydrographical network (broken grey line) show the hydrological connection between the mining areas of the Peñalén surroundings and the Tagus river (continuous grey line). Note the two alluvial cones formed at the mouth of the Merdero and Puente Ravine streams entering the Tagus river. Composition on the PNOA orthophoto of 2006 (of the National Geographical Institute).

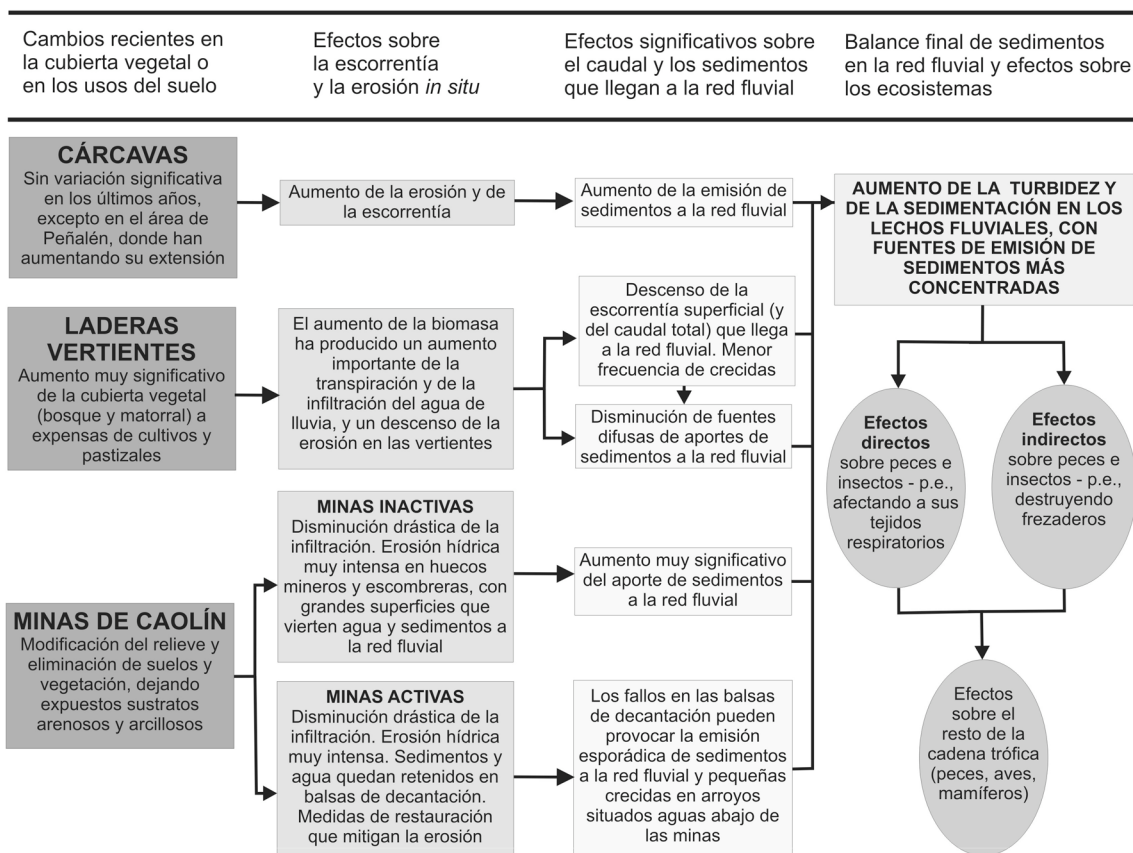


Figura 2. Diagrama de red relativo al impacto hidrológico por emisión de sedimentos sobre el Parque Natural del Alto Tajo.
 Figure 2. Network diagram relating the hydrological impact by sediment yield to the Upper Tagus Natural Park.

La emisión de sedimentos desde estas zonas mineras de Peñalén constituye un factor más de los impactos ecohidrológicos sobre el río Tajo. Los efectos de esas emisiones consisten en una disminución de la calidad de los ecosistemas acuáticos, alterando el hábitat de flora y fauna. El aumento de la turbidez del agua afecta directamente a los tejidos respiratorios de peces e insectos. Y la sedimentación y decantación de arenas, limos y arcillas sobre los lechos de gravas de los cursos fluviales inhabilita los frezaderos y lechos de puesta, también de peces e insectos. La disminución de estas poblaciones afecta a su vez al resto de la cadena trófica, constituida por otros peces, aves y mamíferos. Así las cosas, según los gestores del Parque Natural del Alto Tajo, el principal problema ambiental y de gestión de este espacio protegido es

el declive de los ecosistemas fluviales, en general, y de las poblaciones de truchas, en particular, como consecuencia de la emisión de sedimentos desde zonas colindantes. Pero la estimación del aporte de sedimentos a los cursos fluviales del Parque es un tema complejo (Fig. 2), puesto que también influyen las emisiones que producen las cárcavas naturales, o las emisiones puntuales que pueda haber por un funcionamiento deficiente de las balsas de decantación de minas activas. Adicionalmente, es preciso considerar el efecto que puede haber jugado la disminución de las crecidas fluviales en los últimos años, las cuales conseguían ‘limpiar’ el caolín del fondo de los cauces.

Con el fin de comprender y solucionar esta problemática, se ha constituido un grupo de trabajo para la *Evaluación y corrección del impacto*

ambiental de las minas de caolín del entorno del Parque Natural del Alto Tajo. Este grupo, impulsado y coordinado por la Dirección del propio Parque Natural, está formado por las administraciones de Minas y Medio Ambiente del gobierno regional de Castilla – La Mancha (actualmente agrupadas en la misma Consejería de Industria, Energía y Medio Ambiente), la empresa minera CAOBAR S.A., que no ha explotado ni es propietaria de las minas inactivas de Peñalén objeto de este estudio, pero opera dos minas activas en Poveda de la Sierra, la Confederación Hidrográfica del Tajo (CHT), e investigadores de las Universidades de Alcalá (UAH) y Complutense (UCM) de Madrid. El citado grupo, si bien carece de un ‘reconocimiento formal’, ha establecido un marco de intercambio de información y de colaboración óptimo, y así viene funcionando desde principios del año 2007.

El objetivo de este trabajo es llevar a cabo una primera identificación, caracterización y cuantificación de las distintas fuentes de sedimentos a la red fluvial del río Tajo procedentes de zonas mineras del entorno de Peñalén. Todo ello mediante el uso de métodos directos e indirectos.

2. Área de estudio

2.1. Medio físico

El Parque Natural del Alto Tajo y su entorno se sitúan en la denominada Rama Castellana de la Cordillera Ibérica, en las estribaciones noroccidentales de la Serranía de Cuenca. Una de las señas de identidad de este espacio natural protegido es su altísima diversidad geológica (Carcavilla et al., 2008), si bien su sector suroriental, en general, y el área Peñalén – Poveda, en particular, están dominados por rocas de edad Cretácica: los yacimientos de caolín explotados pertenecen a la Formación Arenas de Utrillas; por debajo de esta Formación aparecen conglomerados, areniscas, arcillas y calizas de las Facies Weald, y por encima toda una serie de rocas carbonáticas. En el fondo de los valles aparece otro conjunto de rocas carbonáticas del Jurásico (Lendínez et al., 1981; Olmo y Álvaro, 1989).

La estructura de estos cuerpos rocosos tabulares forma un sistema de grandes pliegues de radio

amplio (anticlinales y sinclinales), que luego fueron arrasados por extensas superficies de erosión (González Amuchastegui, 1993). El resultado es un conjunto de formas del terreno dominado por mesetas, mesas, muelas, cuevas, *hog-backs* y crestas. A partir de esas superficies de erosión culminantes o parameras, el río Tajo y sus afluentes han labrado, durante el Cuaternario, todo un sistema de gargantas, hoces y cañones, con laderas de pendiente elevada. Tal es el desarrollo de esos encajamientos fluviales en las parameras que el río Tajo forma en este entorno 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 Peñalén – 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 son luvisoles crómicos, cambisoles cálcicos, leptosoles mólicos y leptosoles rendzicos. Y en las laderas son abundantes los recubrimientos coluvionares sobre los que se desarrollan cambisoles cálcicos. La vegetación de este mismo entorno está constituida por extensos pinares de pino laricio y silvestre, mezclados con abundantes masas de quejigos.

2.2. Condicionantes geomorfológicos del impacto hidrológico

Las minas Santa Engracia y Santa Engracia 2 se sitúan en el interior de la cuenca hidrográfica del arroyo Merdero, en la zona superior de las laderas que se han formado como consecuencia de los procesos de encajamiento fluvial descritos en el apartado anterior, en el límite mismo de las parameras. La escombrera Hoya Grande se sitúa sobre la propia paramera, muy cerca de su borde. En esas tres localizaciones existe un importante condicionante geomorfológico que incrementa el potencial del impacto hidrológico. Ello es debido a que la altitud media de las parameras de Peñalén es superior a los 1400 metros, y el cauce del Río Tajo, muy próximo, discurre aquí a una altitud próxima a los 1000 metros. Si consideramos que la distancia en línea recta entre la escombrera de Hoya Grande y el río Tajo es de 2 kilómetros, y de 3 kilómetros en el caso de la mina Santa Engracia, ello se traduce en

unas laderas de pendientes medias muy elevadas (superiores a 20°, con valores que se aproximan a los 30° en su culminación) y de gran longitud (laderas con desarrollos longitudinales próximos y superiores a los 300 metros). En definitiva, la presencia de un nivel de base de la red fluvial muy próximo a las parameras, con un desnivel superior a 400 metros, imprime un perfil longitudinal de gran pendiente a todos los afluentes más próximos, y una vulnerabilidad muy alta a la erosión hídrica de las laderas (Fig. 3 y 4).

3. Metodología

Con el fin de llevar a cabo una primera identificación, caracterización y cuantificación de las distintas fuentes de sedimentos que llegan a la red

fluvial del río Tajo procedentes de zonas mineras del entorno de Peñalén, se han desarrollado tres procedimientos: estimación de tasas de erosión de la cuenca hidrográfica del arroyo Peñalén a partir de la RUSLE 1.06, estimación de la emisión de sedimentos desde la cuenca del arroyo Peñalén a partir del relleno de diques de corrección hidrológica, y estimación de la severidad de los procesos erosivos sobre las zonas mineras del entorno de Peñalén a partir de fuentes documentales y de evidencias geomorfológicas de campo.

3.1. Estimación de tasas de erosión a partir de la RUSLE 1.06

La RUSLE es una versión revisada de la Ecuación Universal de Pérdidas de Suelo

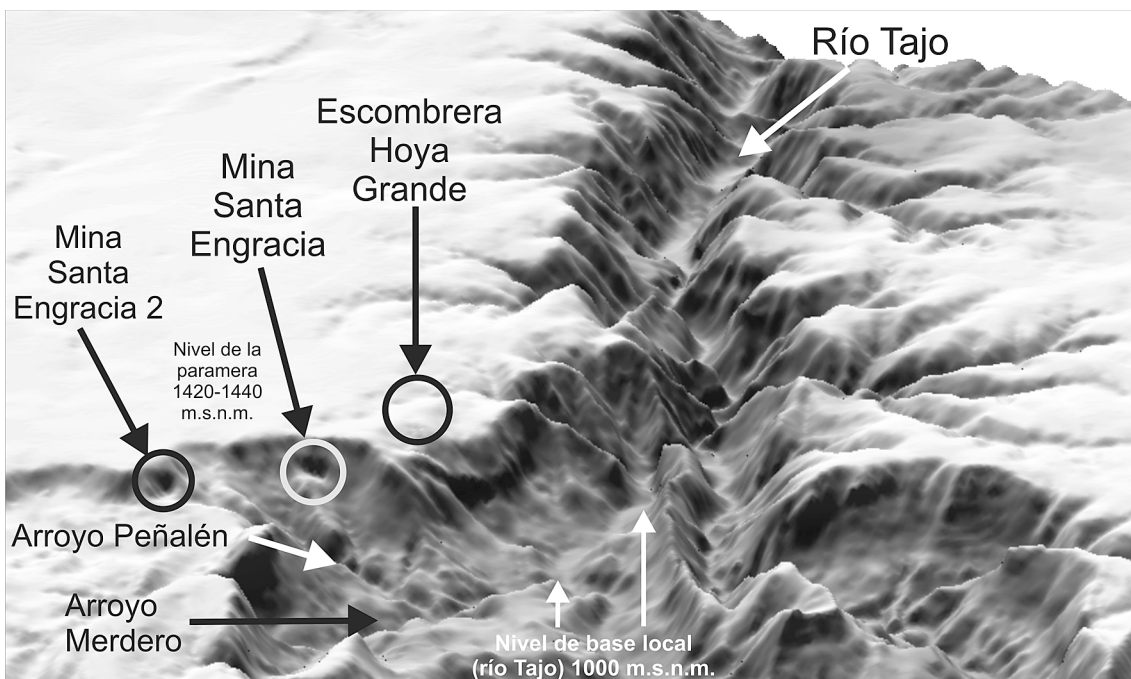


Figura 3. Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del entorno del cañón del Alto Tajo dentro del Parque Natural. Las zonas mineras de Peñalén (Santa Engracia, Santa Engracia 2 y Hoya Grande) se sitúan en posiciones de gran energía del relieve. La imagen muestra el alto grado de incisión fluvial del borde de las parameras hacia el cañón principal del río Tajo, incluida la cuenca formada por los arroyos Peñalén y Merdero.

Figure 3. Digital Elevation Model (DEM) of the Upper Tagus surroundings within the Natural Park. The mining areas of Peñalén (Santa Engracia, Santa Engracia 2 and Hoya Grande) are located in topographical positions of high relief energy. The image shows the high degree of fluvial incision at the edge of the plateaux towards the main Tagus river canyon, including the catchments of the Peñalén and Merdero streams.

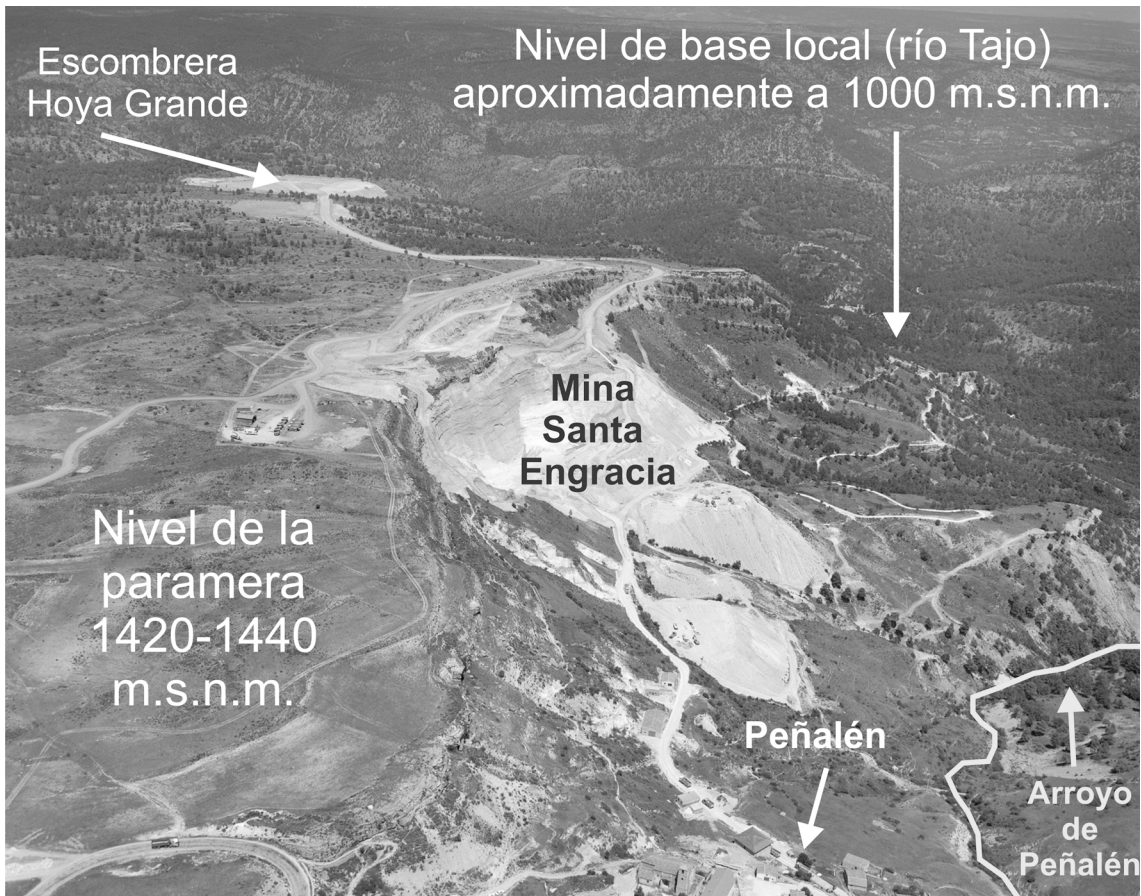


Figura 4. Fotografía aérea oblicua (13 de julio de 1989, Paisajes Españoles S.A.) que muestra la ubicación de la mina Santa Engracia y de la escombrera Hoya Grande en posiciones de vulnerabilidad muy alta a la erosión hídrica.
Figure 4. Oblique aerial photograph (of July 13th, 1989, Paisajes Españoles S.A.), showing the location of the Santa Engracia mine and of the Hoya Grande spoil heap in topographical positions of high vulnerability to the hydric erosion.

(*Universal Soil Loss Equation*, USLE). La versión 1.06 de la RUSLE se desarrolló a partir de datos empíricos registrados en zonas mineras, construidas y restauradas, por lo que resulta una herramienta útil en la predicción de la erosión en estos ambientes (Toy y Foster, 1998). Su uso en este contexto tiene por objetivo proporcionar, de una manera indirecta, una estimación de las áreas del entorno de Peñalén que en mayor medida emiten sedimentos hacia la red fluvial del río Tajo. La estimación se ha realizado a nivel de la cuenca hidrográfica del arroyo Peñalén, lo que ha permitido comparar las tasas de erosión de zonas mineras con otras naturales (como cárcavas).

El primer paso para su aplicación ha sido la cartografía de una serie de unidades homogéneas (ecohidrológicas) respecto a su sustrato, pendiente, suelo y cubierta vegetal, a las que se les supone una respuesta hidrológica y erosiva similar (Fig. 5).

Para calcular el factor R se han tomado los datos publicados en Forteza (1981) e ICONA (1988), y datos directos de las estaciones meteorológicas de la comarca, suministrados por la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Para el cálculo del factor K se analizaron un mínimo de 3 muestras compuestas de las distintas unidades identificadas, obteniéndose en laboratorio los datos de textura y materia orgánica requeridos por el pro-

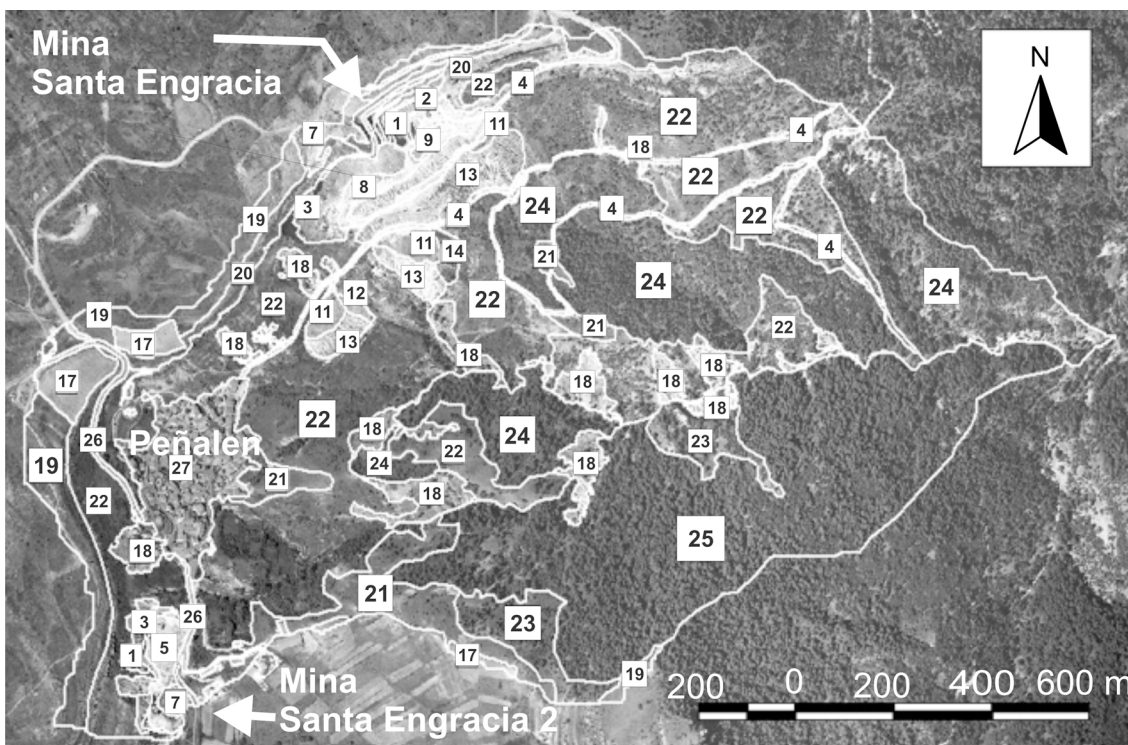


Figura 5. Unidades homogéneas (ecohidrológicas) de la cuenca del arroyo Peñalén utilizadas para el cálculo de de tasas de erosión a partir de la RUSLE 1.06. Véase Tabla 1 para su denominación.

Figure 5. Homogeneous (ecohydrological) units of the Peñalén stream catchment which have been used for the calculation of erosion rates by the RUSLE 1.06. See Table 1 for the name of the units.

grama. El resto de parámetros del factor K y de los factores C y P se obtuvieron a partir de descripciones de campo. Los factores LS se obtuvieron a partir de un análisis con el *software* ArcGIS del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA, de octubre de 2006, tamaño de píxel de 0,5 m).

3.2. Estimación de la emisión de sedimentos a partir del relleno de diques de corrección hidrológica

Los diques de corrección hidrológica se han utilizado para estimar tasas de sedimentación; todo ello a partir de los cálculos volumétricos de las cuñas de sedimentos que quedan retenidas por dichas estructuras. Este método ha sido aplicado, por ejemplo, en el río Quípar, Murcia (Romero Díaz, 2007; Romero Díaz et al., 2007). Los diques

de corrección hidrológica han sido estudiados también en España para determinar sus efectos en la morfología fluvial de cuencas semiáridas (Boix-Fayos et al., 2007; Castillo et al., 2007).

La existencia de un dique de corrección hidrológica, situado en la desembocadura del arroyo Peñalén, ha constituido una excelente circunstancia para llevar a cabo una estimación directa de los sedimentos emitidos desde esa cuenca hidrográfica hacia el arroyo Merdero, afluente a su vez del río Tajo.

En 1984, como consecuencia de la gravedad de los procesos erosivos en la cuenca del arroyo Peñalén, el entonces ICONA construyó un dique de gavión de cuatro metros de altura sobre el cauce del arroyo de Peñalén, justo antes de su desembocadura al arroyo Merdero (R. Serrada, Com. Pers.) (dique 2, Fig. 6). Según Honorio Vicente (Com. Pers.), este dique se relleno de sedimentos en un

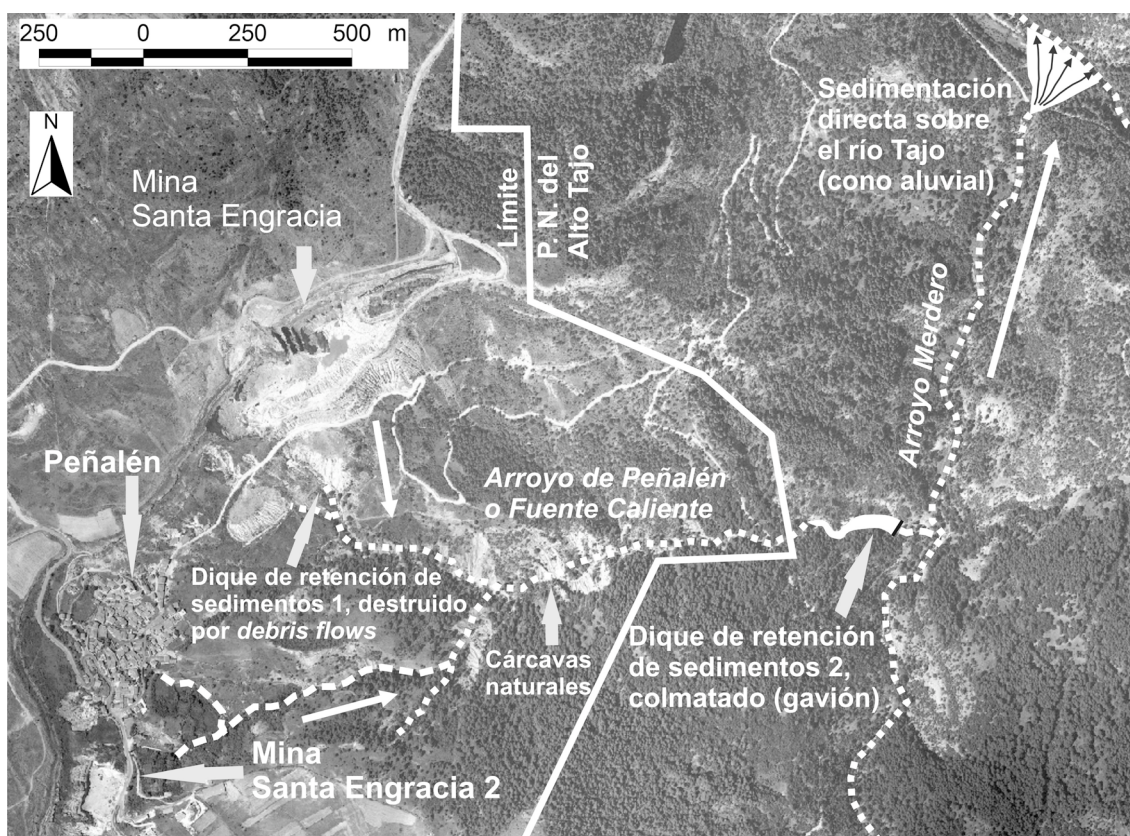


Figura 6. Detalle de la ortofoto representada en la figura 1, mostrando la ubicación de los dos diques de retención de sedimentos de la cuenca del arroyo Peñalén. El segundo de ellos, en la desembocadura del arroyo Peñalén al Merdero, ha sido utilizado para estimar la emisión de sedimentos desde la cuenca del arroyo Peñalén.

Figure 6. Detail of the orthophoto of figure 1, showing the location of two existing check dams at the Peñalén stream catchment. Check dam number 2, at the mouth of the Peñalén stream into the Merdero stream, has been used for the assessment of the sediment yield from the Peñalén stream catchment.

solo año, los cuales procedieron tanto de las canteras Santa Engracia como Santa Engracia 2 (Fig. 6). En 1988, y coincidiendo con una reactivación de trabajos en la mina Santa Engracia, el dique de gaviones citado, que ya estaba completamente relleno de sedimentos desde 1985, fue recrecido cuatro metros más, quedando una cerrada de presa de ocho metros de altura y 30 metros de coronación. En esta ocasión el dique se relleno en dos años, formando un vaso de 150 m de longitud. A partir de esos datos se ha llevado a cabo una estimación del volumen de sedimentos que rellenan el dique, mediante la cubicación de la figura geomé-

trica que se asemeja a la cuña $\frac{3}{4}$ una pirámide de base trapezoidal $\frac{1}{4}$; el método seguido para la cubicación del dique ha sido el utilizado por Romero Díaz (2007):

$$V = 1/3 \times B \times H$$

V volumen de sedimentos (m³);
 B, área de la base, superficie del dique;
 H, longitud de la cuña de sedimentos.

3.3. Estimación de la severidad de los procesos erosivos a partir de fuentes documentales y evidencias geomorfológicas de campo

Finalmente, el estudio de formas activas de erosión y sedimentación en el entorno de Peñalén ha tenido como objetivo contrastar qué unidades ecohidrológicas, de las evaluadas mediante el método RUSLE 1.06, han sufrido en realidad un mayor proceso erosivo.

Al objeto de seguir la evolución geomorfológica de las tres localizaciones mineras descritas (Santa Engracia, Santa Engracia 2 y Hoya Grande), se ha investigado sobre las distintas fases ocurridas en las mismas (explotación, paralización de labores...), y se han utilizado fuentes documentales que caractericen dichas fases. En concreto, se han utilizado tres series de fotografías aéreas oblicuas: una realizada al inicio de las explotaciones (1 de noviembre de 1980) y otra al final de las mismas (13 de julio de 1989), ambas de Paisajes Españoles S.A.; y una tercera llevada a cabo una vez ejecutadas una serie de medidas correctoras (año 1990, realizada por la empresa MAC fotográfica). Con el fin de conocer la evolución geomorfológica seguida por esos tres escenarios desde 1990 hasta la fecha, durante 2007 y 2008 se han realizado distintas campañas de campo en las cuales se han caracterizado las formas que denotan procesos geomorfológicos activos (erosión hídrica y actividad gravitacional) que han afectado a las distintas unidades de las tres superficies mineras. Este análisis morfológico también se extendió a las cárcavas.

4. Resultados

4.1. Estimación de tasas de erosión a partir de RUSLE 1.06

La Tabla I muestra los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la RUSLE 1.06. Las unidades que muestran mayores valores medios de erosión hídrica son las siguientes: (1a y 1b) taludes de desmonte en frente de explotación, (3a y 3b) taludes de derrubios en frente de explotación, (12) taludes de estériles sin regueros, (13a) taludes de estériles con regueros (escombreras exteriores) y (18) cárcavas (Fig. 7). A partir de los valores de la Tabla 1, el valor de erosión total para el conjunto de la cuenca vertiente al arroyo Peñalén, obtenido a partir de la RUSLE 1.06, es de 2763,05 Mg año⁻¹.

4.2. Estimación de la emisión de sedimentos a partir del relleno de diques de corrección hidrológica

La cubicación de la figura geométrica que forma la cuña de sedimentos tras el dique de corrección hidrológica, una pirámide de base trapezoidal, ofrece un volumen total de 6.000 m³, que con una densidad media de 1,6 gr/cm³ (arenas) supone un total de 9.600 toneladas. Dado que se conoce que esas toneladas retenidas fueron sedimentadas en tan sólo tres años (ver epígrafe 3.2), a partir de esos datos puede estimarse una tasa de producción de sedimentos (*sediment yield*) para toda la cuenca de 3200 Mg año⁻¹. La evaluación es muy aproximada, pero en ausencia de datos más concluyentes permite realizar una primera cuantificación del problema de emisión de sedimentos desde la cuenca del arroyo Peñalén.

La guardería forestal del momento atribuyó la emisión de esos sedimentos, sobre todo, a la mina Santa Engracia 2.

4.3. Estimación de la severidad de los procesos erosivos a partir de fuentes documentales y evidencias geomorfológicas de campo

La actividad minera en el municipio de Peñalén comenzó en 1979 y se mantuvo activa durante poco más de una década, hasta 1990, año en el que se produce una suspensión de las labores mineras; ese mismo año, la administración impuso a la empresa propietaria una serie de medidas correctoras. Las medidas correctoras se ejecutaron ese mismo año, 1990, pero no se mantuvieron con posterioridad.

La figura 8 muestra una serie de tres fotografías aéreas oblicuas de distintas fechas para Santa Engracia. En la primera imagen, del 1 de noviembre de 1980, la explotación se encuentra en su fase inicial de explotación. En dicha imagen se observa bien el inicio de construcción de una escombrera exterior por vertido directo en la ladera inmediatamente inferior al hueco minero (*outslope*), en una posición muy vulnerable a la erosión hídrica. La imagen del 13 de julio de 1989 muestra la fase final de la actividad minera en la mina Santa Engracia, y la ausencia aún de medidas de restauración, con amplias superficies expuestas directamente a la

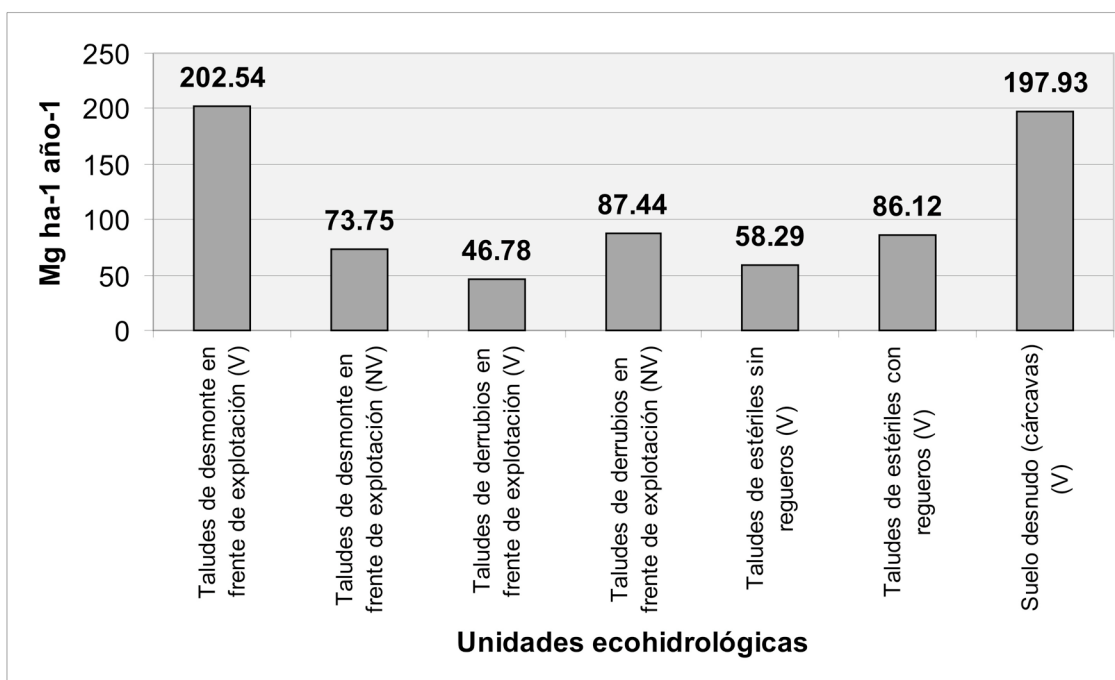


Figura 7. Unidades ecohidrológicas de la cuenca hidrográfica del arroyo Peñalén que ofrecen valores de erosión mayores, a partir del método RUSLE 1.06. (V) unidades vertientes a la cuenca hidrográfica del arroyo Peñalén; (NV) unidades no vertientes a la cuenca hidrográfica del arroyo Peñalén (vertientes al hueco minero de Santa Engracia).

Figure 7. Ecohydrological units of the Peñalén stream watershed with higher erosion rates obtained from the RUSLE 1.06 method. (V) units delivering sediments to the Peñalén stream watershed; (NV) units which do not deliver sediments to the Peñalén stream watershed (but to the mined pit of Santa Engracia).

acción erosiva. La imagen de 1990 muestra la adopción de medidas de restauración en las escombreras exteriores de Santa Engracia. Según se desprende del expediente minero, esas medidas correctoras se realizaron por requerimiento de la Administración, y fueron las siguientes: en mayo de 1990 se comenzó el banqueo de la escombrera exterior; sobre las bermas se extendió tierra vegetal y se realizó alguna plantación; y en marzo de 1991 se realizó una hidrosiembra de todos los taludes. Al pie de una de las escombreras se realizaron drenajes longitudinales, en los cuales se introdujeron tubos perforados, que luego fueron cubiertos con escombros y geotextiles.

Las campañas de campo llevadas a cabo entre los años 2007 y 2008 muestran cómo, de las unidades que ofrecen mayores tasas de erosión mediante métodos indirectos, la unidad 13a (taludes de estériles con regueros, pertenecientes a las escombreras

exteriores de Santa Engracia) presenta un grado de erosión hídrica severo; de hecho, ha evolucionado desde una topografía con forma de terrazas hasta otra de cárcavas (*gullies*), de más de un metro y medio de profundidad, de manera que su fisonomía inicial es irreconocible (Fig. 9). En cambio, los antiguos frentes de explotación y las cárcavas no ofrecen formas tan activas de erosión hídrica. Esas mismas campañas de campo han revelado también cómo los procesos de erosión y degradación en uno de los drenajes longitudinales han sido muy intensos; tanto que ha sido posible reconocer, incluso, depósitos de *debris flow* que han reventando uno de los diques de gaviones construidos en 1988 (Fig. 9).

Respecto a la escombrera Hoya Grande (Fig. 10), ésta muestra también un nivel de degradación por erosión hídrica severo: las terrazas originales de la escombrera están totalmente 'acarcavadas', asemejando un paisaje de *badlands*, las zanjas peri-

Tabla 1. Tasas de erosión para cada una de las unidades ecohidrológicas de la cuenca hidrográfica del arroyo Peñalén, a partir de la aplicación del método RUSLE 1.06. V, unidades vertientes a la cuenca natural; NV, unidades no vertientes a la cuenca natural.

Table 1. Erosion rates for each of the ecohydrological units of the hydrographic catchment of the Peñalén stream, from the application of the RUSLE 1.06 method. V, units conveying runoff and sediments to the natural watershed; NV, units not conveying runoff and sediments to the natural watershed. Tabla 1. Tasas de erosión para cada una de las unidades ecohidrológicas de la cuenca hidrográfica del arroyo Peñalén, a partir de la aplicación del método RUSLE 1.06. V, unidades vertientes a la cuenca natural; NV, unidades no vertientes a la cuenca natural.

Table 1. Erosion rates for each of the ecohydrological units of the hydrographic catchment of the Peñalén stream, from the application of the RUSLE 1.06 method. V, units conveying runoff and sediments to the natural watershed; NV, units not conveying runoff and sediments to the natural watershed.

	Nº	UNIDAD ECOHIDROLÓGICA	TASA EROSIÓN Mg ha ⁻¹ año ⁻¹
Zona de explotación y vías de acceso	1a	Taludes de desmonte en frente de explotación (V)	202,54
	1b	Taludes de desmonte en frente de explotación (NV)	73,75
	2	Bermas de desmonte en frente de explotación (NV)	31,76
	3a	Taludes de derrubios en frente de explotación (V)	46,68
	3b	Taludes de derrubios en frente de explotación (NV)	87,44
	4	Pistas y caminos	—
	5	Plaza de explotación (V)	26,90
	6	Superficies de trabajo	—
	7a	Superficies modificadas (V)	2,47
	7b	Superficies modificadas(NV)	3,59
Escombrera	8	Zonas de sedimentación (NV)	0,28
	9	Lámina de agua	—
	10	Balsas de sedimentación	—
	11	Plataformas de estériles (V)	3,82
	12	Taludes de estériles sin regueros (V)	58,29
	13a	Taludes de estériles con regueros (V)	86,12
	13b	Taludes de estériles con regueros (NV)	35,21
	14	Taludes con tierra vegetal sin regueros (V)	7,40
	15	Bermas de estériles (V)	—
16	Bermas con tierra vegetal (V)	—	
Cuenca natural	17	Campos de cultivo sobre rocas carbonáticas (V)	1,44
	18	Suelo desnudo (cárcavas) (V)	197,93
	19a	Pastizal + matorral sobre rocas carbonáticas (V)	5,46
	19b	Pastizal + matorral sobre rocas carbonáticas (NV)	2,24
	20	Pastizal + matorral sobre rocas carbonáticas (V)	17,57
	21	Pastizal sobre arenas arcillas y margas (V)	12,60
	22	Matorral sobre coluvión carbonático (V)	3,85
	23	Matorral sobre arenas, margas y arcillas (V)	4,71
	24	Arbolado sobre coluvión carbonático (V)	0,59
25	Arbolado sobre arenas, margas y arcillas (V)	1,39	

metrales se encuentran totalmente colmatadas de sedimentos, y un número importante de ejemplares arbóreos han sido enterrados por la sedimentación procedente de la escombrera (Fig. 10).

Las evidencias de campo muestran como los materiales expuestos en las superficies mineras del municipio de Peñalén apenas presentan cubierta vegetal, y los signos de erosión y de inestabilidad de los sustratos arenosos son evidentes. En efecto, estas arenas son removilizadas prácticamente después de cada episodio de lluvias de cierta cantidad

e intensidad, lo que impide el establecimiento de una cubierta vegetal sobre las mismas y constituye una fuente permanente de sedimentos hacia la red fluvial que es afluente del río Tajo. En definitiva, la movilidad del sustrato, debida a una intensa actividad geomorfológica, podría ser la principal causa que imposibilitaría la colonización vegetal espontánea de estos espacios. Debe influir, además, otro tipo de condicionantes existentes en zonas similares, como la ausencia casi total de nutrientes en estos sustratos arenosos y su naturaleza ligeramen-

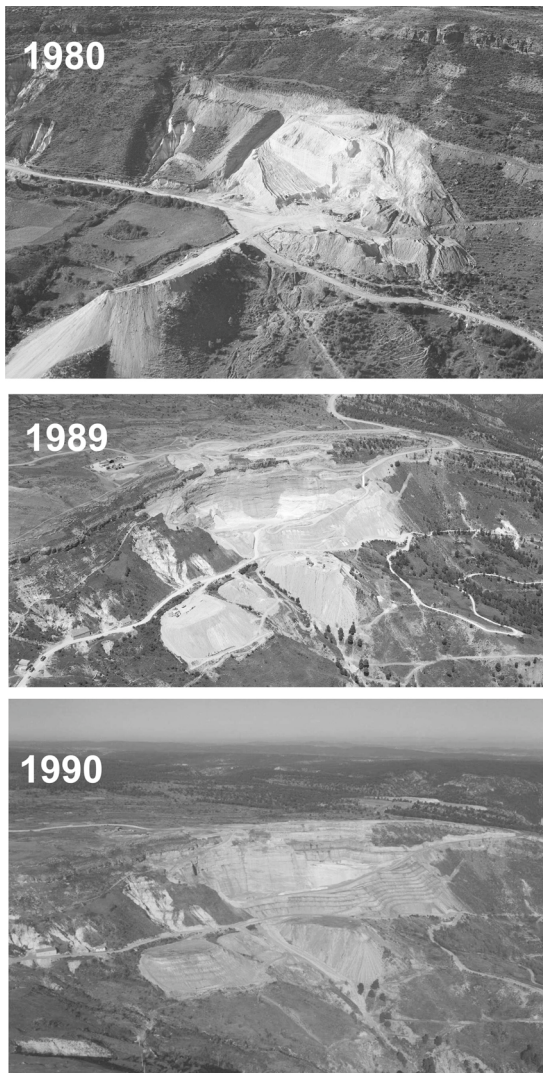


Figura 8. Evolución de la mina Santa Engracia entre 1980 y 1990 (véase el texto para su explicación).

Figure 8. Appearance of the Santa Engracia mine between 1980 and 1990 (see text for explanation).

te ácida, diferente a la de los suelos originales (Martín Duque et al., 1998).

5. Discusión

Las tasas de erosión obtenidas a partir de la aplicación del método RUSLE 1.06 muestran cómo aquellas unidades con mayores tasas de erosión

hídrica ofrecen cifras altas, pero similares a las registradas para otros ambientes mineros (Nicolau, 1996).

El método de estimación de emisión de sedimentos a partir del relleno de diques de corrección hidrológica presenta una cierta incertidumbre. Al estar colmatado, ha sido preciso reconstruir la historia de su relleno a partir de la descripción realizada por la guardería forestal del lugar. En todo caso, a pesar de su imprecisión, ofrece una primera estimación a partir de datos directos (sedimentos acumulados en la cuña sedimentaria del vaso del dique), que puede servir para establecer el orden de magnitud de la emisión de sedimentos desde la cuenca del arroyo Peñalén hacia el arroyo Merdero, que a su vez los evacua directamente hasta el río Tajo. Este valor estimado, 3200 Mg año^{-1} sería equivalente a un vertido anual de 118 bañeras (camiones de transporte) como las que operan en las minas activas del entorno.

El análisis de campo de formas erosivas ofrece información clarificadora. Por ejemplo, las evidencias de campo muestran un desajuste con los valores obtenidos a partir de la RUSLE 1.06. Así los signos de erosión activa, acarcavamiento general, que muestran las escombreras exteriores de Santa Engracia (unidad 13a) es muy superior al de otras unidades que ofrecen valores más altos a partir de la aplicación del mismo método, como las unidades de taludes de desmonte (1) y de derrubios (3) en los frentes de explotación, o las cárcavas (18). De hecho, el trabajo de campo muestra cómo el antiguo frente de explotación ha evolucionado casi exclusivamente a partir de movimientos gravitacionales, y no muestra signos de estar sujeto a una erosión hídrica intensa. Por ello pensamos que la aplicación realizada del método RUSLE 1.06 sobreestima mucho los valores de erosión en unidades de sustrato original arenoso y pendiente alta frente a otras unidades de sustratos sin cohesión (escombreras). Este análisis de formas erosivas precisa de su cuantificación, por ejemplo mediante la cubicación del volumen que le falta a las escombreras exteriores de Santa Engracia, cuyo trabajo está en proceso.

Este hecho puede deberse tanto a la falta de calibración del modelo para esta localización, como a que este método no evalúa la erosión en *gullies*, que es el tipo de erosión dominante en las escombreras. Esa subestimación también es evidente si realizamos una comparación con los valo-

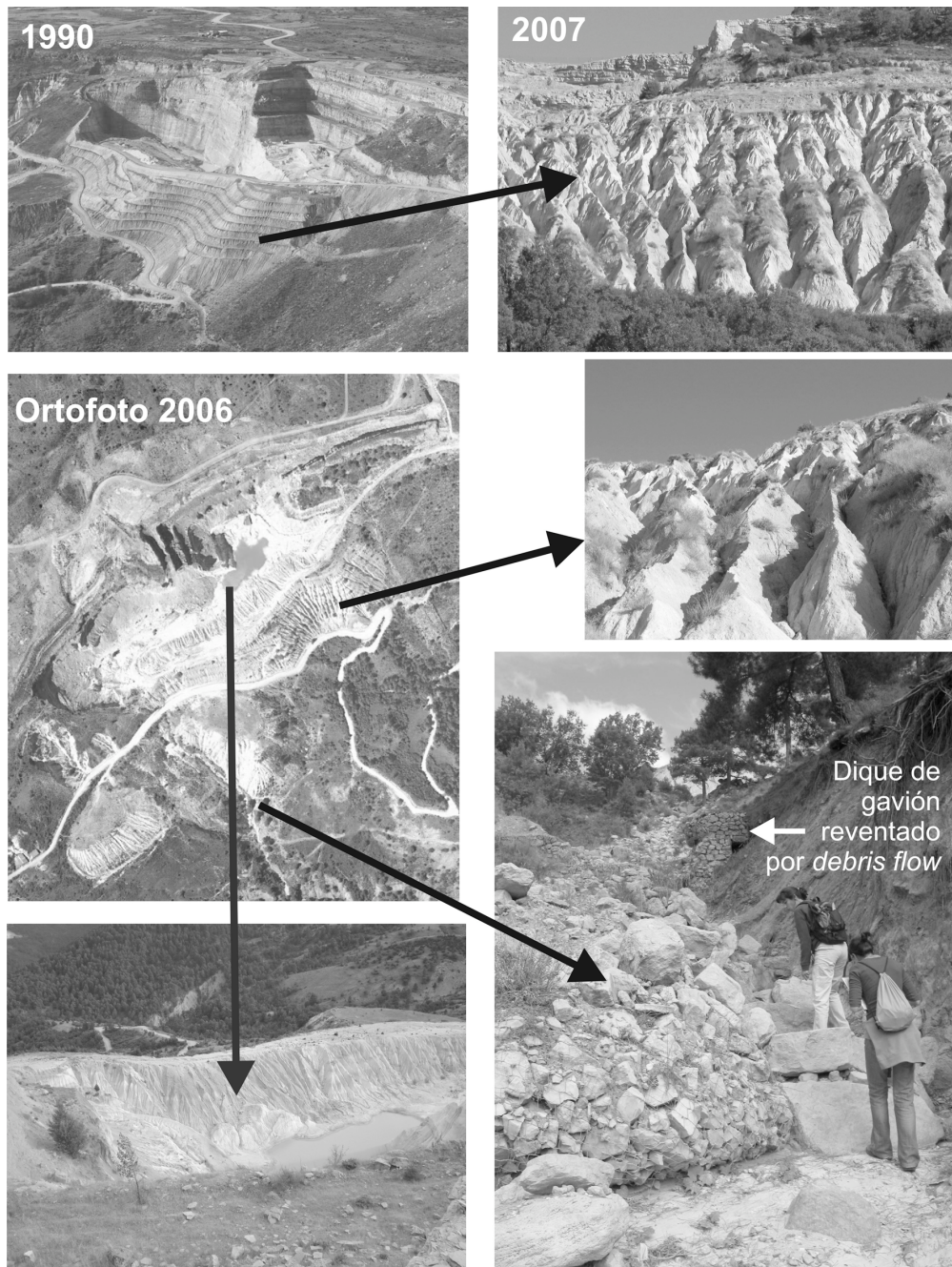


Figura 9. Desde el momento de suspensión de las actividades mineras en Santa Engracia (en 1990) y hasta la actualidad, las escombreras exteriores de la mina han sufrido un proceso de degradación severo por erosión hídrica y movimientos gravitacionales. De una morfología en terrazas se ha pasado a otra totalmente acarcavada. La gravedad de los procesos erosivos ha llegado a provocar la rotura de un pequeño dique de corrección hidrológica por corrientes de derrubios (*debris flow*). Todo ello, a pesar de la existencia de drenajes y geotextiles protectores.

Figure 9. Since the suspension of the mining works at Santa Engracia (in 1990) up to the present time, its outslope spoil heaps have been severely eroded by hydric erosion and mass movements. They have been transformed from a benched topography into a gullied one. The severity of those erosive processes is exemplified by the break of a small check dam as a consequence of a debris flow event. All that despite of the existence of drainage pipes and protecting blankets.

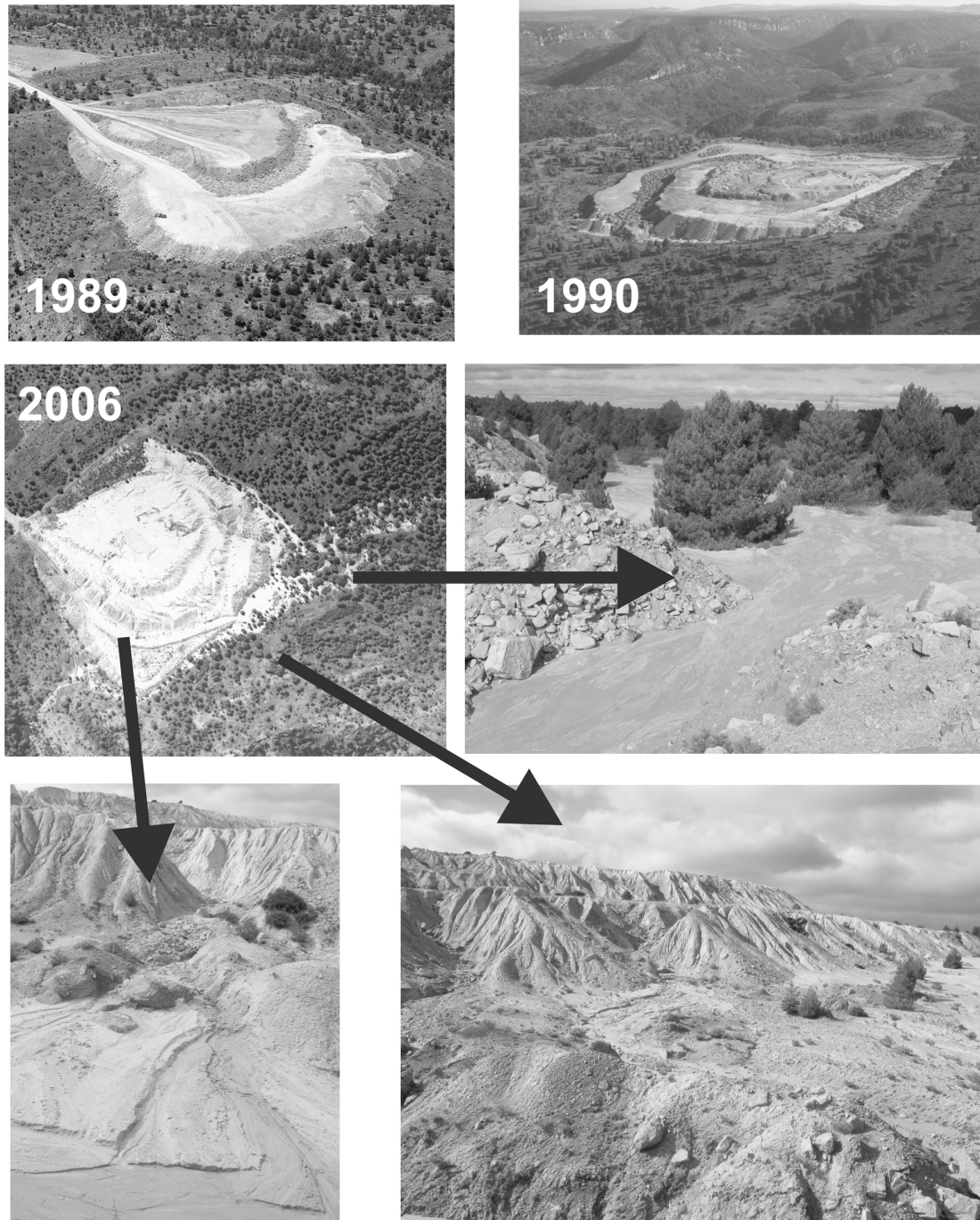


Figura 10. La escombrera de Hoya Grande ha sufrido un proceso de degradación por erosión hídrica similar al de las escombreras exteriores de Santa Engracia. De una morfología en plataformas y taludes se ha pasado a otra de auténticos *badlands* a una escala reducida. Los sedimentos emitidos desde la escombrera han enterrado un número importante de árboles dentro del Parque Natural. *Figure 10. The Hoya Grande spoil heap has suffered a severe degradation process as a consequence of hydric erosion processes similar to those acting on the Santa Engracia outslope spoil heaps. From a platform-slope topography, it has been transformed into another one of truly badlands at a reduced scale. The sediments yielded from the spoil heap have buried an important number of trees within the Natural Park area.*

res obtenidos a partir de la sedimentación en el dique de corrección hidrológica 2 (Fig. 6), 3200 Mg año⁻¹, frente a 2763,05 Mg año⁻¹ de erosión para la cuenca vertiente al arroyo Peñalén obtenidas a partir de la RUSLE 1.06. Para la estimación a partir del dique cabe añadir, además, que las tasas de erosión en las áreas fuente deberían ser aún mayores, dado que el valor obtenido corresponde a la producción de sedimentos (*yield*) de la cuenca, mientras que el método RUSLE 1.06 evalúa únicamente el material erosionado *in situ*, buena parte del cual queda sedimentado en las propias laderas interiores de la cuenca.

En definitiva, el análisis de formas erosivas en campo apunta a que la principal fuente de emisión de sedimentos de toda esta cuenca del arroyo Peñalén son las escombreras exteriores de la mina Santa Engracia (ver Fig. 9).

6. Conclusiones

La problemática descrita y el marco de investigaciones iniciado muestran un ejemplo muy singular, en el que los estudios geomorfológicos están siendo determinantes para evaluar un impacto ambiental severo sobre un espacio natural. El valor de la aproximación geomorfológica se basa en ofrecer un marco espacial y temporal más amplio que el de enfoques basados exclusivamente en métodos empíricos de erosión del suelo.

Sobre la base del estudio del contexto geomorfológico es posible afirmar que la severidad de los procesos erosivos sobre las minas y escombreras del entorno de Peñalén se debe, en gran medida, a su localización en zonas de una gran energía del relieve $\frac{3}{4}$ zonas culminantes de laderas que en conjunto salvan desniveles superiores a 400 metros entre las parameras y el nivel de base del río Tajo $\frac{3}{4}$.

A falta de mejorar y calibrar las estimaciones sobre tasas de erosión de las distintas unidades, puede concluirse que las minas y escombreras de Peñalén constituyen una fuente muy importante de sedimentos que llegan directamente al río Tajo, dado que: (a) muestran signos evidentes de estar sujetas a una erosión hídrica intensa y muy activa (procesos de acarcavamiento de las escombreras de Santa Engracia y Hoya Grande); (b) existe una conexión hidrológica directa entre estas zonas y el curso principal del río Tajo, dentro del Parque

Natural, ya que no existen barreras para la retención efectiva de estos sedimentos.

7. Enfoque para una posible solución del problema

Las actuaciones más adecuadas para corregir los efectos ambientales que provocan las minas y escombreras de Peñalén en su entorno pasarían por adoptar una aproximación igualmente 'geomorfológica' en su restauración. Los métodos convencionales para la rehabilitación de explotaciones mineras (construcción de terrazas y de laderas de pendiente uniforme, inclusión de elementos artificiales para dirigir y disminuir la velocidad de la escorrentía...) se alejan considerablemente de las formas naturales del entorno en el que se suele insertar la actividad minera. Todo ello tanto en apariencia como en funcionalidad. De hecho, una buena parte de estas morfologías geométricas y artificiales son inestables sin un mantenimiento constante, y acaban fallando a largo plazo, precisamente debido a procesos de erosión hídrica. La erosión severa de la escombrera exterior de la mina Santa Engracia, remodelada en forma de terrazas, así como de sus drenajes longitudinales y de las zonas recubiertas con geotextiles, proporcionan un ejemplo muy claro.

Frente a estos métodos tradicionales, las aproximaciones geomorfológicas reproducen la evolución natural de las formas del terreno a un estado 'maduro', en el que las nuevas laderas y canales son estables, dado que se encuentran en equilibrio con las condiciones ambientales locales (Bugosh, 2004, 2006; Martín Duque et al., 2009). Con ello se consigue el múltiple objetivo de reconstruir espacios hidrológica y geomorfológicamente más estables, más atractivos visualmente y más diversos desde un punto de vista ecológico (Riley, 1995; Hancock et al., 2003). En un entorno y en un ejemplo como los aquí referidos, este enfoque geomorfológico sería aún más determinante que en otros casos, puesto que el principal objetivo a alcanzar en estas zonas mineras degradadas sería garantizar su estabilidad hidrogeomorfológica a largo plazo.

El estudio de la evolución geomorfológica de zonas mineras y la adopción de enfoques geomorfológicos en la restauración de terrenos afectados por minería de superficie están siendo desarrolla-

dos en España desde la década de 1990 (Nicolau, 1992, 1996, 2002, 2003a, 2003b; Martín-Duque et al., 1998; 2009; Martín Duque y Sanz Santos, 2000).

8. Agradecimientos

La creación de un grupo de trabajo UCM-UAH para la evaluación y corrección del impacto hidrogeomorfológico en el Alto Tajo fue promovida por la Dirección del Parque Natural del Alto Tajo, concretamente en la figura de su exdirector, Rafael Ruiz López de la Cova. Agradecemos la colaboración prestada desde el inicio de la colaboración por todo el personal del Parque, encabezados por su actual director y directora adjunta, Ángel Vela Laina y Raquel Ibáñez Martínez, y muy especialmente al conjunto de agentes medioambientales de la comarca. Los trabajos descritos han formado parte de dos proyectos de investigación del Plan Nacional (CGL2004-02179 y CGL2006-07207). Queremos agradecer a Asunción Serrano Medrano y a Ignacio Zapico Alonso su colaboración en la elaboración de estudios e informes parciales, así como el apoyo en muy distintas labores técnicas y logísticas de Paula Callejo Correa. Asunción Romero Díaz y un revisor anónimo proporcionaron sugerencias y comentarios muy útiles en la revisión del manuscrito original.

Referencias bibliográficas

- Boix-Fayos, C., Barberá, G.G., López-Bermúdez, F. & Castillo, V.M. (2007). Effects of check dams, reforestation and land-use changes on river channel morphology: case study of the Rogativa catchment (Murcia, Spain). *Geomorphology*, 91, 103-123.
- Bugosh, N. (2004). Computerizing the fluvial geomorphic approach to land reclamation. En: *2004 National Meeting of the American Society of Mining and Reclamation and The 25th West Virginia Surface Mine Drainage Task Force, April 18-24, 2004* (R.I. Barnhisel, ed.). ASMR, Lexington, KY, 240-258.
- Bugosh, N. (2006). Regional variations in stable landforms. And how critical elements can be used to design reclamation landforms. En: *Billings Land Reclamation Symposium, June 4-8, 2006, Billings MT* (R.I. Barnhisel, ed.). ASMR, Lexington, KY, 156-158.
- Castillo, V.M., Mosch, W.M., Conesa García, C., Barberá, G.G., Navarro, J.A. & López-Bermúdez, F. (2007). Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion control in a semiarid Mediterranean catchment: El Cárcavo (Murcia, Spain). *Catena*, 70, 416-427.
- Carcavilla, L., Ruiz, R. & Rodríguez, E. (2008). *Guía geológica del Parque Natural del Alto Tajo*. Junta de Comunidades de Castilla – La Mancha, Guadalajara, 267 pp.
- Forteza, M. (1981). *Caracterización Agroclimática de la Provincia de Guadalajara*. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, Madrid, 128 pp.
- González Amuchastegui, M.J. (1993). *Geomorfología del Alto Tajo en el sector de Molina de Aragón*. Tesis Doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid (España), 732 pp.
- Hancock, G.R., Loch, R.J. & Willgoose, G.R. (2003). The design of post-mining landscapes using geomorphic principles. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28(10), 1097-1110.
- ICONA (1988). *Agresividad de la lluvia en España*. MAPA, Madrid, 39 pp.
- Lendínez, A., Tena Dávila, M., Bascones, L., Martín Herrero, D. & La Moneda, E. (1981). Mapa Geológico de España, Escala 1:50.000. 2ª Serie (MAGNA), Taravilla (514). IGME, Servicio de Publicaciones, Madrid.
- Martín-Duque, J.F., Pedraza, J., Díez, A., Sanz, M.A. & Carrasco, R.M. (1998). A geomorphological design for the rehabilitation of an abandoned sand quarry in central Spain. *Landscape and Urban Planning*, 42, 1-14.
- Martín Duque, J.F. & Sanz Santos, M.A. (2000). Criterios geomorfológicos y consideraciones de la dinámica natural en la restauración de espacios alterados. En: *Segundas Jornadas Científicas del Parque Natural de Peñalara y del Valle del Paular*. Consejería de Medio Ambiente, Comunidad de Madrid, Madrid, 103-114.
- Martín-Duque, J.F., Sanz, M.A., Bodoque, J.M., Lucía, A. & Martín-Moreno, C. (2009). Restoring earth surface processes through landform design. A 13-year monitoring of a geomorphic reclamation model for quarries on slopes. *Earth Surface Processes and Landforms* (aceptado).
- Nicolau, J.M. (1992). *Evolución geomorfológica de taludes de escombreras en ambientes mediterráneos continentales (Teruel)*. Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid, Madrid (España), 104 pp.
- Nicolau, J.M. (1996). Effects of topsoiling on rates of erosion and processes in coal mine spoil banks in Utrillas, Teruel. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 10, 73-78.
- Nicolau, J.M. (2002). Runoff generation and routing on artificial slopes in a Mediterranean – continental environment: the Teruel coalfield, Spain. *Hydrological Processes*, 16, 631-647.
- Nicolau, J.M. (2003a). Diseño y construcción del relieve en la restauración de ecosistemas degradados. Una perspectiva ecológica. En: *Restauración de Ecosistemas Mediterráneos* (J.M. Rey Benayas, T. Espigares & J.M. Nicolau, eds.), UAH, Madrid, 173-188.
- Nicolau, J.M. (2003b). Trends in relief design and construction in opencast mining reclamation. *Land Degradation and Development*, 14(2), 215-226.

- Olmo, P. & Álvaro, M. (1989). Mapa Geológico de España, Escala 1:50.000. 2ª Serie (MAGNA), Peralejos de las Truchas (539). IGME, Servicio de Publicaciones, Madrid.
- Riley, S.J. 1995. Geomorphic estimates of the stability of a uranium mill tailings containment cover, Nabarlek, NT, Australia. *Land Degradation and Rehabilitation*, 6, 1-16.
- Romero Díaz, A. (Coord.) (2007). *Los diques de corrección hidrológica. Cuenca del río Quípar (Sureste de España)*. Universidad de Murcia, Murcia, 270 pp.
- Romero Díaz, A., Alonso Sarriá, F. & Martínez Lloris, M. (2007). Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (SE Spain). A multi-method comparison. *Catena*, 71, 172-178.
- Toy, T.J. & 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.