

Paisajes 'naturales' que emergen a medida que la explotación minera avanza.

Restauración minera progresiva incorporando principios geomorfológicos

José F. Martín Duque, María Tejedor Palomino y Cristina Martín Moreno. *Universidad Complutense de Madrid.*

José M. Nicolau Ibarra. *Universidad de Zaragoza.*

José M. Gómez Díaz y Francisco González Martín-Consuegra. *CEMEX España, S.A.*

Oscar García Ferreres y Carles Roig Mateu. *Ofiteco, Tarragona*

La restauración o rehabilitación adecuada de los espacios transformados por la minería sigue siendo una asignatura pendiente. Con demasiada frecuencia aún, las restauraciones son deficientes y carecen de un enfoque hidrológico, ecológico, paisajístico y funcional adecuado. A su vez, es común que el proceso de restauración se 'traslade' al final de la fase de explotación, separando ambas actividades. La 'minería de transferencia', común en las grandes cortas de carbón, incorporó el concepto de 'restauración progresiva', de modo que a medida que avanza la explotación, se produce un retrolleado de los huecos, que se van restaurando de manera simultánea. Sin embargo, los diseños topográficos de restauración resultantes (laderas rectilíneas, de pendiente uniforme, o en modelo berma-talud, o plataforma-talud) están muy alejados de la configuración y funcionalidad que tienen los paisajes naturales.

Este artículo describe un proceso de restauración progresiva que incorpora, además, la restauración de geoformas y paisajes cuya configuración y dinámica replica a los naturales. Este procedimiento ha sido puesto en marcha en la arcillera Pastor II, explotada por CEMEX España Operaciones para la fabricación de cemento en su planta de Alcanar, en las inmediaciones del delta del Ebro (provincia de Tarragona). El hecho de que el conjunto de la explotación de la arcillera Pastor II se vaya a realizar adaptado a las geoformas 'naturales' de restauración, diseñadas con antelación, y que toda la planificación minera se adapte a la restauración de un paisaje funcionalmente natural, constituye un proceso pionero a nivel de toda Europa, desarrollado en el marco del proyecto LIFE ECORESTCLAY (LIFE12 BIO/ES/000926).

Un punto de partida susceptible de mejora

El mundo que conocemos depende, literal y totalmente, de la minería. Cualquier edificio de una ciudad desarrollada es un centro de minerales. Nuestras infraestructuras y vehículos, o la conducción eléctrica o de Internet, dependen absolutamente de la minería. Pero la explotación de esos minerales ocasiona un impacto elevado sobre los paisajes y ecosistemas (USDI, 1971 y Young, 1992). En particular, sobre procesos, organismos y funciones que son esenciales para el mantenimiento de

nuestra calidad de vida (Martín Moreno *et al.*, 2018). Por todo ello, compatibilizar la actividad minera con la provisión de los bienes y servicios que recibimos de los ecosistemas es, simple y sencillamente, imprescindible. Tal compatibilidad tiene muchas derivadas, siendo una de ellas la restauración ecológica de espacios transformados por actividades extractivas.

Restauración geomorfológica

Debido a los actuales avances en ciencia y tecnología, actualmente es posible diseñar y construir en el marco de

las restauraciones mineras, de manera rápida y con costes totalmente viables y asumibles, geoformas que replican el aspecto y funcionamiento de los ecosistemas y paisajes naturales y rurales. De este modo, zonas severamente degradadas pueden ser transformadas en otras que no son distinguibles de las de su entorno. Las bajantes de obra pueden ser reemplazadas por cursos fluviales meandriformes, contruidos con los propios estériles mineros, y las laderas de pendiente uniforme, o en terrazas, se transforman en vertientes convexo-cóncavas, en perfil, y festoneadas en planta (OSMRE, 2019). O bien, a partir de un antiguo frente de explotación minero, rectilíneo y vertical, se puede pasar a

replicar un acantilado natural complejo. Todo ello se conoce como restauración geomorfológica, que en realidad, es una parte de un enfoque más amplio de restauración ecológica.

La restauración geomorfológica en minería fue desarrollada en Estados Unidos, país en el que es más frecuente. En concreto, en 1999 se comenzó a utilizar el método GeoFluv en grandes minas de carbón del estado de Nuevo México (Bugosh, 2000, 2003). GeoFluv se basa en principios de establecidos en SMCRA (1977), Stiller *et al.* (1980), Toy y Hadley (1987) o Rosgen (1994, 1996). Bugosh y Epp (2019) describen el desarrollo, ejecución y seguimiento de uno de los casos más exitosos, en la mina La Plata. Tal fue el éxito de la restauración geomorfológica en el estado de Nuevo México, que este enfoque es ahora obligatorio allí para la minería del carbón (NMMM, 2010). Desde Nuevo México, el método se está extendiendo por todo el mundo desde el año 2000, periodo en el que también ha surgido literatura especializada sobre este enfoque (Toy y Black, 2000 y Toy y Chuse, 2005).

En Canadá, la restauración minera desde una aproximación geomorfológica comenzó en los años de 1990 (Sawatsky y Beckstead, 1996), donde ha sido aplicada, sobre todo, en las denominadas "Oil Sands" (Sawatsky y Beersing, 2014). En Australia existen precedentes muy destacados del enfoque geomorfológico en la restauración en minería (Hannan, 1984 y Environment Australia, 1999). Y durante la última década, estas técnicas se están extendiendo rápidamente (Waygood, 2014; Kelder *et al.*, 2016 y Lacy, 2019). En Europa, la restauración geomorfológica se ha desarrollado sobre todo en España, con investigaciones y aplicaciones que comenzaron a finales de la década de 1990 y principios del 2000 (Martín Duque *et al.*, 1998 y Nicolau, 2003), habiendo continuado de manera ininterrumpida (Martín Duque *et al.*, 2010; Zapico *et al.*, 2018 y Zapico *et al.*, 2020). Desde España, el enfoque se ha transferido a Suecia, donde se aplicará en las escombreras de la mina Kiruna, y a Portugal, donde se pretende su combinación con procedimientos de estabi-

lización química, en una antigua mina de pirita (Lousal). Los ejemplos españoles han contribuido a que la técnica de restauración geomorfológica haya sido reconocida, a nivel europeo, dentro del catálogo de 'Mejores Técnicas Disponibles para la Gestión de Residuos de las Industrias Extractivas' (JRC, 2018).

Existen otras metodologías de restauración geomorfológica que replican la configuración de escarpes y acantilados naturales en frentes de explotación mineros en roca. Por ejemplo, en el Reino Unido hay antecedentes desde la década de 1970 (Humphries, 1977, 1979; Gageny Gunn, 1988 y Gunn *et al.*, 1992). Y en Francia, un método específico, el método del Talud Royal, establece protocolos similares, también para restauración de frentes y taludes rocosos, tanto en minería como en obra civil (Génie Géologique, 2020).

Incorporación de un enfoque geomorfológico en la restauración minera progresiva

Es demasiado común aún en minería que el proceso de restauración se 'traslade' al final de la fase de explotación, separando ambas actividades. La 'minería de transferencia', frecuente en las grandes cortas de carbón, incorporó el concepto de 'restauración progresiva', de modo que a medida que éstas se explotan, se produce un retrolleado de los huecos, que se van restaurando de manera simultánea. Esta 'restauración progresiva' de los espacios afectados por actividades extractivas constituye una estrategia esencial para minimizar los riesgos ambientales y los costes de cierre en minería (Pearce *et al.*, 2016). Este proceso consiste en restaurar espacios transformados por movimientos de tierras en fases, a lo largo de la extracción mineral, de modo coordinado. Todo ello, como decimos, por oposición a la realización de una restauración general, a gran escala, al final de la operación. Aunque más despacio de

lo que sería deseable, poco a poco esta práctica está empezando a ser relativamente común.

Sin embargo, los diseños topográficos que resultan de esas restauraciones progresivas siguen estando dominados por laderas rectilíneas, de pendiente uniforme, modelos berma-talud, o plataforma-talud. Y tales topografías están muy alejadas de la configuración y funcionalidad que tienen los paisajes naturales.

En este contexto, está surgiendo a nivel mundial la integración de restauración geomorfológica y restauración progresiva. Los ejemplos son aún escasos a nivel mundial, si bien algunos casos destacados en Estados Unidos (Bugosh y Epp, 2019) o Australia (Kelder *et al.*, 2016) demuestran su viabilidad y conveniencia.

El ejemplo pionero a nivel europeo de la arcillera Pastor II

La restauración geomorfológica progresiva de la arcillera Pastor II, y la adaptación del plan de explotación al plan de restauración, y no al revés, constituye, según la información de la que disponemos, el primer ejemplo de esta naturaleza a nivel europeo.

Si bien la arcillera Pastor II ya se encontraba parcialmente explotada en el año 2019, ese mismo año se diseñó para la misma un proyecto de restauración geomorfológica (figuras 1 y 2), como base para su restauración ecológica. La primera fase de ese proyecto se ejecutó entre finales del año 2019 y principios de 2020 (Figura 3), adaptando las fases de explotación a las distintas subcuencas del diseño de restauración, que utilizó la cuenca hidrográfica como unidad básica de planificación. La ejecución de ese diseño incluyó la réplica del 'armado' (carga de fondo de gravas, cantos y bloques), característico de los lechos de los cursos fluviales efímeros (ramblas) del entorno (Figura 4).

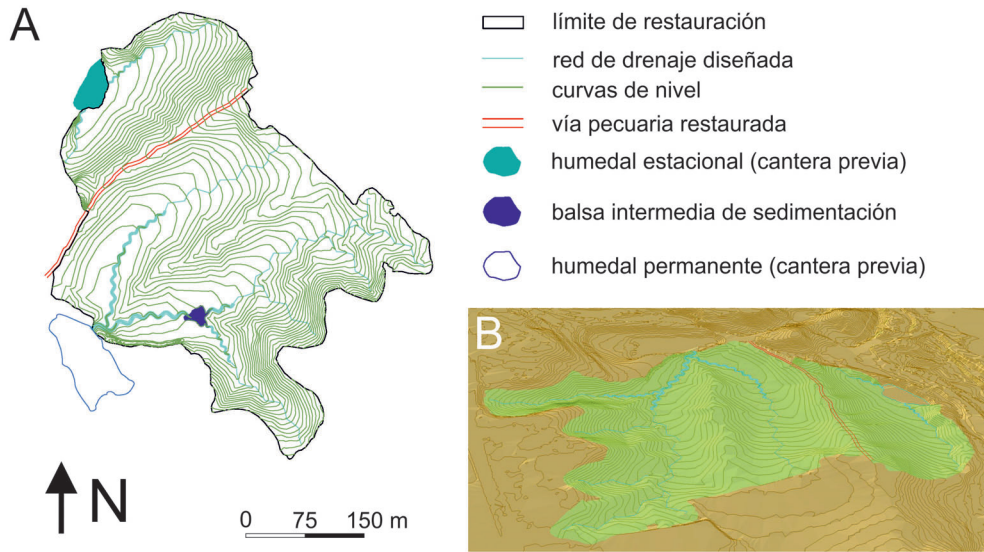


Figura 1. (A) Diseño de restauración geomorfológica de la arcillera Pastor II. (B) Vista 3D del diseño.

Hacia un cambio de modelo en las explotaciones y restauraciones mineras

Toda una serie de literatura (Hooke *et al.*, 2012 y IPBES, 2019) está mostrando, con evidencias claras, cómo el modelo actual de transformación de la superficie terrestre, en general, y debido a mo-

vimientos de tierras (donde se incluye la minería), en particular, es a todas luces insostenible. Revertir o minimizar los efectos del cambio global es un proceso muy complejo, que abarca a cuestiones como crecimiento de la población mundial, consumo de recursos, y economía circular y reciclaje. Pero en todo caso, cada actividad debería realizar su contribución en ese sentido. En el caso de la minería, en particular, pero abarcable a todos los procesos de movimientos de tierras, parece claro que es necesario un cambio de modelo. La mera adopción

de la restauración progresiva ya sería un logro. En ese contexto, nuestra propuesta es incorporar a ese proceso, además, y allí donde proceda (en función de los usos finales), la restauración geomorfológica, como base para un enfoque integral de restauración ecológica. Según este modelo, en un futuro, la actividad extractiva se realizaría adaptada a las geoformas de restauración finales, en lugar de la práctica actual, que impide en la mayoría de los casos una integración funcional y visual de los espacios mineros en su entorno.

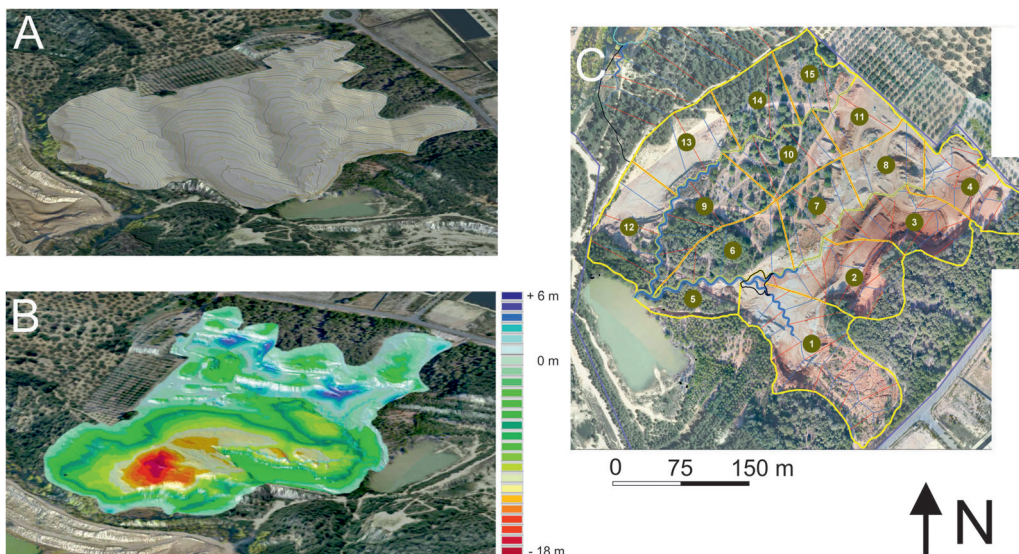


Figura 2. (A) Vista 3D del diseño de la restauración geomorfológica de la arcillera Pastor II sobre ortofoto. (B) Profundidades y espesores de corte (desmonte) y relleno (terraplén), respectivamente, de la topografía final diseñada con respecto a la topografía existente con anterioridad a la restauración (cada categoría de color corresponde a un metro de espesor). (C) Organización en fases del procedimiento de explotación-restauración para el sector comprendido al sur de la vía pecuaria. La explotación-restauración del polígono 1 se completó en enero de 2020. Como puede verse en la imagen, varios polígonos habían sido parcialmente explotados antes de este nuevo plan, si bien fueron integrados en el nuevo plan de restauración progresiva con base geomorfológica.

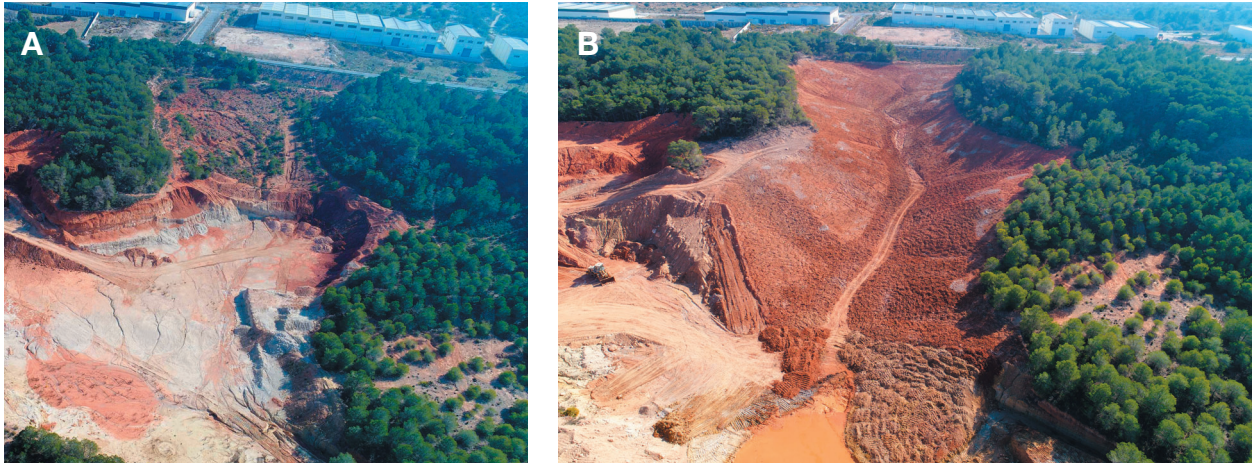


Figura 3. (A) Fotografía aérea oblicua de un sector de la arcillera Pastor II en Febrero de 2019. (B) Fotografía aérea oblicua después del remodelado geomorfológico de explotación-restauración, en enero de 2020. (Fotografías: Ofteco).

Agradecimientos

Este artículo es un resultado del proyecto LIFE12 BIO/ES/000926 (LIFE ECOREST-CLAY). El programa LIFE es el instrumento económico más importante de la Unión Europea en materia de medio ambiente y acción climática (ec.europa.eu/easme/en/life). Agradecemos la gran implicación personal en este proyecto de Xavier Gombau, Julián Llambrich, Fernando Vidiella, Leocadio Cavalle y Álvaro Matamoros en todo el proceso de remodela-

do geomorfológico. Las empresas Ofteco y Diedro han realizado los levantamientos topográficos fotogramétricos, y han obtenido las fotografías aéreas de este proyecto, con el apoyo, en el caso de las imágenes, de Paisajes Españoles. La Universidad de Barcelona (UB), que forma parte del consorcio de este proyecto LIFE, junto con CEMEX España Operaciones, la Universidad de Zaragoza, y la Universidad Complutense de Madrid, ha sido la encargada de completar el enfoque biótico de esta restauración ecológica.

Bibliografía

1. Bugosh, N. (2000). "Fluvial geomorphic principles applied to mined land reclamation". OSM Alternatives to Gradient Terraces Workshop, enero del año 2000. Farmington, NM, Office of Surface Mining.
2. Bugosh, N. (2003). "Innovative Reclamation Techniques at San Juan Coal Company (or why we are doing our reclamation differently)". Rocky Mountain Coal Mining Institute National Meeting. Copper Mt., Colorado.
3. Bugosh, N. y Epp, E. (2019). "Evaluating sediment production from native and fluvial geomorphic reclamation watersheds at La Plata Mine". *Catena*, 174, 383-398.
4. Environment Australia (1998). "Landform Design for Rehabilitation". Canberra, Department of the Environment.
5. Génie Géologique (2020). Talus Royal. <http://www.2g.fr/>.
6. Gagen, P.J. y Gunn, J. (1988). "A geomorphological approach to limestone quarry restoration". J. Hooke (Ed.), *Geomorphology and Planning* (pp. 121-142). New York, Wiley.
7. Gunn, J.; Bailey, D. y Gagen, P. (1992). "Landform replication as a technique for the reclamation of limestone quarries: A progress report". London, HMSO.
8. Hannan, J.C. (1984). "Mine rehabilitation, a handbook for the coal mining industry". Sydney, New South Wales Coal Association.



Figura 4. Canal fluvial principal que drena el sector 1 (ver Figura 2) del sector restaurado entre finales del año 2019 y enero de 2020 (ver Figura 3). Nótese la incorporación de un armado, que reproduce la rugosidad de los lechos de las ramblas del entorno.

9. Hooke R. LeB.; Martin Duque, J.F. y Pedraza, J. (2012). "Land Transformation by humans: A review". *GSA Today*, 22(12), pp. 4-10.
10. Humphries, R.N. (1977). "A new method for landscaping quarry faces". *Rock Products*, 80(5), 122H-122J.
11. Humphries, R.N. (1979). "Landscaping hard rock quarry faces". *Landscape Design*, 127, 34-37.
12. IPBES (2019). "Global Assessment Report on Biodiversity and Ecosystem Services". Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES), IPBES secretariat, Bonn, Alemania.
13. JRC (2018). "Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Management of Waste from the Extractive Industries in accordance with Directive 2006/21/EC". Luxembourg, Joint Research Centre, European Commission, EUR 28963 EN, Publications Office of the European Union.
14. Kelder, I.; Waygood, C. y Willis, T. (2016). "Integrating the use of natural analogues and erosion modelling in landform design for closure". A. Fourie, M. Tibbett (Eds.), *Mine Closure 2016* (pp. 99-106). Perth, Australian Centre for Geomechanics.
15. Lacy, H. (2019). "Mine landforms in Western Australia from dump to landform design: review, reflect and a future direction". A. Fourie, M. Tibbett (Eds.), *Mine Closure 2019* (pp. 371-384). Perth, Australian Centre for Geomechanics.
16. Martín-Moreno, C.; Martín Duque, J.F.; Nicolau, J.M.; Muñoz, A. y Zapico, I. (2018). "Waste dump erosional landform stability – a critical issue for mountain mining". *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, pp. 1431-1450.
17. Martín Duque, J.F.; Pedraza, J.; Díez, A.; Sanz, M.A. y Carrasco, R.M. (1998). "A geomorphological design for the rehabilitation of an abandoned sand quarry in central Spain". *Landscape and Urban Planning* 42(1), pp. 1-14.
18. Martín Duque, J.F.; Sanz, M.A.; Bodoque, J.M.; Lucía, A. y Martín-Moreno, C. (2010). "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*, 35, pp. 531-548.
19. Martín Duque, J.F.; Zapico, I.; Oyarzun, R.; López García, J.A. y Cubas, P. (2015). "A descriptive and quantitative approach regarding erosion and development of landforms on abandoned mine tailings: New insights and environmental implications from SE Spain". *Geomorphology*, 239: pp. 1-16.
20. NMMMD (2010). "A Method for the Evaluation of Compliance with the Approximate Original Contour Requirements of CSMC RULE 19.8". NMAC. Santa Fe, New Mexico Mining and Minerals Division.
21. Nicolau, J.M. (2003). "Trends in topography design and construction in opencast mining reclamation". *Land Degradation and Development*, 14: pp. 1-12.
22. OSMRE (2020). "Geomorphic Reclamation". Office of Surface Mining, Reclamation and Enforcement, Department of Interior, US. <http://www.osmre.gov/programs/tdt/geomorph.shtm>.
23. Pearce, S.; Orr, M.; Grohs, K. y Pearce, J. (2016). "Progressive rehabilitation — Martabe Gold Mine as a case study". A. Fourie, A., & M. Tibbett (Eds.), *Mine Closure 2016* (pp. 619-634). Perth, Australian Centre for Geomechanics.
24. Rosgen, D.L. (1994). "A Classification of Natural Rivers". *Catena*, 22, pp. 169-199.
25. Rosgen, D.L. (1996). "Applied River Morphology". Pagosa Springs, Colorado, Wildland Hydrology.
26. Sawatsky, L. y Beckstead, G. (1996). "Geomorphic approach for design of sustainable drainage systems for mineland reclamation". *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 10(3), pp. 127-129.
27. Sawatsky, L. y Beersing, A. (2014). "Configuring mine disturbed landforms for long-term sustainability". *Proceedings of Mine Closure Solutions, 2014*, abril 26-30, 2014, Ouro Preto, Minas Gerais, Brazil.
28. SMCRA (1977). "Surface Mining Control and Reclamation Act". Public law, 95-87, Statutes at Large, 91 Stat. 445. Federal Law. EE.UU.
29. Stiller, D.M.; Zimpfer, G.L. y Bishop, M. (1980). "Application of geomorphic principles to surface mine reclamation in the semiarid West". *Journal of Soil and Water Conservation*, pp. 274-277.
30. Toy, T.J. y Hadley, R.F. (1987). "Geomorphology and Reclamation of Disturbed Lands". London, Academic Press.
31. Toy, T.J. y Black, J.P. (2000). "Topographic reconstruction: the theory and practice. R. Barnishel, R. Darmody y W. Daniels (Eds.), *Reclamation of Drastically Disturbed Lands* (pp. 41-75). Madison, American Society of Agronomy.
32. Toy, T.J. y Chuse, W.R. (2005). "Topographic reconstruction: a geomorphic approach". *Ecological Engineering*, 24, pp. 29-35.
33. Waygood, C. (2014). "Adaptative landform design for closure". I.M. Weiersbye, A.B. Fourie, M. Tibbett y K. Mercer (Ed.), *Mine Closure 2014* (pp. 1-12). Johannesburg, Universidad de Witwatersrand.
34. USDI, US Dept. of Interior (1971). "Impact of surface mining on environment". T.R. Detwyler (ed.), *Man's Impact on Environment* (pp. 348-369), McGraw Hill, New York.
35. Young, J.E. (1992). "Mining the Earth" (Worldwatch Paper 109). Washington D.C., Worldwatch Institute.
36. Zapico, I.; Martín Duque, J.F.; Bugosh, N.; Laronne, J.B.; Ortega, A.; Molina, A.; Martín-Moreno, C.; Nicolau, N. y 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: pp. 100-116.
37. Zapico, I.; Molina, A.; Laronne, J.; Sánchez, L. y Martín Duque, J.F. (2020). "Stabilization by geomorphic reclamation of a rotational landslide in an abandoned mine next to the Alto Tajo Natural Park". *Engineering Geology*, 264: 105321.