



Fundación Biodiversidad

Restauración ecológica de áreas afectadas por infraestructuras de transporte

Bases científicas para soluciones técnicas

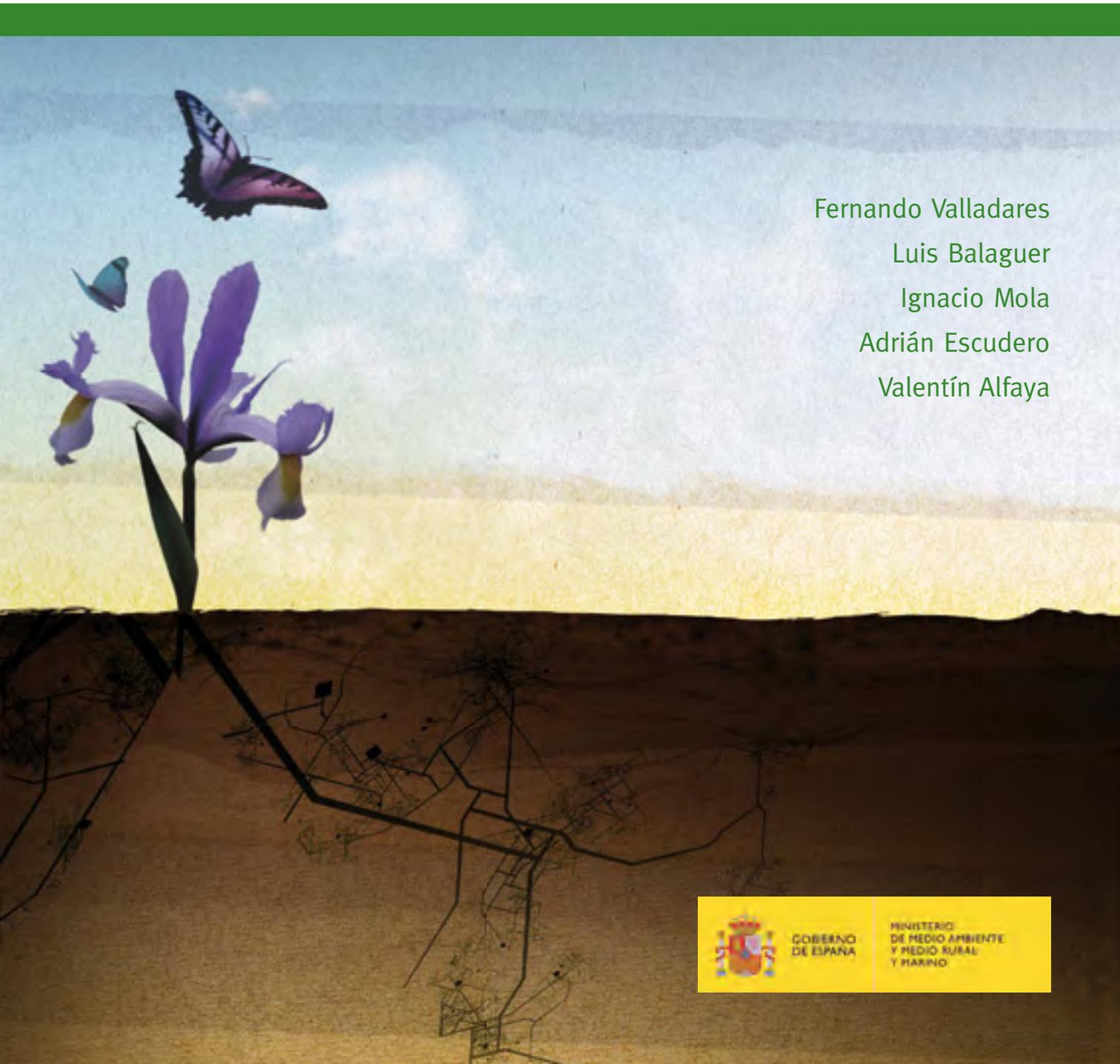
Fernando Valladares

Luis Balaguer

Ignacio Mola

Adrián Escudero

Valentín Alfaya



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE MEDIO AMBIENTE
Y MEDIO RURAL
Y MARINO



Los editores de este libro aúnan experiencias profesionales complementarias, incluso contrastadas, ya que mientras tres de ellos provienen del ámbito académico, los otros dos realizan su trabajo en el seno de empresas privadas. Los cinco comparten el interés por el impacto de las infraestructuras lineales sobre el medio natural y llevan muchos años recopilando información y participando en diversos proyectos con el fin de comprender mejor estos impactos y como atenuarlos. Las ideas teóricas desde el campo de la ecología que Fernando Valladares, Luis Balaguer y Adrián Escudero han ido destilando como resultado de su investigación han debido combinarse por un lado con el conocimiento de la realidad a pie de obra que Valentín Alfaya ha acumulado durante el seguimiento de numerosos proyectos de construcción y por otro, con la experiencia de Ignacio Mola quien aúna ambos intereses, científicos y de empresa, como coordinador de proyectos en restauración de I+D+i en el ámbito de la construcción y explotación de infraestructuras. La necesidad de combinar visiones y experiencias les ha llevado a colaborar con frecuencia y el resultado de ese cruce fértil entre la ciencia y la técnica, entre el mundo de las ideas y el marco tozudo de una realidad compleja, es lo que ha dado origen a este libro.

Restauración ecológica de áreas afectadas por infraestructuras de transporte

Bases científicas para soluciones técnicas

Fernando Valladares | Luis Balaguer | Ignacio Mola

Adrián Escudero | Valentín Alfaya



Restauración ecológica de áreas afectadas por infraestructuras de transporte. Bases científicas para soluciones técnicas

Publicado por:

Fundación Biodiversidad

Editores:

Fernando Valladares, Luis Balaguer, Ignacio Mola, Adrián Escudero y Valentín Alfaya

Esta publicación ha sido posible gracias a la colaboración de:

Ferrovial, S. A. Príncipe de Vergara 135 - 28002 Madrid (España).
Tel.: (+34) 91 586 25 00 www.ferrovial.com



Obrascón Huarte Laín, S. A. Torre Espacio. Paseo de la Castellana, 259D - 28046 Madrid (España). Tel.: (+34) 91 348 41 00 www.ohl.es



Diseño, maquetación e impresión:

AGSM Artes Gráficas. www.agsmartesgraficas.es

Depósito Legal: AB-338-2011

Fotografías: las fotografías que aparecen en este libro son propiedad exclusiva de sus autores. En caso de no señalarse explícitamente su autoría, pertenecen a los autores del capítulo correspondiente.

Cita recomendada:

Valladares, F., Balaguer, L., Mola, I., Escudero, A., y Alfaya, V., eds. 2011. Restauración ecológica de áreas afectadas por infraestructuras de transporte. Bases científicas para soluciones técnicas. Fundación Biodiversidad, Madrid, España. ©Fundación Biodiversidad 2011.

Impreso en papel certificado FSC®



ÍNDICE



| | |
|--|-----|
| Prólogos | 7 |
| Agradecimientos | 11 |
| 1 / Restauración ecológica e infraestructuras de transporte: definiciones, problemas y desafíos | |
| Luis Balaguer, Fernando Valladares e Ignacio Mola | 15 |
| 2 / Consideraciones geomorfológicas e hidrológicas | |
| José F. Martín Duque, Saturnino de Alba y Fernando Barbero Abolaño | 43 |
| 3 / Ecohidrología: erosión hídrica y dinámica de la vegetación en laderas artificiales | |
| José Manuel Nicolau, Tiscar Espigares, Mariano Moreno de las Heras y Luis Merino-Martín | 75 |
| 4 / Importancia del suelo para la restauración de la cubierta vegetal | |
| Pablo García-Palacios | 85 |
| 5 / Procesos ecológicos y restauración de la cubierta vegetal | |
| Esther Bochet, Pablo García-Palacios, Begoña Peco, Jaime Tormo y Patricio García-Fayos | 101 |
| 6 / Introducción de especies leñosas | |
| Pedro Villar-Salvador, Santiago Soliveres y José Luis Quero | 143 |
| 7 / Ecotecnología aplicada a la restauración de infraestructuras de transporte | |
| Santiago Soliveres, Valentín Contreras, João Paulo Fernandes, Jordi Cortina, Pablo García-Palacios, Marisa Martínez y Jorge Fort | 177 |
| 8 / Actuaciones para minimizar los efectos sobre la fauna | |
| Juan E. Malo y Cristina Mata | 213 |

| | |
|---|-----|
| 9 / Seguimiento y vigilancia ambiental | |
| Carlos Iglesias, Santiago Soliveres, Valentín Alfaya, Jesús Álvarez, Ignacio Mola, Javier Martínez de Castilla y Xavier Artigas | 243 |
| 10 / Legislación | |
| Carlos Iglesias, Luis Balaguer, Ignacio Mola y Valentín Alfaya | 275 |
| 11 / Restauración ecológica e infraestructuras de transporte: perspectivas y recomendaciones | |
| Luis Balaguer, Fernando Valladares, Adrián Escudero, Ignacio Mola y Valentín Alfaya | 303 |
| Anexo 1 / Fuentes recomendadas de información adicional | 311 |
| Anexo 2 / Sobre los autores y revisores del libro | 317 |

3

Ecohidrología: erosión hídrica y dinámica de la vegetación en laderas artificiales

José Manuel Nicolau, Tiscar Espigares, Mariano Moreno de las Heras y Luis Merino-Martín





CAPÍTULO 3

Ecohidrología: erosión hídrica y dinámica de la vegetación en laderas artificiales

José Manuel Nicolau, Tiscar Espigares, Mariano Moreno de las Heras y Luis Merino-Martín

I. INTRODUCCIÓN

Como se ha señalado en varios apartados de este manual, la inestabilidad geomorfológica tiene efectos negativos sobre el éxito de la restauración de las laderas construidas (*on site effects*). En efecto, la erosión hídrica condiciona los procesos ecológicos que conducen al establecimiento y desarrollo de la vegetación, así como a la edafogénesis (Kapolka y Dollhopf 2001; Nicolau 2002). Se ha indicado que el ámbito clave para conseguir una restauración efectiva es el suelo, de manera que según, Bradshaw (1988), el objetivo de una restauración debería ser alcanzar un suelo biológicamente funcional. Sin embargo, Whisenant *et al.* (1995) advierten de que, en muchos casos, es un objetivo previo garantizar la estabilidad de los recursos edáficos, que son amenazados por los procesos erosivos. Los mecanismos por los cuales la erosión hídrica afecta a los procesos ecológicos han sido abordados desde la joven disciplina de la ecohidrología. A continuación se presenta una síntesis de los resultados obtenidos en este campo por el grupo de investigación de la Universidad de Alcalá-Universidad de Zaragoza. Estas investigaciones se han efectuado sobre laderas derivadas de la restauración de la minería de carbón a cielo abierto en el ambiente mediterráneo-continental de Teruel. Su interés para el caso de las infraestructuras lineales se refiere a la restauración de los terraplenes, pues se trata de materiales vertidos, alóctonos, a diferencia de los desmontes de materiales autóctonos.

Las interacciones entre la escorrentía superficial y diversos procesos ecológicos han podido ser abordadas en el Área Experimental El Moral (Utrillas, Teruel) gracias a la existencia de un conjunto de laderas construidas de la misma edad y similares características topográficas, edáficas, de orientación y de tratamientos de revegetación, pero diferenciadas por el volumen de escorrentía generado en su cabecera, el cual se introduce en ellas circulando ladera abajo (*run-on*). Ello representa, en condiciones de campo, lo más cercano a un diseño experimental dirigido a evaluar el efecto del volumen de escorrentía, y la erosión hídrica asociada, sobre la dinámica de la vegetación. De hecho, la entrada de escorrentías exógenas por la cabecera de las laderas constituye una singularidad de estos sistemas emergentes, que condiciona notablemente

su evolución ecológica. Estas entradas (*run-on*) se generan a causa del incorrecto funcionamiento de cunetas superiores o bermas, o de la existencia de segmentos superiores de ladera abruptos o convexos que actúan como áreas-fuente de escorrentía. La inestabilidad que generan aconseja el máximo control sobre ellas en los proyectos de restauración (Hancock y Willgoose 2004).

En las laderas artificiales, la acción de la escorrentía superficial –movilizando partículas de suelo y generando geoformas que modifican la microtopografía– es un fenómeno generalmente previo en el tiempo a la siembra o llegada de propágulos, germinación y establecimiento de la vegetación. Y, probablemente, es un proceso también más dinámico en las primeras etapas de la evolución de los terraplenes.

II. EVOLUCIÓN ECOLÓGICA E HIDROLÓGICA DE LADERAS ARTIFICIALES

A modo general, se han identificado tres tipos de trayectorias de evolución ecológica e hidrológica (Moreno de las Heras, 2009a; Merino-Martín *et al.*, 2011) como se indica en la Figura 1: a) laderas con densas redes de regueros continuos, en las que la sucesión ecológica se encuentra bloqueada (*arrested succession*), presentando una escasa implantación vegetal (Figura 1A); b) laderas con regueros discontinuos y geoformas de sedimentación en conos y de erosión en interregueros, que han desarrollado comunidades vegetales herbáceas cuya distribución espacial en manchas discontinuas ('claros y matas') está asociada a las áreas exportadoras e importadoras de escorrentía y sedimentos (Figuras 1B y 1C); c) laderas sin geoformas previas asociadas a procesos de erosión-sedimentación en las que se produce el establecimiento de matorrales facilitadores (que interactúan positivamente con otras especies, favoreciendo su establecimiento y desarrollo), los cuales controlan el flujo de agua y sedimentos (Figura 1D). Como se señala en la Figura 1, estos tres tipos

de laderas restauradas representan, a su vez, un gradiente desde el control abiótico de los recursos hídricos (por los procesos geomorfológicos, en las laderas tipo A y B) al control biótico que se produce en aquellas laderas colonizadas por matorrales facilitadores (tipo C).

Para las condiciones de las laderas de El Moral, se ha podido establecer que, con niveles de cubierta vegetal inferiores al 30% y tasas de erosión en regueros superiores a 20 t ha⁻¹ año⁻¹, la dinámica del sistema conduciría a un bloqueo de la sucesión ecológica. Con niveles superiores al 50% de cobertura vegetal y tasas de erosión en regueros inferiores a 5 t ha⁻¹ año⁻¹, la dinámica del sistema conduciría hacia una cubierta vegetal continua a partir de la matorralización. En los niveles intermedios (5-20 t ha⁻¹ año⁻¹ y 30-50% de cobertura vegetal), se organiza una cubierta vegetal discontinua en un patrón de matas y claros subordinado a la dinámica de la escorrentía superficial (Moreno de las Heras 2009a).

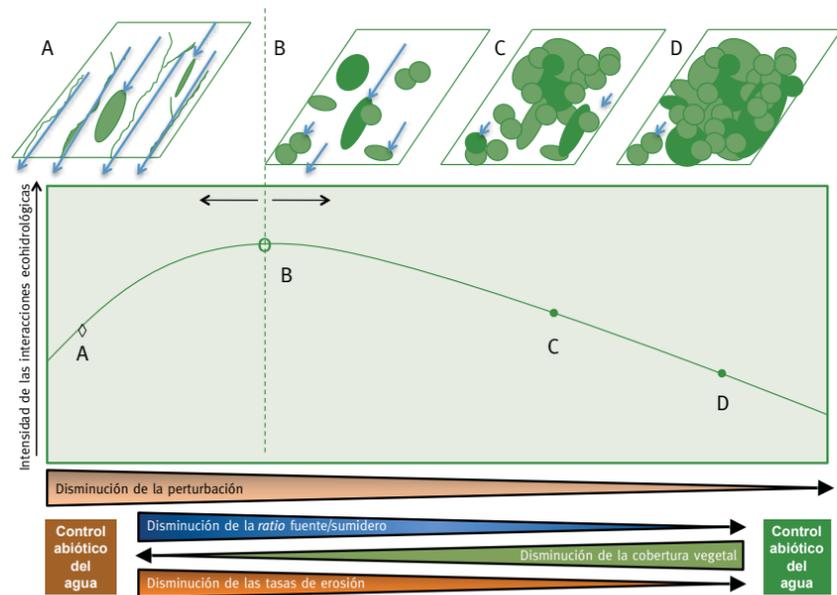


Figura 1. Gradiente de interacciones ecohidrológicas, desde el dominio de la reguización (control abiótico) hasta el dominio de la vegetación arbustiva (control biótico mediado por las islas de fertilidad). (Merino Martín *et al.*, 2011).

III. FUNCIONAMIENTO ECOHIDROLÓGICO DE LADERAS DE ESTUDIO

En el caso de las laderas reguizadas (Figura 2), ha podido establecerse que el principal efecto restrictivo de la erosión sobre la vegetación es la disminución del contenido de humedad edáfica a que da lugar la evacuación eficiente de la escorrentía por parte de los regueros (Moreno de las Heras *et al.*, 2011). La intensificación del déficit hídrico propiciada por la erosión en regueros condiciona notablemente la escasa colonización vegetal. En concreto se ha comprobado que limita la germinación de las semillas, el establecimiento y supervivencia de plántulas, y la producción de semillas de las plantas adultas (Espigares *et al.*, 2011).

Los regueros, además, redistribuyen el agua en la ladera (concentrando la humedad del suelo en la base de los regueros), lo que afecta también a la distribución espacial de las plantas. Así, en las laderas mineras de Teruel, a partir de densidades de regueros de $0,60 \text{ m m}^{-2}$ solo una comunidad pauciespecífica de *Medicago sativa* (alfalfa, originariamente introducida en las laderas mediante revegetación) es capaz de desarrollarse, concentrándose los individuos en los bordes entre los interregueros y los regueros. La localización espacial de estos individuos no es casual, sino que responde a la interacción entre los patrones de envejecimiento y muerte de las plantas con la distribución espacial de la humedad y los efectos mecánicos de los



Figura 2. Ladera reguizada con control abiótico del ciclo del agua y reducido establecimiento de la vegetación. El déficit hídrico acentuado por los regueros limita el establecimiento y desarrollo de la vegetación. Nótese que los ejemplares de *Medicago sativa* se localizan en el borde de los regueros. El elevado volumen de escorrentía circulante tiene su origen en una amplia cabecera de ladera exportadora de escorrentía.

flujos de escorrentía. En este sentido, los bordes entre los regueros y los interregueros representan las áreas donde estas plantas pueden minimizar los niveles de estrés hídrico (gracias al uso de los recursos hídricos presentes en el entorno de la base de los regueros), evitando a la vez el fuerte impacto mecánico generado por los flujos concentrados de escorrentía que circulan por los regueros. Cabe señalar que este tipo de patrón espacial de la vegetación (dispuesto en pequeñas manchas paralelas a los flujos de escorrentía) presenta

una gran incapacidad para interceptar y redistribuir los flujos de recursos (agua, nutrientes...) que circulan por las laderas. En estas condiciones, las pérdidas directas de recursos hídricos de las laderas en forma de escorrentía superficial representan más del 20% de la precipitación anual (Moreno de las Heras *et al.* 2010).

En laderas con volúmenes intermedios de escorrentía (Figura 3), la disponibilidad de agua en el suelo está asociada a distintos microambientes geomorfológicos que funcionan como fuentes y sumideros de escorrentía y sedimentos. La presencia de las especies vegetales y su distribución espacial responden a dicha oferta de agua, con gramíneas sembradas (*Lolium perenne*) o establecidas mediante procesos de colonización natural (*Brachypodium sp.*) formando manchas densamente vegetadas en derramaderos de escorrentía (*run-off splays*). Estos microambientes se encuentran asociados a microterrazas, así como a conos de sedimentación presentes en las discontinuidades de las redes de regueros. En estas áreas con mayor disponibilidad de recurso hídrico se ven favorecidas la riqueza de especies y la cubierta vegetal, así como la riqueza y abundancia del banco de semillas del suelo, lo que incrementa, a su vez, las posibilidades de germinación de las semillas. El aporte de agua desde los claros, o zonas desprovistas de vegetación, a las manchas de vegetación resulta decisiva para ello (Merino Martín 2010). En efecto, se han identificado geoformas exportadoras de agua colonizadas por individuos de *Santolina sp.* e importadoras, cubiertas por *Lolium sp.*, remanente de la siembra inicial del tratamiento de revegetación.



Figura 3. Ladera con un patrón de manchas de vegetación establecidas en geoformas exportadoras (*Santolina sp.* de flor amarilla) o importadoras (*Lolium sp.*) de agua. La distinta oferta hídrica de las geoformas condiciona el patrón espacial de la vegetación. Las flechas indican el flujo de agua desde las zonas exportadoras de *Santolina sp.* hacia las importadoras de *Lolium sp.* (dentro de los círculos). Nótese laanja superior en la ladera que ejerce como área exportadora de escorrentía hacia el conjunto de la ladera.

En las laderas con volúmenes limitados de escorrentía (que no reciben flujos externos; Figura 4), la distribución espacial de la vegetación no está asociada a geoformas derivadas de procesos de erosión-sedimentación, y es la misma vegetación la que controla el flujo del agua superficial y la distribución de la humedad. Se pasa, pues, de un control geomorfológico sobre el agua a otro biológico. En las primeras etapas de la sucesión ecológica se establece una formación de matorral discontinuo constituida principalmente por individuos de *Genista scorpius* (aliaga). Los individuos de esta especie pueden actuar como isla de actividad biológica potenciada hidrológicamente. Por un lado, mejoran sustancialmente las condiciones ambientales de su entorno (aportando sombra y aumentando el contenido de nutrientes); y, por otro, son capaces de interceptar el agua que circula en forma de escorrentía superficial procedente de otras áreas desprovistas de vegetación debido al incremento en la tasa de infiltración del suelo bajo su dosel. Así, los individuos de esta especie ejercen un efecto facilitador sobre las plantas que crecen bajo su dosel, que presentan mejor estado hídrico que las situadas fuera de la influencia de la planta, en las zonas de los claros, desprovistas de vegetación (Merino Martín 2010). Un nuevo diseño de las revegetaciones, alternativo a las plantaciones lineales, puede surgir a partir del uso de especies capaces de funcionar como islas de fertilidad en un patrón de matas y claros.



Figura 4. Ladera colonizada por *Genista scorpius*, especie que actúa como isla de actividad biológica potenciada hidrológicamente. Las especies del subvuelo de *G. scorpius* se ven hidrológicamente facilitadas, lo que indica que existe un control biótico del ciclo del agua. No existen entradas externas de escorrentía desde la cabecera.



Las especies vegetales identificadas en las parcelas experimentales durante los trabajos expuestos en este capítulo se clasificaron en dos grupos: introducidas mediante técnicas de revegetación y especies que colonizan de forma natural (Moreno de las Heras *et al.* 2008). A su vez, clasifican las que llegan de forma natural en frecuentes (presentes en más del 5% de los taludes) y escasas (presentes en menos de 5% de los taludes). En la página de la izquierda, se muestran seis especies pertenecientes al grupo de las frecuentes que de izquierda a derecha y de arriba abajo son: Llantén blanco (*Plantago albicans*), aguja de pastor (*Erodium ciconium*), murajes (*Anagallis arvensis*), hierba betunera (*Psoralea bituminosa*), rabaniza (*Diploaxis erucoides*) y árnica (*Pallenis spinosa*). Sobre estas líneas, de izquierda a derecha y de arriba abajo, se muestran otras tantas especies pertenecientes al grupo de las escasas: alhelí triste (*Matthiola fruticulosa*), uña de gato (*Sedum sediforme*), chiribita (*Bellis perennis*), alcabota (*Mantisalca salmantica*), aguileña (*Aquilegia vulgaris*) y hierba cana (*Senecio vulgaris*). Autor: Ignacio Mola.



IV. CONCLUSIONES SOBRE LOS EFECTOS DE LA EROSIÓN

Los trabajos mencionados permiten precisar los efectos de la erosión (por regueros y laminar) sobre el suelo y la vegetación en estas laderas artificiales. De este modo, las restricciones impuestas por la erosión al desarrollo vegetal dificultan considerablemente la incorporación de materia orgánica en el suelo (Moreno de las Heras 2009b). En consecuencia, los procesos de desarrollo y organización espacial de la estructura física y funcionalidad biológica del suelo se ven drásticamente limitados. Entre ellos, el desarrollo de la estabilidad de los agregados, el tamaño de las poblaciones microbianas y su actividad, así como la mineralización de la materia orgánica y el reciclado de nutrientes del suelo (nitrógeno y fósforo). Incluso en condiciones de erosión moderada, los procesos de formación edáfica son considerablemente lentos, probablemente debido a las pequeñas cantidades de materia orgánica acumuladas en el suelo (en general inferiores al 2%).

La relación entre los procesos erosivos y el desarrollo de los ecosistemas de ladera restaurados es

fundamentalmente no lineal (Moreno de las Heras *et al.* 2011). Así, la disponibilidad de agua para la producción vegetal se ve reducida de forma exponencial con las tasas de erosión, generando a su vez caídas paralelas en los atributos básicos de las comunidades vegetales (biomasa y riqueza) y en la actividad de los procesos de formación del suelo. En cuanto al efecto de la vegetación herbácea sobre el control de la erosión, se ha demostrado que sigue también una relación exponencial negativa, según la cual las tasas erosivas y la generación de escorrentía se reducen apreciablemente con cubiertas vegetales entre el 30-50%, lo que, desde el punto de vista aplicado, lleva a plantear como objetivo práctico de las revegetaciones que buscan el control de la erosión alcanzar un cubrimiento del 50% de la superficie del suelo (Moreno de las Heras *et al.* 2009). Diversos trabajos desarrollados en taludes de carretera y ambientes mineros confirman la efectividad de este umbral de cubierta vegetal sobre el control de los procesos erosivos en entornos de clima mediterráneo (Andrés y Jorba 2000; Loch 2000; Bochet *et al.* 2010).

V. BIBLIOGRAFÍA

Andrés, P., y M. Jorba. 2000. Mitigation strategies in some motorway embankments (Catalonia, Spain). *Restoration Ecology*, 8:268-275.

Bradshaw, A. 1988. Alternative Endpoints for Reclamation. In: J. Cairns, Jr (ed.), *Rehabilitating Damaged Ecosystems*. CRC Press, Boca Raton, Florida, pp. 69-85.

Bochet, E., P. García-Fayos, y J. Tormo. 2010. How can we control erosion of roadslopes in semiarid Mediterranean areas? *Land Degradation and Development*, 21:110-121.

Espigares, T., Moreno, M., y Nicolau, J.M. 2011. Performance of Vegetation in Reclaimed Slopes Affected by Soil Erosion. *Restoration Ecology* 19:35-44.

Hancock, G.R y G. Willgoose. 2004. An experimental and computer simulation study of erosion on a mine tailings dam wall. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29:457-475.

Kapolka, N.M., y D.J. Dollhopf. 2001. Effect of Slope Gradient and Plant Growth on Soil Loss on

Reconstructed Steep Slopes. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment* 15 (2):86-99.

Loch, R.J. 2000. Using rainfall simulation to guide planning and management of rehabilitated areas. Part 1: experimental methods and results from a study at the Northparkes mine, Australia. *Land Degradation and Development*, 11:221-240.

Merino Martín, L. 2010. Ecología de laderas restauradas de la minería de carbón a cielo abierto: interacciones ecohidrológicas. Memoria de Tesis doctoral. Departamento de Ecología. Universidad de Alcalá, Madrid.

Merino Martín L, Breshears DD, Moreno de las Heras M, Camilo Villegas J, Pérez-Domingo S, Espigares T, Nicolau JM. 2011. Ecohydrological Source-Sink Interrelationships between Vegetation Patches and Soil Hydrological Properties along a Disturbance Gradient Reveal a Restoration Threshold. *Restoration Ecology* 19: doi: 10.1111/j.1526-100X.2011.00776.x.

Moreno de las Heras. 2009a. Efectos ecológicos de la erosión en laderas derivadas de la minería del carbón a cielo abierto. Memoria de Tesis Doctoral. Departamento de Ecología. Universidad de Alcalá. Madrid.

Moreno de las Heras, M. 2009b. Development of soil physical structure and biological functionality in mining spoils affected by soil erosion in a Mediterranean-Continental environment. *Geoderma*, 149:249-256.

Moreno de las Heras, M., J.M. Nicolau y T. Espigares. 2008. Vegetation succession in reclaimed coal-mining slopes in a Mediterranean-dry environment. *Ecological Engineering*, 34:168-178.

Moreno de las Heras, M., J. M. Nicolau, L. Merino-Martín, and B. P. Wilcox. 2010. Plot-scale effects on runoff and erosion along a slope degradation gradient, *Water Resources Research*, 46, W04503.

Moreno de las Heras, M., L. Merino y J.M. Nicolau. 2009. Effect of vegetation cover on the hydrology of reclaimed mining soils under Mediterranean-Continental climate. *Catena*, 77:9-47.

Moreno de las Heras, M., T. Espigares, L. Merino-Martín, y J.M. Nicolau. 2011. Water-related ecological impacts of rill erosion processes in Mediterranean-dry reclaimed slopes. *Catena*. Artículo en prensa, doi: [10.1016/j.catena.2010.10.010](https://doi.org/10.1016/j.catena.2010.10.010)

Nicolau, J.M. 2002. Runoff generation and routing on artificial slopes in a Mediterranean-continental environment: The Tervel coalfield, Spain. *Hydrological Processes*, 16:631-647.

Whisenant S.G., T.L. Thurow, y S.J. Maranz. 1995. Initiating autogenic restoration on shallow semiarid sites. *Restoration Ecology*, 3:61-67.