

2

Consideraciones geomorfológicas e hidrológicas

José F. Martín Duque, Saturnino de Alba y Fernando Barbero Abolaño





CAPÍTULO 2

Consideraciones geomorfológicas e hidrológicas

José F. Martín Duque, Saturnino de Alba y Fernando Barbero Abolafio

I. INTRODUCCIÓN

1. La construcción de infraestructuras lineales como proceso geomorfológico

El movimiento de tierras asociado a la construcción de infraestructuras lineales constituye uno de los procesos geomorfológicos más activos y efectivos a escala global. Hooke (1994) estimó que la construcción de carreteras en Estados Unidos movilizaba 3 gigatoneladas de materiales al año (en 1994). Esta cifra suponía casi el 40% del total de movimientos de tierras por actividades humanas en Estados Unidos, completado por 1 Gt/año de la urbanización y 3,8 Gt/año de la minería de superficie. Y la suma de todos ellos se situaba en el mismo orden de magnitud que lo estimado para los agentes geológicos denominados ‘naturales’ en ese contexto espacial y temporal (ríos, glaciares, viento...) (Hooke, 1994).

En España, la previsión inicial del Plan Español de Infraestructuras de Transportes (PEIT) era construir, entre 2005 y 2020, un total de 6000 km de auto-vías y autopistas y 9.000 km de ferrocarril de alta velocidad, incluyendo la adecuación de líneas existentes a altas prestaciones (Ministerio de Fomento, 2005). Utilizando una estimación de movimiento de tierras de 10 m³ por metro lineal construido, y una densidad aparente de 2 t/m³, se obtiene una cifra de movimiento de tierras de en torno a 300 millones de toneladas (20 millones de toneladas al año). De nuevo, utilizando la estimación del transporte de sedimentos desde los ríos hasta los océanos para España, a partir del trabajo de Sytvitski *et al.* (2005),

se puede llegar a la misma conclusión que para Estados Unidos.

Estas reflexiones parecen estar fuera del ámbito de las ciencias geológicas y geomorfológicas, de modo que mover tierras para construir una infraestructura lineal, o el asfaltado de carreteras, no se consideran temas o procesos centrales de esas ciencias. Sin embargo, las cifras aportadas muestran escenarios en los que las actividades humanas se han convertido en el principal agente geomorfológico que actualmente modifica la superficie terrestre. Entre ellas, la construcción de infraestructuras lineales es una de las más importantes. Por todo ello, la transformación de la superficie terrestre debida a esta actividad constructiva debería estar entre la corriente dominante de los trabajos geológicos y geomorfológicos actuales.

Respecto a superficies afectadas, Hooke *et al.* (2010), utilizando datos de todos los países que cuentan con información disponible a este respecto, han estimado que alrededor de 0,6 millones de kilómetros cuadrados de la superficie terrestre están ocupados por infraestructuras lineales en zonas rurales (excluida su ocupación en áreas urbanas, que computarían como superficies urbanas). Todo ello supone una ocupación de aproximadamente un 0,5% de la superficie terrestre continental libre de hielos.

En países desarrollados, este porcentaje se sitúa en torno al 1%. Forman y Alexander (1998) y Forman (2000) sostienen que los corredores de carreteras cubrirían aproximadamente el 1% de Estados Unidos, citando para ello datos del *National Research Council* (1997, p. 181). Por su parte, Luis Balaguer (com. pers.), utilizando datos oficiales del Ministerio de Fomento, también ha estimado que más de 5.000 km² (lo que equivale a un 1% de la superficie de nuestro país, o a 10 veces el tamaño del Parque Nacional de Doñana) está cubierta por autovías, autopistas o carreteras.

El área total ocupada por infraestructuras lineales de transporte (0,5% de la superficie continental libre de hielos, alrededor del 1% en países desarrollados) puede parecer pequeña. Sin embargo, los efectos ambientales de estas superficies alteradas son mucho mayores de lo que podrían sugerir esas cifras. Así, Forman y Alexander (1998) estiman que entre el 15 y el 20% de la superficie de los Estados Unidos está ecológicamente afectada por carreteras, considerando todos los impactos que éstas ocasionan: fragmentación de hábitats, emisión de agentes contaminantes, escorrentía y sedimentos que causan

efectos adversos en amplias superficies terrestres y acuáticas, entre otros.

Como es fácil de comprender, lo más probable es que todas estas cifras se incrementen en un futuro, en un escenario en el que se mantiene el crecimiento imparable de la población mundial y el desarrollo económico de los países emergentes. Por consiguiente, se ejercerá una importante presión constructiva sobre muchos territorios, visible ya en determinados ámbitos (Figura 1). Todo ello refuerza la enorme importancia que tiene la integración ambiental y la restauración ecológica de estos espacios, con el fin de minimizar la pérdida de bienes y servicios ambientales para el conjunto de la sociedad.

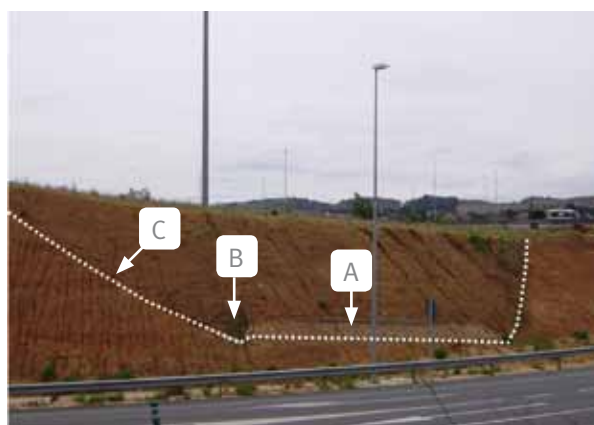


Figura 1. La presión constructiva sobre muchos territorios es tal que, como en el caso que muestra la fotografía, el trazado de una carretera anterior, relleno por materiales de escombrera, puede quedar incorporado, a modo de registro sedimentario, en el desmonte de una carretera más reciente. La línea blanca discontinua señala esta exposición singular. Sobre ella pueden identificarse un corte perpendicular de la plataforma de la carretera, el asfalto (a), las cunetas (b) y los antiguos desmontes (c) (Foto: F. Barbero).

2. Un enfoque geomorfológico para comprender el problema

Cualquier superficie terrestre funciona como un sistema que tiende a mantener un 'equilibrio dinámico' entre las formas del terreno que observamos y los procesos geomorfológicos e hidrológicos que actúan sobre ellas. En efecto, con anterioridad a las modificaciones humanas, la mayor parte de las cuencas hidrográficas en que se organiza el territorio están próximas a una situación de equilibrio (que es siempre dinámico); y los procesos de erosión, transporte y sedimentación están adaptados a las condiciones ambientales existentes (Graf, 1977).

La construcción de infraestructuras lineales supone una perturbación antrópica de primera magnitud, en

tanto no sólo modifica la cubierta vegetal y edáfica, sino todos los componentes de la superficie terrestre (como sustrato y topografía). Ello origina todo un conjunto de nuevas formas del terreno, a modo de auténticas morfologías erosivas (p.e., desmontes) y de verdaderas acumulaciones sedimentarias (p.e., terraplenes) así como nuevas condiciones hidrológicas y edáficas. En definitiva, la apertura de infraestructuras lineales altera las condiciones de ese 'equilibrio dinámico'. Normalmente se produce una aceleración de los procesos geomorfológicos activos en el dominio de carreteras y ferrocarriles; pero también ocurre una deceleración o anulación de los mismos, como sucede en las superficies pavimentadas. En todo caso, siempre acontece una modificación de los flujos de agua y materiales en todo su contexto.

Los nuevos procesos desencadenados por la construcción de infraestructuras lineales, que actúan sobre las nuevas formas del relieve creadas (desmontes,

terraplenes, bermas, plataformas...) y sobre su entorno, son una manifestación del trabajo geomorfológico para restablecer un nuevo equilibrio dinámico entre las formas del terreno creadas por la actividad constructiva y los procesos geomorfológicos activos que son característicos de las condiciones ambientales locales (Schumm y Rea, 1995). Éste es el motivo por el cual el entorno de las infraestructuras lineales, especialmente los desmontes de carreteras y ferrocarriles, constituyen escenarios donde la dinámica geomorfológica es muy evidente (Petersen, 2002).

Para analizar y comprender esa dinámica es posible seguir una aproximación geomorfológica 'clásica', basada en el análisis de las formas del terreno y de los procesos que las originan (Pedraza, 1996). La diferencia fundamental es la escala de detalle de este nuevo análisis (Figura 2), que permite hablar de toda una 'geomorfología de carreteras', ya iniciada en algunos trabajos (Barbero *et al.*, 2009a; Figura 3).



Figura 2. Flujos de barro (*mudflows*) en un pequeño desmonte de una carretera local. Los procesos geomorfológicos que se desarrollan en estos desmontes son similares a los que operan en otros ambientes continentales (por ejemplo zonas de montaña), pero tienen mucho menor tamaño (Foto: J.F. Martín Duque).



Figura 3. Morfologías que se desarrollan de manera más ‘típica’ sobre cada una de las litologías detríticas que caracterizan los desmontes de las infraestructuras lineales de la Cuenca de Madrid, bajo condiciones climáticas mediterráneas (en Barbero *et al.*, 2009a) (Fotos: J.F. Martín Duque).

- A. Distinta respuesta morfológica según la litología. Sobre conglomerados (con tonos más grisáceos), la red de drenaje tiene un menor grado de incisión, debido a la presencia de cantos y bloques, que dificultan el encajamiento; en los materiales más arenosos (con tonos más rojizos), la escorrentía concentrada consigue desarrollar una red paralela de regueros (*rills*).
- B. Patrón de drenaje paralelo, muy bien definido. El espaciado regular entre el conjunto de regueros (*rills*) y sus interfluvios, en la base del desmonte, se interpreta como una herencia del acabado del talud con las uñas de una retroexcavadora, que posteriormente es remodelado y exagerado por la erosión hídrica.
- C. Los procesos erosivos actúan de manera rápida y efectiva en desmontes desarrollados sobre materiales no consolidados o poco consolidados, y son más efectivos cuanto más arenoso es el material del desmonte. La red de drenaje en este tipo de materiales arenosos es subparalela, tendente a dendrítica.
- D. La presencia de materiales arcillosos en los taludes favorece el desarrollo de redes de drenaje con una mayor tendencia a ser dendríticas. Se reproduce así, a escala de gran detalle, el mismo tipo de red de drenaje que ocurre en paisajes dominados por sustratos de dominancia arcillosa.
- E. Los desmontes construidos sobre lutitas, con frecuencia son más verticales que sobre otros materiales, puesto que su cohesión lo permite. Estas paredes casi verticales sufren procesos de meteorización, formando estructuras tipo *pop-corn*: una especie de ‘costra’, que en este caso tiene entre unos pocos milímetros y 2 cm de espesor, y se agrieta formando polígonos de 3-4 cm de radio. Estos ‘fragmentos de corteza’ sufren caídas, acumulándose en la base del desmonte a modo de talud de derrubios. Una vez que la costra se cae, ésta vuelve a formarse y a fragmentarse a partir de sucesivos ciclos de humectación-desecación, hasta que vuelven a sufrir nuevas caídas. Ocasionalmente aparecen morfologías de tipo flujo de barro (*mudflow*).
- F. Los desmontes de la imagen reproducen, en miniatura, el modelo geomorfológico de un escarpe montañoso. La parte superior de talud aparece expuesta a los procesos de meteorización-erosión y la base del talud se caracteriza por una acumulación de derrubios, a modo de ‘derrame

de ladera’ (*talus slope*), que muestra una gran actividad geomorfológica. Puntualmente son reconocibles canales y acumulaciones de flujos de derrubios (*debris flow*), de nuevo en miniatura.

El diseño y construcción de las infraestructuras lineales debe estar encaminado a reorganizar la red de drenaje que se modifica y a garantizar una estabilidad geotécnica del conjunto, dadas las características de seguridad que deben existir en estos espacios. En este contexto, el término ‘inestabilidad’ aplicado a taludes de infraestructuras lineales se asocia mayoritariamente a la ocurrencia, o a la propensión de ocurrencia, de los llamados ‘procesos gravitacionales’, ‘movimientos de ladera’ o ‘movimientos en masa’, de tipo caídas, flujos y deslizamientos (Pedraza, 1996), y que son normalmente de cierta entidad.

Sin embargo, los criterios de seguridad geotécnica no aseguran por sí solos una estabilidad completa de los taludes, puesto que casi siempre existe una inestabilidad geomorfológica gravitacional ‘menor’ (movimientos en masa muy superficiales), y sobre todo, asociada a la erosión hídrica (arranque y transporte de materiales por el flujo de la escorrentía).

La inestabilidad del sustrato de taludes de infraestructuras lineales, debida a movimientos gravitacionales superficiales y a la erosión hídrica, limita extraordinariamente sus posibilidades de restauración ecológica, al evacuar de los mismos agua, nutrientes y diásporas vegetales (ver capítulo sobre vegetación). Tanto es así que existen ya demasiados ejemplos de fallos en los protocolos de revegetación habituales en estos espacios, debidos a la inestabilidad geomorfológica.

En este contexto, las labores de diseño, construcción y restauración de infraestructuras lineales deberían tratar de comprender y minimizar las modificaciones hidrológicas y la actividad geomorfológica, así como de controlarla y manejarla adecuadamente desde su conocimiento, dejando un “ajuste más fino” a los procesos naturales que actuarán después de esas intervenciones (Toy y Black, 2000). Obviamente, la consideración realizada es muy general y debe adaptarse a los distintos condicionantes y escenarios.

Dentro de éstos, y como una primera aproximación, habría que distinguir entre el marco litológico y climático, así como la naturaleza del talud, puesto que una variación de cada uno de esos factores introduce otros, de naturaleza ecológica, que son determinantes. Así por ejemplo, el tipo de sustrato sobre el que se construye la infraestructura condiciona

enormemente su dinámica geomorfológica, de modo que las rocas ‘duras’ (macizos rocosos) son propensas a la ocurrencia de movimientos gravitacionales (como caídas y desprendimientos), pero no a la erosión hídrica, mientras que las rocas ‘blandas’ (referidas frecuentemente como ‘suelos’ en el mundo de la ingeniería) son más propensas a la erosión hídrica, aunque también desarrollan movimientos gravitacionales (como deslizamientos y flujos). El clima es otro factor de primer orden: los climas ‘húmedos’ favorecen la ocurrencia de movimientos gravitacionales, por saturación y aumento de la presión del agua en el sustrato, mientras que en climas tendientes a la aridez, como los mediterráneos, semiáridos o áridos, la erosión hídrica es muy intensa, dado que las precipitaciones, aunque escasas y de corta duración, tienen gran intensidad. Finalmente,

dentro de un mismo contexto geológico y climático, los desmontes y los terraplenes constituyen dos mundos aparte, dado que los primeros dejan expuestos sustratos geológicos de muy distinta naturaleza mientras que los segundos se construyen a partir de materiales ‘sueltos’, cuyas características físicas, aún compactados, les hace muy diferentes a los desmontes.

En España, las principales limitaciones geomorfológicas a la restauración ecológica tienen lugar cuando se solapan en un mismo territorio el clima mediterráneo semiárido, con precipitaciones escasas pero intensas, y litologías no consolidadas o débilmente consolidadas (tales como arenas, limos, arcillas, margas o yesos), lo que resulta en procesos de erosión hídrica muy intensa (ver Figura 3).

II. REVISIÓN DEL CONOCIMIENTO

Existen dos grandes bloques de antecedentes bibliográficos sobre los aspectos tratados en este capítulo. Por un lado se sitúan los que podríamos denominar ‘tradicionales’ o ‘convencionales’, dejando claro que esta clasificación ni tiene carácter peyorativo ni les resta validez, pues constituyen el punto de partida para otros enfoques.

Éstos pueden tener, a su vez, naturaleza hidrológica o geotécnica. Es preciso explicar que este capítulo intenta sintetizar los aspectos esenciales de los mismos, pero en ningún caso intenta incorporar una revisión detallada sobre ellos, dado que están ampliamente desarrollados en muy diversas publicaciones. De ellas, se ofrece una selección de referencias útiles en castellano.

Así las cosas, para el control del drenaje superficial (escorrentía y sus caudales punta), aspecto fundamental en la construcción de infraestructuras lineales, existe una instrucción de carreteras (5.2-1C) de obligado cumplimiento, basada en el método racional, con uso del número de curva en la estimación de las abstracciones iniciales (BOE, 1990). Ambos métodos están bien desarrollados en el manual, ya clásico, de TRAGSA (1994).

Respecto a los antecedentes sobre estabilidad geotécnica de taludes, dado que los movimientos gravitacionales (caídas, deslizamientos, flujos...) son el tipo de inestabilidad más común en el entorno de las infraestructuras lineales, la literatura sobre

este tipo de procesos es abundante. Algunos libros modernos en castellano son los de González Vallejo (2002) o Ayala y Andréu (2006).

En estos manuales se desarrollan las medidas habituales para la prevención y corrección de movimientos del terreno en taludes de infraestructuras lineales, tales como el empleo de bulones que ayudan a mantener la fricción entre bloques adyacentes de rocas, el uso de todo tipo de mallas, o la instalación de drenajes que evacúan el agua del interior de los taludes, evitando el aumento de su presión, y reduciendo por tanto la probabilidad de que ocurran inestabilidades.

El estudio y la adopción de medidas hidrológicas y geotécnicas que aquí hemos agrupado como ‘tradicionales’ o ‘convencionales’ pueden ser necesarios en una parte de los casos, ya sea como punto de partida o bien como solución definitiva. Pero, al mismo tiempo, es preciso señalar que el control o manejo de las dinámicas hidrológica y geomorfológica en el entorno de las infraestructuras lineales, realizado desde una aproximación ecológica, requiere ir más allá de esos planteamientos básicos. Incluso, puede diferir sustancialmente de los mismos. Ello es así porque el criterio que ha regido y rige las actuaciones sobre estas materias en las infraestructuras lineales ha tenido y tiene en cuenta, casi exclusivamente, factores de seguridad. Y si bien es obvio que este factor no puede descuidarse en absoluto, no es menos cierto que existen ya experiencias que

consiguen garantizar el objetivo de hacer posible un transporte seguro y eficiente de personas y bienes a lo largo del territorio, asegurando simultáneamente una disminución de sus efectos ecológicos, una integración ambiental eficiente y una reducción de los costes económicos (véase más adelante, por ejemplo, la solución del ‘talud Royal’).

En esta órbita se sitúa un segundo bloque de antecedentes bibliográficos que persigue introducir nuevas consideraciones geomorfológicas e hidrológicas para la integración ambiental y la restauración ecológica del entorno de infraestructuras lineales. Este enfoque requiere, en general, soluciones más imaginativas, más flexibles, y un análisis particularizado del contexto hidrológico y geomorfológico del lugar que se modifica. Todo lo cual se aleja, en cierto modo, del *modus operandi* dominante, caracterizado por “una forma rutinaria de hacer las cosas” (*business as usual*). En este sentido, el objetivo de este capítulo es proporcionar unas consideraciones generales, pero no por ello menos importantes, que permitan ‘re-pensar’ los proyectos de diseño, construcción y restauración de infraestructuras lineales, desde una perspectiva que considere como conjunto esencial de las mismas su dinámica geomorfológica e hidrológica.

Para abordar ese enfoque, la revisión del conocimiento no puede ceñirse a trabajos en castellano, por ser muy escasos, y parte de una serie de estudios realizados desde las décadas de 1960 y 1970 en Estados Unidos. Éstos abordan cuestiones sobre cuantificación de los procesos de escorrentía, erosión y sedimentación hídricas en taludes de infraestructuras lineales, y sobre la adopción de medidas para su control. Inicialmente los trabajos consistieron en una aplicación de la experiencia adquirida sobre erosión en tierras agrícolas, como la Ecuación Universal de Pérdidas del Suelo (USLE), que luego fueron completados con estudios experimentales *ad hoc* (Diseker & Richardson, 1961; 1962; Diseker & Sheridan, 1971; Meyer *et al.*, 1971; Meyer & Römkens, 1976). Posteriormente estos trabajos tuvieron un mayor desarrollo, de nuevo en Estados Unidos, a partir de la aprobación en 1972 de la *Clear Water Act*. Esta ley se dictó para proteger la calidad de las aguas continentales y los ecosistemas acuáticos de la emisión de escorrentía y sedimentos desde las denominadas zonas ‘construidas’ (minas, carreteras, urbanizaciones...) hacia los cauces naturales.

En el marco de la *Clear Water Act*, los estudios se refirieron inicialmente a los efectos hidrológicos debidos a la construcción de pistas y carreteras forestales (Megahan, 1977; Reid y Dunne, 1984; Montgomery, 1994; Gucinski *et al.*, 2000). La importancia

de estos trabajos daría lugar, en el año 2001, a la publicación de un monográfico especial de la revista *Earth Surface Processes and Landforms* sobre los efectos hidrológicos y geomorfológicos de las carreteras forestales (Luce y Wemple, 2001).

En paralelo al estudio de los efectos geomorfológico e hidrológico de las pistas forestales se fueron desarrollando trabajos que abordan, específicamente, la temática geomorfológica en el ámbito de las carreteras y las vías rápidas. Alguno de estos trabajos tiene más de 40 años (Parker y Jenne, 1967), y otros son bastante más recientes (Haigh, 1985; Al-Homoud *et al.*, 1999; Nyssen *et al.*, 2002).

La publicación de soluciones para el control efectivo de la erosión y la sedimentación desde el ámbito general de zonas sujetas a movimientos de tierras, o ‘zonas construidas’ es común, de nuevo, en EEUU (Gray y Sotir, 1996; Fifield, 2004; Hogan y Drake, 2009; Bugosh, 2006; y en general todo lo relacionado con la *International Erosion Control Association*, IECA, <http://www.ieca.org/>). De manera específica, la mayoría de los estados de ese país cuenta con manuales e instrucciones detalladas sobre el control de la erosión y sobre el resto de los aspectos tratados en este capítulo (véase, a modo de ejemplo, WSDOT, 2010).

A su vez, cabe destacar que algunos trabajos recientes están desarrollando análisis sobre la calidad de las aguas procedentes de la escorrentía de las carreteras (Riley *et al.*, 2008).

Sin embargo, en España, los temas sobre cuantificación de los procesos de escorrentía, erosión y sedimentación hídricas en taludes de infraestructuras lineales, y la búsqueda de medidas de control eficaces, pueden considerarse como líneas de trabajo (tanto desde un punto de vista profesional como desde la investigación) muy poco desarrolladas. Ello puede ser debido, quizás, a la inexistencia de normativas similares a la *Clear Water Act*. En todo caso, la guía para la elaboración de estudios de impacto ambiental de carreteras y ferrocarriles (MOPU, 1989) sintetiza bien los aspectos clave que deben abordarse en referencia a los aspectos tratados en este capítulo (recogidos allí bajo los epígrafes de geología, geomorfología, hidrología y suelos). Y otra serie de trabajos más específicos constituyen ya un catálogo de antecedentes de interés en nuestro país (Arnáez y Larrea, 1995; Andrés y Jorba, 2000; Navarro, 2002; Bochet y García-Fayos, 2004; Bochet *et al.*, 2007a, 2007b, 2010; Barbero *et al.*, 2009a, 2009b).

III. INCIDENCIA DE LOS PROCESOS GEOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS ACTIVOS SOBRE LAS INFRAESTRUCTURAS: RIESGOS NATURALES

Si bien la construcción de infraestructuras lineales tiene como consecuencia el desencadenamiento de toda una serie de procesos geomorfológicos activos (que serán tratados en el siguiente apartado), lo cierto es que existen posibles afecciones de procesos geológicos e hidrológicos activos cuya ocurrencia no está asociada, en principio, ni a las infraestructuras lineales ni a los efectos de su construcción. Es el caso de terremotos, erupciones volcánicas, grandes deslizamientos de laderas o procesos de erosión o inundación que afectan a las infraestructuras lineales, sin que la construcción de estas últimas tenga influencia alguna en los primeros.

La predicción y prevención de este tipo de afecciones, no inducidas por la construcción de carreteras y ferrocarriles, debería formar parte de un tipo de estudios específicos sobre riesgos geológicos y naturales, desarrollados en las fases iniciales de consideración de alternativas y de diseño de esas infraestructuras lineales. Este tipo de análisis no se considera en este manual, por superar los objetivos del mismo, y se emplaza al usuario a utilizar otras guías que los tratan en profundidad. Véanse, por ejemplo, en castellano y recientes: Ayala y Olcina (2002), Aramburu *et al.* (2006), Keller y Blodgett (2007) o Regueiro (2008).

IV. INCIDENCIA DE LAS INFRAESTRUCTURAS SOBRE EL MEDIO: IMPACTO GEOMORFOLÓGICO E HIDROLÓGICO

1. Las causas

Las modificaciones que introducen las infraestructuras lineales sobre las características geológicas, geomorfológicas, edáficas e hidrológicas pueden analizarse a dos niveles: a escala de ladera, por variación de las condiciones físicas locales de los nuevos taludes creados; y a escala de paisaje, por alteración de los flujos y los procesos que operan en el entorno de las infraestructuras.

a. Modificaciones de las condiciones geomorfológicas e hidrológicas locales.

El acabado final de los taludes de las infraestructuras lineales transforma una serie de factores que favorecen su inestabilidad geomorfológica, tales como producir un aumento de la pendiente, cortar niveles freáticos y modificar las propiedades físicas de los sustratos expuestos, entre otros.

Ciertamente, la práctica constructiva de infraestructuras lineales lleva aparejada un aumento de la pendiente local de una buena parte del territorio modificado. La alteración de este factor, por sí sólo, contribuye a aumentar la inestabilidad de los nuevos taludes creados. En otros casos, sin embargo, puede producirse una disminución de la pendiente,

como ocurre en las propias plataformas o en algunos terraplenes.

A su vez, una buena parte de las excavaciones asociadas a la construcción de infraestructuras cortan formaciones geológicas que almacenan y transmiten agua, lo que origina surgencias y rezumes en los desmontes. Esta circunstancia, que podría parecer una ventaja para la restauración ecológica en ambientes semiáridos, acaba convirtiéndose en la mayor parte de los casos en un problema, porque acelera la actividad geomorfológica de los desmontes. Se desencadenan así distintos tipos de movimientos gravitacionales, los cuales aparecen recogidos en la literatura como *seepage erosion*. La experiencia muestra cómo la previsión de afectar a la dinámica de las aguas subterráneas es uno de los aspectos menos considerados y más difíciles de controlar en la construcción de carreteras y ferrocarriles (Figuras 4 y 5).



Figura 4. Cabecera de deslizamiento (a) y derrubios movilizados (b) en un desmonte de carretera, a favor de una surgencia de agua (c) producida en el contacto entre una roca impermeable (d) y unos cantos y bloques permeables (e), correspondientes a un depósito de abanico aluvial (Foto: J.F. Martín Duque).



Figura 5. Ejemplo de seepage erosion en un desmonte construido sobre materiales arenosos (Foto: J. Vázquez).

De manera adicional, se modifican las propiedades físicas de las nuevas superficies expuestas, sobre todo en el caso de la construcción de desmontes. Así por ejemplo, los procesos de excavación originan procesos de ‘descompresión’ (descompactación y ‘esponjado’ en los sustratos expuestos), como

resultado de la disminución brusca de las presiones litostáticas confinantes, lo que favorece su fragmentación e inestabilidad. Este fenómeno es muy evidente cuando se excavan macizos rocosos. Y si se construyen desmontes sobre rocas ‘blandas’, los acabados ‘estándar’ suelen generar superficies lisas y compactadas, lo que tiene como consecuencia innumerables efectos limitantes para la restauración (como por ejemplo una erosión hídrica severa), los cuales se desarrollan en el epígrafe 2.a de este capítulo.

b. Modificaciones de las condiciones geomorfológicas e hidrológicas del entorno

La consecuencia hidrológica más evidente de la construcción de infraestructuras lineales es lo que se conoce como ‘efecto barrera’. Los trazados de carreteras y ferrocarriles se convierten así en toda una red de barreras hidrológicas longitudinales que modifican la dinámica hidrológica superficial y subterránea previa. Ello produce la intercepción, desviación y descarga concentrada de la escorrentía. Las cunetas interceptan y desvían la escorrentía local, que finalmente es liberada, de manera concentrada, en los colectores que constituyen los drenajes de las infraestructuras. La Figura 6 ilustra gráficamente este efecto.

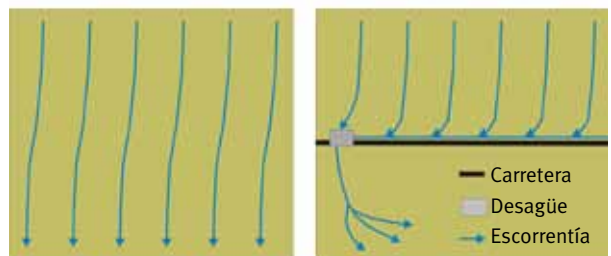


Figura 6. Izquierda, ejemplo de escorrentía sin infraestructura lineal; derecha, ejemplo de la misma escorrentía con infraestructura lineal. Redibujado a partir de un esquema de Lenore Fahrig (inédito).

Otro efecto bien conocido es la formación de encharcamientos debidos a ese mismo ‘efecto barrera’, en este caso más bien ‘efecto presa’, que ocasiona la infraestructura al interceptar las líneas de flujo de circulación hidrológica (tanto superficial como subterránea; Figura 7).



Figura 7. Ejemplo de encharcamiento ocasionado por el efecto 'barrera presa' que ejerce la carretera sobre el flujo hidrológico superficial y subterráneo procedente de la ladera de la derecha de la imagen (Foto: J.F. Martín Duque).

Una consecuencia más es la modificación que se produce en la recarga de los acuíferos como consecuencia de las alteraciones de la dinámica hidrológica superficial y subterránea antes descritas.

2. Los efectos. Impactos geomorfológicos e hidrológicos habituales

Al igual que las causas, los impactos geomorfológicos e hidrológicos ocasionados por la construcción de las infraestructuras lineales pueden agruparse en dos grandes tipologías: efectos sobre el propio ámbito de las construcciones (*on-site effects*) y efectos sobre el entorno de las construcciones (*off-site effects*).

a. Efectos on-site

Las consecuencias que produce la modificación de la pendiente y la alteración de las propiedades físicas e hidrológicas de los nuevos sustratos expuestos en los taludes, fundamentalmente en los desmontes, se manifiestan, generalmente, en un aumento de la escorrentía y en una mayor intensidad de los procesos erosivos. Ello limita el desarrollo del suelo y el establecimiento de la vegetación, dificultando los procesos de restauración ecológica (véanse capítulos sobre suelo y vegetación).

Estos procesos son particularmente severos en ambientes de clima mediterráneo semiárido, donde el exceso de escorrentía dificulta mucho su control y manejo. Y se traduce en una baja disponibilidad hídrica para las plantas, lo que condiciona extraordinariamente su germinación y establecimiento (Bochet *et al.*, 2007).

Uno de los efectos más evidentes de la erosión hídrica sobre los desmontes de carreteras y ferrocarriles es la emisión de sedimentos desde los mismos, que se acumulan a su pie, o en las distintas superficies colectoras, pavimentadas o no (Figura 8). Estos fenómenos, si bien en la mayoría de los casos no constituyen un riesgo para la seguridad vial, sí que afectan con frecuencia a bienes y servicios, y suponen uno de los principales costes de mantenimiento de las infraestructuras lineales. Por otro lado, algunos avances e inversiones relevantes en las vías, como puede ser el uso de pavimentos o asfaltos permeables, o de nuevos materiales, pueden fracasar como consecuencia del efecto impermeabilizante que tienen las emisiones de materiales finos procedentes de la erosión de los taludes, transportados hasta allí por la acción del agua o del viento.



Figura 8. Acumulación de sedimentos procedentes de un desmonte, que prácticamente colmata una cuneta (Foto: J.F. Martín Duque).

Si la erosión en los taludes se convierte en el proceso dominante, la restauración se verá comprometida. Se puede afirmar que sin un 'manejo' adecuado de la dinámica superficial los taludes, que proporcione a los mismos una estabilidad geomorfológica suficiente, la mayoría de los planes de restauración y de revegetación están abocados al fracaso (Figura 9).



Figura 9. Deslizamientos superficiales del terreno en desmontes de una autopista, que desbaratan las actuaciones de revegetación realizadas sobre los mismos (Foto: J.F. Martín Duque).

b. Efectos off-site

Constituyen, probablemente, las consecuencias más adversas y menos estudiadas y abordadas desde un punto de vista técnico y de investigación, precisamente por situarse ‘fuera’ del ámbito de las carreteras y los ferrocarriles. La mayor parte de estos impactos se debe al efecto que tienen las infraestructuras lineales interceptando, desviando y concentrando los flujos de escorrentía y sedimentos de su entorno, pero también procedentes del ámbito de las propias vías y taludes, y emitiendo los mismos de manera concentrada.

Un impacto común sobre el entorno consiste en la formación de cárcavas a la salida de los drenajes de las infraestructuras (Figuras 10 y 11). Las principales causas de formación de estas morfologías erosivas se deben a la concentración de flujos superficiales a partir de los sistemas de desagüe, que liberan de manera concentrada el drenaje de cuencas que han incrementado su área (Montgomery, 1994; Nyssen *et al.*, 2002) (Figura 10). Pero también al evacuar, siempre de manera concentrada, la escorrentía generada en el interior de las construcciones y su entorno (Figura 11).

La formación de estas cárcavas, pero también la emisión de sedimentos que tiene lugar a partir de las mismas, afectan de manera negativa a la calidad de los suelos del entorno de las infraestructuras, por aterramiento de los perfiles de suelo fértil en zonas de depósito, produciendo una inversión edáfica. Todo ello supone una merma de su calidad y capacidad agrícola, forestal y ecológica.



Figura 10. Formación de una cárcava a la salida de una bajante sobre un terraplén. Las cunetas de una autovía interceptan y desvían la escorrentía local, que finalmente es liberada de manera concentrada en este punto, con el consiguiente efecto erosivo (Foto: J.F. Martín Duque).



Figura 11. Formación de una cárcava a la salida de una cuneta que recoge la escorrentía procedente del ámbito de una autopista (vías y desmontes). (Foto: J.F. Martín Duque).

El efecto barrera o presa, y el desagüe repentino de escorrentía a través de colectores, puede dar lugar a inundaciones con efectos catastróficos aguas abajo. La conjunción del efecto barrera y de un funcionamiento deficiente de los desagües en la carretera M-45 fue una de las hipótesis consideradas en unas inundaciones ocurridas en septiembre de 2008 en el municipio madrileño de Coslada, con resultado de una persona muerta y considerables daños económicos.

El caso extremo de estas situaciones tiene lugar cuando se produce una rotura de terraplenes que han represado la escorrentía, lo que puede, de nuevo, tener efectos desastrosos. A modo de ejemplo, en septiembre de 1999 se produjo el desmoronamiento de un tramo de 200 metros de terraplén del ferrocarril Villalba-Ávila (entre sus puntos kilométricos 99 y 100), que actuó como presa en un aguacero. Ello tuvo graves secuelas aguas abajo (en la población

de El Herradón) e interrumpió el tráfico ferroviario entre Madrid y el noroeste peninsular durante casi un mes. Este suceso, así como otros similares, se describen en detalle en Díez (2003).

Finalmente, un impacto claramente adverso consiste en la emisión de escorrentía, pero sobre todo de sedimentos, a la red fluvial situada en el entorno de las infraestructuras. Y es que los sedimentos procedentes del ámbito de estas construcciones llegan con mucha frecuencia a las redes hidrográficas más cercanas, ocasionando un claro impacto sobre los sistemas fluviales (que varían su morfología y dinámica) y sobre los ecosistemas acuáticos. Aunque en España faltan estudios en este sentido, todo parece indicar que las emisiones a los cursos fluviales desde taludes de carreteras y ferrocarriles pueden suponer una de las principales fuentes de sedimentos en muchas cuencas hidrográficas.

V. LA ADOPCIÓN DE SOLUCIONES DESDE ENFOQUES GEOMORFOLÓGICOS E HIDROLÓGICOS

1. Hacia una integración ambiental eficiente en las fases de planificación y diseño

Más allá de la adopción de medidas correctoras localizadas, está ampliamente demostrado que es en las fases de planificación y diseño donde puede realizarse la mejor integración ambiental posible de las infraestructuras lineales de transporte. Así las cosas, si hubiera que realizar una recomendación general, ésta consistiría en retomar la práctica del ‘análisis del lugar’ que ha caracterizado a los mejores proyectos de ingeniería a lo largo de la historia, utilizando precisamente el ingenio humano. Y ello frente a la práctica dominante, que tiende a imponer unas soluciones estándar para cualquier escenario, al margen de las características específicas del territorio.

Una correcta integración de los factores geológicos, geomorfológicos e hidrológicos debe evitar o minimizar la posibilidad de que las infraestructuras sean afectadas por procesos geológicos y geomorfológicos activos (no relacionados con la infraestructura). Todo ello mediante un análisis de peligrosidad y riesgo (Ayala y Olcina, 2002) que ayude a no situar las infraestructuras en lugares inadecuados desde esta perspectiva. Y no sólo con un objetivo de reducir la probabilidad de pérdidas

humanas, sino con la finalidad de reducir los costes económicos posteriores en obras de defensa y en medidas correctoras.

Para ello se deberían identificar y evaluar áreas susceptibles de estar sujetas a procesos de erosión (Figura 12), deslizamientos, terremotos, subsidencias..., u otros peligros geológicos que supongan una amenaza seria a las infraestructuras, y que por tanto hagan incompatible su ubicación en esas zonas.

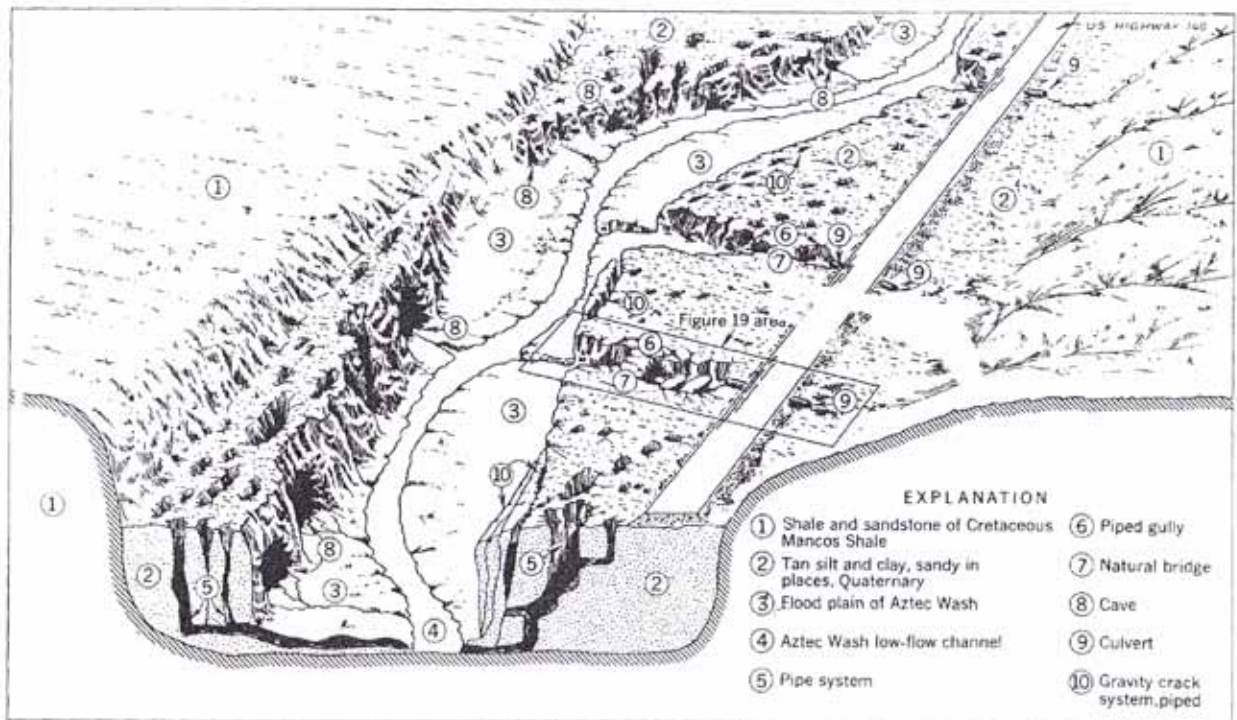


Figura 12. Bloque diagrama idealizado que muestra los daños producidos a la autopista 140 (en el suroeste de Colorado, Estados Unidos), en un tramo en el que atraviesa un fondo de valle muy afectado por procesos de *piping* y erosión en cárcavas. En Parker y Jenne (1967).

Una de las recomendaciones más efectivas para integrar correctamente los factores geomorfológicos e hidrológicos consiste en garantizar una mínima afectación a la hidrología superficial y subterránea a escala de paisaje, aumentando siempre, en la medida de lo posible, la ‘permeabilidad’ de los corredores de las infraestructuras. Por ejemplo, mediante la construcción del mayor número posible de viaductos y drenajes.

Dentro de este epígrafe de ‘integración ambiental’ merecen un comentario específico las constantes obras de ‘mejora’ (ampliar anchura, arcenes, reducir curvas...) de carreteras locales, muy poco transitadas o que discurren por espacios naturales o rurales remotos. Bajo el argumento de garantizar un transporte seguro y eficiente ‘en cualquier lugar’, es frecuente modificar severamente la topografía local, exponer sustratos no meteorizados que ocasionan un impacto ecológico y paisajístico significativo, verter derrubios a cauces fluviales y afectar a formaciones geomorfológicas relevantes o a elementos esenciales de paisajes rurales valiosos (como vallados centenarios de piedra o árboles). Todo ello origina una pérdida del carácter del paisaje en el que se insertan las propias vías, y del cual forman parte de manera indisoluble. Así se reconoce en la catalogación de

‘carreteras escénicas’ en países como Estados Unidos (*scenic byways*), o en la consideración que tienen estas vías en la mayoría de los países del norte de Europa y de América, en los que no cabe hablar de una falta de preocupación por la seguridad de las personas. Su forma de actuar, en estos casos, podría tomarse como ejemplo, muy alejado de demasiadas prácticas que ponen de manifiesto una escasísima sensibilidad hacia el territorio que se transforma.

Pasando ya a una escala de ‘talud’, se deberían considerar las dinámicas geomorfológica e hidrológica locales, desde su análisis y comprensión, como factores esenciales en el diseño y construcción de desmontes y terraplenes. Ello podría recomendar, en la medida de lo posible, el remodelado de los taludes, variando sus perfiles rectilíneos por otros geomorfológicamente más estables (de topografía normalmente compleja), según dicte el análisis geomorfológico local.

Los préstamos, vertederos y bermas de tierra deberían merecer un tratamiento específico dentro de la integración ambiental de las infraestructuras lineales. Para la restauración de préstamos pueden seguirse, en realidad, los mismos criterios que rigen las mejores prácticas para la restauración ecológica

de terrenos afectados por minería de superficie. En Nicolau (2003) y en Martín Duque *et al.* (2010) puede encontrarse una síntesis de las distintas aproximaciones y de la literatura internacional más relevante sobre estos temas. Bugosh (2006) describe la que puede considerarse una de las aproximaciones más avanzadas a nivel mundial a este respecto (método GeoFluv y *software* Natural Regrade).

Tanto las bermas de tierra (*earth berms*), aunque se construyen fundamentalmente para compensar movimientos de tierra y como pantallas acústicas o visuales, como las escombreras, podrían incorporar también criterios geomorfológicos e hidrológicos en su diseño y construcción, en lugar de ceñirse a unas pocas tipologías constructivas, muy básicas y estandarizadas a nivel global. Todo ello no con un fin exclusivamente visual o estético, sino funcional, tratando de garantizar la máxima integración ambiental y su estabilidad geomorfológica a largo plazo. El libro de Schor y Gray (2007) ofrece un método esencialmente visual sobre las posibilidades de diseño de estas formas del terreno, mientras que en Bugosh (2006) se puede encontrar un enfoque más funcional, basado en principios de la geomorfología fluvial.

Finalmente, si bien es cierto que el proceso de construcción de infraestructuras lineales puede destruir o dañar elementos geológicos y geomorfológicos de interés, no es menos cierto que este proceso constructivo puede crear exposiciones y afloramientos de enorme utilidad donde antes no existían. No identificar los puntos y lugares de interés geológico que se generan con frecuencia durante los procesos de construcción de carreteras y ferrocarriles constituye uno de los errores más habituales de esta actividad humana. El desinterés hacia este aspecto suele afectar también a las fases de restauración, basadas exclusivamente, en muchos casos, en tratar de establecer una cubierta vegetal a toda costa, lo que puede destruir elementos geológicos de gran valor educativo, científico y turístico.

En Estados Unidos existe una amplia tradición en la identificación y puesta en valor, mediante materiales interpretativos (paneles, miradores y hasta centros de visitantes), de estructuras y cortes geológicos de gran valor que quedan expuestos a partir de la construcción de infraestructuras lineales. Uno de los ejemplos más emblemáticos lo constituye el corte geológico conocido como *Sideling Hill Road Cut*. En este caso, las obras de una autopista dejaron expuesta, de manera espectacular, la estructura de un sinclinal colgado en una de las alineaciones

montañosas de los Apalaches (Figura 13). El valor de esta exposición es tal que cuenta con un pequeño centro de visitantes y con abundante material interpretativo *ad hoc*, constituyendo un recurso didáctico y turístico indudable.



Figura 13. Superior: fotografía aérea oblicua del Sideling Hill Road Cut. El corte realizado por la autopista permite reconocer la estructura interior de un sinclinal colgado, el cual forma la alineación montañosa de la imagen. (Foto: Maryland Geological Survey, 1998). Inferior: detalle del corte y de la estructura geológica desde una plataforma habilitada para su observación (Foto: J.F. Martín Duque).

En el Reino Unido, el corte *Claverley Road Cutting* está reconocido como patrimonio geológico relevante para el estudio de ambientes fluviales del Triásico (Ellis, 1996). Y en España, si bien existen algunos antecedentes de interés, lo cierto es que éstos aún tienen un carácter aislado, y que apenas existe tradición en este sentido. Es el caso del ‘pliegue Zaleski’, recogido incluso en la guía metodológica para la elaboración de estudios de impacto ambiental de carreteras y ferrocarriles (MOPU, 1989, pág. 117). Un ejemplo sobresaliente lo constituye el trabajo realizado en torno al Túnel Ordovícico de Ribadesella (perteneciente a la Autovía del Cantábrico). En él, la integración entre el desarrollo de las obras, las investigaciones científicas y la divulgación de la información obtenida (con una exposición permanente en el Museo El Carmen de Ribadesella), constituye un ejemplo

modélico (ver Gutiérrez Marco y Bernárdez, 2003). Sin embargo, situaciones como la del túnel Ordovícico son aún muy aisladas en nuestro país, lo que lleva a desaprovechar, con demasiada frecuencia, toda una serie de oportunidades educativas, científicas y turísticas que se generan con la apertura de infraestructuras lineales.

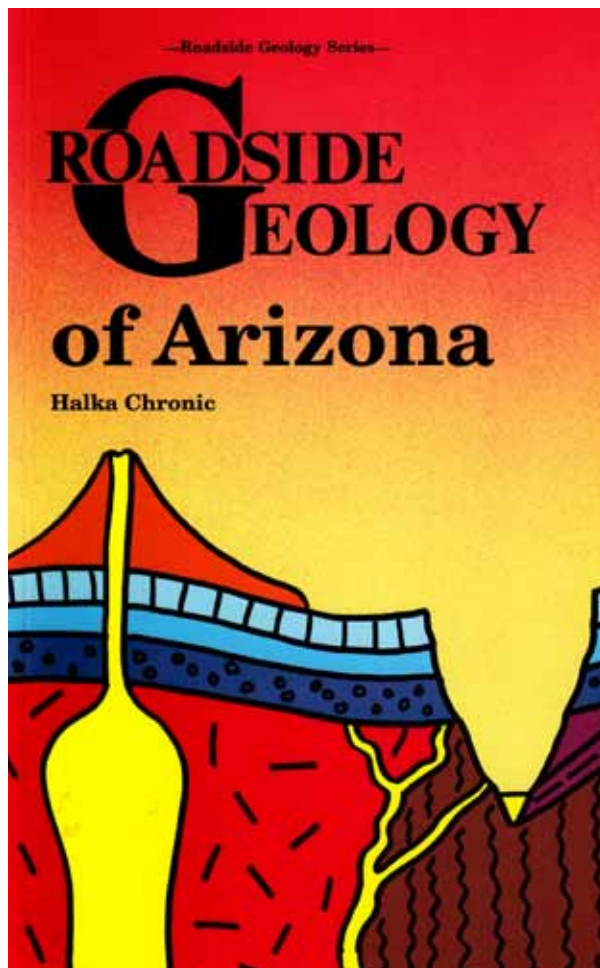


Figura 14. Portada del libro *Roadside Geology of Arizona*. Los libros de esta serie pueden encontrarse fácilmente en la mayoría de las áreas y zonas de servicio relacionados con el transporte por carretera de Estados Unidos.

El coste económico que supondría la adecuación de estos espacios podría ser mínimo, pues en muchos casos bastaría con un pequeño aparcamiento y un panel explicativo. Una recomendación esencial, a la hora de facilitar el acceso a tales lugares y permitir así un posible aprovechamiento ‘cultural’ de estas exposiciones, es la de garantizar la seguridad de las personas que puedan examinar los afloramientos, lo cual debería ser primordial. A modo de comentario final sobre la relación entre las carreteras y los lugares de interés geológico y geomorfológico, merece la pena destacar la iniciativa *Roadside*

Geology Series. Esta iniciativa, procedente de nuevo de Estados Unidos, consiste en una serie de libros editados para cada estado (Figura 14) en los que se explican e interpretan paisajes actuales y pasados sobre la base de lugares de interés situados “al lado de las carreteras”. Las carreteras se convierten así en el elemento estructurante y organizador de los contenidos.

2. Corrección de los efectos *on-site*

A diferencia de la restauración de otros espacios en los que ha habido una modificación simultánea del sustrato, del suelo y de la vegetación (por ejemplo minería), en los taludes de las infraestructuras lineales no es posible la reconstrucción de una nueva topografía, lo cual impone toda una serie de limitaciones de primer orden a la restauración. En todo caso, sí que es posible efectuar un remodelado y suavizado de los perfiles rectilíneos.

Pero lo cierto es que en un contexto ‘global’ apenas se llevan a cabo variaciones morfológicas de los taludes diseñados con criterios geotécnicos, de modo que el principal objetivo de la restauración va dirigido a revegetar las superficies directamente resultantes de la construcción de taludes. Todo ello a pesar de que, como ya se ha comentado, existan demasiados ejemplos de fallos en intentos de revegetación de estos espacios; sobre todo en desmontes sobre rocas no consolidadas bajo climas mediterráneos semiáridos.

Para prevenir efectos geomorfológicos e hidrológicos severos en los propios taludes de las infraestructuras lineales, la literatura recoge como una buena práctica, ciertamente esencial, evitar la entrada de escorrentía exterior (*run-on*) hacia el talud. Todo ello mediante medidas como la construcción de cunetas perimetrales efectivas (*cut-off drains*). Sin embargo, una vez que el flujo se concentra en estas cunetas, el potencial erosivo resultante de liberar dicha escorrentía (y el de infiltración, si no están pavimentadas), se incrementa considerablemente. Por este motivo, su conducción hacia el sistema de drenajes y cunetas, cuando el diseño lo recomiende, debería realizarse mediante los distintos tipos de bajantes que están diseñados para disipar la energía.

La prevención de los efectos derivados de la existencia de surgencias en los desmontes puede acometerse desde métodos tradicionales y contrastados, tales como drenar de manera controlada los niveles

permeables mediante alguno de los múltiples sistemas existentes (como tubos perforados), o mediante el uso de vegetación que cumpla la misma función, lo cual está menos ensayado.

Otra práctica beneficiosa consiste en aumentar la rugosidad de los desmontes. Pero mientras que en demasiados países, incluido España, aún se reivindica la construcción de taludes con apariencia lisa, que otorguen una (falsa) impresión de ‘buen acabado’ y de un trabajo ‘bien hecho’, se puede citar que, nada menos que en 1978, Wright y otros autores alertaban categóricamente sobre esa práctica perjudicial, la cual suele conducir a fallos en el establecimiento de la vegetación. Según señalan Wright *et al.* (1978), las superficies rugosas otorgan una apariencia ‘fea’ al profano, pero favorecen la infiltración de agua y ayudan a recolectar semillas y nutrientes, lo que acelera el establecimiento de la vegetación y por consiguiente disminuye la emisión de aguas y sedimentos a la red de drenaje. Un trabajo mucho más reciente (Petersen *et al.*, 2004), también pone de manifiesto cómo los lechos rugosos favorecen significativamente el establecimiento de la vegetación.

Este aspecto revela una constante contradicción, o una falta de claridad de objetivos, a la hora de acometer muchos proyectos de restauración, en los que no está claro desde el principio el aspecto y función que debe tener un talud de una infraestructura lineal. Las posturas y enfoques que van desde una aproximación meramente estética (proporcionar la más agradable experiencia visual para el conductor) hasta otra más ecológica, como la que se propone en este manual, no han logrado una conciliación. En esta discusión no habría que obviar que una mayor funcionalidad ecológica tiene unas mayores posibilidades de integración visual.

La reducción de la escorrentía y el incremento de la infiltración mediante procesos de descompactación o aumento de la rugosidad aparecen descritos como medidas efectivas en trabajos como Gray y Sotir (1996) o Hogan y Drake (2009).

Otras medidas de ‘sentido común’, pero que la dinámica de las obras puede dificultar, consisten en planificar las actividades de construcción y restauración en función de la meteorología del lugar, de modo que se minimicen los procesos erosivos, y en reducir el tiempo de exposición entre la construcción y la restauración de desmontes y terraplenes, de manera que se eviten o minimicen los procesos erosivos (Figura 15).



Figura 15. Erosión hídrica muy severa en terraplenes de una autovía. La paralización de las obras impidió el extendido de tierra vegetal y la revegetación durante un largo periodo de tiempo (Foto: J.F. Martín Duque).

3. Corrección de los efectos *off-site*

La adopción de un enfoque o aproximación ecológica que permita minimizar muchos de los efectos ambientales más habituales que tiene la construcción de carreteras y ferrocarriles, debería partir de un análisis y comprensión de la dinámica geomorfológica e hidrológica que tiene el territorio sobre el que se impone la infraestructura. En el caso de la hidrología, las estimaciones de volúmenes de escorrentía y de sus caudales punta, aunque imprescindibles para diseñar los drenajes, deberían completarse con análisis sobre su capacidad de erosión, transporte y sedimentación. Una comprensión y anticipación de los factores geomorfológicos e hidrológicos implicados, evitaría muchas de las habituales letanías de problemas que surgen tras la fase de construcción.

Para la corrección de los efectos geomorfológicos e hidrológicos *off-site*, la experiencia y la literatura destacan los múltiples beneficios que tiene aumentar la ‘permeabilidad’ hidrológica y territorial de las infraestructuras (por ejemplo, mediante la construcción de viaductos). Un caso interesante lo constituyen toda una serie de proyectos destinados a mejorar la permeabilidad de la autovía AP-7 frente a las avenidas.

Se debería, asimismo, evitar incrementar excesivamente el área de las cuencas hidrográficas que drenan hacia los distintos colectores que atraviesan las infraestructuras, impidiendo en la medida de lo posible la desviación de escorrentía desde unas cuencas hidrográficas a otras. También se debería limitar la distancia entre los sistemas de cunetas y



Lugar de interés geológico excepcional (cabalgamiento o falla inversa), expuesto como consecuencia de unas obras de ampliación de la carretera N-110, en el borde norte del Sistema Central (proximidades de la localidad de Villacastín). El material grisáceo situado sobre la línea oblicua (falla) son granitoides de edad Paleozoico que ‘cabalgan’ sobre los materiales anaranjados y ocreos correspondientes a arenas arcósicas de edad Cenozoico (Foto: Alberto Carrera). En Díez y Martín Duque (2005).



alcantarillas, con el objetivo de reducir la longitud de recorrido de la escorrentía.

Otras medidas efectivas consisten en dirigir el desagüe de los drenajes hacia zonas con una buena cubierta vegetal, bien existente o bien creada mediante canales revegetados. O bien canalizar las emisiones de escorrentía y sedimentos que atraviesan

o proceden de las infraestructuras hasta balsas de decantación o retención temporal, tanques de tormentas, diques de tierra o gaviones, o similares, a la salida de los drenajes (Figura 16). Opcionalmente, estas estructuras pueden incorporar un desagüe controlado y gradual de la escorrentía. Todo ello con el objetivo de laminar picos de avenidas y de evitar posibles roturas o colmataciones rápidas.



Figura 16. Izquierda: Ejemplo de una balsa de decantación de sedimentos y de contención de vertidos accidentales, conectada al sistema de drenaje de la autopista Radial 4 (Madrid). En la imagen pueden observarse, además de la infraestructura lineal: la bajante desde el terraplén, la cuneta que conduce la escorrentía y los sedimentos a la balsa; el canal de entrada; la balsa; y el vertedero de la balsa a la red fluvial del entorno (arroyo Salinas). Derecha: Detalle de la misma balsa, en el que se aprecian mejor alguno de los elementos que la componen: el canal de entrada, la rejilla de desbaste, la balsa, el canal de vertido y el arroyo Salinas (al fondo) (Fotos: Javier Martínez de Castilla Colomer, Ferroviario – Agromán SA).

La literatura especializada propone evitar construir cunetas con un diseño convencional con perfil “en V”, y construirlas con fondo plano, sobre todo si no están pavimentadas, ya que las primeras concentran y aceleran el flujo de agua y favorecen la erosión; bien en la propia cuneta (si no está cementada), bien cuando se libera la escorrentía hacia fuera del ámbito de la infraestructura. Otras recomendaciones aún más completas incluirían diseñar las cunetas sobre la base de principios de la geomorfología fluvial (ver Bugosh, 2006) y utilizar pavimentos

permeables, siempre previendo los posibles efectos de los mismos.

Como síntesis, podría decirse que habría que reducir al máximo posible la interceptación, concentración y desviación de la escorrentía producida por la construcción de carreteras. Además, la escorrentía evacuada debería distribuirse espacial y temporalmente, buscando siempre incrementar la infiltración, y evitando dirigir los desagües hacia laderas sin protección frente a la erosión hídrica.

VI. UN EJEMPLO ILUSTRATIVO. LAS LIMITACIONES DE LAS SOLUCIONES ‘ESTÁNDAR’

El siguiente caso (descrito en detalle en Díez Herrero *et al.*, 2009) puede servir para ilustrar la dicotomía permanente que existe entre una forma convencional de abordar el tratamiento de taludes de carreteras (el ya referido ‘*business as usual*’) y la existencia de otras posibilidades, apenas exploradas, que podrían conseguir solucionar problemas de manera más eficiente y con una mayor integración ambiental.

La carretera SG-312, denominada localmente “Cuesta de los Hoyos”, consiste en una vía de doble carril que bordea la ciudad histórica de Segovia por el suroeste, constituyendo una de las principales vías de comunicación de su entorno. Dicha carretera discurre, a modo de escalón, entre el fondo de un pequeño valle (del arroyo Clamores) y una ladera desarrollada sobre rocas carbonáticas.

Las obras de construcción de esta carretera, y de sus sucesivos arreglos y ensanches, han conformado un escarpe continuo en uno de los márgenes de la vía. Este escarpe, casi vertical, ha favorecido la ocurrencia de sucesivos procesos de caídas, desprendimientos, vuelcos y colapsos de rocas, cuya interferencia con el tráfico rodado ha sido muy frecuente. De hecho, ha existido aquí desde antiguo la característica señal de tráfico que indica ‘peligro por desprendimientos’. En el año 2003, la circulación por esta carretera estuvo cortada debido a las obras de estabilización de los taludes, como consecuencia de dos importantes desprendimientos de rocas ocurridos los meses de mayo y agosto de ese mismo año, uno de los cuales movilizó más de 20 toneladas de rocas. Tras ese desprendimiento, y cuando apenas habían transcurrido 25 días de su apertura, la carretera tuvo que ser cortada de nuevo el 31 de agosto de 2003, tras otro desprendimiento.

La solución de estabilización consistió en aplicar a todo el cortado rocoso distintos tipos de malla talud (Figura 17), cuyo importe total fue de 900.000 euros. Si bien la medida correctora puede ser efectiva para pequeños desprendimientos, no lo es para otros de mayor entidad (puesto que la solución no logra estabilizar grandes bloques inestables, como también puede verse en la Figura 17). Al mismo tiempo, se echa en falta aquí un tratamiento más adaptado al entorno tan singular en el que se integra la vía, con vistas recíprocas entre la carretera y el borde suroeste de la ciudad histórica (que es Patrimonio de la Humanidad desde 1985). La singularidad de

este enclave se completa por la circunstancia de que el talud objeto de tratamiento incluye cuevas aprovechadas como necrópolis, que fueron el cementerio judío de la ciudad. De hecho, la Fiscalía de la Audiencia Provincial de Segovia llegó a incoar diligencias informativas para tener conocimiento de la posible afección al medio ambiente de estas obras. Desde nuestro punto de vista, una acción ‘correctora’ más sensible y ecológica, más particularizada, y con un enfoque en el que hubiera predominado la integración ambiental de la obra en su entorno, podría haber propuesto, al menos en algunos sectores, la retirada y desmonte de todos aquellos sectores del talud que mostrasen mayor inestabilidad, eliminando el riesgo, pero dejando al descubierto afloramientos naturales de roca ‘sana’ (en la línea de la solución ‘talud Royal’, que se expondrá más adelante). En este sentido, la exposición de superficies coincidentes con diaclasas existentes habría favorecido un aspecto más ‘envejecido’, de manera natural, del desmonte, conservando así el carácter singular de este entorno.



Figura 17. Tratamiento con malla-talud efectuado en la Cuesta de Los Hoyos (Segovia) (Foto: Andrés Díez).

La confirmación del fracaso de una solución que no está adaptada a paliar la causa del problema se ha puesto de manifiesto con la ocurrencia de nuevos desprendimientos recientes, ocurridos el 22 de noviembre de 2010, que han motivado un nuevo cierre de la vía.

Muy cerca de la citada carretera SG-312 aparece otro ejemplo de ‘estabilización’ de un escarpe rocoso que ilustra, incluso mucho más claramente que el anterior, la dificultad para adoptar otro tipo de soluciones que no sean las rutinarias.

En este caso se trata de unos cantiles rocosos de la misma naturaleza que los recién descritos que, a modo de anfiteatro natural, circundan el Santuario de La Fuencisla (denominadas Peñas Grajeras), también en el entorno de la ciudad histórica de Segovia. Estos escarpes han sufrido al menos 5 desprendimientos de gran entidad en los últimos 500 años (Díez Herrero *et al.*, 2009), lo que indica un periodo de retorno de un evento de gran magnitud de entorno a 100 años. El suceso más reciente tuvo lugar la madrugada del 7 de abril de 2005, cuando al menos dos mil toneladas de roca se desprendieron de las Peñas Grajeras, destruyendo el edificio anexo al Santuario de la Fuencisla e hiriendo a tres religiosas que se encontraban dentro.

Dentro de estas mismas Peñas Grajeras, toda una serie de desprendimientos de menor entidad afectan también, de modo recurrente, a la carretera que discurre a su pie (carretera SG-310, o carretera de Arévalo). Así, unos pocos días después del suceso del 7 de abril de 2005, se produjo un nuevo desprendimiento de rocas en una zona muy próxima. En este caso, las rocas caídas alcanzaron a un vehículo que pasaba por la carretera en ese momento. Con posterioridad, otros desprendimientos (ocurridos el 13-05-2008 y el 20-07-2008), obligaron de nuevo a cortar algunas zonas a la circulación de personas y vehículos

En este caso se puede ser aún mucho más crítico con la actuación de estabilización y restauración que se produjo sobre las Peñas Grajeras con posterioridad al gran desprendimiento del 7 de abril de 2005. Tras el desprendimiento, un gran bloque quedó semisuspendido, separado del macizo rocoso por una grieta de 6 centímetros de anchura y de 15 metros de longitud, con riesgo de afectar al Santuario. Tras esa alarma, se produjo una intervención inmediata, que ‘bulonó’ el bloque inestable al macizo rocoso, realizándose con posterioridad un tratamiento con mortero proyectado (gunitado). En nuestra opinión,

hubiera sido mucho más conveniente proceder a desmontar el gran bloque inestable, lo que hubiera garantizado una gran estabilidad de la zona durante muchos años. Y hubiera permitido el afloramiento de roca natural, asegurando el mantenimiento de la calidad ecológica y visual del lugar. Como mínimo, esta posibilidad debería haberse contemplado como alternativa, dada su viabilidad y dado que los requerimientos técnicos (instalación de grúa) y de riesgo asumido eran similares en los dos casos. Sin embargo, en su lugar se procedió a realizar una actuación ‘convencional’ (Figura 18), como las que se aplican en cualquier talud de carretera, en un entorno de gran valor natural, histórico y religioso, y sin duda, en el paisaje más sobresaliente del entorno de la ciudad de Segovia. No en vano, esta zona forma parte de las vistas panorámicas de mayor calidad que se obtienen desde el mirador del Alcázar, vistas que se encuentran protegidas por una normativa pionera en nuestro país (del año 1941) a este respecto. La tabla 1 trata de comparar los efectos que hubiera tenido la alternativa de desmontar el bloque inestable con respecto a la solución finalmente adoptada.



Figura 18. Detalle del bulonado y gunitado elegido como solución técnica para la fijación de la placa de roca contigua a la zona desprendida (Foto: Andrés Díez).

Tabla 1

EFECTOS QUE HUBIERA TENIDO DESMONTAR EL GRAN BLOQUE INESTABLE	EFECTOS DE LA INTERVENCIÓN REALIZADA: BULONADO + GUNITA
Apariencia natural, manteniendo la calidad visual. Hubiera quedado un escarpe rocoso poco meteorizado, que se habría integrado progresivamente en el conjunto del cortado	Pérdida de valores estéticos. Aspecto artificial, de “cualquier desmonte de carretera”, en un entorno de calidad visual muy alta
Hubiera mantenido intactos los valores que hacen de esta localización un enclave singular	La singularidad del enclave se mantiene, pero se produce una pérdida clara del carácter del lugar
Se habrían mantenido los procesos geomorfológicos, hidrológicos y ecológicos (mantenimiento del hábitat natural para distintas especies rupícolas y de la biodiversidad...)	No mantiene los procesos geomorfológicos, hidrológicos y ecológicos. Sistema artificial, sin flujos naturales ni hábitats (gunitado)
Hubiera sido una solución resiliente y estable	No es una solución ni resiliente ni estable
No hubiera requerido mantenimiento (mucho mayor estabilidad). Más barato	Requiere mantenimiento (el problema queda ‘congelado’). Más caro

VII. EJEMPLOS DE ÉXITO (O DE CÓMO SERÁ EL FUTURO)

El hecho de que la práctica totalidad de los taludes de infraestructuras lineales se construyan actualmente siguiendo casi siempre los mismos métodos, no quiere decir que no existan ya otras propuestas y realidades que constituyen ejemplos exitosos, que apuntan hacia otra manera de hacer las cosas. Estas experiencias, aún muy minoritarias y tildadas de ‘poco realistas’, o ‘muy caras’ (lo cual contra-argumentaremos), muestra lo que serán, probablemente, los procedimientos de diseño y construcción de la mayor parte de los taludes de infraestructuras lineales en el futuro.

1. Máxima estabilidad e integración ambiental de desmontes rocosos: el talud Royal®

La práctica constructiva actual de desmontes de infraestructuras lineales sobre macizos rocosos puede considerarse bastante ‘traumática’ para el paisaje afectado, dado que ‘bisela’ por igual todo tipo de rocas y formas del terreno. Los nuevos desmontes suelen tener un gran impacto visual y ecológico, al tiempo que son fuente de todo tipo de inestabilidades. Frente a esta manera –casi única–, de observar la realidad de estos espacios, el talud Royal® (<http://www.geniegeologique.fr/>) creado y patentado por el geólogo francés Paul Royal, propone un método que consigue,

simultáneamente, otorgar la máxima estabilidad a los desmontes rocosos de infraestructuras lineales y conseguir una extraordinaria integración visual y ecológica.

El método consiste en analizar la evolución geomorfológica que sufren las mismas rocas objeto de corte en laderas de paisajes del entorno, que se consideran referentes, e ‘imprimir’ a los desmontes construidos dicha evolución desde el principio. En el fondo, el razonamiento es simple, y realiza la siguiente interpretación: si se construyera un desmonte rocoso sobre una localización determinada, y no se interviniera sobre él (estabilizándolo) durante un periodo de tiempo largo, éste sufriría una evolución geomorfológica. La interpretación de esa evolución no es imposible, sino perfectamente factible a partir del análisis de los referentes ya citados. Sobre esta base, la solución Royal ‘comprime’ esa evolución durante la fase constructiva, y otorga al desmonte rocoso, desde el principio, la evolución que sufriría a lo largo de un periodo de tiempo dilatado. El resultado es un talud muy estable, visualmente muy atractivo, y con las máximas ventajas ecológicas.

En síntesis, el método consiste en; (1) identificar las principales líneas de discontinuidad del macizo rocoso (fallas, diaclasas, planos de estratificación, planos de esquistosidad...), las cuales determinan la

inestabilidad; (2) comprender los patrones de esa inestabilidad, como tipo de proceso (caídas o deslizamientos...) y condiciones de ocurrencia; (3) conocer cuál es la respuesta diferencial (erosiva o evolutiva) de las distintas rocas que componen un talud (por ejemplo, una roca masiva puede soportar un talud vertical, pero un estrato de una roca sedimentaria intercalada no), e incorporar dicha respuesta en el diseño.

Los taludes Royal se construyen a partir de voladuras muy dirigidas o controladas (adaptadas a la estructura de los distintos tipos de rocas). Este proceso se completa mediante el desmonte particularizado de bloques inestables con retroexcavadora, y también de manera manual (Figura 19). El enfoque convencional interpreta que el procedimiento Royal es “mucho más caro” que los métodos actuales de construir desmontes, pero desde aquí nos atrevemos a afirmar que este método es “mucho más barato”, si consideramos el ahorro que se genera con el método Royal tanto en costes de medidas correctoras de tipo estructural (cunetas, bulones, mallas, empleo de gunita...) como en costes de mantenimiento al que están sujetos la mayoría de los taludes rocosos que son afectados por infraestructuras lineales (véase a este respecto el ejemplo descrito en el apartado VI de este capítulo).



Figura 19. Aspecto de un talud Royal en construcción, en el que se están eliminando los últimos bloques inestables de forma manual. Carretera RN57, en Luxeuil, Francia (Foto: Paul Royal).

Como ya se ha indicado, además del beneficio económico a largo plazo, los taludes Royal ofrecen enormes ventajas paisajísticas y ecológicas:

1. Constituyen teselas de paisaje visualmente atractivas, perfectamente integradas en el entorno. Ello es así porque ofrecen una configuración geomorfológica que es convergente ('natural', coherente) con la del entorno (Figura 20). También, y este destalle es esencial, porque al dejar

al descubierto las discontinuidades naturales de la roca, éstas ya tienen un determinado grado de meteorización, lo que consigue el admirable objetivo de construir un talud nuevo que ya parece 'muy viejo', por estar meteorizado (Figura 21).



Figura 20. Aspecto de un talud Royal en la carretera Azo, Cahors (Francia) (Foto Paul Royal).



Figura 21. Aspecto de un talud Royal en la carretera RD 105, Loire (Francia), en el que se observa la exposición de superficies ya meteorizadas en un desmonte de reciente construcción (Foto Paul Royal).

2. Se logra establecer una continuidad entre la geología y la geomorfología (es decir, la estructura del paisaje) del entorno y los desmontes construidos, al evitar contactos bruscos y artificiales entre ambos sistemas.
3. La configuración del desmonte ofrece las mayores ventajas ecológicas posibles, al no incluir elementos artificiales. A su vez, se maximiza la superficie total expuesta, dado que son taludes 'tridimensionales', que incrementan considerablemente su superficie final. Aún más, como existen distintas orientaciones y pendientes, se construye la base

para la existencia de una gran diversidad de hábitats. Finalmente, dada la ausencia de elementos artificiales y su gran estabilidad, su colonización natural por distintas especies de flora y fauna es rápida y espontánea.

El método Royal cuenta con una amplísima gama de ejemplos construidos en Francia, (accesibles a través de <http://www.geniegeologique.fr/>), y a fecha de 2010, con dos ejemplos en Cataluña: carretera C-16 D'Abdera a Bellver de Cerdanya y carretera C-15 en el tramo de Vilanova i la Geltru – Vilafranca del Penedes (Figura 22). Estos ejemplos son el resultado de iniciativas de gran interés, que llevan años buscando las mejores soluciones disponibles para minimizar el impacto de las infraestructuras viarias sobre el territorio (EGAM, S.L. 2000).



Figura 22. Aspecto de un talud Royal en construcción, en una autopista que atraviesa el macizo del Garraf (Cataluña). La Declaración de Impacto Ambiental de esta autopista puso como condición la construcción de este tipo de talud en esta zona. Nótese cómo las rocas de la izquierda de la imagen (rocas de falla, más erosionables) son remodeladas formando ya una pequeña depresión en el desmorte, alcanzando desde el principio la que será su más que previsible evolución, tal y como ocurre en las laderas ‘naturales’ del entorno (Foto: J.F. Martín Duque).

2. A la búsqueda de la máxima estabilidad e integración ambiental de desmontes sobre rocas no consolidadas: remodelados topográficos y aumento de la estabilidad física del sustrato

La construcción de desmontes sobre rocas no consolidadas (rocas ‘blandas’) no cuenta con un método de diseño y construcción tan sólido y coherente como el talud Royal, si bien existen iniciativas que apuntan en esa dirección.

En primer lugar, el Departamento de Transportes del estado de California, en Estados Unidos (Caltrans), sobre la base de la aproximación de Schor y Gray (2007), está diseñando y construyendo desmontes a partir de remodelados geomorfológicos que buscan una mayor estabilidad e integración ambiental en el entorno (Figura 23).

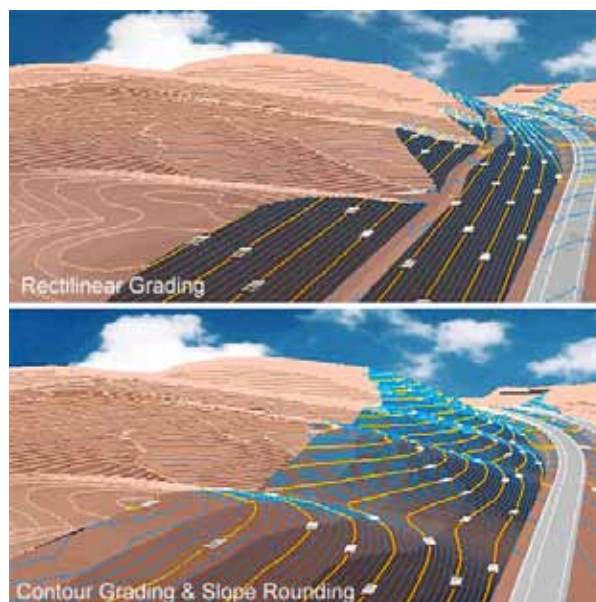


Figura 23. Comparativa entre un remodelado rectilíneo del terreno y otro que se adapta a las formas del paisaje, en el entorno de una infraestructura lineal. El segundo aumenta la superficie afectada, pero puede tener, según el escenario, mayores ventajas en términos de estabilidad e integración ambiental. Imagen accesible a través de: http://www.dot.ca.gov/hq/LandArch/ec/earthwork/contour_grading_rounding.htm.

Como ya se ha señalado a lo largo de todo el capítulo, en los desmontes de rocas no consolidadas construidos en ambientes semiáridos, la erosión hídrica constituye un problema central, que determina la estabilidad de los desmontes y el éxito de las restauraciones. En este sentido, además de consolidar y articular como método las posibilidades de remodelados topográficos sobre la base de los ejemplos expuestos, un equipo de investigación formado por personal de las Facultades de Geología y Biología de la Universidad Complutense de Madrid (UCM) y del servicio de I+D+i de la empresa constructora Obrascón Huarte Lain S.A (OHL) está desarrollando soluciones para reducir la erosión hídrica en estos escenarios mediante el manejo de procesos que intervienen en las propiedades físicas de los sustratos de los desmontes (descompactación, aumento de la rugosidad, estudio de la organización microtopográfica de la escorrentía y posibilidades de control de la misma sin elementos estructurales...) (Barbero *et al.*, 2009a, 2009b).

VIII. HACIA UN CAMBIO DE PARADIGMA

Las consideraciones y ejemplos descritos tratan de ilustrar el necesario cambio de paradigma que debería ocurrir con respecto al manejo y control de la dinámica geomorfológica e hidrológica en el entorno de las infraestructuras lineales. Ese cambio debería afectar a todas las fases: diseño, construcción, medias correctoras y de restauración, y requeriría tratar de ‘manejar’ y controlar las dinámicas geomorfológica e hidrológica de forma más adaptativa, y no basada exclusivamente en medidas estructurales convencionales. Ello permitiría lograr soluciones que combinen de manera más eficiente seguridad y beneficios ambientales y económicos.

A modo de ejemplo, la adopción de enfoques más ‘adaptativos’ en taludes sobre rocas no consolidadas en ambientes mediterráneos semiáridos podría incrementar, significativamente, el éxito de los procesos de revegetación y de restauración ecológica, y disminuir los costes de mantenimiento. La principal mejora derivada de tratar de comprender y manejar esos procesos geomorfológicos e hidrológicos desde un enfoque ecológico, se debe a la reducción en la merma de bienes y servicios ambientales en el

entorno de las infraestructuras. Se podría conseguir, así, disminuir las pérdidas de suelo por distintos procesos erosivos (en algunos casos severos, tales como formación de barrancos y cárcavas), así como por fenómenos de sedimentación (por ejemplo en forma de conos aluviales). Todo ello impediría a su vez la pérdida de suelos productivos desde un punto de vista agrícola, forestal y ecológico. Y se reducirían al mínimo las emisiones de sedimentos a las redes fluviales próximas, un problema ambiental muy serio que pasa inadvertido en España.

Respecto a los desmontes rocosos, el método del talud Royal sintetiza de manera magistral el enfoque adaptativo y el cambio de paradigma que aquí se defiende.

Prestar atención al interés científico, educativo y turístico de determinadas exposiciones (afloramientos) generados por la apertura de infraestructuras lineales, podría completar un abanico de medidas encaminadas a incrementar la integración ambiental de las infraestructuras lineales en su entorno.

IX. PREGUNTAS CLAVE

¿Cómo se puede cumplir la mejor integración geomorfológica e hidrológica posible de la infraestructura (formulación de distintas alternativas o diseño de la alternativa final)?

Realizar análisis geológicos, geomorfológicos e hidrológico regionales y a escala de paisaje, que permitan adaptar la infraestructura al territorio minimizando los riesgos naturales y los impactos.

¿Cómo se puede maximizar la ‘permeabilidad’ hidrológica de la infraestructura sobre el territorio, minimizando sus ‘efectos barrera’?

Explorar todas las posibilidades de diseño y construcción que sean más eficientes a la hora de favorecer la conectividad hidrológica a ambos lados de la infraestructura (viaductos, drenajes...).

¿Es viable técnica y económicamente modificar los perfiles topográficos rectilíneos de los taludes por otros geomorfológicamente más estables en esas localizaciones?

Evaluar la posibilidad de introducir variaciones a los diseños de taludes rectilíneos si se estima que otras morfologías, técnica y económicamente viables, son más estables en el largo plazo.

¿Cuáles son los factores abióticos que limitan la estabilidad geomorfológica de los taludes objeto de actuación, así como el establecimiento y desarrollo de suelos y vegetación? ¿Cómo se pueden ‘manejar’, de manera experta y desde un enfoque ecológico, dichos factores?

Realizar un análisis de esos factores a escala local, y utilizar la experiencia acumulada por el estado del conocimiento actual para su manejo desde una óptica ecológica. En función de las condiciones climáticas y particulares, ese manejo puede ir dirigido a aumentar la infiltración de agua (a partir de medidas como el aumento de la rugosidad o la descompactación), para evitar la erosión hídrica, o a todo lo contrario, es decir, a favorecer el drenaje, para evitar una saturación del subsuelo que provoque movimientos gravitacionales.

X. ERRORES HABITUALES

1. Imponer la infraestructura al territorio, en lugar de adaptarla o integrarla en el mismo, en la medida que los condicionantes técnicos y económicos de cada proyecto lo permitan.
2. Realizar obras en carreteras que discurren por paisajes rurales y naturales de gran valor ecológico y paisajístico, que bien son innecesarias, bien se realizan desde una perspectiva que no considera el carácter del territorio transformado. Para evitar estos errores se podría adoptar el enfoque que tienen, para este tipo de vías, los países del norte de Europa y de Norteamérica.
3. Aplicar soluciones estándar, para estabilizar taludes, sin considerar la calidad o fragilidad del entorno en el que se realiza dicha actuación.
4. No identificar, conservar, habilitar y promover la divulgación e interpretación de puntos, lugares y estructuras singulares, de interés geológico y geomorfológico, que quedan expuestos, con frecuencia, como consecuencia de la construcción de infraestructuras lineales.
5. No considerar la erosión hídrica como un factor de inestabilidad de primer orden en taludes que tienen materiales no compactados, y no incluir, por tanto, dicho factor en el diseño de los taludes.
6. No prever los efectos que tendrán los ‘cortes’ realizados en el terreno, en los procesos de construcción de infraestructuras, sobre posibles niveles permeables y saturados del subsuelo, ni las consecuencias que se derivarán sobre la inestabilidad de los taludes.
7. No considerar el efecto que introduce la variabilidad litológica dentro de un mismo talud a la hora de abordar su estabilización o restauración.
8. Realizar plantaciones de arbustos y matorrales en desmontes muy susceptibles a la erosión hídrica, lo que no consigue reducir la erosión, sino al contrario, la favorece debido al descenso del nivel de base local que introducen en el talud los procesos de ahoyado.

XI. REFERENCIAS

- Andrés, P, y M. Jorba. 2000. Mitigation strategies in some motorway embankments (Catalonia, Spain). *Restoration Ecology* 8:268–275.
- Arnáez, J., y V. Larrea. 1995. Erosion processes and rates on road-sides of hill-roads (Iberian System, La Rioja, Spain). *Physics and Chemistry of the Earth* 20(3-4):395-401.
- Al-Homoud, A.S., G. Prior, y A. Award. 1999. Modelling the effect of rainfall on instabilities of slopes along highways. *Environmental Geology* 37(4):317-325.
- Ayala, F.J., y J. Olcina, coordinadores. 2002. *Riesgos Naturales*. Ariel, Barcelona.
- Ayala, F.J. y F. Andréu. 2006. *Manual de Ingeniería de Taludes*. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid.
- Aramburu, M.P. et al. 2006. *Guía para la elaboración de estudios del Medio Físico*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid.
- Barbero, F., J.F. Martín Duque, S. de Alba, I. Mola, y L. Balaguer. 2009a. Caracterización y estabilidad geomorfológica de desmontes de infraestructuras lineales de la cuenca de Madrid. Páginas 1360-1371, J. Corominas y M. Hürlimann, editores, VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. CIMNE, Barcelona.
- Barbero, F., S. de Alba, J. Catalán, A. Martín Herrero, y J.F. Martín Duque. 2009b. Análisis de la morfología de las redes de drenaje desarrolladas sobre la superficie de desmontes: implicaciones sobre la respuesta erosiva y la estabilidad superficial del talud. Páginas 1348-1359, J. Corominas y M. Hürlimann, editores, VII Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables. CIMNE, Barcelona.
- Bochet, E., y P. García-Fayos. 2004. Factors Controlling Vegetation Establishment and Water Erosion on Motorway Slopes in Valencia, Spain. *Restoration Ecology* 12(2):166-174.
- Bochet, E., P. García-Fayos, B. Alborch, y J. Tormo. 2007a. Soil water availability effects on seed

- germination account for species segregation in semiarid roadslopes. *Plant Soil* 295:179–191.
- Bochet, E., P. García-Fayos, y J. Tormo. 2007b. Road slope revegetation in semiarid Mediterranean environments. Part I. Seed dispersal and spontaneous colonization. *Restoration Ecology* 15(1):88–96.
- Bochet, E., P. García-Fayos, y J. Tormo. 2010. How can we control erosion of roadslopes in semiarid Mediterranean areas? Soil improvement and native plant establishment. *Land Degradation and Development* 21:110–121.
- BOE, 1990. Orden de 14 de mayo de 1990 por la que se aprueba la Instrucción de Carreteras 5.2-1C, drenaje superficial, páginas 14036-14082. BOE del miércoles 23 de mayo de 1990. <http://www.boe.es/boe/dias/1990/05/23/pdfs/A14036-14082.pdf>
- Bugosh N. 2006. Basic Manual for Fluvial Geomorphic Review of Landform Designs. Office of Surface Mining of the US Department of the Interior, Denver.
- Díez, A. 2003. Geomorfología e Hidrología fluvial del río Alberche. Modelos y SIG para la gestión de riberas. Serie Tesis Doctorales nº 2. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Ministerio de Ciencia y Tecnología, Madrid. <http://www.ucm.es/BUCM/tesis/geo/ucm-t25361.pdf>
- Díez, A., y J.F. Martín Duque. 2005. Las raíces del paisaje. Condicionantes geológicos del territorio de Segovia. Junta de Castilla y León, Valladolid.
- Díez Herrero, A., L. Laín Huerta, J.F. Martín-Duque, y F. Vicente Rodado. 2009. A todo riesgo III. Convivir con los desastres geológicos cotidianos. Guión de la excursión científico-didáctica de la Semana de la Ciencia 2009. IGME, UCM e IE-Universidad, Madrid-Segovia. http://www.dendroavenidas.es/Riada/documentos/a_todo_riesgo_iii_2009.pdf
- Diseker, E.G., y E.C. Richardson. 1961. Roadside sediment production and control. *Transactions of the ASAE* 4(1): 62–68.
- Diseker, E.G., y E.C. Richardson. 1962. Erosion rates and control methods on highway cuts. *Transactions of the ASAE* 5(2):153–155.
- Diseker, E.G., y J.M. Sheridan. 1971. Predicting sediment yield from roadbanks. *Transactions of the ASAE* 14(1):102–105.
- EGAM, S.L. 2000. Recull d'accions per minimitzar l'impacte de les infraestructures viàries sobre el territori. Quaderns de Medi Ambient nº5. Departament de Medi Ambient. Generalitat de Catalunya. http://mediambient.gencat.net/cat/el_departament/actuacions_i_serveis/publicacions/quaderns_ma_catalunya.jsp
- Ellis, N.V., editor. 1996. An Introduction to the Geological Conservation Review. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough.
- Fifield, J.S. 2004. Designing for Effective Sediment and Erosion Control on Construction Sites. Forester Press, Santa Barbara, California.
- Forman, R.T.T. 2000. Estimate of the Area Affected Ecologically by the Road System in the United States. *Conservation Biology* 14(1):31–35.
- Forman, R.T.T., y L.E. Alexander. 1998. Roads and their major ecological effects. *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 29:207–231.
- González de Vallejo, L., coordinador. 2002. Ingeniería Geológica. Prentice Hall, Madrid.
- Graf, W. 1977. The rate law in fluvial geomorphology. *American Journal of Science* 27:178–191.
- Gray, D.H., y R.B. Sotir. 1996. Biotechnical and Soil Bioengineering Slope Stabilization. A practical guide for erosion control. John Wiley & Sons, New York.
- Gucinski, H., M. Furniss, R. Ziemer, y M. Brookes. 2000. Forest Roads: A Synthesis of Scientific Information. USDA, Forest Service. http://www.fs.fed.us/eng/road_mgt/science.pdf
- Gutiérrez-Marco, J.C., E. Bernárdez. 2003. Un tesoro geológico en la Autovía del Cantábrico. El túnel Ordovícico del Fabar en Ribadesella, Asturias. Libro-catálogo de la exposición homónima, Ministerio de Fomento, Madrid.
- Haigh, M.J. 1985. Geomorphic evolution of Oklahoma roadcuts. *Zeitschrift fur Geomorphologie* 29:439–452.
- Hogan, M., y K. Drake, 2009. Sediment Source Control Handbook. An Adaptive Approach to Restoration of Disturbed Areas. A Sierra Business Council Publication, Truckee. http://www.sbcouncil.org/pdf/SSCH_Final_Web.pdf
- Hooke, R.L. 1994. On the efficacy of humans as geomorphic agents. *GSA Today* 4:217–225.

- Hooke, R.L., J.F. Martín Duque, y J. Pedraza. 2010. Land transformation and Population: two neglected components of Global Change (manuscrito inédito)
- Keller, E.A., y R.H. Blodgett. 2007. Riesgos naturales. Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes. Pearson Prentice Hall. Madrid.
- Luce, C., B. Wemple, editors. 2001. Hydrologic and geomorphic effects of forest roads. *Earth Surface Processes and Landforms* 26(2):111-232.
- Martín Duque, J.F., M.A. Sanz, J.M. Bodoque, A. Lucía, y C. Martín Moreno. 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* 35:531-548.
- Megahan, W. 1977. Reducing erosional impacts of roads. Páginas 237-251, S. Kunkle y J. Thornes, editores, *Guidelines for Watershed Management*. FAO, Rome.
- Meyer, L.D., W.H. Wischmeier, y W.H. Daniel. 1971. Erosion, Runoff and Revegetation of Denuded Construction Sites. *Transactions of the ASAE Proceedings* 14(1):138-141.
- Meyer, L.D., y M.J.M. Römkens. 1976. Erosion and sediment control on reshaped land. Páginas 2-65, 2-67, *Proceedings of the Third Interagency Sediment Conference*, Water Resources Council, Washington DC.
- Ministerio de Fomento. 2005. PEIT: Plan Estratégico de Infraestructuras de Transporte 2005-2020. Ministerio de Fomento, Madrid.
- Montgomery, D. 1994. Road surface drainage, channel initiation, and slope instability. *Water Resources Research* 30(6):1925-1932.
- MOPU. 1989. Guías metodológicas para la elaboración de estudios de impacto ambiental. 1: carreteras y ferrocarriles. Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Madrid.
- National Research Council. 1997. *Toward a Sustainable Future: Addressing the Long-term Effects of Motor Vehicle Transportation on Climate and Ecology*. Natl. Acad. Press, Washington, DC.
- Navarro, J. 2002. Control de la erosión en desmontes originados por obras de infraestructura viaria: aplicación al entorno de Palencia capital. Tesis doctoral, ETSI de Montes, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.
- Nicolau, J.M. 2003. Trends in relief design and construction in opencast mining reclamation. *Land Degradation and Development* 14:215-226.
- Nyssen, J. et al. 2002. Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the Northern Ethiopian Highlands. *Earth Surface Processes and Landforms* 27:1267-1283.
- Parker, G.G., y E.A. Jenne. 1967. Structural failure of Western highways caused by piping. *Highway Res. Rec.* 203:57-76.
- Pedraza, J. 1996. *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. Rueda, Madrid.
- Petersen, J.F. 2002. The role of roadcuts, quarries and other artificial exposures in geomorphology education. *Geomorphology* 47(2-4):289-301.
- Petersen, S.L., B.A.Roundy, y R.M. Bryant. 2004. Revegetation methods for High-Elevation Roadsides at Bryce Canyon National Park, Utah. *Restoration Ecology* 12(2):248-257.
- Regueiro, M. 2008. Guía metodológica para la elaboración de cartografías de riesgos naturales en España. Ministerio de Vivienda e Ilustre Colegio Oficial de Geólogos. Madrid.
- Reid, L., y T. Dunne. 1984. Sediment production from forest road surfaces. *Water Resources Research* 20(11):1753-1761.
- Riley, S., S. Shrestha, P. Hackney, y R.A. Mann. 2008. Water quality of road runoff in the Blue Mountains, NSW, Australia, Páginas 151-160. U. Mander, C.A. Brebbia, y J.F. Martín Duque, editores, *Geo-environment and Landscape Evolution*. Wessex Institute of Technology, Southampton.
- Schor, H.J, y D.H. Gray. 2007. *Landforming. An environmental approach to hillside development, mine reclamation and watershed restoration*. John Wiley and Sons, Hoboken.
- Schumm, S.A., y D.K. Rea. 1995. Sediment yield from disturbed earth systems. *Geology* 23(5):391-394.
- Syvitski, J.P.M., C.J. Vörösmarty, A.J. Kettner, y P. Green. 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science* 308:376-380.
- Toy, T.J., y J.P. Black. 2000. *Topographic reconstruction: the theory and practice*. Páginas 41-75. R.

Barnishel, R. Darmody, y W. Daniels, editores. Reclamation of Drastically Disturbed Lands. American Society of Agronomy, Madison.

TRAGSA. 1994. Restauración hidrológico forestal de cuencas y control de la erosión. TRAGSATEC. Mundi Prensa, Madrid.

Wright, D.L., H.D. Perry, y R.E. Blaser. 1978. Persistent Low Maintenance Vegetation for Erosion Control and Aesthetics in Highway Corridors. Páginas 553-583. F.W. Shaller y P. Sutton, editores, Reclamation of Drastically Disturbed Lands. American Society of Agronomy, Crop. Sci. Soc. Of America and Soil Soc. Of America, Madison.

WSDOT. 2010. Environmental Procedures Manual. Washington State Department of Transportation. <http://www.wsdot.wa.gov/Publications/Manuals/M31-11.htm>

