



Erosión en cárcavas: una revisión de los efectos de los diques forestales

Autor: Virginia Díaz Gutiérrez

Institución: Universidad Católica de Ávila

Otros autores: Jorge Mongil Manso (Universidad Católica de Ávila); Joaquín Navarro Hevia (Universidad de Valladolid); Iván Ramos Díaz (Universidad de Valladolid)

Resumen

La erosión del suelo es un problema ambiental grave, que afecta de manera moderada o severa al 80 % de los terrenos cultivados del mundo y supone unas pérdidas anuales en la producción agrícola de 42.000 millones de dólares. La erosión en cárcavas es una de las formas de erosión hídrica que se presenta con notable frecuencia en los climas semiáridos. Se trata de una serie de incisiones profundas que se producen en las laderas, cuyo desarrollo se debe a avenidas bruscas e intermitentes, condicionado así mismo por factores climáticos, edáficos y geomorfológicos, entre otros. Si las cárcavas progresan en una amplia extensión de terreno se puede llegar a un paisaje de morfología abarrancada que recibe la denominación de badlands. Las badlands, aunque sólo ocupan una extensión alrededor del 5% en el sur de Europa, suelen ser responsables del 50% al 80% de la emisión de sedimentos dentro de sus cuencas, y en España se han registrado tasas de erosión que oscilan entre varias toneladas por hectárea y año hasta casi un centenar.

La restauración de terrenos afectados por cárcavas requiere de elevadas inversiones, por lo que la prevención es lo más recomendable, generalmente mediante el mantenimiento de cubiertas vegetales densas que constituyan una protección natural del suelo. No obstante, existe una amplia experiencia en técnicas de restauración, que pasan por la recuperación de una cubierta forestal y la instalación de obras de ingeniería civil – fundamentalmente diques forestales- generalmente incluidas dentro de un proyecto de restauración hidrológico-forestal. La restauración de la vegetación suele ser una medida muy efectiva a medio y largo plazo, mientras que los diques frenan la erosión en el cauce, retienen los sedimentos generados en las laderas y los deslizamientos controlando el avance de las cárcavas temporalmente, hasta que la vegetación empieza a cumplir eficazmente su función protectora del suelo.

Si respecto a los trabajos de restauración de la cubierta vegetal existe un amplio consenso en cuanto a su eficiencia en la lucha contra la erosión, algunos autores consideran que los diques de retención de sedimentos no siempre son necesarios ni efectivos. Para evaluar los efectos de estas obras, en este trabajo se realiza una revisión del problema de la erosión en cárcavas, de los procesos que las inician y desarrollan y, especialmente, del papel de los diques en el control y retención de sedimentos así como de sus efectos en la morfología de los cauces, las variaciones de flujo y su efecto barrera.

Palabras claves: badlands; restauración hidrológico-forestal; hidráulica torrencial; estabilización de cauces; presas de retención.

INTRODUCCIÓN

La erosión del suelo por acción del agua y del viento es un problema constante desde que la humanidad comenzó a cultivar la tierra, que causa la pérdida y redistribución del suelo, la degradación de su estructura, el arrastre de materia orgánica y nutrientes, y, como consecuencia, un descenso de su fertilidad y una pérdida de productividad de las tierras afectadas (Morgan, 1997). La carta mundial de los suelos (FAO, 1981) pone de relieve la importancia del suelo como un componente esencial del medio ambiente sobre el que se desarrolla la vida, cuyo uso no debe causar su degradación, ya que las consecuencias en términos de pérdida de suelo serían irreparables. Para ofrecer una idea de la magnitud del problema, la erosión y la desertificación ponen en peligro la salud y los medios de vida de más de 1.000 millones de personas, y en términos monetarios, según la ONU, causan unas pérdidas anuales en la producción agrícola de 42.000 millones de dólares (Alfonso, 2005). Este dato pone de manifiesto la necesidad de preservar los suelos en su estado natural, y de restaurar los suelos que se encuentren desprotegidos. En este sentido, Lal & Steward (1995) estiman que el 80 % de las tierras agrícolas del mundo sufren erosión moderada a severa, y el 10 % de ellas, erosión ligera a moderada. Por otra parte, el proyecto internacional "Global Assessment of Human Induced Soil Degradation" (GLASOD) elaborado en 1990 por el programa "United Nations Environment Programme" (UNEP) señala el alto grado de degradación que presentan los suelos de todo el mundo. En España se observa un estado de degradación de los suelos que varía de un valor medio a muy alto, según la zona. En una versión más extensa del mapa se observa que esta degradación está producida principalmente por erosión hídrica, con valores que varían de medio a muy alto (GCMD, 2011). De hecho, la erosión es uno de los procesos más importantes que causan estos valores de degradación del suelo en la región mediterránea (Ibáñez *et al.*, 2003).

La erosión es un problema ambiental grave en España, de forma que en varias ocasiones ha sido calificado por las Naciones Unidas como el país europeo con mayor riesgo de desertificación por erosión (Rubio, 2005). Prueba de ello son los amplios fondos que destina la Administración Española a trabajos de control de la erosión y del transporte de sedimentos, y los diversos programas y proyectos españoles, como el LUCDEME (Lucha contra la Erosión en el Mediterráneo) o el plan nacional de I+D, e incluso de la Unión Europea, como CORINE (Soil Erosion Risk and Important Land Resources), MEDALUS (Usos del Suelo y Desertificación en el Mediterráneo) o HERMES (Procesos de Erosión-Sedimentación) (López Bermúdez & Romero, 1998; Boix-Fayos *et al.*, 2008). Alfonso (2005) estima que la mitad de la superficie de la Península Ibérica sufre un riesgo moderado a muy grave de desertificación, y Rubio (2005) indica que un 10% de ésta sufre procesos de erosión y desertificación que pueden ser irreversibles. La pérdida de suelo por erosión en nuestro país ha sido estimada por De Alba (1998) en $23,37 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, con valores máximos de $47,8$ y $44,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, respectivamente, en las cuencas del Sur-Mediterráneo y Guadalquivir, y mínimos de $4,8 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en la cuenca norte (Ibáñez *et al.*, 2003). De acuerdo con los mapas de estados erosivos elaborados por el ICONA y la Dirección General de Conservación de la Naturaleza entre 1987 y 2002, la intensidad del proceso de erosión supera los límites tolerables en torno al 45 % de la superficie de España, y unas 6 millones de hectáreas de ésta sufre erosión muy severa, con arrastres que ocasionan unas pérdidas de suelo superiores a $50 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, cifras muy elevadas si contrastamos con la tasa de formación de suelos, que

varía entre 2 y 12 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ (Ibáñez *et al.*, 2003; MMAMRM, 2008). En la tabla 1 se pueden observar las pérdidas medias de suelo que se producen en función de los distintos usos de suelo que se determinaron para la elaboración del mapa de estados erosivos.

Tabla 1. Pérdidas de suelo en los distintos usos del suelo (MMAMRM, 2008).

USO DEL SUELO	SUPERFICIE (ha)	PÉRDIDAS MEDIAS (Mg·ha ⁻¹ ·año ⁻¹)
Cultivos de regadío	3.054.078	10,35
Cultivos arbóreos y viñedos de secano	5.113.437	78,93
Cultivos herbáceos de secano	14.804.776	30,53
Erial a pastos, matorral disperso y arbolado con cabida cubierta < 0,2	8.231.174	17,46
Pastizales permanentes	2.141.306	8,08
Arbustos y matorral	5.200.907	19,14
Arbolado con cabida cubierta entre 0,2 y 0,7	5.984.709	8,36
Arbolado con cabida cubierta > 0,7	4.535.843	5,16

Las cárcavas son pequeños valles de paredes verticales y cabeceras verticalizadas y perfiles longitudinales de pendiente elevada, que transmiten flujos efímeros y están sujetos a una intensa erosión hídrica (Lucía *et al.*, 2008). Constituyen una serie de profundas incisiones inscritas en la ladera y sujetas a avenidas bruscas e intermitentes, y que surgen cuando una corriente de agua natural rompe su estado de equilibrio metaestable (Faustino, 1985; Hudson, 1982; Rivera *et al.*, 2007). Son geoformas que normalmente aparecen asociadas a litologías fácilmente erosionables, y a regímenes climáticos con cierto grado de aridez (Vicente, 2009; Vicente *et al.*, 2009). La erosión hídrica en cárcavas se ha convertido en un problema de ámbito mundial (Valentín *et al.*, 2005) por lo que ha sido objeto de numerosos estudios durante la última década (Poesen *et al.*, 2003; Casali & Jiménez, 2007; Gómez *et al.*, 2011).

La existencia de cárcavas indica que el terreno en el que se localizan ha sufrido o está sufriendo un grado elevado de degradación, de forma que una erosión intensa en cárcavas y barrancos en una zona concreta genera un paisaje fuertemente disectado denominado malas tierras, mal país o *badlands*, si bien puede haber terrenos acarcavados relativamente estables, como el caso del Desierto de Tabernas en el sureste de España (Cantón *et al.*, 2001). Las *badlands*, a pesar de que ocupan solo un 5 % en el sur de Europa (Poesen & Hooke, 1997), son la fuente principal de sedimentos dentro de sus cuencas (Clotet *et al.*, 1987; Clarke & Rendell, 2010), alcanzando tasas de hasta el 80 % (Poesen *et al.*, 2002; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2004; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2009) e incluso hasta del 94 % (Poesen *et al.*, 2003). Por otra parte, en cuencas de Iowa (EEUU) se ha comprobado que la contribución de las cárcavas a la cantidad total de sedimentos que circulan por los cauces va desde un 20 % hasta un 34 % (Piest & Bowie 1974; Thomas *et al.*, 2004). En ocasiones, incluso con vegetación (Hooke *et al.*, 2007), suelen ser importantes focos de erosión donde la meteorización del terreno, sus características edáficas, la red de drenaje asociada y los procesos de tubificación (Faulkner *et al.*, 2008), entre otros, generan ingentes cantidades de sedimentos. En

Basilicata (Italia) se han registrado rebajamientos anuales del terreno entre 7 y 18 mm (Clark & Rendell, 2006) y en España, tasas de erosión entre 32 y 77 Mg·ha⁻¹·año⁻¹, en *badlands* desnudas en las Bardenas Reales (Desir & Marín, 2009). En *badlands* con vegetación, en el Penedés aún se han detectado cifras entre 16 y 63 Mg·ha⁻¹·año⁻¹ (Martínez-Casasnovas *et al.*, 2009); pero cuando la revegetación es mayor del 30 % en el lecho, las cárcavas resultan casi inactivas (Rey, 2003; Hooke, 2006; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2009) o son responsables una baja erosión (Cantón *et al.*, 2001). De Luna *et al.* (2004) han medido el retroceso de cabeceras de cárcavas de grandes dimensiones en Granada, mediante fotografías aéreas entre 1956 y 1994, registrando valores de 0,2 a 1,7 m·año⁻¹.

La erosión en cárcavas es un proceso complejo y diverso, relacionado en ocasiones con un deficiente manejo del bosque (Navarro *et al.*, 2012; Mongil *et al.*, 2012) y que en nuestro país muestra una creciente preocupación (Gómez *et al.*, 2011). Por ello, el objetivo de este trabajo es realizar una revisión del conocimiento existente sobre la erosión en cárcavas y sobre las principales técnicas que se emplean en su restauración, especialmente los diques forestales.

LA EROSIÓN EN CÁRCAVAS

La erosión en cárcavas es un fenómeno que se da bajo diversas condiciones climáticas (Gómez *et al.*, 2011), aunque más comúnmente en climas semiáridos y sobre suelos estériles y con vegetación abierta, con un uso inadecuado del terreno o inapropiado diseño del drenaje de las vías de comunicación. Las incisiones que constituyen las cárcavas, se ven potenciadas por avenidas violentas y discontinuas típicas del clima mediterráneo, lluvias intensas o continuas sobre terrenos desnudos o por la concentración de flujos superficiales fomentados por obras de drenaje de caminos o carreteras. También los procesos subsuperficiales de tubificación o *piping* en terrenos arcillosos o arcillolimosos provocan la formación de galerías internas en el terreno que llevan al colapso del mismo y a la aparición de cárcavas. En general, los cursos de agua fluctúan hacia un punto de equilibrio, de forma que si el caudal se incrementa, el canal se ensanchará, profundizará o incrementará su pendiente hasta conseguirlo, y sólo podrá recuperar su estado original si las alteraciones son leves; pero si la cárcava comienza, será necesario un esfuerzo de mayor magnitud para conseguir volver a esa situación inicial. En la denominada erosión por cárcavas, el escurrimiento superficial es grande y con elevada energía erosiva, de forma que se concentra dando lugar a surcos o cárcavas que pueden alcanzar decenas de metros, tanto en dimensión longitudinal como altitudinal, originando, como consecuencia, contaminación, debido a la movilización de sedimento que producen, y causando una pérdida de productividad del terreno afectado (Faustino, 1985; Rivera *et al.*, 2007; Casalí *et al.*, 1999).

Si nos fijamos en el perfil longitudinal de la cárcava, en su fase inicial, la sección del canal es más profunda que la original, y su rugosidad disminuye al desaparecer la cubierta vegetal, consiguiendo una nueva pendiente más llana que la original, y una mayor altura de caída del agua conforme va retrocediendo la cabecera de la cárcava (Hudson, 1982; Clarke & Rendell, 2006). No obstante, la extensión de las cárcavas se realiza en tres direcciones (Faustino, 1985; FAO, 1992): en longitud, debido al avance y caída de la escorrentía; en anchura, por las mismas razones anteriores, o por caída de las paredes

de las laderas por falta de estabilidad; y en profundidad, por efecto de la escorrentía, hasta llegar a su estabilización en el nivel de base. Este avance en extensión de las cárcavas se ve favorecido en gran parte por las prácticas inadecuadas de utilización del suelo, como en el caso de construcciones civiles y minería, que originan cortes del terreno que quedan a merced del agua, y por la realización de surcos en campos de cultivo, que gracias a la acción de la lluvia y la concentración de flujos tienden a profundizarse y, con el tiempo, a causar este proceso (León, 2005). El fuego o el sobrepastoreo son acciones que reducen la cubierta vegetal, provocando una reducción de la resistencia, o, dicho de otra manera, una disminución de la rugosidad, que origina una mayor velocidad del caudal, con sus correspondientes consecuencias en términos de erosión. Ejemplos de acciones que provocan un aumento en la velocidad del flujo, y por tanto de la erosión, son la construcción de un puente o el trazado de aliviaderos de tierra en pequeños embalses, así como la concentración de escorrentías en ciertos puntos a través del diseño del drenaje de obras de infraestructura, actuaciones agrarias, etc. Además, hay que recordar que la erosión por cárcavas es la fuente más importante de sólidos en suspensión en los ríos (Hudson, 1982; Clotet *et al.*, 1987; Casalí *et al.*, 1999; Clarke & Rendell, 2010), lo que reduce considerablemente la calidad de las aguas (Simon & Darby, 1999; Zaimas *et al.*, 2009).

Por tanto, la evolución y la forma que van tomando las cárcavas dependerán de varios grupos de factores (Casalí *et al.*, 1999):

- Factores ligados al suelo: erosionabilidad, presencia de horizontes resistentes, presencia de costras o sellado, contenido de humedad (Moore *et al.*, 1988), contenido en sales, naturaleza mineralógica del terreno (arcillas expandibles) (Clotet *et al.*, 1987).
- Factores topográficos: tamaño de la cuenca de aportación (Poesen & Govers, 1990), pendiente del cauce y laderas (Foster, 1986; Poesen & Govers, 1990; Poesen, 1993; Clarke & Rendell, 2006), y su exposición.
- Factores climáticos: intensidad, frecuencia y duración de las precipitaciones.
- Otros factores: la erosión en cárcavas puede ser inducida por cambios en la cubierta vegetal generados por actividades humanas, por el ganado (Shumm, 1999) o por malas prácticas de cultivo. Pero también hay factores naturales como los incendios que destruyen la cubierta vegetal, los fuertes vientos que derrumban el arbolado y que si son precedidos de tormentas generan acumulaciones de agua en puntos concretos del terreno que favorecen el acarcavamiento, los deslizamientos de márgenes fluviales por la socavación de su base, etc.

En función de su temporalidad pueden ser efímeras o permanentes (Gómez *et al.*, 2011). En cuanto a la naturaleza y morfología del terreno se adopta la forma de la cárcava, y podemos distinguir entre cárcavas en V, situadas en terrenos de ladera, o cárcavas en U, que podemos encontrar en terrenos llanos (Núñez, 2001). En el primero de los casos, cuando se produce un crecimiento de las cárcavas hacia arriba y los lados de las laderas, podemos hablar de cárcavas remontantes (FEDERACAFÉ, 1975). Asimismo, Stocking & Murnaham (2003) indican que las cárcavas pueden ser continuas o discontinuas, caracterizadas las segundas por su menor nivel de pendiente con respecto al general del terreno, y porque erosionan ascendiendo hacia la cabecera, aunque la sedimentación se produzca al final de la discontinuidad.

Por otro lado, asumiendo que la profundización de las cárcavas puede generar verdaderos barrancos, y en función de su torrencialidad, entendiendo torrente como una corriente natural de agua caracterizada por crecidas súbitas y violentas, fuertes pendientes y una periodicidad temporal o permanente (Del Palacio, 1999), se puede distinguir entre cárcavas tipo torrentes alpinos o propiamente torrentes alpinos (en los que se han realizado correcciones típicas pirenaicas como las de Canfranc, Arratiecho, Betés, etc.) y cárcavas tipo torrentes-rambla (en las que se han llevado a cabo actuaciones como las de las *badlands* de Murcia, Almería, etc.). Ambos sistemas tienen comportamientos diferentes. Los primeros, de régimen estacional, se sitúan en grandes altitudes, y en cauces estrechos, con pendiente media alta y perfil transversal en forma de V. En estos torrentes se produce erosión laminar y movimientos en masa. Sin embargo, las cárcavas tipo torrentes-rambla, cuyo régimen puede ser estacional o permanente, son típicas de áreas mediterráneas, y se sitúan en pequeñas altitudes. Sus cauces son anchos y de pendiente baja, y se caracterizan por sufrir una erosión lineal, y de ladera y márgenes, y por ser zonas de depósito de sedimentos, razón por la cual poseen perfiles en forma de U muy abierta (Del Palacio, 1999, 2002). Perez-Soba (2009) distingue entre ramblas puras y torrentes ramblas, en función de la morfología del cauce y de la cuenca y de su régimen torrencial.

Por último, hay que señalar que las cárcavas son características de varios tipos paisajes y climas (Gómez *et al.*, 2011), pero aparecen especialmente en climas áridos y semiáridos como el mediterráneo (Clarke & Rendell, 2010), como en Italia (Ciccacci *et al.*, 2008; Clarke & Rendell, 2006), Grecia, Marruecos, Israel (Yair *et al.*, 1980) y España (López Bermúdez & Torcal, 1986; Benito *et al.*, 1992; Navarro *et al.*, 1997; Casalí *et al.*, 1999; Regüés *et al.*, 2000; Cantón *et al.*, 2001; Martín Duque, 2007; Martínez-Casasnovas *et al.*, 2009).

CORRECCIÓN Y CONTROL DE CÁRCAVAS

El control de cárcavas es una tarea ardua y costosa; volver a la posición de equilibrio original requiere un gran esfuerzo. Además, hay que tener en cuenta que la existencia de cárcavas es un reflejo de la degradación de la cuenca o de un manejo hidrológico deficiente de esta. Es necesario estudiar los orígenes de estas cárcavas para que las tareas de control que se lleven a cabo sean efectivas. La solución más lógica teniendo en cuenta estas circunstancias es prevenir y evitar que se produzcan estas cárcavas, o evitar que se continúe erosionando, es decir, en muchas ocasiones será suficiente realizar un control parcial, considerándolas como parte del paisaje (Hudson, 1982); la implantación de una efectiva cubierta vegetal que tapice las paredes de las cárcavas puede frenar su progresión (Navarro *et al.*, 1997; Navarro *et al.*, 2012; Mongil *et al.*, 2012). Rey (2003) y Martínez-Casasnovas *et al.* (2009) señalan que cuando el lecho de las cárcavas tienen una cubierta de vegetación superior al 30 % éstas resultan casi inactivas o explican bajas tasas de erosión (Cantón *et al.*, 2001).

Los objetivos del control de cárcavas justifican su inversión, como cuando se pretenda evitar el descenso de la capa freática, la pérdida de capacidad de almacenamiento de embalses, la posibilidad de que afecte a construcciones (puentes, carreteras o edificaciones), afecten a la calidad del agua, perturben los hábitat acuáticos de gran valor ecológico o la pérdida de suelo y su productividad. Completando las recomendaciones de Hudson (1982) se señalan una serie de principios a seguir en el control de cárcavas:

- Determinar las causas.
- Determinar los impactos y efectos más significativos en su entorno.
- Diseñar y adoptar medidas proporcionales a los impactos o perturbaciones a corregir.
- Restaurar un balance hidráulico adaptado a las nuevas condiciones (para reducir o controlar el caudal al volumen aceptable para las condiciones originales o las nuevas adoptadas).
- Proteger la zona donde vayan a aplicarse las medidas de recuperación y control.
- Establecer un seguimiento periódico para estudiar la evolución adecuada del sistema e impedir su regeneración.

Entre las técnicas para el control de cárcavas, podemos mencionar en primer lugar técnicas de manejo del suelo que incrementen la infiltración, o construcción de estructuras que conserven o extiendan la escorrentía (terrazas, zanjas de interceptación en cabecera o a media ladera, microcuencas de captación, etc.). Para evitar el avance de la cárcava en tres dimensiones, anteriormente mencionado, se puede utilizar técnicas como realizar su aislamiento de la escorrentía y del ganado, o de otros usos no compatibles (extracción de leñas, utilización de materiales térreos para construcción de adobes, cerámica, etc.), para a continuación realizar su relleno total, parcial o terraplenado, que conllevará su eliminación, o bien suavizar los taludes para construir barreras o forestar la cárcava.

La vegetación en el control de cárcavas

La revegetación de cárcavas es una buena medida para su control, que protege al suelo de la escorrentía a la vez que reduce la velocidad del caudal, y por lo tanto su energía erosiva. Navarro *et al.* (1997) y Navarro *et al.* (2012) indican que en áreas de la región mediterránea, con un clima semiárido, en exposiciones de solana y sobre margas yesíferas o rocas arcilloarenosas, esta técnica no ha dado los resultados esperados, a pesar de que señalen que es preferente actuar con material vegetal antes que con movimientos de tierra o estructuras constructivas. Las dificultades en su implantación se deben a que el suelo de una cárcava suele ser deficiente en nutrientes y en materia orgánica, y con escasa retención de humedad, y a que suelen estar localizadas en zonas de escasas precipitaciones, que no permiten un tapiz vegetal continuo y que deja caminos expeditos para la concentración de escorrentías. Además, los deslizamientos en las paredes de las cárcavas pueden ser objeto de arrastre de las plantaciones realizadas. Sólo si se actúa en un medio suficiente estable y con unas condiciones hídricas apropiadas se consigue la regeneración. Por otro lado, Hudson (1963) indica que los suelos sometidos a acarcavamiento suelen tener problemas de salinidad y alcalinidad. Para solucionar las posibles dificultades que puedan surgir se deben elegir las plantas apropiadas, de fácil arraigo y vigorosas, así como emplear técnicas especiales para asegurar el éxito de la plantación, como el uso de fertilizantes.

Además, para ayudar al establecimiento de la vegetación de la cárcava, se pueden acompañar estas medidas con barreras fabricadas con materiales de origen natural, tales como ramas (palizadas, fajinas, zarzos, etc.), troncos o piedras (muretes de reconstrucción, bancales, etc.), que serán de carácter temporal, a no ser que el estado de la cuenca requiera la instalación de estructuras permanentes. O bien aplicando una técnica más reciente como geotextiles, que igualmente ayudan al asentamiento de la vegetación en laderas degradadas. Los estudios realizados por Navarro *et al.* (1997) demuestran el éxito de los geotextiles orgánicos combinados con la revegetación, ya que concluyen que, una vez aplicados, ofrecen un recubrimiento del 100 % del suelo tratado; si bien, debido a su alto coste, aconsejan su empleo en cárcavas que afecten a terrenos productivos, ecosistemas singulares, obras civiles o la calidad de las aguas.

Estructuras temporales para el control de cárcavas

Las estructuras temporales sirven de protección transitoria, para dar tiempo y facilitar la implantación y el arraigo de la vegetación. Retienen la tierra fértil y la humedad y pueden consistir en (Hudson, 1982; FAO, 2000; Sharma, 1993):

- Barreras de piedras sueltas, que se emplean cuando la pendiente del lecho es moderada, y el área de drenaje es pequeño o moderado, y cuando en la zona se encuentran abundantes piedras.
- Barreras de piedras con malla metálica, con las mismas características y en las mismas condiciones que el anterior, sólo que las piedras van sujetas con una malla de alambre.
- Presas de red: postes metálicos clavados en el lecho que sujetan una red metálica, sobre la cual se aplica paja y broza suelta para constituir una barrera porosa.
- Barreras de ramas secas, apiladas o amarradas entre filas de estacas verticales. Deben estar lo suficientemente enterradas para que no se desmoronen. Se emplean cuando el área de drenaje es de pequeño tamaño.
- Barreras de troncos, formando un entramado más firme que en el caso anterior. Se emplean cuando la carga es violenta y en altura, por ejemplo en la cabecera de la cárcava. Aquí pueden incluirse los pequeños diques de troncos propuestos por Cantero (2011).
- Barreras de adobe, que pueden fabricarse con el propio terreno del lecho de la cárcava.

Estructuras permanentes para el control de cárcavas

Las estructuras permanentes se emplean cuando el problema de la erosión por cárcavas es de mayor envergadura, cuando ya no son eficaces las estructuras temporales, y su principal objetivo es resistir las avenidas torrenciales por tiempo indefinido.

Hudson (1982) agrupa las distintas estructuras de carácter permanente según la función a la que estén destinadas. De esta forma, si se pretende evitar el avance de la cabecera de las cárcavas que puede llegar a producir problemas de derrumbamiento en puentes, carreteras o edificios, se pueden construir un dique en la cabecera de la cárcava, que se

encontrará inundado continuamente si se ha dejado un espacio libre entre la estructura y la cabecera. También se puede llegar a conseguir estabilizar la cabecera de la cárcava empleando las estructuras de obra de fábrica o de hormigón que Hudson (1982) denomina “estructuras de pendiente”, y que ocasionan un daño menor.

Pero si la función que se pretende que realicen estas estructuras es regular el impacto de la crecida, se acude a la construcción de diques de regulación, que poseen un vertedero abierto, cuyo funcionamiento consiste en la recogida del agua de una tormenta y su desagüe para la próxima crecida.

Por último, cuando el fin de estas construcciones sea la retención de sedimentos, y las anteriores soluciones no sean válidas debido a una excesiva carga de estas partículas, se acude a presas permanentes que retienen los aluviones.

Los materiales son variados: desde estructuras reticulares de madera, perfiles o jaulas metálicas rellenas de cascajo o piedra a estructuras de mampostería seca, mampostería hidráulica, hormigón en masa, hormigón armado, presas de tierra, de otros materiales reciclados como neumáticos, bidones o contenedores, etc. Si se realizan con hormigón o mampostería hidráulica se diseñan una serie de mechinales o troneras que atraviesan su perfil y permiten la salida regulada del caudal líquido, a la vez que disminuyen las fuerzas de empuje y contribuyen a la estabilidad de la obra.

LAS RESTAURACIONES HIDROLÓGICO-FORESTALES CON CONSTRUCCIONES CIVILES

La restauración hidrológico-forestal comprende el conjunto de planes, trabajos y acciones necesarias para la conservación, defensa y recuperación de la estabilidad y fertilidad de los suelos, la regulación de escorrentías, la consolidación de cauces fluviales y laderas, la contención de sedimentos y acarreos y, en general, la defensa del suelo contra la erosión (Ferrer, 2009).

La realización de estos trabajos de restauración se remonta a mediados del siglo XIX, y nace en Europa con el fin de dar una solución a la deforestación que estaban sufriendo sus territorios montañosos, debido a cortas abusivas, roturaciones del terreno o explotaciones indiscriminadas, entre otras, y sometidos a aludes en invierno y deshielos en primavera, así como a las lluvias torrenciales en zonas mediterráneas, que originaban inundaciones y avenidas, con sus consecuentes efectos negativos. Así, se llevaron a cabo trabajos de restauración en zonas montañosas en Suiza (1848), Francia (1882), Austria (1884) y España (1888) (Thiéry & Lechallas, 1891; Codorníu, 1897, 1898; Del Palacio, 1999; Gil, 2004).

Las causas que motivaron que en 1888 se llevara a cabo la primera restauración forestal en nuestro país fueron las catástrofes del Júcar en 1864, y del Guadalentín y el Almanzora en 1879. Esta restauración se materializó en el “Plan sistemático de repoblación de cabeceras de cuencas hidrográficas”, que comprendía a las cuencas del río Júcar, del río Segura, del río Lozoya, y de las dunas de Cádiz y Huelva. En ese mismo año se promulgó un Real Decreto que hacía referencia a la organización de los trabajos de repoblación en las cabeceras de las cuencas hidrográficas de España (Mintegui & Robredo, 1994; Del Palacio, 1999; Gil, 2004).

En 1901 se crea el Servicio Hidrológico-Forestal de la Nación, que abarca las principales cuencas hidrográficas del territorio español mediante su distribución en diez Divisiones Hidrológico-Forestales. A través del Real Decreto de 7 de junio de 1901 se crearon los Servicios Hidrológico-Forestales, responsables de las extensas zonas arboladas que actualmente pueblan nuestra península. De esta manera, se comienza a unir en la práctica lo hidrológico y lo forestal, denominación bien acertada que da una idea de la importancia que tiene el bosque en el ciclo hidrológico. En estos principios del siglo XX se realizan restauraciones emblemáticas en sierra Espuña (Codorníu, 1910), en Canfranc y en la cuenca del Lozoya, entre otras (Mintegui & Robredo, 1994; Martínez García *et al.*, 1996; Del Palacio, 1999; Ferrer, 2009).

Posteriormente, en 1926 se crean las Confederaciones Hidrográficas, que también tenían competencias en este campo. Las Divisiones Hidrológico-Forestales siguen trabajando hasta que son absorbidas en 1952 por el Patrimonio Forestal del Estado, y finalmente desaparecen en 1968, asumiendo sus funciones los Servicios Hidrológico-Forestales provinciales. Estos servicios pasan a depender del Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) cuando se crea este organismo en sustitución del Patrimonio Forestal, en 1971 (Del Palacio, 1999; Gil, 2004).

Con la creación de las Comunidades Autónomas, en 1984 éstas asumen las competencias en restauración hidrológico-forestal, si bien de forma compartida con la administración estatal, a través de convenios entre las Comunidades Autónomas y el Ministerio de Medio Ambiente. Así, en 1985 se firmaron convenios entre las Comunidades Autónomas y el ICONA, que tenían con objeto la restauración hidrológico-forestal de cuencas; y a partir 1986, con la entrada de nuestro país en la Unión Europea, los convenios establecidos con ésta han servido para transferir y canalizar los fondos europeos, como el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER), que se aplica desde las Confederaciones Hidrográficas, o el Fondo Europeo de Orientación y Garantía Agrícola (FEOGA) (Del Palacio, 1999; Gil, 2004; MMAMRM, 2011). En este marco, se han llevado a cabo una serie de actuaciones en materia de restauración hidrológico-forestal, a través de la actual Dirección General de Medio Natural y Política Forestal del Ministerio de Medio Ambiente, que incluyen repoblaciones forestales con especies del máximo valor ecológico posible dentro de las condiciones de clima, topografía y suelo, y obras de corrección de cauces torrenciales y ramblas como acciones de defensa activa inmediata para disminuir arrastres y acarreos sólidos, impidiendo su incorporación a los cauces fluviales y a la red de embalses. Gracias a estas ayudas, son muchas las restauraciones hidrológico-forestales llevadas a cabo en nuestro país. Los trabajos realizados en las cuencas de los torrentes de cabecera de los ríos Aragón, Gallego, Noguera Ribagorzana o Noguera Pallaresa en la cornisa pirenaica, en las cuencas de las ramblas de los ríos Guadalmedina, Almanzora y Oria, en las cuencas de los ríos Jalón y Jiloca y en la Cuenca Hidrográfica del río Segura, en las torrenciales ramblas levantinas, o las actuaciones llevadas a cabo en el Valle del Lozoya, Sierra Espuña o Sierra Nevada, son algunos ejemplos de restauraciones hidrológico-forestales en España (Codorníu, 1910; Pérez-Urruti, 1948; Del Palacio, 2002; Gil, 2004).

En el presente, la Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes, modificada por la Ley 10/2006, de 28 de abril, atribuye al actualmente denominado Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente las actuaciones de restauración hidrológico-forestal, junto

con los trabajos de conservación de suelos y lucha contra la desertificación, si bien, de acuerdo con el ordenamiento jurídico, realiza estas actividades en colaboración con las Comunidades Autónomas. A través de la Ley de Montes se aprueba el Plan Nacional de Actuaciones Prioritarias de Restauración Hidrológico-Forestal, que preveía la identificación y diagnóstico, por subcuencas, de los procesos erosivos, su intensidad y el riesgo para las poblaciones, cultivos e infraestructuras, a través de la definición de zonas prioritarias de actuación.

Objetivos de la restauración hidrológico-forestal.

Mintegui & Robredo (1994) clasifican los objetivos de la restauración hidrológico-forestal de una cuenca hidrográfica en tres grupos:

- La retención de suelo mediante el control de la erosión
- La regulación de las avenidas y el transporte de sedimentos que éstas provocan, así como su sedimentación.
- La provisión hídrica.

Estos mismos objetivos quedan reflejados en el esquema de una restauración hidrológico-forestal (figura 1) propuesto por Gil (2004), que comprende dos partes:

- El estudio descriptivo de la cuenca hidrográfica, que incluye el estudio del relieve, la red de drenaje, la vegetación y el suelo (parte izquierda).
- El análisis de los datos pluviométricos que culminan en la obtención de los caudales punta asociados a los distintos periodos de retorno (parte derecha).

Estas dos partes confluyen en un mismo punto cuando es necesario llevar a cabo actuaciones en las laderas y en los cauces de la cuenca estudiada. Y para ello el autor señala la previa ordenación agrologica de la cuenca y la selección de alternativas a desarrollar, para finalmente llegar a la descripción, justificación y cálculo de los trabajos que conforman el proyecto de restauración hidrológico-forestal.

Por tanto, para poder establecer las bases o principios que deben regir las actuaciones correctoras englobadas dentro de lo que se denomina restauración hidrológico-forestal de cuencas se debe partir del fenómeno torrencial, caracterizado por precipitaciones de gran intensidad que generan crecidas violentas y súbitas, que provocan la circulación por los cauces de caudales sólidos (materiales en suspensión o acarreos), y que es consecuencia de los procesos erosivos de una cuenca (López-Cadenas, 2003).

La corrección del fenómeno torrencial se basa en la comparación entre la capacidad de arrastre del caudal y la resistencia a ser arrastrados de los materiales del lecho afectados. La primera, denominada tensión tractiva, es función del peso específico del agua (γ), de la pendiente (l) y del radio hidráulico (R_h); y la segunda, llamada tensión límite de arrastre o tensión crítica, es función del diámetro característico de los materiales (d_{50}), de la diferencia entre el peso específico de los materiales y del agua ($\gamma_s - \gamma$), y de un coeficiente K . Si en una sección del cauce la tensión tractiva es superior a la tensión límite de arrastre se producirán fenómenos de erosión, con lo que las actuaciones de restauración hidrológico-forestal irán encaminadas a reducir los parámetros de los que depende la tensión tractiva o a incrementar la tensión límite de arrastre (Del Palacio, 1999; López-Cadenas, 2003).

El proceso de corrección de cauces torrenciales consiste en el establecimiento de diversas obras destinadas a la estabilización de los cauces, para regular total o parcialmente los efectos de la dinámica de los caudales circulantes, y que producen en sus orillas y fondo procesos de erosión, transporte y sedimentación de los materiales que lo forman. Así mismo, se intenta evitar la incorporación de caudales sólidos a la corriente, actuando sobre las laderas de la cuenca vertiente (Del Palacio, 1999). En la tabla 2 se muestran las actuaciones que componen la corrección de un sistema torrencial, indicando sus respectivos objetivos.

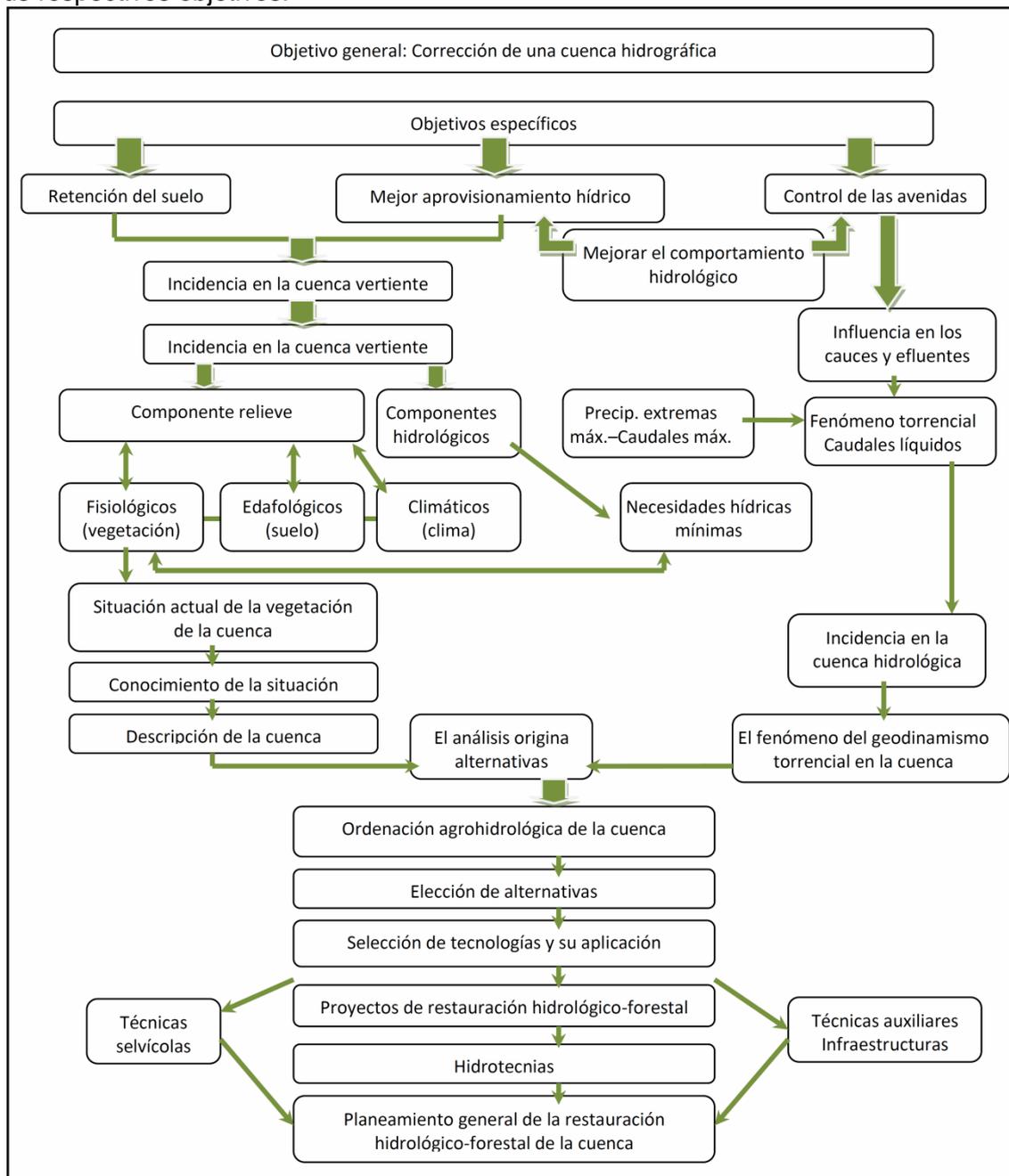


Figura 1. Esquema de la restauración hidrológico-forestal de cuencas, según Gil (2004).

Tabla 2. Actuaciones de corrección de una cuenca torrencial (modificado de Del Palacio, 1999).

LOCALIZACIÓN		ACCIONES		OBJETIVOS	
		TIPOS			
En la cuenca		Acciones biológicas	Replantación forestal Mejora de cubiertas vegetales Tratamientos selvícolas	Control de erosión laminar y en regueros Mejora de la infiltración Control de escorrentías directas	
		Prácticas de conservación de suelos	Terrazas Drenajes Zanjas de infiltración Microcuencas	Control de erosión laminar y en regueros Control de la humedad del suelo Control de los movimientos en masa Mejora de la disponibilidad hídrica en laderas	
		Obras de bioingeniería	Albarradas, palizadas Fajinas, etc. Muretes de reconstitución	Control de cárcavas Control de la erosión remontante Estabilidad de laderas	
En el cauce (régimen torrencial)	Área de erosión y transporte	Obras transversales	Diques de consolidación	Perfil de equilibrio o compensación Consolidación de las laderas del cauce	
			Diques de retenida	De materiales sólidos	Retención de sedimentos o acarreos Defensa de embalses, vegas... Defensa de instalaciones hidroeléctricas, infraestructuras y poblaciones
				De caudales líquidos	Laminación de la onda de avenida Recarga de acuíferos
			Umbrales de fondo	Control de erosión del lecho	
			Dispositivos Clauzel Plazoletas de depósito	Retención de acarreos Retención de acarreos y bolos	
	Área de sedimentación	Obras longitudinales	Espigones	Defensa contra erosiones laterales desviando las aguas	
			Muros de defensa	Defensa de márgenes y rectificación del eje hidráulico Defensa contra inundaciones Contención de deslizamientos en laderas	
			Revestimiento de márgenes: escolleras, cubiertas vegetales, otras estabilizaciones biotécnicas (bioingeniería)	Defensa contra erosiones laterales, aumentando la resistencia de los márgenes y/o controlando la velocidad del agua	
			Canales de desagüe Encauzamientos mediante muros longitudinales, rastrillos y solera resistente a erosión	Concentración del agua en cauce fijo y estable	
En el cauce (régimen fluvial)	Obras longitudinales	Revestimientos y espigones, deflectores	Defensa de márgenes contra erosiones laterales, recuperación de riberas		
		Malecones	Defensa contra inundaciones y rectificación del eje hidráulico		

Las repoblaciones forestales en la restauración hidrológico-forestal

La restauración hidrológico-forestal de cuencas integra un conjunto de acciones de mejora de la cubierta vegetal de las laderas y obras de ingeniería hidráulica que se desarrollan en los cauces. La restauración de la vegetación es el primer paso para conseguir la restauración hidrológico-forestal de una cuenca.

La cubierta vegetal de un lugar contribuye al control de las escorrentías directas y de la erosión superficial, estabilizando la cuenca frente al fenómeno torrencial. Por ello, la restauración de la vegetación y el mantenimiento de las cubiertas vegetales en buen estado producen (Mintegui & Robredo, 1994; Del Palacio, 1999; Soto, 2008):

- Eliminación de sedimentos en suspensión, disminuyendo la tensión tractiva de la corriente.
- Aumento de la tensión límite de arrastre de los bordes de los cauces.
- Reducción de los caudales punta circulantes, al interceptar la lluvia e incrementar la infiltración del suelo.
- Disminución del radio hidráulico de las secciones y, en consecuencia, de la tensión tractiva de los caudales.
- Además, aumento de la rugosidad del cauce lo que frena la velocidad de la corriente e incrementa los tiempos de concentración de las cuencas

Las peculiaridades de los terrenos en los que se realizan este tipo de actuaciones repobladoras acarrea una serie de dificultades, debido a que suelen tener fuertes pendientes, climas extremos y con precipitaciones irregulares pero intensas, en algunos casos escasas, y son suelos con alto grado de degradación. Estos inconvenientes generan limitaciones en cuanto a la elección de la especie, obligando a inclinarse hacia especies de temperamento heliófilo, por las fuertes insolaciones que tienen que soportar en las etapas iniciales, xerófilas y frugales. Por estas razones, las especies elegidas suelen ser del género *Pinus*. Dentro de este género, el pino carrasco (*Pinus halepensis*) ha sido ampliamente utilizado en repoblaciones en el sureste español (Maestre *et al.*, 2004). Este tipo de especies a su vez permitirán el establecimiento de especies más exigentes, como las del género *Quercus*, bien como acompañantes en la repoblación, o bien en una segunda fase de restauración hidrológico-forestal (Del Palacio, 1999). Ejemplos del empleo de esta combinación de géneros *Pinus-Quercus* son las repoblaciones del monte El Valle y Carrascoy en 1983, la restauración hidrológico-forestal realizada en 1907 para la corrección de la cuenca del torrente de Arás en Huesca, la realizada en 2003 para la restauración de la cuenca del Río Jarama en la Puebla de Valles en Guadalajara, las actuaciones desarrolladas en la Rambla de la Ortigosa en la provincia de Albacete (Martínez-Casasnovas, 1992; Del Palacio, 1999; Gil, 2004; Rodríguez Graells, 2011), o la restauración hidrológico-forestal proyectada para la corrección de los torrentes de Canfranc con *Pinus sylvestris* como especie principal y *Fagus sylvatica* en las zonas más sombrías (Ayerbe, 1913); también en la corrección de las cárcavas del río Carrión (Palencia) Saldaña, se empleó *Pinus sylvestris* pero diversas frondosas en las vaguadas (Navarro *et al.*, 2012) (figura 2).



Figura 2. Restauración hidrológico-forestal de Saldaña (Palencia). Izquierda: cárcavas y dique de retención en 1930 (Archivo de Confederación Hidrográfica del Duero); derecha: cárcavas en junio de 2010

Las obras civiles en la restauración hidrológico-forestal

Para corregir y estabilizar los cauces torrenciales se pueden proyectar diversas hidrotecnias, que pueden ser longitudinales, que actúan en los márgenes del cauce, o transversales, que producen sus efectos más significativos en el lecho del cauce.

Las obras longitudinales no se pueden considerar como solución única para corregir el estado torrencial de un cauce, sino que son complementarias a las obras transversales, y su objetivo es la defensa contra la erosión lateral, contra los deslizamientos o contra las inundaciones. En la tabla 3 se pueden observar las principales obras transversales, según la función que desempeñen (Del Palacio, 1999).

Por otro lado, las obras transversales ofrecen la solución más sencilla y la más empleada para la corrección de cauces torrenciales. Los principales efectos de este tipo de construcciones son (op. cit.):

- Establecen un punto fijo en el lecho del cauce, controlando su descenso progresivo.
- Provocan el depósito de los sedimentos más gruesos en el vaso de embalse antes de que se aterre.
- El aterramiento progresivo eleva el cauce hasta alcanzar la pendiente de compensación, menor que la del cauce natural.
- Generan mayores anchuras de cauce, que junto con la menor pendiente, logra una disminución de velocidad y de la capacidad de erosión.
- Producen la estabilización de las laderas, debido al aterramiento.

Estas obras transversales son principalmente los diques forestales, y se clasifican en dos grupos, los diques de consolidación y los de retenida. Los diques de consolidación se utilizan para evitar los fenómenos directos de erosión en los cauces y en las laderas marginales afectadas de inestabilidad. Con ellos se consigue la fijación del perfil longitudinal, mediante la gradación del cauce con diques consecutivos, que dotan al torrente de la pendiente más estable de los aterramientos en forma de escalones. Sin embargo, los diques de retenida sirven para retener materiales sólidos y líquidos. Son obras complementarias, necesarias para evitar daños por acarreos y caudales líquidos en zonas dominadas por el torrente, y se pueden distinguir dos tipos (op. cit.):

- Diques de retenida de materiales sólidos.- Pueden ser diques cerrados, que retienen todos los materiales, o semihuecos, que realizan una retenida selectiva, ya que sólo retienen materiales de gran tamaño.
- Diques de retención de caudales líquidos.- Incluyen los diques de laminación, cuyo objetivo es disminuir los caudales punta, y los diques de recarga de acuíferos, que tratan de embalsar agua para que se infiltre hasta el acuífero.

Tabla 3. Tipos de obras longitudinales (Del Palacio, 1999).

Obras de defensa contra erosiones laterales	Se aplican principalmente en los tramos de garganta y en las zonas inferiores de las ramblas donde son frecuentes erosiones laterales discontinuas en puntos concretos del cauce	Espigones	Estructuras sumergibles, que se apoyan o empotran en la orilla, perpendiculares al flujo o divergentes a contracorriente. Defienden las orillas, obligando al curso de agua a seguir una curva más suave y no erosiva
		Malecones o muros de defensa	De hormigón o mampostería hidráulica o gavionada, protegen directamente a las márgenes frente a erosiones laterales y regulan la sección del cauce
		Escolleras	Sencillas y económicas, recubren con materiales sueltos (grandes piedras o bloques) los taludes y orillas sometidos a erosión. Puede plantarse con especies arbustivas, y hacerse de enrejados metálicos o gaviones
Obras para la contención de deslizamientos de laderas	Normalmente se construyen muros de altura suficiente en la base de las laderas de los torrentes.		
Obras de defensa para evitar inundaciones (encauzamientos)	Consisten en la construcción de dos malecones, uno en cada orilla, para regularizar y consolidar las márgenes del cauce, definiendo una sección con capacidad de desagüe suficiente para evacuar avenidas de elevado periodo de retorno	Encauzamiento naturalizado con lecho no erosionable	Empleando materiales de revestimiento de lecho y márgenes que resistan la tensión de arrastre de los máximos caudales, siendo recomendable disponer a intervalos regulares de unos rastrillos de fondo transversales
		Encauzamiento escalonado en tramos erosionables sobre lecho natural	Formado por muros cajeros resistentes y pequeños diques transversales o rastrillos, que escalonan la descarga y reducen la velocidad de flujo
		Encauzamiento con canal rápido y solera resistente	Canales de obra de fábrica muy resistente, en las que se concilian la suficiencia de la sección con la pendiente y la rugosidad de la solera, para que no se produzcan velocidades inadmisibles

Los diques de retención de sedimentos

Un dique puede ser definido como una estructura transversal construida a través de un cauce con la intención de mitigar y reducir la erosión de su lecho y sus laderas (Hudson, 1982; Morgan, 1997; Chanson, 2004; Zeng *et al.*, 2009). En Europa el empleo de este tipo de estructuras se remonta al siglo XVI, momento en el que fueron empleados en los Alpes, y se hicieron populares en el siglo XIX. En China se construyeron por primera vez también en el siglo XVI en la meseta de Loess, y han sido utilizados con frecuencia desde el siglo XX (Xu *et al.*, 2004; Xu *et al.*, 2006; Zeng *et al.*, 2009; Xu *et al.*, 2009; Huang *et al.*, 2009). En España, la construcción de diques ha sido una técnica muy frecuentemente empleada en los planes y programas de restauración hidrológico-forestal (Del Palacio, 1999; Varela, 1999; Martínez de Azagra *et al.*, 2002; Gil, 2004), principalmente en Pirineos y en el sureste de la Península Ibérica (Martínez-Lloris *et al.*, 2001; Conesa, 2004; Belmonte *et al.*, 2005a, 2005b; Martínez-Lloris, 2006; Romero *et al.*, 2007; Castillo *et al.*, 2007; Boix-Fayos *et al.*, 2007; Castillo *et al.*, 2008; Conesa & García, 2009; Conesa *et al.*, 2009). En las zonas semiáridas, en las que la degradación de la cubierta vegetal y la torrencialidad de las precipitaciones originan procesos erosivos que dañan gravemente al suelo, el empleo de esta técnica es especialmente importante y necesario.

Sin embargo, algunos autores consideran que los diques de retención de sedimentos no siempre resultan necesarios ni efectivos (Marston & Dolan, 1999; Romero, 2008). García-Ruiz *et al.* (1996) y Götz (2001) analizan los riesgos que entrañan estas obras de corrección, sobre todo en áreas especialmente vulnerables, y Wohl (2006) indica que los diques producen los siguientes efectos negativos:

- Alteran la dinámica de los sedimentos
- Alteran la estabilidad del sustrato y lecho del cauce
- Interrumpe el movimiento longitudinal de nutrientes y organismos acuáticos
- Alteran la frecuencia de las olas de las inundaciones

Las entradas a la presa inducen importantes efectos morfológicos y granulométricos en el lecho del río (Boix-Fayos *et al.*, 2007), que cambia el comportamiento hidráulico del flujo en eventos de gran intensidad (Conesa *et al.*, 2004). Por tanto, será necesario el estudio de cada caso para determinar la necesidad de su empleo para la consecución del efecto deseado, y considerar si éste se pudiera lograr únicamente con vegetación. Castillo *et al.* (2008) concluyen que, a largo plazo, los usos del suelo ejercen un mayor control de la producción de sedimentos que las obras hidráulicas, que son menos eficientes con el aumento de la cobertura vegetal. No obstante, ambas técnicas pueden alterar el régimen hidrológico del cauce y su morfología, de forma que pueden llegar a causar impactos tan negativos que lleguen a anular los efectos beneficiosos conseguidos con la ejecución de estas obras (Castillo *et al.*, 2007; Boix-Fayos *et al.*, 2007; Castillo *et al.*, 2008). Por tanto, según estos autores, en el corto plazo, los diques tienen efectos positivos para el control de los sedimentos, pero debe considerarse como una medida temporal, que debe ser acompañada con actuaciones de repoblación con especies que ayuden a conseguir un control a largo plazo. De hecho, esta combinación de actuaciones tiene efectos positivos sobre la vegetación ribereña de acuerdo con Bombino *et al.* (2006), que encuentran una diversificación longitudinal de los tipos de vegetación y la creación de nuevos hábitats para las comunidades biológicas y ecológicas, que se atribuye a las características geométricas de este tipo de construcciones.

Funciones de los diques de retención de sedimentos

Las funciones que cumplen estas estructuras transversales y que justifican su empleo son múltiples, y han sido reseñadas por varios autores:

- Controlar el transporte de sedimentos, en condiciones generales así como en aquellos casos en que se encuentren asociados con el flujo de escombros y carga pesada durante las grandes inundaciones (Catella *et al.*, 2005).
- Estabilizar las laderas y cauces torrenciales, como barranqueras, barrancos, torrentes, ramblas, ramblizos o cárcavas. Consolidar las laderas inestables gracias a la cuña de materiales aguas arriba del dique, que se interpone entre las dos laderas, impidiendo los movimientos en masa: deslizamientos de fondo, socavación o hundimientos (Conesa, 2004; Gil, 2004; Conesa & García, 2007; Romero, 2008).
- Capturar, controlar, retener y disminuir el aporte de material sólido (Conesa, 2004; Belmonte *et al.*, 2005; Conesa & García, 2007; Romero, 2008).
- Laminar las aguas de avenida (Conesa, 2004; Gil, 2004; Conesa & García, 2007).
- Recargar los acuíferos, favorecido por el almacenamiento de agua en el vaso y el aumento de la carga hidrostática (Romero *et al.*, 2003; Conesa, 2004; Gil, 2004; Conesa & García, 2007).
- Disminuir la velocidad del agua y por tanto su capacidad erosiva (Belmonte *et al.*, 2005; Romero, 2008).
- Retrasar el aterramiento de embalses y alargar su vida útil, al reducir la tasa de materiales que serían vertidos en el vaso del embalse (Gil, 2004; Belmonte *et al.*, 2005; Romero, 2008). En las cuencas hidrográficas mediterráneas y del Guadalquivir la pérdida de capacidad de los embalses se estimó entre el 5 y el 25 % (Avendaño & Cobo, 1997; Saavedra, 2003). Este aspecto es especialmente importante en España, ya que es el primer país europeo y cuarto del mundo en número de embalses (Romero, 2008).
- Controlar aludes, mediante su retención completa o parcial, evitando que se vean afectadas vías de comunicación, poblaciones o estaciones de esquí (Gil, 2004).

Efectos de los diques de retención de sedimentos

Los diques empleados en los proyectos de restauración hidrológico-forestal pueden producir efectos hidrológicos y geomorfológicos sobre la corriente y efectos sobre infraestructuras, que han sido señalados por multitud de autores (Chien, 1985; López Cadenas, 1988; Castillo *et al.*, 2002; Romero *et al.*, 2003; Conesa, 2004; Gil, 2004).

Los efectos sobre el comportamiento hidráulico de la corriente difieren aguas arriba y aguas abajo de la hidrotecnia. Aguas arriba, estas estructuras provocan un descenso de la energía cinética del flujo de agua y de su capacidad de transporte, que induce la deposición de los sedimentos, produciéndose un cambio local del perfil del río, con disminución de la pendiente y ensanchamiento de la sección, y con un progresivo aterramiento del vaso con enterramiento de barras antiguas, con la consecuente elevación del lecho del cauce. De esta forma, producen una estabilización del canal, y originan dispersión de canales, e incluso un almacenamiento de agua, transitoriamente, de forma que se reducen los caudales punta; o de forma permanente, favoreciendo la

recarga de acuíferos (García-Ruíz & Puigdefábregas, 1985; Castillo *et al.*, 2001; Gil, 2004; Castillo *et al.*, 2007). Al disminuir la pendiente, además, en el extremo del área de influencia de la presa, se produce una deposición caótica de cantos heterométricos. En esta deposición, los sedimentos se organizan por tamaños, tendiendo a la simplificación sedimentaria que se va prolongando hacia arriba (García-Ruíz & Puigdefábregas, 1985). Romero *et al.* (2007) han obtenido un valor medio de control de erosión en cuencas con diques en Murcia de $4 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$, lo cual es una referencia del efecto de retención mínimo que realizan estas estructuras; también Díaz-Gutiérrez *et al.* (2012) ha observado que se pueden retener $7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$ en diques de las cárcavas de Tórtoles, en la cuenca del río Corneja, en Ávila (figura 3); y Ramos *et al.* (2012) han obtenido cifras dentro de este rango de magnitud en los diques de Saldaña, junto al río Carrión, en Palencia. Estas cifras no son nada desdeñables a la hora de analizar el efecto beneficioso de estas obras hacia las infraestructuras y poblaciones aguas abajo de las mismas, así como en la protección de la calidad del agua y el hábitat acuático.



Figura 3. Restauración hidrológico-forestal de Tórtoles (Ávila). Izquierda: barrancos y cárcavas en 1964 (Archivo de Confederación Hidrográfica del Duero); derecha: dique en un barranco en 2009

Aguas abajo los efectos de estas hidrotecnias son más complejos. Según algunos autores (García-Ruíz & Puigdefábregas, 1985; Bull *et al.*, 2000; Castillo *et al.*, 2001), la retención de sedimentos aguas arriba de la estructura provoca que el flujo recupere parte de su energía cinética original, que ya no emplea en arrastrar sedimentos, por lo que tiene una gran capacidad de incisión y una mayor capacidad erosiva, de forma que la excavación del nivel de base induce un incremento y una reactivación de los procesos de erosión. Además, se produce una modificación de la morfología de los cauces (García-Ruíz & Puigdefábregas, 1985; Romero *et al.*, 2003), que pueden indicar que la erosión se ve incrementada aguas abajo de la presa, produciendo cambios en el transporte y en la descarga de sedimentos. Esta última, en función de su intensidad, puede alterar la forma de la sección transversal del cauce, su pendiente y el tamaño de grano del material del lecho (Brandt, 2000; Castillo *et al.*, 2007). Sin embargo, a este respecto hay que decir que el peso específico del agua con sedimentos es de unos $1.200 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, mientras que el del agua pura es de $1.000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, por lo que evidentemente la energía cinética del agua pura es menor que la cargada de materiales. Por lo tanto, la erosión a la que se refieren los autores señalados, es posible que sea debida a un defecto en el diseño de la

estructura, en cuanto a la falta de disipadores de energía, cuencos de amortiguación o zampeados, y no a causa del flujo hidráulico. Estos elementos deben acompañar siempre el cuerpo central de la obra para evitar efectos indeseados.

Sobre las infraestructuras, los diques, aparte de ocasionar una prolongación de la vida útil de los embalses, sirven de defensa de puentes, drenajes y encauzamientos desde una doble perspectiva: los diques situados aguas arriba de estas infraestructuras ayudan a mantener su operatividad para el rango de caudales para el que fueran diseñadas, ya que, al provocar la sedimentación, evitan la acumulación de materiales arrastrados por el flujo, que producirían la reducción de la sección efectiva del canal; los diques situados aguas abajo, sin embargo, evitan que se descalce la cimentación de estas obras, gracias al aterramiento del vaso que producen (Gil, 2004).

Por otra parte, Gil (2004) indica que los diques alteran la geomorfología de barrancos, torrentes y ramblas, por lo que a la hora de diseñarlos es necesario tenerlo en cuenta para que los efectos negativos sean los mínimos posibles. No obstante, hay que considerar la distinta repercusión de estas hidrotecnias en corrientes naturales y en zona de *badlands* o torrentes generados por una acción antrópica descontrolada. En este último caso, los diques intentan recuperar una morfología más parecida a la original antes de la intervención humana y al menos, si no es posible, disminuir la capacidad erosiva de los flujos torrenciales creados y reducir el elevado transporte de sedimentos, con lo que sus efectos serían positivos. Por otra parte, si se construyen estas hidrotecnias sobre cauces con flujos permanentes o casi permanentes, se debe tener en cuenta a la fauna acuática que los utiliza, y por lo tanto adoptar las medidas oportunas para que no se vea afectado su desplazamiento longitudinal. A este respecto, también conviene señalar que muchas de estas obras llevan distribuidas en el paramento a diferentes alturas mecinales y/o troneras, que en cierta medida pueden facilitar el paso de fauna acuática a su través con diferentes niveles de avenidas.

Por último, los efectos de la retención de sedimentos y laminación de avenidas anteriormente señalados, conducen a una reducción de los riesgos de inundación de los núcleos de población que se sitúan aguas abajo de estas estructuras, de acuerdo con Gil (2004). Sin embargo, en ocasiones inducen una falsa idea de seguridad absoluta, y aparecen usos inadecuados en los cauces o en los conos de deyección, como en el caso de la catástrofe del torrente de Arás en Biescas (Huesca), viviendas al pie de las cárcavas como en Saldaña (Palencia), o casas apoyadas en diques, como ocurre en Tórtoles (Ávila) (figura 4).



Figura 4. Izquierda: Construcción empotrada en un dique de gaviones en Tórtoles (Ávila). Derecha: Vivienda construida al pie de una cárcava en Saldaña (Palencia).

CONCLUSIONES

El problema de la erosión por cárcavas y *badlands* es arduo, complejo y de costosa remediación. Hay que estabilizar laderas para poder revegetar y reforestar el terreno, evitar tubificaciones, controlar escorrentías así como caudales líquidos y sólidos, disipar la energía de los flujos erosivos y asegurar el arraigo de la vegetación implantada. Todo ello se analiza, estudia, calcula y planifica en un proyecto de restauración hidrológico-forestal elaborado por los ingenieros forestales y de montes, que son los técnicos con la formación y competencia profesional en la materia. Este proyecto luego debe ser ejecutado con las complicaciones que se presentan sobre terrenos tan difíciles y climas tan irregulares (arcillas expansivas, deslizamientos de laderas, accesos a los terrenos, problemas de cimentación o anclaje de estructuras, falta de lluvias, crecidas súbitas, etc.). El análisis de la efectividad de las obras y los resultados deben entonces someterse a crítica asegurando que las condiciones de ejecución han sido las correctas. En ocasiones la falta de presupuestos apropiados a la envergadura de las obras, las sequías, la infertilidad del suelo, la calidad de la planta, la carencia de mano de obra especializada, la falta de control en el desarrollo de los trabajos y, muchísimas veces, la falta de seguimiento y mantenimiento de las acciones proyectadas pueden llevarnos a falsas conclusiones sobre los resultados. Un estudio serio y riguroso debe considerar tanto el diseño de los proyectos como su ejecución, analizar las variables climáticas, hidráulicas y humanas relacionadas con las obras y aquéllas para las que estaban diseñadas. Y por supuesto, no perder nunca de vista el objeto para el que fueron proyectadas: normalmente la defensa de poblaciones, propiedades e infraestructuras. Sólo así se podrá avanzar en el conocimiento y la mejora de los proyectos y actuaciones. No obstante, la ingeniería forestal ha dejado desde finales del siglo XIX claros ejemplos de lo que supone robar terrenos al desierto y devolverlos a su vocación forestal. Los torrentes pirenaicos, de la cuenca del Jalón y del Jiloca, los torrentes rambla levantinos, las restauraciones de Sierra Ricote y Sierra Espuña, la fijación de dunas en Guardamar de Segura, las restauración de cárcavas de Daroca, las del río Carrión o de la cabecera del río Corneja forman parte de un gran elenco. Se trata ahora, como entonces, de frenar los procesos desertificadores y recuperar la fertilidad y productividad de los terrenos, regular el ciclo hidrológico y mejorar la calidad de las aguas para incrementar la riqueza de un país con un grave porcentaje de su territorio seriamente degradado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfonso, C.; 2005. Desertificación: problemática y soluciones. *Ambienta*, 47: 22 – 25.
- Ayerbe, B.; 1913. El problema del Cuerpo de Ingenieros de Montes en la defensa de la estación y vía internacional del ferrocarril a Francia por Canfranc. *Revista Montes*, 871: 305-314, 350-354, 378-386 y 423-430.
- Belmonte, F.; Romero, A.; Martínez-Lloris, M.; 2005: Erosión en cauces afectados por obras de corrección hidrológica (Cuenca del Río Quípar, Murcia). *Papeles de Geografía*, 41-42: 71-83.
- Belmonte, F.; Romero, A.; Martínez-Lloris, M.; 2005. Impactos ambientales asociados a la construcción de obras de corrección hidrológica en la Cuenca del río Quípar (Sureste de España): apertura de caminos de acceso. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 31: 97-106.
- Benito, G.; Gutiérrez, M.; Sancho, C.; 1992. Erosion rates in badland areas of the central Ebro basin (NE Spain). *Catena*, 19: 269–286.
- Boix-Fayos, C.; González-Barberá, G.; López-Bermúdez, F.; Castillo, V.M.; 2007. Effects of check dams, reforestation and land-use changes on river channel morphology: case study of The Rogativa Catchment (Murcia, Spain). *Geomorphology*, 91: 103-123.
- Boix-Fayos, C.; De Vente, J.; Martínez-Mena, M.; González-Barberá, G.; Castillo, V.; 2008. The impact of land use change and check-dams on catchment sediment yield. *Hydrol. Process.*, 22: 4922–4935.
- Bombino, G.; Tamburino, V.; Zimbone, S.M.; 2006. Assessment of the effects of check-dams on riparian vegetation in the mediterranean environment: a methodological approach and example application. *Ecological engineering*, 27: 134-144.
- Brandt, S.A.; 2000. Classification of geomorphological effects downstream of dams. *Catena*, 40: 375–401.
- Bull, L.J.; Kirkby, M.J.; Shannon, J.; Hooke, J.M.; 2000. The impact of rainstorms on floods in ephemeral channels in southeast Spain. *Catena*, 38(3): 191-209.
- Cantero, A.; 2011. Construcción de pequeños diques de trozas en el hayedo de Iturrigorri (Oñati, Guipúzcoa). *Montes*, 107: 17-20.
- Cantón, Y.; Domingo, F.; Solé-Benet, A.; Puigdefábregas, J.; 2001. Hydrological and erosion response of a badlands system in semiarid SE Spain. *Journal of Hydrology*, 252: 65-84.
- Casalí, J.; López, J.J.; Giráldez, J.V.; 1999. Erosión por cárcavas efímeras en el sur de Navarra (España): Descripción y cuantificación. *Ingeniería del Agua*, 6(3): 251-258.
- Casalí, J.; Giménez, R. (Eds.); 2007. *Progress in gully erosion research*. Universidad Pública de Navarra. Pamplona.
- Castillo, V.M.; Mosch, W.; González-Barbera, G.; Lopez-Bermudez, F.; 2001: Efectos de los diques de correccion hidrológico-forestal en la geomorfología de barrancos y ramblas. *III Congreso Forestal Español*. Granada.
- Castillo, V.; González-Barberá, G.; Mosch, W.; Navarro, J.A.; Conesa, C.; López-Bermúdez, F.; 2002. Seguimiento y evaluación de los efectos sobre el medio natural de la sequía y los procesos erosivos en la Región de Murcia. Consejería de Agricultura, Agua y Medio Ambiente de la Región de Murcia, 167-233.
- Castillo, V.M.; Mosch, W.; Conesa, C.; Gonzalez-Barberá, G.; Navarro, J.A.; López-Bermúdez, F.; 2007: Effectiveness and geomorphological impacts of check dams for soil erosion control in a semiarid mediterranean catchment: El Cárcavo (Murcia, Spain). *Catena*, 70: 416-427.

- Castillo, V.M.; Boix-Fayos, C.; De Vente, J.; Martínez-Mena, M.; González-Barberá, G.; 2011. Efectos del aumento de la cubierta vegetal y los diques de corrección en la producción de sedimentos de cuencas mediterráneas. *Cuad. Soc. Esp. Cienc. For.*, 32: 153-157.
- Catella, M.; Paris, E.; Solari, L.; 2005. Case study: Efficiency of slit-check dams in the Mountain region of Versilia Basin. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(3): 145-152. DOI: 10.1061/~ASCE!0733-9429~2005!131:3~145!
- Chanson, H.; 2004. *The hydraulics of open channel flow: an introduction*. Elsevier Butterworth-Heinemann. Oxford.
- Chien, N.; 1985. Changes in river regime after the construction of upstream reservoirs. *Earth Surface Processes and Landforms*, 10: 143-159.
- Ciccacci, S.; Galiano, M.; Roma, M.A.; Salvatore, M.C.; 2008. Morphological analysis and erosion rate evaluation in badlands of Radicofani area (Southern Tuscany-Italy). *Catena*, 74(2): 87-97.
- Clarke, M.L.; Rendell, H.M.; 2006. Process-form relationships in southern Italian badlands: erosion rates and implications for landform evolution. *Earth Surf. Process. Landforms*, 31: 15-29.
- Clarke, M.L.; Rendell, H.M.; 2010. Climate-driven decrease in erosion in extant Mediterranean badlands. *Earth Surf. Process. Landforms.*, 35(11): 1281-1288.
- Clotet, N.; Gallart, F.; Sala, M.; 1987. Los badlands, características, interés teórico, dinámica y tasas de erosión. *Notes de Geografía Física*, 15-16: 28-37.
- Codorníu, R.M.; 1897, 1898. La sierra Espuña y su repoblación forestal. *Revista de Montes*, 498: 530-538, 499: 561-566 y 606-611, 501: 633-637, 502: 661-663, 512: 233-236, 513: 261-265, 297-300 y 378-380 (artículo publicado por partes).
- Codorníu, R.; 1910. *Ligera idea de los trabajos hidrológico-forestales que efectúa el Estado*. Cuerpo Nacional de Ingenieros de Montes. Inspección de Repoblaciones Forestales y Piscícolas, núm. 7. Imprenta Alemana. Madrid.
- Conesa, C.; 2004. Los diques de retención en cuencas de régimen torrencial: diseño, tipos y funciones. *Nimbus*, 13-14: 125-132.
- Conesa, C.; García-Lorenzo, R.; 2007. Litofacies de relleno y modelo de sedimentación de los diques de retención en el tramo inferior de la Rambla del Cárcavo (Cuenca del Segura). *Rev. C & G.*, 21(3-4): 77-100.
- Conesa, C.; Arana, R.; García-Lorenzo, R.; 2009. Variación granulométrica y mineralógica en profundidad de los sedimentos retenidos por diques. Estudio en cauces torrenciales semiáridos del sureste peninsular. *Nimbus*, 23-24: 61-88.
- Conesa, C.; García-Lorenzo, R.; 2009. Local scour estimation at check dams in torrential streams in south east Spain. *Geogr. Ann.*, 91A(3): 159-177.
- Del Palacio, E.; 1999. *La restauración hidrológico-forestal. Gestión sostenible de los recursos suelo, agua y vegetación*. O.A. Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Del Palacio, E.; 2002. *Las ramblas: los ríos invisibles. La restauración hidrológico-forestal de ramblas en el ámbito mediterráneo*. O.A. Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- De Luna, E.; Laguna, A.M.; Poesen, J.; Giráldez, J.V.; 2004. Evolución de un sistema de cárcavas activas en el sureste español. *Ingeniería del agua*, 11: 65-73.
- Desir, G.; Marín, C.; 2009. Caracterización de la erosión en áreas acarreadas de la FM. Tudela (Bárdenas Reales, Navarra). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 35 (2):195-213.

- Díaz-Gutiérrez, V.; Mongil, J.; Navarro, J.; 2012. Efectividad de los diques forestales en la retención de sedimentos en la cabecera del río Corneja (Ávila). Propuesta metodológica. (Pendiente de aceptación).
- Ellison, W.D; 1947. Soil Erosion. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 12: 479-84.
- FAO; 1981. *World soil charter*. Food and Agriculture Organization. Roma.
- FAO; 1992. *Manual de sistemas de labranza para América Latina*. Boletín de suelos de la FAO. FAO.
- FAO; 2000. *Manual de prácticas integradas de manejo y conservación de suelos*. Boletín de aguas y tierras de la FAO. FAO.
- Faulkner, H.; Alexander, R.; Zukowskyj, P.; 2008. Slope-channel coupling between pipes, gullies and tributary channels in the Mocatán catchment badlands, Southeast Spain. *Earth Surf. Process. Landforms*, 33: 1242-1260
- Faustino, J.; 1985. CATIE. *Proyecto regional de manejo de cuencas. Conservación de suelos*. Curso de capacitación. Panamá.
- FEDERACAFÉ; 1975. *Manual de conservación de suelos de ladera*. Centro Nacional de Investigaciones del Café, Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Chinchiná (Colombia).
- Ferrer, M.; 2009. La restauración hidrológico-forestal. *Foresta*, 43: 181-185.
- Foster, G.R.; 1986. Understanding ephemeral gully erosion. En: *Soil Conservation. Assessing the National Resources Inventory*. Vol 2: 90-125. Committee on Conservation Needs and Opportunities. Board on Agriculture. National Research Council. National Academy Press, Washington D. C.
- García-Ruiz, J.N.; Puigdefábregas, J.; 1985: Efectos de la construcción de pequeñas presas en cauces anastomosados del pirineo central. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 11: 91-102.
- García-Ruiz, J.M.; White, S.; Martí, C.; Valero, B.; Errera, M.P.; Gómez-Villar, A.; 1996. *La catástrofe del Barranco de Arás (Biescas, Pirineo Aragonés) y su contexto espacio temporal*. Instituto Pirenaico de Ecología, Consejo Superior de Investigaciones científicas. Zaragoza.
- GCMD; 2011. The Global Assessment of Human Induced Soil Degradation (GLASOD) Digital Database from UNEP/GRID-Geneva. http://gcmd.nasa.gov/records/GCMD_GNV00018_171.html.
- Gil, R. (Coord.); 2004. Restauración hidrológico-forestal: Pasado, presente y futuro. *Congreso Nacional de Medio Ambiente*. Madrid.
- Gómez, A.; Schnabel, S.; Lavado, F.; 2011. Procesos, factores y consecuencias de la erosión por cárcavas; trabajos desarrollados en la Península Ibérica. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 55: 59-80.
- Götz, A.; 2001. *Flood protection: a common goal for federal, cantonal and municipal authorities*. Federal Office for Water and Geology.
- Hooke, J.M.; 2006. Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region. *Geomorphology*, 79: 311-335.
- Hooke, J.; Van Wesemael, B.; Torri, D.; Castillo, V.; Cammeraat, E.; Poesen, J.; 2007. *Combating Land Degradation by Minimal Intervention: The Connec. Reduct. Approach*. Global Change and Desertif. Prog. Proj. No. GOCE-CT-2003-505361. Univ. of Portsmouth.
- Huang, M.; Gong, J.; Shi, Z.; Zhang, L.; 2009. River bed identification for check-dam engineering using SPOT-5 image in the HongShiMao watershed of the Loess Plateau, China. *International Journal of Remote Sensing*, 30(8): 1853-1865.

- Hudson, N.W.; 1963. Gully control in Mopani Soils. *Rhodesia Agricultural Journal*, 60(1): 22-31.
- Hudson, N.; 1982. *Conservación del suelo*. Editorial REVERTÉ. Barcelona.
- Ibáñez, J.J.; Jiménez-Ballesta, R.; Conde, P.; 2003: Degradación de suelos por efecto antrópico en la región mediterránea. En: Bienes, R.; Marqués, R.J. (Eds.). *Perspectivas de la degradación del suelo*. Forum Calidad. Madrid.
- Lal, R.; Stewart, B. A.; 1995. *Soil Management, Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*. Lewis Publisher CRC Press. Florida, USA.
- León, J.D.; 2005. Estrategias para el control y manejo de la erosión en cárcavas. *Cuadernos Ambientales*, 2: 88-101.
- López-Bermúdez, F.; Torcal, L.; 1986. Procesos de erosión en tunel (piping) en cuencas sedimentarias de Murcia (España). Estudio preliminar mediante difracción de rayos x y microscopio electrónico de barrido. *Papeles de Geografía Física*, 11: 7-20.
- López-Bermúdez, F.; Romero, A.; 1998. Erosión y desertificación: Implicaciones ambientales y estrategias de investigación. *Papeles de Geografía*, 28: 77-89.
- López-Bermúdez; 2008. *Desertificación: Preguntas y respuestas a un desafío económico, social y ambiental*. Fundación Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- López Cadenas, F. (Dir.); 1988. *Corrección de torrentes y estabilización de cauces*. FAO.
- López Cadenas, F.; 2003. *La ingeniería en los procesos de desertificación*. Ed. Mundi-Prensa, Tragsa. Madrid.
- Lucía, A.; Vicente, F.; Martín-Moreno, C.; Martín-Duque, J.F.; Sanz, M.A.; De Andrés, C.; Bodoque, J.M.; 2008. Procesos geomorfológicos activos en cárcavas del borde del piedemonte norte de la Sierra de Guadarrama (Provincia de Segovia, España). *Boletín de la Real Sociedad Española de Historia Natural (Sec. Geol.)*, 102: 47-69.
- Maestre, F.T.; Cortina, J.; Gil, F.; 2004. Repoblaciones de *Pinus halepensis* y restauración de ecosistemas en medio semiárido. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.*, 17: 181-186.
- MMAMRM; 2008. *Programa de Acción Nacional contra la Desertificación*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid.
- MMAMRM; 2011. *Restauración hidrológico-forestal*. www.marm.es/es/biodiversidad/temas/montes-y-politica-forestal/restauracion-hidrologicoforestal/default.aspx. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.
- Marston, R.A.; Dolan, L.S.; 1999. Effectiveness of sediment control structures relative to spatial pattern of upland soil loss in an arid watershed, Wyoming. *Geomorphology*, 31: 313-323.
- Martín-Duque, J.F.; 2007. *Erosión hídrica en cárcavas y barrancos de la provincia de Segovia, España*. *Geología & Yacimientos minerales*. www.aulados.net.
- Martín-Vide, J.P.; 2002. *Ingeniería de ríos*. Edicions UPC. Badalona.
- Martínez de Azagra, A.; Fernández de Villarán, R.; Seseña, A.; Méndez, C.; Díez-Hernández, J.M.; Navarro, J.; Varela, J.M.; 2002. Metodología para la inventariación de diques forestales gavionados. Aplicación en la provincia de Palencia. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, 13: 171-181.
- Martínez-Casasnovas, J.A.; 1992. Reforestación de cuencas en Murcia. En: Aranda, G. (Coord.). *Hidrología Forestal y Protección de Suelos*. Organismo Autónomo Parques Nacionales. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid.
- Martínez-Casasnovas, J.A.; Ramos, M.C.; Poesen, J.; 2004. Assessment of sidewall erosion in large gullies using multi-temporal DEMs and logistic regression analysis. *Geomorphology*, 58: 305-321.

- Martínez-Casasnovas, J.A.; Ramos, M.C.; García-Hernández, D.; 2009. Effects of land-use changes in vegetation cover and sidewall erosion in a gully head of the Penedés region (Northeast Spain). *Earth Surf. Process. Landforms*, 34: 1927–1937.
- Martínez-García, F.; Martínez-García, J.J.; Masiá, R.; Cabanes S.; 1996. La restauración hidrológico-forestal de Sierra Espuña. *Montes*, 43: 9-11.
- Martínez-Lloris, M.; Romero, A.; Alonso-Sarría, F.; 2001. Respuesta erosiva de cuencas, corregidas mediante diques de retención de sedimentos, ante lluvias de alta intensidad. Cuenca del río Quípar, sureste de España. *Papeles de Geografía*, 34: 191-203.
- Martínez-Lloris, M.; 2006. *El comportamiento hidrodinámico de la cuenca del río Quípar (sureste de España). La función de los diques de corrección hidrológica* (Tesis doctoral). Universidad de Murcia. Murcia.
- Mintegui, J.A.; Robredo, J.C.; 1994. Caracterización de las cuencas hidrográficas objeto de restauración hidrológico forestal, mediante modelos hidrológicos. *Ingeniería del agua*, 1(2): 69-82.
- Mongil, J.; Navarro, J.; Cruz, V.; Díaz, V.; 2012. Destrucción y restauración de la cubierta forestal en la cuenca alta del río Corneja (Ávila): análisis histórico de un proceso de gestión cambiante. *IV Reunión del Grupo de Historia Forestal de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. Vitoria.
- Moore, I. D.; Burch, G.J.; Mackenzie, D. H.; 1988. Topographic Effects on the Distribution of Surface Soil Water and the location of Ephemeral Gullies. *Trans. ASAE*, 31:1098-1107.
- Morgan, R.P.C.; 1997. *Erosión y conservación del suelo*. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- Navarro, J.; Serrano, C.; Ugalde, M.; Oria de Rueda, J.A.; Jonte, M.A.; 1997. Utilización de geotextiles en la corrección de cárcavas del Cristo del Otero (Palencia). *I Congreso Forestal Hispano-Luso*. Pamplona.
- Navarro, J.; Mongil, J.; Araújo, J.C.; 2012. Desertificación secular de las cuestas de Saldaña (Palencia) frente a 80 años de restauración. *IV Reunión del Grupo de Historia Forestal de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*. Vitoria.
- Núñez, J.; 2001. *Manejo y conservación de suelos*. EUNED. San José (Costa Rica).
- Pérez-Soba, I.; 2009. Diferencias hidrológicas entre ramblas y torrentes-ramblas. *Actas 5º Congreso Forestal Español*.
- Pérez-Urruti, J.A.; 1948. *Trabajos hidrológico-forestales: fijación de terrenos*. Conferencia de clausura del Centenario de la Escuela de Ingenieros de Montes. Diana, Artes Gráficas. Madrid.
- Piest, R.F.; Bowie, A.J.; 1974. Gully and stream bank erosion. En: Land-use: persuasion of regulation. *Proceedings of the 29th Annual Meeting of the Soil Conservation Society of America*. Ankeny (Iowa, EEUU).
- Poesen, J.; 1993. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. En: *Farm Land Erosión in Temperate Plains Environment and Hills*. S. Wicherek (Ed.). Elsevier. Amsterdam.
- Poesen, J.; Govers, G.; 1990. Gully Erosión in the Loam Belt of Belgium: Typology and Control Measures. En: *Soil Erosión on Agricultural Land*. J. Boardman, I. D. L. Foster y J. A. Dearing (eds.). John Wiley & Sons. Londres.
- Poesen, J.; Hooke, J.M.; 1997. Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Progress in Physical Geography*, 21 (2): 157–199.
- Poesen, J.; Vandekerckhove, L.; Nachtergaele, J.; Oostwoud Wijdenes, D.; Verstraten, G.; Van Wesemael, B.; 2002. Gully erosion in dryland environments. En: Bull, L.J.;

- Kirkby, M.J. (Eds.); 2002. *Dryland rivers: hydrology and geomorphology of semi-arid channels*. Wiley. Chichester (United Kingdom).
- Poesen, J.; Nachtergaele, J.; Verstraeten, G.; Valentin, C.; 2003. Gully erosion and environmental change: importance and research needs. *Catena*, 50: 91-133.
- Porta, J.; López Acevedo, M.; Roquero, C.; 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. Ed. Mundi-Prensa. Madrid.
- Ramos, I.; Navarro, J.; Díaz, V.; Mongil, J.; Bartolomé, D. 2012. Control de sedimentos y erosión en la restauración hidrológico-forestal de Saldaña (Palencia). VI Congreso Forestal. Vitoria. (Aceptada para comunicación oral)
- Regüés, D.; Guàrdia, R.; Gallart, F.; 2000. Geomorphic agents versus vegetation spreading as causes of badland occurrence in a Mediterranean subhumid mountainous area. *Catena*, 40: 173-187.
- Rey, F.; 2003. Influence of vegetation distribution on sediment yield in forested marly gullies. *Catena*, 50: 549-562
- Rivera, J.H.; Sinisterra, J.A.; Calle, Z.; 2007. *Restauración ecológica de suelos degradados por erosión en cárcavas en el enclave xerofítico de Dagua, Valle del Cauca, Colombia*. Fundación CIVAP.
- Rodríguez-Graells, C.; 2011. Planes de Conservación de Suelos en la provincia de Albacete. Repoblación y Restauración Hidrológico-Forestal. *Foresta*, 47-48: 130-139.
- Romero, A.; 2008. Los diques de corrección hidrológica como instrumentos de cuantificación de la erosión. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 34: 83-99.
- Romero, A.; Martínez-Lloris, M.; Belmonte, F.; Hernández-Laguna, E.; 2003. La cuenca del Río Quipar (región de Murcia): Una cuenca modelo para el estudio de utilidad de los diques de retención de sedimentos en el control de la erosión y en la recarga de acuíferos. *Nimbus*, 11-12: 89-105.
- Romero, A.; Alonso-Sarria, F.; Martínez-Lloris, M.; 2007. Erosion rates obtained from check-dam sedimentation (SE Spain). A multi-method comparison. *Catena*, 71: 172-178.
- Rubio, J.L.; 2005. Desertificación. *Ambienta*, 47: 26-31.
- Saavedra, M.M.; 2003: El manejo de la cubierta vegetal en el control de la erosión en olivar. En: Bienes, R.; Marqués, R.J. (eds.). *Perspectivas de la degradación del suelo*. Forum Calidad. Madrid.
- Schumm, S.A.; 1999. Causes and control of channel incision. En: Darby, S.E.; Simon, A. (Eds.); 1999. *Incised rivers*. Jhon Wiley ans Sons Press. Chichester (United Kingdom).
- Sharma, P.M.; 1993. *Prevención y control de cárcavas a nivel de finca por medio de métodos vegetativos y estructurales temporales en Honduras tropical*. Proyecto RENARM/ Manejo de cuencas. CATIE. Turrialba (Costa Rica).
- Simon, A.; Darby, S.; 1999. The nature and significance of incised river channels. En: Darby, S.E.; Simon, A. (Eds.); 1999. *Incised rivers*. Jhon Wiley ans Sons Press. Chichester (United Kingdom).
- Soto, M.; 2008. Lucha contra la erosión en La Rioja Baja. *Páginas de Información Ambiental*, 27: 24-27.
- Stocking, M.; Murnaham, N.; 2003. *Manual para la evaluación de campo de la degradación de la tierra*. Ediciones Mundi-Prensa. Murcia.
- Thiéry, E.; Lechallas, M.C.; 1891. *Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement*. Baudry et cie. París.
- Thomas, J.T.; Iverson, N.R.; Burkart, M.R.; Kramer, L.A.; 2004. Long-term growth of a valley-bottom gully, western Iowa. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29: 995-1009.

- Valentín, C.; Poesen, J.; Li, Y.; 2005. Gully erosion: impacts, factors and control. *Catena*, 63(2): 132-153.
- Varela, J.M. (Dir); 1999. *Inventario de obras de corrección hidrológica-forestal de las variables ambientales relacionadas con las mismas*. Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas. Dirección General de Obras Hidráulicas. Madrid.
- Vicente, M.F.; 2009. Origen, evolución y dinámica actual de cárcavas del piedemonte norte del Guadarrama. Métodos de estudio y criterios para su gestión con bases ecológicas. Congreso Nacional de Medio Ambiente (CONAMA9).
- Vicente, F.; Sanz, M.A.; Lucía, A.; Martín-Duque, J.F.; 2009. Evolución geomorfológica en tiempos históricos recientes de cárcavas del borde del piedemonte norte del Guadarrama (Segovia, España): Estudio a partir de fuentes documentales. *Bol. R. Soc. Esp. Hist. Nat. Sec. Geol.*, 103(1-4): 49-64.
- Wohl E.; 2006. Human impacts to mountain streams. *Geomorphology*, 79: 217-248.
- Xu, X.Z.; Zhang, H.W.; Zhang, O.; 2004. Development of check-dam systems in gullies on the Loess Plateau, China. *Environmental Science & Policy*, 7: 79-86.
- Xu, X.Z.; Zhang, H.W.; Wang, G.Q.; Peng, Y.; Zhang, O.Y.; 2006. A laboratory study on the relative stability of the check-dam system in the Loess Plateau, China. *Land Degrad. Develop.*, 17: 629-644.
- Xu, X.Z.; Zhang, H.W.; Wang, G.Q.; Chen, S.C.; Dang, W.Q.; 2009. An experimental method to verify soil conservation by check dams on the Loess Plateau, China. *Environ. Monit. Assess.*, 159: 293-309.
- Yair, A.; Sharon, D.; Lavee, H.; 1980. Trends in runoff and erosion processes over an arid limestone hillside, northern Negev, Israel. *Hydrological Sciences Journal*, 25: 3, 243-255.
- Zaimes, G.N.; Schultz, R.C.; Tufekcioglu, M.; 2009. Gully and stream bank erosion in three pastures with different management in southeast Iowa. *Jour. Iowa Acad. Sci.*, 116(1-4): 1-8.
- Zeng, Q.L.; Yue, Z.Q.; Yang, Z.F.; Zhang, X.J.; 2009. A case study of long-term field performance of check-dams in mitigation of soil erosion in Jiangjia Stream, China. *Environ Geol*, 58: 897-911.