

El estudio de la morfología de los ríos en roca. Implicaciones hidrológicas y evolutivas en dos barrancos españoles

J.A. Ortega Becerril

Departamento de Geodinámica. Universidad Complutense de Madrid
C/. José A. Novais, 2. Madrid 28040.
jortega47@geo.ucm.es

RESUMEN

España es un país con una enorme riqueza en sistemas fluviales y torrenciales, sobre todo de montaña. Los ríos desarrollados sobre roca resistente (ríos en roca) encierran muchas respuestas aplicables a los interrogantes de los ríos aluviales. La baja tasa de erosión y su buena preservación hacen de ellos unos excelentes laboratorios naturales. Su morfología general y las formas menores aparecen como respuesta a condiciones locales como la pendiente y los aportes líquidos y sólidos. El sustrato juega un papel importante, pero no fundamental, en el desarrollo de la morfología. Es el régimen de caudales el más importante de los factores que condicionan las formas, y las crecidas y avenidas el instrumento del que se vale para realizar los cambios a nivel puntual. El equilibrio no se alcanza a escala de cuenca o de río al completo, más bien parece obedecer a tramos de tamaño pequeño o inclusive a nivel puntual. Podemos entender un río en roca como un sistema con múltiples niveles de base (sistemas de poza y escalón) en el que la hidráulica y el clima, las lluvias fundamentalmente, condicionan la forma final y en el que la degradación o erosión se produce a lo largo de múltiples tramos y no de forma unidireccional aguas arriba (erosión remontante). En los dos ejemplos estudiados aparecen a lo largo de un tramo de pocos kilómetros, zonas con morfología y funcionamiento distintas y que no obedecen a una gradación *normal* en la evolución o madurez fluvial.

Palabras clave: geomorfología, hidráulica, hidrología, inundaciones, ríos en roca

Bedrock river's morphology analysis. Evolutive and hydrologic implications in two spanish canyons

ABSTRACT

Spain has an important diversity and richness of fluvial systems, specially mountain rivers. Bedrock Rivers have the response to many questions applied to alluvial rivers. Low erosion rates and good preservation make of these fluvial systems an excellent natural flume of experimentation. General morphology and small forms appear punctually doubt to local conditions like slope, discharge and bedload. Substrate plays an important role but not essential in morphology development. Hydraulic conditions is the most important factor that controls bedrock forms and floods are the instrument that realize punctual changes. We can understand the canyons like a river with different base levels in which both, hydraulics and climate (rainfall) help to morphology's building and in which degradation appears in multiple fronts.

Key words: bedrock rivers, floods, geomorphology, hydraulic, hydrology

Introducción

Los ríos en roca son los fósiles de la geomorfología fluvial, ya que guardan en su interior las respuestas a preguntas que constantemente nos hacemos sobre sus 'hermanos mayores', los ríos aluviales. La configuración rocosa del sustrato hace que los procesos se ralenticen y queden impresas las huellas de su formación en distintas etapas. Pero además hay una razón por la cual son muy interesantes desde una ópti-

ca científica, y es que nunca se encuentran equilibrados a nivel completo, o inclusive a escala de un tramo, si no que los procesos geomorfológicos actúan en ellos de una forma puntual. Es como si tuviesen a lo largo de su recorrido innumerables niveles de base que los controlan.

Los mejores ejemplos se localizan en zonas de montaña de difícil acceso que han permitido continuar a los procesos naturales con normalidad, circunstancia que ha propiciado que hayan llegado

hasta nuestros días con un aceptable grado de conservación. En España existe un espacio protegido con categoría de Parque Natural, que es uno de los mayores tesoros geomorfológicos mundiales, por la excepcional calidad de los ríos en roca que alberga. Es el Parque Natural de la Sierra y los cañones de Guara. Además de este espacio, España cuenta con más de 1000 ríos en roca o tramos de ríos que atraviesan litologías resistentes que se reparten por toda la geografía nacional, siendo las zonas de mayor interés, Pirineos, Sierras Exteriores Pirenaicas, Mallorca y, en general, casi todos los macizos montañosos de naturaleza calcárea, propensa a generar relieves acusados.

La definición de río en roca dada por Wohl (2000) incluye una mayor cantidad de litologías, no solo la calcárea, y otros sistemas fluviales aparte de los barrancos. Según esta definición, un río en roca sería en general cualquier sistema fluvial encajado en un sustrato rocoso que dificulta su erosión y con pendientes elevadas, flujos turbulentos, movimiento de sedimentos que sigue patrones estocásticos y régimen de caudales fuertemente estacional, entre otras características. De esta manera, pueden ser ríos en roca cualquiera de los tramos de un sistema fluvial, independientemente de si está o no en la zona de cabecera. Algunos ejemplos ibéricos de este tipo de ríos atravesando sustrato rocoso en su curso medio-bajo son el río Guadiana en la zona de Pulo do Lobo (Portugal), el río Tajo en Alcántara (Cáceres) o el río Duero en los Arribes (Salamanca y Zamora).

En el marco de este gran número de ríos encontramos una gran variedad morfológica en España (Ortega, 2003), con ríos y secciones prácticamente de todas las categorías de ríos en roca y formas menores descritas por autores como Wohl (1992, 1998 y 1999), Tinkler y Wohl (1998), Wohl e Ikeda (1998), Wohl *et al.* (1999) y Richardson y Carling (2005).

A finales de los 90 las investigaciones en morfología de ríos en roca se centraron en los factores que condicionan las formas: ¿se trataba del sustrato, pendiente, clima, condiciones hidráulicas o hidrológicas?. Algunos autores (Wohl e Ikeda, 1997; Wohl *et al.*, 1999; Wohl y Thompson, 2000) demuestran que las condiciones hidráulicas (régimen de caudales y su variabilidad) junto al clima, son dos de los factores más relevantes en la morfología. Actualmente falta por demostrar la relación entre la forma y su distribución espacial, ya que en principio la morfología se muestra independiente del sustrato (Wohl e Ikeda, 1997), y no se conoce bien el porqué de su aparición (de una u otra forma o tipología) en una zona concreta. Otra cuestión importante versa sobre si las distintas morfologías que pueden describirse se relacionan

con la evolución del río en roca, aspecto más descrito para grandes formas como plataformas rocosas, canales internos o puntos de inflexión y no tanto en pequeños afluentes de montaña. En este sentido, este trabajo pretende caracterizar y delimitar algunos de estos tramos dentro de los ríos y establecer relaciones entre ellos. Se describirán algunas de las formas-tipo descritas en la literatura y que muy posiblemente se relacionan con el estado evolutivo del cañón. El estudio se ha realizado para dos ríos en roca españoles (Barranco Fondo, Huesca y Barranco del Infierno, Alicante) que presentan distinta naturaleza del sustrato, régimen hidrológico, área de la cuenca y pendiente.

Así pues, el objetivo del presente trabajo es presentar dos casos específicos que complementen una síntesis sobre el estado del arte en los ríos en roca en cuanto a las tipologías y formas. Para ello se ha empleado una metodología de trabajo clásica, a partir de fotografías aéreas y de satélite, mapas topográficos e instrumentación de levantamiento topográfico combinada con material específico de descenso de barrancos para introducirse en el interior de zonas de difícil acceso.

Estado del arte sobre los ríos en roca. Modelos genéticos y clasificación según morfología

Las peculiares condiciones de la geografía ibérica hacen de la Península y más concretamente, España, una de las mejores zonas para la aparición de ríos en roca. Con una extensión superior al 20% del territorio, los macizos montañosos se extienden por todo el país, aumentando las posibilidades de encontrar redes fluviales encajadas gracias a una actividad tectónica reciente.

Los modelos de formación para los barrancos españoles (Rodríguez Vidal, 1986; Cuchí *et al.*, 1997; Concernau *et al.*, 2000; Ortega, 2003) son los clásicos descritos en la literatura internacional: sobreimposición, modelado fluviokárstico y erosión diferencial debida a discontinuidades del sustrato rocoso. Pero además de estos modelos hacen falta otros factores para conformar la morfología final, como son el clima y el régimen hidrológico, entre otros.

La sobreimposición descrita por Powell (1875) es un hecho observable en muchos barrancos pirenaicos que no se encuentran en terrenos carbonáticos, en los que el modelo fluviokárstico no es aplicable, y en los que tampoco se observan estructuras tectónicas condicionantes de su formación. Dos ejemplos son el barranco de Barrosa, excavado en granitos y el río Lapazosa, excavado en pizarras, cuyo sustrato

posiblemente no habría evolucionado hacia esas formas encajadas sin la ayuda de un levantamiento reciente. Se podrían incluir en este grupo también algunos barrancos desarrollados en roca caliza y que presentan una salida final colgada sobre el río principal, como es el caso del barranco de Carpín en el valle de Bujaruelo (Huesca), asociado a un cabalgamiento, aunque su origen también pueda ser explicado mediante procesos glaciares.

La acción conjunta de las aguas subterráneas y las superficiales produce formas similares por encajamiento de la red superficial al capturar la red subterránea de galerías. El modelado fluvio-kárstico se manifiesta en los cañones calizos (Cuchí *et al.*, 1997) con comunicación entre grandes sistemas de cuevas como el Solencio de Bastarás, y barrancos, como el río Formiga a la altura del barranco de Gorgonchón (Gómez, 1993). Este parece ser el mecanismo más importante en las Sierras Exteriores de Guara, con barrancos que son auténticas cuevas exhumadas puesto que se reconocen bastantes espeleotemas colgados sobre las paredes de los ríos. No obstante ambos mecanismos podrían coexistir en zonas de elevación reciente y con buen desarrollo kárstico.

El tercero de los mecanismos propuestos es la erosión diferencial a favor de discontinuidades, como ocurre localmente con fallas y pliegues, pudiendo ser este mecanismo a su vez coexistente con los dos primeros.

Los sistemas fluviales han sido clasificados en función de algunas de sus características y condicionantes (Leopold y Wolmann, 1957; Schumm, 1963 y 1977; Wohl, 1998, entre otros), como son la permanencia de su caudal (efímeros, intermitentes, perennes), su relación con el acuífero con el que se relacionan (ganadores o perdedores), su régimen hidrológico (nival, pluvial, pluvionival, fusión glaciár) o la morfología en planta del canal/es (rectos, meandriformes, entrelazados y anastomosados). Otras veces se clasifican según la carga transportada (suspensión, mixta, de fondo) y por último, una de las formas de clasificarlos a nivel de mesoescala, es basándose en las inicialmente llamadas "formas del lecho" (Montgomery y Buffington, 1997), luego adaptada y denominada de manera más amplia como "morfologías del canal en roca" (Wohl, 1999; Wohl *et al.*, 1999). Esta clasificación está adaptada para los ríos en roca (Figura 1) y diferencia entre ríos con múltiples canales y ríos de canal simple, ríos con morfología en planta sinuosa o no y ríos con gradiente variable o uniforme y, en caso de serlo, con diferencias o no a nivel de perfil.

De todos los tipos morfológicos tan sólo uno no ha sido descrito aún en España (Ortega, 2003): la morfología en roca de tipo anastomosada. El resto

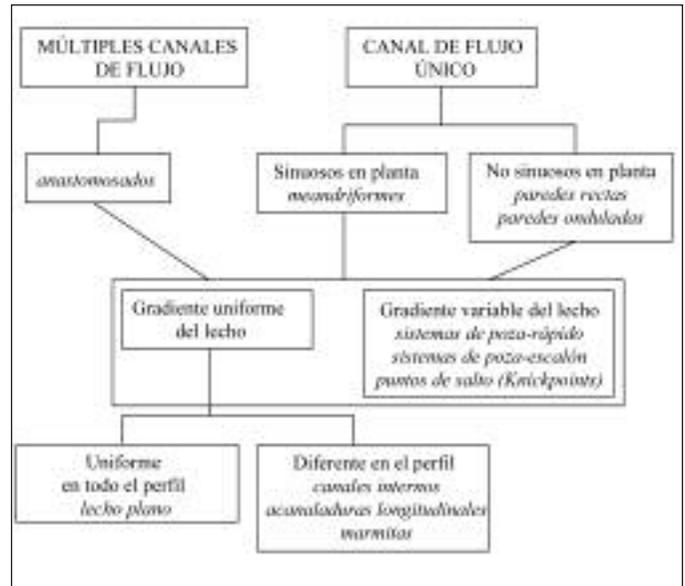


Figura 1. Esquema de los tipos de morfologías existentes en los ríos en roca (modificado de Wohl, 1998)

Figure 1. Bedrock rivers morphology's scheme (modified from Wohl, 1998)

de tipos morfológicos se encuentran en su mayoría de manera puntual a lo largo de un sistema fluvial, pudiendo encontrar que un mismo sistema presente, por ejemplo, zonas sinuosas en planta que derivan en zonas de paredes rectas que terminan en un punto de inflexión, zona de salto ó *knickpoint* y pasan a tramos con marmitas encadenadas (paredes onduladas). Además de estas morfologías de tamaño más o menos grande (mesoescala), se pueden encontrar elementos de menor tamaño dentro de los tramos anteriores (marmitas aisladas, canales internos o acanaladuras).

Los condicionantes para que se dé una u otra forma son fundamentalmente: régimen hidrológico, sustrato, pendiente, caudal, y características de los episodios extremos como las avenidas.

El régimen hidrológico condiciona la morfología, en cuanto a la afluencia de caudales al cauce, esto es, su magnitud y frecuencia.

El sustrato inicialmente parece ser el elemento fundamental que condiciona el tipo morfológico, pero algunos trabajos como los de Wohl *et al.* (1999) y Wohl e Ikeda (1997) concluyen que en sustratos homogéneos no parece existir influencia sobre la morfología, si bien sí existe ésta cuando presentan heterogeneidades como diaclasados, distinta naturaleza de la roca o cambios en el grado de fracturación.

La pendiente es un elemento mucho más importante como condicionante de la forma. Los ríos en

roca con pendientes muy elevadas desarrollan morfologías escalonadas, con saltos de agua grandes y marmitas de recepción, como es el caso del barranco de la Foz de la Canal (Huesca). Si la pendiente se reduce, aparecen otras formas como tramos de marmitas encadenadas formando los tramos de paredes onduladas con forma no sinuosa en planta, como ocurre con uno de los tramos del Barranco del Infierno (Alicante). Si disminuye aún más, comienzan a aparecer sistemas de poza-escalón, tramos rectos no sinuosos, y por último tramos meandriformes. Se han llevado a cabo pruebas en canales experimentales (Wohl e Ikeda, 1997) obteniendo dichas morfologías en un sustrato cohesivo homogéneo mediante variación del gradiente.

El caudal y régimen hidráulico adoptado por el flujo está muy relacionado con la pendiente y no tanto con el sustrato, cuando éste es homogéneo. El

caudal influye en el tipo morfológico a desarrollar en cuanto a la energía disponible en cada punto, y la transformación de dicha energía en acciones elementales como erosión y transporte. La forma final depende de los parámetros hidráulicos (velocidad, turbulencia, potencia energética, esfuerzo de cizalla), y éstos, a su vez, de si existen depósitos que transportar (y su tamaño), pendiente y por tanto energía disponible, caudal circulante e inhomogeneidades del sustrato. Una sección con morfología de paredes onduladas supone una disipación de la energía en los ensanchamientos por generación de flujos de contracorriente (Wohl *et al.*, 1999). Esto ha sido observado en el barranco de Gorgol (Huesca) por Ortega (2003) y Ortega y Cebrian (2006).

Los episodios extremos como las avenidas y crecidas, son los auténticos agentes modeladores del relieve del canal (Figura 2). La situación de los caño-



Figura 2. Avenida en el barranco de Lapazosa (Huesca) producida por lluvias torrenciales en el mes de agosto de 2003. Izquierda: nivel de agua normal durante el inicio del verano donde puede verse un deportista descendiendo. Derecha: nivel de avenida a los 10 minutos de la primera fotografía (Fotos: Miguel Ortega)

Figure 2. Flood in Lapazosa gorge (Huesca) related to intense rainfall in August 2003. Left: ordinary water level at the beginning of the summer (a person is located descending with a rope). Right: flood level 10 min later (Photos: Miguel Ortega)

nes en zonas de montaña, con elevada frecuencia de fenómenos convectivos -uno de los más conocidos es el caso de Biescas, en el barranco del río Arás (García Ruiz *et al.*, 1996; Martínez Goytre *et al.*, 1996; Ayala, 2003)- hace que éstos presenten una gran cantidad de perturbaciones al régimen normal. Las avenidas y crecidas suponen cambios puntuales en la configuración geomorfológica, tales como movimiento de grandes bloques, erosión de marmitas, colapsos en puntos de inflexión ó *knickpoint*, cambios en cascadas, rellenos de pozas y otros. Algunos de los cambios ocurridos en los últimos años en la Sierra de Guara han sido constatados por Salamero (2002), con modificaciones en los ríos Alcanadre, Mascún (relleno de pozas y encajamiento en la zona activa de *knickpoint*), Isuala (remoción de troncos acumulados, movimiento de grandes bloques) y Formiga (movimiento de bloques empotrados).

A veces la perturbación se debe a lluvias intensas sobre nieve o a factores externos, como los fenómenos gravitacionales (caídas de bloques, fenómenos de corrientes de derrubios ó *debris flow*, aludes). Las caídas de bloques son frecuentes por desprendimiento de viseras causadas por el descalzamiento y erosión diferencial (Ortega, 2003).

Los aludes suelen aportar muchos troncos, creando detritos leñosos ó *woody debris* y cambiando la configuración del perfil longitudinal, como es el caso del cañón de los ríos Aguas Limpias, Arazas y Ara en el Pirineo entre otros (Ortega, 2003). Los troncos generan presas, que crean morfologías parecidas a la configuración poza-escalón al orientarse perpendiculares al flujo (Bilby y Ward, 1989) y en ocasiones son cementados por precipitación de carbonato, quedando estables durante mucho tiempo hasta la ocurrencia de otra perturbación fuerte que los libere, como ocurrió en el río Isuala (Oscuros del Balcés, Huesca) durante las avenidas de 2001 (Salamero, 2002). Estas presas a veces son de gran tamaño y se rompen, creando ondas de avenida y aumentando la punta de la crecida (Jarret y Costa, 1986).

Estudio de la morfología en planta de dos barrancos españoles. Significativo evolutivo

Se han estudiado y descrito los tipos morfológicos por tramos en dos barrancos muy diferentes en cuanto a su clima, sustrato rocoso, pendiente, régimen hidrológico y superficie. El objetivo de la elección de barrancos tan distintos es comparar las posibles similitudes en su morfología e intentar asociar dicha morfología a un posible estado evolutivo y/o a un régimen hidrológico determinado.

Los barrancos analizados son el barranco Fondo en la provincia de Huesca y el barranco del Infierno en la provincia de Alicante (Figura 3).

Barranco de fondo (Huesca)

Localizado en el Parque Natural de la Sierra y los Cañones de Guara (Pirineo Oscense), más concretamente se trata de un afluente por la margen derecha del río Isuala, también llamado Balcés. Las características de la cuenca son: una superficie pequeña, de 0,83 km²; la longitud del cauce principal es de 1,2 km²; la pendiente media es elevada, de 0,16 m/m; el barranco se desarrolla sobre conglomerados terciarios y el tiempo de concentración es de 29 minutos.

En esta cuenca se han identificado tres tramos diferentes (tabla 1): (1) tramo abierto y escalonado con marmitas incipientes, (2) tramo recto y abierto y (3) tramo sinuoso.

Las características de los principales tipos morfológicos encontrados son:

(1) Tramo escalonado: sucesión de marmitas de escaso desarrollo y escalones, en algunos casos de hasta 20 m de salto. La anchura del tramo es variable, con zonas de 2 m a zonas de 10 m de ancho; la pendiente relativa es muy elevada y la sinuosidad baja. En este tramo no existe apenas sedimento acumulado, ya que se trata de zonas con elevada potencia de transporte.

(2) Tramo recto: zona más ancha, de 10 a 20 m, y con tamaño de sedimento grande (bloques métricos). La pendiente relativa es baja y la sinuosidad también. En este tramo abunda la vegetación y actúa como una zona de disipación de la energía generada en el tramo anterior; es un tramo de laminación natural.

(3) Tramo sinuoso: previamente a la llegada a esta zona existe un tramo con paredes onduladas que deriva en un tramo meandriforme. En este tramo la pendiente relativa es baja, la anchura muy baja (de unos 0,5 m a 3 m) y la sinuosidad alta. Las paredes del cañón se encuentran paralelas, discurriendo de forma sinuosa. El sedimento encontrado son gravas de tamaño decimétrico o zonas ausentes de sedimento (zonas de alta velocidad de la corriente).

Barranco del Infierno, río Ebo (Alicante)

El segundo de los barrancos estudiados se localiza en la Sierra de la Carrasca, provincia de Alicante, cerca de las localidades de Vall de Ebo y Vall de Laguart. Se trata de un afluente del río Ebo, que a su vez es tribu-



Figura 3. Localización de los ríos en roca estudiados. A: Barranco Fondo (Huesca), B: Barranco del Infierno (Alicante)
 Figure 3. Studied bedrock rivers location. A: Barranco Fondo (Huesca), B: Barranco del Infierno (Alicante)

Morfología dominante	Anchura	Sinuosidad	Pendiente	Tamaño carga	Presencia de knickpoint
Tramo escalonado (1)	2-10 m	Baja	Alta	Sin sedimento	Si, al final
Tramo recto (2)	10-30 m	Baja	Baja	Bloques métricos	Si, al final
Tramo sinuoso (3)	0,5-3 m	Alta	Baja	Gravas decimétricas y zonas sin sedimento	No

Tabla 1. Características principales de los tipos morfológicos encontrados en el barranco Fondo (Huesca)
 Table 1. Main characteristics of the morphological typologies founded in barranco Fondo (Huesca)



Figura 4. Barranco Fondo (Huesca). Izquierda, tramo 1 muy vertical escalonado y en estado incipiente de evolución. Derecha: tramo 3, sinuoso, en estado más evolucionado que el anterior
 Figure 4. Barranco Fondo (Huesca). Left, reach 1 very steep and with pool-step sequence who shows an incipient stage of evolution. Right: reach 3, sinuous in a more developed stage that the present one

Morfología dominante	Anchura	Sinuosidad	Pendiente	Tamaño carga	Presencia de Anickpoint
Tramo recto (1 y 4)	20-30 m	Baja	Baja	Bloques métricos	Si, al final
Tramo ondulado en fase (2)	1,5-15 m	Alta	Media	Gravas decimétricas	No
Marmitas (3)	1-20 m	Baja	Alta	Gravas decimétricas	¿incipiente al final?

Tabla 2. Características principales de los tipos morfológicos encontrados en el barranco del Infierno (Alicante)
 Table 2. Main characteristics of the morphological types founded in barranco del Infierno (Alicante)

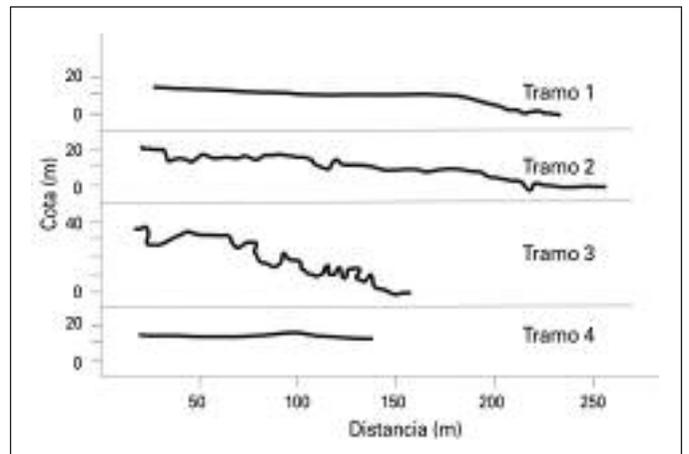


Figura 5. Perfiles longitudinales de los distintos tramos encontrados en el barranco del Infierno (Alicante)
 Figure 5. Longitudinal profiles surveyed in different reaches of barranco del Infierno (Alicante)

tario del río Girona. El tramo estudiado tiene una longitud de 1690 m y se sitúa al final de la cuenca del río Ebo. Las características son: una superficie de cuenca de 48,3 km²; la longitud del cauce principal es de 2,1 km; el tiempo de concentración de 40 minutos; la pendiente media del río Ebo es de 0,26 m/m, mientras que en el tramo estudiado es de 0,35 m/m. El barranco se desarrolla sobre calizas y presenta tres morfologías diferentes, que se encuentran representadas en cuatro tramos (tabla 2):

(1) Tramos rectos: (tramos 1 y 4), de anchura más o menos constante, entre 20-30 m, que permiten la buena circulación de caudales durante épocas de avenida. El tramo es recto y por tanto la sinuosidad baja. La pendiente relativa (en comparación entre las tres morfologías) es baja, y el tamaño de la carga presente en el fondo del canal es el mayor de las tres: bloques de tamaño métrico que llegan a alcanzar los 2 m de diámetro. Este tramo se sitúa al inicio y al final de la sección estudiada.

(2) Tramo ondulado (tramo 2), situado a continuación del primer tramo recto (Figuras 5 y 6). La anchura es muy variable, oscilando entre los 1,5 m y los 20 m; en los tramos más estrechos las paredes se disponen de forma paralela o morfología en fase. En ellas la velocidad es muy grande, y el canal se encuentra prácticamente desprovisto de sedimento. Actúan de tramos de tránsito ó by pass entre zonas más amplias. La sinuosidad es alta, especialmente en las zonas estrechas, y la pendiente relativa es media. Los depósitos del canal (si los hay) suelen ser gravas de tamaño decimétrico.

(3) Tramos de marmitas (tramo 3), situado a continuación del tramo 2, y al final de la zona más estrecha (Figuras 5 y 6). La anchura de este tramo es variable, dependiendo de la marmita y el estrechamiento posterior, oscilando entre 1-3 m en las zonas de escalón, y los 10 y 20 m en las zonas de marmitas. Las paredes se disponen en forma ondulada. La pendiente relativa del tramo es alta, con zonas de poza y zonas de escalón entre marmitas. La sinuosidad es baja y los depósitos de tamaño decimétrico, con abundancia de barras rampantes de final de marmita.

Interpretaciones evolutivas

La interpretación del estado evolutivo de los tramos, se ha realizado a partir de sus características como pendiente y energía disponible, estructuras erosivas, velocidad del tramo y disipación de la velocidad de la corriente. Los tramos pueden separarse unos de otros por discontinuidades como zonas de salto.

Un *knickpoint* (zona de salto o punto de inflexión) indica una discontinuidad en el perfil longitudinal que suele asociarse con descensos en el nivel de base o elevaciones en la cuenca y supone erosión remonante (Wohl, 2000). Su presencia indica la actividad de degradación que está sufriendo el barranco a nivel puntual. El mantenimiento de una zona de inflexión después de un tramo estrecho y profundo refleja la resistencia erosiva de las paredes del cañón e implica hacer máximo el esfuerzo de cizalla y la potencia fluvial (Wohl, 2000). Los *knickpoint* son zonas muy activas dentro de un río, y representan una liberación de la energía en forma de fricción sobre las rocas, degenerando en erosión del tramo.

Se han encontrado zonas que pueden asociarse a *knickpoints* en el paso de un tramo a otro, pero no en todos los casos. La presencia de estas zonas podría interpretarse como una zona de articulación entre segmentos con distinto grado evolutivo siempre y cuando no existan discontinuidades geológicas que puedan causar los cambios (E. Wohl, comun. pers.).

El resultado final es un grado de madurez relativa para cada tramo. Esto no puede asimilarse con la edad de cada uno de ellos, puesto que no podemos asegurar que un tramo maduro no sea a su vez un tramo joven altamente desarrollado por una intensa actividad de los procesos de degradación. La madurez se refiere exclusivamente a la presencia de formas más o menos evolucionadas.

En el barranco Fondo, según las características de los tramos, interpretamos que el tramo 1 es el menos evolucionado, ya que presenta un circo de cabecera y un cauce poco desarrollado que se encuentra en fase de encajamiento, la pendiente es elevada y la potencia generada muy alta. El tramo 2 sería el más maduro, con una amplitud de cauce mayor, morfologías bien desarrolladas y menor pendiente. El tramo 3 es un tramo intermedio entre ambos, con un estado evolutivo más cercano a la juventud. Las paredes sinuosas y estrechas muestran la escasa erosión que se ha producido en este tramo; esta erosión es mayor en la zona de articulación entre los segmentos 1 y 2, por la presencia de una zona más evolucionada que actuaría de punto de inflexión.

El análisis del barranco del Infierno nos muestra como más maduros a los tramos 1 y 4, que corresponden a la morfología de tipo recto en planta. Su mayor anchura, baja pendiente y el tamaño de los bloques hace pensar en que serían los más evolucionados. Los bloques grandes son el resultado de la degradación y erosión del antiguo relieve (formado por marmitas) y no por la competencia del río para su transporte. Los tramos juveniles corresponden con los tramos 2 y 3, que son las morfologías de tipo

ondulado y marmitas, respectivamente. El nivel evolutivo de ambos parece ser diferente en función de la geometría del cauce (anchura), pendiente y configuración de ambas paredes entre sí (en el primer caso paralelas, en el segundo opuestas). El tramo 2 implica mayor velocidad del agua, mayor energía disponible, pero menor disipación de la misma, mientras que el tramo 3 supone una retención de las aguas, laminación de los caudales y disipación de la energía.

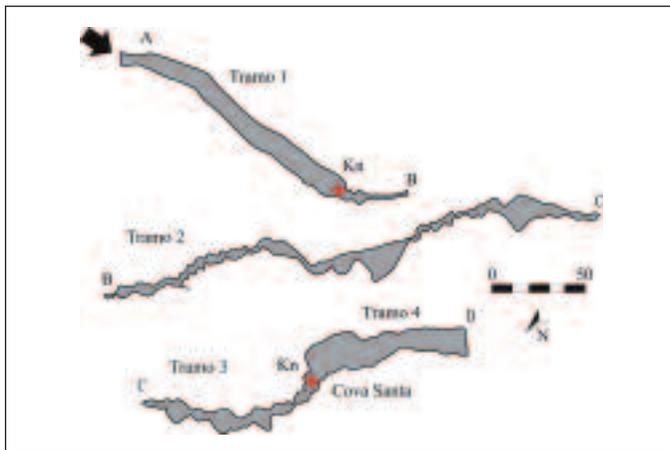


Figura 6. Morfología en planta de los diferentes tramos encontrados en el tramo estudiado del barranco del Infierno (Alicante). kn = indica zona de knickpoint
 Figure 6. Plant morphology of different reaches founded in studied reach of barranco del Infierno (Alicante). kn = knickpoint zone

Tras un análisis conjunto de ambos ríos en roca observamos la coincidencia en la variedad de tramos, que se van alternando en el perfil longitudinal. Además estos tramos no siguen la secuencia propuesta por Davis (1899) en su ciclo de erosión normal, con los tramos más evolucionados en las zonas distales más bajas y los más modernos en zonas más proximales. Esta secuencia se rompe por la existencia de tramos intercalados con distinto grado de evolución, e incluso por presentar tramos juveniles en zonas distales.

Discusión y conclusiones

El estudio de la morfología en planta permite un buen análisis a nivel de tramo o local y nos permite encontrar diferencias en un río en roca a una escala grande.

Respecto al análisis de morfologías concretas en los dos ríos en roca estudiados, obtenemos que la

morfología ondulada de paredes paralelas parece ser la más juvenil. No hay estructuras generales para el tramo, hay alternancia entre zonas, e incluso zonas muy estrechas, en las que el agua lleva gran velocidad. En estas zonas predomina la circulación de flujos con alto poder erosivo y gran capacidad de transporte, a juzgar por la ausencia de sedimento en ellas.

La morfología tipo marmita es una forma más evolucionada que la anterior, con una pendiente escalonada y morfología bien desarrollada y adaptadas para rebajar la energía de la corriente (Wohl e Ikeda, 1997). Es de suponer que dichas formas, en algunos casos de hasta 20 m de anchura, requieran bastante más tiempo de formación que las anteriores, ya que son más eficaces en la disipación de la energía. Aguas abajo de los tramos de marmitas generalmente las secciones son más amplias y su pendiente menor.

Un análisis detallado de las formas y características de las mismas puede servirnos para establecer diversos grados de evolución de un río. La pendiente es un factor importante en la juventud-madurez de un tramo, pero no el único ni exclusivo. Una alta pendiente dota de energía al tramo, pero la configuración y geometría (paredes estrechas o anchas, paralelas u opuestas) de la sección, presencia de material grueso en el cauce y variedad de morfologías menores, también van a reforzar o disminuir este efecto. Los tramos con marmitas y pendiente alta suponen una zona activa de incisión donde la energía disponible se disipa en erosionar y ampliar las marmitas. Los tramos estrechos y sin buen desarrollo de marmitas suponen zonas menos activas y juveniles en los que la energía se transporta hacia las zonas de verdadero cambio en el barranco, mientras que los tramos anchos y de baja pendiente suponen zonas de actividad e incisión antigua, ya abandonados y erosionados, donde predomina sobre todo el transporte.

La articulación de los tramos activos se realiza mediante un punto de inflexión ó knickpoint, las verdaderas zonas de disipación energética, generalmente aguas arriba o mediante una sección ancha con abundante depósito, que normalmente se encuentra aguas abajo.

El condicionante hidráulico parece ser determinante para los diferentes tipos morfológicos, y es durante el momento en avenidas y crecidas cuando suelen darse los cambios morfológicos mayores en los ríos en roca, al ser dominados por la dinámica torrencial.

Pese al gran conocimiento que se tiene actualmente de los sistemas aluviales, los ríos en roca son tremendamente desconocidos y guardan una gran información aún por interpretar.

Agradecimientos

Agradezco los acertados comentarios y sugerencias de la Dra. Ellen Wohl de Colorado State University y de la Dra. Guillermina Garzón Heydt del Departamento de Geodinámica de la Universidad Complutense de Madrid por la exhaustiva revisión del trabajo. Además agradezco las sugerencias de los revisores del trabajo, Dr. Juan José Durán Valsero y Dr. Andrés Díez Herrero.

Referencias

- Ayala, F. 2003. La inundación torrencial catastrófica del camping "Las Nieves" del 7 de agosto de 1996 en el cono de deyección del Arás (Biescas, Pirineo Aragonés). En: Ayala, F. y Olcina, J. (Ed), *Riesgos naturales*. Ariel Ciencia. 889-912.
- Bilby, R y Ward, J. 1989. Changes in characteristics and function of woody debris with increasing size of streams in western Washington. *Trans. American Fisheries Society*, 118, 368-378.
- Concernau, J., Civit, A. y Boltá, X. 2000. *El Descens Déngorjats a Catalunya*. Cossetania edicions. 143pp.
- Cuchí, J. A. Salamero, E. y Avellanas, M. 1997. Aspectos geológicos del deporte del barranquismo en el Parque Natural de la Sierra y cañones de Guara (Huesca). *Tierra y tecnología*, 16-17, 89-94.
- Davis, W. M. 1899. The Geographical Cycle. *Geographical Journal*, vol. 14, 481-504.
- García Ruiz, J.M., White, S., Martí, C., Valero, B., Errea, M. Y Gómez, A. 1996. *La catástrofe del barranco de Arás (Biescas, Pirineo Aragonés) y su contexto espacio-temporal*. CSIC, Zaragoza. 54pp.
- Gómez, D. 1993. *El Parque de la Sierra y los Cañones de Guara*. Editorial Pirineo. Huesca. 179pp.
- Jarret, R. y Costa, J. 1986. Hydrology, geomorphology and dam break modelling of the July 15th, 1982. Lawn lake dam and cascade dam failures. Larimer County. Colorado. *U.S. Geological Survey prof. paper* 1369.
- Leopold, L. B. y Wolmann, M. G. 1957. River channels patterns-braided, meandering and straight. *U.S. Geological Survey Professional paper*, 282B, 39-85.
- Martínez Goytre, J., Martínez Gil, J. y Garzón, G. 1996. La prevención de riesgos naturales. El caso de Biescas. *Tierra y Tecnología*, 14-15, 26-30
- Montgomery, D. R. y Buffington, J. M. 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109, 596-611.
- Ortega, J. A. 2003. *Manual de hidrología para barranquistas*. Desnivel. Madrid. 145pp.
- Ortega, J. A. y Cebrían, M. A. 2006. *50 barrancos del Pirineo. Los más bellos descensos*. Madrid. Editorial Desnivel. 240 pp.
- Powell, J. W. 1875. Exploration of the Colorado river of the West (1869-72). U.S. Govt. Printing Office. Washington.
- Richardson, K. y Carling, P. A. (2005). A typology of sculpted forms in open bedrock channels. *The Geological Society of America. Special Paper*, 392.108pp.
- Rodríguez Vidal, J. 1986. *Geomorfología de las Sierras Exteriores Oscenses y su piedemonte*. IEA. Colección de Estudios Alto Aragoneses, 4, 172pp.
- Salamero, E. 2002. *Sierras de piedra y agua*. Edición Camping Mascún. Huesca. 331pp.
- Schumm, S. 1963. A tentative classification of alluvial river channels. *U.S. geological Survey Circular*, 477, 10pp.
- Schumm, S. 1977. *The fluvial system*, John Willey & Sons. New York. 338pp.
- Tinkler, K. y Wohl, E. E. 1998. A primer on bedrock channels. En: Tinkler, K. J. y Wohl, E. E. (Eds). *Rivers over rock: Fluvial processes in bedrock channels*. American Union Geophysical Monograph 107, 1-18.
- Wohl, E. E. 1992. Gradient irregularity in the Herbert Gorge of northeastern Australia. *Earth surface processes and landforms*, Vol 17, 69-84.
- Wohl, E. E. e Ikeda, H. 1997. Experimental simulation of channel incision into a cohesive substrate at varying gradients. *Geology*. Vol. 25, nº 4, 295-298.
- Wohl, E. E. e Ikeda, H. 1998. Patterns of bedrock channel erosion on the Bosso peninsula, Japan. *The Journal of Geology*. Vol. 106, 331-345.
- Wohl, E. E. 1998. Bedrock channel morphology in relation to erosional processes. En: Tinkler, K.J. y Wohl, E. E. (Eds). *Rivers over rock: Fluvial processes in bedrock channels*. American Union Geophysical Monograph, 107, 133-151.
- Wohl, E. E. 1999. Incised bedrock channels. En: Darby, S. y Simon, A. (Eds). *Incised river channels*. John Willey & Sons. 187-218.
- Wohl, E. E., Thompson, D y Miller, A. 1999. Canyons with undulating walls. *Geophysical Society of America Bulletin*. Vol 111, nº 7, 949-959.
- Wohl, E. E. 2000. *Mountain rivers*. American Geophysical Society. Water resources monograph, 14, Washington, 116pp.
- Wohl, E. E., y Thompson, D. 2000. Velocity characteristics along a small step-pool channel. *Earth surface processes and landforms*, 25, 353-367

Recibido: agosto 2007

Aceptado: diciembre 2007