

CLASIFICACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE CURSOS FLUVIALES A PARTIR DE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (S.I.G.)

Jesús Horacio

Departamento de Geografía. Universidad de Santiago de Compostela

Alfredo Ollero

Dpto. de Geografía y Ordenación del Territorio, Universidad de Zaragoza

RESUMEN

Se propone un método para la clasificación geomorfológica fluvial y su desarrollo con S.I.G. Las Tecnologías de la Información Geográfica han aportado a la geomorfología fluvial un cambio en el análisis de procesos y clasificaciones (versatilidad e información precisa y rápida). La caracterización y tramificación de la red fluvial se ha basado en la geomorfología del valle y en la pendiente y morfología del cauce. En el ejemplo (cuenca del Cabe, Lugo) se han diferenciado 14 clases hidrogeomorfológicas, con dominio de cauces aluviales sinuosos en valles de encajamiento moderado y fondo amplio.

Palabras clave: geomorfología fluvial, S.I.G., valle, cauce, clasificación geomorfológica.

ABSTRACT

Geographic Information Technologies has marked in fluvial geomorphology a change in the analysis of processes and classifications (versatility and precise and fast information). Characterization and reach-making of fluvial network is based on valley geomorphology and channel slope and morphology. The method is explained with an example (Cabe river, Lugo, Spain), with 14 hydromorphological types and a dominance of alluvial sinuous channels in valleys of moderate confinement and wide valley-floor.

Key words: fluvial geomorphology, G.I.S., valley, channel, geomorphological classification.

Fecha de recepción: abril 2010.

Fecha de aceptación: mayo 2011.

I. INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas la importancia de la geomorfología como base para comprender y valorar espacios naturales ha ido en aumento (Thorndycraft et al., 2008). Desde unas concepciones de *naturalidad* referidas casi exclusivamente a las condiciones de la biota, la inmersión de la geomorfología ha supuesto un sustancial cambio en términos de procesos y relaciones entre componentes naturales abióticos y bióticos (Newson, 2002). Esta mayor concienciación en el valor geomorfológico y la necesidad de efectuar estudios que profundicen en la relación entre los distintos componentes del medio natural y humano, han llevado a que la gestión de sistemas hídricos comience a estar necesitada de clasificaciones hidrogeomorfológicas que ayuden en la comprensión del funcionamiento de un río, hecho que se percibe con el notorio aumento de normativas, estudios y pautas que orienten en la tarea (Newson y Large, 2006).

Los ríos tradicionalmente han sido clasificados y gestionados en función de caracteres hidrológicos y biológicos, quedando relegados a un segundo plano los cauces, tanto su génesis, dinámica o repercusiones como sostén, precisamente, de la componente biológica. Es por ello que consideramos que el conocimiento de la dinámica natural de los sistemas fluviales debe situarse a la cabeza en la ordenación y tratamiento de la problemática ambiental. En este sentido, desde Europa se está implementando la Directiva Marco del Agua (2000/60/CE), siendo la valoración hidrogeomorfológica uno de sus puntos clave para la determinación del estado de los sistemas fluviales y para la búsqueda de soluciones. Algunas obras de referencia, como las de Thorne et al. (1997), *Commision of the European Communities* (2002), Sear et al. (2003), Kondolf y Piégay (2003), Downs y Gregory (2004), Brierley y Fryirs (2005) o Malavoi y Bravard (2010) han surgido en esta línea, constituyendo la base conceptual y argumental sobre la que se asienta este trabajo.

El notable incremento durante los últimos años de los Sistemas de Información Geográfica (S.I.G., en adelante) como técnica de análisis, ha servido para concebir un nuevo enfoque y un nuevo marco metodológico en la praxis de las ciencias ambientales. Así, con el presente trabajo se aborda la caracterización de la geomorfología fluvial aprovechando la potencia de cálculo de estas herramientas — auxiliado en ocasiones por *software* específicos— para lograr identificar de forma rápida y sencilla tramos fluviales interna y funcionalmente homogéneos según tres variables geomorfológicas (Díaz y Ollero, 2005).

II. ANTECEDENTES METODOLÓGICOS

El método científico diseñado y empleado está basado en algunos de los requerimientos de la Directiva 2000/60/CE pero, especialmente, en las aportaciones de la Comisión *Guidance Standard CEN TC 230/WG 2/TG 5: N32*. Se consideraron también otros trabajos con base en la tipificación y clasificación de los sistemas fluviales como el *Rapid Stream Assessment Technique (RSAT)* norteamericano, el *Indice de Funzionalità Fluviale (IFF)* italiano (Siligardi, 2003), la propuesta australiana *River Styles Framework* de Brierley y Fryirs (2005) o el índice IHG para la valoración de la calidad hidrogeomorfológica de sistemas fluviales (Ollero et al., 2009). En el territorio español los antecedentes de trabajo son escasos, entre los que destacan las tipificaciones propuestas por Prat y Munné (1999) y Díaz y Ollero (2005) para la cuenca del Ebro o la caracterización de la red fluvial aragonesa desarrollada por Ollero et al. (2003).

El procedimiento seguido en la clasificación de los cursos fluviales se basa únicamente en aspectos geomorfológicos: geomorfología del cauce (estilo fluvial), pendiente del cauce y geomorfología del valle (Petts y Foster, 1985; Petts y Amoros, 1996). Con base en todos los antecedentes metodológicos citados, el método propuesto se fragmenta en dos etapas que permiten caracterizar el sistema fluvial desde una perspectiva hidrogeomorfológica: *tramificación* y *tipificación*. En el proceso de tramificación se obtiene una sectorización de la red fluvial por cada variable estudiada, mientras que con la intersección de los tres resultados se abre la fase de tipificación que consiste, básicamente, en obtener tipos de cursos fluviales internamente homogéneos en función de los tres descriptores geomorfológicos manejados. Ambas etapas están muy relacionadas y se retroalimentan constantemente. Asimismo, los conceptos manejados son muy relativos según las características fisiográficas de cada zona de estudio, con lo que la fijación de umbrales tipológicos de las variables tratadas para la tramificación ha de consistir en un juego ensayo-error basado en criterio experto

En la implementación de técnicas S.I.G. se ha trabajado con *ArcGis 9.2* (ESRI ArcGis®) —en menor medida *ArcView 3.2.®*—, concretamente con los módulos de *ArcMap* (edición) y *ArcCatalog* (modelización conceptual), así como extensiones auxiliares de diferente tipo (*Hawth's Analysis Tools*, *MorfoPerfil-T*, etc.). Los objetivos se centran en: i) proponer un marco de actuación básico en relación con la evaluación hidrogeomorfológica; ii) presentar un modo de proceder con estas herramientas; y iii) evaluar las potencialidades y carencias de las T.I.G. en este tipo de trabajos.

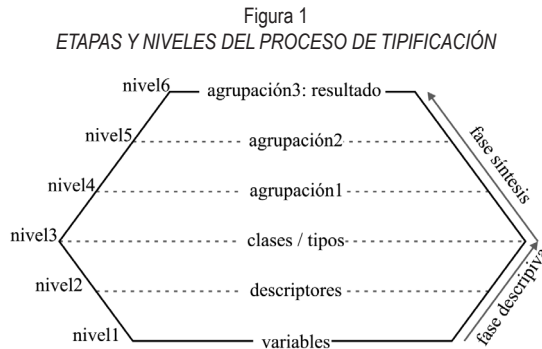
El material de trabajo necesario se resume a la ortofotografía aérea, un modelo digital de elevaciones (MDE) y diversos mapas temáticos como el geológico o geomorfológico. La escala de trabajo aconsejable no debe ser superior a 1/25000 aunque, como en el caso de los mapas geológicos del IGME, la escala más extendida es de 1/50000. Consideremos como resolución excelente para caracterizar aquella que no rebase el metro, si bien, dada la complejidad para obtener esta información una resolución de 10x10 m es también óptima. Como se explicará posteriormente, un tamaño de píxel demasiado pequeño puede tener contrapartidas en el trazado de perfiles transversales con lo que, para estos casos, lo propio es hacer un filtrado que modifique la resolución a tamaños de celda mayores.

III. METODOLOGÍA

La metodología que se propone constituye un protocolo de actuación abierto en el que el propio investigador establezca, a partir de otros estudios y experiencias, los descriptores más adecuados para ese territorio concreto. En el presente trabajo se ha llevado a cabo un ensayo en la cuenca lucense del río Cabe (733 km²), constituida por una gran depresión central con un reborde montañoso continuo y altitud máxima de 1.299 m y mínima de 128 m. El estudio se basó en el análisis de los cursos con más de 20 km de longitud, lo que supone una reducción de la red de drenaje a los ríos Cabe (59,6 km), Mao (32,8 km), Cinsa (22 km) y Saa (20,2 km).

El ejercicio de tipificación de la red consiste en establecer tramos hidrogeomorfológicos internamente homogéneos pero diferentes entre sí (Petts y Amoros, 1996) a partir del previo trabajo de tramificación desarrollado con las 3 variables geomorfológicas citadas. Estas variables han sido descompuestas a su vez en 6 descriptores fundamentales, cada uno de los cuales también se divide en diversos subtipos (ver figura 1 y figura 12). La combinación de

todos ellos arroja un total de 3.600 combinaciones potenciales que han sido comprimidas a 4 tipos de cauce y 5 los valles posibles, por consiguiente 14 tipos de tramo en la cuenca (figura 12). Todo este proceso metodológico y de síntesis sugiere de diferentes niveles de trabajo que, a su vez, se pueden reagrupar en una fase descriptiva y otra sintética (figura 1).



Para la comprensión de la geomorfología del cauce se consideraron básicos tres aspectos: el tipo de canal, el número de canales en el lecho y el índice de sinuosidad. Los tipos de canales diferenciables han sido ríos en roca (T1), ríos de cantos y gravas (T2) y ríos arcillo-arenosos (T3). Según el número de canales nos encontramos con ríos de canal único (N1), ríos de canal múltiple (N2) y un tipo de transición (N3). Para la sinuosidad se han establecido las siguientes clases: <1,05 recto (S1); 1,05-1,3 sinuoso (S2); 1,3-1,5 ameandramiento moderado (S3); >1,5 meandriforme (S4). En el caso de la pendiente se fijaron los intervalos que siguen: <0,5% baja (P1); 0,5-2% moderada-baja (P2); 2-10% moderada alta (P3); >10% alta (P4). El nivel de encajamiento se determinó a partir del cociente anchura/profundidad del valle, con las modalidades: <3 escarpe (E1); 3-12 muy encajado (E2); 12-22 moderadamente encajado (E3); 22-40 suavemente encajado (E4); >40 abierto (E5). Finalmente, la anchura del fondo de valle ha sido estructurada en: nula (A1), <50 m estrecho (A2), 50-250 m medio (A3), 250-1.000 m ancho (A4) y >1.000 m muy ancho (A5).

IV. CARACTERIZACIÓN Y TRAMIFICACIÓN DE LA RED FLUVIAL

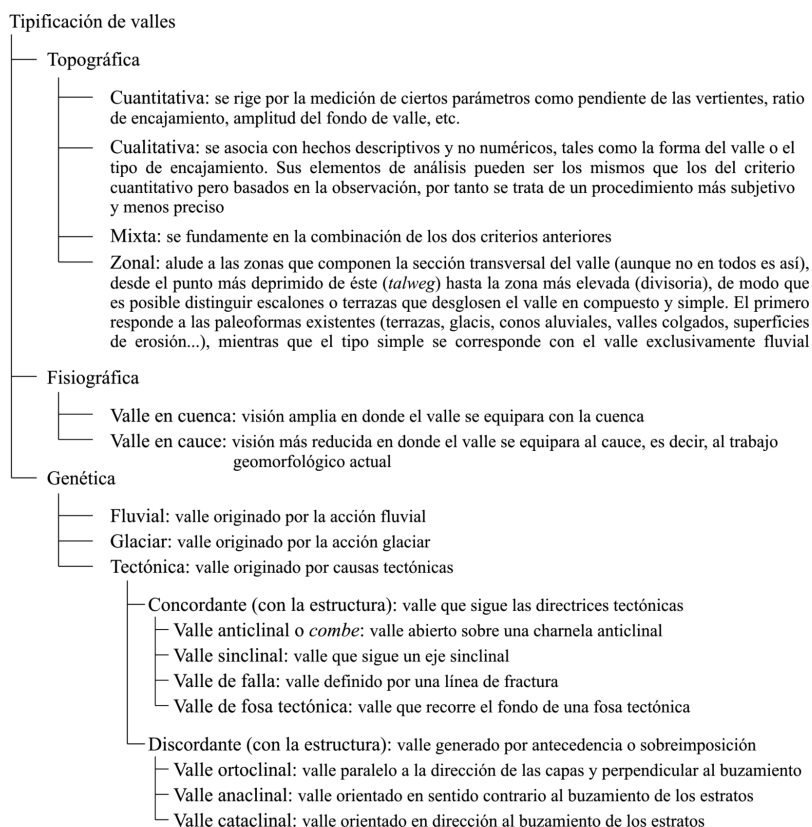
4.1. Geomorfología del valle

El término 'valle' se refiere de forma generalizada a una morfoestructura depresionaria y alargada entre dos vertientes. Definir un valle no es una empresa sencilla por la ambigüedad del concepto (Pérez-Alberti, 1981), en vistas de que una cuenca puede considerarse un valle a escalas de poco detalle, mientras que el propio cauce es en sí mismo un valle (Twidale, 1976; Pedraza, 1996). Esto nos conduce a deducir que desde la más mínima incisión de escorrentía concentrada se está formando un cauce (Dietrich y Dunne, 1993) o, si se prefiere, un valle, de modo que cualquier corriente presenta *per se* un valle desde el nacimiento hasta la desembocadura.

Existe un vacío en metodologías para la caracterización y posterior clasificación de valles, hecho causado, posiblemente, por la elevada riqueza tipológica que dificulta unificar tipos comunes. Sí proliferan por el contrario obras con puntos de vista variados dedicadas al estudio de los valles fluviales (Young, 1972; Galay et al., 1973; Twidale, 1976; Pedraza, 1996; Rosgen, 1996; Pella et al., 2001; Schmitt, 2001; Brenden et al., 2008; Gangodagamage et al., 2007). Plantear un método universal que aglutine todos los tipos de valle resulta un tanto utópico y poco operativo por la elevada amalgama tipológica anteriormente aludida, de modo que puede resultar más productivo elaborar un protocolo de actuación que marque unas pautas de referencia para abordar un estudio de tipificación de valles (tabla 2).

Se proponen tres grandes enfoques para clasificar los valles: topográfico, fisiográfico (Pedraza, 1996) y genético (Martonne, 1913). La primera propuesta no genera directamente subtipos sino que se apoya en cuatro criterios para fijar clases de valle. Por el contrario, los enfoques fisiográfico y genético sí se subdividen en niveles inferiores. En conjunto, se trata de modos de proceder diferentes e independientes, pero no excluyentes e integrados unos con los otros (figura 2).

Figura 2
ESQUEMA DE TIPIFICACIÓN DE VALLES. ADAPTADO PARCIALMENTE DE MARTONNE (1913) Y PEDRAZA (1996)

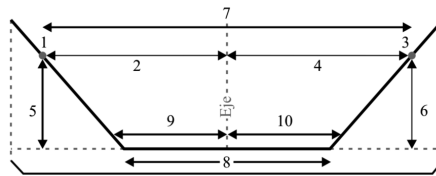


En los trabajos de geomorfología fluvial los valles deben ser estudiados como ejes de procesos en lugar de como elementos descriptivos, por el importante papel que desempeñan en el sistema fluvial (Ollero, 2007). De acuerdo con esto, el criterio cuantitativo de la perspectiva topográfica es el que mejor caracteriza los valles, porque posibilita obtener tipos geomorfológica y ecológicamente funcionales.

En la tabla 1 se expone la geometría transversal de un valle. A partir de este conjunto de mediciones, además de otras variables, se plantean una serie de descriptores obligatorios y optativos válidos para caracterizar los valles fluviales (tabla 2). La idea es que no se genere un único sistema de clasificación para todas las zonas sino que sea el usuario, basándose en su propia experiencia, el que disponga de cierta capacidad de maniobra.

Tabla 1
 PARÁMETROS DE LA GEOMETRÍA DEL VALLE
 (DESCRIPCIONES BASADAS EN EL TRABAJO DE PARDO-PASCUAL Y PALOMAR, 2002)

Parámetro	Descripción
z_{max_i}	Cota del máximo detectado a la izquierda del eje sobre el perfil transversal (1)
d_{zmax_i}	Distancia horizontal entre el máximo a la izquierda y eje del cauce en el perfil transversal (2)
z_{max_d}	Cota del máximo detectado a la derecha del eje sobre el perfil transversal (3)
d_{zmax_d}	Distancia horizontal entre el máximo a la derecha y eje del cauce en el perfil transversal (4)
iz_i	Diferencia de cota entre el máximo a la izquierda y la cota del eje del cauce en el perfil transversal (5)
iz_d	Diferencia de cota entre el máximo a la derecha y la cota del eje del cauce en el perfil transversal (6)
iz_m	Media de las diferencias de cota entre el eje del cauce y los máximos por la izquierda y por la derecha
A1	Distancia horizontal entre los dos máximos (izquierda y derecha) (7)
A2	Distancia horizontal del fondo de valle (8)
dcí	Distancia horizontal entre el punto inicial del fondo (izq.) y la cota del eje del cauce en el perfil transversal (9)
dcd	Distancia horizontal entre el punto inicial del fondo (der.) y la cota del eje del cauce en el perfil transversal (10)
A_1 / P	Índice de encajamiento = A_1 / iz_m
sA1	Simetría del ancho de valle = $(d_{zmax_d} - d_{zmax_i}) / A_1$
sA2	Simetría del fondo de valle = $(dcd - dcí) / A_2$
P_{vi}	Pendiente vertiente izquierda = $(iz_i * 100) / \sqrt{d_{zmax_i}^2 + iz_i^2}$
P_{vd}	Pendiente vertiente derecha = $(iz_d * 100) / \sqrt{d_{zmax_d}^2 + iz_d^2}$
P_{mv}	Pendiente media de las vertientes = $(P_{vi} + P_{vd}) / 2$
P_t	Pendiente total o global del valle = $(iz_m * 100) / A_1$



La forma del valle en un tramo cualquiera está determinada por la combinación de factores tectónicos, litológicos y locales dentro de la cuenca (Charlton, 2008). Esta combinación engendra un tipo de encajamiento y una amplitud del fondo de valle concreta y asociada, por lo general, a un modelo geomorfológico de cauce, lo que supone, en consecuencia, que estos dos factores sean de carácter obligatorio (tabla 2) para la clasificación por la intensa interacción que mantienen con el cauce.

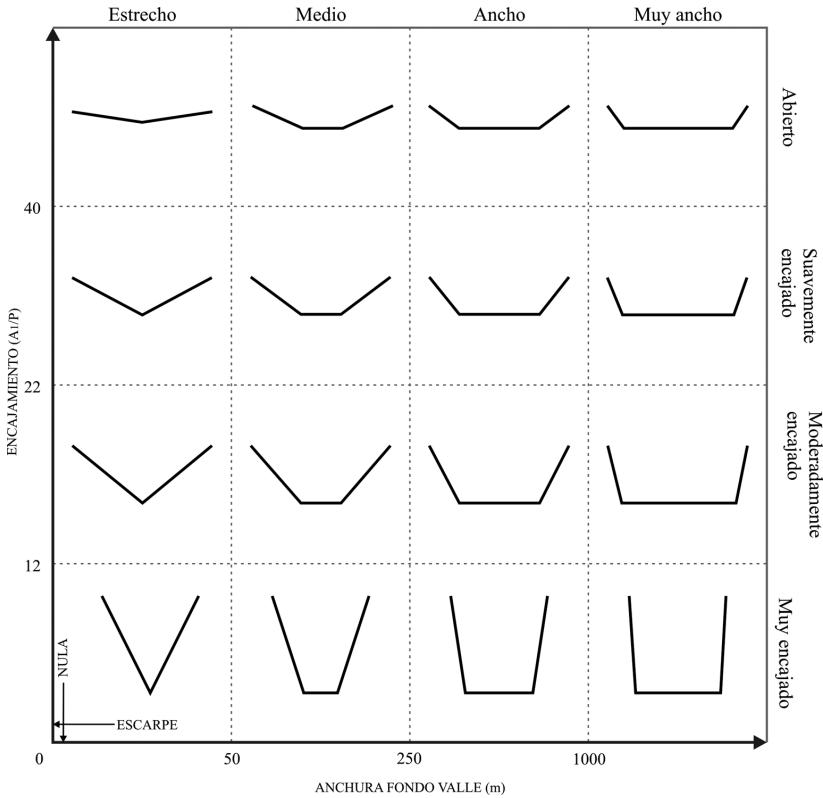
Tabla 2
 PROTOCOLO PARA LA CLASIFICACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE VALLES

Descriptores		Descripción
Factores obligatorios	Encajamiento	Carácter morfológico reflejo del ambiente que envuelve al cauce
	Ancho del fondo de valle	Indicativo del grado de movilidad o confinamiento del cauce
Factores optativos	Simetría del ancho de valle	La variable se mueve dentro del intervalo (-1,1). Valores próximos a 1 indican asimetría de la sección transversal hacia la derecha; 0 señala simetría total; valores próximos a -1 indican asimetría de la sección transversal hacia la izquierda
	Simetría del fondo de valle	La variable se mueve dentro del intervalo (-1,1). Valores próximos a 1 indican asimetría del cauce mayor hacia la derecha; 0 señala simetría total; valores próximos a -1 indican asimetría del cauce mayor hacia la izquierda
	Pendiente vertiente izq. (planimétrica)	Carácter morfológico indicativo del tipo de interacción entre el canal y la vertiente izquierda del valle
	Pendiente vertiente der. (planimétrica)	Carácter morfológico indicativo del tipo de interacción entre el canal y la vertiente derecha del valle
	Pendiente media vertientes	Los valores de pendiente media, como todo promedio, deben considerarse con cautela ya que pueden verse alterados por valores extremos no representativos. Este parámetro es un buen indicador de posibles disimetrías
	Pendiente global del valle	Expresión de pendiente donde se considera la pendiente de las vertientes y el ancho de valle. Sus resultados son menos dependientes de la desigual pendiente de las vertientes, por lo que puede resultar de utilidad para fijar umbrales tipológicos
	Litología	Las distintas unidades litológicas presentan un comportamiento diferenciado ante la erosión fluvial
	Genética	Se divide en fluvial, glaciar o tectónico (ver también figura 2)
	Ratio A_1 / A_2	Relación entre la anchura del valle y su base. Esta ratio presenta el agravante de que el grado de confinamiento se ve desvirtuado por el numerador (anchura del valle), pudiendo darse el caso de que valles diferentes sean clasificados dentro de un mismo tipo

Resulta de interés complementar los valores de amplitud y encajamiento con las condiciones de simetría, ya que permiten determinar el grado de proporcionalidad de la anchura del valle respecto al eje central o la desviación del *talweg* respecto al centro del cauce mayor, respectivamente. Con la combinación de estos descriptores se liga la intensa trabazón existente entre dos ambientes dinámicos de actividad diferenciada, fondo de valle y vertiente, y fundamentales para determinar una potencial entrada de sedimentos al canal o las posibilidades de movilidad fluvial del cauce en función del confinamiento al que esté sometido. En ambos casos, los valores simétricos representan una forma más equilibrada geomorfológicamente mientras que los registros asimétricos responden a un mayor desequilibrio.

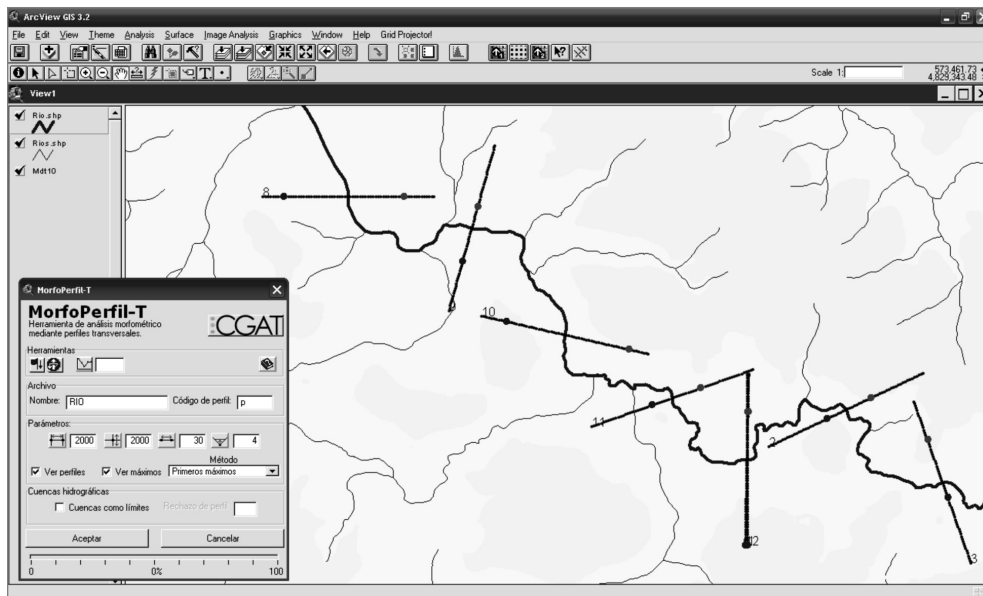
La ordenación de valles fluviales basada en los factores obligatorios se ha desarrollado en función al cruce de ambas variables (figura 3), variando el número de tipos básicos de valle según los umbrales de encajamiento y ancho del fondo definidos a partir de diferentes casos de estudio. La inclusión de más o menos descriptores optativos puede elevar demasiado el número de casos, al igual que la escala de trabajo —cuenca, río, tramo— o la finalidad del estudio —tipificar o definir dinámicas geomorfológicas—.

Figura 3
 POSIBLES TIPOS DE VALLE ATENDIENDO A SU ENCAJAMIENTO (A₁/P) Y ANCHURA DEL FONDO
 (MODIFICADO DE PARDO-PASCUAL Y PALOMAR, 2002)



Desde el ámbito de los S.I.G. existen diversas herramientas capaces de calcular secciones transversales y ciertos parámetros de interés (*ET Surface*, *ArcHydro Tools*, *Spatial analyst*, etc.), sin embargo, para el presente trabajo se abogó por el uso de *MorfoPerfil-T* (Pardo-Pascual y Palomar, 2002; Segura-Beltrán et al., 2004), una extensión para ArcView® 3.2 diseñada por el grupo de investigación de Cartografía GeoAmbiental y Teledetección (CGAT) del Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría de la Universidad Politécnica de Valencia © (<http://cgat.webs.upv.es>). El modo de proceder de la herramienta (figura 4) consiste en trazar sucesivas secciones transversales sobre el cauce o valle que se intersectan con el MDE y adquieren los datos altimétricos de éste. El programa lanza un conjunto de medidas básicas de gran provecho en la caracterización geomorfológica de la sección transversal de un río (tabla 1) que, complementadas con otros parámetros de utilidad morfológica, sirven para apuntalar la caracterización a un alto nivel de detalle. En cualquier caso, debe procurarse que las secciones no representen situaciones anómalas o irreales de modo que ha de ser el propio autor quien supervise el trazado final de los perfiles.

Figura 4
TRAZADO DE SECCIONES TRANSVERSALES SOBRE LA RED, CON APOYO DE UN MDE (ARCVIEW 3.2®)



La mayor parte de los descriptores propuestos en el protocolo deben ser obtenidos en una hoja de cálculo, por ejemplo del tipo *Excel*, a partir de los parámetros extraídos directamente por *MorfoPerfil-T* (tabla 1). Otros, como el ancho de fondo de valle, son calculados directamente por la extensión S.I.G. *MorfoPerfil-T*.

En relación al uso y manejo de *MorfoPerfil-T*, u otras herramientas S.I.G. similares, es preciso exponer las siguientes consideraciones:

- Es común que este tipo de herramientas topográficas tracen las secciones transversales perpendiculares al eje de la línea de flujo o línea del *talweg*. Si el recorrido del río, como es habitual, se ha obtenido directamente a partir de un MDE ráster es evidente que, como mucho, las direcciones posibles solo son 4 (N-S, E-W, SE-NW, NE-SW) y, por ello, en zonas con meandros pueden darse problemas.
- Algunas herramientas, entre ellas *MorfoPerfil-T*, tratan de determinar la forma del lecho o del fondo del valle fijando una elevación sobre el eje. La dimensión ha de definirla el usuario atendiendo tanto a la morfología de los valles que estudia y también de la precisión de los datos del MDE sobre el que trabaja. Sin embargo, se trata de un valor difícilmente generalizable ya que buscar automáticamente donde está el borde real es bastante complejo dada la variabilidad morfológica que en la naturaleza se da.
- En aquellos casos en los que el *software* considere al valle como el espacio comprendido entre los dos primeros máximos o puntos de inflexión detectados en cada

vertiente, es preciso señalar que con MDEs de alta resolución se aumenta el riesgo de que el programa identifique como un primer máximo cualquier tipo de obstáculo ajeno a la realidad del valle. La aplicación de un suavizado del MDE por medio de un filtro de paso bajo o una mayor distancia entre puntos de la sección mitiga la ocurrencia de este posible problema.

- Las pendientes de vertiente según la distancia planimétrica y no la real suponen una pérdida de representatividad en valles con forma en Y y U, mientras que son más ajustables a valles encajados con forma de V.
- Las secciones de valle abiertas en superficies de aplanamiento o tabulares, dan valores de encajamiento poco representativos con la geomorfológica del cauce existente. Es común que estos valles en forma de Y se encuentren sectorizados en dos partes, una primera comandada por pendientes suaves y un perfil abierto y una segunda con un valle encajado sobre la superficie. En cierto modo se trata de dos valles en uno por el fuerte contraste entre ambas partes.

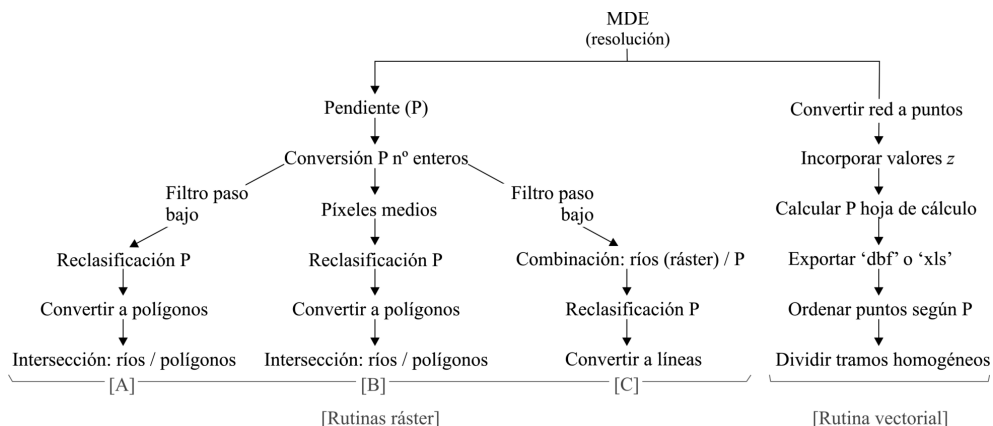
4.2. Pendiente del cauce

Se ha clasificado la variable pendiente en tres categorías atendiendo al tipo de información que se precise: i) pendiente local (pendiente en un punto concreto del área de estudio); ii) pendiente media o específica (equivale a la pendiente media de una zona, por consiguiente no informa de la pendiente del cauce *sensu stricto* sino del ambiente geomorfológico por donde circula); y iii) pendiente longitudinal (se corresponde con la variación longitudinal de la pendiente del cauce en tramos homogéneos). Cada tipo definido proporciona una expresión de pendiente diferente, aunque es el último de ellos el que mejor se adapta para la caracterización geomorfológica de los cursos fluviales.

La estimación de la pendiente desde *software* S.I.G. puede hacerse según distintos algoritmos y tipo de información base (vectorial y/o ráster). En los modelos vectoriales —redes de triángulos irregulares, TIN— la pendiente se calcula según el máximo índice de cambio en la elevación del triángulo. No obstante, la mayor parte de los trabajos de pendiente son realizados a partir del cambio de elevación entre celdas de un MDE ráster acotadas por una matriz, aunque esta práctica no es la más adecuada para determinar la pendiente a nivel de cauce. En la figura 5 se recogen diversos procedimientos S.I.G. para la obtención de alguno de los tres tipos de pendiente definidos (puntual, específica y longitudinal). La denominada rutina vectorial (no entendida como TIN) es la de mayor utilidad porque aporta información ceñida exclusivamente a la superficie ocupada por el cauce menor, mientras que para la pendiente específica y puntual los modelos ráster son los adecuados.

El objetivo final de cada estudio debe condicionar el uso del procedimiento idóneo para que el resultado se ajuste lo mejor posible al valor real de la variable, de modo que, en el presente trabajo, se propone un modo de abordar el cálculo de la pendiente del cauce mediante la combinación de un MDE ráster y elementos vectoriales de líneas y puntos (rutina vectorial). De igual forma, se analizan también los riesgos que entraña extraer la pendiente del cauce directamente de los algoritmos de cálculo aplicados sobre el MDE.

Figura 5
PROCEDIMIENTOS DE TRABAJO PARA EL CÁLCULO DE LA PENDIENTE DEL CAUCE CON ARCGIS 9.X®



A. Desarrollo de la pendiente con estructuras vectoriales

Este procedimiento es válido únicamente para el cálculo de la pendiente longitudinal del cauce. Se consiguen resultados tan exactos como calidad tenga el MDE. Para su desarrollo nos hemos apoyado en la extensión de ecología espacial *Hawth's Analysis Tools*® implementada por el Dpto. de Ciencias Biológicas de la Universidad de Alberta (Canadá) para *ArcGis*® *ESRI*.

Figura 6
OBTENCIÓN DE LA PENDIENTE CON LA HOJA DE CÁLCULO EXCEL

E3		fx = ((D2-D3)/500)*100				
	A	B	C	D	E	F
1	ID	x	y	z	P	
2	1	640782	4726031	1012,9	10,1	
3	2	640545	4725628	982,7	6,0	
4	3	640687	4725159	941,3	8,3	
5	4	636390	4722827	539,2	1,4	
6	5	636033	4722850	531,1	1,6	

El proceso se inicia con la descomposición de la red fluvial en puntos equidistantes [*Hawth's tools* → *Hawths tools* → *Animal movements* → *Convert paths to points (lines to points)*] para que la distancia planimétrica sea constante. A las nuevas capas de puntos creadas para cada corriente se les añade el valor de la altitud del MDE en ese punto [*3D Analyst tools* → *Functional surface* → *Surface spot* || *Spatial analyst tools* → *Extraction* → *Extract values to points*]. Las capas (*.shp) están constituidas por diferentes archivos, uno de los cuales es una tabla (*.dbf) donde se almacena todo el contenido alfanumérico. Cada una de estas

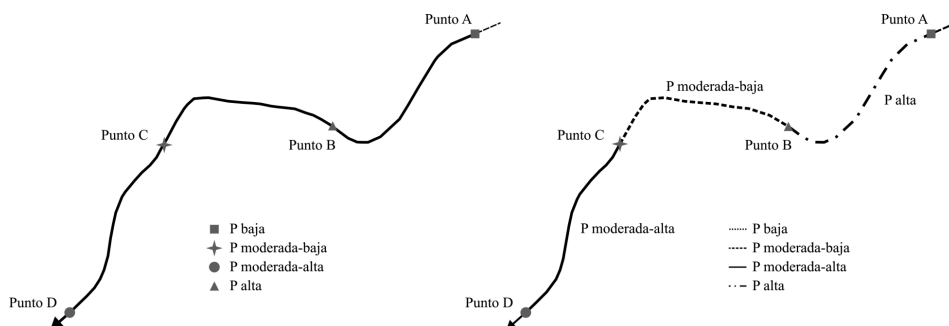
tablas puede abrirse con la hoja de cálculo *Excel* para formular la ecuación de la pendiente en una nueva columna denominada ‘P’, como bien ilustra la figura 6.

El resultado es guardado nuevamente en formato (*.dbf) o bien (*.xls), ambos reconocidos por *ArcGis 9.x*®. Las tablas de datos con la nueva información almacenada se vuelcan en el programa [*Tools* → *Add XY data*] para, seguidamente, representarla en el visor *ArcMap*. La presentación de los datos ha de hacerse en función de los intervalos de pendiente (%) de cauce previamente definidos.

Antes de continuar con el proceso es necesario generar una copia de la capa ríos que sirva de base para la desfragmentación en tipos de pendiente. El proceso es simple y consiste en cortar la copia de la capa lineal ríos —denominada ‘Pendiente’— [*Split tool* y *Snapping* (‘Puntos_ríoX’)] en cada cambio de tipo de pendiente indicada según el color / forma de los puntos y definida así en la simbología. El mecanismo se explica en la figura 7:

Figura 7

EJEMPLIFICACIÓN DEL CÁLCULO DE LA PENDIENTE LONGITUDINAL MEDIANTE MODELOS VECTORIALES. EL PUNTO D REPRESENTA LA PENDIENTE ENTRE ÉSTE Y EL PUNTO INMEDIATAMENTE SUPERIOR AGUAS ARRIBA (PUNTO C); EL PUNTO C REPRESENTA LA PENDIENTE ENTRE ÉSTE Y EL PUNTO INMEDIATAMENTE SUPERIOR AGUAS ARRIBA (PUNTO B), Y ASÍ SUCESIVAMENTE



B. Desarrollo de la pendiente con estructuras ráster

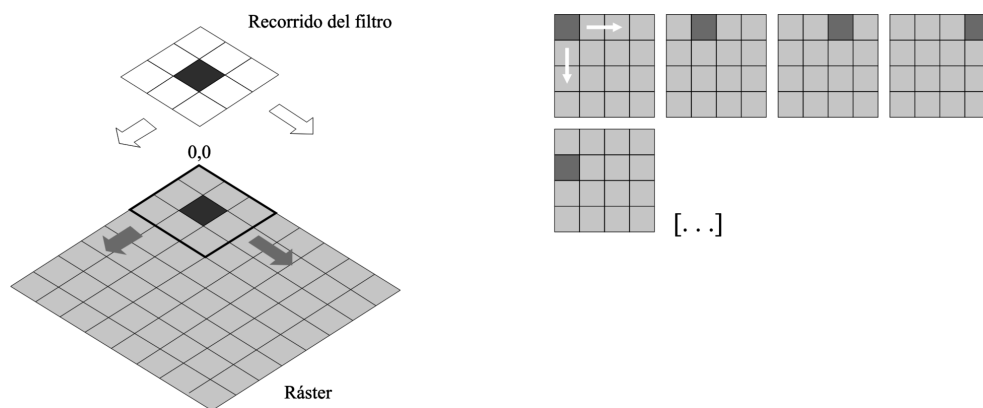
El principal obstáculo para el cálculo de la pendiente con estructuras matriciales es, sobre muchos otros, el tamaño del píxel del MDE, de modo que la decisión del tipo de resolución es un paso primordial con fuerte impronta en el resultado final. *ArcGis 9.x*® obtiene automáticamente la pendiente mediante un operador de paso bajo denominado *sobel* o método de Horn (Horn, 1981). El proceso se basa en una matriz móvil de coeficientes de filtrado o *kernel* de 3x3 celdas que recorre el MDE englobando en cada cálculo 8 valores, sin intervención del punto a deducir (figura 8). Para sucesivos movimientos de la ventana, tras calcular el nuevo valor del píxel central y único modificado en cada movimiento, el cálculo se basa en los valores originales y no en los ya filtrados. El operador *sobel*, a diferencia de otros que usan también 8 valores de computación, pondera más a los 4 vecinos más próximos que aquellos ubicados en las diagonales (Felicísimo, 1994). La obtención de la pendiente mediante este filtro se resuelve con la raíz cuadrada ($\sqrt{}$) de $S_A^2 + S_B^2$, en la que:

$$S_A = [(Z_3 + 2Z_6 + Z_9) - (Z_1 + 2Z_4 + Z_7)] / 8d$$

$$S_B = [(Z_1 + 2Z_2 + Z_3) - (Z_7 + 2Z_8 + Z_9)] / 8d$$

donde Z es la cota altimétrica y d la distancia entre los centroides de las celdas de filtrado.

Figura 8
SIMULACIÓN DEL RECORRIDO DE LA KERNEL EN UN RÁSTER (IMAGEN CEDIDA POR F. J. REYES PERALTA)

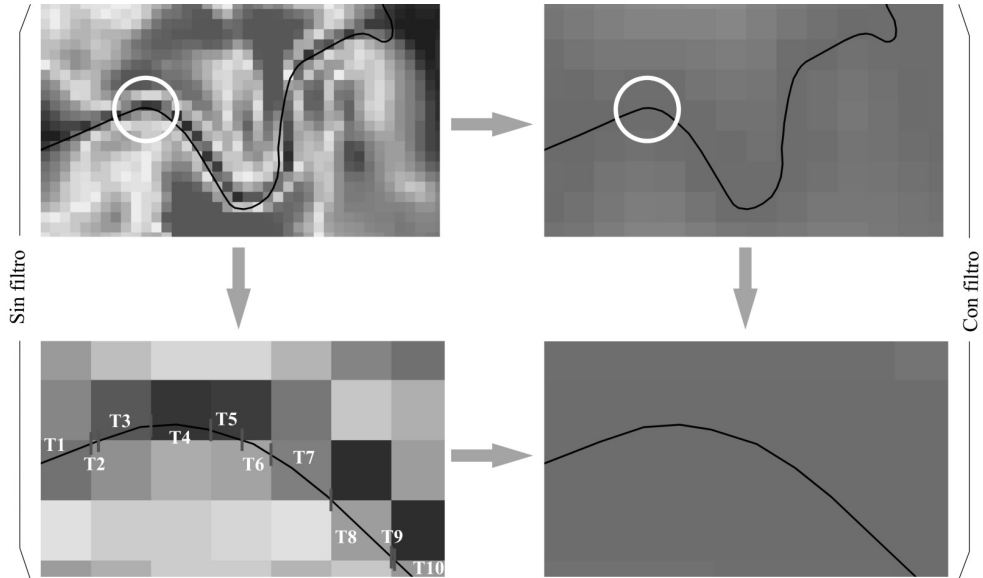


Los algoritmos para la obtención de pendientes son diversos y cada programa comercial emplea uno u otro, si bien, se generaliza el cálculo basado en máscaras de 3x3 con ponderación variada según el método (Castillejo et al., 2006). El filtrado del algoritmo empleado por *ArcGis 9.x*® supone que actúen un elevado número de puntos pero no el punto problema o a deducir, conjetura que propicia dos grandes desventajas: i) efecto de suavizado importante; y ii) desaprovechamiento de la información del punto problema al no formar parte del cálculo, situación que puede verse agravada si ese dato coincide con una depresión o una cresta. Por el contrario, este procedimiento cuenta con la ventaja de disfrazar posibles errores puntuales del MDE ya que, al intervenir un elevado número de datos en el filtrado, éstos pierden peso en detrimento de los valores circundantes que conforman la ventana (Márquez, 2004).

No es recomendable establecer los tipos de pendiente directamente de los resultados del algoritmo. Conviene aplicar antes a la capa ráster (figura 9) un filtro de paso bajo con media de *kernels* de, por ejemplo, 3x3, 5x5 o 7x7 (rutinas ráster A y C) o bien transformar el *grid* a otro con píxeles de valor medio (*mean*) de la cuenca (rutina ráster B), que ayude a mitigar una excesiva división en tipos de pendiente. La idea es fortalecer la componente media (el filtro *favorece* a los píxeles periféricos por lo que el píxel central se asemeja más a éstos) para reducir la variabilidad de casos y obtener un *grid* mucho más homogeneizado (ver figura 9) (Chuvieco, 2008). Esta aplicación tiene especial relevancia allí en donde la frecuencia de cambio es alta, entendiendo frecuencia como el número de permutas en los valores de celda por unidad de distancia (adaptado de Jensen, 1996).

Figura 9

IMÁGENES DE UN SECTOR DE CUENCA: SIN FILTRADO (IZQ.) Y CON FILTRO DE PASO BAJO 3X3 (DER.). EN LAS IMÁGENES INFERIORES SE INDICA EL NÚMERO DE TRAMOS DIBUJADOS POR EL S.I.G. ANTES (IZQ.) Y DESPUÉS (DER.) DE LA APLICACIÓN DEL FILTRO EN UN TRAMO DE 180 M Y CON UN TAMAÑO DE PÍXEL DE 25 M



De los resultados del proceso de filtrado o suavizado son especialmente interesantes los datos medios de número de tramos, tramos medios y tramo máximo porque reflejan muy bien la respuesta de la tramificación con diferentes tipos de filtros. El tramo mínimo es poco representativo porque se corresponde generalmente con aquellas situaciones en las que un río *roza* levemente un píxel adquiriendo de ese modo su valor. La no aplicación de un filtro deriva en una longitud del tramo media o baja y un número de tramos elevado y, de modo inverso, el filtrado implica que la longitud del tramo medio sea mayor y el número de tramos menor.

C. Desventajas de los modelos matriciales en el cálculo de la pendiente longitudinal

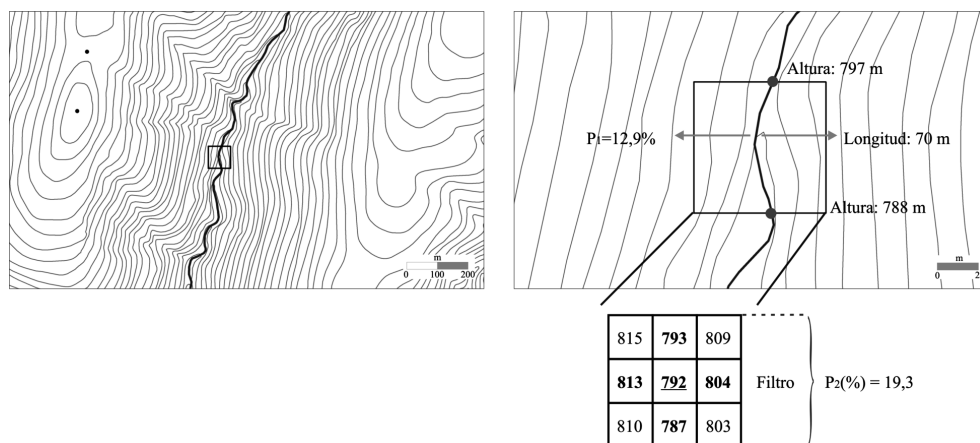
La resolución del MDE supone principalmente 3 tipos de problemas para determinar la pendiente a nivel de cauce: i) cuanto menos resolución tenga el MDE menos exacto será el cálculo de la pendiente; ii) en valles estrechos, gargantas, desfiladeros, etc. se otorga al cauce un valor de pendiente superior al real (figura 10); y iii) pueden aparecer tramos de cauce en contrapendiente debido al efecto que implican los filtros, infravalorando o sobrevalorando el valor de un punto concreto en función del valor de los puntos incluidos en la ventana de filtro. El resultado es, en consecuencia, una red con bastantes imprecisiones (*ruido*): discontinuidades, fenómenos de contrapendiente, cortes bruscos...

En la figura 9 se ejemplifica como en un sector de río de escasos 180 m el programa divide la red antes del filtrado en 10 tramos, algunos de los cuales únicamente tienen 2 ó 3 m, sin embargo, con un filtro bajo de 3x3 todo ese sector se reduce a una única mancha y, por tanto, a un solo tipo de pendiente o tramo. El recorrido del río supone también un contratiempo difícil de solventar en cuanto que son numerosas las ocasiones en que *roza* con píxeles de pendiente-tipo distinta generando así un pequeño tramo. Este problema no es posible solucionarlo de forma automática aunque sí se reducen notablemente las posibilidades de padecerlo después del filtrado.

En áreas de planitud topográfica no se dan grandes problemas de cálculo ya que la heterogeneidad de valores altimétricos es baja. Ahora bien, en los sectores de mayor verticalidad, ubicados muchos de ellos en los tramos de cabecera, la pendiente del cauce puede distar bastante de la realidad porque en el cálculo se tienen en cuenta las pendientes de vertiente, muy superiores a la pendiente de cauce (ver el ejemplo de la figura 10).

Figura 10

PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO DE LA PENDIENTE CON FILTROS SOBEL (P_2) Y PENDIENTE REAL DEL CAUCE (P_1)



4.3. Geomorfología del cauce

El cauce menor, canal fluvial o lecho es el elemento de mayor relevancia en los estudios de hidrogeomorfología fluvial (Petts y Amoros, 1996). El cauce está experimentando un proceso de cambio constante a causa del caudal líquido y sólido, la pendiente del cauce, el confinamiento del valle, la carga sedimentaria o su nivel de base, lo que genera un equilibrio dinámico del cauce (Schumm, 1977; Conesa, 1999) que se distingue en la multitud de tipos existentes: simple o múltiple, rectilíneo, meandriforme, trenzado, anastomosado, etc. Así, el estilo fluvial —forma del cauce— (Bravard y Gilvear, 1993) resulta de la combinación de todas las características naturales de la cuenca y de los procesos geomorfológicos acaecidos en ella (Schumm y Lichty, 1965; García Ruiz et al., 1987; Werrity, 1997; Ollero, 2007).

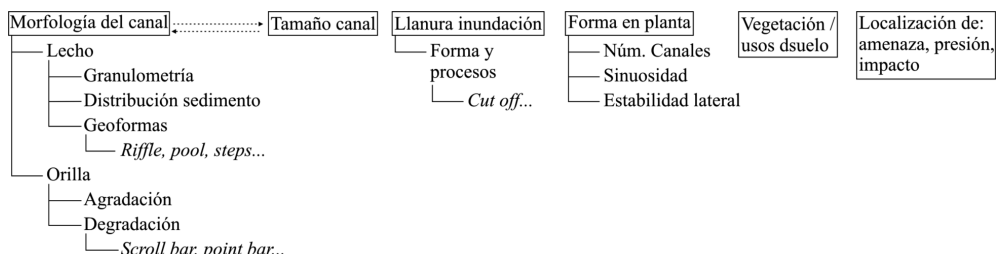
Un elevado número de clasificaciones tienen como base la propuesta de Rust (1978) a partir de la cual se derivan tipos intermedios o de transición según diferentes variables geomorfológicas de estudio (Schumm, 1963; Galay et al., 1973; Mollard, 1973; Brice, 1975; Kellerhals et al., 1976; Morisawa, 1985; Montgomery y Buffington, 1993; Kondolf, 1995; Petit, 1995; Schmitt, 2001, entre otros). Desde el ámbito administrativo una de las metodologías más aplicadas ha sido la de Rosgen (1994, 1996) aunque, según algunos autores, ofrece respuestas rápidas y poco válidas geomorfológicamente para la ordenación territorial (Miller y Ritter, 1996; Simon et al., 2005).

El estudio y definición de tipos geomorfológicos de cauce desde el S.I.G. y/o fotografía aérea cuenta con interesantes antecedentes (Brice, 1975), especialmente desde la escuela canadiense (Galay et al., 1973; Kellerhals et al., 1976) o, entre otros, el programa australiano Ausriivas (*Australian River Assessment System*) (Parsons, et al., 2002; Brierley y Fryirs, 2005). Estas metodologías de gabinete tienen importantes ventajas porque permiten obtener una visión en planta del cauce o fijar un análisis global donde no solamente se incluye el cauce propiamente dicho sino el ambiente por el que transita, lo que, en definitiva, desencadena en una clasificación fluvial rápida, bastante eficaz y desde una perspectiva diferente a la obtenida en campo.

La aportación de las T.I.G. está muy ligada a la fotografía aérea, de modo que la caracterización de la geomorfología del cauce va a estar supeditada a la escala de trabajo y la resolución de las imágenes. Igualmente, el ancho de cauce y el grado de recubrimiento vegetal pueden tornarse en dos agravantes que cuestionen las bondades del S.I.G. / fotografía aérea en la clasificación de ríos.

Brierley y Fryirs (2005) han hecho un riguroso examen de las variables que caracterizan geomorfológicamente los ríos. Algunas de las mismas requieren un ineludible trabajo de campo, si bien, muchas otras —morfología y tamaño del canal, llanura de inundación y forma en planta— se obtienen mejor mediante evaluaciones fotogeomorfológicas. Asimismo, con las T.I.G. se puede determinar eficazmente cuestiones concernientes a la vegetación / usos del suelo, a la identificación y localización de amenazas, presiones e impactos o efectuar estudios diacrónicos para observar procesos de cambio o comparar estados de deterioro (figura 11).

Figura 11
ASPECTOS DE UN SISTEMA FLUVIAL TRATABLES MEDIANTE T.I.G.



El correcto manejo de técnicas de fotointerpretación, resolución y escala adecuada, calidad visual y experiencia del usuario, son los factores necesarios para cartografiar cualquiera

de los elementos expuestos en la figura 11. No obstante, de entre los mismos, la sinuosidad (Schumm, 1963) —empleada para definir el grado de ameandramiento (Leopold et al., 1964) de un cauce— no es tan dependiente de la fotointerpretación y sí más del tipo de método empleado. Se citan y estructuran diferentes métodos de cálculo de la sinuosidad (ver tabla 3), cada uno de los cuales enfatiza más en un parámetro geotopográfico determinado.

Tabla 3
TIPOS DE SINUOSIDAD Y FORMA DE CÁLCULO

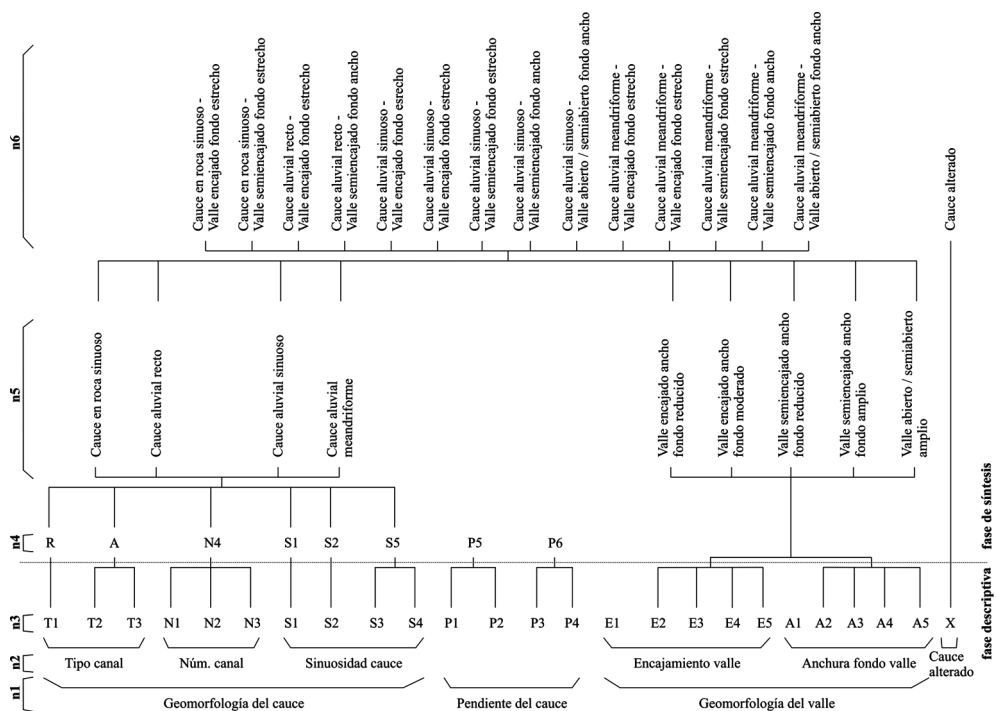
Método	Descripción	Ventajas / inconvenientes
Método de la sinuosidad total	Parámetro basado en el coeficiente entre la longitud del cauce y la distancia más corta entre el inicio y el final del mismo	Buen ajuste en corrientes rectas. Es primordial considerar los cambios de dirección marcados por el entramado de fallas, fracturas u otros elementos. Con una permuta direccional superior a 15° se recomienda iniciar un nuevo tramo de sinuosidad ya que, de lo contrario, se desvirtúa ostensiblemente el valor real del índice.
Método de Brice (1964) o 'longitud del eje central de meandros'	El índice se expresa como la ratio entre la longitud del cauce y la longitud del eje de meandros	Método muy universalizado por su rápido cálculo y buen ajuste a escalas medias y pequeñas. Con redes curvas presenta un claro sesgo porque no considera los cambios de dirección entre valles
Método de la sinuosidad por inflexión	Se obtiene de unir con una línea quebrada todos los puntos de inflexión de la serie de meandros y poner esa línea como denominador de la fórmula	Se conoce la sinuosidad de cada meandro, no obstante, aunque es lo más exacto, la sinuosidad general de un tramo largo tiende a salir más baja que con otros métodos
Método de Leopold y Wolman (1957)	Consiste en dividir la longitud del <i>talweg</i> con la longitud del valle	Se obtienen unos valores intermedios entre los dos anteriores índices, sin embargo, cuenta con el problema técnico añadido que supone determinar el <i>talweg</i> del cauce. Al igual que el método Brice, tampoco atiende a los cambios de dirección del valle
Método de la sinuosidad hidráulica (Mueller, 1978)	Formulado como el cociente entre la longitud del cauce y la longitud media del valle	Es el criterio más adecuado para el análisis morfométrico por su buen ajuste al valor real de sinuosidad. Su ejecución supone la existencia de tramos de cauce según la sinuosidad extremadamente reducidos cuando los valores de sinuosidad son medio-altos o incluso en zonas de relieve vertical, con numerosos valles de pequeño recorrido
Método de la sinuosidad topográfica (Mueller, 1978)	Definido como la relación de la longitud media del valle con la distancia más corta entre el inicio y el final del cauce	Método bien adaptado a los valles encajados. A medida que proliferen los meandros libres el valor de la ratio pierde fiabilidad ya que la longitud media del valle cuasi se equipara con el trazado recto entre el inicio y final del cauce, de modo que no se tiene en consideración la divagación del lecho

Desde ArcGis® el proceso de cálculo consiste en dividir la capa lineal de corrientes de agua en función al sector o tramos sobre los que deseamos conocer la sinuosidad. El denominador de la fórmula se obtiene automáticamente con la extensión *Hawth's tools* [*Hawth tools* → *Analysis tools* → *Line metrics: sinuosity*]. Esta función genera un nuevo campo en la tabla de atributos donde se almacenan los índices de sinuosidad de cada tramo de río dividido.

V. RESULTADOS

Los resultados alcanzados con la propuesta metodológica aquí presentada quedan recogidos esquemáticamente en la figura 12 y numéricamente en la tabla 4. Partiendo de los 24 tipos fijados en el nivel 3 (ver figura 1) se diferenciaron 14 clases hidrogeomorfológicas.

Figura 12
PROCESO DE TIPIFICACIÓN DE LA RED FLUVIAL EN LA CUENCA DEL RÍO CABE (VER TAMBIÉN FIGURA 1)



En la tabla 4 se almacenan los porcentajes de ocupación de cada tipo resultante una vez desarrollado el ejercicio de síntesis a tipos funcionales. Se da un claro dominio de cauces aluviales sinuosos en valles de encajamiento moderado con un ancho de fondo amplio. El índice de sinuosidad presenta valores similares tanto en sectores encajados (en muchos casos derivados de procesos de superposición) como en áreas de mayor movilidad fluvial.

Tabla 4

PORCENTAJES (%) DE OCUPACIÓN DE LOS TIPOS DE CAUCE Y VALLE EXISTENTES EN LA CUENCA DEL RÍO CABE

	Cauce en roca sinuoso	Cauce aluvial recto	Cauce aluvial sinuoso	Cauce aluvial meandriforme
Valle encajado de ancho de fondo reducido	9,9	0,4	18,1	18,1
Valle encajado de ancho de fondo moderado	-	-	1,0	2,3
Valle semiencajado de ancho de fondo reducido	0,2	-	2,3	2,0
Valle semiencajado de ancho de fondo amplio	-	0,5	21,7	4,4
Valle abierto / semiabierto de fondo amplio	-	-	6,7	8,5

El trabajo de simplificación —tránsito del nivel 3 al nivel 6— (ver figuras 1 y 12) se ha hecho en función a la agrupación de tipos con comportamientos geomorfológicos similares, al número de casos resultante y a la longitud mínima de cualquier tipo de combinación. Todo ello acompañado por un aparato estadístico alimentado con la información numérica extraída de las cartografías generadas en el entorno S.I.G.

Las 9 modalidades de cauce resultantes de combinar el tipo de canal y el número de canales, se sintetizaron en dos grandes tipos: ríos en roca (*bedrock*) (R) y ríos de cantos/gravas/arena/arcilla, denominados como ríos aluviales (A). Igualmente, toda la red se consideró de canal único por la escasa representatividad de las otras variantes. Los tipos de geomorfología del valle provienen de la propia interacción entre encajamiento y anchura del fondo de valle. En último término, se correlacionó la variable dependiente sinuosidad con la independiente pendiente, pues es común que ésta se erija como una de las variables explicativas preponderantes de la sinuosidad fluvial. Los resultados arrojan correlaciones bajas y negativas, salvo para el río Cinsa ($r=0,062$). Si consideramos el coeficiente de correlación para cada tipo de sinuosidad las tendencias son mayoritariamente positivas pero igualmente de escasa pendiente. Esto supone que la relación pendiente-sinuosidad no permite establecer generalidades definidoras en la caracterización del cauce, con lo que la clasificación debe abordarse separadamente.

La problemática ha supuesto que los tipos de sinuosidad quedasen conformados por: tramos rectos ($<1,05$), tramos sinuosos ($>1,05 - <1,3$) y tramos meandriformes ($>1,3$) en vistas de que el comportamiento geomorfológico de los ríos de meandrizamiento moderado y meandriformes no denota diferencias en la zona de estudio. La baja carga explicativa de la pendiente ha supuesto que no se considere para establecer clases en esta cuenca.

VI. CONCLUSIONES

En función a las características del presente trabajo, las conclusiones deben referirse por separado, y primeramente, a la propuesta metodológica para, a continuación, valorar su aplicación en la cuenca del río Cabe.

Son destacables los siguientes aspectos del método propuesto y su desarrollo con técnicas S.I.G.:

- Resulta más interesante abordar qué es un valle desde las acepciones que adopta el término según diversas clasificaciones (figura 2) y no tanto desde definiciones generalistas que tratan de aplicar un único enunciado que englobe a todos los demás.
- La elaboración de una cartografía de pendientes ráster supone, por la propia idiosincrasia de este tipo de estructuras, unos resultados con un notable sesgo, por lo que el valor final no refleja en muchos casos la realidad de la pendiente del cauce.
- La idea de un protocolo de actuación en vez de una clasificación cerrada y predefinida supone que sea el propio investigador —y auténtico conocedor de la zona de estudio— quien determine los parámetros idóneos para la caracterización hidrogeomorfológica.

El ensayo llevado a cabo en la cuenca del Cabe debe entenderse como un ejemplo de adecuación del protocolo a un área concreta con unas particularidades determinadas. En este sentido, en la figura 12 se muestra el modo de proceder para este caso en el que, partiendo de las tres variables geomorfológicas (nivel 1) se llegaron a distinguir 24 tipos o características para el análisis geomorfológico (nivel 3). En las siguientes etapas (fase de síntesis) todo este conjunto de tramos-tipo se van simplificando a un número coherente mediante el reajuste de umbrales, el grado de representatividad espacial y la correlación entre variables.

La simplificación tan acusada del tipo y número de canales se justifica en: i) la separación entre tramos de gravas/cantos y tramos arcillo/arenosos no resulta sencilla, pues ambas modalidades se van intercalando a lo largo del río, surgiendo así infinidad de situaciones intermedias; ii) aplastante predominio de los ríos de canal único, ocupando un 99,73% de la red (solamente se cartografiaron 350 m de tramos con más de un canal); y iii) los nuevos tipos establecidos siguen presentando una actividad hidrogeomorfológica diferente.

Aunque la pendiente no se ha mostrado como un factor explicativo de la sinuosidad ni, por ende, discriminador de ambientes dinámicos de procesos diferenciados, la intensidad de este vínculo es variable en función al número de factores que interactúan en un punto concreto del sistema fluvial, de modo que la pendiente en sí misma también puede ser indicativa de la geomorfología del cauce en otros contextos.

El tránsito de una tipología a otra se produce de forma gradual. Sin embargo, cada sector es bastante diferenciable de sus circundantes, en especial desde el punto de vista del cauce donde los ríos en roca son perfectamente reconocibles. El paso de una particularidad de valle a otra es más difuso y se necesita en muchos casos recurrir al criterio cuantitativo para establecer límites. En estas zonas de contacto tipológico no se constató sin embargo una marcada combinación de estilos fluviales que suponga establecer tipos de transición. Un caso especial presente también en el área de estudio son los cauces alterados o tramos afectados por un impacto, lo que se interpreta como una pérdida total o parcial del comportamiento geomorfológico natural.

En suma, este tipo de clasificaciones resulta de sumo interés para la comprensión de los sistemas naturales, su funcionamiento y puesta en valor, además de un instrumento nuevo a tener en consideración en los planes de ordenación territorial con un notable beneficio para el medio natural y la sociedad.

El ensayo se ha llevado a cabo solamente en la cuenca del río Cabe, por lo que es preciso en futuros trabajos aumentar el ámbito de aplicación a otras cuencas y comparar la validez del método.

BIBLIOGRAFÍA

- BRAVARD, J.P. y GILVEAR, D.J. (1993): «Structure hydro-géomorphologique des hydrosystèmes». En Amoros, C. y Petts, G.E. (coords.): *Hydrosystèmes fluviaux*, París, Masson, pp. 83-103.
- BRENDEN, T.O., WANG, L., SEELBACH, P.W., CLARK Jr., R.D., WILEY, M.J. y SPARKS-JACKSON, B.L. (2008): «A spatially constrained clustering program for river valley segment delineation from GIS digital river networks». *Environmental Modelling & Software*, nº 23, pp. 638-649.
- BRICE, J.C. (1964): «Channel patterns and terraces of the Loup Rivers». *US Geological Survey Professional Paper*, Nebraska, 422-D.
- BRICE, J.C. (1975): «Air photo interpretation of the form and behavior of alluvial rivers». *Final report to the US Army Research Office*.
- BRIERLEY, G.J. y FRYIRS, K.A. (2005): *Geomorphology and river management. Applications of the river styles framework*. Oxford, Blackwell, 398 pp.
- CASTILLEJO, I.L., FÉRNANDEZ, P., GARCÍA-FERRE, A. y SÁNCHEZ, M. (2006): «Estudio comparativo de los distintos métodos de cálculo de pendientes derivados de modelos digitales del terreno». *XVIII Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, Barcelona.
- CHARLTON, R. (2008): *Fundamentals of fluvial geomorphology*. Abingdon, Routledge, 234 pp.
- CHUVIECO, E. (2008): *Teledetección ambiental. La observación de la Tierra desde el Espacio*. Barcelona, Ariel Ciencia, 595 pp.
- COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES (2002): *A guidance standard for assessing the hydromorphological features of rivers*. CEN TC 230/WG 2/TG 5: N32, 1-21.
- CONESA, C. (1999): «Cambio ambiental y equilibrio dinámico de los cauces». *Papeles de Geografía*, nº 30, pp. 31-46.
- DÍAZ, E. y OLLERO, A. (2005): «Metodología para la clasificación geomorfológica de los cursos fluviales de la cuenca del Ebro». *Geographicalia*, nº 44, pp. 23-45.
- DIETRICH, W.E. y DUNNE, T. (1993): «The channel head». En: Beven, K. y Kirkby, M.J. (eds): *Channel network hydrology*. Chichester, John Wiley & Sons Ltd, pp. 175-219
- DOWNS, P.W. y GREGORY, K.J. (2004): *River channel management. Towards sustainable catchment hydrosystems*. London, Arnold, 395 pp.
- FELICÍSIMO, A.M. (1994): *Modelos digitales del terreno*. Oviedo, Pentalfa Ediciones, 222 pp.
- GALAY, V.J., KELLERHALS, R. y BRAY, D.I. (1973): «Diversity of river types in Canada». *Fluvial process and sedimentation*, National Research Council of Canada, pp. 217-250.
- GANGODAGAMAGE, G., BARNES, E. y FOUFOULA-GEORGIU, E. (2007): «Scaling in river corridor widths depicts organization in valley morphology». *Geomorphology*, nº 91, pp. 198-215.

- GARCÍA-RUIZ, J.M., GÓMEZ VILLAR, A. y ORTIGOSA, L. (1987): *Aspectos dinámicos de un cauce fluvial en el contexto de su cuenca: el ejemplo del río Oja*. Zaragoza, Instituto Pirenaico de Ecología, 112 pp.
- HORN, P. (1981): *Active filter design handbook*. New York, Wiley.
- JENSEN, J. R. (1996): *Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective*. 2nd Ed., New Jersey, Prentice Hall.
- KELLERHALS, R., CHURCH, M. y BRAY, D.I. (1976): «Classification and analysis of river processes». *Journal of the Hydraulics Division*, n° 102, pp. 813-829.
- KONDOLF, G.M. (1995): «Geomorphological stream channel classification in aquatic habitat restoration: uses and limitations». *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, n° 5, pp. 127-141.
- KONDOLF, G.M. y PIÉGAY, H. (eds.) (2003): *Tools in Fluvial Geomorphology*. Chichester, Wiley, 688 pp.
- LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G. y MILLER, J.P. (1964): *Fluvial processes in Geomorphology*. San Francisco, Freeman and Co., 522 pp.
- MALAVOI, J.R. y BRAVARD, J.P. (2010): *Éléments d'hydromorphologie fluviale*. Vincennes, Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), 224 pp.
- MÁRQUEZ, J. (2004): *Modelos digitales de elevaciones, métodos de interpolación y parámetros morfométricos del relieve*. Tesis doctoral, Universidad de Sevilla, 594 pp.
- MARTONNE, E. de (1913): *Traité de géographie physique*. Paris, A. Colin, 922 pp. (2^a ed.).
- MILLER, J.R. y RITTER, J.B. (1996): «An examination of the Rosgen classification of natural rivers». *Catena*, n° 27, pp. 295-299.
- MOLLARD, J.D. (1973): «Air-photo interpretation of fluvial features». *Fluvial process and sedimentation*, National Research Council of Canada, pp. 341-380.
- MONTGOMERY, D.R. y BUFFINGTON, J.M. (1993): *Channel classification, prediction of channel response and assessment of channel conditions*. Washington State Department of Natural Resources, Timber/Fish/Wildland Agreement, 84 pp.
- MORISAWA, M. (1985): *Rivers. Form and process*. Geomorphology Texts, University of East Anglia, K. M. Clayton, vol. 7, 222 pp.
- NEWSON, M.D. (2002): «Geomorphological concepts and tools for sustainable river ecosystem management». *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, n° 12, pp. 365-379.
- NEWSON, M.D. y LARGE, A.R.G. (2006): «Natural' rivers, 'hydromorphological quality' and river restoration: a challenging new agenda for applied fluvial geomorphology». *Earth Surface Processes and Landforms*, n° 31, pp. 1606-1624.
- OLLERO, A. (2007): *Territorio fluvial. Diagnóstico y propuesta para la gestión ambiental y de riesgos en el Ebro y los cursos bajos de sus afluentes*. Bilbao, Bakeaz, 255 pp.
- OLLERO, A., BALLARÍN, D. y MORA, D. (2009): *Aplicación del índice hidrogeomorfológico IHG en la cuenca del Ebro. Guía metodológica*. Zaragoza, Confederación Hidrográfica del Ebro, 93 pp.
- OLLERO, A., ECHEVERRÍA, M.T., SÁNCHEZ FABRE, M., AURIA, V., BALLARÍN, D. y MORA, D. (2003): «Metodología para la tipificación hidromorfológica de los cursos fluviales de Aragón en aplicación de la Directiva Marco de Aguas (2000/60/CE)». *Geographicalia*, n° 44, pp. 7-25.

- PARDO PASCUAL, J.E. & PALOMAR, J. (2002): «Metodología para la caracterización geomorfológica de los barrancos del sur de Menorca mediante perfiles transversales». En *X Congreso de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección*, Valladolid (libro electrónico).
- PARSONS, M., THOMS, M. y NORRIS, R. (2002): *Australian River assessment system: review of physical river assessment methods. A biological perspective*. Monitoring River Health Initiative, Commonwealth of Australia and University of Canberra, 59 pp.
- PEDRAZA, J. (1996): *Geomorfología. Principios, métodos y aplicaciones*. Madrid, Rueda, 414 pp.
- PELLA, H., WASSON, J.G. y SOUCHON, Y. (2001): «Caractérisation des vallées alluviales. Rapport final». *Cemagref*, 56 pp.
- PÉREZ-ALBERTI, A. (1981): «Aproximación xeográfica aos vales fluviais en Galicia». *Cuadernos de Estudios Galegos*, nº 32 (96-97), pp. 7-36.
- PETIT, F. (1995): «Régime hydrologique et dynamique fluviale des rivières ardennaises». En Demoulin, A. (ed.): *L'Ardenne Essai de Géographie Physique*, Livre en hommage au Professeur A. Pissart, Université de Liège: Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale, pp. 194-223.
- PETTS, G.E. y AMOROS, C. (coord) (1996): *Fluvial hydrosystems*. London, Chapman & Hall Ltd, 322 pp.
- PETTS, G.E. y FOSTER, I. (1985): *Rivers and landscape*. London, Edward Arnold Ltd, 274 pp.
- PRAT, N. y MUNNÉ, A. (1999): *Regionalización de la cuenca del Ebro*. Confederación Hidrográfica del Ebro, 134 pp.
- ROSGEN, D.L. (1994): «A classification of natural rivers». *Catena*, nº 22 (3), pp. 169-199.
- ROSGEN, D.L. (1996): *Applied river morphology*. Pagosa Springs, Wildland Hydrology.
- RUST, B.R. (1978): «A classification of alluvial channel systems». En Miall, A.D. (ed.): *Fluvial Sedimentology, Mem. Canadian Society Petroleum Geologists*, nº5, pp. 187-198.
- SCHMITT, L. (2001): *Typologie hydro-géomorphologique fonctionnelle des cours d'eau. Recherche méthodologique appliquée aux systèmes fluviaux d'Alsace*. Tesis doctoral, Université Louis Pasteur, Estrasburgo, 217 pp. + anexos.
- SCHUMM, S.A. (1963): «A tentative classification of alluvial river channels». *Washington, U. S. Government Printing Office* (U. S. Geological Survey circular, 477), 9 pp.
- SCHUMM, S.A. (1977): *The fluvial system*. New York, John Wiley & Sons, 338 pp.
- SCHUMM, S.A. y LICHTY, R.W. (1965): «Time, space and causality in Geomorphology». *American Journal of Science*, nº 263, pp. 110-119.
- SEAR, D.A.; NEWSON, M.D. y THORNE, C.R. (2003): *Guidebook of applied fluvial geomorphology*. London, R&D Technical Report, DEFRA y Environment Agency, 233 pp.
- SEGURA BELTRÁN, F., PARDO PASCUAL, J.E. y PALOMAR, J. (2004): «Torrents, barrancs i canals: la xarxa de drenatge del Migjorn». *Història Natural del Migjorn de Menorca: el medi físic i l'influx humà, Monografia de la Societat d'Història Natural de les Balears*, Palma de Mallorca, pp. 129-156.
- SILIGARDI, M. (coord.) (2003): *I.F.F. Indice de funzionalità fluviale*. Roma, Agenzia Nazionale per la Protezione dell'Ambiente, 224 pp. (2ª ed.).

- SIMON, A., DOYLE, M., KONDOLF, G.M., SHIELDS, F.D. Jr., RHOADS, B., GRANT, G., FITZPATRICK, F., JURACEK, K., McPHILLIPS, M. y McBROOM, J. (2005): «How well do the Rosgen classification and associated «natural channel design» methods integrate and quantify fluvial processes and channel response?» *Environmental and Water Resources Institute World Congress Proceedings*.
- THORNDYCRAFT, V.R.; BENITO, G. y GREGORY, K.J. (2008): «Fluvial geomorphology: a perspective on current status and methods». *Geomorphology*, nº 98, pp. 2-12.
- THORNE, C.R.; HEY, R.D. y NEWSON, M.D. (1997): *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. Chichester, Wiley, 376 pp.
- TWIDALE, C.R. (1976): *Analysis of landforms*. Australia, Wiley & Sons, 572 pp.
- WERRITY, A. (1997): «Short-term changes in channel stability». En Thorne, C.R., Hey, R.D. y Newson, M.D. (eds.): *Applied fluvial geomorphology for river engineering and management*, Chichester, Wiley, pp. 47-65.
- YOUNG, A. (1972): *Slopes*. Clayton, Geomorphology, Vol. 3, 288 pp.