

IV Reunión de Geomorfología
Grandal d' Anglade, A. y Pagés Valcarlos, J., Eds.
1996, Sociedad Española de Geomorfología
O Castro (A Coruña)

EL MÉTODO DE GEOMETRÍA DE CAUCES APLICADO A LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS DE CRECIDA EN LA VEGA ALTA DEL SEGURA

Conesa García, C.¹ y Alvarez Rogel, Y.

¹ Dpto. de Geografía Física. Universidad de Murcia. Campus de la Merced, s/n,
30001 Murcia.

RESUMEN

En condiciones naturales, la forma del cauce suele ser la expresión más clara de su adaptación a corrientes de régimen alto. Esta adaptación implica normalmente cambios en la configuración del lecho y modificación de la anchura y profundidad del cauce asociados a caudales dominantes y extremos. El presente trabajo dedica especial atención a dichas relaciones, eligiendo para su estudio el *método de geometría de cauces*, ya utilizado por numerosos autores como método indirecto de estimación de caudales de inundación. Aquí ha sido aplicado al tramo de la Vega Alta del Segura, cuyo cauce presenta niveles de referencia geomórfica netos y un modelo de cauce meandriforme bien definido. Para el conjunto del tramo se han obtenido empíricamente ecuaciones de tipo potencial que relacionan los datos de corriente de las estaciones de aforo con las dimensiones del cauce medidas a partir de secciones transversales naturales próximas a ellas. Los resultados constituyen una aproximación teórica comparable a las ecuaciones regionales desarrolladas en otros medios fluviales semiáridos.

Palabras clave: geometría del cauce, caudal dominante, desbordamiento, *bankfull*, llanura de inundación activa, adaptación morfológica, ecuación de regresión.

ABSTRACT

Under natural conditions, the channel geometry is usually the clearest expression of its adjustments to high-water flows. These adjustments often imply changes in the bed-forms and changes in width and depth of the channel related to extreme and dominant discharges. This work devotes special attention to that relationship, choosing the channel geometry method, in order to study it. Method has been used by a lot of authors as an indirect method to estimate flood discharges. Here, it has been applied to the sector in the 'Vega Alta' of Segura, where the channel shows net geomorphic reference levels and a meandering pattern which is well defined. For the set of reaches potential equations have been obtained empirically. Equations that relate discharge records in gauge stations to channel dimension measurements based in cross-sections near them. The results are a theoretical

approach comparable to regional aquations which have been developed in other fluvial semi-arid environments.

Key words: channel geometry, dominant discharge, overflow, bankfull, active floodplain, morphological adjustment, regression equation.

INTRODUCCIÓN

Normalmente un cauce adapta su forma y capacidad al volumen de corriente dominante. Si la capacidad del cauce en un punto es demasiado pequeña en relación con la de tramos próximos, la probabilidad de sucesos de *bankfull* y desbordamiento aumenta hasta que los procesos de erosión y sedimentación desarrollados localmente en torno a su perímetro producen una nueva situación de equilibrio. La forma del cauce refleja su adaptación a la frecuencia y magnitud de los sucesos hidrológicos, mostrando un ritmo de respuesta muy diferente según se trate de medios húmedos (WOLMAN y GERSON, 1978; HARVEY *et al.*, 1982) o áridos-semiáridos (TUNBRIDGE, 1984; CLARK y DAVIES, 1988; CONESA GARCÍA, 1995). Esta adaptación viene dada por cambios en la geometría del cauce (anchura, profundidad) y en la configuración del lecho (dunas, ripples y otras formas menores). Los ajustes morfológicos del cauce suelen mantener una importante relación con determinados umbrales de caudal, dependientes de controles medio-ambientales externos. La investigación sobre este tipo de relaciones entre geometría hidráulica y caudal ha proporcionado la base de un método indirecto de estimación de caudales de inundación en tramos no aforados (*método de geometría de cauces*). Las ecuaciones de geometría de cauces se desarrollan empíricamente relacionando los datos de corriente de las estaciones de aforo y las dimensiones del cauce medidas en tramos naturales del río próximos a dichas estaciones. Una vez definidas estas ecuaciones, generalmente con forma de función potencial (OSTERKAMP, 1978), basta conocer la anchura o el área del cauce en una sección concreta para estimar aquí las características de la corriente en condiciones de régimen alto.

El régimen irregular de los cursos que drenan la cuenca del Segura y el carácter torrencial de sus avenidas dificultan en muchos casos la medición directa de caudales en tramos no aforados, haciendo necesaria la aplicación de métodos tradicionales indirectos, tales como la extrapolación de registros de corrientes a partir de la cuenca vertiente aforada más cercana, técnicas de regresión (empleando variables climáticas y de drenaje), métodos de área-pendiente y modelos hidrológicos basados en parámetros físicos (WHARTON, 1992). Alternativamente, la escasa fiabilidad de este tipo de modelos en medios semiáridos y áridos ha impulsado, durante los últimos años, el desarrollo del *método de geometría de cauces*. Su aplicación a cursos de la cuenca del Segura puede constituir una aproximación valiosa, dada la falta de información hidrológica de amplios sectores de la misma y los escasos requerimientos de datos exigidos por dicho método. En esta cuenca opera una red de 27 estaciones de aforo continuo, con series más o menos largas de información, pero, en cambio, las ramblas no disponen de instrumentos de registro, salvo en contados puntos controlados desde hace algunos años por el

S.A.I.H. (Sistema Automático de Información Hidrológica). Las limitaciones impuestas por la escasa información hidrológica referente a las ramblas, la falta de adecuación entre los modelos de cauces efímeros y los correspondientes al río Segura, y el encauzamiento de este último desde La Contraparada hasta su desembocadura en Guardamar, han llevado a utilizar esta técnica en la vega alta del río, caracterizada por un trazado meandriforme y dos niveles gemórficos bien definidos (*bankfull* y llanura de inundación activa). En este tramo, el Segura recibe un imbricado sistema de ramblas de fuerte potencial erosivo (Rambla del Cárcavo, Rambla del Agua Amarga, Rambla del Judío, Rambla del Moro, Rambla de Benito, Rambla de Ambroz, Rambla de Mayés, Rambla del Carrizalejo,...), que en época de avenidas contribuyen, con importantes caudales y aportes sedimentarios, a modificar la morfología del cauce principal aguas abajo de sus confluencias. Además, dispone aquí de varias estaciones con series de datos suficientes para establecer ecuaciones de geometría de cauces, aplicables a la totalidad del tramo y a otros sistemas fluviales de comportamiento similar.

METODOLOGÍA

Las líneas metodológicas adoptadas en el presente análisis se basan principalmente en la experiencia desarrollada por el *Water Resources Division* del USGS, y en los trabajos sobre geometría de cauces de Osterkamp y Hedman (1979, 1982) y de Wharton (1992, 1995a, 1995b).

Los datos de caudal corresponden a siete estaciones de aforo comprendidas entre Calasparra y Archena (Vega Alta del Segura). Dos de ellas, Menjú y E. de Ojós, disponen de series cortas, que han sido completadas con valores deducidos por correlación con los de estaciones próximas. En la estimación de caudales para períodos de retorno específicos (Q_T), se ha empleado la distribución EV1 de Gumbel (GUMBEL, 1958; NERC, 1975) (tabla 1), modelo log-normal general, cuya función, $F(x) = 1 - P(x) = \exp[-\exp[-(x-u)/a]]$, constituye un doble exponencial de dos parámetros, con moda u , media $\mu = u + 0,5772 \cdot \alpha$ y varianza $\sigma^2 = (\pi^2 \alpha^2)/6$.

Tabla 1. Valores de caudal máximo medio anual (Q_{ma}) y caudales máximos diarios calculados para diferentes tiempos de retorno (Q_T) en estaciones con series largas*.

	Q_{ma}	σ^2	α	u	Q_2	Q_5	Q_{10}	Q_{20}	Q_{40}	Q_{80}
Calasparra	101,0	16081,9	98,87	43,87	80	192	267	338	407	474
Almadenes	111,8	15247,1	96,27	56,25	92	200	273	343	410	478
Cieza	142,5	14450,0	93,72	88,35	123	229	300	367	433	500
Abarán	137,9	17284,3	102,50	78,73	117	232	309	383	456	527
Archena	136,2	14633,1	94,32	81,75	116	223	294	362	429	494

α y u son parámetros empleados en el cálculo de la función de distribución EV1 de Gumbel; $\alpha^2 = (\sigma^2 / \pi^2) \times 6$; $u = Q_{ma} - 0,5772 \times \alpha$; * Período de análisis: 1923-24/1983-84.

Para el estudio de geometría hidráulica se han seleccionado tramos semiestables de trazado meandriforme y poco sinuoso, distribuidos en siete sectores de la Vega Alta del Segura: 1. Calasparra-Macaneo, 2. Horno-La Torre, 3. Los Charcos-Cieza, 4. Menjú-Abarán, 5. Abarán-E.de Ojós, 6. Ulea-Villanueva del Río Segura, 7. Archena-Algaida (fig.1). Siguiendo las sugerencias de WHARTON (1995b), cada tramo tiene una longitud igual a 4 ó 5 veces la anchura de su cauce, presenta márgenes poco coherentes capaces de ajustarse a los caudales dominantes, y carece de obstrucciones naturales importantes, de obras de revestimiento o realineación del cauce y de irregularidades topográficas en su lecho. Se ha procurado también evitar afluencias de ramblas y barrancos que pudieran provocar ajustes bruscos y distorsionar localmente la morfología de la sección transversal del cauce (RICHARDS, 1980, KNIGHTON, 1980). Cada tramo ha sido definido mediante cuatro secciones representativas regularmente espaciadas y con forma trapezoidal. Las secciones correspondientes a tramos meandriformes se localizan en los puntos de inflexión, tal como aconsejan OMANG *et al.* (1983), y las de tramos poco sinuosos en sectores de lecho uniforme, sin grandes pozas ni rápidos, reduciendo así posibles variaciones locales en las medidas de geometría del cauce.

DATOS DE GEOMETRÍA HIDRÁULICA

Las dimensiones del cauce han sido medidas respecto a dos niveles de referencia adoptados por el Water Resources Division (USGS) en regiones áridas y semiáridas: 1. el nivel de cauce activo, descrito por OSTERKAMP y HEDMAN (1977) como un "rasgo geomórfico modelado activamente, a corto plazo, por procesos normales de descarga de agua y sedimentos", y 2. el nivel de llanura de inundación activa, definida como una superficie sometida a desbordamientos periódicos (tabla 2). En numerosos trabajos referidos a ámbitos húmedos, el primer nivel se identifica como "bankfull" (WHARTON, 1992), "techo del cauce principal" (RIGGS, 1974) o "cauce entero" (RIGGS y HARENBURG, 1976), mientras que el segundo suele coincidir con el límite "overtopping".

Tabla 2. Valores de geometría hidráulica del cauce promediados para cada tramo

Tramo	W_b	A_b	D_b	W_{ot}	A_{ot}	D_{ot}	λ	W_{lla}	D_i
Calasparra-Macaneo	27	129,6	4,8	210	694	3,30	349	525	8,2
Horno-La Torre	29	136,3	4,7	240	720	3,00	390	586	9,5
Los Charcos-Cieza	33	161,7	4,9	260	770	2,96	433	600	10,3
Menjú-Abarán	32	152,4	5,2	196	774	4,07	389	395	12,8
Abarán-E. de Ojós	28	148,4	5,3	152	625	4,11	217	316	12,9
Ulea-Villanueva R.Seg.	30	150,0	5,0	290	710	2,45	429	500	12,5
Archena-Algaida	30	159,0	5,8	320	740	2,14	460	1700	12,6

W_b = anchura del cauce en el nivel de *bankfull* (m); A_b = Area de la sección transversal del cauce activo o *bankfull* (m²); D_b = profundidad media del cauce de *bankfull*, A_b/W_b (m); W_{ot} = Anchura del cauce en el nivel de *overtopping* (límite máximo del llano activo de inundación)(m); A_{ot} = área de la sección transversal del cauce *overtopping* (m²); D_{ot} = profundidad en situación de *overtopping* (m); λ = longitud de onda de los meandros (m); W_{lla} = anchura de la llanura aluvial (m); D_i = Profundidad de incisión respecto a la superficie aluvial (m).

Los datos geométricos de cada sección, referidos a dichos niveles, han sido obtenidos mediante medidas directas en el campo y perfiles topográficos extraídos de modelos digitales del terreno (MDT) con resolución de 1 a 2,5 m por pixel. Para la generación de estos MDT se han digitalizado, en entorno CAD, las curvas de nivel de planos con escala 1/500 y 1/5000, según los casos y niveles de referencia. Los ficheros resultantes son vectorizados con el programa ACDTOIDR de Riegelmann (INTERGRAFH) y, a continuación, rasterizados con el módulo LINERAS de IDRISI, sistema de información geográfica y de procesamiento de imágenes desarrollado por el *Graduate School of Geography, Clark University*, Ver.4.0 (1992). Por interpolación espacial de las cotas contenidas en la imagen output se consigue finalmente el modelo digital del terreno correspondiente a cada tramo. Los distintos niveles de referencia geomórficos pueden ser visualizados superponiendo a la representación tridimensional del DTM una imagen "drape", que diferencie dichos niveles, previa reclasificación de las alturas respecto al lecho actual (fig.2).

APLICACIONES Y RESULTADOS

En una sección transversal, el caudal varía de acuerdo con la anchura superficial del flujo, la profundidad y velocidad media de la corriente, y otras variables tales como el gradiente superficial del agua, el índice de fricción de Manning (n) y la tensión de corte del lecho. Estos cambios reflejan ajustes del prisma de agua dentro de la sección, pero, al mismo tiempo, implican adaptaciones morfológicas del cauce, asociadas a procesos de erosión y sedimentación, que afectan a su perímetro. Según LÉOPOLD y MADDOCK (1953), estos ajustes son descritos mediante relaciones de función potencial del tipo:

$$W = aQ^b; \quad D = cQ^f; \quad V = kQ^m$$

donde Q es el caudal, W la anchura, D la profundidad y V la velocidad. Como $WDV = Q$, se deduce que $b+f+m = 1$ y $a \cdot c \cdot k = 1$.

En la Vega Alta del Segura, las ecuaciones que definen la geometría hidráulica del cauce, de acuerdo con estas relaciones ($W = 2,83 \cdot Q^{0,49}$; $D = 1,07 \cdot Q^{0,32}$; $V = 0,33 \cdot Q^{0,19}$) describen básicamente las características propias de cursos de régimen semiárido y modelo meandriforme. Los parámetros b , f y m , aquí obtenidos, concuerdan con los exponentes de geometría hidráulica regional indicados por Leopold y Miller (1956) para corrientes efímeras aguas abajo de las estaciones de aforo ($b=0,5$; $f=0,28$ y $m=0,22$). Desde Calasparra hasta Murcia se suceden meandros con sección asimétrica y barras laterales (*point bars*), que aumentan la rugosidad, turbulencia y resistencia a la corriente, amortiguando el incremento de velocidad en dicha dirección, así como márgenes relativamente inestables por su naturaleza limoarcillosa y escasa compactación. Ello hace que el exponente b , que por lo general aumenta más rápidamente que f y m en dirección aguas abajo, sea muy superior a éstos ($b \gg f+m$), y que, por tanto, la anchura del cauce constituya aquí un importante elemento teórico de predicción en la estimación del caudal medio de inundación. Cabe tener en cuenta, no obstante, que las secciones transversales analizadas son producto de un comportamiento hidromorfológico más complejo

que el deducido a partir de esta aproximación teórica y que la desigual colonización vegetal ribereña, las rupturas de márgenes y los depósitos aluviales de pie de margen condicionan, de forma notoria, el perfil de las curvas de geometría hidráulica.

El método aquí expuesto es complementario de otros modelos hidrológicos basados en características físicas de las cuencas, pero puede resultar particularmente útil en medios semiáridos, como el que nos ocupa dentro de la Cuenca del Segura, en los que las estimaciones de caudales, a través de modelos de conversión lluvia-escorrentía, área de drenaje y condiciones medioambientales, no siempre ofrecen la calidad deseada. De hecho, las tradicionales aproximaciones indirectas basadas en el análisis de cuencas, desarrolladas en regiones templado-húmedas (WHARTON, 1995b), carecen de adecuación suficiente en su transferencia a medios más áridos, donde las variaciones pluviométricas y de escorrentía son más significativas, y las características de la corriente pueden diferir ampliamente de un tramo a otro, y entre tributarios, dentro de la misma cuenca vertiente.

La aplicación de las ecuaciones de geometría de cauces a la Vega Alta del Segura ha resultado útil en la estimación de caudales de inundación de dicho curso, además de contribuir a un mejor conocimiento de las adaptaciones inmediatas, y a corto plazo, dentro de este sistema, y ofrecer un modelo de dimensionamiento del cauce que puede ayudar en su planificación. Por ejemplo, asumiendo que la relación entre forma media del cauce y caudal, calculada para el conjunto de la Vega, representa la condición de equilibrio de dicho tramo, los valores residuales o desviaciones de los datos observados respecto a la recta de ajuste pueden indicar, además de la distribución de errores probables en la estimación teórica, si el cauce está infra o sobre-dimensionado en función del volumen de agua que circula por él y, por tanto, determinar su sensibilidad a cambiar en un futuro próximo.

Las ecuaciones que generalmente presentan mejor ajuste en esta Vega se basan en las relaciones entre caudal y anchura del cauce (o área de su sección transversal) (tabla 3). Se trata de relaciones de función potencial que adoptan la forma $Q_T = a \cdot W_b$ ó $Q_T = a \cdot A_b$. Las ecuaciones de tipo exponencial son rechazables por su irrelevante coeficiente de determinación ($r^2 \leq 0,05$), al igual que las potenciales que relacionan el caudal con la anchura de los llanos de inundación y con la longitud de onda de los meandros en tramos que incluyen secciones confinadas por estructuras montañosas ($r^2 < 0,15$). La profundidad del cauce es un indicador de predicción poco fidedigno, porque, aunque ésta puede ser medida y relacionada con el caudal, los perfiles del lecho fluvial varían mucho longitudinal y transversalmente. Sólo la profundidad máxima de incisión respecto a la superficie del llano aluvial presenta cierta correlación con los caudales de avenidas para tiempos de retorno de 5, 10 y 20 años ($r^2 = 0,74-0,75$), lo que confiere a éstos un importante papel en los procesos de encajamiento y construcción vertical del cauce.

Tabla 3. Coeficientes de determinación (r^2) de las ecuaciones de regresión que relacionan los caudales (Q_T) con las dimensiones del cauce (W_b , A_b , W_{ot} , A_{ot} , λ , D_i).

	W_b	A_b	W_{ot}^*	W_{ot}^{**}	A_{ot}^{**}	λ^*	λ^{**}	D_i
Q_{ma}	0,87 (P)	0,96 (P)	0,15 (E)	0,70 (P)	0,89 (P)	0,10 (E)	0,88 (P)	0,70 (P)

Q ₅	0,87 (P)	0,88 (P)	0,07 (E)	0,68 (P)	0,93 (P)	0,02 (E)	0,80 (P)	0,74 (P)
Q ₁₀	0,83 (P)	0,76 (P)	0,02 (E)	0,63 (P)	0,93 (P)	0,01 (P)	0,70 (P)	0,75 (P)
Q ₂₀	0,76 (P)	0,65 (P)	0,01 (P)	0,58 (P)	0,89 (P)	0,05 (E)	0,60 (P)	0,74 (P)
Q ₄₀	0,67 (P)	0,54 (P)	0,02 (P)	0,52 (P)	0,82 (P)	0,09 (P)	0,50 (P)	0,71 (P)
Q ₈₀	0,64 (P)	0,46 (P)	0,04 (P)	0,45 (P)	0,80 (P)	0,13 (P)	0,43 (P)	0,66 (P)

La relación entre el caudal y los parámetros geométricos W_{ot} , A_{ot} y λ se han realizado bajo dos supuestos: incluyendo entre los tramos analizados el sector aluvial encajado de Abarán-Ojós (*) y suprimiendo dicho tramo (**). Entre paréntesis figura el tipo de ecuación de mejor ajuste: (P) Potencial, (E) Exponencial.

Las variables de geometría hidráulica, cuya medida proporciona un mayor grado de fiabilidad en la predicción de caudales medios anuales de crecida (Q_{ma}) del Segura son el área y la anchura del cauce activo o *bankfull* (A_b y W_b respectivamente), el área de *overtopping* (A_{ot}) y la longitud de onda de los meandros (λ). El área y la anchura de la sección activa mantienen también una correlación alta con los caudales de inundación estimados para tiempos de retorno inferiores a 10 años ($< 290 \text{ m}^3/\text{s}$), pero no son indicadores adecuados para predecir sucesos mayores. El caudal medio dominante de las crecidas de este río (caudal *bankfull*) figura, por tanto, como principal responsable en la construcción de las secciones trapezoidales que conforman su cauce activo, siendo el área de éstas el parámetro geométrico más estrechamente relacionado con aquél ($Q_{ma} = 0,062 \cdot A_b^{1,524}$, con $r^2=0,96$) (tabla 4). Corresponden a este umbral flujos de régimen alto que ocupan toda o buena parte de la sección del cauce principal y constituyen sucesos de gran efectividad morfológica. Amenudo están relacionados con prolongadas crecidas que terminan desbordando las motas del cauce y, en ocasiones, sobrevienen como corrientes aisladas, repentinas que, aun siendo importantes, no llegan a coronar los márgenes (CONESA GARCÍA, 1995).

Tabla 4. Ecuaciones de geometría de cauces

<i>Vega Alta del Segura</i>	
$Q_{ma} = 0,296 \times W_b^{1,775}$	$Q_{ma} = 7,13 (W_b - 30,2) + 125,9$
$Q_{10} = 25,11 \times W_b^{0,717}$	$Q_5 = 7,20 \times W_b^{0,997}$
$Q_{ma} = 0,062 \times A_b^{1,524}$	$Q_5 = 3,53 \times A_b^{0,823}$
$Q_{ma} = 1,66 \times W_{ot}^{0,776}$	$Q_{ma} = 58,44 \times e^{0,003 \times W(ot)}$
$Q_{ma} = 5,49 \times e^{0,004 \times A(ot)}$	$Q_5 = 0,002 \times A_{ot}^{1,792}$
$Q_{10} = 0,05 \times A_{ot}^{1,313}$	$Q_{20} = 0,347 \times A_{ot}^{1,05}$
$Q_{ma} = 0,046 \times \lambda^{1,314(ot)}$	$Q_5 = 3,08 \times \lambda^{0,705}$
$Q_{10} = 147,4 \times D_i^{0,285}$	$Q_{20} = 207,4 \times D_i^{0,232}$
<i>Otros cursos de medios semiáridos</i>	
Cursos efímeros californianos (Hedman, 1970): * $Q_r = 258 \times W_d^{1,54} \times D_d^{0,6}$.	
Regiones semiáridas occidentales de USA (Osterkamp y Hedman, 1979): * $Q_{10} = 4,14 \times W_b^{1,63}$	
Cursos de régimen intermitente y efímero en el Sureste de Montana (Omang <i>et al.</i> , 1983): * $Q_2 = 10 \times W_b^{1,16}$	

*Valores de caudal expresados en pies cúbicos por segundo y dimensiones del cauce en pies.

Tomando como referencia geomórfica el nivel de llano activo de inundación, y prescindiendo de tramos de encajamiento estructural como el de Abarán-Ojós, el área de la sección (A_{ot}) muestra mejor correlación con caudales de sucesos mayores (r^2 se mantiene en 0,80 incluso para inundaciones extremas con tiempo de retorno de 80 años) (tabla 3). Sin embargo, la anchura de esta sección (W_{ot}) no puede considerarse buen predictor, por cuanto ha experimentado adaptaciones locales, combinadas con reajustes en los niveles de excavado, debido a sucesivos estrechamientos del lecho de inundación episódico desde la salida de Los Almadenes hasta el llamado Salto de la Novia (extremo oriental de la Sierra del Cajal) y a una serie de escalonamientos de pendiente variable: 3,8 por mil aguas arriba de Cieza, 2 por mil en el tramo Cieza-Abarán, 2,8 por mil de Abarán a Blanca, 3,4 por mil entre Blanca y Archena, y 1,7 hasta la confluencia con el río Mula (LÓPEZ BERMÚDEZ, 1973).

El caudal tiene también una implicación geomórfica importante sobre el propio modelo de cauce y, en particular, sobre determinados parámetros geométricos del trazado meandriforme, como son la longitud de onda de los meandros, la amplitud de éstos y el radio de curvatura. En este sentido, CARLSTON (1965) correlacionó la longitud de onda de los meandros con el caudal medio anual, el caudal medio en el mes de máxima descarga y el caudal en distintas condiciones de régimen, obteniendo la mejor correlación y ajuste con los sucesos "sub-bankfull". Comprobó, así, que este tipo de sucesos controla la geometría de los meandros, debido sobre todo a que frecuentemente provocan rupturas de margen que aceleran la erosión lateral. En el caso de la Vega Alta del Segura, la longitud de onda de los meandros (λ), en tramos de trazado libre, presenta un elevado grado de significación en relación con los valores de caudal

máximo medio anual o caudal dominante ($r^2 = 0,88$ para $Q_{ma} = 0,046 \cdot \lambda^{1,314}$) y muy bajo en relación con los caudales registrados en sucesos extremos ($r^2 \leq 0,5$). Con el caudal dominante se asocian frecuentes remodelaciones del margen que afectan a las curvas de meandro, sobre todo cuando la erosión lateral viene precedida de deslizamientos o desprendimientos que favorecen la ocurrencia de otros nuevos (CONESA GARCÍA, 1992). Pero, en ningún caso, dicho caudal guarda correlación con la geometría de los tramos encajados de baja sinuosidad, que dibujan codos y curvas de corto radio por imposición de las estructuras béticas.

CONCLUSIONES

Normalmente la respuesta morfológica de un río varía y se ajusta de acuerdo con la magnitud y frecuencia de los sucesos hidrológicos que en él se producen. Por ello, en condiciones naturales, las dimensiones de su cauce pueden ser más que suficientes para estimar los caudales dominantes que lo han originado. En tal sentido, y desde que LEOPOLD & MADDOCK (1953) propusieron las ecuaciones básicas que definen la geometría hidráulica de los cauces, han aparecido multitud de estudios empíricos que las han readaptado a distintos medios fluviales. En un medio mediterráneo semiárido como es la Vega Alta del Segura, atravesada por un curso de trazado meandriforme intermedio, con meandros de desbordamiento y de encajamiento, y dos niveles geomórficos bien definidos (*bankfull* y llano activo de inundación), el método de geometría de cauces, basado en la relación entre caudales de inundación y variables de geometría hidráulica, puede resultar especialmente útil. Como predictor hidrológico proporciona estimaciones de caudales máximos de crecida para distinto tiempo de retorno en secciones no aforadas, entre Calasparra y Archena, y permite, además, detectar variaciones espacio-temporales del régimen de caudales; y como elemento de planificación fluvial, aporta información sobre las secciones del río, donde la relación forma del cauce - caudal difiere del modelo teórico obtenido.

Sin embargo, debido a factores medioambientales externos que afectan a su trazado y desarrollo morfo-sedimentario, no todos los parámetros dimensionales del cauce en este tramo del Segura ofrecen la misma fiabilidad en la estimación de caudales de inundación. La anchura y el área de *bankfull* están muy bien correlacionados con los caudales dominantes (100-200 m³/s), cuyo tiempo de retorno varía entre 2 y 5 años, mientras que el área de *overtopping*, que engloba al llano de inundación episódico, muestra mejor ajuste con caudales extremos del orden de 200 a 400 m³/s y tiempos de retorno de 5 a 20 años. En este caso, resulta necesario excluir tramos de valle encajado, como el de Abarán o el de Ojós, en los que la anchura del llano activo de inundación viene impuesta por las estructuras béticas. Por último, la longitud de onda de los meandros aparece estrechamente relacionada con el caudal máximo medio anual (Q_{ma}) y con las corrientes de *bankfull*, que tanta importancia desempeñan en la construcción del cauce activo principal.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido desarrollado en el marco del Proyecto 4 de MEDALUS III (Mediterranean Desertification and Land Use): "Ephemeral Channels and Rivers". Num. PL950685. Comisión de las Comunidades Europeas.

REFERENCIAS

- CARLSTON, C.W. (1965): The relation of free meander geometry to stream discharges and its geomorphic implications, *American Journal of Science*, 263, 864-85.
- CLARK, P.B. & DAVIES, S.M.A. (1988): The application of regime theory to wadi channels in desert conditions, en White, W.R. (ed), *International Conference on River Regime*, Wiley, Chichester, 67-82.
- CONESA GARCIA, C. (1992): Trazados de baja y alta sinuosidad en ríos españoles, *Papeles de Geografía*, Univ. de Murcia, 18, 9-29.
- CONESA GARCIA, C. (1995): Torrential Flow Frequency and Morphological Adjustments of Ephemeral Channels in South-East Spain, en Hickin, E.J., (ed) *River Geomorphology*, Ch.9, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 170-192.
- GUMBEL, E.J. (1958): Statistical theory of floods and droughts, *Journal of the Institute of Water Engineers*, 12, 157-184.
- HARVEY, A.M., HITCHCOK, D.H. & HUGUES, D.J. (1982): Event frequency and morphological adjustment of fluvial systems in Upland Britain, en Rhodes, D.D. & Williams, G.P. (eds), *Adjustments of Fluvial Systems*, George Allen & Unwin, London, 139-168.
- HEDMAN, E.R. (1970): *Mean Annual Runoff as related to Channel Geometry of Selected Streams in California*, United States Geological Survey, Water Supply Paper 199-E, Washington DC.
- KNIGHTON, A.D. (1980): Longitudinal changes in size and sorting of stream bed material in four English rivers, *Bulletin of the Geological Society of America*, 91, 55-62.
- LEOPOLD, L.B. & MADDOCK, T.Jr. (1953): *The Hydraulic Geometry of Streams and some Physiographic Implications*, United States Geological Survey Professional Paper 252, Washington DC.
- LOPEZ BERMUDEZ, F. (1973): *La Vega Alta del Segura. Clima, Hidrología y Geomorfología*, Universidad de Murcia, Murcia, p.92.
- NERC (Natural Environment Research Council)(1975): *Flood Study Report*, Natural Environment Research Council, UK.
- OMANG, R.J., PARRETT, C. & HULL, J.A. (1983): *Mean Annual Runoff and Peak Flow Estimates based on Channel Geometry of Streams in South-eastern Montana*, United States Geological Survey, Water Resources Investigations, 82-4092, Washington DC.
- OSTERKAMP, W.R. (1978): Bed -and bank- material sampling procedures at channel-geometry sites, *National Conference on Quality Assurance of Environmental Measurements*, Denver, Colorado.
- OSTERKAMP, W.R. & HEDMAN, E.R. (1977): Variation of width and discharge for natural high-gradient stream channels, *Water Resources Research*, 13 (2), 256-258.
- OSTERKAMP, W.R. & HEDMAN, E.R. (1979): Discharge estimates in surface-mine areas using channel-geometry techniques, en *Proceedings of the Symposium on Surface Mining Hydrology, Sedimentology and Reclamation*, University of Kentucky, Lexington, Kentucky.
- OSTERKAMP, W.R. & HEDMAN, E.R. (1982): *Perennial-streamflow Characteristics related to Channel Geometry in Missouri River Basin*, United States Geological Survey, Professional Paper 1242, Washington.
- RICHARDS, K.S. (1980): A note on changes in channel geometry at tributary junctions, *Water Resources Research*, 16, 241-244.
- RIGGS, H.C. (1974): Flash flood potential from channel measurements, en *Flash Floods Symposium*, International Association Hydrological Sciences, Publication Núm. 112, 52-56.

- RIGGS, H.C. & HERENBERG, W.A. (1976): Flood Characteristics of Stream in Owyhee County, Idaho, United States Geological Survey, Water Resources Investigations, Open-File Report 76-88, Washington DC.
- TUNBRIDGE, I.P. (1984): Facies model for sandy ephemeral stream and clay complex; The Middle Devonian Ireton Formation of North Devon, U.K. *Sedimentology*, 31(5), 697-716.
- WHARTON, G. (1992): Flood estimation from channel size: guidelines for using the channel-geometry method, *Applied Geography*, 12, 339-359.
- WHARTON, G. (1995a): Information from channel geometry-discharge relations, en Gurnell, A.M. & Petts, G.E. (eds), *Changing River Channels*, Wiley, Chichester, 325-345.
- WHARTON, G. (1995b): The channel-geometry method: guidelines and applications, *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, 649-660.
- WOLMAN, M.G. & GERTON, R. (1978): Relative scales of time and effectiveness of climate in watershed geomorphology, *Earth Surface Processes*, 3, 189-208.

Pies de Figuras

Fig. 1. Localización de las estaciones de aforo y de los tramos de cauce seleccionados.

Fig. 2. (a) MDT del sector Menjú-Abarán. (b) MDT combinado con una imagen "drapé" de niveles de referencia geomórficos. (c) Indicación y representación de los perfiles transversales seleccionados a lo largo del tramo.



