

**XXIV CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
PUNTA DEL ESTE, URUGUAY, NOVIEMBRE 2010**

**CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA E HIDRÁULICA
EN REGIONES SEMIÁRIDAS**

Luis G. Castillo Elsitdié, M. Dolores Marín Martín
Universidad Politécnica de Cartagena. Grupo de I+D+i Hdr@m, España
luis.castillo@upct.es; mdolores.marin@upct.es

RESUMEN:

En regiones de morfología abrupta y régimen irregular de precipitaciones, las crecidas suelen presentarse llevando una gran cantidad de transporte de sedimentos. Si bien es usual que en las regiones semiáridas se presenten flujos hiperconcentrados, el cambio climático incrementará la torrencialidad del fenómeno y obligará a controlarlos para minimizar sus efectos destructivos.

Con el fin de poder diseñar sistemas efectivos de control y captación de flujos en zonas semiáridas, es preciso conocer las características hidrológicas e hidráulicas de los cauces efímeros, propios de este tipo de zonas.

De acuerdo a los resultados presentados para el caso del barranco de las Angustias (Isla de la Palma), y partiendo su similitud con las cuencas semiáridas de la Región de Murcia, en este artículo se presenta un análisis de los resultados obtenidos tras la aplicación de la metodología elaborada por Castillo et al. (2000a, 2000b y 2009) y Castillo (2004 y 2007), en la Rambla del Mergajón (Campo de Cartagena, Región de Murcia).

ABSTRACT:

In steep morphology and irregular rainfall regime areas, floods with high proportion of solid materials transport are normal. Although it is usual that hiperconcentrated flows are presented in semi-arid regions, climate change will increase flash floods phenomenon, and will made necessary to control them to minimize their destructive effects.

In order to design effective control and intake systems in semi-arid areas, it is necessary to know hydrological and hydraulic characteristics of ephemeral channels, typical of this areas.

According to the results presented of Las Angustias Gully (Isla de la Palma), and based on their similarity to the semi-arid watersheds of the Region of Murcia, the methodology developed by Castillo et al. (2000a, 2000b and 2009) and Castillo (2004 and 2007) was applied on Mergajón Gully (Campo de Cartagena, Region of Murcia). This paper presents the analysis of the results obtained.

PALABRAS CLAVES:

Regiones semiáridas, coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos.

INTRODUCCIÓN

Las zonas semiáridas se caracterizan por contar con una pluviometría irregular, lo que les confiere, entre otras características, una cobertura vegetal reducida o casi ausente.

El cambio climático está provocando un efecto directo sobre la frecuencia e intensidad de la precipitación, de manera que actualmente en estas zonas se producen lluvias más intensas y menos frecuentes.

Si conjugamos estos dos elementos, lluvias torrenciales y zonas potencialmente erosionables, se explica la existencia de flujos hiperconcentrados (Wan y Wang, 1994), cada vez más acusados en este tipo de regiones.

El estudio de sistemas de captaciones específicos para regiones semiáridas se justifica principalmente por tres motivos: los flujos hiperconcentrados no pueden captarse con los sistemas habituales presa-embalse (la elevada concentración de sedimentos los inutilizaría en poco tiempo), para captar un recurso tan necesario y escaso en estas regiones como el agua y, por último, con este tipo de estructuras se consigue minimizar los efectos destructivos que tienen los flujos torrenciales. Para llegar al análisis de los parámetros de diseño de los posibles sistemas de captación, previamente se han de conocer las características hidrológicas e hidráulicas de los cauces donde se situarán dichas obras. Dentro de la caracterización de los cauces efímeros, la cuantificación de la capacidad de transporte de sedimentos es imprescindible.

Si bien las investigaciones en la evaluación del transporte de sedimentos se vienen realizando durante décadas, sin embargo, todavía no se ha logrado obtener una ecuación realmente satisfactoria que interrelacione adecuadamente las propiedades del fluido y del sedimento.

Teniendo en cuenta estos hechos, se han examinado otras experiencias en el cálculo de transporte de sedimentos en el caso de flujos hiperconcentrados. Encontramos en España algunas de ellas, como la existente en el barranco de las Angustias sito en la Isla de la Palma (Canarias).

Ateniendo a la problemática citada y basándonos en los principales resultados que de estos estudios se ha publicado, se presentan en este artículo los principales resultados del cálculo hidrológico e hidráulico en la Rambla del Mergajón (Campo de Cartagena, Región de Murcia).

Como se verá, ambas zonas de estudio (Canarias y Murcia) se caracterizan por tener un régimen irregular de precipitaciones, concentradas en muy pocos días al año, y una alta tasa de erosión. Estas características se traducen en la concentración de los recursos en un número escaso de avenidas con elevados caudales y velocidades, y una gran proporción de transporte de materiales sólidos.

DESCRIPCIÓN DE LA CUENCA MEDITERRÁNEA ESTUDIADA

La Rambla del Albuñón, situada en la Región de Murcia (España), forma parte de la Cuenca Hidrográfica del río Segura, y constituye la principal red de drenaje de la comarca del Campo de Cartagena. Nace en las sierras circundantes, Sierra de Carrascoy, Sierra del Algarrobo, Sierra de las Victorias y Sierra de Los Gómez y desemboca en el Mar Menor. La superficie vertiente de la cuenca es de algo más de 694 km².

Está compuesta por una serie de subcuencas entre las cuales destacan, por la margen izquierda las Ramblas de la Cueva del Marqués, de la Señora y de la Murta, y por la margen derecha, las Ramblas del Mergajón y de la Azohía (Figura 1).

De forma general, se puede decir que geomorfológicamente la cuenca del Albuñón se caracteriza por la presencia de moderadas elevaciones (Figura 2). Las pendientes del terreno oscilan entre el 0.4 % próximo a la desembocadura y el 5.8% en las zonas de cabecera. Así, siguiendo la morfología propia del Campo de Cartagena, predominan las grandes llanuras de cultivos agrícolas eminentemente de regadío en la zona baja de la misma (frutales y herbáceos en la parte media-alta). También existen zonas dispersas de arbolado en las sierras, destacando las formaciones de coníferas, matorral y monte bajo.

En la litología de la cuenca del Albuñón encontramos en la zona media-baja un predominio casi exclusivo de glaciares de limos negros y rojos y cantos encostrados, y de arcillas rojas en menor

proporción, y en la parte alta, predominantemente formaciones superficiales cálcicas no consolidadas, encontrando en los puntos más altos de los cerros mayor variedad de suelos (rocas carbonatas y areniscas, filitas y margas en el noroeste y cuarcitas al sur). Estas formaciones confieren al suelo un carácter poco permeable y drenaje imperfecto.

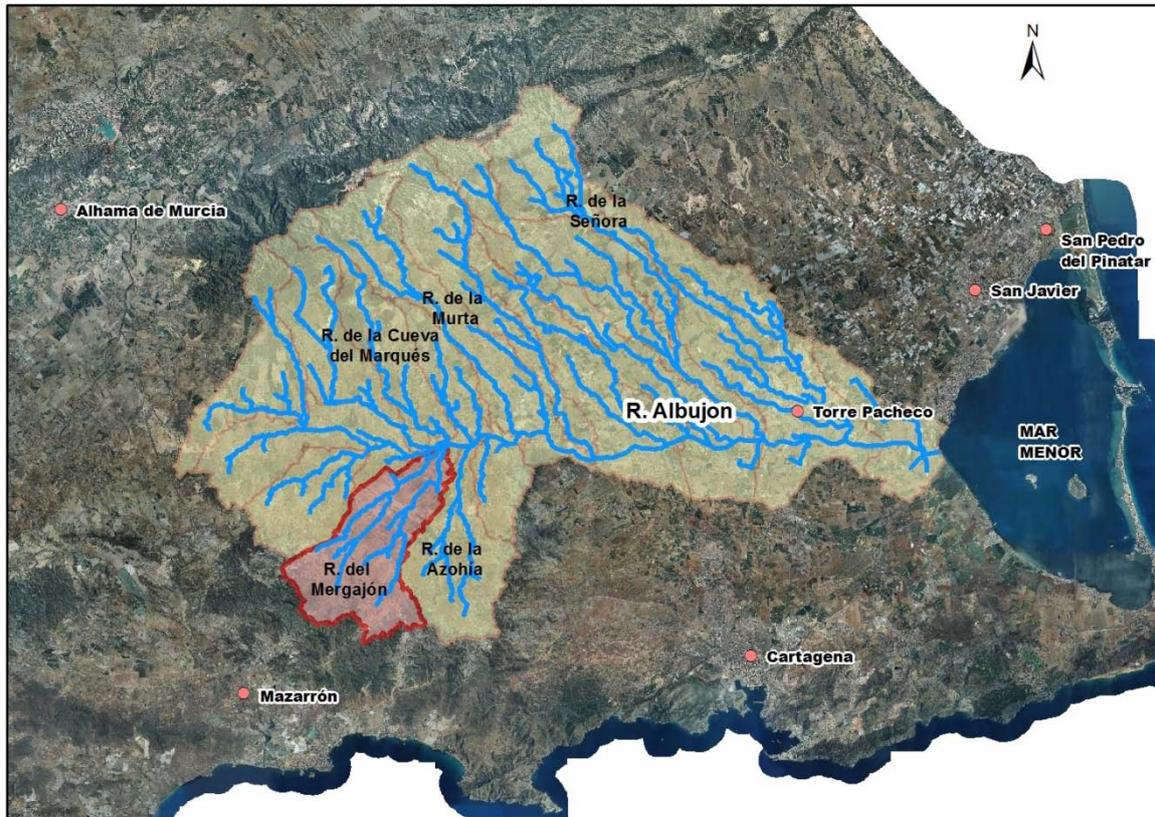


Figura 1.- Situación de la Rambla del Albuñón y de la Rambla del Mergajón.

El carácter torrencial de las precipitaciones, escasas pero muy intensas, hacen que estas ramblas, generalmente inactivas, puedan transportar grandes cantidades de agua y sedimento en los eventos lluviosos.

De entre las subcuencas que componen la Rambla del Albuñón, la Rambla del Mergajón ha sido seleccionada para la aplicación de la metodología elaborada en el Barranco de las Angustias, dado la semejanza que ambas presentan, tanto en sus características geomorfológicas (área y pendiente), como las hidrológicas e hidráulicas, tal y como se verá más adelante.

CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA DE LA CUENCA

Las regiones áridas o semiáridas se caracterizan por presentar mayores valores de extremos relativos en los componentes del ciclo hidrológico, que en los climas húmedos. Por una parte, se caracterizan por poseer una alta evaporación potencial y una baja precipitación anual, pero con tormentas de alta intensidad que presentan considerable variabilidad espacial, y por otra, cuentan en términos generales con baja escorrentía anual pero presentando a corto plazo un alto volumen de escorrentía, así como infiltraciones importantes en los cauces efímeros. Además, estas regiones son especialmente propensas a la erosión. Es por ello que los modelos hidrológicos han de ser elegidos adecuadamente, de manera que puedan explicar de forma satisfactoria estos factores.

Según Salas (2000), en general, para cuencas áridas o semiáridas los modelos distribuidos, ya sean continuos o de eventos, son más flexibles y más útiles. En base a ello, para una primera aproximación en la caracterización hidrológica de la cuenca, y el cálculo de los caudales correspondientes a los distintos periodos de retorno, se ha empleado el programa HEC-HMS v 3.3 (2008), desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers de los Estados Unidos (USACE), ya que

además de ser un programa ampliamente conocido y empleado, permite la modelización agregada y semidistribuida, la simulación continua y de eventos, y además presenta diferentes posibilidades de modelar los diversos componentes que intervienen en el proceso de transferencia lluvia-escorrentía. Para el cálculo de pérdidas por infiltración, se ha empleado el modelo empírico del Soil Conservation Service (SCS) por ser el más extendido, experimentado, y contar con estudios propios en España. Respecto al modelo de transformación lluvia-escorrentía se ha optado por utilizar el del hidrograma unitario del SCS, dada la escasa información existente sobre eventos reales en la cuenca. Por último, el método empleado para el tránsito de los caudales ha sido el de Muskingum-Cunge, puesto que además de su fácil implementación, considera la dependencia de los parámetros respecto del caudal circulante.

De esta forma, se ha realizado el estudio hidrológico de la cuenca completa de la Rambla del Albuñón, extractando los resultados referentes a la Rambla del Mergajón, que son los que se mostrarán, para posteriormente proceder a la caracterización hidráulica de la misma.

INFORMACIÓN DE ENTRADA EL MODELO

Delimitación de la cuenca

La delimitación de la cuenca del Albuñón y agregación de las subcuencas que la componen, se ha realizado con ayuda de la extensión Hec-GeoHMS v. 1.1 (2003), y la extensión Spatial Analyst, para el programa ArcGIS (2006) del Environmental Systems Research Institute. Inc. ESRI.

Para ello se ha partido del Modelo Digital del Terreno (MDT) de 4x4 m elaborado en el año 2009 como parte del proyecto Natmur-08, encargado por la Consejería de Desarrollo Sostenible y Ordenación del Territorio de la Región de Murcia. En la Figura 2 se representa el MDT de la cuenca del Albuñón y la subcuenca del Mergajón. La altura máxima del Albuñón es de 1064 m.s.n.m. y la mínima de 0 m.s.n.m. Se puede observar claramente la topografía de la cuenca, las llanuras en la parte media-baja, y la existencia de las mayores elevaciones en la parte noroeste y suroeste donde se sitúan las Sierras de Carrascoy y Sierra del Algarrobo respectivamente. Se han obtenido un total de 17 subcuencas (áreas entre 16 y 86 km²) y cauces correspondientes, de los que se han obtenido las principales características físicas: área, pendiente media de la cuenca, longitud y pendiente media del cauce, etc.

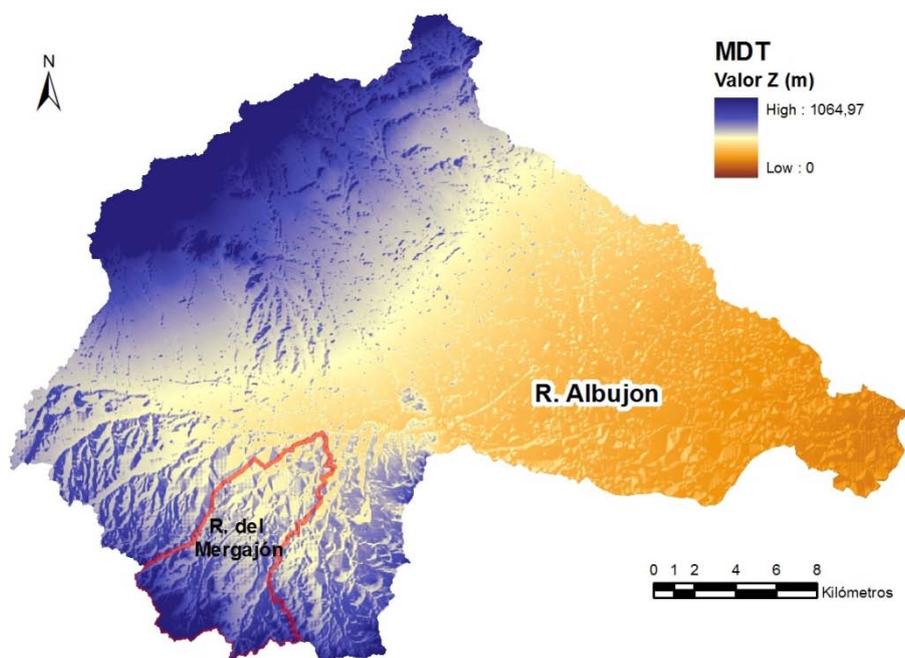


Figura 2.- Modelo Digital del Terreno de la Rambla del Albuñón y de la Rambla del Mergajón.

Pérdidas por infiltración

Para la aplicación del método del Soil Conservation Service en el cálculo de pérdidas, se ha obtenido el mapa de los números de curva de la cuenca, empleando la metodología expuesta en Ferrer et al. (1995). Según la misma, se obtienen los valores del número de curva derivados de la versión española del método del SCS, es decir, se calcula el número de curva NC , a partir del valor del parámetro P_0 , umbral de escorrentía que Témez (1987) definió como $P_0 = 0.2 \cdot S$, siendo S la máxima infiltración acumulada potencial que puede producirse y, estableciendo la relación entre el NC y P_0 como $NC = 5080 / (50.8 + P_0)$.

Las variables que definen P_0 son: pendiente, tipos de suelo, usos del suelo y condiciones previas de humedad. Los datos de los que se ha partido para la obtención de estos parámetros son:

- Mapa de pendientes calculado a partir del MDT y reclasificado a pendientes inferiores o superiores al 3% (rangos tabulados).
- Mapa de tipos de suelo basados en la litología de la cuenca, para lo que se han empleado la información de los planos geológicos a escala 1:50000 en formato shape del Instituto Geológico y Minero.
- Mapa de usos de suelo a partir de las capas del proyecto Corine Land Cover 2000.
- Por defecto se asumen unas condiciones de humedad antecedente medias, que es la situación que está tabulada en la metodología aplicada.

El resultado obtenido es un mapa de números de curva, y que, para el caso de condiciones medias y superpuesto al mapa de la definición de la cuenca, se representa en la Figura 3.

En general, la cuenca presenta unos valores que varían entre los 60 y 80, si bien puede observarse en esta figura la existencia de zonas impermeables dispersas, que en su mayoría se corresponden a núcleos urbanos o industriales, y a formaciones arcillosas o pizarrosas situadas al norte de la cuenca. Para el caso del Mergajón, el valor medio ponderado del Número de Curva es de 78.

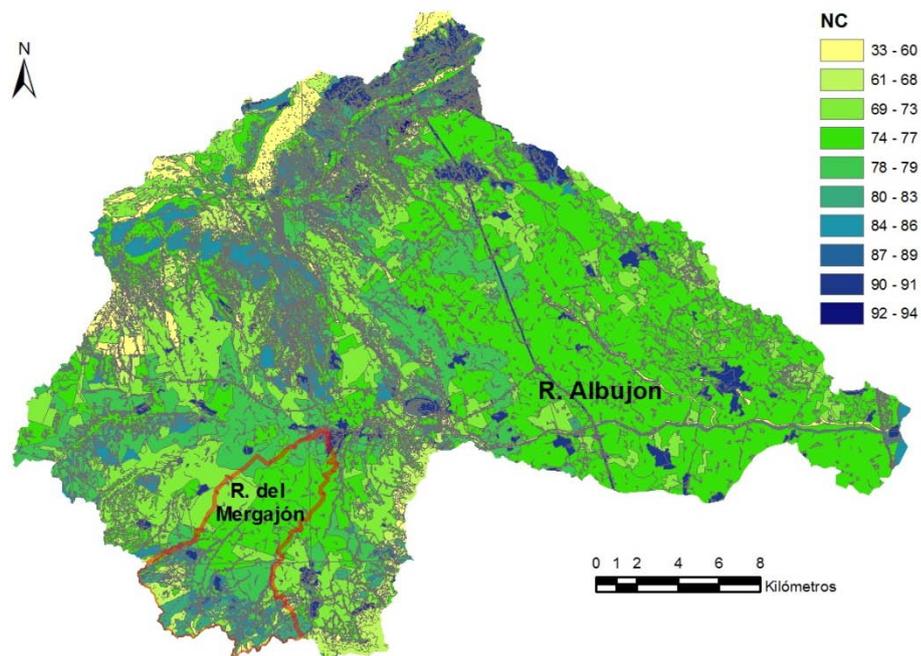


Figura 3.- Mapa de Números de Curva NC en condiciones de humedad media.

Distribución espacial y temporal de precipitaciones

En zonas semiáridas, donde se sitúan los cauces efímeros, en ocasiones no es posible hacer una predicción y estimación de lluvia, debido a la pobre instrumentación existente y escasa información hidrometeorológica (pocos pluviógrafos y aforos, y los que hay tienen series históricas muy cortas), lo que dificulta el uso de las metodologías basadas en imágenes satelitales y radar.

En este caso, se aplican diversas metodologías que emplean datos históricos de pluviómetros con registros diarios y patrones de precipitaciones o tormentas de diseño, que permiten simular la variabilidad espacio-temporal de la precipitación.

Para calcular la precipitación máxima diaria en cada punto para un periodo de retorno determinado, se ha realizado un estudio pluviométrico que incluye: análisis estadístico de las precipitaciones máximas diarias y en 24 horas, la definición del tiempo de tormenta y su distribución (tormenta de diseño).

Para el análisis estadístico de las precipitaciones se ha partido de los datos registrados en 17 estaciones pluviométricas, situadas en el interior o en las proximidades de la cuenca del Albuñón (Tabla 1). El periodo de tiempo analizado ha sido de 1933 a 2009.

Tabla 1.- Estaciones pluviométricas seleccionadas

Indicador	Nombre	Años observados	Indicador	Nombre	Años observados
7005	Mazarrón	7	7026	Cartagena (Pozo Estrecho)	67
7011	Cartagena H.E.	34	7028	Los Alcázares Aeródromo	11
7013	Cartagena Puerto	49	7227	Alhama (Comarza)	21
7014	Cartagena Esc. Bastarreche	17	7229	Murcia El Sequen	7
7016	Cartagena (El Algar)	27	7023 A	Fuente Álamo S.E. Agraria	32
7020	Murcia (Corvera)	55	7024 J	Fuente Álamo (Balsapintada)	12
7023	Fuente Álamo C.H.	75	7026 U	Torre-Pacheco C.C.A.	33
7024	Valladolises	19	7028 I	Torre-Pacheco (Torreblanca)	34
7025	Murcia (Los Martínez del Puerto)	54	7229A	Murcia (El Valle)	22

En el estudio de los datos se ha tenido en cuenta la distribución temporal y espacial, comparando y analizando los datos de las diferentes estaciones meteorológicas. Así, con la aplicación del método de las dobles masas, se comprueba la consistencia de las series y se verifica que las condiciones de medida de los datos no han variado a lo largo del tiempo.

Para su evaluación se han definido 3 grupos afines de estaciones, teniendo en cuenta los siguientes criterios: (1) los grupos o patrones deben de tener de 3 a 10 estaciones, (2) cada grupo debe de tener al menos una estación con una serie de años suficientemente extensa, por lo menos 10 años, (3) la media de las estaciones debe ser similar en cada grupo, (4) la altura de las estaciones del grupo no deben diferir en más de 300 m.s.nm. y (5) las estaciones deben estar relativamente próximas, no más alejados de 50 km.

Los grupos resultantes han sido:

- Grupo 1, que contenía las estaciones de Alhama (Comarza), Murcia (El Valle), Murcia El Sequen, Murcia (Corvera) y Murcia (Los Martínez del Puerto),
- Grupo 2 que contenía las estaciones de Valladolides, Fuente Álamo (Balsapintada), Fuente Álamo S.E. Agraria, Fuente Álamo C.H. y Mazarrón,
- Grupo 3, con las estaciones de Cartagena H.E., Cartagena Esc. Bastarreche, Cartagena (El Algar) y Cartagena Puerto, Torre Pacheco (Torreblanca), Torre Pacheco C.C.A., Cartagena (Pozo Estrecho) y Los Alcázares Aeródromo.

Con el análisis se detectaron algunas inconsistencias, habiendo sido necesario corregir algunos valores de las estaciones de Valladolides y Cartagena (Esc. Bastarreche).

A los datos obtenidos se les ha aplicado el coeficiente corrector que según el número de observaciones en 24 h recomienda la Organización Meteorológica Mundial, y que en este caso corresponde a un valor de 1.13.

A partir de estos datos se ha procedido a estimar la lluvia correspondiente a los diferentes periodos de retorno, en cada una de estas estaciones, ajustando la ley de distribución de frecuencias a las funciones estadísticas más habituales (TCEV, GEV, LP3, GUMBEL y SQRT – ETmax), adoptando los valores más desfavorables. Seguidamente y con la aplicando los polígonos de Thiessen, se obtuvieron los valores de las precipitaciones medias para cada subcuenca, a los que posteriormente se les aplicaron otras dos correcciones: la propuesta por Témez (1991) para considerar el efecto de

no simultaneidad de la precipitación en toda la superficie, y la propuesta por la Organización Meteorológica Mundial en función del área de la cuenca y de la duración de tormenta de proyecto.

Tabla 2.- Coeficientes correctores de la Rambla del Mergajón.

	Duración de la tormenta [h]	Área [km ²]	Coeficiente corrector		
			Por número de observaciones	Por simultaneidad	Por área-duración
Rambla del Mergajón	24	52	1.13	0.88	0.99

Los valores resultantes de precipitación para el caso de estudio de la rambla del Mergajón se exponen en la Tabla 3. También se incluyen los valores de precipitación del barranco de las Angustias y como se puede apreciar, los valores son similares en ambos casos para periodos de retorno bajos, acusando mayores diferencias para los periodos altos.

Tabla 3.- Precipitación máxima diaria correspondientes a cada periodo de retorno de la Rambla del Mergajón y del Barranco de las Angustias

	Precipitación máx. diaria (TR años) [mm]						
	Área [km ²]	P _{1,4}	P ₅	P ₁₀	P ₅₀	P ₅₀₀	P ₁₀₀₀
Rambla del Mergajón	52	91.97	118.26	176.13	200.59	257.12	281.42
Barranco de las Angustias	56	101	166	195	257	344	370

Para tener en cuenta la distribución temporal de la lluvia se ha considerado un patrón de lluvias acorde con la forma en que se presentan estos eventos en la zona de estudio (Figura 4). Partiendo de un tiempo de tormenta de 24 h y una discretización temporal de 15 minutos, mediante el método de bloques alternos, se ha elaborado un patrón en el que el 80 % de la lluvia se concentra en las 8 horas centrales, repartiéndose el 20% restante de manera simétrica en las 2 colas de 9 horas cada una.

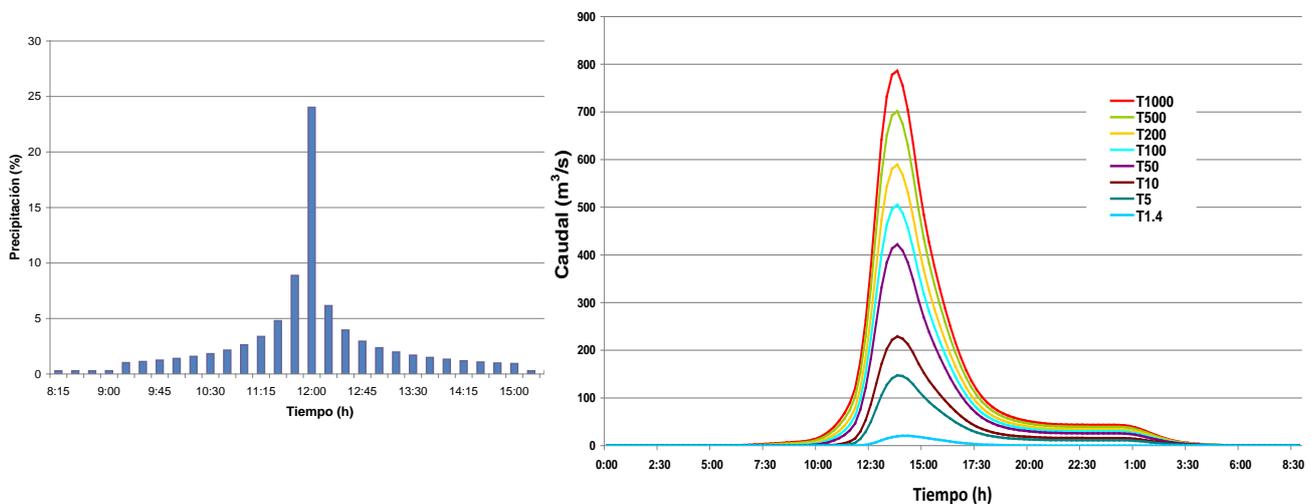


Figura 4.- Patrón de precipitación e hidrogramas calculados en la Rambla del Mergajón.

Otros parámetros hidrológicos

El modelo transformación lluvia-escorrentía del SCS requiere el cálculo del tiempo de retardo, T_{lag} . El método del SCS propone aproximar su valor al 60% del tiempo de concentración $T_{lag} \approx 0.6T_c$, determinándose T_c con la fórmula de Kirpich $T_c = 0.06628(L^{0.77} / i^{0.385})$, en donde L es la longitud del cauce principal en km e i la pendiente en tanto por uno.

En España se emplean expresiones semejantes, con ciertas adaptaciones obtenidas por Témez (1987). El autor, partiendo de la teoría del SCS y tras diversos estudios en cuencas del país, propuso

la aproximación de $T_{lag} \approx 0.35T_c$, siendo $T_c = 0.3(L/i^{0.25})^{0.76}$. Esta aproximación ha sido empleada en la rambla del Mergajón, obteniéndose valores de $T_c = 289.86$ minutos y $T_{lag} = 101.45$ minutos. De manera análoga, para el modelo de propagación de caudales de Muskingum-Cunge, se incluyeron varias secciones transversales obtenidas del MDT y se adoptaron coeficientes de rugosidad medias según las características de las diferentes secciones.

RESULTADOS OBTENIDOS DE CAUDALES LÍQUIDOS

Finalmente, se han obtenido los hidrogramas de avenida correspondientes a cada uno de los periodos de retorno (ver Figura 4) y cuyos caudales punta se presentan en la Tabla 4. Junto a ellos se reflejan también los del Barranco de las Angustias.

Se puede observar que para periodos de retorno bajos, los caudales líquidos que presenta el Barranco de las Angustias son muy superiores a los de la Rambla del Mergajón, tendiendo a igualarse los valores que presentan ambas cuencas, para periodos de retorno altos. Este hecho contrasta con la tendencia que presentan los datos pluviométricos mostrados en la Tabla 3. Esta circunstancia se justifica debido a que en el Barranco de las Angustias las condiciones de humedad inicial del suelo son mucho más elevadas que en la Rambla del Albujón.

Tabla 4.- Caudales líquidos para cada periodo de retorno.
Rambla del Mergajón y Barranco de las Angustias

	Caudales líquidos de avenida (TR años) [m ³ /s]					
	Q _{1,4}	Q ₅	Q ₁₀	Q ₅₀	Q ₅₀₀	Q ₁₀₀₀
Rambla del Mergajón	21.4	147.5	229	422	701.4	786.2
Barranco de las Angustias	121	277	350	519	762	836

ESTUDIO HIDRÁULICO

Una vez caracterizada hidrológicamente la cuenca, se procede a evaluar su comportamiento hidráulico. La metodología que ha sido aplicada tiene en cuenta los principales aspectos que permiten estimar la capacidad de transporte de sedimentos en los cauces de zonas semiáridas, así como también, la determinación de los coeficientes de resistencia para flujos rugosos y macrorrugosos.

ESTUDIO DEL TRANSPORTE DE SEDIMENTOS

Desde el punto de vista de la fuente de sedimentos, el transporte puede dividirse en la carga de lavado “wash load”, que comprende el material muy fino y se transporta en suspensión, y la carga de material de fondo “bed load”, que se transporta por el fondo y en suspensión, dependiendo del tamaño del sedimento y de la velocidad de flujo.

Para el cálculo del transporte de sedimentos, la información básica necesaria es de dos tipos, una de tipo hidráulico a través de las características de flujo, y otra de tipo granulométrico del material del lecho del cauce.

Se recogen las curvas granulométricas de la Rambla del Mergajón y del Barranco de las Angustias en la Figura 5. Como se puede apreciar existe una gran diferencia en la distribución de los diámetros característicos en dichas curvas. Para calcular las principales características del flujo en la sección de control establecida, partimos de los principales valores geométricos de la rambla del Mergajón en dicha sección: ancho inferior (9.20 m), pendiente de cajeros izquierdo y derecha [1:3.6 (V:H)] y pendiente media longitudinal ≈ 0.033 .

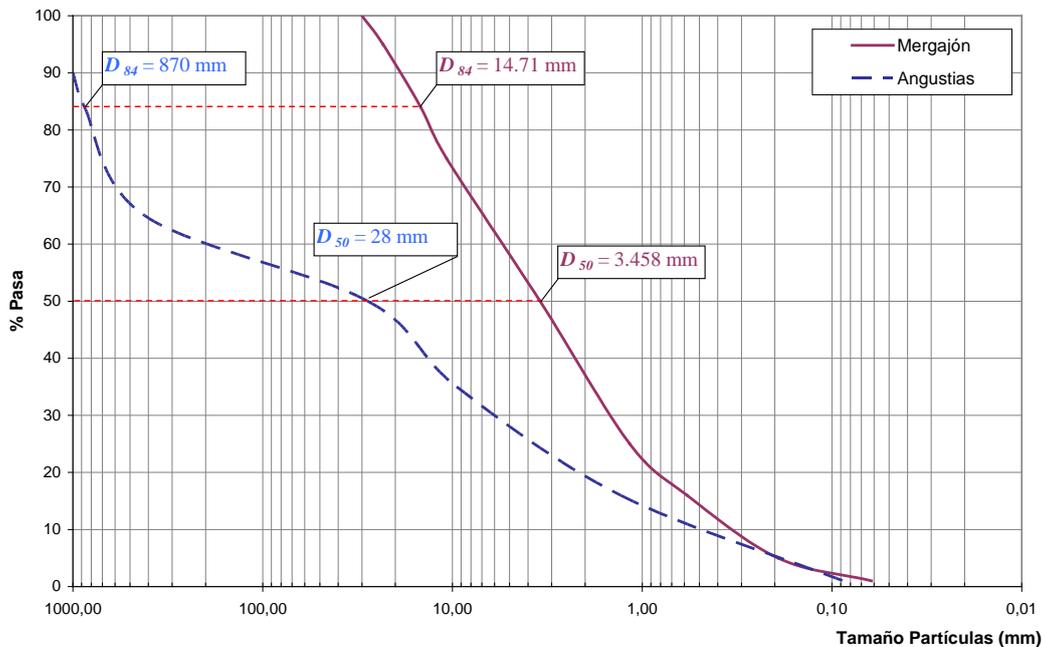


Figura 5.- Curvas granulométricas de la Rambla del Mergajón y el Barranco de las Angustias.

Coefficiente de Manning

El cálculo de las características de flujo para un caudal determinado depende fundamentalmente, a parte de la sección transversal y la pendiente longitudinal, del coeficiente de resistencia.

En primera instancia, para conocer el comportamiento del flujo, se comprobaron una serie de aspectos:

(1) Macrorrugosidad: Este hecho se presenta generalmente cuando además de existir una gran cantidad de transporte de sedimentos, los tamaños característicos transportados son grandes. Se produce cuando la relación $y/D_{84} < 50$ donde y es el calado de flujo. En la Rambla del Mergajón, este fenómeno se presenta en los caudales bajos y, concretamente, para el caudal ordinario $Q_{1.4} = 21 \text{ m}^3/\text{s}$, el calado correspondiente es $y = 0.50 \text{ m}$, con lo que el valor de $y/D_{84} = 34.06 < 50$.

(2) Resistencia por formas de fondo. Sería necesario considerarlas si la relación $R_h/D_{50} > 2000$, donde R_h es el radio hidráulico. En el caso más desfavorable, $Q_{1000} = 786 \text{ m}^3/\text{s}$, $R_h/D_{50} = 2.63/0.00346 = 760.11$, por lo que no se desarrolla esta resistencia.

(3) Acorazamiento. Si la desviación típica granulométrica es extendida o bien graduada $\sigma_g = (D_{84}/D_{16})^{0.5} > 3$. En el caso de la cuenca del Mergajón, $\sigma_g = (0.58/14.71)^{0.5} = 5.04 > 3$, entonces sí se produce el fenómeno de acorazamiento.

(4) Tipo de flujo, hiperconcentrado o mud flow. En situaciones normales, en los flujos cargados de sedimentos, estos son transportados por la corriente teniendo poca influencia en el comportamiento de la misma. En otras situaciones, la presencia de grandes cantidades de partículas de sedimentos influye notablemente en la mezcla, cambiando las propiedades del fluido y el comportamiento del flujo. A los flujos de estas características se los denomina flujos hiperconcentrados. Según Wan y Wang (1994) el límite entre flujo hiperconcentrado y mud flow se produce cuando la concentración de sedimentos es superior al diez por ciento en peso, o en otros términos, cuando $E_d > 0.01 \text{ (g/cm}^3\text{)}$, siendo E_d el valor de la energía proporcionada por la fase sólida, obtenida mediante la expresión $E_d = \gamma_s C_v S$, donde S es la pendiente correspondiente al tramo de estudio, y C_v la concentración volumétrica de la fase sólida. Para conocer C_v , se ha calculado la concentración de sedimentos en peso, C_s , de la Rambla del Mergajón (Tabla 5). Se observa que varía entre un 1,81% para $Q_{1.4} = 21 \text{ m}^3/\text{s}$, llegando a alcanzar un 1,417% para el caudal milenario ($Q_{1000} = 786 \text{ m}^3/\text{s}$). Tomando el valor más alto de C_s , se obtiene para el caso del Mergajón

$E_d = 2.65 \cdot 0.0068 \cdot 0.033 = 0.00060 < 0.01$, entonces no será necesario contemplar un incremento de la resistencia por la variación de la densidad y viscosidad del fluido.

Tabla 5.- Valor de la concentración en peso para cada periodo de retorno de la Rambla del Mergajón.

Periodo de retorno	Caudal líquido	Caudal sólido en peso Qs			Concentración en peso C _s
		[T/s]			
[años]	(m ³ /s)	Fondo	Suspensión	Total	[%]
1,4	21,4	0,118	0,269	0,388	1,811
5	277	0,640	3,513	4,153	1,499
10	350	0,632	4,601	5,234	1,495
50	519	0,739	6,935	7,674	1,479
500	762	1,076	9,573	10,649	1,398
1000	786	0,989	10,152	11,141	1,417

Con ello, siguiendo la metodología expuesta para el Barranco de las Angustias, se han calculado los coeficientes de resistencia aplicando algunas de las formulaciones recogidas en Castillo et al. (2009) –como son las de Limerinos (1970), Bathurst (1985), Fuentes y Aguirre (1991), Van Rijn (1987), García Flores (1996), y Jarret (1984)-, y otras como las de Strickler (1973), Grant (1997) y Bathurst (2002), cuyas principales características se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6.- Formulaciones del coeficiente de resistencia.

AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
Limerinos (1970)	$C^* = 5.657 \log \left[\frac{R}{D_{84}} \right] + 3.281; \quad 0.90 \leq R/D_{84} \leq 68.55$ $C^* = 5.657 \log \left[\frac{R}{D_{50}} \right] + 0.990; \quad 1.90 \leq R/D_{50} \leq 177$	$n = \frac{0.1129R^{1/6}}{2 \log(R/D_{84}) + 1.160}$ R= Radio hidráulico total
Bathurst (1985)	$C^* = 5.62 \log \left[\frac{d}{D_{84}} \right] + 4; \quad 0.3 \leq R/D_{84} \leq 50$	$0.4\% \leq S_0 \leq 4\%$ d= calado del flujo
Fuentes y Aguirre (1991)	$C^* = 5.657 \log \left[\frac{d}{D_{50}} \right] + 1.333 + 0.737 \left[1 / \left(\frac{d}{D_{50}} \right) \right]$ $0.3 \leq d/D_{50} \leq 77$	$0.001\% \leq S_0 \leq 6.55\%$
García Flores (1996)	Régimen Supercrítico: $C^* = 5.756 \log \left[\frac{d}{D_{84}} \right] + 3.698; \quad 0.30 \leq d/D_{84} \leq 100$ $C^* = 5.756 \log \left[\frac{R_b}{D_{50}} \right] + 1.559; \quad 0.6 \leq R_b/D_{50} \leq 200$ Régimen Subcrítico: $C^* = 5.756 \log \left[\frac{d}{D_{84}} \right] + 2.2794; \quad 0.30 \leq d/D_{84} \leq 100$ $C^* = 5.756 \log \left[\frac{R_b}{D_{50}} \right] + 0.2425; \quad 0.6 \leq R_b/D_{50} \leq 200$	$n = \frac{0.111d^{1/6}}{2 \log(d/D_{84}) + 1.2849}$ $n = \frac{0.111d^{1/6}}{2 \log(d/D_{84}) + 0.7919}$ R _b = Radio hidráulico del fondo
Van Rijn (1987)	$C^* = 5.75 \log(12R_f / 3D_{90})$	R _f = radio hidráulico de fondo
Jarret (1984)	$n = 0.39 S^{0.38} / (3.28R)^{0.16}; \quad 0.2\% < S < 0.4\%; \quad 0.15m < R < 2.1m$	S= pendiente de fricción; R= radio hidráulico
Strickler (1923)	$n = D_{50}^{1/6} / 21.1$	D ₅₀ Diámetro característico en m
Grant (1997)	$C^* = 2.18 \left[\ln \left(1.65 \frac{\tau_{cr}^*}{S} + 1.65 \right) \right]; \quad \tau_{cr}^* = d \cdot S / (\gamma_s / \gamma_a - 1) \cdot D$	D= D ₈₅ S= pendiente tramo d= calado del flujo
Bathurst (2002)	$C^* = 3.84 \left(\frac{d}{D_{84}} \right)^{0.547}; \quad S < 0.8\%$ $C^* = 3.10 \left(\frac{d}{D_{84}} \right)^{0.93}; \quad S > 0.8\%$	S= pendiente tramo d= calado del flujo $0.2\% \leq S \leq 4\%$ $d/D_{84} < 11$

Los resultados obtenidos al aplicar las formulaciones a la Rambla del Mergajón se presentan en la Figura 6. Se observa cierta tendencia en los valores a disminuir a medida que aumenta el caudal, si bien esta propensión es mucho menos pronunciada que la que presentaba el Barranco de las Angustias (n_{medio} representado por una línea azul), ya que en el caso del Mergajón nos encontramos ante un flujo no hiperconcentrado. Los valores medios de n decrecen de forma exponencial variando desde $n=0.034$ (para $Q_{1.4}=21\text{ m}^3/\text{s}$) a $n=0.029$ (para $Q_{1000}=786\text{ m}^3/\text{s}$).

Como se aprecia, las expresiones de Jarret y de Aguirre y Fuentes (D_{65}) dan valores muy por encima de la media, superiores incluso a la zona comprendida por las dos líneas rojas a trazos, que representan los valores de $n_{medio} + 1.5\sigma$ y $n_{medio} - \sigma$. Los valores de Aguirre y Fuentes (D_m), aunque dentro de la franja de confianza, también arrojan valores elevados lo que hace que la media no se sitúe sobre la mayor agrupación de resultados. A tenor de la Figura 6, las expresiones que más se acercan a la media son las de Limerinos, Van Rijn, García Flores, Bathurst (1985), Grant (D_{65}), Aguirre y Fuentes (D_{50}) y la formulación clásica de resistencia del grano de Strickler.

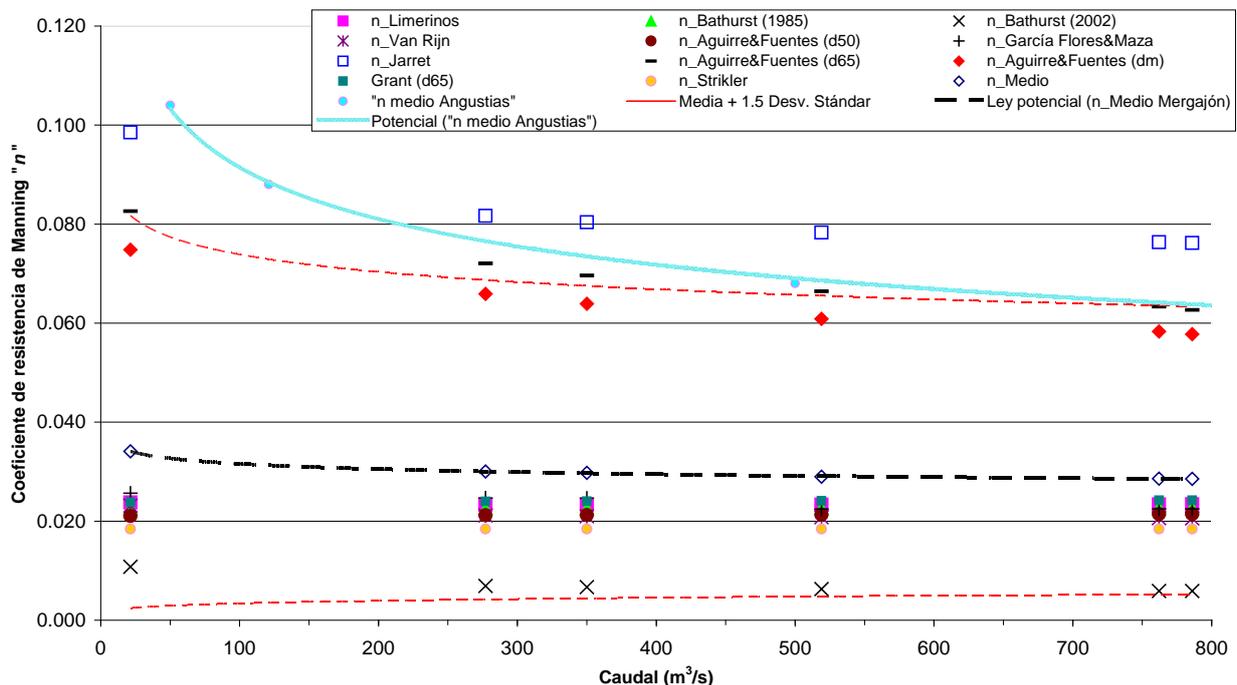


Figura 6.- Coeficientes de resistencia de Manning n en función del caudal de flujo. Rambla del Mergajón y Barranco de las Angustias

Transporte de sedimentos

Como en el caso del coeficiente de resistencia, siguiendo la metodología, se han evaluado los caudales líquidos y sus correspondientes caudales sólidos para diversos períodos de retorno comprendidos entre 1.4 y 1000 años. Para ello se han aplicado algunas de las formulaciones recogidas en Castillo et al. (2009), escogiéndose entre estas, las que en principio mejor se podrían adaptar a las condiciones de este tipo de cuencas: Meyer-Peter y Müller (1948), Ackers-White (1990), Yang (1976), Einstein y Barbarrosa (1952) y Yang S. (2005). Además se han analizado otras expresiones más específicas para ríos de montaña y alta pendiente propuestas por: Smart y Jaeggi (1983), Mizuyama y Shimohigashi (1985), Van Rijn (1987) y Aguirre-Pe et al. (2000). En la Tabla 10 se presentan las expresiones que han dado valores más próximos a la media.

Mediante un proceso iterativo se ha llevado a cabo el acoplamiento de las características hidráulicas con las formulaciones de transporte de sedimentos. En la Figura 7 se muestran los resultados obtenidos con las formulaciones señaladas.

Tabla 10.- Formulaciones del transporte de sedimentos que mejor se comportan en la Rambla del Mergajón.

AUTOR	FÓRMULA	OBSERVACIONES
Yang (1976)	Transporte de arenas: $g_{BT} = 0.001 \cdot U \cdot d \cdot \exp\{11.8929 - 0.153 \cdot \ln(w \cdot D_m / v) - 0.297 \cdot \ln(U_* / w) + [1.78 - 0.1563 \cdot \ln(w \cdot D_m / v) - 0.297 \cdot \ln(U_* / w)] \cdot \ln(U \cdot S / w)\}$ Transporte de gravas: $g_{BT} = 0.001 \cdot U \cdot d \cdot \exp\{15.3836 - 0.633 \cdot \ln(w \cdot D_m / v) - 4.816 \cdot \ln(U_* / w) + [2.784 - 0.1327 \cdot \ln(w \cdot D_m / v) - 0.1228 \cdot \ln(U_* / w)] \cdot \ln(U \cdot S / w - U_c \cdot S / w)\}$	Si $1.2 < \frac{U_* D}{v} < 70$ $\frac{U_c}{w} = \frac{2.5}{\log(U_* D / v - 0.06)} + 0.66$ Si $70 \leq \frac{U_* D}{v}$; $\frac{U_c}{w} = 2.05$
Einstein y Barbarrosa (1952)	$i_B g_{Bi} = \Phi_* i_B \gamma_s \left(g \Delta D_i^3 \right)^{1/2}; g_{BT} = g_B + g_{BS}$ $i_S g_{BSi} = i_B g_{Bi} \{ P_E I_1 + I_2 \}; i_{BT} g_{BTi} = i_B g_{Bi} = \{ 1 + P_E I_1 + I_2 \}$ $g_{BT} = \sum_{i=1}^n i_{BTi} g_{BTi}; \Psi_* = \xi Y (\beta / \beta_x)^2 \Psi'; \xi = f(D/X), Y = f(D_{65} / \delta')$ $X = 0.77 \Delta' \text{ si } \Delta' / \delta' > 1.8; X = 1.39 \delta' \text{ si } \Delta' / \delta' < 1.8; \beta = \log 10.6 = 1.025$ $\beta_x = \log(10.6 X / \Delta'); \Psi' = \Delta(D_i / R'); E = a / d; a = 2D_i; z = w / (K \beta U_*')$ Nota: Integrales se calculan por medio de ábacos. Para una descripción completa ver Simons and Sentürk (1992) y Graf (1984).	$P_E = 2.303 \log \left(\frac{30.2d}{\Delta'} \right)$ $I_1 = 0.216 \frac{E^{Z-1}}{(1-E)^Z} \int_E^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^Z dy$ $I_2 = 0.216 \frac{E^{Z-1}}{(1-E)^Z} \int_E^1 \left(\frac{1-y}{y} \right)^Z \ln(y) dy$ $\Delta' = \frac{K_s}{\chi}; K_s = D_{65};$ $\chi = f(K_s / \delta'); U' = \sqrt{g R I}$
Yang S. (2005)	$C = \frac{g_t}{Vh} = k \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \frac{\tau_o u_*'^2 - u_{*c}^2}{w}; k = \text{constante universal} = 12.5$ $u_*'^2 = \text{velocidad de corte debido a grano}; u_{*c}^2 = \text{velocidad crítica de Shields}$	C=concentración sedimento total de fondo; g_t =transporte total de fondo en peso; h =radio hidráulico o calado; V =velocidad media; τ_o =tensión de corte en fondo, d =diámetro sedimento; w =velocidad sedimentación partícula; γ_s =peso específico sedimento; γ =peso específico agua

Se puede apreciar que con la fórmula de Yang S. (2005), tomando el coeficiente medio propuesto por el autor de $k=12.5$ y n el valor medio, se obtienen valores muy elevados fuera de la zona de delimitación propuesta, que ha sido representada en la Figura 7 como la franja comprendida entre las dos líneas finas de trazos, y que nos da un orden de magnitud del flujo de sólidos. Sin embargo, al evaluar la expresión de Yang para $k=6$ (constante susceptible de ser calibrada según el propio autor de la formulación), los resultados se sitúan sobre la media total de flujo de material de fondo, representada por una línea gruesa de trazos.

Respecto a los resultados obtenidos con la expresión de Smart y Jaeggi, para caudales líquidos bajos (no mayores de $300 \text{ m}^3/\text{s}$), los valores de caudal sólido se sitúan en la zona alta de la franja de delimitación y, para caudales más elevados se sitúan sobre la media. El caso contrario sucede con los resultados de Mizuyama y Shimohigashi.

Por otro lado, los resultados obtenidos mediante las formulaciones de Van Rijn y Ackers-White se encuentran en el límite inferior de la zona de delimitación propuesta. Con la formulación de Meyer-Peter y Müller, al no cuantificar el transporte de fondo en suspensión, los resultados obtenidos se sitúan también en el límite inferior.

De todos los resultados, las formulaciones que mejor se aproximan a la media total de flujo son las de Einstein-Barbarrosa (1952), Yang C.T. (1976) y Yang S.Q., 2005 (con coeficiente $k=6$).

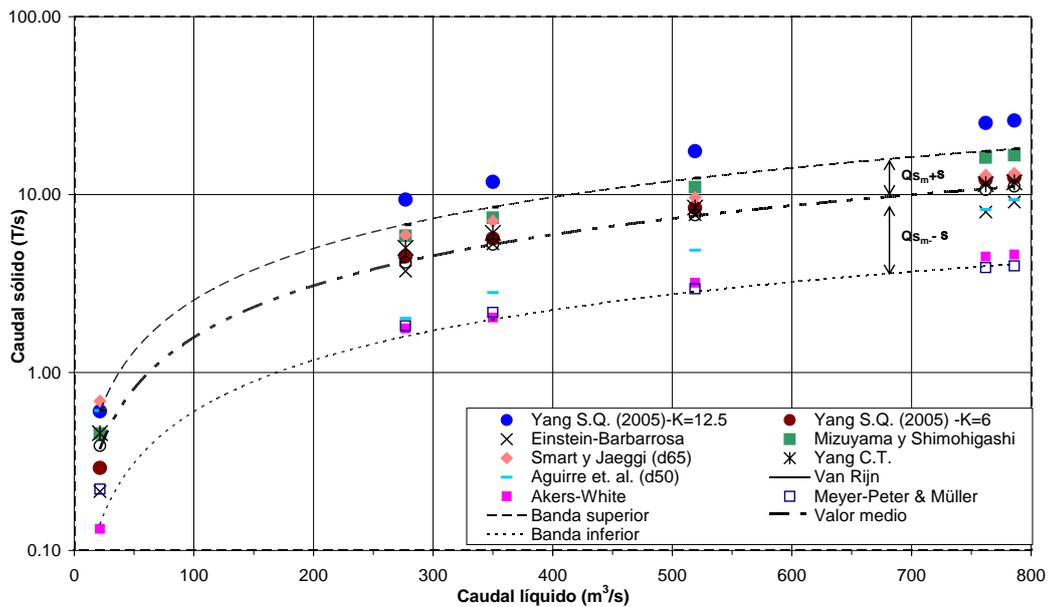


Figura 7.- Caudal sólido en función del caudal líquido (Rambla del Mergajón).

Si comparamos el valor del caudal sólido frente al caudal líquido de las dos cuencas semiáridas, (Figura 8), en términos generales comprobamos que el Mergajón presenta un caudal de sedimentos menor que las Angustias, incrementándose la diferencia a medida que aumenta el caudal líquido. Teniendo en cuenta la similitud que presentan ambas cuencas en la mayoría de los parámetros intervinientes para el cálculo del transporte de sedimentos, este hecho se explica, en gran medida, por la diferente granulometría que presentan ambas cuencas (recuérdese que $D_{84} \text{ (Mergajón)} = 14.71 \text{ mm} \ll D_{84} \text{ (Angustias)} = 870 \text{ mm}$).

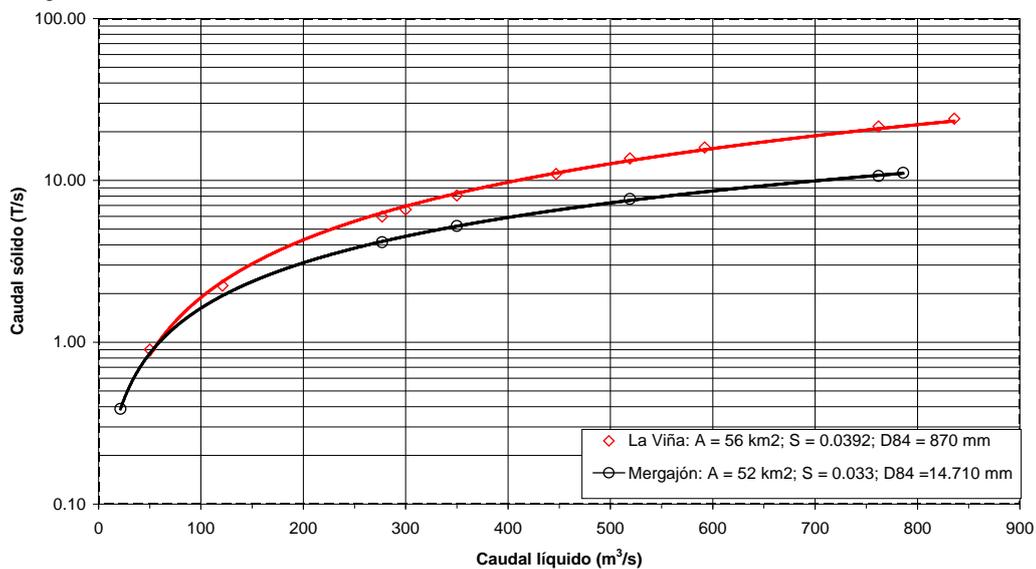


Figura 8.- Comparativa del caudal sólido en función del caudal líquido. Barranco de las Angustias y Rambla del Mergajón.

También se ha representado la proporción que representa del transporte medio total, el transporte de fondo y de fondo en suspensión (Figura 9), cuyos porcentajes fueron obtenidos mediante la expresión de Einstein–Barbarosa. Para el caso del Barranco de las Angustias se observa que en caudales más bajos, el transporte de fondo es mucho mayor que el de suspensión, 84% frente al 6% ($Q_{1.4} = 121 \text{ m}^3/\text{s}$), proporción que va variando hasta llegar al 61% de transporte de fondo y 39% de suspensión ($Q_{1.000} = 836 \text{ m}^3/\text{s}$). Estas proporciones están en concordancia con lo observado en los flujos macrorrugosos por García (2000). En el caso de la Rambla del Mergajón, comprobamos que el transporte de fondo tiene un valor muy inferior al de transporte de fondo en suspensión, así un

31% frente al 69% ($Q_{1.4}=21 \text{ m}^3/\text{s}$) y de un 9% frente al 91% ($Q_{1000}=786 \text{ m}^3/\text{s}$), tendencia invertida a la que presenta el Barranco de las Angustias, debido fundamentalmente a la diferente granulometría que presentan ambas cuencas.

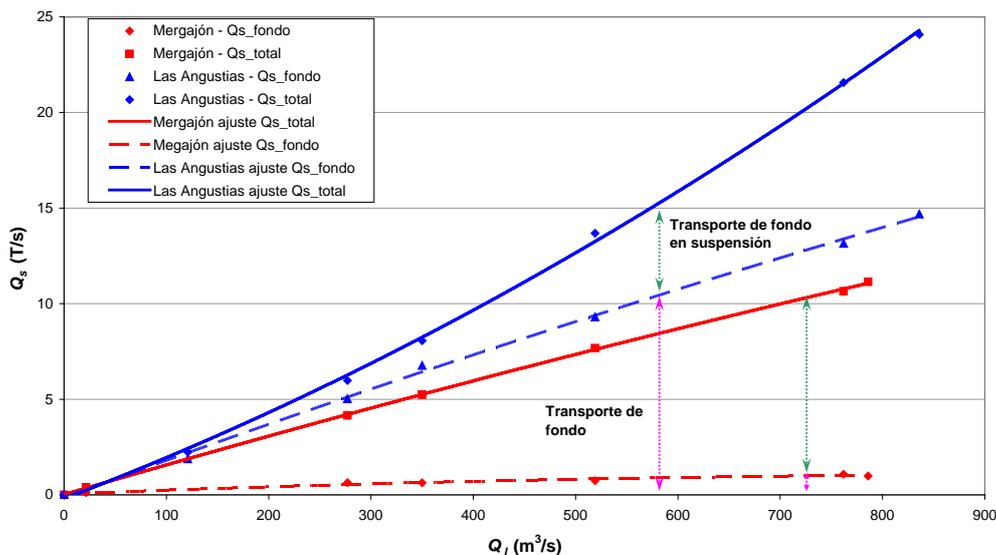


Figura 9.- Transporte de fondo y transporte de fondo en suspensión. Comparativa entre el Barranco de las Angustias y la Rambla del Mergajón.

CONCLUSIONES

En este artículo se ha analizado la validez de la metodología elaborada por Castillo et al. (2000a, 2000b y 2009) y Castillo (2004 y 2007) para su aplicación en regiones semiáridas.

En concreto se ha comprobado su bondad en la Rambla del Mergajón situada en el Campo de Cartagena (Región de Murcia), una cuenca con características hidrológicas similares a la cuenca para la que fue realizada la metodología (Barranco de las Angustias).

Se han analizado los resultados hidráulicos obtenidos para el Mergajón, y se han comparado con los de Las Angustias. Teniendo en cuenta las similitudes hidrológicas, las diferencias existentes entre los valores del caudal sólido ($Q_{s(Angustias)} > Q_{s(Mergajón)}$) estarían principalmente causadas por la diferencia en las características granulométricas existentes en cada zona, certificando la importancia que tiene el muestreo en el cálculo del transporte de sedimentos. Así, los diámetros característicos que reflejan una curva granulométrica, sobrevalorarán o subvalorarán las estimaciones de su capacidad de transporte.

AGRADECIMIENTOS

La investigación forma parte del proyecto PEPLAN: "Modelación Hidrológica en Zonas Semiáridas. Subproyecto 3: Modelación de Captaciones en Cauces Efímeros" (Decreto 420/2008). Los autores agradecen por el financiamiento recibido a la Consejería de Universidades, Empresa e Investigación de la Comunidad Autónoma de la Región de Murcia.

REFERENCIAS

- Ackers, P. y White, W.R. (1973). *Sediment Transport: New Approach and Analysis*. J. Hydraulics Division.
- ArcGIS v.9.2 (2006). *Using ArcGIS Desktop*. Environmental Systems Research Institute. Inc. ESRI. USA.
- Arc View GIS (1996). *User Manual*. Environmental Systems Research Institute. Inc. ESRI. USA.
- Aguirre-Pe J., Olivero M. L. y T. Moncada A. (2000). "Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente". *Ingeniería del Agua*. Vol 7. No. 4, pp. 353-365.
- Bathurst, J.C. (1985). "Flow resistance of large scale roughness". *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, Vol. 111, No. 4, pp. 1103-1122.

- Bathurst, J.C., Graf, H. y Cao, H. H. (1987).** *Bed load discharge equations for steep mountains rivers*. Sediment transport in gravel bed rivers. John Wiley and Sons, N.Y, USA, Cap.15. pp. 453-491.
- Bathurst, J.C. (2002).** "At-a-site variation and minimum flow resistance for mountain rivers". *Journal of Hydrology*, Vol. 269, pp. 11-26.
- Castillo, L., Santos, F., Ojeda, J., Calderón, P., Medina, J. M. (2000a).** "Estimación de los coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en el diseño de un encauzamiento con flujo hiperconcentrado". *V Jornadas sobre encauzamientos fluviales*, CEDEX, Madrid.
- Castillo, L., Santos, F., Ojeda, J., Calderón, P., Medina, J.M. (2000b).** "Importancia del muestro y limitaciones de las formulaciones existentes en el cálculo del transporte de sedimentos". *XIX Congreso Latinoamericano de hidráulica*. Córdoba, Argentina.
- Castillo, L. (2004).** "Estimation of sediment transport and dominant flow in hyperconcentrated flows". *The 6th International Conference. ICHE-2004*, Brisbane, Australia.
- Castillo, L. (2007).** "Discussion about prediction of bed material discharge". *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 45, No.2, pp. 425-428.
- Castillo, L., Martín Vide, J. P., Marín, M. D. (2009).** "Coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en regiones semiáridas". *I Jornadas sobre el agua y energía 2009*. CEDEX. Madrid
- Einstein, H. A. y Barbarrosa, N. L. (1956).** "River Channels Roughness". *Trans. ASCE* Vol. 177, pp.440-457.
- Ferrer, M., Rodriguez, y J., Estrela, T. (1995).** "Generación automática del número de curva con sistemas de información geográfica". *Ingeniería del Agua*. Vol. 2, No. 4, España, pp 43-58.
- Fuentes, R. y Aguirre-Pe, J. (1991).** "Resistance to flow in steep rough streams". *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 116, November.
- García, M. H. (2000).** *Notas de Curso: Mecánica del Transporte de Sedimentos con Aplicación a la Ingeniería Fluvial*. E.T.S. de Ingenieros de Caminos de la Universidad de Castilla-La Mancha. Ciudad Real, 26 al 30 de Junio de 2000.
- García Flores, M. (1996).** "Resistencia al flujo en ríos de montaña". *IAHR. XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Guayaquil, Ecuador. Vol. 4. PP 105-116.
- Graf, W. H. (1984).** *Hydraulics of Sediment Transport*. Water Resources Publications, LLC. Colorado, USA.
- Hec-GeoHMS v. 1.1. (2003).** *User's Manual*. US Army Corps of Engineers.
- Hec-HMS (2000).** *Technical Reference Manual*. US Army Corps of Engineers.
- Hec-HMS v.3.3. (2008).** *User's Manual*. US Army Corps of Engineers.
- Jarrett, R. D. (1984).** "Hydraulics of High-gradient Streams". *J. Hydraul. Engng*. Vol. 110, No4, pp. 1519-1539.
- Limerinos, J. T. (1970).** "Determination of the Manning coefficient for measured bed roughness in natural channels". *Water Supply Paper 1898-B*. United States Geological Survey, Washington, D.C.
- Meyer-Peter, E. y Müller, R. (1948).** "Formulations of the Bed-load Transport". *II International Congress IAHR*, Stockholm, Sweden, pp. 39-64.
- Mizuyama, T. y Shimohigashi, H. (1985).** "Influence of fine sediment concentratios on sediment transportes rates". *Jpn Civil Engr. J.* 27(1).
- Salas, J. D., 2000.** "Hidrología de zonas áridas y semiáridas". *Ingeniería del Agua*. Vol. 7. No 4. pp. 409-429.
- Smart, G. M. and Jaeggi, M. (1983).** *Sediment Transport on Steep Slopes*. V.A.W. *Mitteil 64*. Hidrologie und Glaziologie, ETH, Zurich, Swiss, p. 191.
- Témez, J. R., (1987).** *Cálculo hidrometereológico de caudales de avenida en pequeñas cuencas naturales*. MOPU. Dirección General de Carreteras.
- Témez, J. R., (1991).** "Generalización y mejora del método racional. Versión de la Dirección general de Carreteras de España. Ingeniería Civil". No 8, *CEDEX-MOPT*.
- Van Rijn, L. C. (1987).** "Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport". *Delft Hydraulics Communication No. 382*, Delft, Holanda.
- Wan, Z., Wang, Z. (1994).** *Hyperconcentrated Flow*. I.A.H.R. Monograph Series, A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Yang, C. T. (1996).** *Sediment Transport: Theory and Practice*. McGraw-Hill International Editions, NY, USA.
- Yang, S. Q. (2005).** "Sediment Transport Capacity". *J. Hydraulic Research*, IAHR Vol. 43, No 1, pp. 12-22.