

## Caracterización hidrológica e hidráulica y evaluación del transporte de sedimentos en regiones semiáridas

*L.G. Castillo<sup>1</sup>, JM.D. Marín<sup>1</sup>*

### 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 ramblas de las regiones semiáridas se presenten flujos hiperconcentrados, el cambio climático incrementará la torrencialidad del fenómeno, provocando grandes inundaciones que con unos efectos muy destructivos sobre el medio y las personas.

Estos flujos no pueden captarse con los sistemas habituales presa-embalse, ya que la elevada concentración de sedimentos los inutilizaría en poco tiempo. Por ello es preciso la construcción de sistemas específicos de control y captación de este tipo de flujos.

Para definir los parámetros de diseño de estos sistemas es imprescindible caracterizar hidrológica e hidráulicamente las cuencas, y cuantificar el transporte de sedimentos que presentan los cauces efímeros donde se situarán las estructuras.

Para la caracterización hidrológica de las zonas semiáridas se considera imprescindible el empleo de programas de simulación agregada y distribuida, y para la caracterización hidráulica y cálculo de transporte de sedimentos se emplea la metodología elaborada por Castillo et al. (2000, 2009, 2011) y Castillo (2007), validada para el uso en estas zonas.

En el siguiente capítulo, se realiza un análisis de los principales resultados obtenidos en el cálculo hidrológico, hidráulico y de transporte de sedimentos en varias cuencas de la Rambla del Albuñón (Campo de Cartagena, Murcia).

1.- Grupo I+D+i, Ingeniería Hidráulica, Marítima y Medio Ambiental Hidr@m. Departamento de Ingeniería Civil. Universidad Politécnica de Cartagena, UPCT. Paseo Alfonso XIII, 50, 30203 Cartagena, España. luis.castillo@upct.es; mdolores.marin@upct.es

## 1. Introducción

Los flujos torrenciales hiperconcentrados que se presentan en las ramblas de la geografía peninsular, provocan grandes inundaciones con efectos muy destructivos sobre el medio y las personas. Este hecho se está viendo incrementado por el cambio climático, con 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. 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.

Dichos flujos no pueden captarse con los sistemas habituales presa-embalse, ya que la elevada concentración de sedimentos los inutilizaría en poco tiempo. Por ello es preciso la construcción de sistemas específicos de control y captación de este tipo de flujos.

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, propios de zonas semiáridas, la cuantificación de la capacidad de transporte de sedimentos es imprescindible.

Atendiendo a la problemática y basándonos en experiencias similares y los principales resultados que de estos estudios se ha publicado Castillo et al. (2000, 2009, 2011), se presentan en este capítulo los principales resultados de la caracterización hidrológica e hidráulica en tres subcuencas de la Rambla del Albuñón. (Campo de Cartagena, Región de Murcia).

## 2. Objetivos

Los fenómenos hidrológicos son extremadamente complejos y su adecuado conocimiento se presenta como una tarea difícil. La herramienta más utilizada para ello es la modelización matemática.

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, incluyendo: 1) una baja precipitación anual pero con tormentas de alta intensidad que presentan considerable variabilidad espacial, 2) alta evaporación potencial, 3) baja escorrentía anual pero presentando a corto plazo un alto volumen de escorrentía y 4) pérdidas de escorrentía en los cauces efímeros (Branson et al. 1981). 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 adecuadamente estos factores.

Algunos autores como Salas (2000), indican que en general, para cuencas áridas o semiáridas los modelos distribuidos, ya sean continuos o de eventos, son más flexibles y más útiles. Michaud y Sorooshian (1994), también afirman que sólo un modelo espacialmente distribuido de alta resolución puede representar apropiadamente la variabilidad espaciotemporal de la lluvia y los subsiguientes procesos de infiltración y escorrentía en el medio semiárido.

En cambio otros autores como Beven (1989) citan que los modelos conceptuales son mejores que los modelos físicamente basados, puesto que son más simples, involucran un número de parámetros menor, requieren menos información y son más económicos, todo esto siempre y cuando se empleen a la escala adecuada.

Con todo ello, para el estudio de las cuencas en zonas mediterráneas se ha considerado conveniente el empleo de los dos tipos de modelos: agregados o semi-distribuidos

conceptuales, y distribuidos y físicamente basados, mediante el uso de dos programas. Y así comparando los resultados lograr un mayor conocimiento en este tipo de zonas de los procesos hidrológicos involucrados. Debido a ello, para la caracterización hidrológica de estas zonas se han realizado varios modelos con dos tipos de programas diferentes:

- el programa HEC-HMS v 3.5 (2010), desarrollado por el U.S. Army Corps of Engineers de los Estados Unidos (USACE), que permite la modelización agregada y semidistribuida, y
- el programa MIKE SHE (DHI, 2008), desarrollado por el by DHI Water & Environment, que permite la modelización físicamente basada y distribuida del ciclo integral del agua.

Los primeros resultados obtenidos en una de las cuencas estudiadas, nos indican la similitud de los resultados y la coherencia existente entre ambos modelos.

Respecto a la evaluación de transporte de sedimentos, y la caracterización hidráulica, en ambos casos se comprueba la validez y bondad de la metodología citada en los cauces efímeros estudiados

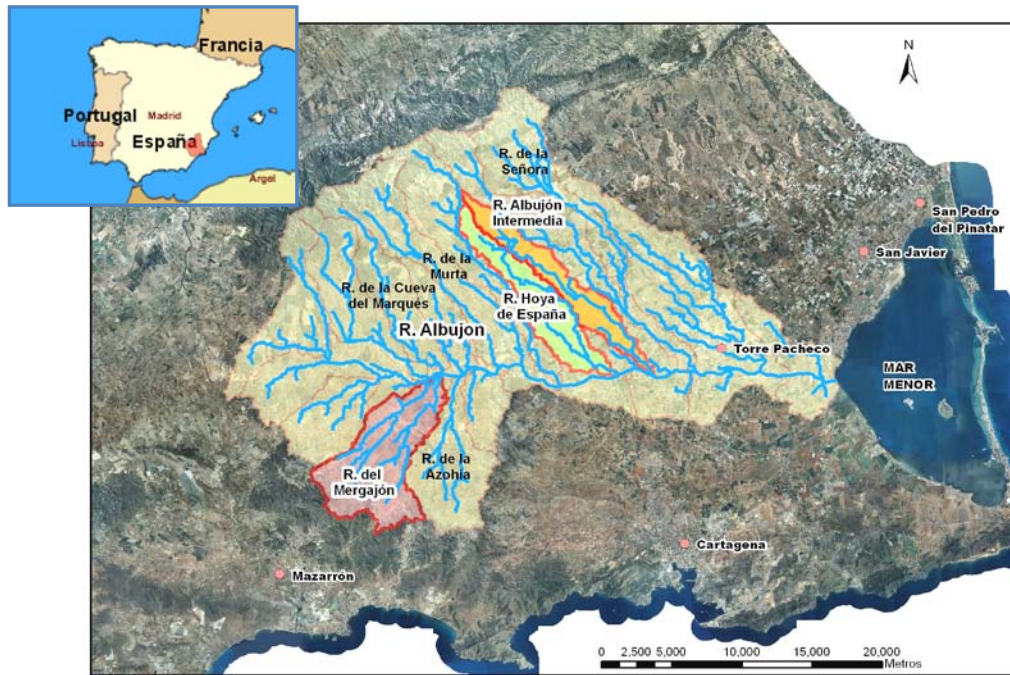
### **3. Descripción de las cuencas Mediterráneas estudiadas**

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 km<sup>2</sup>.

Geomorfológicamente la cuenca del Albuñón se caracteriza por presentar elevaciones moderadas. Las pendientes del terreno oscilan entre el 0.4 % próximo a la desembocadura, y el 5.8% en las zonas de cabecera. 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, destacan 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, cantos encostrados, y en menor proporción arcillas rojas. En la parte alta predominan las 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 un drenaje imperfecto.

La cuenca del Albuñón está compuesta por 17 subcuencas de entre 28 y 55 km<sup>2</sup>, de las cuales se han seleccionado tres para el estudio: La Rambla del Mergajón dada la semejanza que presenta con el Barranco de las Angustias (cuenca para la que fue definida la metodología a aplicar), tanto en sus características geomorfológicas (área y pendiente), como las hidrológicas e hidráulicas; y las subcuencas de Hoya de España y Albuñón Intermedia por sus diferencias con las anteriores y como representantes de cuencas aluviales o de cauce medio. (Figura 1).



**Figura 1** Situación de la Ramblas del Albuñón, del Mergajón, Hoya de España y Albuñón Intermedia.

### 3. Caracterización hidrológica de las cuencas

En base a ello, y como ya se ha comentado, en la caracterización hidrológica se han empleado dos tipos de programas diferentes: (1) el programa HEC-HMS v 3.5 (2010), que permite la modelación agregada y semidistribuida, y (2) el programa MIKE SHE (DHI, 2008), que permite la modelación físicamente basada y distribuida del ciclo integral del agua, incluyendo los procesos de evapotranspiración, flujo superficial, flujo en zona no saturada, flujo subterráneo y flujo en lámina libre, así como las interrelaciones entre ellos.

En la implementación de los modelos realizados para los dos programas se han utilizado entradas comunes, como la topografía y la precipitación, y otros valores de parámetros equivalentes.

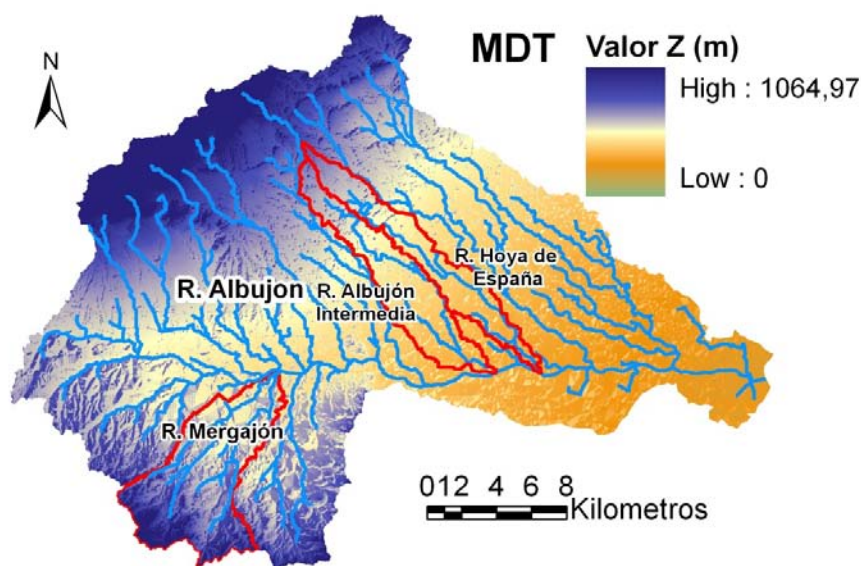
#### 3.1 Información de entrada de los modelos

##### Delimitación de la cuenca

Para la topografía, se ha usado un Modelo Digital del Terreno (MDT) de 4x4 m elaborado en el año 2009 como parte del proyecto Natmur-08 (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 las subcuencas estudiadas. En el caso del modelo HEC-HMS la agregación de las subcuencas que la componen, y sus características se han obtenido con la aplicación Hec-GeoHMS v. 4.2 (2009), para el programa ArcGIS 9.2 (2006) del Environmental Systems Research Institute, Inc. ESRI.

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.

De las diferentes subcuencas se han obtenido las principales características físicas: área, pendiente media de la cuenca, longitud y pendiente media del cauce, etc. En la Tabla 1 se presentan las de las cuencas estudiadas.



**Figura 2.** MDT de la cuencas y subcuencas estudiadas.

**Tabla 1.** Características generales de las cuencas de estudio.

| Cuenca     | Área cuenca completa (km <sup>2</sup> ) | L (km) | <i>i</i> <sub>media</sub> (m/m) |
|------------|---|--------|---------------------------------|
| Intermedia | 32                                      | 25.230 | 0.0082                          |
| H. España  | 28                                      | 27.241 | 0.0082                          |
| Mergajón   | 52                                      | 12.874 | 0.0274                          |
| Angustias  | 49                                      | 12.982 | 0.0392                          |

## 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 pluviómetros 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 2). El periodo de tiempo analizado ha sido de 1933 a 2009.

**Tabla 2.** 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 si 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, estaciones de Alhama (Comarza), Murcia (El Valle), Murcia El Sequen, Murcia (Corvera) y Murcia (Los Martínez del Puerto),
- Grupo 2, estaciones de Valladolises, Fuente Álamo (Balsapintada), Fuente Álamo S.E. Agraria, Fuente Álamo C.H. y Mazarrón,
- Grupo 3, 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 Valladolises 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 períodos 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 3.** Coeficientes correctores para las distintas ramblas

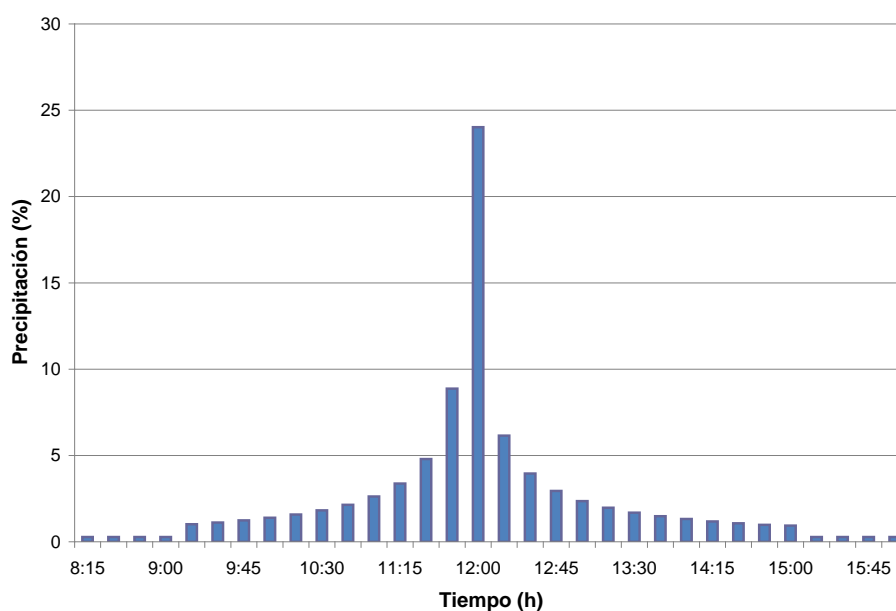
| Cuenca     | Duración de la tormenta (h) | Área cuenca completa (km <sup>2</sup> ) | Coeficiente corrector       |                   |                   |
|------------|-----------------------------|---|-----------------------------|-------------------|-------------------|
|            |                             |   | Por número de observaciones | Por simultaneidad | Por área-duración |
| Intermedia | 24                          | 32                                      | 1.13                        | 0.89              | 0.99              |
| H. España  | 24                          | 28                                      | 1.13                        | 0.89              | 0.99              |
| Mergajón   | 24                          | 52                                      | 1.13                        | 0.89              | 0.99              |
| Angustias  | 24                          | 49                                      | 1.13                        | 0.89              | 0.99              |

Los valores resultantes de precipitación para el caso de estudio de las ramblas del Mergajón, Albuñón Intermedia y Hoya de España, se exponen en la Tabla 4. También se incluyen los valores de precipitación del barranco de las Angustias y como se puede apreciar, los valores son similares en el caso del Mergajón y Barranco de Las Angustias, para periodos de retorno bajos, acusando mayores diferencias para los periodos altos.

**Tabla 4.** Máxima lluvia diaria.

| Cuenca             | Área cuenca completa (km <sup>2</sup> ) | Precipitación máx. diaria (TR años) (mm) |       |          |          |           |            |
|--------------------|---|--|-------|----------|----------|-----------|------------|
|                    |   | $P_{1.4}$                                | $P_5$ | $P_{10}$ | $P_{50}$ | $P_{500}$ | $P_{1000}$ |
| Albuñón Intermedia | 32                                      | 30                                       | 78    | 99       | 145      | 210       | 229        |
| Hoya de España     | 28                                      | 32                                       | 74    | 92       | 131      | 187       | 204        |
| Mergajón           | 52                                      | 36                                       | 92    | 118      | 176      | 257       | 281        |
| Las Angustias      | 49                                      | 101                                      | 166   | 195      | 257      | 344       | 370        |

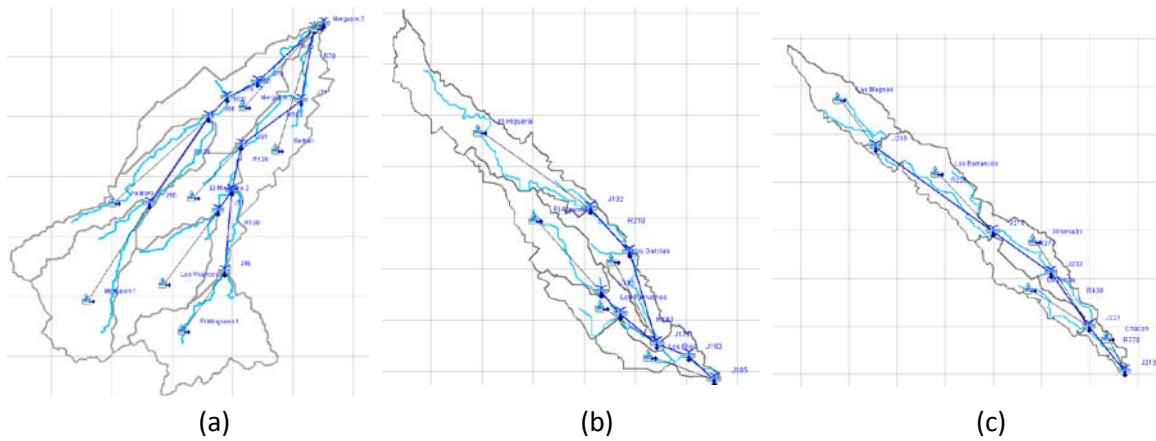
Para tener en cuenta la distribución temporal de la lluvia se ha considerado un patrón de lluvias acorde con la forma en que se presentan estos eventos en la zona de estudio (Figura 3). Partiendo de un tiempo de tormenta de 24 h y una discretización temporal de 15 minutos, mediante el método de bloques 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 3.** Patrón de precipitación.

### 3.2 Simulación agregada y semidistribuida

Con el programa HEC-HMS se han implementado varios modelos. Para cada cuenca se ha considerado un modelo agregado, tomando la cuenca completa, y dos modelos semidistribuidos, desagregando en varias subcuencas con áreas no mayores de 11 km<sup>2</sup>, y empleando diferentes métodos de tránsito de caudales (Figura 4).



**Figura 4.** Modelos semidistribuidos HEC-HMS, (a) Mergajón, (b) Albujión Intermediary (c) Hoya de España.

### 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 5.

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.

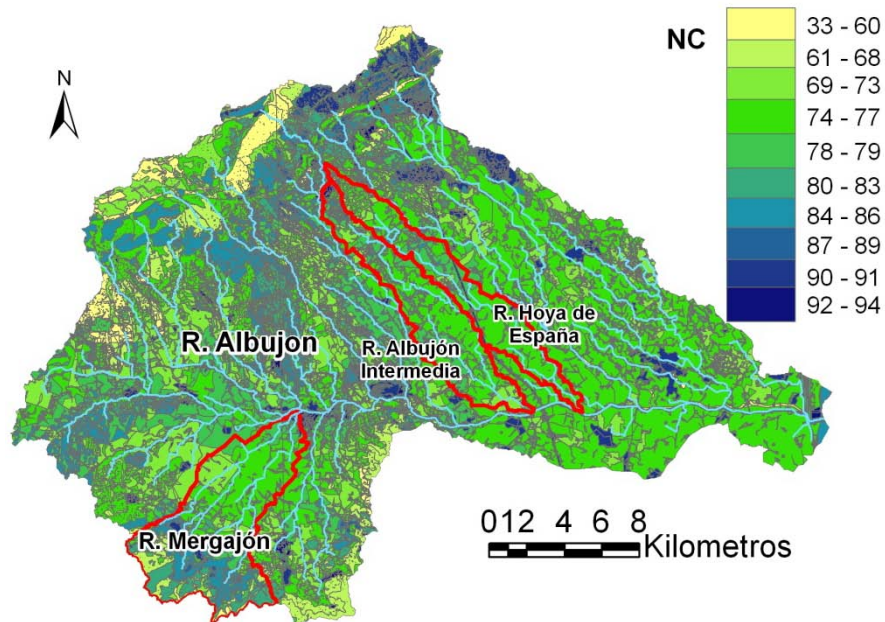


Figura 5. Mapa de Números de Curva NC en condiciones de humedad media.

## Otros parámetros hidrológicos

Respecto al modelo de transformación lluvia-escorrentía, para todas las simulaciones, se ha optado por utilizar el hidrograma unitario del SCS, dada la escasa información existente sobre eventos reales en la cuenca.

El modelo transformación lluvia-escorrentía del SCS requiere el cálculo del tiempo de retardo,  $T_{lag}$ , y para ello 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 españolas, propuso la aproximación de  $T_{lag} \approx 0.35T_c$ , siendo  $T_c = 0.3(L/i^{0.25})^{0.76}$ . Esta aproximación es la que ha sido empleada en las ramblas estudiadas.

Los valores obtenidos para cada cuenca completa se encuentran en la Tabla 5. Se hace notar que la diferencia de forma que presentan las cuencas completas, se refleja en los valores de  $T_c$  y  $T_{lag}$ , las cuencas más alargadas como la Hoya de España y Albuñón Intermedia presentan valores significativamente mayores.

Para el tránsito de los caudales en los modelos semidistribuidos, se han empleado los métodos de Muskingum-Cunge y la Onda Cinemática, de acuerdo a las pendientes presentadas. En cuencas con pendientes más pronunciadas se ha usado el método de Muskingum Cunge, dejando el otro para pendientes menores del 1%.

De manera análoga, para ambos modelos de propagación de caudales, se incluyeron varias secciones transversales obtenidas del MDT y adoptándose los coeficientes de rugosidad medios según las características de las diferentes secciones.

## Resultados

Los resultados de todas las simulaciones agregadas y semidistribuidas se muestran en la Tabla 5.

De acuerdo a los resultados, en todos los casos, la simulación de la cuenca completa da valores inferiores a los obtenidos en las simulaciones semi-distribuidas, diferencias que van aumentando a medida que crece el periodo de retorno (ver Figura 6). Respecto a los caudales calculados en cuencas completas, comparativamente los resultados del Mergajón y Las Angustias son muy similares tanto en precipitaciones como en caudales para períodos de retorno mayores de 50 años.

En términos generales los resultados obtenidos en las simulaciones semidistribuidas con los dos métodos de propagación, Muskingum-Cunge y Onda Cinemática, son similares para cada rambla. El método de la Onda Cinemática se considera más apropiado que el de Muskingum-Cunge en las ramblas del Albuñón Intermedia y Hoya de España, básicamente en atención a la forma de las cuencas y a las pendientes medias de las mismas. En el caso del Mergajón, los resultados de la cuenca completa y disgregada, difieren significativamente. La causa está en la singular forma de la cuenca, que al tener dos ríos paralelos que se unen al final de la cuenca, hace que los picos de los hidrogramas sean prácticamente coincidentes.

**Tabla 5.** Valores de caudal máximo resultantes del modelo HMS.

| Cuenca             | Simulación       | Área (Km <sup>2</sup> )    | Modelo/<br>Características                           | Caudal máximo (m <sup>3</sup> /s) |                |                 |                 |                  |                   |
|--------------------|------------------|----------------------------|--|-----------------------------------|----------------|-----------------|-----------------|------------------|-------------------|
|                    |                  |                            |  | Q <sub>1,4</sub>                  | Q <sub>5</sub> | Q <sub>10</sub> | Q <sub>50</sub> | Q <sub>500</sub> | Q <sub>1000</sub> |
| Albuñón Intermedia | Agregada         | 32                         | T <sub>c</sub> =512 min<br>T <sub>lag</sub> =179 min | 3                                 | 48             | 76              | 144             | 246              | 277               |
|                    | Semi-distribuida | 5 subcuencas<br>De 4 a 11  | Muskingum-Cunge                                      | 3                                 | 57             | 95              | 187             | 329              | 384               |
|                    | Semi-distribuida |                            | Onda Cinemática                                      | 3                                 | 54             | 90              | 184             | 329              | 386               |
| Hoya de España     | Agregada         | 28                         | T <sub>c</sub> =532 min<br>T <sub>lag</sub> =186 min | 3                                 | 37             | 58              | 109             | 186              | 210               |
|                    | Semi-distribuida | 5 subcuencas<br>De 1.5 a 8 | Muskingum-Cunge                                      | 3                                 | 44             | 70              | 139             | 244              | 279               |
|                    | Semi-distribuida |                            | Onda Cinemática                                      | 3                                 | 40             | 65              | 129             | 232              | 267               |
| Mergajón           | Agregada         | 52                         | T <sub>c</sub> =290 min<br>T <sub>lag</sub> =102 min | 15                                | 147            | 227             | 421             | 701              | 785               |
|                    | Semi-distribuida | 8 subcuencas<br>De 1 a 9   | Muskingum-Cunge                                      | 19                                | 163            | 315             | 587             | 987              | 1103              |
|                    | Semi-distribuida |                            | Onda Cinemática                                      | 18                                | 170            | 327             | 601             | 1000             | 1119              |
| Las Angustias      | Agregada         | 49                         | T <sub>c</sub> =180 min<br>T <sub>lag</sub> =63 min  | 121                               | 277            | 350             | 519             | 762              | 836               |

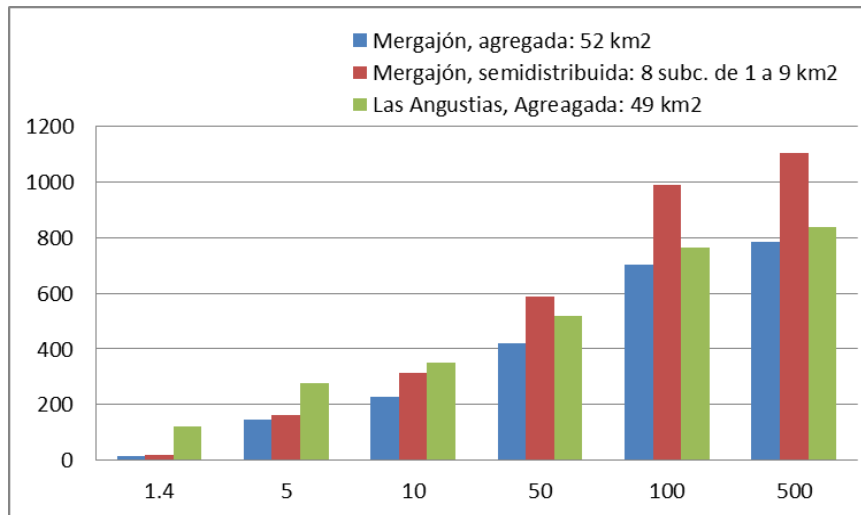


Figura 6. Comparativa entre modelos agregados y semidistribuidos para el caso del Mergajón.

### 3.3 Simulación distribuida

El programa MIKE SHE ha sido empleado para la modelización distribuida de la cuenca del Mergajón. Como primera aproximación, para la simulación de un evento de 24 horas de precipitación, sólo se incluyó el proceso de flujo superficial. Para implementar el modelo de MIKE SHE se han utilizado valores de entrada equivalentes a los utilizados en el modelo de HMS. Entre ellos la precipitación, la topografía, y el valor de almacenamiento (detention storage,  $DS$ ), que se asimila al valor de  $P_0$ . Los resultados para las simulaciones de tres periodos de retorno diferentes se muestran en la Tabla 6 y Figura 7.

Comparando los valores obtenidos de caudal máximo y el tiempo para alcanzarlo tanto en el modelo HEC-HMS como en MIKE SHE (Tabla 3), podemos ver que los caudales obtenidos por MIKE SHE son más altos que los de HMS para un período de retorno bajo ( $T$  1.4 años). Sin embargo, dichos valores son similares en ambos modelos para  $T$  50 años. Para  $T$  500 años los caudales del modelo MIKE SHE son más bajos que el modelo de HMS. Respecto al tiempo al pico, estos son muy similares entre ellos excepto para el caso de  $T$  1.4 años.

Tabla 6. Valores de caudal máximo obtenidos en HEC-HMS y MIKE SHE. Tiempo para alcanzarlo.

| $DS = P_0$ (mm)=14   $CN=78$   | $Pd T_{1.4}$ | $Pd T_{50}$ | $Pd T_{500}$ |
|--------------------------------|--------------|-------------|--------------|
| HEC HMS $Q_{max}$ ( $m^3/s$ )  | 14           | 422         | 701          |
| Tiempo al pico (h)             | 14:15        | 13:45       | 13:45        |
| MIKE SHE $Q_{max}$ ( $m^3/s$ ) | 24.2         | 420.8       | 558.9        |
| Tiempo al pico (h)             | 19:09        | 13:36       | 13:10        |

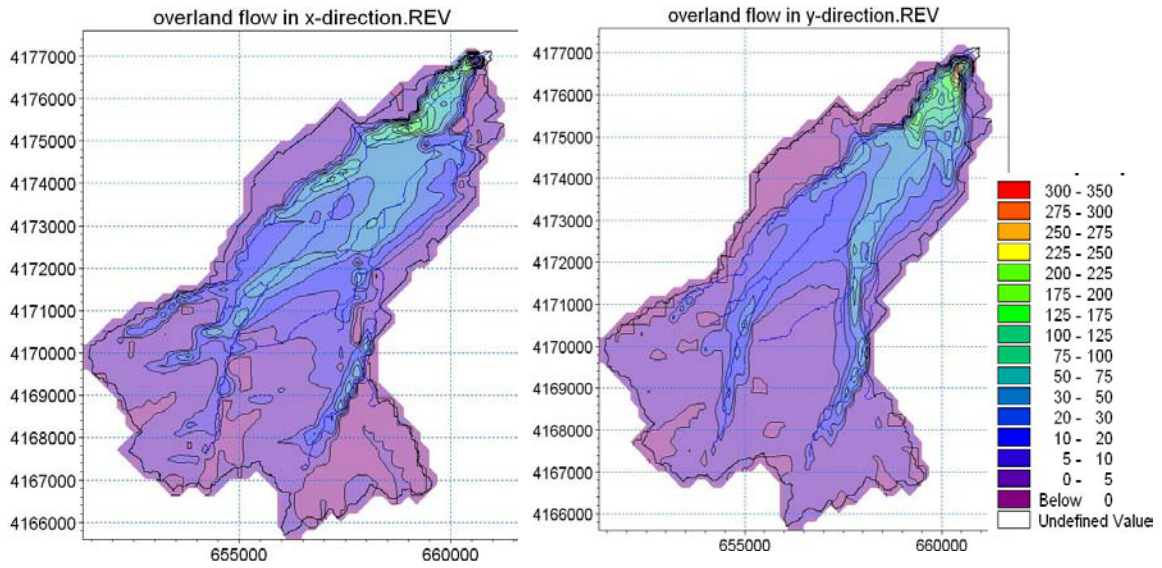


Figura 7. Caudales máximos en direcciones "x" e "y" para T500 años.

#### 4. Caracterización hidráulica. Estudio del transporte de sedimentos

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 (Tabla 7), y otra de tipo granulométrico del material del lecho del cauce (Figura 8).

Es de notar la gran diferencia que existe entre la granulometría de Las Angustias y las restantes.

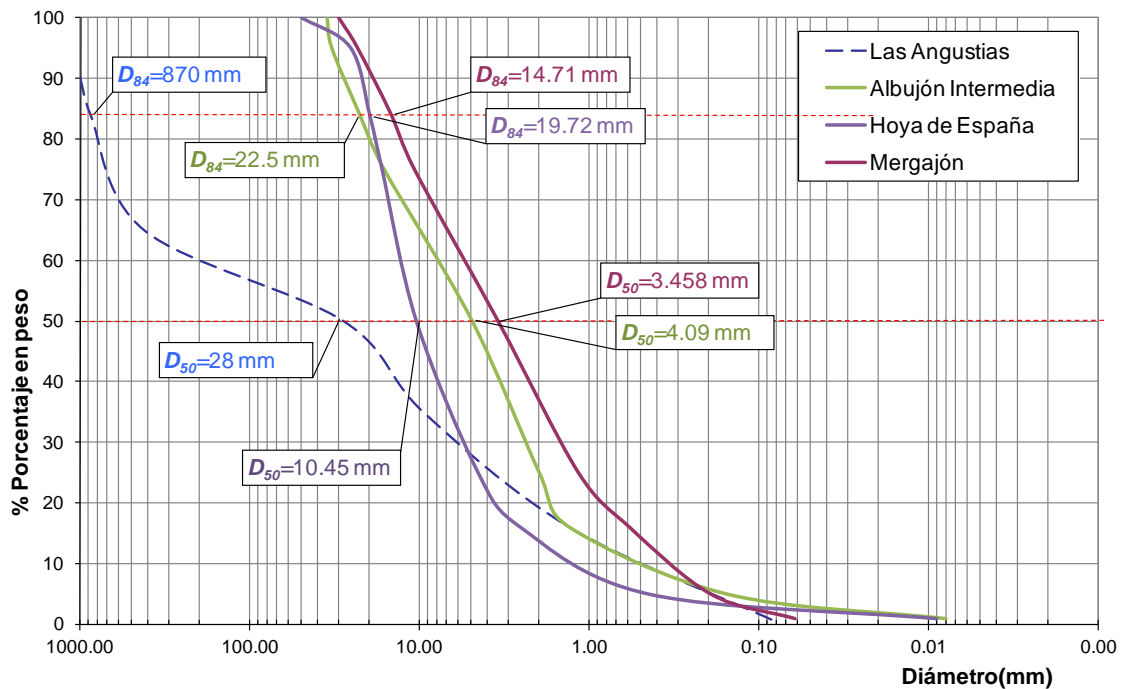


Figura 8. Curvas granulométricas de las diferentes subcuencas.

## 4.1 Estimación del coeficiente de resistencia de Manning

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

Siguiendo la metodología de Castillo et al. (2009) se consideran cuatro aspectos para determinar las características del flujo:

- (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.
- (2) Resistencia por formas de fondo. Sería necesario considerarlas si la relación  $R_h/D_{50} > 2000$ , donde  $R_h$  es el radio hidráulico.
- (3) Tipo de flujo, hiperconcentrado o mud flow. Determinarán el tipo de flujo según los límites expuestos de Wan y Wang (1994). Si este no es mudflow, entonces no será necesario contemplar un incremento de la resistencia por la variación de la densidad y viscosidad del fluido.
- (4) Acorazamiento. Aparece este fenómeno si la desviación típica granulométrica es extendida o bien graduada  $\sigma_g = (D_{84}/D_{16})^{0.5} > 3$ . Los efectos derivados del acorazamiento son varios y significativos: influyen en la rugosidad del cauce, y con ello en la velocidad de la corriente y el inicio de movimiento de las partículas del lecho.

En todos los casos estudiados nos enfrentamos a un problema de macrorrugosidad en períodos de retorno bajos. Por otra parte no es necesario contemplar un aumento de resistencia por forma de fondo, ni tampoco un aumento por la densidad y viscosidad del flujo puesto que la concentración en peso de los sedimentos es inferior al 10%. Sin embargo, el fenómeno del acorazamiento se presenta en el Mergajón y Albujión Intermedia, donde ( $\sigma_g > 3$ ), pero no en la Hoya de España (Tabla 7).

**Tabla 7.** Principales características hidráulicas de las cuencas.

| Cuenca     | $Q_T(m^3/s)$ | $y/D_{84}$ | $Q_{1000}(m^3/s)$ | $R_h/D_{50}$ | $Q_T(m^3/s)$   | Conc. Peso (%) | $\sigma_g = D_{84}/D_{16}$ |
|------------|--------------|------------|-------------------|--------------|----------------|----------------|----------------------------|
| Intermedia | $Q_{50}=144$ | 46         | 277               | 152          | $Q_5=48$       | 0.31           | 4.15                       |
| H. España  | $Q_{50}=109$ | 49         | 210               | 76           | $Q_{1000}=210$ | 0.31           | 2.79                       |
| Mergajón   | $Q_{1.4}=15$ | 23         | 786               | 442          | $Q_5=147.5$    | 1.28           | 5.03                       |

Para la estimación del coeficiente de rugosidad en flujos macrorugosos se han empleado las 9 fórmulas recogidas en la metodología de Castillo et al. (2000, 2009) (Tabla 8). El cálculo se realiza acoplando iterativamente las características hidráulicas con el transporte de sedimentos, obteniendo así la media de la rugosidad del grano. En aquellas formulaciones en las que no se indica expresamente en valor del coeficiente de manning  $n$ , se ha empleado la relación de Strikler  $n = R_h^{1/6} / C$ , donde  $C$  es el coeficiente de Chezy. De las expresiones recogidas en la tabla 8, las fórmulas de Fuentes y Aguirre (1991), Bathurst (1985), García Flores (1996) y Van Rijn (1987) son las que mejor se ajustaron al valor medio.

Los resultados obtenidos de las diferentes expresiones analizadas muestran cierta dispersión, pero en general los valores tienden a disminuir a medida que aumenta el flujo. Los valores calculados se incrementaron en 0.01 para considerar la forma de la sección, y la vegetación existente en la zona del Albujión. Finalmente los coeficientes de manning

adoptados para el cálculo del transporte de sedimentos fueron: Las Angustias (0.104 -0.062), Mergajón (0.033 - 0.032), Albujión Intermedia (0.036 - 0.034) y en la Hoya de España (0.038 - 0.034).

**Tabla 8.** Principales formulaciones del coeficiente de resistencia para flujos macrorugosos.

| AUTOR                           | FÓRMULA  | OBSERVACIONES   |
|---------------------------------|--|---|
| <b>Limerinos (1970)</b>         | $C^* = 5.657 \log \left[ \frac{R}{D_{84}} \right] + 3.281; \quad 0.90 \leq R/D_{84} \leq 68.55$<br>$C^* = 5.657 \log \left[ \frac{R}{D_{50}} \right] + 0.990; \quad 1.90 \leq R/D_{50} \leq 177$   | $n = \frac{0.1129R^{1/6}}{2 \log(R/D_{84}) + 1.160}$<br>R= Radio hidráulico total   |
| <b>Bathurst (1985)</b>          | $C^* = 5.62 \log \left[ \frac{d}{D_{84}} \right] + 4; \quad 0.3 \leq d/D_{84} \leq 50$   | $0.4\% \leq S_0 \leq 4\%$<br>d= calado del flujo  |
| <b>Fuentes y Aguirre (1991)</b> | $C^* = 5.657 \log \left[ \frac{d}{D_{50}} \right] + 1.333 + 0.737 \left[ 1/(d/D_{50}) \right]$<br>$0.3 \leq d/D_{50} \leq 77$  | $0.001\% \leq S_0 \leq 6.55\%$  |
| <b>García Flores (1996)</b>     | Régimen Supercrítico:<br>$C^* = 5.756 \log \left[ \frac{d}{D_{84}} \right] + 3.698; \quad 0.30 \leq d/D_{84} \leq 100$<br>$C^* = 5.756 \log \left[ \frac{R_b}{D_{50}} \right] + 1.559; \quad 0.6 \leq R_b/D_{50} \leq 200$<br>Régimen Subcrítico:<br>$C^* = 5.756 \log \left[ \frac{d}{D_{84}} \right] + 2.2794; \quad 0.30 \leq d/D_{84} \leq 100$<br>$C^* = 5.756 \log \left[ \frac{R_b}{D_{50}} \right] + 0.2425; \quad 0.6 \leq R_b/D_{50} \leq 200$ | $n = \frac{0.111d^{1/6}}{2 \log(d/D_{84}) + 1.2849}$<br>R <sub>b</sub> = Radio hidráulico del fondo<br><br>$n = \frac{0.111d^{1/6}}{2 \log(d/D_{84}) + 0.7919}$ |
| <b>Van Rijn (1987)</b>          | $C^* = 5.75 \log(12R_f / 3D_{90})$   | R <sub>f</sub> = radio hidráulico de fondo  |
| <b>Jarret (1984)</b>            | $n = 0.39S^{0.38} / (3.28R)^{0.16}; \quad 0.2\% < S < 0.4\%; \quad 0.15m < R < 2.1m$   | S= pendiente de fricción;<br>R= radio hidráulico  |
| <b>Strickler (1923)</b>         | $n = D_{90}^{1/6} / 26$  | D <sub>50</sub> Diámetro característico en m  |
| <b>Grant (1997)</b>             | $C^* = 2.18 \left[ \ln(1.65 \frac{\tau_{cr}^*}{S}) + 1.35 \right]; \quad \tau_{cr}^* = d \cdot S / (\gamma_s / \gamma_a - 1) \cdot D$  | D= D <sub>85</sub><br>S= pendiente tramo<br>d= calado del flujo   |
| <b>Bathurst (2002)</b>          | $C^* = 3.84(d/D_{84})^{0.547}; \quad S < 0.8\%$<br>$C^* = 3.10(d/D_{84})^{0.93}; \quad S > 0.8\%$  | S= pendiente tramo<br>d= calado del flujo<br>$0.2\% \leq S \leq 4\%$<br>d/D <sub>84</sub> <11   |

## 4.2. Estimación del transporte de sedimentos

En Castillo et al. (2000, 2009) se contemplan 12 fórmulas para el cálculo de la capacidad de transporte de sedimentos (Tabla 9). Estas han sido aplicadas en las ramblas estudiadas para caudales con periodos de retorno comprendidos entre 1.4 y 1000 años. Las formulaciones que más se han ajustado al valor promedio han sido las de Einstein y Barbarossa (1952), Meyer-Peter and Müller (1948), Bathurst et al. (1987) y Yang S. (2005).

**Tabla 9.** Principales formulaciones del transporte de sedimentos.

| AUTOR                        | FÓRMULA   | OBSERVACIONES  |
|------------------------------|---|--|
| Colby (1964)                 | $g_{BT \max} = 1.13U^{3.326}; g_{BT \min} = 0.46U^{3.326} \quad 0.1mm \leq D_{50} \leq 1mm$   | <p><math>U</math>=velocidad media del flujo</p> <p><math>g_{BT}</math> =Transporte unitario total de fondo en peso (kg/ms)</p>   |
| Meyer- Peter y Müller (1948) | $\gamma(K_s / K_r)^{3/2} R_s I = 0.047 \gamma'_s D_m + 0.25 \gamma'_s \rho^{1/3} (g_{BT} / \gamma_s)^{2/3}; K_r = 26 / D_{90}^{1/6};$ $K_s = \frac{B^{2/3} K_m K_w}{\{Bd^{2/3} + 2d(K_w^{3/2} - K_m^{3/2})\}^{2/3}}; K_m = 1/n; K_w = 1/n_{pared}$  | <p><math>g_{BT}</math> =Transporte unitario total de fondo en peso (T/ms) <math>b</math>=ancho (m); <math>K_m</math>=coeficiente de resistencia global en toda la sección. <math>K_w</math>=coeficiente de resistencia de las paredes; <math>K_s</math>=coeficiente de resistencia global del fondo; <math>K_r</math>=coeficiente de resistencia del grano del material del fondo; <math>d</math>= calado (m)</p> <p>0.04% &lt; <math>S</math> &lt; 2%</p> |
| Ackers-White (1990)          | $g_{BT} = \gamma_s K D_{35} U \left(\frac{U}{U_*}\right)^n \left(\frac{F_*}{F_{*c}} - 1\right)^m$ <p>Si: <math>1 \leq D_* \leq 60</math>: <math>K = \exp\{2.79 \ln(D_*) - 0.426(\ln D_*)^2 - 7.967\}</math></p> <p><math>n = 1 - 0.56 \log D_*</math>; <math>F_{*c} = (0.23/\sqrt{D_*}) + 0.14</math>; <math>m = (6.83/D_*) + 1.67</math></p> <p><math>F_* = (U_*^n / \sqrt{g\Delta D}) \{U / \sqrt{32 \log(10d/D)}\}^{1-n}</math>; <math>D_* = D_{35} (g\Delta / \nu^2)^{1/3}</math></p> | <p>El método se aplica si:</p> <p><math>D_* \geq 1</math> <math>F_* \leq 8</math></p> <p>Si <math>D_* &gt; 60</math>; <math>n = 0</math>; <math>m = 1.78</math>; <math>F_{*c} = 0.17</math>; <math>K = 0.025</math>;</p> $\sigma_g = \left(\frac{D_{84}}{D_{16}}\right)^{0.5} \quad \text{siendo} \begin{cases} D = D_{35} & \text{si } \sigma_g > 3 \\ D = D_{50} & \text{si } \sigma_g \leq 3 \end{cases}$   |
| Engelund y Hansen (1967)     | $g_{BT} = 0.05 \gamma_s U^2 \tau_*^{3/2} \left(\frac{D_{50}}{g\Delta}\right)^{1/2}$   | <p>Siempre que: <math>Re_* = \frac{U_* D_{50}}{\nu} \geq 12</math> ; <math>D_{50} \geq 0.15mm</math>; <math>\sigma_g \leq 2</math></p>   |
| Bathurst et al. (1987)       | $\phi = (2.5S)^{3/2} / [(\Delta + 1)D_{50} (g\Delta D_{50})^{1/2}] [q - q_c]$ $q_c^* = \frac{q_c}{g^{1/2} D_{50}^{3/2}} = 0.15S^{-1.12}; \quad q_c^* = \frac{q_c}{g^{1/2} D_{16}^{3/2}} = 0.21S^{-1.12}$ <p>Con <math>D_{50}</math>: <math>D_{16}</math>:</p>   | <p>Siendo</p> <p><math>S</math>= pendiente;</p> <p><math>q</math>= caudal unitario de agua</p> <p><math>q_c</math>= caudal crítico</p> <p><math>\Delta</math> = peso específico aparente adimensional</p>  |
| Van Rijn (1987)              | $\phi = \frac{0.053}{D_*^{0.3}} \left[ \frac{F_{rd}^2}{C_*^2 \tau_c^*} - 1 \right]^{2.1}; \quad C_*^* = 5.75 \log \left[ \frac{12R_f}{3D_{90}} \right]; \quad D_*^* = D \left( \frac{g\Delta}{\nu^2} \right)^{1/3}$   | <p><math>F_{rd}</math>= número de Froude Densimétrico de partículas; <math>\tau_c^*</math>= esfuerzo cortante crítico adimensional; <math>C_*^*</math>= coeficiente de Chézy; <math>R_f</math>= radio hidráulico del fondo</p>   |

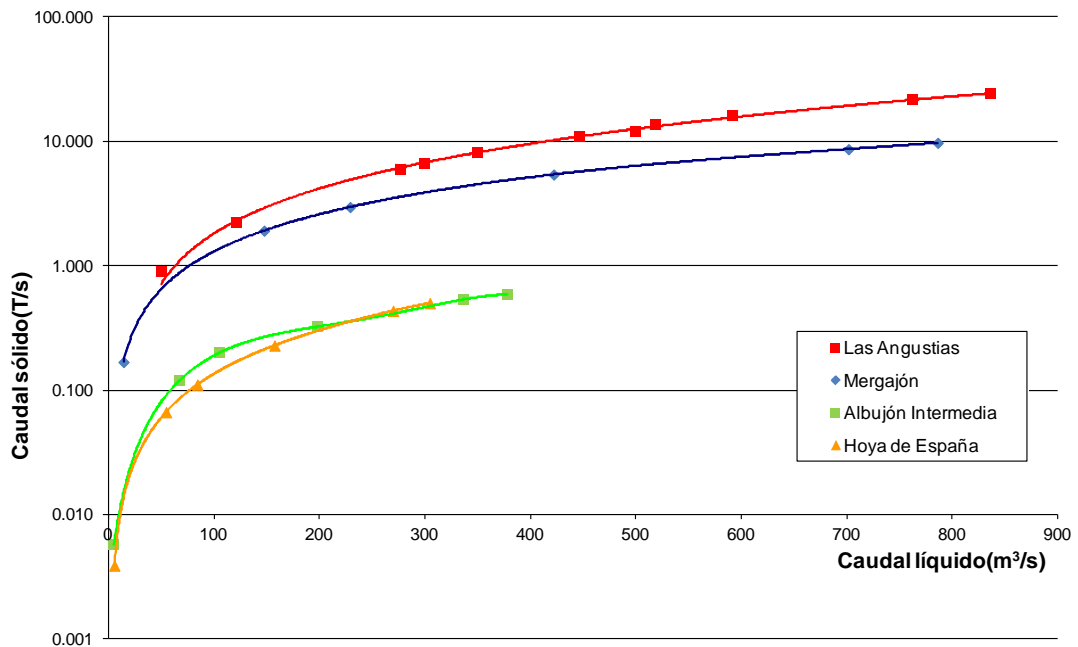
| AUTOR                                 | FÓRMULA   | OBSERVACIONES   |
|---------------------------------------|---|---|
| <b>Yang (1976)</b>                    | <p>Transporte de arenas:</p> $g_{BT} = 0.001 \cdot U \cdot d \cdot \exp\{11.8929 - 0.153 \cdot \ln(w \cdot D_m / \nu) - 0.297 \cdot \ln(U_* / w) + [1.78 - 0.1563 \cdot \ln(w \cdot D_m / \nu) - 0.208 \cdot \ln(U_* / w)] \cdot \ln(U \cdot S / w)\}$ <p>Transporte de gravas:</p> $g_{BT} = 0.001 \cdot U \cdot d \cdot \exp\{15.3836 - 0.633 \cdot \ln(w \cdot D_m / \nu) - 4.816 \cdot \ln(U_* / w) + [2.784 - 0.1327 \cdot \ln(w \cdot D_m / \nu) - 0.1228 \cdot \ln(U_* / w)] \cdot \ln(U \cdot S / w - U_c \cdot S / w)\}$   | <p>Si <math>1.2 &lt; \frac{U_* D}{\nu} &lt; 70</math></p> $\frac{U_c}{w} = \frac{2.5}{\log(U_* D / \nu - 0.06)} + 0.66$ <p>Si <math>70 \leq \frac{U_* D}{\nu}</math>; <math>\frac{U_c}{w} = 2.05</math></p>   |
| <b>Mizuyama y Shimohigashi (1985)</b> | $\phi = 20 \frac{S^2}{\Delta^2} \frac{q}{\sqrt{g \Delta D_{50}^3}}$   | <p>S= pendiente; q= caudal unitario de agua;<br/> <math>\Delta</math> = peso específico aparente adimensional</p>   |
| <b>Einstein y Barbarossa (1952)</b>   | <p>Transporte total</p> $g_{BT} = g_B + g_{BS} \text{ donde } g_{BT} = \sum_{i=1}^n i_{BTi} g_{BTi}; i_{BT} g_{BTi} = i_B g_{Bi} \cdot \{1 + P_E I_1 + I_2\}$ <p>Transporte de fondo:</p> $g_B = \sum_{i=1}^n i_B g_{Bi};$ $i_B g_{Bi} = \Phi_* i_b \gamma_s \left( g \Delta D_i^3 \right)^{1/2}; \Phi_* = f(\Psi_*); \Psi_* = \xi Y (\beta / \beta_x)^2 \Psi'; \beta_x = \log(10.6 X / \Delta')$ $\beta = \log 10.6 = 1.025; \Psi' = \Delta \frac{D_i}{R' I}; \xi = f(D / X); Y = f(D_{65} / \delta'); \delta' = \frac{11.6 \nu}{U_*}$ $X = 0.77 \Delta' \text{ si } \Delta' / \delta' > 1.8; X = 1.39 \delta' \text{ si } \Delta' / \delta' < 1.8; \Delta' = \frac{K_s}{\chi}; K_s = D_{65};$ $\chi = f(K_s / \delta');$ <p>El transporte en suspensión:</p> $g_{BS} = \sum_{i=1}^n i_S g_{BSi}; i_S g_{BSi} = i_B g_{Bi} \cdot \{P_E I_1 + I_2\};$ <p>Nota: Integrales se calculan por medio de ábacos. Para una descripción completa ver Simons and Sentürk (1992) y Graf (1984).</p> | $P_E = 2.303 \log\left(\frac{30.2d}{\Delta'}\right)$ $I_1 = 0.216 \frac{E^{Z-1}}{(1-E)^Z} \frac{1}{E} \int \left(\frac{1-y}{y}\right)^Z dy$ $I_2 = 0.216 \frac{E^{Z-1}}{(1-E)^Z} \frac{1}{E} \int \left(\frac{1-y}{y}\right)^Z \ln(y) dy$ $E = a/d; a = 2D_i; z = w/(K\beta U_*'); U_*' = \sqrt{gR'I};$ |



| AUTOR                           | FÓRMULA  | OBSERVACIONES   |
|---------------------------------|--|---|
| <b>Aguirre-Pe et al. (2000)</b> | $\phi = \frac{1.5S^{1/2} F_{rd}^6}{C^{*4}} ; F_{rd}^2 = U / \sqrt{\Delta g D_m \cos \theta (\tan \phi - \tan \theta)} ; C^* = \sqrt{\frac{8}{f_b}}$  | <p><math>F_{rd}</math>=Froude Densimétrico de partículas; <math>S</math>=pendiente; <math>C^*</math>=coeficiente adimensional de Chézy; <math>U</math>=velocidad media de flujo; <math>D_m</math>= diámetro promedio; <math>\theta</math>= ángulo inclinación longitudinal de lecho; <math>\phi</math>=ángulo fricción interna partículas; <math>f_b</math>= factor fricción Darcy-Weisbach para radio hidráulico de fondo.</p> |
| <b>Yang S. (2005)</b>           | $C = \frac{g_t}{Vh} = k \frac{\gamma_s}{\gamma_s - \gamma} \frac{\tau_o}{Vh} \frac{u_*'^2 - u_{*c}^2}{w} ; k = \text{constante universal}=12.5$ <p><math>u_*'^2</math> =velocidad de corte debido a grano; <math>u_{*c}^2</math> =velocidad crítica de de Shields</p> $\frac{V}{u_*} = 2.5 \ln \left( \frac{11R}{2d_{50}} \right)$ | <p><math>C</math>=concentración sedimento total de fondo; <math>g_t</math>=transporte total de fondo en peso; <math>h</math>=radio hidráulico o calado; <math>V</math>=velocidad media; <math>\tau_o</math>=tensión de corte en fondo, <math>d</math>=diámetro sedimento; <math>w</math>=velocidad sedimentación partícula; <math>\gamma_s</math>=peso específico sedimento; <math>\gamma</math>=peso específico agua</p>       |
| <b>Smart y Jaeggi (1983)</b>    | $\phi = 4 \left[ \frac{D_{90}}{D_{30}} \right]^{0.2} S^{0.6} C^* \tau^* 0.5 \left[ \tau^* - \tau_{cj}^* \right] ; \tau_{cj}^* = \tau_c^* \cos(\arctan S) [1 - S / \tan \phi]$ <p>3%&lt;<math>S</math>&lt;25% y 2mm &lt;<math>D_m</math>&lt;10.5 mm</p>   | <p><math>\tau_c^*</math>= esfuerzo cortante crítico adimensional; <math>\tau^*</math>= esfuerzo cortante adimensional; <math>C^*</math>= coeficiente adimensional de Chézy; <math>S</math>=pendiente; <math>\phi</math>=ángulo de fricción interna de las partículas</p>  |

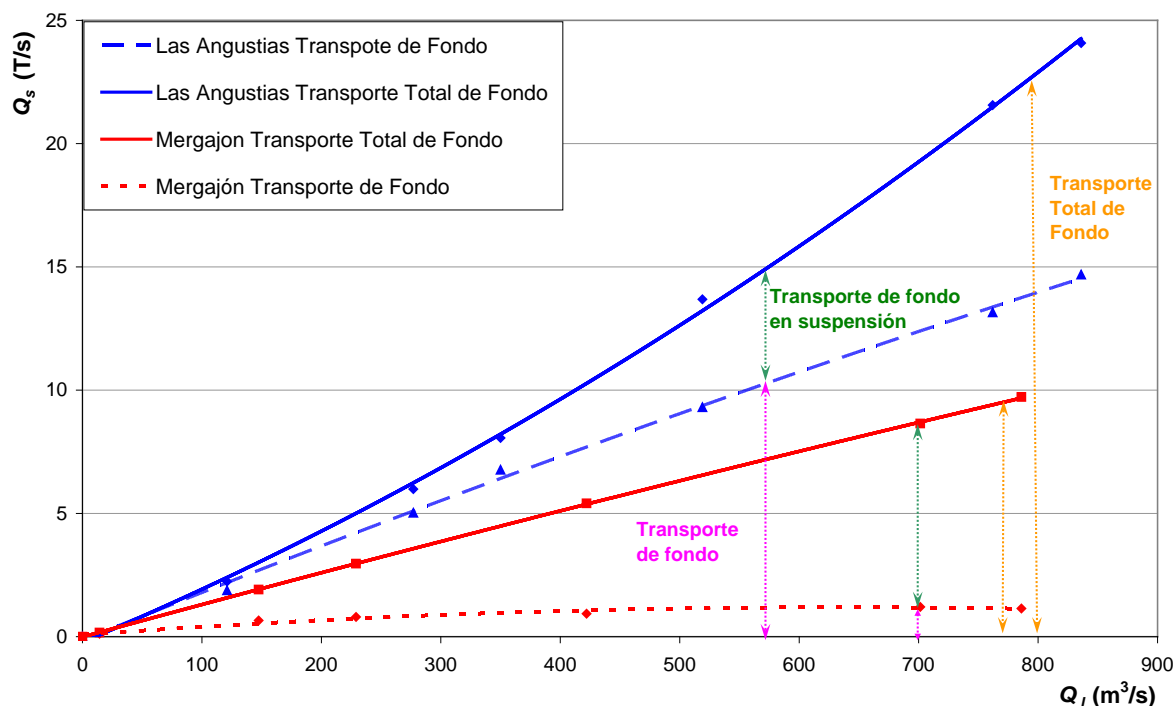
La Figura 9 presenta los resultados medios finales obtenidos de cada cuenca. Se aprecia que todas las subcuencas del Albuñón arrojan valores inferiores al de las Angustias, solo los obtenidos en el Mergajón son comparables al de Las Angustias. En general la diferencia entre ellos disminuye a medida que el caudal líquido aumenta.

También se ha representado la proporción que representa del transporte medio total, el transporte de fondo y de fondo en suspensión (Tabla 10 y Figura 10), cuyos porcentajes fueron obtenidos mediante la expresión de Einstein-Barbarossa. 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 16% para  $Q_{1,4}=121 \text{ m}^3/\text{s}$ ), proporción que va variando hasta llegar al 61% de frente al 39% para  $Q_{1000}=836 \text{ m}^3/\text{s}$ . En el Mergajón para bajos periodos de retorno ( $Q_{1,4} = 15 \text{ m}^3/\text{s}$ ) el transporte de fondo tiene un valor superior al de transporte de fondo en suspensión (71% vs. 29%) , sin embargo para caudales mayores ( $Q_{1000}=786 \text{ m}^3/\text{s}$ ) el transporte de fondo es inferior al de fondo en suspensión, tendencia invertida a la de Las Angustias.



**Figura 9.** Caudal sólido (T/s) en función del caudal líquido (m³/s) para todas las cuencas.

Aguirre et al. (2000) señala que para ríos pendientes entre 0,01 y 0,20, el transporte de fondo puede llegar a alcanzar un 50% del transporte total de fondo. En contraste con esto, en ríos con pendientes bajas el transporte de fondo se situaría alrededor de 5 a 20% del transporte total de fondo. La rambla del Mergajón, si bien se puede considerar como un río de montaña en función de su pendiente (0,027), tiene una curva granulométrica propia de un río tipo aluvial, muy distinta a la que presenta Las Angustias. Este hecho explicaría la tendencia invertida comentada.



**Figura 10.** Comparativa del transporte de fondo entre el Barranco de las Angustias y la Rambla del Mergajón.

Las ramblas del Albuñón Intermedia y la Hoya de España, aunque se pueden considerar propiamente como ríos de llanura, de acuerdo a los valores indicados en la Tabla 8, las tasas de transporte de fondo son más altas que las de fondo en suspensión, para todos los caudales. Este comportamiento podría ser debido a que los flujos en estas cuencas son más bajos que en Mergajón, y no son capaces de movilizar todo el transporte de fondo.

**Tabla 10.** Proporciones del transporte total de fondo para las distintas subcuencas.

| Cuenca     | $Q_{T1.4}$ (m³/s) | Transp. Fondo | Transp. Susp | $Q_{T1000}$ (m³/s) | Transp. Fondo | Transp. Susp. |
|------------|-------------------|---------------|--------------|--------------------|---------------|---------------|
| Angustias  | 121               | 84 %          | 16 %         | 836                | 61 %          | 39 %          |
| Mergajón   | 14                | 71 %          | 29 %         | 786                | 12 %          | 88%           |
| Intermedia | 3                 | 93%           | 7 %          | 277                | 55 %          | 45 %          |
| H. España  | 3                 | 95 %          | 5 %          | 210                | 71 %          | 29 %          |

## 5. Conclusiones

En este capítulo se ha realizado la caracterización hidrológica e hidráulica de tres cuencas mediterráneas, sitas en el Campo de Cartagena (Región de Murcia), empleando la metodología elaborada por Castillo et al. (2000 y 2009) en regiones semiáridas. Se han estudiado la Rambla del Mergajón, cuenca de montaña con características hidrológicas similares a la cuenca para la que fue realizada la metodología (Barranco de las Angustias), y las ramblas del Albuñón Intermedio y la Hoya de España con características propias de ríos de llanura o aluviales.

Para la caracterización hidrológica se han empleado dos tipos de programas, agregados y semidistribuidos (HEC-HMS), y distribuidos (MIKE-SHE). Los primeros resultados ofrecen valores coherentes para ciertos periodos de retorno.

Como conclusión en este aspecto, la recomendación del uso de modelos distribuidos (tipo MIKE-SHE) para mejorar el conocimiento de los procesos físicos ocurridos en cuencas semiáridas, y hacer notar la importancia de la determinación de  $T_{lag}$ ,  $T_c$  y del patrón de lluvia que representará la variabilidad espacial y temporal de la precipitación.

Con respecto a la caracterización y el cálculo de la capacidad de transporte de sedimentos, el estudio muestra que la metodología propuesta es adecuada para los ríos efímeros. Los resultados presentados apuntan a la importancia del 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.

Finalmente es importante señalar que para analizar y contrastar las distintas fórmulas de transporte de sedimentos y de rugosidad, se precisan cuencas piloto con instrumentos suficientes y adecuados.

## 8. Bibliografía

Ackers, P. y White, W.R. (1973). Sediment Transport: New Approach and Analysis. J. Hydraulics Division.

Aguirre-Pe J., Olivero M.L. y Moncada A.T. (2000). Transporte de sedimentos en cauces de alta pendiente. Ingeniería del Agua, 7(4), pp. 353-365.

ArcGIS v.9.2 (2006). Using ArcGIS Desktop. Enviromental Systems Research Insitute. Inc. ESRI. USA.

Bathurst, J.C. (1985). Flow resistance estimation in mountain rivers. J. Hydraulic Engineering, ASCE, 111(4), pp. 625-643.

Bathurst, J.C. (2002). At-a-site variation and minimum flow resistance for mountain rivers. Journal of Hydrology 269, pp. 11-26.

Bathurst J.C., Graf, H. y Cao, H.H. (1987). Bed load discharge equations for steep mountains rivers (Chapter 15). Sediment transport in gravel bed rivers, ed. John Wiley and Sons, N.Y, USA, pp. 453-491.

Branson, F.A. Gifford, G.F. Renard, K.G. and Hadley. (1981). Rangeland Hydrology. Society for Range Management, Kendall/Hunt Publishing Company, Dubuque, Iowa.

Beven, K. (1989). Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. Journal of Hydrology 105. pp. 157-172.

Castillo, L., Santos, F., Ojeda, J., Calderón, P. y Medina, J.M. (2000). Importancia del muestro y limitaciones de las formulaciones existentes en el cálculo del transporte de sedimentos. XIX IAHR, Córdoba, Argentina.

Castillo, L. (2004). Estimation of sediment transport and dominant flow in hyperconcentrated flows. Proc. of the ICHE, Brisbane, Australia.

Castillo, L. (2007). Discussion about prediction of bed material discharge. J. Hydraulic Research, 45 (2), pp. 425-428.

Castillo, L., Martín Vide, J.P. y Marín, M.D. (2009). Coeficientes de resistencia, transporte de sedimentos y caudal dominante en regiones semiáridas. Proc. of the I Jornadas de Ingeniería del Agua, JIA, CEDEX. Madrid.

- Castillo, L., y Marín, M.D. (2010). Caracterización hidrológica e hidráulica en regiones semiáridas. XXIV IAHR, Punta del Este, Uruguay.
- Castillo, L. y Marín, M.D. (2011). Characterization of Ephemeral Rivers. 34th IAHR World Congress. Brisbane. Australia.
- Colby, B.R. (1964). Practical Computations of Bedmaterial Discharge. J. Hydraul. Div. ASCE 90(HY2).
- Danish Hydraulic Institute (DHI). (2008). MIKE SHE. An integrated hydrological modeling framework-User Guide and Technical Ref. Manual.
- Einstein, H.A. y Barbarrosa, N. L. (1952). River Channels Roughness, ASCE Vol.117, pp. 1121-1132.
- Engelund, F. y Hansen, E. (1972). A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Streams. Teknisk Forlag, Copenhagen, Denmark.
- 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. J. Hydraulic Engineering, 116(11), pp. 1374-1387.
- García Flores, M. (1996). Resistencia al flujo en ríos de montaña. Proc. of the XVII IAHR Guayaquil, Ecuador.
- Grant, G.E. (1997). Critical flow constrains flow hydraulics in mobile-bed streams: A new hypothesis. Water Resources Research, Vol. 33, No. 2, pp. 349–358.
- Hec-GeoHMS v. 1.1. (2009). User's Manual. US Army Corps of Engineers.
- Hec-HMS v.3.5. (2010). User's Manual y Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers.
- Meyer-Peter, E. y Müller, R. (1948). Formulations of the Bed-load Transport. Proc. of the II IAHR, Stockholm, pp. 39-64.
- Michaud, J. Sorooshian, S. (1994). Comparison of simple versus complex distributed runoff models on a midsized semiarid watershed. Water Resour Research. 30(3), pp. 593-605.
- Mizuyama, T. y Shimohigashi, H. (1985). Influence of fine sediment concentrations on sediment transport rates (in Japanese). Japan Civil Engr. J. 27(1) pp. 46-49.
- Salas, J.D. (2000). Hidrología de zonas áridas y semiáridas. Ingeniería del Agua, 7(4), pp.409-429.
- Smart, G.M. y Jaeggi, M. (1983). Sediment Transport on Steep Slopes. V.A.W. Mitteil 64. Hydrologie und Glaziologie, ETH, Zurich, Swiss, p. 191.
- Témez, J. R. (1987). Cálculo hidrometeorológico 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, CEDEX-MOPT, 82, pp. 51-56.
- Van Rijn, L.C. (1987). Mathematical modelling of morphological processes in the case of suspended sediment transport. Delft Hydraulics Communication No. 382.
- 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 43(1), pp. 12-22.