

## **Análisis de la influencia que el estado de limpieza de los cauces tiene en las avenidas.**

### **Resumen**

Las avenidas son fenómenos naturales en los que los caudales de los ríos crecen sustancialmente en un intervalo corto de tiempo. Si bien se producen generalmente después de fuertes precipitaciones, ya sean torrenciales o continuadas, también se pueden deber a deshielo, a grandes desembalses por motivos de seguridad, o a una combinación de las anteriores. En algunos casos, los cauces de los ríos no son capaces de retener este aumento de caudal produciéndose inundaciones, las cuales pueden conllevar grandes pérdidas materiales, e incluso personales. En los últimos años la opinión pública está responsabilizando al estado de limpieza de los cauces de agravar la intensidad de las inundaciones, alegando que la vegetación existente no permite el adecuado drenaje de los caudales. Si bien es cierto que los obstáculos existentes en los cauces frenan el avance del agua, también reducen a su vez el tiempo de concentración de las cuencas, por lo que las ondas de avenidas tienden a ser menores. En este trabajo se aborda esta cuestión analizando la influencia que la resistencia al avance del flujo de los cauces tiene sobre el caudal pico de salida de una cuenca hidrográfica. Para ello se realiza una simulación hidrológica con un modelo distribuido en el que se determina el hidrograma de salida para los periodos de retorno de 25, 100 y 500 años. Para estas simulaciones se analiza cómo varía el valor del caudal pico, así como el tiempo que tarda en producirse el mismo a partir del comienzo de la precipitación, en función de la resistencia del cauce medida por el número de Manning. El caso de estudio es una rambla costera en Cartagena en la que se suelen producir frecuentes inundaciones, denominada Canteras. Los resultados indican que cuanto menor es la resistencia al flujo, es decir menos obstáculos existen en los cauces, mucho mayor es el caudal pico de la onda de avenida, al acumularse más rápido los caudales en la parte final de la rambla, lo que agravaría la inundación en esta zona. Este resultado desmitifica la creencia que cuantos menos obstáculos estén en los cauces, más rápido se desaguan los caudales y menor es la inundación. Por lo que, a la hora de establecer estrategias de limpiezas de cauces, o incluso dragados que pueden afectar negativamente a hábitats de alto valor ecológico, hay que realizar previamente estudios hidrológicos e hidráulicos integrales que analicen en profundidad esta cuestión en concreto.

**Palabras clave:** Hidrología Superficial, Manning, Inundaciones, Rambla, Segura.

## 1. Introducción

Las avenidas son fenómenos naturales en los que los caudales de los ríos crecen sustancialmente en un intervalo corto de tiempo. Si bien se producen generalmente después de fuertes precipitaciones, también se pueden deber a deshielo, a desembalses por motivos de seguridad, o a una combinación de las anteriores (Sikorska *et al.*, 2015). En algunos casos, los cauces de los ríos no son capaces de retener este aumento de caudal produciéndose inundaciones que pueden conllevar grandes pérdidas materiales, e incluso personales (La Opinión, 2016). En los últimos años la opinión pública está responsabilizando al estado de limpieza de los cauces de agravar la intensidad de las inundaciones, alegando que la vegetación existente no permite el adecuado drenaje de los caudales (Heraldo, 2015). Si bien es cierto que los obstáculos existentes en los cauces frenan el avance del agua, también reducen a su vez el tiempo de concentración de las cuencas, por lo que las ondas de avenidas tienden a ser menores.

Para evaluar cómo influye el estado de los cauces en las inundaciones se puede recurrir a la modelización hidrológica, en concreto a aquella cuyo fin es evaluar los caudales en tramos fluviales a partir de datos meteorológicos (Koriche & Rientjes, 2016). En estas modelizaciones se suele incluir el proceso hidráulico-hidrológico de propagación de caudales, que es el encargado de establecer cómo se van desplazando las ondas de avenida, calculadas previamente por el propio modelo, a través de diferentes elementos de la red fluvial, como son los cauces o los embalses. La propagación de caudales determina el tiempo que la onda de avenida va a tardar en atravesar cada elemento y, además, cuánto se va a atenuar el caudal pico de la misma a su salida (Haltas & Kavvas, 2009). A partir de esta información se van componiendo las ondas de avenidas desde aguas arriba hacia aguas abajo a lo largo de la red fluvial. La coincidencia temporal o no de los picos de estas ondas en las confluencias de la red fluvial será determinante en el valor final de la salida de la cuenca.

La simulación de la propagación de caudales se puede llevar a cabo mediante modelos hidráulicos o hidrológicos. Los primeros, más complejos, abordan el problema resolviendo ecuaciones fundamentales de hidráulica (o mecánica de fluidos) (Saleh *et al.*, 2013). Mientras que los segundos describen el fenómeno de forma sencilla con el uso de pocos parámetros, pero siempre cumpliendo la ecuación de balance o conservación de la masa (Schwanenberg & Montero 2016). Si bien la resolución numérica es distinta en función de la perspectiva empleada (hidráulica o hidrológica), la resistencia al flujo que ofrece el elemento estudiado y la capacidad de almacenar agua son siempre dos aspectos fundamentales. Para el caso concreto de cauces se suele cumplir que: i) cuanto mayor es la longitud mayor será el tiempo que tarda la onda de avenida en atravesarlo; ii) a mayor sección, mayor atenuación (laminación) al tener más capacidad; iii) cuanto mayor sea la resistencia al flujo, más será el tiempo de tránsito de la onda al frenar el flujo y mayor la atenuación ya que aumenta la sección mojada (Balamurugan & Bhallamudi, 2016). Esta resistencia se debe a los propios materiales con los que está compuesto el cauce más aquellos obstáculos dentro del mismo que frenan el flujo. Entendiendo obstáculos como aquellos elementos que dificultan la circulación del agua, como es la propia vegetación, cambios de sección, irregularidades del terreno, existencia de parques, cañas, árboles caídos, basura, escombros, entre otros (Cowan, 1956; Aldridge & Garret, 1972).

En este trabajo se analiza el efecto de la resistencia al flujo por parte de los cauces sobre la onda de avenida de salida de una cuenca hidrográfica (hidrograma). Para ello se recurre a la modelización hidrológica construyendo un modelo hidrometeorológico distribuido con el que se estima el caudal de salida de una cuenca. Dicho modelo tiene implementado la propagación de caudales en su red hidrográfica principal mediante un método hidrológico cuya resistencia al flujo la establece el número de Manning, parámetro que representa la rugosidad del cauce en los cálculos hidráulicos en lámina libre (Zhang *et al.*, 2011). La variación de este parámetro en los diferentes tramos de cauce estudiados en el modelo hidrometeorológico va a cuantificar la influencia que el mismo tiene sobre el hidrograma de salida de la cuenca. Los principales valores analizados en dicho hidrograma son el valor del caudal pico y el tiempo que tarda en producirse el mismo a partir del comienzo de la precipitación (tiempo al pico). Además, se van a plantear diferentes escenarios de tormentas (periodos de retorno de 25, 100 y 500 años), para así ver también cómo influye la intensidad de la tormenta en este análisis.

Como caso de estudio se ha seleccionado la cuenca de la rambla de Canteras en la Demarcación Hidrográfica del Segura (Grindlay *et al.*, 2011), cuyo tramo final suele tener problemas de inundaciones. De hecho, está declarado como zona inundable (MAGRAMA, 2016). Actualmente, el proyecto de encauzamiento de la rambla está sin terminar, ya que sólo se ha realizado el tramo inicial y final. Por lo que este estudio también puede servir para mejorar el conocimiento sobre el comportamiento hidrológico-hidráulico de su red fluvial, y puede ser de ayuda para un adecuado diseño del tramo intermedio que queda por proteger.

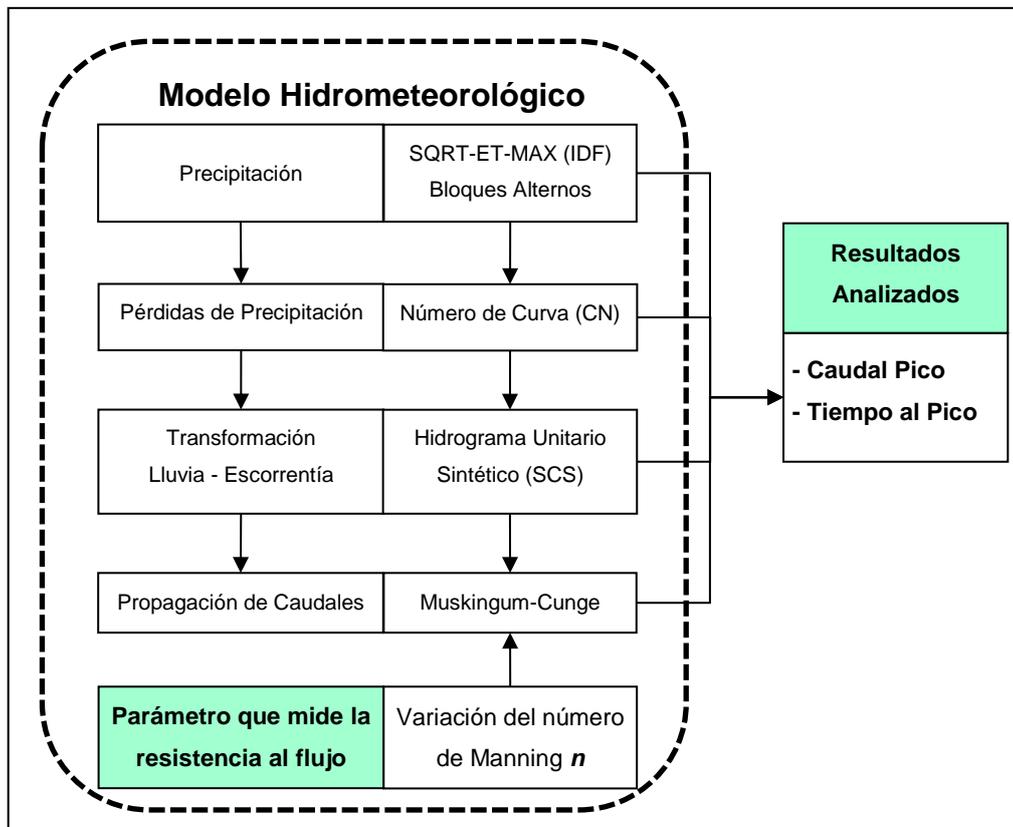
## 2. Metodología

### 2.1. Esquema metodológico

El primer paso de la metodología es diseñar un modelo hidrometeorológico distribuido (Pellicer-Martínez & Martínez-Paz, 2014) con el que determinar el hidrograma de salida de una cuenca. Este tipo de modelos son simulaciones matemáticas que estiman los caudales que genera una tormenta acontecida sobre una cuenca (Koriche & Rientjes, 2016). Se basan en la ecuación de balance de agua en la cuenca y consideran los flujos de agua (denominados habitualmente como procesos hidrológicos) más relevantes en una avenida: precipitación, pérdidas de precipitación a corto plazo (interceptación, almacenamiento en depresiones,...), transformación de la lluvia en escorrentía superficial y propagación de caudales. Cada uno de estos cuatro procesos, que son los que se han tenido en cuenta en el modelo diseñado, se evalúa con una formulación matemática específica que se muestra en el siguiente esquema metodológico (Figura 1), y cuya descripción se desarrolla en los siguientes epígrafes.

El segundo paso, una vez definido el modelo hidrometeorológico que va a proporcionar el caudal de salida en la cuenca, se realiza un análisis de sensibilidad del parámetro que monitoriza la resistencia del cauce al flujo del agua, que para el método seleccionado es el número de Manning (Zhang *et al.*, 2011). Por lo que se hace variar dicho parámetro entre el rango de valores posibles para cuantificar cómo afecta su valor al hidrograma de salida de toda la cuenca, en concreto a dos de sus valores más relevantes: el caudal pico y el tiempo al pico.

Figura 1. Esquema metodológico.



Fuente: Elaboración propia.

## 2.2. Modelo hidrometeorológico

Como se acaba de indicar, el modelo hidrometeorológico aglutina cuatro procesos hidrológicos (precipitación, pérdidas de precipitación, transformación lluvia-escorrentía, propagación de caudales). A continuación se define brevemente cada uno de estos procesos así como el método matemático seleccionado para su simulación.

### 2.2.1. Precipitación

La precipitación es la variable que pone en funcionamiento el modelo de simulación, y se mide como altura de agua lluvia (mm). En el modelo se introduce en forma de función en

el tiempo, siendo ésta generalmente discontinua, definiéndose para varios intervalos de tiempo (p.e. cada varios minutos). A la hora de definir esta función se recurre a registros históricos, los cuales pueden ser introducidos directamente en el modelo. Sin embargo, una práctica habitual es realizar un análisis estadístico de dichos registros, tanto temporales como espaciales. A partir de estos análisis se derivan expresiones matemáticas con las que es posible establecer la función de precipitación en un punto, o incluso calcularla de forma distribuida en el espacio (Kimura *et al.*, 2014). Es decir, se determina una precipitación o tormenta de diseño específica para la cuenca de estudio.

Generalmente para el cálculo de avenidas se recurre a un análisis de la frecuencia ( $f$ ) de ocurrencia de las tormentas de mayor intensidad acontecidas en un año natural, con el fin de establecer el valor total de la tormenta para un periodo de retorno ( $T$ ) determinado (inverso de la frecuencia:  $f=1/T$ ). Este análisis se realiza ajustando los datos registrados a una función de distribución para variables extremas (Tromel & Schonwiese, 2005), entre las que destacan las funciones Gumbel (Evin *et al.*, 2011) y SQRT-ET-MAX (Etoh *et al.*, 1987).

Una vez determinadas estas funciones de distribución para la cuenca de estudio es necesario ajustar el valor que proporcionan al tamaño de la misma, ya que cuanto menor es la cuenca de estudio, mayor es la probabilidad de que la intensidad de la tormenta que le afecte por completo sea mayor. Para ello se suele recurrir a las conocidas curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) que, como su propio nombre indican, proporcionan la intensidad de una tormenta para una duración y frecuencia preestablecidas (Liew *et al.*, 2014). El valor de la duración de la tormenta se suele fijar para el tiempo de concentración de la cuenca (Sharifi & Hosseini, 2011), asumiendo que a partir de ese momento toda la lluvia que ha caído sobre la cuenca está presente en el caudal de salida de la misma. Por último queda diseñar la función discontinua de la precipitación en el tiempo, que generalmente se define con patrones creados tras el estudio de tormentas registradas (Kimoto *et al.*, 2011).

Para este trabajo, la metodología seguida es la recomendada por la legislación que regula los estudios de inundabilidad en la zona (BORM, 2007), con el fin de obtener valores similares a los que obtendrían los organismos competentes en esta materia (CHS, 2016). El volumen total de la tormenta se ha definido con la función de distribución de probabilidad SQRT-ET-MAX (Etoh *et al.*, 1987) definida para toda España (Ferrer & Ardiles, 1994). Con los valores obtenidos de esta función para los periodos de retorno de 25, 100 y 500 años se definen las curvas IDF utilizando la formulación propuesta por la Instrucción de Drenaje Superficial (BOE, 2016).

La duración de la tormenta la establece el tiempo de concentración de la cuenca ( $T_c$ ), determinado por la formulación de Témez (1978). Y el histograma de las tres tormentas de diseño que se consideran, una para cada periodo de retorno indicado previamente, se ha definido por el método de tormenta de bloques alternos asimétrica (Gong *et al.*, 2016).

### 2.2.2. Pérdidas de precipitación

No toda la precipitación que cae sobre la tierra se transforma finalmente en escorrentía superficial que discurre por los cauces de una cuenca. Si existe cubierta vegetal, una parte queda retenida en la misma y, transcurrido un cierto tiempo se evapora, volviendo a la atmósfera (Linhoss & Siegert, 2016). El resto de volumen que no es atrapado por la vegetación entra en contacto con el suelo provocando un aumento de su humedad y, una

vez que alcanza la saturación o la tasa máxima de infiltración (Mao *et al.*, 2016), el agua de lluvia se transforma en escorrentía superficial. Asimismo, en pequeñas depresiones endorreicas se almacena agua que tampoco formará parte de la escorrentía y terminará evaporándose o infiltrándose hacia los acuíferos. La suma de estos volúmenes de precipitación que no alcanzan los cauces se suele denominar abstracciones iniciales (Estrela *et al.* 1995).

Existen numerosas formulaciones matemáticas, tanto empíricas como físicas, para determinar el volumen retenido por la vegetación (interceptación) (Linhoss & Siegert, 2016), la tasa de infiltración en el suelo (Mao *et al.*, 2016), y la acumulación en pequeñas depresiones (Ajmal *et al.*, 2016). Pero una de las metodologías más usadas es la del Número de Curva (CN) (Li *et al.*, 2015; Mishra *et al.*, 2014), que simula el efecto de estos tres procesos de forma conjunta (Bauwe *et al.*, 2016), y es la utilizada en este trabajo.

El CN descompone las pérdidas de precipitación en abstracción inicial (engloba todos los fenómenos de pequeñas pérdidas tales como, interceptación, almacenamientos superficiales en depresiones e infiltración inicial) y tasa de infiltración. Se basa en la ecuación de balance (3) y se define a partir de dos hipótesis:

1. La relación entre la precipitación neta ( $P_n$ ) y la máxima precipitación susceptible de generar escorrentía ( $P-I_a$ ) es equivalente a la relación entre la infiltración real acumulada ( $F_a$ ) y la cantidad máxima de retención del suelo ( $S$ ) (1).

$$\frac{P_n}{P-I_a} = \frac{F_a}{S} \quad (1)$$

2. La segunda hipótesis se basa en que la cantidad de abstracción inicial ( $I_a$ ) es una fracción de la cantidad máxima potencial de retención ( $S$ ) (2).

$$I_a = \lambda S \quad (2)$$

La ecuación de balance indica que la precipitación total ( $P$ ) es igual a la suma de la precipitación neta ( $P_n$ ), las abstracciones iniciales ( $I_a$ ) y la infiltración real acumulada ( $F_a$ ) (3):

$$P = P_n + I_a + F_a \quad (3)$$

Al parámetro  $\lambda$ , que representa un porcentaje de  $S$  en tanto por uno entre 0,1 y 0,3, se le asigna un valor recomendado de 0,2 (Mishra & Singh, 2004). Al combinar las ecuaciones (1) y (3) resulta la siguiente formulación que establece la precipitación neta:

$$P_n = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a+S} \quad (4)$$

Ecuación válida siempre que  $P \geq I_a$ , de lo contrario el caudal es nulo. El parámetro  $S$  tiene un rango de variación muy extenso ( $0 \leq S \leq \infty$ ), que se puede expresar en función de un parámetro adimensional CN, que varía entre 0 y 100 (5). Si las unidades de todas las variables son pulgadas, dicha relación queda de la siguiente forma:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10 \quad (5)$$

Mientras que si las unidades son mm se expresa (6):

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (6)$$

### 2.2.3. Transformación lluvia-escorrentía

Una vez definida la precipitación neta de una tormenta se ha de establecer cómo ésta se va transformando en escorrentía. Para ello se recurre a un hidrograma unitario sintético (Patel *et al.*, 2016), dada la imposibilidad de definir un hidrograma unitario específico para la cuenca de estudio ya que no existen mediciones de caudal. Dicho hidrograma unitario sintético indica, de forma adimensional, cómo se transforma la precipitación en escorrentía a lo largo del tiempo. Para este trabajo en concreto, entre las diferentes tipologías existentes (Wilkerson & Merwade, 2010), se ha seleccionado el propuesto por el SCS (SCS, 1972; Paudel *et al.*, 2009), ya que su uso también está recomendado por la legislación que regula los estudios de inundabilidad de la zona de estudio (BORM, 2007).

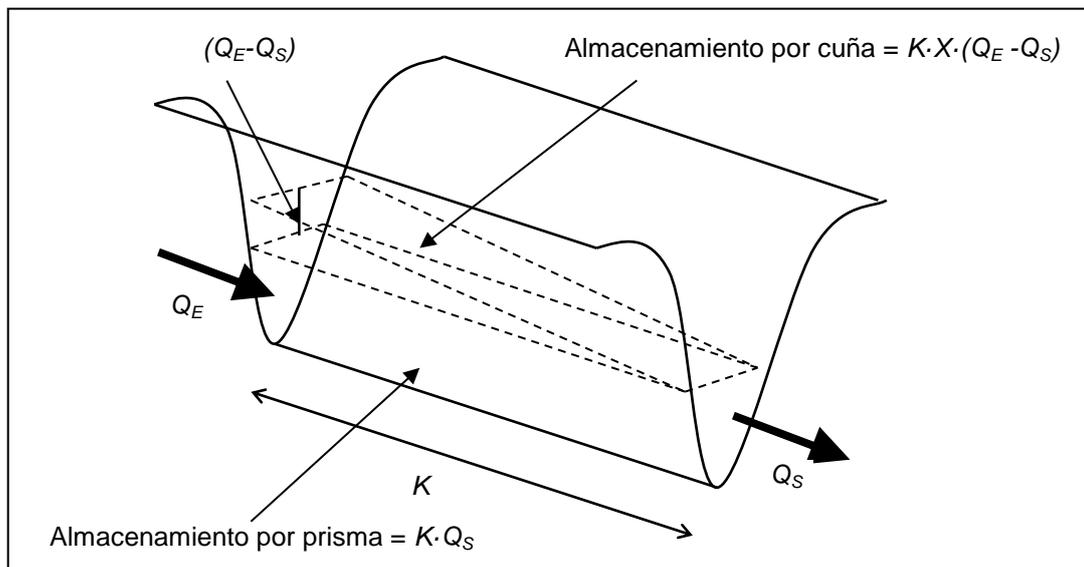
Los valores del hidrograma son específicos para cada cuenca y se establecen a partir de dos parámetros concretos: el tiempo para la punta ( $T_p$ ), o también conocido como tiempo al pico ( $T_{lag}$ ), y el caudal pico ( $Q_p$ ). El tiempo al pico se suele establecer como un valor proporcional al tiempo de concentración de la cuenca ( $T_c$ ), y para este caso se toma el que habitualmente se emplea para este hidrograma unitario:  $T_{lag} = 0,35 \cdot T_c$ . El tiempo de concentración se calcula aquí por el método empírico de Témez (1978), si bien se podría haber empleado otra de las metodologías existentes (Sharifi & Hosseini, 2011).

### 2.2.4. Propagación de caudales

Tal y como se ha comentado previamente en la introducción, la propagación de caudales sirve para caracterizar cómo avanza una onda de avenida a través de diferentes elementos de la red fluvial, como son los cauces o los embalses. Con su estudio se analiza principalmente el tiempo que tarda una onda en recorrer dichos elementos y la laminación que ha sufrido el caudal pico de la misma a su salida (Haltas & Kavvas, 2009).

Para el caso de estudio se ha implementado el método hidrológico de Muskingum-Cunge, que determina la propagación de caudales mediante expresiones que relacionan el caudal de entrada ( $Q_E$ ) con el de salida ( $Q_S$ ) del tramo a partir de las características geométricas del mismo (Schwanenberg & Montero 2016). Desarrollado a partir del método de Muskingum describe el fenómeno de laminación estimando dos almacenamientos dentro del cauce conforme avanza la onda del hidrograma (Moghaddam *et al.*, 2016): uno por prisma y otro por cuña. El almacenamiento por prisma representa el caudal base del tramo estudiado, y el almacenamiento por cuña es el avance o el retroceso de la onda de avenida a través del tramo, estando definida su pendiente por un coeficiente  $X < 1$  (Figura 2).

Figura 2. Almacenamientos del método de Muskingum-Cunge.



Fuente: elaboración propia.

La resolución numérica del problema de propagación se lleva a cabo por diferencias finitas, dividiendo cada tramo estudiado en intervalos espaciales. Los valores de  $K$  y  $X$  dependen (además de la longitud de dichos intervalos) de la celeridad de avance de la onda de avenida, que depende a su vez de la sección y número de Manning  $n$  del cauce, y de la pendiente del tramo (Zhang *et al.*, 2011).

### 3. Cuenca de Canteras en la Demarcación Hidrográfica del Segura.

La metodología descrita se ha puesto en práctica en la cuenca costera de Canteras, ubicada dentro de la Demarcación Hidrográfica del Segura (Figura 3). Presenta un clima semiárido (Grindlay *et al.*, 2011), pudiendo ser la precipitación media anual inferior a 200 mm/año. Sin embargo, a pesar de estos bajos registros de lluvia, la mayor parte de ésta se produce generalmente de forma torrencial. Estas características pluviométricas hacen que la red fluvial esté compuesta por ramblas en las que se producen caudales esporádicos, siendo algunos de ellos de gran virulencia (García-Pintado *et al.*, 2009).

La cuenca de Canteras tiene una extensión de poco más de 9 Km<sup>2</sup> y desemboca en la rambla de Benipila, justo antes de que esta última desemboque en el mar. La longitud del cauce principal es de 4,5 Km y tiene una pendiente media de 0,0374 (m/m). Los principales usos del suelo son agrícolas y forestales, pero existen núcleos urbanos en la margen izquierda del cauce principal y en el tramo final del mismo. De hecho, como se adelantó en la introducción, este tramo final está declarado como zona inundable (MAGRAMA, 2016) y existe un proyecto de encauzamiento aún sin completar.

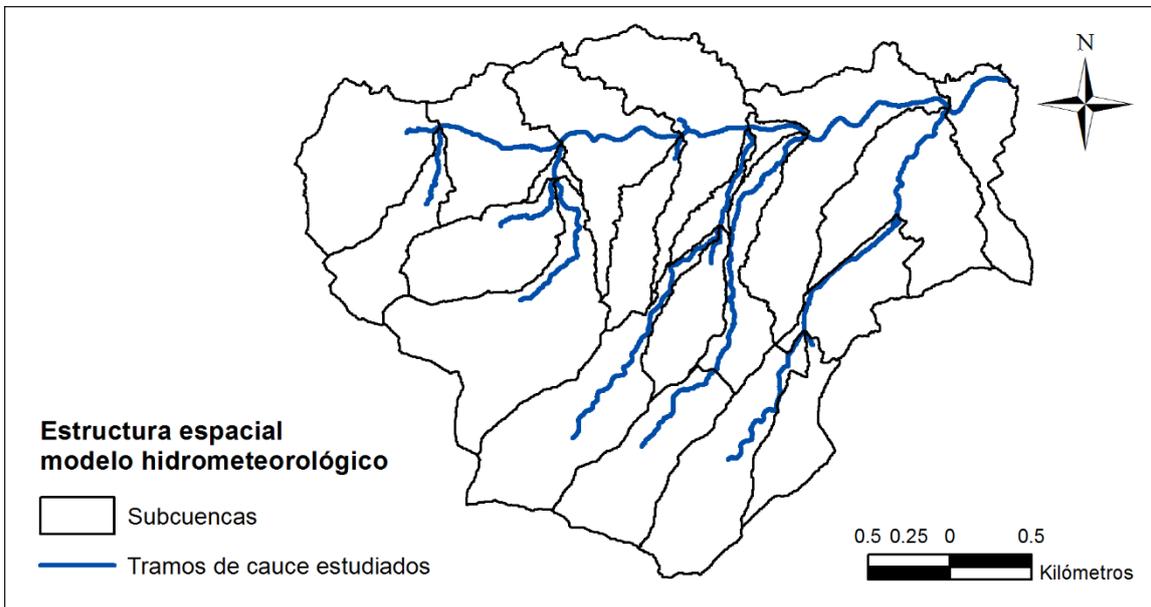
Figura 3. Localización zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

La información utilizada para determinar las características geométricas de la cuenca (delimitación de subcuencas, área de cada una de ellas, tiempo de concentración, longitud de los cauces, entre otras) procede del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) de la Región de Murcia (IDE, 2016). A partir de éste y con ayuda de Sistemas de Información Geográfica (SIG) se ha construido un modelo distribuido con 21 subcuencas y 12 tramos, siendo en éstos últimos en donde se va a hacer variar la resistencia al flujo (Figura 4).

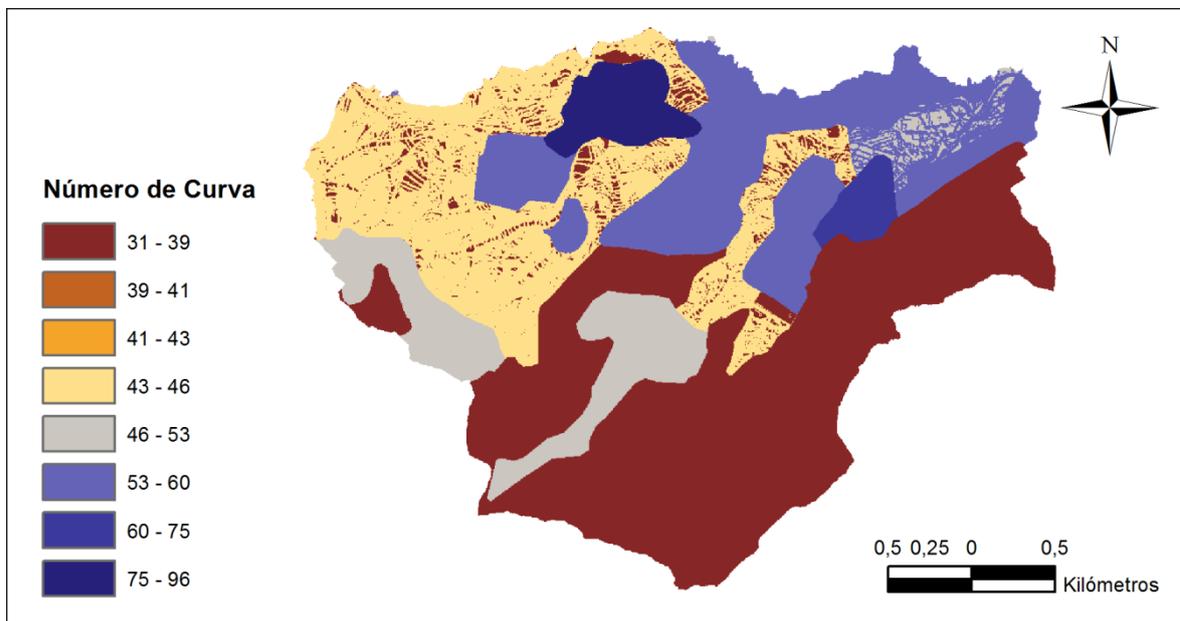
**Figura 4. Distribución espacial del modelo hidrometeorológico implementado en Hec-HMS.**



Fuente: Elaboración propia.

Para establecer las pérdidas de precipitación en cada subcuenca se ha realizado un cálculo distribuido en el espacio del *CN* (Estrela *et al.*, 1995) a partir del MDE (IDE, 2016), al mapa edafológico de la Región de Murcia (CARM, 2008) y a la clasificación de usos del suelo CORINE 2006 (Reif & Hanzelka, 2016) (Figura 5). La tormenta de diseño para cada periodo de retorno (25, 100 y 500) se ha determinado siguiendo la metodología descrita previamente. La duración de la tormenta se ha establecido en 2 horas, que es un valor aproximado al tiempo de concentración de la cuenca. Con las curvas IDF se ha distribuido la tormenta en 24 intervalos de 5 minutos. Las intensidades máximas para el intervalo central de cada periodo de retorno (25, 100 y 500) son 18,7, 25,4 y 34,2 mm/h, respectivamente. Mientras que la precipitación acumulada para cada tormenta es 77, 104 y 140 mm. La transformación lluvia-escorrentía se ha realizado por el método también indicado en la metodología (BORM, 2007). El número de Manning no tiene un valor fijo, ya que se hace variar entre sus valores extremos posibles (Cowan, 1956; Aldridge & Garret, 1972) con el fin de realizar el análisis pretendido en este trabajo. Por último, indicar que el modelo hidrometeorológico construido a partir de esta información se ha construido con la herramienta informática de modelización hidrológica Hec-HMS (Sabzevari, *et al.*, 2010).

Figura 5. Distribución espacial del parámetro Número de Curva (*CN*).



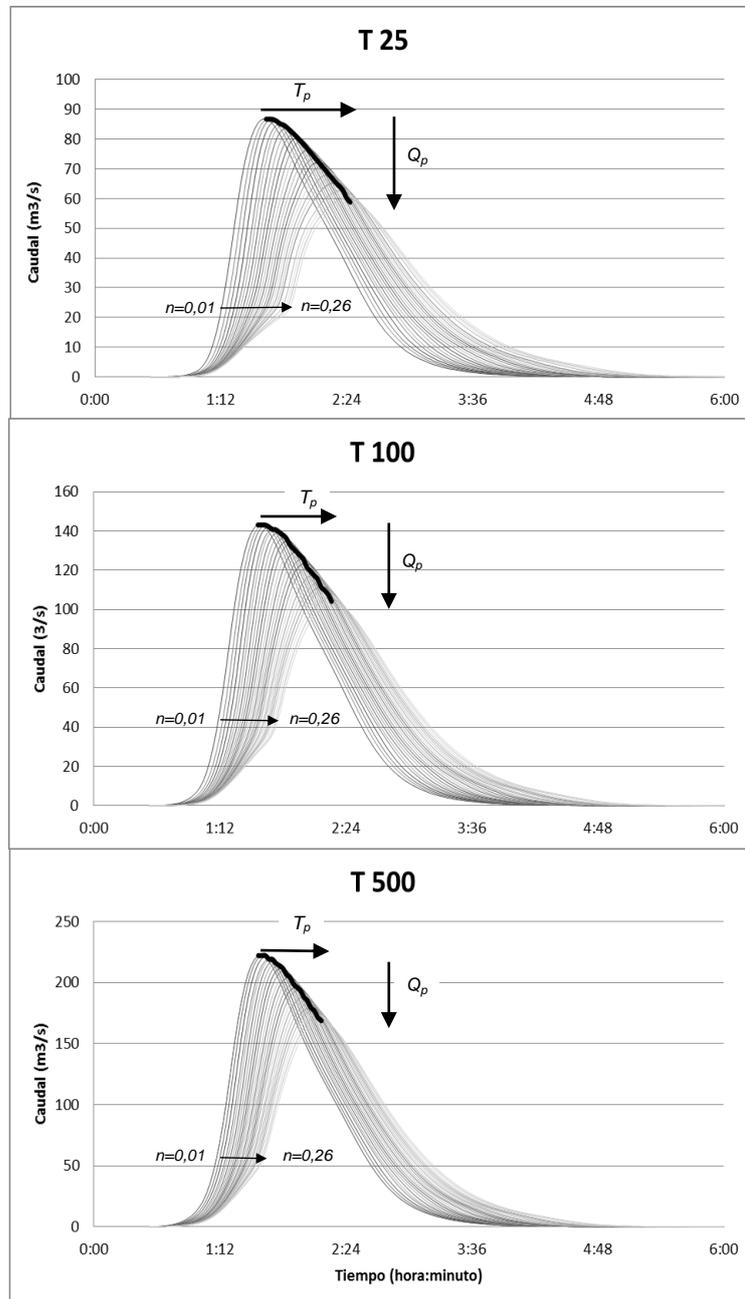
Fuente: Elaboración propia.

## 4. Resultados

El modelo hidrometeorológico creado para cada una de las tres tormentas de diseño establecidas en función del periodo de retorno  $T$  (25, 100 y 500), se simula 26 veces haciendo variar el número de Manning entre los valores extremos de 0,01 y 0,26 en intervalos de 0,1. Para cada una de estas 26 simulaciones se representa el hidrograma de salida de la cuenca de Canteras, agrupando los resultados de cada periodo retorno en una gráfica (Figura 7). En esta representación se marca en trazo más grueso la línea que envuelve los 26 caudales pico obtenidos para cada número de Manning, lo que demuestra que conforme aumenta el valor del mismo, disminuye el caudal pico y se retarda la onda de avenida. De hecho para el periodo de retorno de 25 años, se pasa de un caudal pico máximo de  $86,7 \text{ m}^3/\text{s}$  a un mínimo de  $58,8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Lo que supone un descenso del 32%. Además, el tiempo al pico pasa de 1:38 (hora:minuto) a 2:26 (hora:minuto), lo que supone un retardo de casi una hora (48 minutos). Este descenso del caudal pico también se produce para los periodos de retorno de 100 (27%) y 500 (24%) años, pero es ligeramente inferior. De estos resultados también se observa que a mayor caudal, menor es el retardo del pico de la onda de avenida, ya que de 48 minutos para  $T = 25$  años, se reduce a 35 minutos para  $T = 500$  años.

Hay que resaltar que los descensos del caudal pico entre los primeros valores de número de Manning (0,01-0,05), que son los que habitualmente se utilizan en los cálculos hidrológicos para cuencas con tramos fluviales encauzados o con poca vegetación y obstáculos, son pequeños en términos relativos. Por lo que, en general, los resultados para una cuenca con los cauces recubiertos de hormigón ( $n=0,012$ ) o de arbustos ( $n=0,05$ ) van a proporcionar resultados similares. Sin embargo, a partir de valores de  $n=0,07$ , el descenso del caudal pico es progresivo, por lo que para que los obstáculos en los cauce sean efectivos han de generar una resistencia al flujo que implique valores de  $n$  superiores a 0,10.

Figura 7. Variación del caudal pico y del tiempo de rezago en función de  $n$ . Cada gráfica recoge los 26 hidrogramas reproducidos para cada periodo de retorno, haciendo variar el número de Manning entre 0,01 y 0,26 con intervalos de 0,01.



Fuente: Elaboración propia.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se ha evaluado cómo influye el estado de limpieza de los cauces a la formación y propagación de caudales de avenida. Para ello se ha diseñado un modelo hidrometeorológico que simula los principales procesos hidrológicos implicados en la generación de avenidas debidas a fuertes precipitaciones (BORM, 2007). Entre estos procesos, se ha estudiado la propagación de caudales, ya que es la encargada de establecer el tiempo de tránsito de las ondas de avenida por los tramos de la red fluvial y la atenuación de sus caudales pico a la salida de los mismos. Su modelización se ha realizado con el método de Muskingum-Cunge, que establece la resistencia al flujo por parte del cauce con el conocido parámetro de número de Manning  $n$ . Por lo que se ha cuantificado la afección del valor de este parámetro en las principales características del hidrograma de salida: el caudal pico y el tiempo al pico. Este desarrollo metodológico se ha puesto en práctica en la cuenca de Canteras, una rambla costera de la Demarcación hidrográfica del Segura con recurrentes problemas de inundación, y se han tomado tres tormentas de diseño con periodo de retorno diferente (25, 100 y 500) como referencia.

Los resultados obtenidos de las simulaciones indican que cuanto menor es la resistencia al flujo, es decir menos obstáculos existen en los cauces, mucho mayor es el caudal pico de la onda de avenida, al acumularse más rápido los caudales en la parte final de la rambla, lo que agravaría la inundación en esta zona. También revelan que este efecto de atenuación es independiente de la intensidad de la precipitación, aunque se va reduciendo conforme aumenta la intensidad de la tormenta. Por tanto, estos resultados ponen en duda la creencia que cuanto más despejados estén los cauces (menor  $n$ ), la inundación es menor ya que se desaguan más rápido los caudales. La reducción de la resistencia al flujo en los cauces permite siempre una mayor capacidad de desagüe de los mismos, pero hay que tener en cuenta que se puede estar desplazando el problema hacia aguas abajo. Asimismo, aumentar la velocidad del agua propicia erosiones en las márgenes de los cauces, lo que incrementa la capacidad destructiva de la avenida.

Del caso práctico se derivan otras consideraciones generales a la hora de establecer estrategias de limpiezas de cauces, o incluso dragados, en fechas previas a la temporada en la que las avenidas son más frecuentes (deshielo, lluvias torrenciales, entre otras). En estos casos, se tienen que planificar las actuaciones sobre los cauces a partir de los resultados de estudios hidrológicos e hidráulicos previos que analicen, de forma integral, la evolución de las avenidas a lo largo de toda la red fluvial. Ya que el coste económico, y ecológico, de ciertas actuaciones de limpieza, puede ir acompañado de un agravamiento de las inundaciones aguas abajo de las zonas afectadas.

## 6. Referencias

- Ajmal, M., Kim, T.W., Ahn, J.H. 2016. Stability assessment of the curve number methodology used to estimate excess rainfall in forest-dominated watersheds. *Arabian Journal of Geosciences*, 9(5).
- Aldridge, B.N. & Garrett, J.M. 1973. Roughness coefficients for stream channels in Arizona. U.S. Geological Survey. Open-file Report, 87 pp.

- Balamurugan, M. & Bhallamudi, S.M. 2016. Flood routing in an ephemeral channel with compound cross-section. *Sadhana-Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 41(7): 771-785.
- Bauwe, A., Kahle, P., Lennartz, B. 2016. Hydrologic evaluation of the curve number and Green and Ampt infiltration methods by applying Hooghoudt and Kirkham tile drain equations using SWAT. *Journal of Hydrology*, 537: 311-321.
- BOE. 2016. Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2-IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras. *Boletín Oficial del Estado*, 60: 18882-19023.
- BORM. 2007. Decreto 258/2007, de 13 de julio, por el que se establece el contenido y procedimiento de los estudios de inundabilidad en el ámbito del Plan de Ordenación Territorial del Litoral de la Región de Murcia. *Boletín Oficial de la Región de Murcia*, 173: 23145-23165.
- CARM. 2008. Proyecto NATMUR-08. Vuelo fotogramétrico digital y levantamiento LIDAR de la Región de Murcia. Disponible en: <http://www.murcianatural.carm.es/natmur08/>
- CHS. 2016. Memoria del Plan de Cuenca de la Cuenca del Segura. Ciclo de planificación 2015-2021. Confederación Hidrográfica del Segura. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Murcia.
- Cowan, W.L. 1956. Estimating Hydraulic Roughness Coefficients. *Agricultural Engineering*, 37(7): 473-475.
- Etoh, T., Murota, A., Nakanishi, M. 1987. SQRT-Exponential Type Distribution of Maximum. Incl. en *Hydrologic Frequency Modelling. Proceedings of the International Symposium on Flood Frequency and Risk Analysis*. May 1986. Baton Rouge, p. 253-264. Reidel.
- Estrela, T., Ferrer, M., Ardiles, L. 1995. Estimation of precipitation-runoff regional laws and runoffs maps in Spain using a Geographical Information System. *International Hydrological Programme (IHP). UNESCO FRIEND AMHY*. Thessaloniki, Greece.
- Evin, G., Merleau, J., Perreault, L. 2011. Two-component mixtures of normal, gamma, and Gumbel distributions for hydrological applications. *Water Resources Research*, 47, W08525.
- Ferrer, F.J. & Ardiles, L. 1994. Análisis estadístico de las series anuales de máximas lluvias diarias en España. *Ingeniería Civil*, 95: 87-100.
- García-Pintado, J., Barbera, G.G., Erena, M., Castillo, V.M. 2009. Calibration of structure in a distributed forecasting model for a semiarid flash flood: Dynamic surface storage and channel roughness. *Journal of Hydrology*, 337(1-2):165-184.
- Gong, Y.W., Liang, X.Y., Li, X.N., Li, J.Q., Fang, X., Song, R.N. 2016. Influence of Rainfall Characteristics on Total Suspended Solids in Urban Runoff: A Case Study in Beijing, China. *Water*, 8(7): n° 278.
- Grindlay, A.L., Zamorano, M., Rodríguez, M.I., Molero, E., Urrea, M.A. 2011. Implementation of the European Water Framework Directive: Integration of hydrological and regional planning at the Segura River Basin, southeast Spain. *Land Use Policy*, 28(1): 242-256.

- Haltas, I. & Kavvas, M.L. 2009. Ensemble-Averaged Flow Routing in Channel Networks: Kinematic Wave Equation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(7): 655-662.
- Heraldo. 2016. Los afectados por las riadas exigen indemnizar los daños y la limpieza del río "con carácter de urgencia". Periódico digital "Heraldo". Crecida del río Ebro (10-03-2015). Disponible en: [http://www.heraldo.es/noticias/aragon/zaragoza\\_provincia/2015/03/10/los\\_afectados\\_por\\_las\\_riadas\\_exigen\\_limpieza\\_del\\_rio\\_con\\_caracter\\_urgencia\\_344596\\_1101025.html](http://www.heraldo.es/noticias/aragon/zaragoza_provincia/2015/03/10/los_afectados_por_las_riadas_exigen_limpieza_del_rio_con_caracter_urgencia_344596_1101025.html)
- IDE. 2016. Infraestructura de Datos Espaciales de la Región de Murcia. Vuelo fotogrametrico digital y levantamiento LIDAR de la Región de Murcia. Disponible en: <http://iderm.imida.es/iderm/>
- Kimoto, A., Canfield, H.E., Stewart, D. 2011. Comparison of Synthetic Design Storms with Observed Storms in Southern Arizona. *Journal of Hydrology*, 16(11): 935-941.
- Kimura, N., Tai, A., Chiang, S., Wei, H.P., Su, Y.F., Cheng, C.T., Kitoh, A. 2014. Hydrological Flood Simulation Using a Design Hyetograph Created from Extreme Weather Data of a High-Resolution Atmospheric General Circulation Model. *Water*, 6(2): 345-366.
- Koriche, S.A. & Rientjes, T. H. M. 2016. Application of satellite products and hydrological modelling for flood early warning. *Physics and Chemistry of the Earth*, 93: 12-23.
- La Opinión. 2016. Cuarenta y tres años de la peor riada del siglo XX en la Región. Periódico digital "La Opinión". Puerto Lumbreras y Lorca recuerdan la tragedia de la Rambla de Nogalte que dejó 100 muertos (19-10-2016). Disponible en: <http://www.laopiniondemurcia.es/municipios/2016/10/19/cumplen-43-anos-riada-causo/775993.html>
- Li, J., Wang, Z.G., Liu, C.M. 2015. A combined rainfall infiltration model based on Green-Ampt and SCS-curve number. *Hydrological Processes*, 29(11): 2628-2634.
- Liew, S.V., Raghavan, S.V., Liong, S.Y. 2014. How to construct future IDF curves, under changing climate, for sites with scarce rainfall records? *Hydrological Processes*, 28(8): 3276-3287.
- Linhoss, A.C. & Siebert, C.M. 2016. A comparison of five forest interception models using global sensitivity and uncertainty analysis. *Journal of Hydrology*, 538: 109-116.
- MAGRAMA. 2016. Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. Disponible en: <http://www.magrama.gob.es/es/agua/temas/gestion-de-los-riesgos-de-inundacion/snczi/>
- Mao, L.L., Li, Y.Z., Hao, W.P., Zhou, X.N., Xu, C.Y., Lei, T.W. 2016. A new method to estimate soil water infiltration based on a modified Green-Ampt model. *Soil & Tillage Research*, 161: 31-37.
- Mishra, S.K., & V.P. Singh. 2004. Long-term hydrological simulation based on the Soil Conservation Service curve number. *Hydrological Processes*, 18(7): 1291-1313.
- Mishra, S.K. Chaudhary, A. Shrestha, R.K., Pandey, A., Lal, M. 2014. Experimental Verification of the Effect of Slope and Land Use on SCS Runoff Curve Number. *Water Resources Management*, 28(11): 3407-3416.

- Moghaddam, A., Behmanesh, J., Farsijani, A. 2016. Parameters Estimation for the New Four-Parameter Nonlinear Muskingum Model Using the Particle Swarm Optimization. *Water Resources Management*, 30(7): 2143-2160.
- Patel, J.N., Jayantital N., Thorvat, A.R. 2016. Synthetic Unit Hydrograph Development for Ungauged Basins Using Dimensional Analysis. *Journal of American Water Works Association*, 108(3): 78-8.
- Paudel, M., Nelson, E.J., Scharffenberg, W. 2009. Comparison of Lumped and Quasi-Distributed Clark Runoff Models Using the SCS Curve Number Equation. *Journal of Hydrologic Engineering*, 14(10): 1098-1106.
- Pellicer-Martínez F. & Martínez-Paz J.M. 2014. Assessment of interbasin groundwater flows between catchments using a semi-distributed water balance model. *Journal of Hydrology*, 519(B): 1848-1858.
- Reif, J. & Hanzelka, J. 2016. Grassland winners and arable land losers: The effects of post-totalitarian land use changes on long-term population trends of farmland birdse. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 223: 208-217.
- SCS. 1972. *Hydrology*, National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Chapter 10, Soil Conservation Service, USDA, Washington, D.C.
- Sharifi, S. & Hosseini, S. M. 2011. Methodology for Identifying the Best Equations for Estimating the Time of Concentration of Watersheds in a Particular Region. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering-ASCE*, 137(11): 712-719.
- Sabzevari, T., Ardakanian, R., Talebi, A., Shamsai, A. 2010. Watersheds Flood Forecasting using HEC-GeoHMS and HEC-HMS Model. *Proceedings of 2010 International Conference on Environmental Science and Development*, 323-327.
- Saleh, F., Ducharne, A., Flipo, N., Oudin, L., Ledoux, E. 2013. Impact of river bed morphology on discharge and water levels simulated by a 1D Saint-Venant hydraulic model at regional scale. *Journal of Hydrology*, 476: 169-177.
- Schwanenberg, D. & Montero, R.A. 2016. Total variation diminishing and mass conservative implementation of hydrological flow routing. *Journal of Hydrology*, 539: 188-195.
- Sikorska, A.E., Viviroli, D., Seibert, J. 2015. Flood-type classification in mountainous catchments using crisp and fuzzy decision trees. *Journal of Hydrology*, 51(10): 7959-7976.
- Témez, J.R. 1978. *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. Dirección General de Carreteras. MOPU. Madrid.
- Tromel, S. & Schonwiese, C.D. 2005. A generalized method of time series decomposition into significant components including probability assessments of extreme events and application to observational German precipitation data. *Meteorologische Zeitschrift*, 14(3): 417-427.
- Wilkerson, J. & Merwade, V. 2010. Incorporating Surface Storage and Slope to Estimate Clark Unit Hydrographs for Ungauged Indiana Watersheds. *Journal of Hydrologic Engineering*, 15(11): 918-930.

---

Zhang, G.H., Luo, R.T., Cao, Y., Shen, R.C., Zhang, X.C. 2011. Impacts of sediment load on Manning coefficient in supercritical shallow flow on steep slopes. *Hydrological Processes*, 24(26): 3909-3914.