

NOTA TÉCNICA

INTRODUCCIÓN DE MÚLTIPLES TIEMPOS DE RESPUESTA EN LA SIMULACIÓN HIDROLÓGICA DE AVENIDAS TORRENCIALES EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS

José Carlos Robredo Sánchez, Carlos De Gonzalo Aranoa y Juan Ángel Mintegui Aguirre

Unidad Docente Hidráulica e Hidrología. Dpto. de Ingeniería Forestal. Universidad Politécnica de Madrid. Ciudad Universitaria s/n. 28040-MADRID (España). Correo electrónico: josecarlos.robredo@upm.es

Resumen

La magnitud de los caudales de avenida en la red de drenaje, originados por escorrentía superficial, está directamente relacionada con el tiempo que tarda dicha escorrentía en desplazarse, por la superficie de la cuenca y por su red de drenaje, hasta llegar al punto de ésta en el que se realiza el cálculo. La simulación, que requiere una simplificación del fenómeno físico para hacer abordables los cálculos, generalmente asume un tiempo más o menos constante de respuesta que se refleja en el parámetro denominado “tiempo de concentración”, en el caso de la simulación hidrológica de cuencas; o “tiempo de recorrido”, en el caso de la laminación en tramos de la red de drenaje. En la realidad estos tiempos son función del caudal circulante por los cauces y por tanto variable en cada instante del evento. El método que se propone consiste en considerar varios tiempos de respuesta en la simulación, con el fin de ajustarse mejor a las observaciones. En la simulación hidrológica de caudales de avenida se emplean diversos métodos, tanto para la simulación del hidrograma generado por una cuenca ante un evento, como para estimar la laminación que puede sufrir un hidrograma como consecuencia de su recorrido a lo largo de un tramo de la red de drenaje. Con este fin se propone utilizar el método del Hidrograma Unitario del SCS y el método de Muskingum, respectivamente, utilizando en ambos casos una múltiple simulación con tiempos rápidos y lentos para cada evento analizado, asumiendo que, en cada caso, una parte del volumen de agua se mueve más rápidamente que otra. Para la prueba del método propuesto se han utilizado la información aforada en dos cuencas instrumentalizadas de la Diputación Foral de Bizkaia y, para la simulación de la laminación en cauces, los aforos de la Confederación Hidrográfica del Ebro en Campo y en Graus, ambos en la provincia de Huesca, que delimitan un tramo en el río Ésera.

Palabras claves: *Avenida, Caudal punta, Tiempo de respuesta, Laminación, Simulación*

INTRODUCCIÓN

El caudal máximo que en un momento dado (caudal punta) o, si deseamos mayor detalle en la información, a lo largo de un espacio temporal (hidrograma), depende de la morfología y características superficiales de la cuenca hidrográfica que vierte sus aguas al punto del cauce considerado. El volumen de agua que circula por los cauces, constituyendo el caudal en un instante y lugar determinados, proviene en última instancia de las precipitaciones. Una parte de dicho volumen tiene un recorrido lento, subsuperficial, después de haberse infiltrado en el terreno en el momento en el que acontece la lluvia. Esta parte del caudal proviene de precipitaciones que han tenido lugar con días, semanas e incluso meses de antelación (en cuencas grandes podríamos decir años). Por otro lado, la parte de la precipitación que no se infiltra y se pone en movimiento sobre la superficie del terreno, circula con una velocidad más rápida que hace que el tiempo que tarda en llegar al punto de estudio sea de horas o días. Esta última parte del caudal es, en magnitud, significativamente mayor que la procedente de la escorrentía subsuperficial, aunque, si consideramos los volúmenes totales, esta última representa la mayor parte del volumen. Si nos centramos en las avenidas torrenciales y más concretamente en la estimación de los caudales punta, el volumen procedente de la escorrentía superficial es la componente principal.

La magnitud de los caudales de avenida originados por una determinada escorrentía superficial, depende directamente del tiempo que tarda el agua que escurre y que se va concentrando gradualmente en la red de drenaje, hasta llegar al punto del cauce en el que se quiere conocer el hidrograma. Evidentemente cada unidad de volumen de agua tarda un tiempo diferente dependiendo de su punto de partida, que determina un camino con ciertas características, y del momento del evento en el que realiza el recorrido, que determina el caudal que circula por la red de drenaje. Para caracterizar la rapidez de respuesta de la cuenca se suele utilizar un valor de tiempo único. Este tiempo es el que sirve de base para la simulación matemática de los eventos (SHERMAN, 1932; KIRPICH, 1940; TÉMEZ, 1987).

En el caso de la laminación, la transformación que sufre el hidrograma de avenida a través de un tramo de la red de drenaje, también depende de los dos factores comentados. Por un lado de la morfología del cauce y por otro del nivel de caudal que circula a lo largo del tiempo que dura el hidrograma. Estas características condicionan la velocidad con la que el agua recorre el tramo. Cada unidad de volumen invierte un tiempo diferente en función del camino recorrido y del momento del evento en el que realiza el mismo. Esta variedad de tiempos se engloba en un parámetro con el fin de aplicar de forma operativa la simulación matemática de la laminación en cuestión.

La simulación de la respuesta hidrológica de la cuenca ante un evento de precipitación extrema, o la laminación del hidrograma de avenida generado, se puede realizar de diversas formas; que van desde métodos sencillos con pocos parámetros, basados en aproximaciones al fenómeno, hasta métodos detallados que reflejan fielmente de forma matemática y dentro de lo razonable el fenómeno físico. Estos últimos necesitan una información de partida importante que refleje con detalle la superficie del terreno que constituye la cuenca hidrográfica o el tramo de cauce en cuestión. Dado que la disponibilidad de información no es grande en la mayoría de los casos, se tiene a utilizar modelos sencillos con pocos parámetros.

La idea de este trabajo es mejorar la respuesta de los modelos sencillos de simulación utilizando varios tiempos de respuesta, en vez de un parámetro único. En el caso de la respuesta hidrológica de una cuenca se utiliza el método del Número de Curva para la estimación de la escorrentía superficial y el método del Hidrograma Unitario adimensional del S.C.S para estimar el hidrograma generado. En el caso de la laminación del hidrograma a través de un tramo de cauce se utiliza el método de Muskingum (LINSLEY *et al.*, 1977; SINGH, 1952; USDA, S.C.S, 1985; CHOW *et al.*, 1988; MINTEGUI Y ROBREDO, 1993; MISHRA & SINGLE, 2003).

MATERIAL Y MÉTODOS

Con el fin de analizar la metodología propuesta se han utilizado, por un lado, datos afora-

dos de hidrogramas originados por tormentas y los registros de estas últimas en estaciones meteorológicas situadas en las cuencas aforadas y, por otro, datos registrados de hidrogramas en dos estaciones de aforo situadas en el mismo cauce, delimitando un tramo de este.

Para la simulación hidrológica se han escogido dos cuencas aforadas por la Diputación de

Bizkaia dentro de la cuenca del río Ibaizabal, Elorrio y Mañaria, de dimensiones reducidas, 29,66 km² y 18,69 km² respectivamente (Figura 1), de forma que la extrapolación de los datos de precipitación, registrados en la localización de las estaciones de aforo, a la total extensión de la cuenca fuera una hipótesis razonable. Los datos de dichas cuencas aparecen en la Tabla 1.

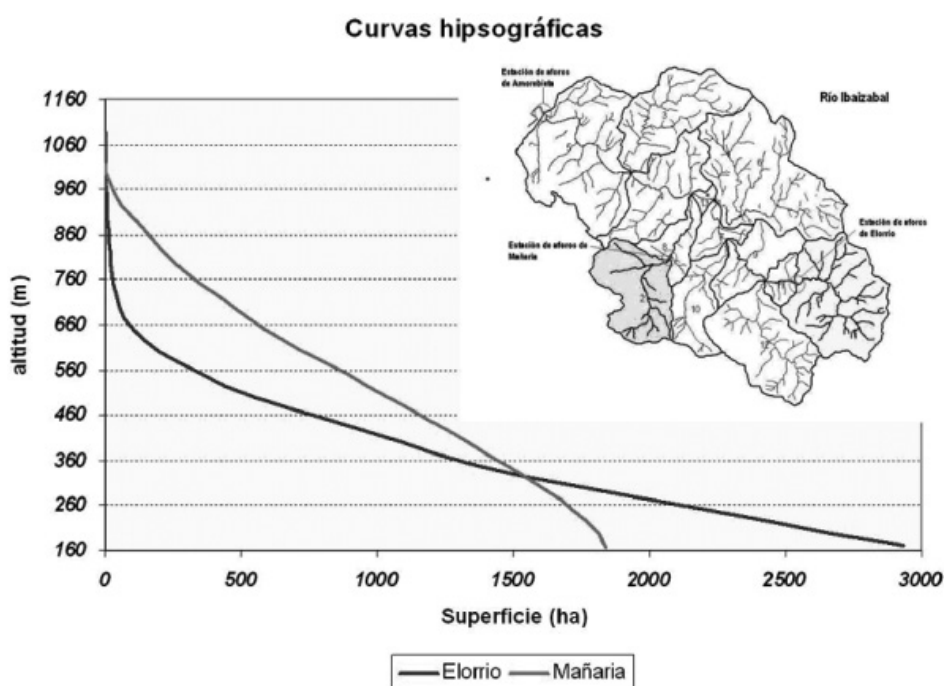


Figura 1. Localización de las cuencas utilizadas en las simulaciones y sus curvas hipsográficas

	Elorrio	Mañaria
Superficie (km ²)	29,66	18,69
Número de Curva medio estimado	70	70
Longitud del cauce más largo (km)	7,53	6,36
Altitud máxima del cauce (m)	430	700
Altitud mínima del cauce (m)	170	173
Altitud media (m)	300,0	436,5
Pendiente media del cauce (m/m)	0,034542	0,082927
Tiempo de concentración según: (h)		
Kirpich	1,15	0,72
Témez	2,64	1,96
Ven Te Chow	2,93	1,99
U.S. Corps of Engineers	2,46	1,83
Giandotti	10,07	4,59
S.C.S.	5,86	4,11

Tabla 1. Características de las cuencas hidrográficas correspondientes a las estaciones de aforo de Elorrio y Mañaria

Para la simulación de la laminación de los hidrogramas en cauces se han escogido dos estaciones de aforo de la Confederación Hidrográfica del Ebro situadas en el río Ésera, una situada en Campo y otra en Graus, ambas en la provincia de Huesca (CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO, 2008). Las características del tramo se muestran en la Tabla 2 y en la Figura 2. En la foto de ésta última figura se muestra la situación que presenta el cauce el 1 de mayo de 2007 a las 15:23 horas, con un caudal circulante de $44 \text{ m}^3\cdot\text{s}^{-1}$. La particularidad por la que han escogido estas estaciones es que los hidrogramas registrados utilizados provienen, no de precipitaciones, sino de volúmenes de agua turbinados procedentes de

una central hidroeléctrica situada aguas arriba de la estación aforadora de Campo. Esta situación conlleva que los volúmenes de agua que atraviesan ambas estaciones sean prácticamente los mismos, con lo cual se puede analizar el fenómeno de laminación sin tener que considerar otros aportes laterales al cauce durante la ventana temporal correspondiente al hidrograma laminado en el tramo.

En la cuenca aforada de Elorrio se ha analizado la tormenta de los días 31 de mayo y 1 de junio de 2008 (DIPUTACIÓN FORAL DE BIZKAIA, 2008). En la cuenca de Mañaria se ha utilizado la tormenta del 10 y 11 de octubre de 2007 (Figura 3). Para la simulación de la laminación

Longitud del tramo (km)	27
Desnivel (m)	200
Ancho medio estimado (m)	20
Rugosidad media estimada	0,035

Tabla 2. Características del tramo de cauce del río Ésera entre Campo y Graus

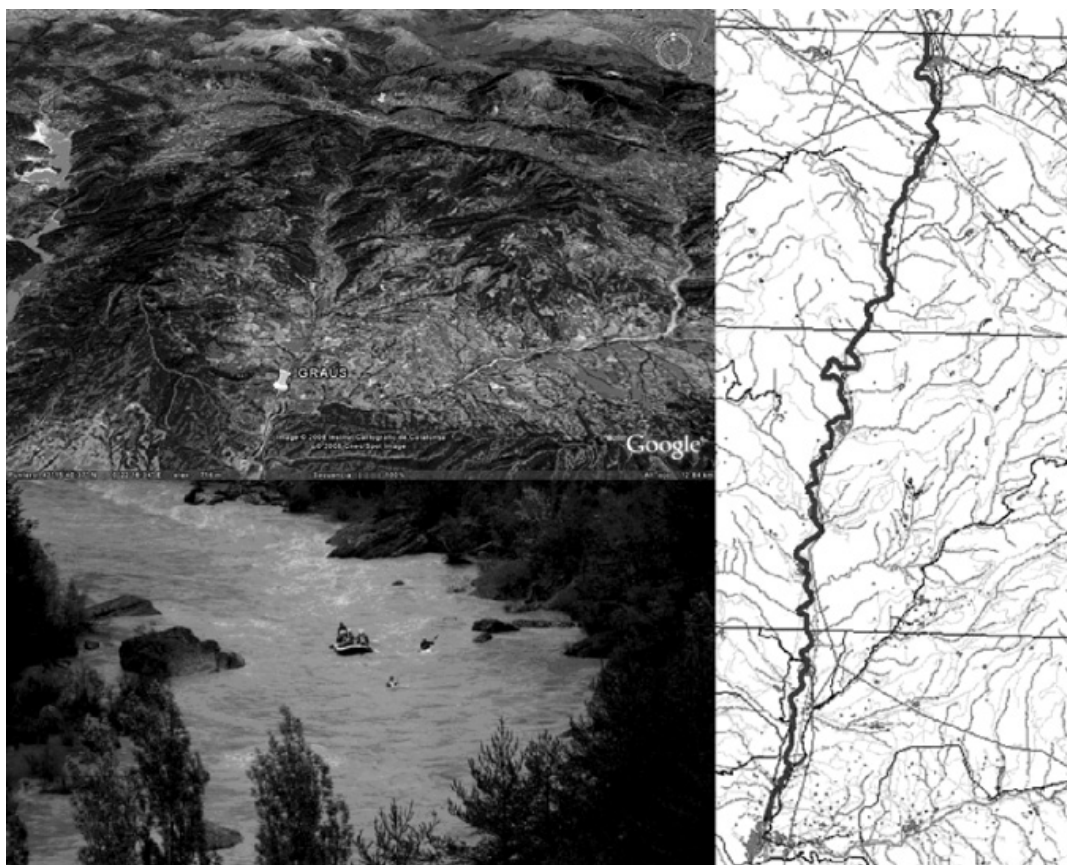


Figura 2. Tramo del río Ésera objeto de estudio

que otra. La hipótesis consiste en que parte del volumen inicial del hidrograma que entra en el tramo se emplea en aumentar el calado en este, hasta un nivel sobre el cual el agua se mueve más rápido. Este volumen abandona el tramo de forma más lenta una vez que la mayor parte del hidrograma ha pasado. Esto supone descomponer el hidrograma de entrada en dos: una parte inicial a la que se le aplica un parámetro K mayor y una segunda parte a la que se le aplica un tiempo menor. De la misma forma se utilizan dos valores del parámetro X , uno para la parte rápida y otro para la parte lenta. Un dato necesario para poder aplicar el método es determinar el volumen inicial y , por consiguiente, la parte del hidrograma al que aplicar el tiempo lento. Este volumen dependerá del calado inicial que exista en el tramo. Si los calados son altos no habrá parte lenta y la conducción será la misma que la que se simularía con el método original. Si los calados son muy bajos, una parte importante del hidrograma de avenida se desplazará de forma más lenta, apareciendo esta diferenciación de volúmenes rápidos y lentos.

A continuación se realizan las simulaciones de los distintos eventos considerados siguiendo los métodos propuestos. Con el fin de valorar las mejoras obtenidas con el nuevo procedimiento, se han analizado también los eventos siguiendo el método tradicional, utilizando solo un tiempo de respuesta en cada simulación y , en el caso de la aplicación del método del Número de Curva, utilizando un umbral de escorrentía $P_o = 0,2 \cdot S$.

Tormenta de los días 31 de mayo y 1 de junio de 2008 en Elorrio

Ajustando el Número de Curva y el tiempo de concentración para que la simulación refleje el máximo de caudal instantáneo registrado en la estación de aforos, se obtienen los siguientes valores: $NC = 81$ ($P_o = 0,2 \cdot S = 13,72$ mm) y $t_c = 1,2$ horas ($t_{lag} = 0,72$ horas suponiendo que para el tiempo de concentración se utiliza la expresión de Kirpich y por tanto $t_{lag} = 0,6 \cdot t_c$). En la Figura 4a se muestran el hidrograma obtenido comparándolo con el hidrograma real aforado.

Aplicando el método propuesto, los valores de los 8 parámetros que corresponden con el ajuste que se muestra en la Figura 4b son: $NC_{n-r} = 58$, $P_{o_{n-r}} = 0$ mm, $NC_1 = 76$, $P_{o_1} = 2$ mm, $t_{c_r} = 1$ hora, $t_{c_n} =$

1,2 horas, $t_{c_1} = 6$ horas. Por último se establece un nivel de escorrentía rápida de $NQ_r = 2,5$ mm.

Tormenta de los días 10 y 11 de octubre de 2007 en Mañaria

En este caso, ajustando el Número de Curva y el tiempo de concentración, se obtienen los siguientes valores: $NC = 94,5$ ($P_o = 0,2 \cdot S = 4,76$ mm) y $t_c = 3,5$ horas ($t_{lag} = 2,1$ horas). En la Figura 4c se muestra el hidrograma obtenido comparándolo con el hidrograma real aforado.

Aplicando el método propuesto, los valores de los 8 parámetros que corresponden con el ajuste que se muestra en la Figura 4d son: $NC_{n-r} = 90$, $P_{o_{n-r}} = 0$ mm, $NC_1 = 100$, $P_{o_1} = 0$ mm, $t_{c_r} = 3$ hora, $t_{c_n} = 7$ horas, $t_{c_1} = 25$ horas. Por último se establece un nivel de escorrentía rápida de $NQ_r = 2,5$ mm.

Laminación del hidrograma de los días 19 al 22 de marzo de 2008 en el río Ésera

Para la simulación clásica con el método de Muskingum, intentando que el hidrograma de salida obtenido se asemeje globalmente al registrado en la estación de aforo, los valores de los parámetros serían $K = 6$ y $X = 0,35$. En la Figura 5a se muestra el resultado de la simulación.

Como se aprecia en el hidrograma de salida, los picos no se atenúan tanto como lo hace la simulación con los parámetros propuestos. Si se aumenta el valor X hasta 0,425, con un valor de $K = 4,6$ horas, los picos se simulan mucho mejor, pero el hidrograma simulado falla al principio y al final de la crecida, como se puede ver en la Figura 5b.

Desglosando el hidrograma de entrada en dos y simulando con dos grupos de parámetros diferentes ambos hidrogramas, $K_r = 4,6$ $X_r = 0,425$ y $K_1 = 13,5$ $X_1 = 0,2$, se obtiene el resultado que se muestra en la Figura 5c, en el cual se traslada la salida de un cierto volumen inicial, que constituye uno de los hidrogramas, al final de la avenida mediante un tiempo de recorrido lo suficientemente grande. La separación del hidrograma “rápido” en este caso se ha realizado dejando pasar el primer pico relativo de cada avenida, que como media representa un volumen de 65.178 m³, considerando a partir de dicho punto como “caudal rápido” en cada intervalo, al caudal que supera el caudal mínimo de el hidrograma aforado a la entrada del tramo, que se ha fijado en 2 m³·s.

RESULTADOS Y DISCUSION

La asignación de valores a los parámetros para ajustar la simulación a los datos reales aforados tiene un problema importante, que es la aceptación de la hipótesis de que la lluvia registrada en el pluviógrafo, que en este caso se sitúa en las estaciones de aforo y por lo tanto en la parte más baja de la cuenca, sea representativa de la lluvia que tuvo lugar en toda la superficie de la cuenca,

tanto en magnitud como en distribución, suponiendo que ésta es uniforme. Se pueden encontrar parámetros que ajusten más o menos bien el evento, pero seguramente con otra tormenta los resultados no presenten el mismo ajuste. Esto se debe a que los citados parámetros absorben el error de la hipótesis inicial de lluvia comentada y en cada tormenta la realidad puede ser muy diferente. En nuestro caso aceptamos la hipótesis de lluvia homogénea dado que la superficie de las

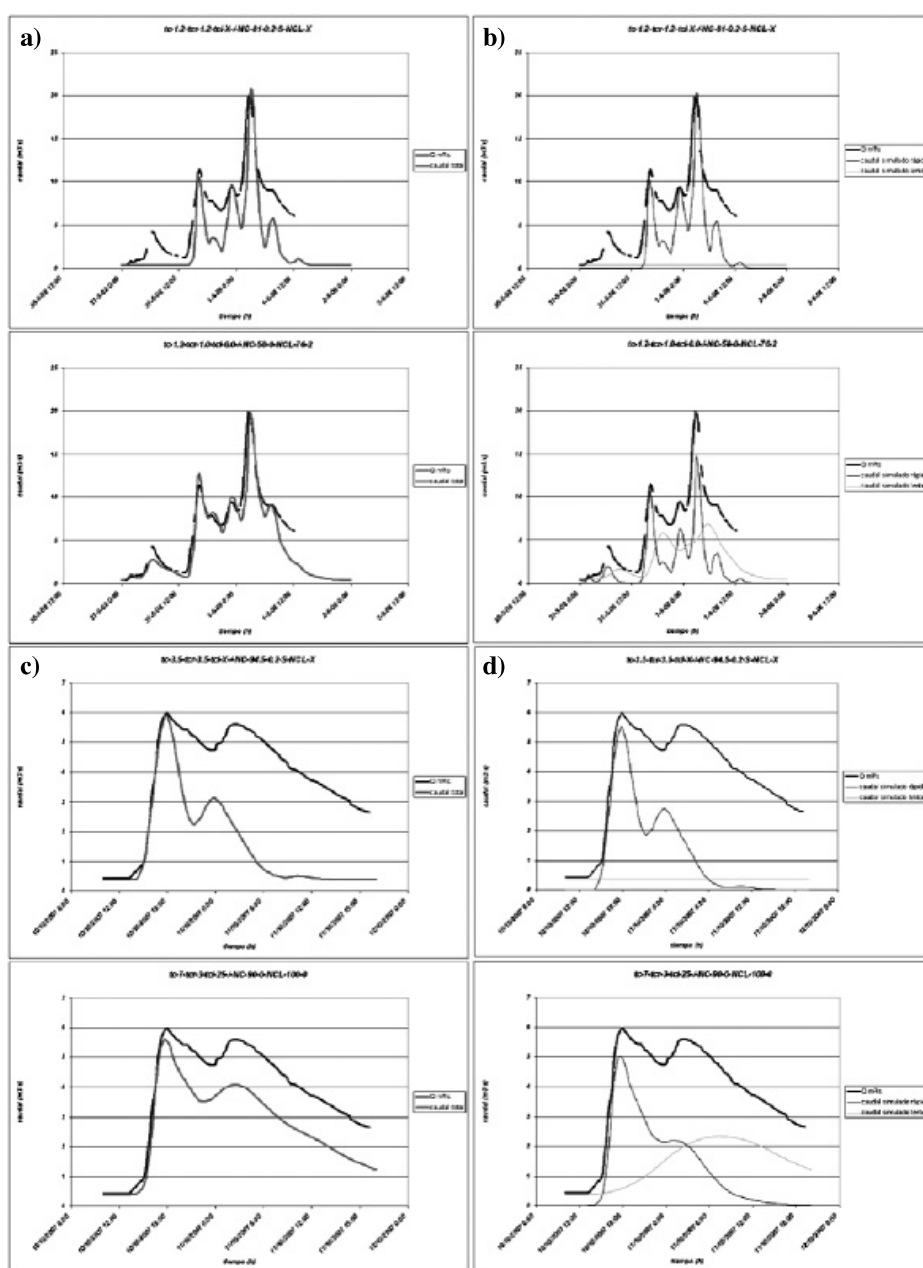


Figura 4. a) Simulación con un solo tiempo de respuesta en Elorrio. b) Simulación con dos tiempos de respuesta en Elorrio. c) Simulación con un tiempo de respuesta en Mañaria. d) Simulación con dos tiempos de respuesta en Mañaria

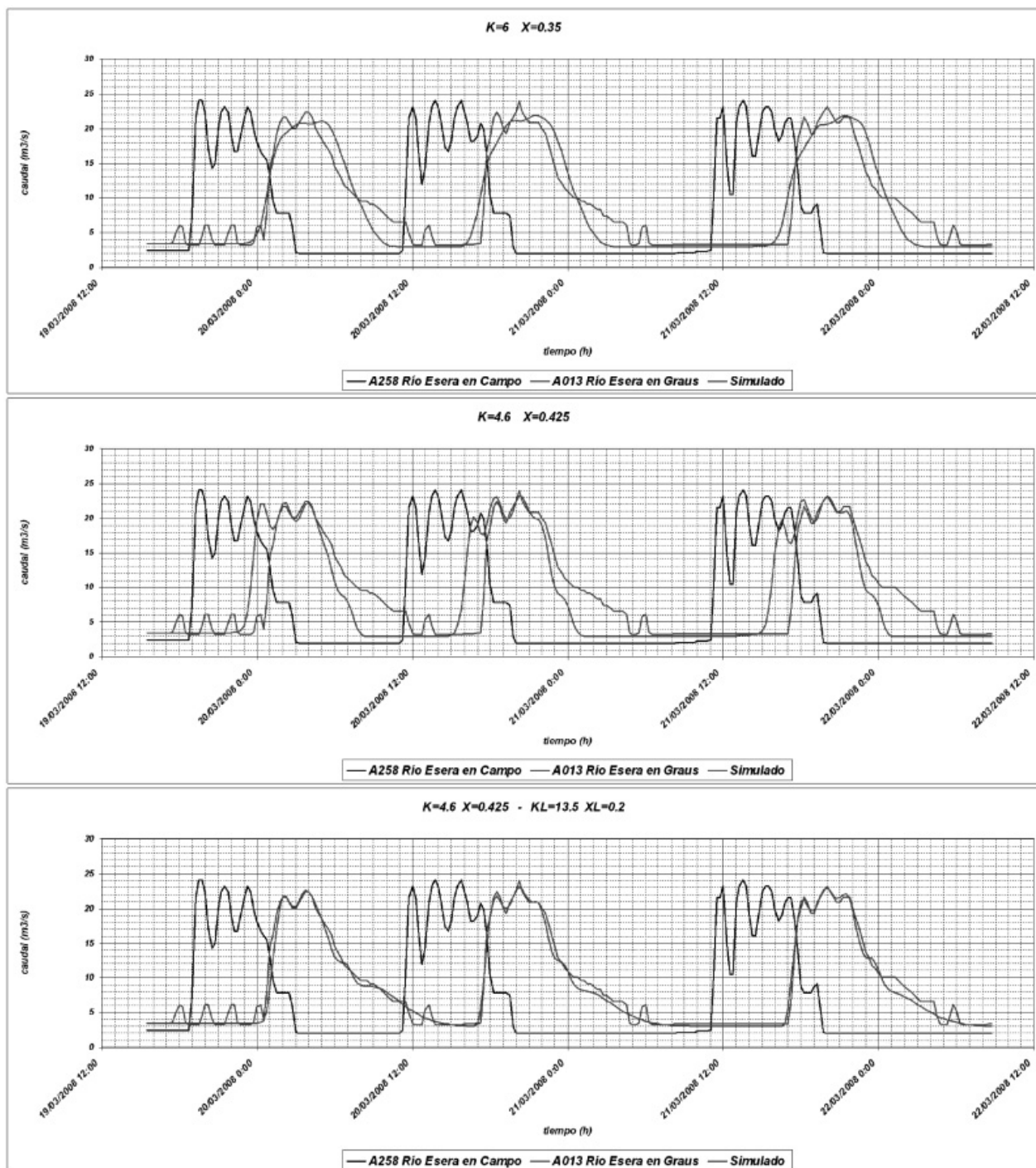


Figura 5. a,b,c. Simulaciones de la conducción en el tramo del río Ésera

cuencas es pequeña, aunque intentaremos analizar las posibles desviaciones buscándoles su origen en una variación espacial de la precipitación.

Si, como es el objetivo común en la aplicación de estos métodos integrados, se pretenden estimar los valores de los caudales punta, al margen del ajuste del resto del hidrograma, la forma

tradicional de aplicación del método da resultados aceptables, incluso buenos (Figuras 4a y 4c). Hay que tener en cuenta que solo se está simulando la escorrentía superficial rápida que se obtiene de la aplicación del método del Número de Curva. Existe otra escorrentía más lenta que no influye tanto en los caudales punta, pero sí en el

resto del hidrograma. Esta escorrentía más lenta normalmente se asocia al caudal base, que no tiene porque ser constante, pero que se estima de una forma independiente de la propia tormenta. La idea del método propuesto, como ya se ha comentado, es mejorar la simulación del hidrograma completo, no solo los valores punta, añadiendo una respuesta lenta en forma de escorrentía superficial asociada también a la tormenta. Como se puede observar en las Figuras 4b y 4d la forma de los hidrogramas simulados con respecto a los aforados mejora sustancialmente.

En ambas simulaciones se aprecia que en la parte final del hidrograma los caudales se reducen de una forma importante con respecto a los aforados. Como es lógico suponer, tiene que existir otra parte de caudal de respuesta más lenta todavía, asociado ya a volúmenes de escorrentía sub-superficial o subterránea, lo que constituye el caudal base, que no se ha simulado en esta ocasión, o realmente se ha realizado parcialmente al considerar un caudal base constante, igual al caudal circulante en el momento del comienzo de la tormenta. Evidentemente se podrían mejorar los ajustes considerando nuevos volúmenes de escorrentía con respuestas aún más lentas, pero aumentaría la dificultad de aplicación del método al incrementarse mucho el número de parámetros a utilizar; la cuestión no es el objetivo de este análisis, que pretende aportar una mejora en la simulación sin complicar en exceso la aplicación.

En el caso de la tormenta en la cuenca de Mañaria se aprecian unos valores de caudal simulados por debajo de los valores aforados. Los parámetros empleados se han llevado al límite de sus valores posibles y aún así no se ha llegado a ajustar los caudales aforados. La explicación de estos resultados puede deberse a que los valores de precipitación registrados en el pluviógrafo de Mañaria son inferiores a los valores que realmente tuvieron lugar en el conjunto de la superficie de la cuenca, sobre todo en las partes altas, donde es lógico pensar que tuvieron lugar precipitaciones de mayor magnitud. El hecho de que esta diferencia ocurra en esta cuenca y no en la de Elorrio, se puede buscar en la diferencia de distribución altitudinal de la superficie reflejada en las curvas hipsográficas de la Figura 1, donde se aprecia que la cuenca de Elorrio presenta menor variación altitudinal. Se

ha intentado respetar la forma del hidrograma, actuando con los valores de los parámetros, antes que ajustar el valor del caudal punta; asumiendo que seguramente los valores de precipitación en la cuenca fueron mayores que los registrados en el pluviógrafo de Mañaria, concretamente en los intervalos de precipitación siguientes a los máximos que se registran al comienzo de la tormenta.

También cabe destacar los valores del tiempo de concentración calibrados en esta segunda cuenca. Mientras que en Elorrio los valores son del orden de los que se obtienen con las fórmulas aplicadas al efecto, en Mañaria los tiempos calibrados son mucho mayores que los que cabría esperarse. Sería interesante analizar este punto de cara a valorar la idoneidad de las distintas expresiones en ciertos casos.

En cuanto a la laminación en el tramo del río Ésera, se aprecia claramente que existe un volumen inicial que se lamina de una forma más lenta que el volumen que circula a continuación. Es lógico pensar que hasta que no se alcanza un cierto valor de caudal en el tramo y más concretamente un valor de calado, el agua tarda más tiempo en recorrerlo; pero una vez alcanzado dicho valor la velocidad de recorrido aumenta rápidamente, existiendo claramente dos velocidades de desplazamiento, una por debajo del calado comentado y otra por encima. Según esta hipótesis, la laminación del hidrograma responde a unos parámetros mientras los calados sean inferiores a dicho nivel crítico y, en el momento que son superados, los valores de los parámetros tienen que cambiar. La cuestión es determinar en cada tramo cual es el valor del calado crítico para poder descomponer el hidrograma de entrada en los dos hidrogramas comentados con anterioridad, uno que se laminará con unos valores “lentos” y el otro que se laminará con los valores “rápidos” o normales. En el caso que nos ocupa, el reparto del volumen “lento” a lo largo del tramo supondría un aumento aproximado de 0,12 m en la altura de la lámina.

CONCLUSIONES

La aplicación de dos tiempos de concentración, t_c , y Números de Curva, en el caso de la

simulación hidrológica, y de dos tiempos de recorrido, K, y dos valores del parámetro X, en el caso de la laminación aplicando el método de Muskingum, mejora la simulación de los hidrogramas, como cabía esperar; a cambio de aumentar el número de parámetros a considerar. La metodología realmente sería útil si se encuentran relaciones entre dichos parámetros de forma que solo se tengan que asignar a cada simulación un solo parámetro, como se realiza en el cálculo original. Es razonable pensar que tras el análisis de un número importantes de tormentas, en distintas cuencas vertientes y con distintas tormentas, se puedan encontrar relaciones entre ambos tiempos de respuesta y entre los Números de Curva utilizados dentro de una misma simulación. Llegados a este punto se mantendría la sencillez del método y se mejoraría la respuesta de la simulación.

Es necesario observar que el tiempo de recorrido "lento" en la laminación depende de la duración de la avenida y tendría que establecerse, no como parámetro morfológico únicamente, sino realizando una lectura previa del hidrograma de entrada y en función de su duración establecer su valor.

BIBLIOGRAFÍA

- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R. & MAYS, L.W.; 1988. *Applied Hydrology*. Mc.Graw Hill Co.
- CONFEDERACIÓN HIDROGRÁFICA DEL EBRO. *Sistema Automático de Información Hidrológica*. <http://195.55.247.237/saihebro/index.php?url=/datos/introduccion>
- DIPUTACIÓN FORAL DE BIZKAIA. *Departamento de Medio Ambiente. Área de Hidrología*. http://www.bizkaia.net/Ingurugiroa_Lurraldia/Hidrologia_Ac/Datos_meteo.asp?Idioma=CA&Tem_Codigo=2679
- KIRPICH, Z.P.; 1940. Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds *Civil Engineering* 10: 362.
- LINSLEY, R.K. (JR.); KOHLER, M.A. Y PAULHUS, J.L.H.; 1958, 1967, 1977. (2ª edición) *Hidrología para ingenieros*. Ed. Mc Graw-Hill Latinoamericana S.A. Bogotá.
- MINTEGUI AGUIRRE, J.A. Y ROBREDO SÁNCHEZ, J.C.; 1993. *Métodos para la estimación de los efectos torrenciales en una cuenca hidrográfica. Manual para un programa básico*. Fundación Conde del Valle de Salazar. E.T.S.I. Montes. Madrid.
- MISHRA, S.K. & SINGH, V.P.; 2003. *Soil Conservation Service Curve Number (Scs-Cn) Methodology*, Kluwer Academic Pub. Dordrecht.
- SHERMAN, L.K.; 1932. Streamflow from Rainfall by the Unit Hydrograph Method *Eng. News Record* 108: 501-505.
- SINGH, V.P.; 1982. *Rainfall-runoff relationship*, Water Resources Publications. -Littleton-Colorado.
- SINGH, V.P.; 1982. *Applied modeling in catchment hydrology*, Water Resources Publications. -Littleton- Colorado.
- TEMEZ, J.R.; 1987. *Cálculo hidrometeorológico de caudales máximos en pequeñas cuencas naturales*. M.O.P.U. Madrid.
- U.S.D.A. SOIL CONSERVATION SERVICE; 1985. *SCS National Engineering Handbook*. Washington D.C.