

# *Evaluación de la respuesta numérica en la simulación de escorrentía con ecuaciones de aguas poco profundas en una cuenca pirenaica*

*Caviedes-Voullième, D., Murillo, J., García-Navarro, P.*

*Universidad de Zaragoza*

*daniel.caviedes@unizar.es, javier.murillo@unizar.es, pigar@unizar.es*

## **1 Introducción**

Los procesos de escorrentía en escala cuenca se han representado muchas veces con métodos empíricos y modelos agregados con el objetivo de obtener hidrogramas en respuesta a una tormenta y su posterior utilización con fines de diseño. El modelo de aguas poco profundas en 2D es una opción evidente para realizar la modelización de la escorrentía en cuencas desde una perspectiva distribuida, considerando una mayor complejidad en los procesos físicos. Su uso, sin embargo, muchas veces está limitado por la resolución espacial de la información disponible para aprovechar las capacidades del modelo y obtener buenos resultados así como por la dificultad de calibrar los parámetros que se requieren y por el tiempo de cálculo. En este estudio se utiliza un modelo de aguas poco profundas para simular la respuesta de una cuenca pirenaica instrumentada en un evento de tormenta. Se pretende comprender la interacción del modelo numérico con los distintos parámetros que pueden impactar la calidad de la simulación de la escorrentía, como paso previo a la formulación de un modelo hidrológico integrado de la cuenca a nivel superficial y subterráneo.

Las ecuaciones de aguas poco profundas requieren la solución por métodos numéricos. En este caso, se utiliza un esquema numérico basado en volúmenes finitos de primer orden, explícito y upwind [7]. Es conocido que las soluciones obtenidas a partir de esquemas de volúmenes finitos dependen de forma significativa de la malla de cálculo. Influyen en los resultados varias propiedades de la malla, tales como el tamaño y tipo de celda (triangular, rectangular, etc), y la estructura general de la malla [5]. Es claro también que a mayor número de celdas, mayor tiempo de cálculo, un tema de especial interés ya que la complejidad del terreno de las cuencas de montaña requiere normalmente un gran número de celdas. También debe considerarse que la formulación explícita del esquema requiere satisfacer la condición CFL [7] y por tanto implica una restricción al paso de tiempo más severa conforme la malla es más fina. La resolución máxima de la malla de cálculo está gobernada por la información topográfica con la que se cuenta para representar la cuenca y, en general, no es una variable bajo el control del modelador. Sin embargo, el tipo de celda y la estructura de la malla sí pueden ser definidas por el modelador. Es por tanto importante explotar el control de dichas variables para obtener una malla que represente adecuadamente el terreno y los fenómenos hidráulicos minimizando el número de celdas, maximizando su tamaño y refinando donde es necesario. En este estudio se investigan los efectos de utilizar distintas resoluciones de malla en conjunto con utilizar mallas estructuradas con celdas cuadradas o triangulares y mallas no estructuradas triangulares, tanto en configuraciones homogéneas como adaptadas al terreno, refinando apropiadamente en las zonas más complejas para optimizar la relación entre resolución y tiempo de cálculo.

En cuanto a parámetros hidráulicos e hidrológicos, es necesario caracterizar la respuesta de un modelo de aguas poco profundas a los parámetros que están supeditados a la decisión del modelador, y así contar con recomendaciones para la toma de decisiones respecto a los escenarios de simulación. En este estudio se busca evaluar la respuesta del modelo a la representación del rozamiento por medio del coeficiente de Manning y a los parámetros de infiltración del método SCS.

La metodología seguida consiste en abstraer inicialmente el problema de la simulación de la escorrentía en la cuenca real, y analizar de manera independiente los efectos causados por la malla, por el rozamiento y por la infiltración, con el fin de contar con una variedad de casos que permitan observar la magnitud de las variaciones por uno u otro parámetro.

## 2 Metodología

### 2.1 Modelo de aguas poco profundas

Para la simulación del flujo superficial se utiliza el modelo de aguas poco profundas, las cuales expresan la conservación de masa y cantidad de movimiento promediadas en la vertical

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}(\mathbf{U})}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}(\mathbf{U})}{\partial y} = \mathbf{S} + \mathbf{H} \quad (1)$$

donde

$$\mathbf{U} = \left( h, \quad q_x, \quad q_y \right)^T \quad (2)$$

Representa las variables conservadas, donde  $h$  es el calado,  $(u,v)$  las componentes del vector velocidad promediado en la vertical y  $q_x = hu$  y  $q_y = hv$  los caudales unitarios. Los flujos son

$$\mathbf{F} = \left( q_x, \frac{q_x^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2, \frac{q_x q_y}{h} \right)^T \quad \mathbf{G} = \left( q_y, \frac{q_x q_y}{h}, \frac{q_y^2}{h} + \frac{1}{2}gh^2 \right)^T \quad (3)$$

Donde  $g$  es la aceleración de la gravedad. Los términos fuente del sistema se dividen en dos

$$\mathbf{S} = \left( 0, -\frac{\tau_{b,x}}{\rho}, -\frac{\tau_{b,y}}{\rho} \right)^T \quad (4)$$

Donde  $\tau_{b,x}$  y  $\tau_{b,y}$  son los esfuerzos cortantes de fondo en las direcciones  $x$  e  $y$  respectivamente, y  $\rho$  la densidad del fluido. El término  $\mathbf{H}$  representa la variación de la fuerza de presión a lo largo del fondo en las direcciones  $x$  e  $y$  formulada en términos de la pendiente de fondo.

$$\mathbf{H} = \left( 0, -gh \frac{\partial z}{\partial x}, -gh \frac{\partial z}{\partial y} \right)^T \quad (5)$$

El sistema definido en la ecuación (1) depende del tiempo, es no lineal y contiene términos fuentes. Con la hipótesis de que prevalece la advección, el sistema se puede clasificar y tratar numéricamente como un sistema hiperbólico. Sus propiedades matemáticas incluyen la existencia de un jacobiano  $\mathbf{J}_n$  del flujo normal a una dirección dada por el vector unitario  $\mathbf{n}$ ,  $\mathbf{En} = \mathbf{F}n_x + \mathbf{G}n_y$ , definido por

$$\mathbf{J}_n = \frac{\partial \mathbf{En}}{\partial \mathbf{U}} = \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{U}} n_x + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial \mathbf{U}} n_y \quad (6)$$

El sistema de ecuaciones se resuelve por un esquema de volúmenes finitos de primer orden, explícito y *upwind* como se describe en [7].

### 2.2 Generación y selección de mallas

Con el fin de analizar el efecto que tienen las propiedades de las malla sobre la simulación, se seleccionaron 4 tipos de mallas. Las mallas estructuradas cuadradas (SS, por sus siglas en inglés), mallas triangulares estructuradas (TS), mallas triangulares no estructuradas (TU) y mallas triangulares no estructuradas refinadas localmente (TU-LR). Las mallas SS consisten en cuadrados de lado 5, 10, 15 y 20 m. La resolución de 5m coincide con la información del Modelo Digital de Terreno (MDT) en formato *raster*, es decir, formado por pixels de 5m de lado. Las mallas SS más gruesas se forman promediando el valor de elevación entre los 4, 9 ó 16 pixels respectivamente. Las mallas TS se generaron de forma análoga, pero adicionalmente dividiendo los cuadrados en dos triángulos rectángulos. Las mallas TU se generaron utilizando *Triangle* [12], controlando el área máxima de las celdas y el ángulo interno mínimo. El resultado son mallas aproximadamente homogéneas, con una distribución de área de celda muy poco dispersa. En cambio, las mallas TU-LR, al incluir criterios de refinamiento locales tienen una distribución de área de celda enormemente más amplia. El criterio de

refinamiento es el gradiente de la pendiente del terreno. En las zonas donde existe mayor variación de la pendiente se requieren más celdas para capturar apropiadamente tanto la elevación como el vector que describe a la pendiente del terreno. Así, es posible generar mallas que en las zonas en las que el terreno tiene una tendencia única (ya sea en plano o en pendiente) las celdas sean de un tamaño mayor, mientras que en las zonas donde la pendiente cambia y existe una topografía accidentada (vertientes, cauces, máximos y mínimos locales) se tienen celdas más pequeñas que garanticen una buena representación de las direcciones de flujo y eviten la generación de máximos y mínimos locales artificiales. De esta manera es posible representar pequeñas variaciones y accidentes en la topografía, que pueden generar grandes perturbaciones en el flujo general [3,9]. Las propiedades de las mallas utilizadas se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1: Mallas utilizadas

Malla	Área max. Celda (m <sup>2</sup> )	Celdas	Malla	Área max. Celda (m <sup>2</sup> )	Celdas
SS5	25	110010	TS20	200	14166
TS5	12.5	220020	TU-10-40	40	106939
SS10	100	27941	TU-16-60	60	71384
TS10	50	55882	TU-18-100	100	43019
SS15	225	12478	TU-LR-16666	1640	16666
TS15	112.5	24956	TU-LR-22624	1281	22624
SS20	400	7083	TU-LR-31662	1247	31662

### 2.3 Método SCS-CN

Una forma simple de aproximar la pérdida de lluvia por infiltración es el método del Número de Curva desarrollado por el *Soil Conservation Service* estadounidense (SCS-CN) [10]. Este método es utilizado frecuentemente con métodos hidrológicos agregados cuando se cuenta con muy escasa información sobre la cuenca en cuestión. Por su amplio uso, su sencillez y costo computacional prácticamente nulo, en este estudio se presenta su utilización en conjunto con un método distribuido para la escorrentía superficial, eliminando así la necesidad de recurrir a hidrogramas sintéticos unitarios para el tránsito de la escorrentía. El método SCS-CN consiste en estimar la precipitación efectiva  $P_e$  que resulta de restar el agua infiltrada a la lluvia total  $P_t$ .

$$P_e = \frac{(P_t - \alpha S)^2}{P_t + S(1 - \alpha)} \quad (7)$$

La pérdida de lluvia por infiltración se estima a partir del potencial de retención  $S$  y de la abstracción inicial (aquel volumen que se infiltra antes que se inicie la escorrentía) el cual se estima como  $\alpha S$ . A su vez,  $S$  se relaciona con el número de curva CN, el cual depende de las características del terreno y de su cobertura. Expresando  $S$  en milímetros la relación es

$$S = \frac{25400}{\text{CN}} - 254 \quad (8)$$

El método, en principio está diseñado para estimar la precipitación efectiva de un evento de forma integral, aunque es posible aplicarlo para estimar la precipitación efectiva en el tiempo a partir de un hietograma. El valor del coeficiente  $\alpha$  fue definido empíricamente como 0.2 [10]. Sin embargo diversos estudios han demostrado la necesidad de calibrar no solo CN, sino también  $\alpha$  [1,8].

### 3 Descripción de la cuenca y evento

La cuenca de Arnás se encuentra en el Pirineo aragonés, en el valle de Borau. Presenta una superficie de 2.84 km<sup>2</sup>, con elevación entre los 900 y 1340 m.s.n.m (figura 1). La cuenca está instrumentada y desde 1995 se ha recolectado una gran cantidad de información hidrológica. El cauce principal es el barranco de Arnás, el cual es afluente del río Lubierre. Se han recogido mediciones de caudal en el barranco en un punto cercano a la confluencia, sitio en el cual también se cuenta con una estación meteorológica que incluye un pluviómetro. Desde el punto de vista geológico, la cuenca se sitúa sobre formaciones de flysch Eoceno. Por otra parte, la cuenca ha experimentado cambios significativos en el uso del suelo y la cobertura vegetal en las últimas décadas, generando una cobertura que varía desde parches boscosos a arbustos, hierba y suelo expuesto [2]. La descripción geológica, mapas de vegetación y demás información para la caracterización de la cuenca se obtuvo de estudios previos [2,4,6,11]. Desde el punto de vista experimental, se ha observado una estacionalidad importante [2,4 en la cual primavera y otoño son períodos de alta generación de escorrentía, el invierno como período intermedio y el verano como estación seca. A su vez, se ha reportado que existen variaciones espaciales importantes en lo que refiere a las áreas que más contribuyen a la escorrentía. Ambos estudios coinciden en que el nivel freático tiene una influencia limitada en la respuesta a la precipitación, y que la escorrentía se forma principalmente al excederse la capacidad de infiltración (flujo hortoniano), especialmente en temporada seca. En temporada húmeda la saturación del suelo juega un papel más importante. Desde la perspectiva numérica, López-Barrera [6] simuló la cuenca de Arnás utilizando un enfoque distribuido con un modelo bidimensional de onda difusiva en conjunto con los métodos de Horton y Green-Ampt para evaluar la infiltración, encontrando dificultades para reproducir los hidrogramas. Serrano-Pacheco [11] simuló la cuenca utilizando el sistema completo de aguas poco profundas y utilizando el modelo de Horton. Ambos estudios concluyeron que la infiltración juega un papel preponderante.

Se seleccionó para los experimentos numéricos una tormenta ocurrida el 13-10-2005, cuyo hietograma y correspondiente hidrograma de salida se muestran en la figura 1.

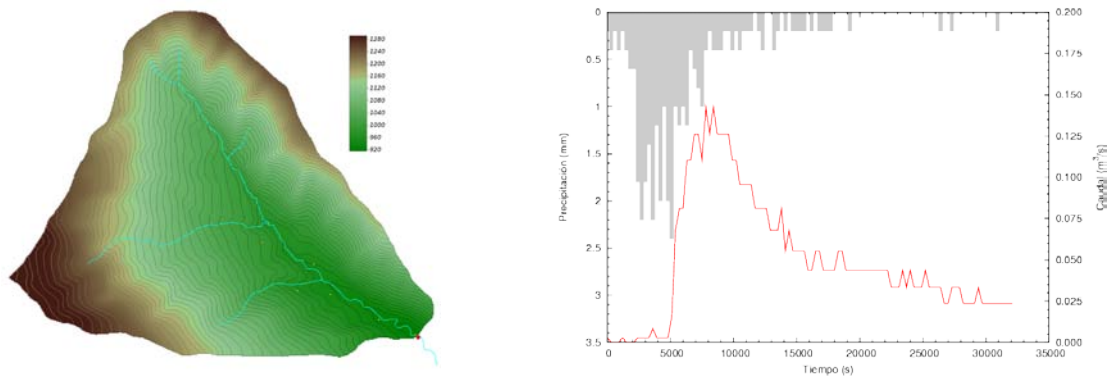


Figura 1: Cuenca de Arnás y evento de tormenta

Para estudiar la respuesta de cada parámetro de la modelización se realizaron simulaciones en las cuales se consideraron separadamente los parámetros. La primera configuración consistió en realizar simulaciones con todas las mallas, sin fricción ni infiltración. Por lo tanto, todas las diferencias que se puedan observar se deben únicamente a las propiedades de las mallas. La segunda configuración incluyó fricción, pero no infiltración. Para caracterizar la rugosidad de la cuenca se utiliza un valor medio de rugosidad de Manning para toda la cuenca, obtenido a partir de un mapa de rugosidad generado por [11]. Así, es posible observar los efectos que introduce la fricción en cada malla, así como su interacción. En la tercera configuración se utilizó el mapa de rugosidades para evaluar si la variabilidad espacial (tanto real como artificial por la interpolación del mapa de rugosidad en la malla) tiene efectos significativos. La cuarta configuración incluyó infiltración, pero sin fricción. La infiltración se representó por medio del método del Número de Curva (SCS-CN). Dado que se cuenta solamente con un hidrograma para la cuenca, se utilizó un solo valor de CN para la cuenca y no una distribución espacial, de forma que se consideraron dos parámetros de calibración, CN y  $\alpha$ .

## 4 Resultados

### 4.1 Efectos de la malla

En esta sección se analiza el efecto que tiene el utilizar las diferentes mallas generadas, omitiendo completamente los fenómenos de fricción e infiltración. Los resultados se muestran en las figuras 2 y 3. La malla SS5 se toma como referencia pues es la única que contiene la información del MDT sin perturbar. El hidrograma con la malla SS5 replica la forma del hietograma. El volumen de agua (instantáneamente) en superficie (VAS) alcanza un máximo aproximadamente al mismo tiempo que el hidrograma de salida. Posteriormente se reduce hasta un volumen residual compuesto por agua que aún fluye, pero mayoritariamente por agua estática, encharcada en depresiones locales del terreno. En los resultados se observa que conforme la resolución de las mallas SS se reduce, el hidrograma experimenta un efecto difusivo, similar a la laminación, aunque para SS20 aparecen algunas oscilaciones de alta frecuencia, las cuales se pueden atribuir a las trayectorias recorriendo las celdas rectangulares cada vez más grandes. El tiempo al caudal máximo (TCM) aumenta conforme se reduce la resolución de la malla. En resumen, el hidrograma pierde resolución temporal y es laminado y retardado. Pero también se incrementa el VAS conforme se reduce la resolución de las mallas SS. Esto se debe a dos factores. Por una parte, una representación topográfica deficiente, que puede perder o generar artificialmente tmáximos y mínimos locales que pueden generar encharcamientos. Por otra parte, también interviene la viscosidad numérica que genera el utilizar celdas más grandes. Los resultados con las mallas TS muestran la misma tendencia, aunque los hidrogramas SS sufren más laminación que los TS. Esto es consecuente con el hecho de que las mallas SS imponen más direccionalidad al flujo que las mallas TS, generando un efecto difusivo. Es decir, la mallas SS son más viscosas que las mallas TS.

Los resultados obtenidos de las mallas TU muestran que al existir poca dispersión en las áreas de las celdas se generan mallas viscosas, como se evidencia con TU-10-40. En dicho caso el hidrograma en general se lamina, aunque se generan también variaciones de alta frecuencia. Se observa un alto VAS, similar al VAS obtenido con SS20. Conforme la dispersión aumenta, el hidrograma sufre menos laminación y aparecen variaciones de mayor frecuencia y amplitud. En el caso TU-16-60 se aprecian variaciones de alta frecuencia alrededor de los 10000s que no se presentan con amplitud similar en ningún otro caso. En TU-18-100 se observan variaciones de alta frecuencia alrededor del pico del hidrograma, con un valor máximo instantáneo de caudal significativamente mayor. En términos temporales, TU-10-40 y TU-16-60 presentan el máximo caudal en el segundo pico, desviándose de significativamente de los resultados de SS5. El efecto es especialmente notorio en TU-10-40.

Por otra parte, las mallas TU-LR responden mucho mejor que las mallas TU. Los resultados de VAS mejoran notoriamente y son muy similares a los resultados de SS5. Las mallas TU-LR presentan una gran dispersión en el tamaño de celdas, y por tanto es consistente con los casos anteriores que se obtengan mejores resultados de VAS. Esto se debe a una buena representación del terreno, capturando correctamente los mínimos locales y las pendientes. Por otra parte, los hidrogramas presentan variaciones de alta frecuencia aunque, en general, de menor amplitud que las mallas TU. A diferencia de las mallas TU, el primer pico se corresponde con el máximo caudal. El caudal máximo instantáneo es mayor en TU-LR-16666 y TU-LR-22624 aunque su duración es muy corta y rápidamente se asemeja a la solución obtenida con SS5. Se aprecia muy poco retraso en el hidrograma. Los resultados indican que las mallas TU-LR introducen poca viscosidad numérica. De este análisis es posible concluir que las mallas TU-LR son más apropiadas que las mallas TU y que muchas mallas SS y TS.

### 4.2 Efectos de la fricción

Los efectos de la fricción se analizaron en dos niveles. Primero, se asignó un valor promedio de rugosidad de Manning representativo de toda la cuenca (FA). De esta manera, los efectos de la fricción no dependen de la discretización de la rugosidad. El segundo nivel de análisis (FM) incuye la representación espacial de la variación de la rugosidad, utilizando un mapa de rugosidad de Manning generado por Serrano-Pacheco [11]. Así, la fricción depende de la variabilidad espacial, tanto de la real como de la generada por la discretización, introduciendo una dependencia de la malla. Ambos casos se comparan entre ellos y con el caso sin fricción (F0). Los resultados se muestran en las figuras 2 y 3.

Al incluir la fricción los hidrogramas son mucho más suaves que aquellos sin fricción, gracias al amortiguamiento natural que introducen los fenómenos de fricción. Los caudales máximos se reducen respecto a los casos F0, aunque el efecto es menos notorio conforme disminuye la resolución de la malla. Esto indica que cierta medida de amortiguamiento es generada por la reducción de resolución de la malla. Sin embargo, en SS20 y TS20 se observan variaciones de alta frecuencia, mucho más importantes que en el resto de mallas

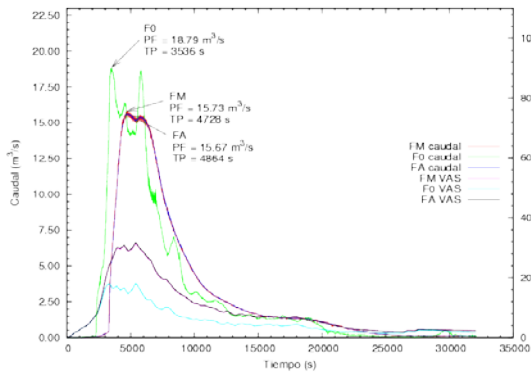
estructuradas. Esto puede deberse a que a la mala representación topográfica de las mallas SS20 y TS20 que genera encharcamientos se le suma el efecto de la fricción que favorece dichos encharcamientos y dificulta el flujo, lo cual posiblemente genera frentes seco-mojado que varían muy rápidamente, lo cual resulta en pulsos de descarga de alta frecuencia en dichas zonas. Es posible que en TS20 el efecto sea más notorio por su menor viscosidad numérica. En todos los casos, el VAS es instantáneamente mayor en los casos FA y FM respecto al caso F0. Sin embargo, hacia el final de la simulación el VAS es prácticamente igual, indicando que la fricción ya no juega un papel sobre el dicha agua, lo cual permite interpretar que la velocidad es muy baja o nula.

Se observan muy pocas diferencias entre los casos FA y FM. Esto es esperable dado que la distribución de rugosidad está muy concentrada alrededor del valor medio de 0.0579. De hecho alrededor del 70% de los pixels tienen valores de 0.05 ó 0.06. Si la distribución fuese más amplia sería razonable observar diferencias mayores entre FA y FM. Se aprecian oscilaciones en los hidrogramas FM, de alta frecuencia y amplitud muy pequeña respecto al entorno local del hidrograma, aunque también aparecen en FA y F0 en alguna medida. Se aprecia una magnitud un poco mayor en las diferencias en las mallas SS que en las TS, y conforme se reduce la resolución aumenta la amplitud de las oscilaciones. Las mallas TU presentan pocas oscilaciones excepto TU-18-100 en las que el caso FA presenta algunos picos importantes, aunque también se observan grandes oscilaciones en el caso F0. Esto indica que la malla TU-18-100 no representa correctamente el terreno y afecta severamente al flujo. Por otra parte las mallas TU-LR responden muy bien. Los hidrogramas generados por mallas TU-LR son mucho más suaves y continuos, muy parecidos a los hidrogramas de SS5 y TS5. Las oscilaciones que aparecen en los casos F0 con mallas TU-LR se amortiguan significativamente y se obtiene una muy buena respuesta.

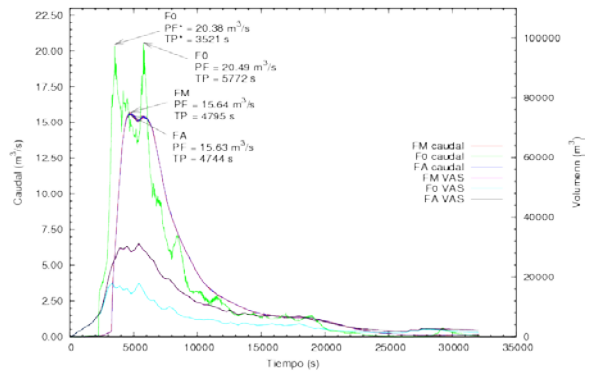
En términos del TCM, la fricción genera un retraso, como es esperable. Es interesante notar que el caudal máximo en el caso SS5-F0 ocurre a los 3536 s, con un valor de 18.79 m<sup>3</sup>/s, mientras que el caso SS20-F0 lo presenta en 4881 s con un valor de 17.57 m<sup>3</sup>/s. El caso SS5-FA presenta un pico de 15.67 m<sup>3</sup>/s a los 4864 s, mientras que el caso SS20-FA tiene un máximo de 17.00 m<sup>3</sup>/s a los 5241 s. Lo que merece la pena destacar de estos resultados es que el pico del caso SS5-FA ocurre 1328 s más tarde que en SS5-F0 (38% más tiempo), mientras que el retraso entre SS5-F0 y SS20-F0 es de 1345 s. Es decir, el retraso que introduce el aumento del tamaño de las celdas de SS5 a SS20 es de la misma magnitud que el que introduce la fricción en la malla SS5. Adicionalmente, el retraso entre SS5-FA y SS20-FA es de 377 s, mucho menos que los 1345 s de retraso entre los casos sin fricción, o que el retraso entre SS5-F0 y SS5-FA. Es de similar magnitud al retraso que introduce la fricción entre SS20-F0 y SS20-FA. Estos resultados muestran que el retraso que introduce la fricción y el retraso generado por el engrosamiento de la malla interactúan de una forma compleja y el resultado no es lineal con la pérdida de resolución. Las mallas TS muestran un comportamiento similar, aunque TS20 no retrasa tanto el primer pico de caudal respecto a TS5 como en los casos SS. Las mallas TU presentan un error importante en el TCM puesto que el segundo pico es mayor que el primero, excepto en TU-18-100 que presenta grandes oscilaciones. La fricción suaviza los hidrogramas, pero el segundo pico sigue siendo más alto en TU-10-40 y TU-16-60. La respuesta de TU-18-100 presenta oscilaciones en el caso FA, probablemente debidas a una mala representación de la topografía y las variaciones en la rugosidad que existen cerca del contorno de salida del cauce. Las mallas TU-LR representan una mejoría importante sobre las mallas TU. Por ejemplo, TU-LR-22624-F0 presenta un retraso de 120 s respecto al caso SS5-F0, y un retraso de apenas 3 s en los casos FA. Recordando que el retraso entre SS5-F0 y SS5-FA es de 1328 s, está claro que los errores que genera TU-LR-22624 en términos de TCM son mínimos. En los casos TS y SS el retraso por reducción de resolución es de la misma magnitud que el retraso por fricción. Sin embargo en TU-LR-22624 no es así, sino que el retraso generado por la malla ronda el 9% del retraso generado por fricción en SS5. Esto es un claro indicador de que las mallas TU-LR son mejores que las mallas estructuradas gruesas y que las mallas TU.

El conjunto de observaciones anteriores llevan a la conclusión de que, a pesar de una generación de malla ciudadosa, se introduce una mayor fricción numérica, y este efecto debe considerarse. Los valores de rugosidad pueden seleccionarse apropiadamente a partir de tablas, pero podrían aportar una cantidad excesiva de fricción a la simulación puesto que la malla puede generar tanta o más fricción. Es, por tanto, necesario calibrar los coeficientes de fricción en cada malla para compensar la fricción numérica generada por la malla.

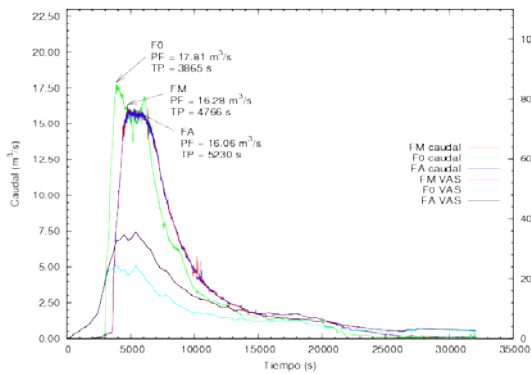
Una comparación general de las variables principales permite concluir que las mallas SS y TS generan peores resultados en cuanto su resolución disminuye. En la mayoría de los casos se subestima el caudal máximo, incluso en mallas TU, se obtienen TCM retrasados y en muchos casos se representa mal el VAS. En términos de la calidad de resultados las mallas SS5, TS5, TU-18-100 y las TU-LR parecen las mejores. Pero además, es importante considerar la eficiencia computacional para la selección de mallas. En términos de tiempo de cálculo TS5 requiere un tiempo de cálculo (en el mejor caso) 1.6 veces mayor que SS5, mientras que TU-LR-16666 y TU-LR-22624 requieren, en el peor caso alrededor de un tercio del tiempo que SS5. TU-LR-31662 requiere alrededor de un 15% menos tiempo que SS5. Como referencia, el caso SS5-F0 requirió aproximadamente 16.5 horas de tiempo de cálculo. Por tanto, TU-LR-16666 y TU-LR-22624 son las mejores mallas. Al comparar las mallas con los tres casos (F0, FA, FM) fue posible concluir que LMR-22624 es la malla más apropiada.



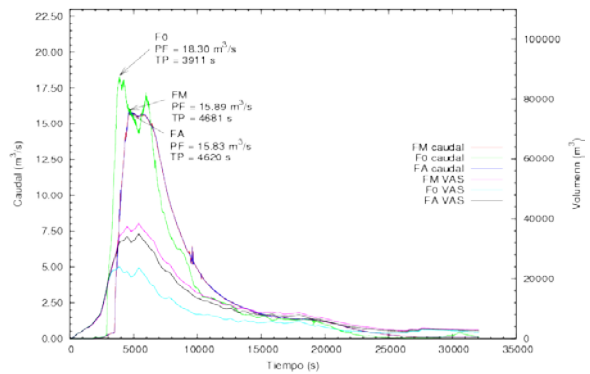
(a) SS5



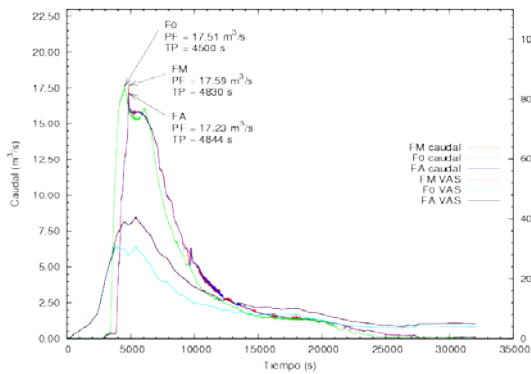
(b) TS5



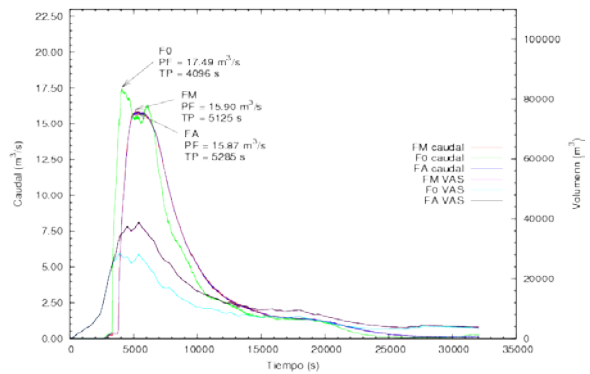
(c) SS10



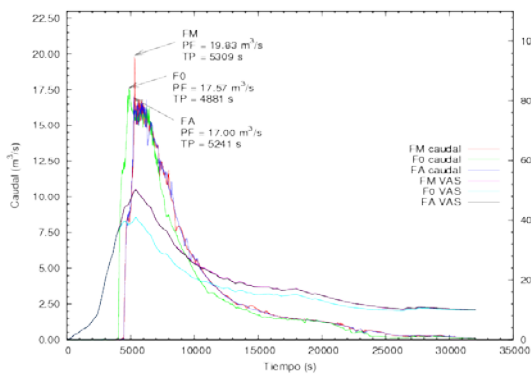
(d) TS10



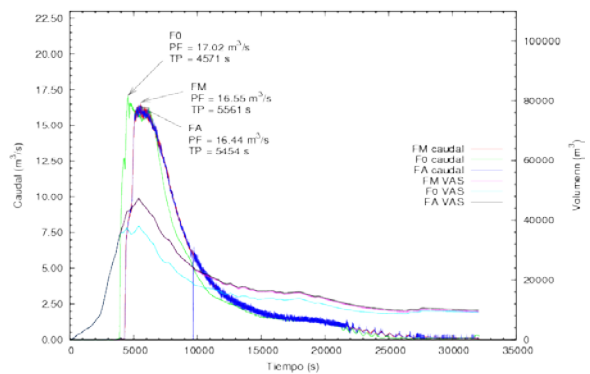
(e) SS15



(f) TS15



(g) SS20



(h) TS20

Figura 2: Resultados para mallas estructuradas

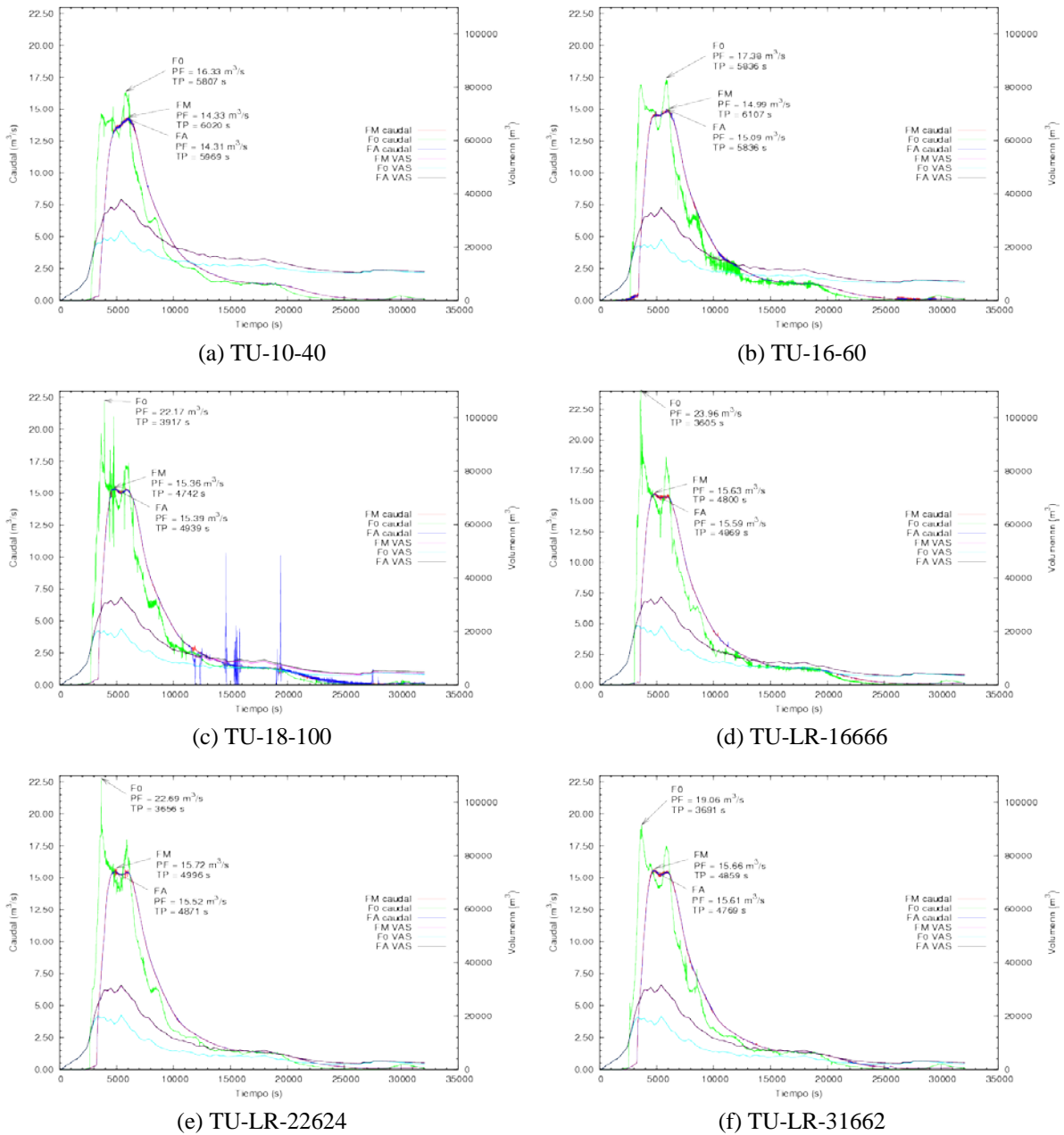


Figura 3: Resultados para mallas no estructuradas

### 4.3 Resultados de SCS-CN

Las simulaciones en las cuales se utilizó el SCS-CN solo se realizaron con la malla TU-LR-22624 por considerarse la más apropiada para la cuenca según se expone en la sección anterior. El proceso de calibración de CN y  $\alpha$  se describe a continuación. Inicialmente, se utilizaron las mediciones experimentales para la determinación del volumen escurrido en el punto de salida (VES) el cual es de 1595 m<sup>3</sup>, lo cual representa un 1.61% del volumen precipitado de 99065 m<sup>3</sup>. Con dicho valor de VES es posible estimar, utilizando el método del SCS de forma agregada combinaciones de CN y  $\alpha$  que generen dicho volumen. Con las combinaciones obtenidas como referencia, se realizaron simulaciones con el modelo de aguas poco profundas para obtener la respuesta de la cuenca y comparar los hidrogramas con la información experimental. Los resultados obtenidos en general fueron muy pobres, con un mal ajuste del VES y en consecuencia, del hidrograma. Se realizaron variaciones sobre las combinaciones anteriores, para intentar obtener mejores resultados. Los dos casos con mejores resultados se muestran en la figura 4 para combinaciones (CN, $\alpha$ )=(52,0.08) y (CN, $\alpha$ )=(30,0.01).



Obsérvese que en un caso se sobreestima y en el otro se subestima el VES. Adicionalmente, los hidrogramas están retrasados considerablemente, y su forma no se ajusta a las mediciones.

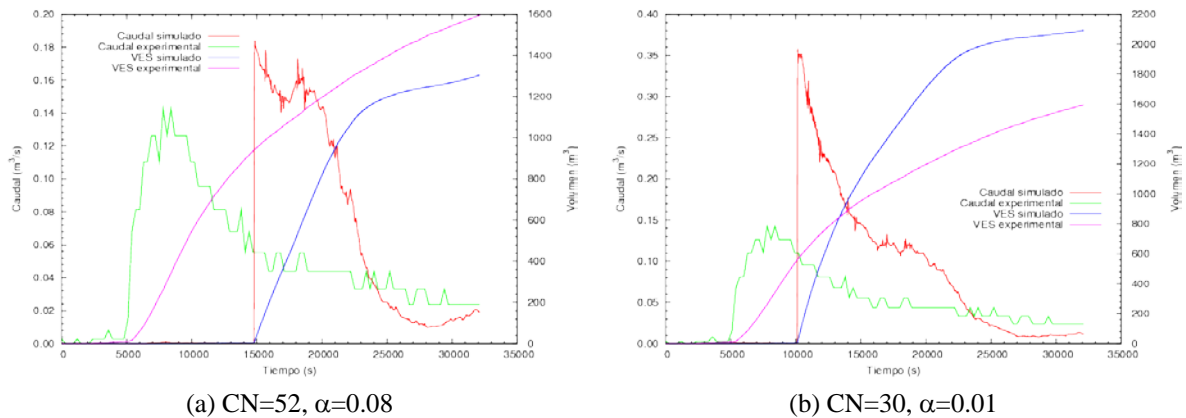


Figura 4: Resultados de simulaciones SCS-CN para VES=1595 m<sup>3</sup>.

Sin embargo, del espectro de simulaciones fue posible observar que el volumen almacenado en superficie (VAS) al final de la simulación se mantuvo alrededor de los 1650 m<sup>3</sup>. Como se indicó en la sección 4.1, este volumen contiene una cantidad importante de agua inmóvil. El valor del VAS es importante porque es muy cercano al valor del VES. El problema que se evidencia es que el agua encharcada que refleja el VAS es agua escurrida de otra zona de la cuenca (es decir, agua no infiltrada), un efecto que el SCS-CN no es capaz de captar. Por tanto, el volumen que se corresponde con la precipitación efectiva no necesariamente fluye por el punto de salida de la cuenca. El resultado es que la calibración de (CN,α) buscando un VES estimado *a priori* con los resultados experimentales será errónea. La calibración debe realizarse con la suma de VES y de VAS ya que SCS-CN en realidad estima el agua *no infiltrada*. Ahora, si el valor de VAS fuese mucho menor que VES (experimental), el error en el volumen escurrido calculado sería de menor magnitud. Pero en este caso particular, son muy similares, por lo que el error es evidente. En consecuencia, para conocer el VES correcto, es necesario estimar cuánto es el VAS residual de la cuenca después de la tormenta. Para ello, se simuló en condiciones sin fricción ni infiltración, la escorrentía de un pulso sintético de lluvia instantáneo sobre la cuenca. El pulso de lluvia fue equivalente a una lluvia de volumen igual al VES experimental. Al final de la simulación se obtuvo un VAS residual de aproximadamente 1590 m<sup>3</sup>. Se realizó una segunda simulación de pulso sintético, con volumen total de 3200 m<sup>3</sup>, que resultó en un VAS residual de alrededor de 1800 m<sup>3</sup>. Finalmente, se procedió a estimar de forma agregada con SCS-CN y un volumen VES+VAS = 3200 m<sup>3</sup> y así recalibrar (CN,α).

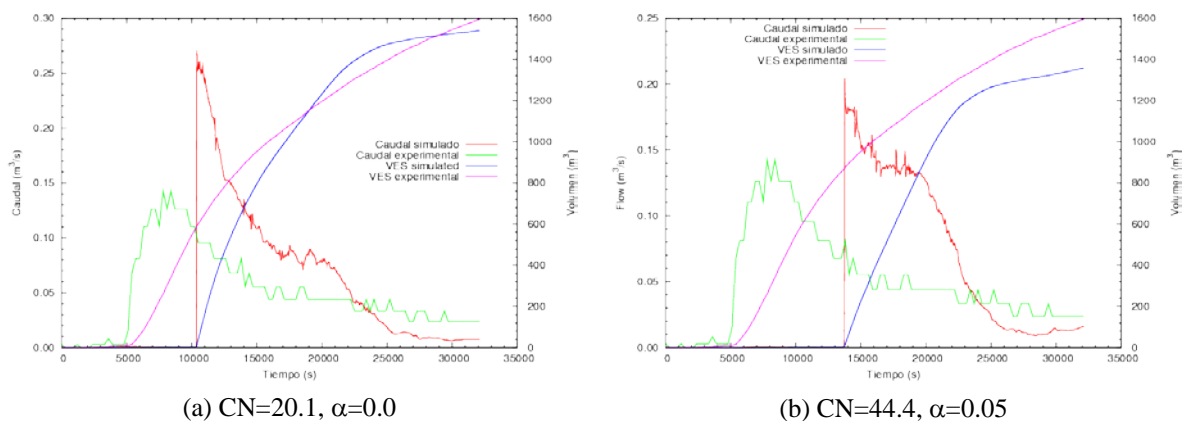


Figura 5: Resultados de simulaciones SCS-CN para VES=3200 m<sup>3</sup>.

Con las combinaciones obtenidas, se realizaron simulaciones distribuidas. Los mejores resultados se obtuvieron con (CN,α)=(20.1,0) y (44.4,0.05), los cuales se muestran en la figura 5. Obsérvese que el VES con (20.1,0)

aproxima bien el VES experimental, pero el hidrograma es considerablemente diferente. Nótese que  $\alpha$  es el parámetro responsable de la infiltración inicial y por tanto tiene una influencia importante sobre la distribución temporal de la infiltración, especialmente al principio. Pero aún con un valor de cero (y sin fricción) el hidrograma está retrasado significativamente. El aumento del caudal es súbito y a un valor muy alto. Aunque introducir fricción reduciría el pico y haría más suave el aumento, también retrasaría más el hidrograma. Los resultados indican que, aunque se considere correctamente el VES experimental para la calibración de (CN, $\alpha$ ), puede que no se alcance un buen ajuste del hidrograma. Nótese que en la utilización de SCS-CN en conjunto con métodos de hidrogramas unitarios puede ser posible ajustar correctamente el hidrograma puesto que existen parámetros de calibración en el hidrograma unitario, que permiten controlar su forma. Sin embargo, al utilizar SCS-CN con un método distribuido y mecanístico, no se cuenta con parámetros libres para calibrar, puesto que la topografía y el flujo superficial se modelan con bases físicas y con sus ecuaciones gobernantes directamente. Se requiere, en general, mejores estimaciones de la infiltración en el tiempo para ajustar correctamente el hidrograma de salida. Es posible, por otra parte, que en otro tipo de eventos, de mayor duración e intensidades menores, los resultados obtenidos con esta metodología sean mejores. De forma similar, si los tiempos de flujo son mucho mayores que la escala temporal de la lluvia, los errores relativos serían significativamente menores. En definitiva, la calidad de los resultados de la aplicación del SCS-CN en conjunto con un modelo distribuido de flujo superficial, depende de la magnitud del evento y de la cuenca.

## Referencias bibliográficas

1. Baltas, E. A., Dervos, N. A., and Mimikou, M. A. Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. *Hydrology and Earth System Sciences* 11, 6 (2007), 1825–1829.
2. Garcia-Ruiz, J., Arnaez, J., Begueria, S., Seeger, M., Marti-Bono, C., Regues, D., Lana-Renault, N., and White, S. Runoff generation in an intensively disturbed, abandoned farmland catchment, Central Spanish Pyrenees. *CATENA* 59, 1 (JAN 1 2005), 79–92.
3. Horritt, M. S., and Bates, P. D. Effects of spatial resolution on a raster based model of flood flow. *Journal of Hydrology* 253, 1-4 (2001), 239 – 249.
4. Lana-Renault, N., Latron, J., and Reguees, D. Streamflow response and water-table dynamics in a sub-Mediterranean research catchment (Central Pyrenees). *Journal of Hydrology* 347, 3-4 (DEC 30 2007), 497–507.
5. Leveque, R. *Finite Volume Methods for Hyperbolic Problems*. Cambridge University Press, 2002.
6. López-Barrera, D., García-Navarro, P., Brufau, P., Sources of uncertainty in the validation of a coupled hydrological-hydraulic simulation model with sediment transport. *La Houille Blanche* 3, 2011.
7. Murillo, J., and Garcia-Navarro, P. Weak solutions for partial differential equations with source terms: Application to the shallow water equations. *Journal of Computational Physics* 229, 11 (JUN 1 2010), 4327–4368.
8. Ponce, V. M., and Hawkins, R. H. Runoff curve number: Has it reached maturity? *Journal of Hydrologic Engineering* 1, 1 (1996), 11–19.
9. Schubert, J. E., Sanders, B. F., Smith, M. J., and Wright, N. G. Unstructured mesh generation and landcover-based resistance for hydrodynamic modeling of urban flooding. *Advances in Water Resources* 31, 12 (DEC 2008), 1603–1621.
10. SCS. *SCS National Engineering Handbook*. Soil Conservation Service, USA Department of Agriculture, 1964.
11. Serrano-Pacheco, A. Simulación numérica bidimensional de procesos hidrológicos e hidráulicos sobre lecho irregular deformable. PhD thesis, Universidad de Zaragoza, NOV 2009.
12. Shewchuk, J. R. Triangle: Engineering a 2D Quality Mesh Generator and Delaunay Triangulator. In *Applied Computational Geometry: Towards Geometric Engineering*, M. C. Lin and D. Manocha, Eds., vol. 1148 of Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, May 1996, pp. 203–222. From the First ACM Workshop on Applied Computational Geometry.