

# Influencia de la densidad espacial de estaciones pluviométricas y de la disponibilidad de datos radar en los hidrogramas de tormenta calculados con un modelo hidrológico distribuido: Aplicación a una cuenca de 24 Km<sup>2</sup> en el Noroeste de España

L. Cea, I. Fraga, J. Puertas, M. Álvarez, M. Bermúdez, S. Coquerez  
*Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente. Universidad de Coruña*

S. Salsón, A. Pettazzi  
*MeteoGalicia. Xunta de Galicia*

## 1. Introducción

El cálculo de hidrogramas de avenida mediante modelos de transformación lluvia-escorrentía requiere una caracterización precisa de la evolución espacial y temporal de los campos de precipitación. La disponibilidad actual de modelos hidrológicos distribuidos y de datos de radar meteorológico con una alta resolución espacial y temporal ha propiciado el desarrollo de nuevos modelos y metodologías de cálculo que incorporan dicha información. A pesar de que el radar meteorológico proporciona una adecuada descripción de la variabilidad espacio-temporal de la intensidad de precipitación, los valores de dicha intensidad tienen una elevada incertidumbre debido a distintos factores como la transformación utilizada para pasar de datos de reflectividad a datos de precipitación, o la altura sobre el terreno a la que se mide la intensidad de precipitación. Las estaciones meteorológicas por el contrario proporcionan estimaciones relativamente precisas de la intensidad de lluvia en un punto concreto pero, debido a la distancia habitual entre estaciones en las redes meteorológicas existentes, no son capaces por si solas de captar de forma adecuada la variabilidad espacial de la lluvia en pequeñas escalas espaciales. Ello ha propiciado el desarrollo de técnicas estadísticas para combinar los datos radar con datos de pluviómetros en superficie con el fin de obtener una adecuada representación tanto de la intensidad como de la distribución espacial de la precipitación. De las múltiples técnicas existentes, una de las más utilizadas actualmente en hidrología es Kriging with External Drift (Ahmed y De Marsily, 1987; Haberlandt, 2007).

En este trabajo se analiza la influencia del número de estaciones pluviométricas disponibles en los hidrogramas calculados con un modelo hidrológico distribuido en una cuenca de 24 km<sup>2</sup> situada en el Noroeste de España. Desde el punto de vista hidrológico dicha cuenca es

especialmente interesante por combinar zonas rurales y urbanas y por tener un riesgo potencial de inundación elevado debido a sus características hidrológicas (tiempo de concentración bajo, fuertes pendientes, zonas urbanizadas).

## 2. Modelo hidrológico distribuido

El modelo hidrológico utilizado en este trabajo para realizar la transformación lluvia-escorrentía considera de manera espacialmente distribuida el flujo por escorrentía superficial y por escorrentía subsuperficial, y ha sido implementado en el software Iber (Bladé et al., 2014). El modelo es totalmente distribuido en espacio, y permite una caracterización detallada de la topografía de la cuenca, de los usos del suelo y de los tipos de suelo, así como una definición de la lluvia variable en espacio y tiempo. Permite asimismo incorporar estructuras hidráulicas como azudes, terraplenes, obras de drenaje y otras construcciones que influyen en la propagación de la escorrentía y en la generación del hidrograma de tormenta, y que son especialmente relevantes en la cuenca de estudio.

El cálculo de la escorrentía superficial se realiza mediante la resolución de las ecuaciones de St. Venant 2D por el método de volúmenes finitos en una malla no estructurada, incluyendo términos de precipitación y de infiltración (Cea y Bladé, 2015). El modelo de escorrentía superficial ha sido validado previamente en diferentes condiciones de flujo y para distintas escalas espaciales (Cea y Bladé, 2015; Cea et al. 2014)

Las pérdidas por infiltración se han estimado mediante el modelo lineal incluido en Iber, que si bien no tiene en cuenta la variación temporal de la capacidad de infiltración, si que puede proporcionar una estimación aceptable del valor medio de la tasa de infiltración durante tormentas de corta duración. El único parámetro del modelo lineal es la tasa de infiltración potencial, que se considera constante en tiempo durante todo el evento. Su calibración es por lo tanto más sencilla que la de otros modelos como el de Horton o el de Green-Ampt, en los cuales es necesario ajustar 3 parámetros por cada tipo de suelo considerado. Esto es especialmente relevante en la cuenca de estudio, ya que las propiedades del suelo no son homogéneas espacialmente y por lo tanto el número de parámetros se multiplica con el número de tipos de suelo considerados. Se han considerado tres tipos de suelo con capacidades potenciales de infiltración diferentes: suelo urbano o industrial, suelo agrícola, y bosque mixto. La tasa potencial de infiltración de cada uno de estos suelos se ha considerado como un parámetro de calibración del modelo.

La componente subsuperficial de la escorrentía se calcula mediante la resolución de la ecuación de Boussinesq 2D para flujo no confinado en un medio poroso isotrópico, asumiendo las hipótesis de Dupuit. Para considerar la interacción entre flujo subsuperficial y escorrentía superficial, en dicha ecuación se considera la recarga por infiltración y la descarga por exfiltración hacia la superficie. La versión actual del modelo no considera el flujo en la zona no saturada del suelo, considerándose que el volumen de agua infiltrada pasa directamente a la zona saturada, contribuyendo al aumento de la cota del nivel

freático. Esta simplificación es únicamente válida para espesores de suelo pequeños y para conductividades verticales elevadas (i.e. cuando el tiempo de tránsito del volumen de agua infiltrada a través de la zona no saturada es pequeño). La ecuación de flujo subsuperficial se resuelve mediante el método de volúmenes finitos en la misma malla no estructurada en la que se resuelven las ecuaciones de St. Venant.

### 3. Cuenca de estudio

La cuenca del río Con se encuentra situada en la provincia de Pontevedra, en el Noroeste de España. Tiene una extensión total de 24.2 km<sup>2</sup> y vierte al mar en la ría de Arousa. La topografía de la cuenca es relativamente abrupta, siendo la cota máxima del terreno en la cuenca de aproximadamente 640 m.s.n.m. Los diferentes tipos de terreno existentes en la cuenca se pueden agrupar en tres tipos de suelo principales: urbano o industrial, agrícola y bosque mixto. La distribución espacial de estos tipos de suelo se muestra en la Figura 1.

La cuenca se divide en tres subcuentas, siendo la principal la del río Con que abarca toda la parte central y Norte de la cuenca, con una extensión de aproximadamente 16.3 km<sup>2</sup>. A la salida de dicha cuenca se registra de forma continua el calado en el río con una sonda de presión. A partir del nivel registrado y de la curva de gasto estimada en dicha sección se obtiene de forma continua el caudal del río, que será utilizado para calibrar y validar el modelo hidrológico.



**Figura 1.** Modelo hidrológico distribuido de la cuenca del río Con. MDT (izquierda), principales corrientes de agua superficiales (centro) y usos del suelo (derecha). El círculo negro indica la situación de la sección de aforo en el río Con.

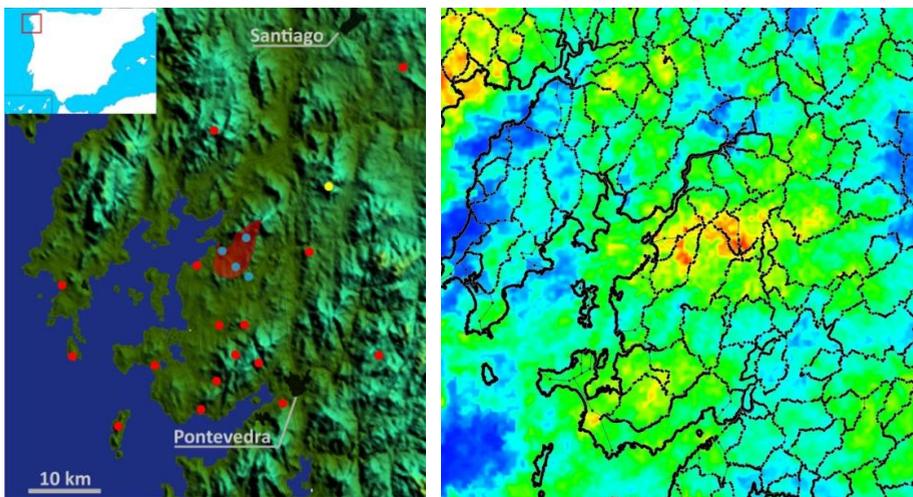
## 4. Estimación de los campos de precipitación

### 4.1. Datos de precipitación utilizados

La estimación de los campos de precipitación se ha realizado combinando los siguientes datos de precipitación (Figura 2): el radar de precipitación del servicio de meteorología

gallego (MeteoGalicia), 17 pluviómetros pertenecientes a la red de estaciones meteorológicas de MeteoGalicia, 3 pluviómetros instalados en el marco de las actividades del proyecto CAPRI (CGL2013-46245-R), y un pluviómetro del CSIC situado en las proximidades de la cuenca.

El radar meteorológico se encuentra situado en el Monte Xesteiras, a una altitud de 750 m.s.n.m. y a aproximadamente 10 Km al Noreste de la cuenca de estudio. Su resolución espacial en la zona de estudio es de aproximadamente 250 x 250 m y su resolución temporal de 5 minutos. Los datos radar utilizados para estimar la precipitación en la cuenca cubren una cuadrícula de aproximadamente 60 x 60 km centrada en la propia cuenca. De la red de estaciones de MeteoGalicia se han seleccionado aquellas situadas dentro de dicha cuadrícula (17 estaciones). Algunas de estas estaciones se encuentran en las proximidades de la cuenca, pero ninguna de ellas está situada en el interior de la propia cuenca. Asimismo se han utilizado los datos del pluviómetro de la estación fitopatológica do Areeiro, perteneciente al CSIC, situada en el Pazo Baión (Vilanova de Arousa). Adicionalmente se han instalado recientemente 3 nuevas estaciones pluviométricas distribuidas espacialmente en el interior de la cuenca. El objetivo de estas estaciones es: 1) evaluar el error en la estimación de la precipitación en el interior de la cuenca; 2) completar los datos de la red de MeteoGalicia para estimar la precipitación en la cuenca; y 3) verificar la influencia de una mayor densidad de estaciones en la predicción de los campos de precipitación, así como en los hidrogramas calculados mediante modelos hidrológicos distribuidos. Todos los datos de las estaciones pluviométricas utilizados tienen una resolución temporal de 10 minutos.



**Figura 2.** Mapa de situación de las estaciones pluviométricas en relación a la cuenca (izquierda) e imagen de distribución espacial de precipitación obtenida del radar meteorológico para el 01/05/2015 entre las 04:40 y las 04:50. Se muestran en rojo las estaciones de MeteoGalicia, en azul las estaciones instaladas en el proyecto CAPRI y la de Pazo Baión, y en amarillo la localización del radar de Monte Xesteiras, en donde también existe una estación pluviométrica de MeteoGalicia.

## 4.2. Métodos de interpolación

Se han considerado dos métodos de interpolación habitualmente utilizados en hidrología para estimar la variación espacial de la precipitación: Kriging Ordinario (OK) y Kriging with External Drift (KED) (Ahmed y De Marsily, 1987; Haberlandt, 2007). Con el fin de cuantificar la influencia de los pluviómetros situados en el interior de la cuenca sobre las estimaciones de precipitación obtenidos con cada uno de estos métodos de interpolación se han realizado estimaciones considerando: 1) todos los pluviómetros disponibles (21 pluviómetros); 2) únicamente los pluviómetros de MeteoGalicia (17 pluviómetros). Todas las estimaciones se han realizado para 2 resoluciones temporales: 10 min y 60 min.

## 4.3 Variabilidad espacial y temporal de la precipitación

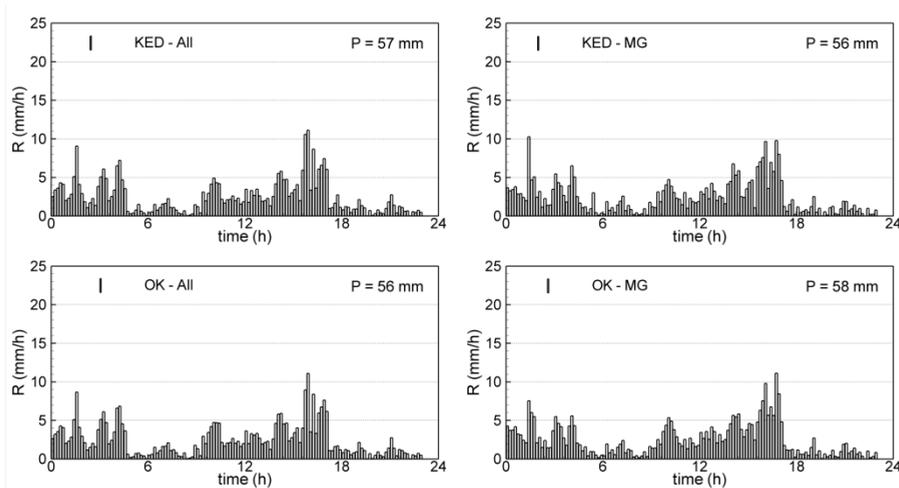
La Figura 3 muestra los hietogramas de tormenta promediados en la cuenca del río Con durante el evento del 30/04/2015, estimados mediante KED y OK. Tomando como referencia el hietograma estimado mediante OK utilizando únicamente los 17 pluviómetros de MeteoGalicia, se observa que el hecho de añadir la información del radar meteorológico (KED) y de los pluviómetros instalados en la propia cuenca apenas influye en el volumen total de precipitación estimado durante el evento del 30/04/2015, que oscila entre 56 y 58 mm en función del método de interpolación (Figura 3). Asimismo, la variabilidad temporal de la precipitación es muy similar para las cuatro estimaciones presentadas en la Figura 3. Tomando como referencia el hietograma obtenido utilizando todos los pluviómetros disponibles y los datos radar (KED-All), la diferencia absoluta media (MAD) con los hietogramas obtenidos mediante las otras técnicas de interpolación varía entre 0.14 y 0.76 mm/h (Tabla 1). Las mayores diferencias se producen al no utilizar los pluviómetros instalados en la propia cuenca en la estimación, independientemente de si se usan los datos radar (KED-MG) o no (OK-MG). En todo caso, si bien el valor máximo de las diferencias puede alcanzar valores bastante elevados en algunos pasos de tiempo (de hasta 6 mm/h), la media de su valor absoluto es muy bajo, menor a 0.8 mm/h en todos los casos para una resolución temporal de 10 min. Se observa el mismo comportamiento y los mismos órdenes de magnitud en las diferencias entre la distribución espacial de los campos de precipitación obtenidos con las distintas interpolaciones (Tabla 2).

	30/04/2015			04/05/2015		
	MAD	MD	MaxD	MAD	MD	MaxD
KED-MG	0.76	-0.02	6.32	1.42	0.31	5.57
OK-All	0.14	-0.02	1.92	0.06	0.03	0.41
OK-MG	0.75	0.06	6.46	1.36	0.27	5.33

**Tabla 1.** Diferencia absoluta media (MAD), diferencia media (MD) y diferencia máxima (MaxD), expresadas en mm/h, entre los hietogramas calculados con las distintas técnicas de interpolación y el calculado con KED usando todos los pluviómetros (KED-All), para una resolución temporal de 10 min.

	30/04/2015		04/05/2015	
	MAD	MD	MAD	MD
KED-MG	0.87	0.02	1.51	-0.29
OK-All	0.26	0.02	0.15	-0.03
OK-MG	0.88	-0.06	1.46	-0.26

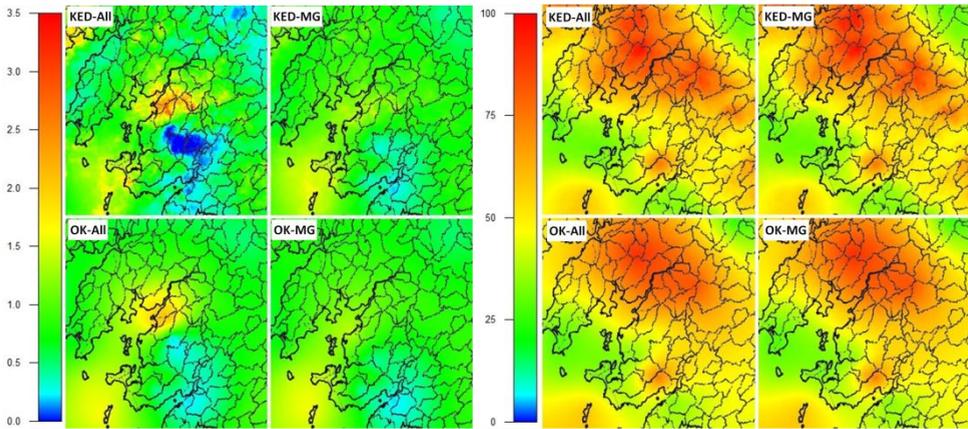
**Tabla 2.** Diferencia absoluta media (MA) y diferencia media (MD) expresadas en mm/h, entre los campos espaciales de precipitación calculados con las distintas técnicas de interpolación y el calculado con KED usando todos los pluviómetros (KED-All), para una resolución temporal de 10 min.



**Figura 3.** Hietogramas promediados en la cuenca del río Con durante el evento del 30/04/2015, calculados mediante KED y OK, utilizando todas las estaciones pluviométricas (All) y sólo las de Meteogalicia (MG). P = profundidad total de precipitación. Resolución temporal: 10 min. El tiempo  $t=0$  se corresponde con las 13:00 del 30/04/2015.

Respecto a la variabilidad espacial de la precipitación, las diferencias entre los 4 métodos de interpolación son escasas en lo que se refiere a la distribución espacial de la profundidad total de precipitación durante todo el evento (Figura 4, derecha). Las diferencias en las estimaciones son más significativas para intervalos de tiempo pequeños (Figura 4, izquierda), debido a que la correlación espacial de la intensidad de precipitación disminuye al disminuir el intervalo de tiempo considerado.

A pesar de que las diferencias en las estimaciones obtenidas con los distintos métodos de interpolación son pequeñas, es difícil estimar *a priori* la influencia de utilizar un método de interpolación u otro sobre el hidrograma calculado con un modelo hidrológico distribuido. Dado que las diferencias entre métodos de interpolación se reducen de forma importante al disminuir la resolución temporal de las estimaciones, el efecto sobre el hidrograma calculado será mayor cuanto menor sea el tiempo de concentración de la cuenca. Asimismo, la heterogeneidad espacial de los tipos de suelo propiciará un aumento de sensibilidad de los resultados del modelo hidrológico a la variabilidad espacial de precipitación.



**Figura 4.** Distribución espacial de la profundidad de precipitación (mm) entre las 04:40 y las 04:50 del 01/05/2015 (izquierda) y durante todo el evento del 30/04/2015 (derecha). Estimaciones realizadas mediante KED y OK con todos los pluviómetros (All) y con los de MeteoGalicia (MG).

## 5. Modelización hidrológica distribuida

### 5.1. Modelo hidrológico distribuido

La malla de cálculo utilizada en el modelo hidrológico distribuido descrito en la sección 2 está compuesta por 57252 elementos triangulares con tamaños de lado que varían entre 10 m en los cauces fluviales y en las carreteras principales que atraviesan la cuenca y 35 m en el resto de la cuenca (Figura 5). Dichos tamaños se han definido tras un análisis de convergencia en malla de los hidrogramas calculados con el modelo.



**Figura 5.** Tamaños de elemento de la malla de cálculo (izquierda) y detalle de la malla en las proximidades del cierre de la cuenca (derecha).

La calibración del modelo se ha realizado para el evento del 30/04/2015, utilizando los datos de precipitación obtenidos mediante KED y utilizando todos los pluviómetros disponibles. Los parámetros calibrados son el coeficiente de rugosidad de fondo (Manning), la tasa

potencial de infiltración, el espesor de la capa de suelo permeable y la conductividad hidráulica del subsuelo. El único parámetro que se ha considerado variable espacialmente es la tasa de infiltración, la cual toma un valor diferente para cada uno de los 3 tipos de suelo considerados en la Figura 1. Como función objetivo se ha utilizado el NSE calculado a partir del hidrograma medido a la salida de la cuenca. Los parámetros adoptados tras la calibración se muestran en la Tabla 3. La comparación numérico experimental obtenida con dichos parámetros se muestra en la Figura 6 (NSE=0.71). En dicha figura se muestra asimismo la descomposición del hidrograma calculado en flujo superficial y subsuperficial.

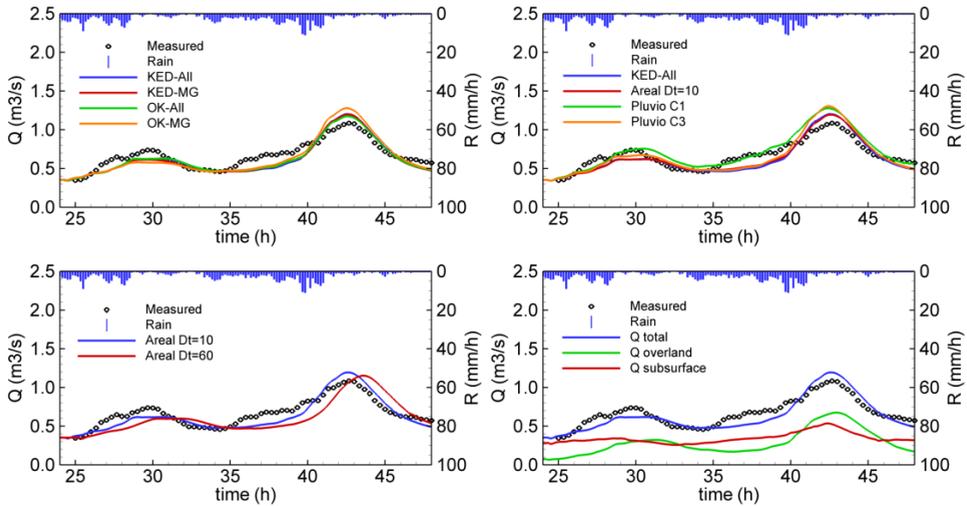
Evento	$n$ ( $s \cdot m^{-1/3}$ )	$f1$ (mm/h)	$f2$ (mm/h)	$f3$ (mm/h)	$ds$ (m)	$ks$ (m/s)	NSE
30/04/2015	0.3	1.7	18	26	0.9	$8 \cdot 10^{-5}$	0.71

**Tabla 3.** Parámetros del modelo numérico obtenidos tras su calibración en el evento del 30/04/2015.

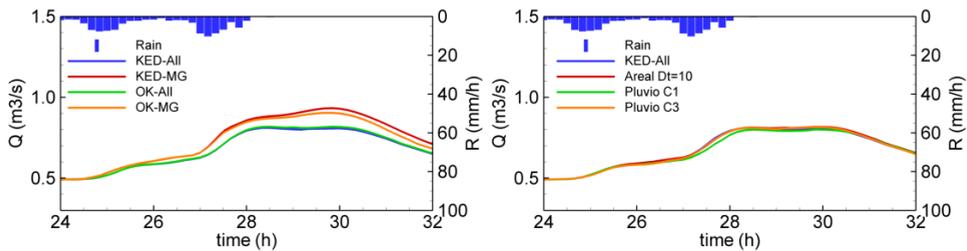
## 5.2. Influencia del método de estimación de precipitación en el hidrograma de salida

Las diferentes estimaciones de precipitación calculadas para los días 30/04/2015 y 04/05/2015 se han utilizado para calcular el hidrograma a la salida de la cuenca con el modelo hidrológico distribuido descrito en la sección 2. La comparación de los hidrogramas calculados se muestra en las Figuras 7 y 8. Las diferencias en los hidrogramas calculados mediante KED y OK el 30/04/2015 son despreciables. Esto se debe a que la variabilidad espacial de la precipitación durante este evento es pequeña. Incluso estimando la precipitación a partir de una única sonda ubicada en la propia cuenca, las diferencias en el hidrograma calculado son pequeñas. La influencia de la resolución temporal es mayor en este caso (Figura 6, abajo-izquierda), lo que muestra la importancia de trabajar con una resolución del orden de 10 min en la definición de la precipitación en esta cuenca.

En el evento del 04/05/2015 las diferencias obtenidas con los distintos métodos de interpolación son ligeramente mayores. En este caso las diferencias entre hidrogramas tienen su origen en el hecho de utilizar, o no, los pluviómetros ubicados en la propia cuenca para realizar la estimación de la precipitación (Figura 7, izquierda). En este caso el hecho de utilizar los datos radar no aporta diferencias significativas en los hidrogramas calculados.



**Figura 6.** Hidrogramas calculados para el evento del 30/04/2015 utilizando distintas estimaciones de precipitación. Los pluviómetros C1 y C3 se encuentran ubicados en la propia cuenca, en el embalse del Con y en el Ayuntamiento de Vilagarcía respectivamente. Se muestra asimismo (abajo-derecha) la descomposición del hidrograma total en flujo superficial y flujo subsuperficial.



**Figura 7.** Hidrogramas calculados con el modelo hidrológico para el evento del 04/05/2015 utilizando distintas estimaciones de precipitación.

## 6. Conclusiones

Se han presentado los primeros resultados obtenidos en el proyecto CAPRI (CGL2013-46245-R), referentes a la modelización hidrológica distribuida a partir de estimaciones de precipitación obtenidas mediante la combinación de datos radar y de estaciones pluviométricas. El cálculo hidrológico se ha realizado con el modelo Iber, el cual resuelve las ecuaciones de St. Venant 2D. A dicho modelo se le ha incorporado un módulo de flujo subsuperficial, ya que en los eventos estudiados la componente subterránea del flujo es relevante.

Los resultados obtenidos el 30/04/2015 y el 04/05/2015 indican que la variabilidad espacial de la lluvia tiene una influencia moderada en el hidrograma calculado con un modelo

hidrológico, especialmente teniendo en cuenta el resto de incertidumbres presentes en los cálculos hidrológicos, como son la definición de la capacidad de infiltración del suelo o los errores estructurales del modelo hidrológico utilizado. En ambos eventos, los resultados preliminares parecen indicar que el hecho de incorporar los pluviómetros situados en la propia cuenca en la estimación de los campos de precipitación tiene una influencia más relevante en el cálculo hidrológico que la utilización de datos radar, si bien esta conclusión deberá corroborarse en futuros eventos de precipitación de mayor intensidad y de diferentes características a los registrados hasta el momento, ya que las tormentas registradas desde el inicio del proyecto son escasas y de una intensidad moderada.

## Agradecimientos

Este trabajo se integra dentro del proyecto de investigación "Cálculo probabilístico de inundaciones con modelos hidrológicos de alta resolución espacial a partir de estimaciones de precipitación de radar (CAPRI)" (Referencia: CGL2013-46245-R), financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad dentro del Programa Estatal de Investigación, Desarrollo e Innovación orientada a los Retos de la Sociedad. La agencia Meteogalicia (Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructuras, Xunta de Galicia) ha proporcionado los datos de precipitación del radar meteorológico de Monte Xesteiras y de su red de estaciones pluviométricas.

## Referencias

- Ahmed, S., and De Marsily, G. 1987. Comparison of geostatistical methods for estimating transmissivity using data on transmissivity and specific capacity. *Water Resources Research* 23(9), 1717-1737
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., ... & Coll, A. (2014). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería* 30(1), 1-10
- Cea, L. and Bladé, E. (2015), A simple and efficient unstructured finite volume scheme for solving the shallow water equations in overland flow applications. *Water Resour. Res.*. Accepted Author Manuscript. doi:10.1002/2014WR016547
- Cea, L., Legout, C., Darboux, F., Esteves, M., & Nord, G. (2014). Experimental validation of a 2D overland flow model using high resolution water depth and velocity data. *Journal of Hydrology*, 513, 142-153
- Haberlandt, U. 2007. Geostatistical interpolation of hourly precipitation from rain gauges and radar for a large-scale extreme rainfall event. *Journal of Hydrology* 332(1), 144-157
- Pettazzi, A., and Salsón, S. 2012. Combining radar and rain gauges rainfall estimates using conditional merging: a case study. In *Proceeding of the ERAD 2012—The 7th European Conference on Radar in Meteorology and Hydrology*.