

# ***Evaluación de la incertidumbre en la simulación de caudales en puntos no aforados con un modelo distribuido y mediante un procesador estocástico***

## ***(Tema B. Hidrología y gestión del agua.)***

*Juan Camilo Múnera<sup>1</sup>, Félix Francés<sup>1</sup>, Ezio Todini<sup>2</sup>, Gabriele Coccia<sup>2</sup>*

*<sup>(1)</sup>Instituto de Ingeniería del Agua y el Medio Ambiente, Universidad Politécnica de Valencia*

*<sup>(2)</sup>Departamento de Ciencias de La Tierra y Geológico Ambiental, Universidad de Bolonia*

[juancmunera@yahoo.es](mailto:juancmunera@yahoo.es)

En este trabajo se presenta una metodología orientada a la evaluación de incertidumbre asociada a la estimación de caudales mediante un modelo hidrológico distribuido en puntos no aforados de una cuenca o sistema hidrológico que constituya una región homogénea desde el punto de vista de la respuesta hidrológica, y que cuente con algunas estaciones de aforo. Resulta fundamental asignar a la estimación realizada con el modelo hidrológico, una medida de la incertidumbre de la estimación, es decir, establecer en cada paso de tiempo con qué probabilidad se puede verificar la ocurrencia real de un caudal de cierta magnitud, condicionado a la estimación realizada con el modelo. Esta aproximación probabilística del problema deriva del hecho de que cualquier modelo hidrológico, independiente de su tipología (modelos conceptuales, físicamente basados, basados en los datos, etc.), puede tener mayor o menor grado de acierto sobre las principales características de un hidrograma o de la serie de caudales, en función de las condiciones meteorológicas o físicas condicionantes en cada momento, de la información disponible para representar tales condiciones, de la estación del año, el estado de humedad inicial en la cuenca, las condiciones de contorno, etc.

El modelo hidrológico distribuido utilizado en este estudio es el modelo TETIS (Vélez et al, 2002; Francés et al, 2007), desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia. Para la evaluación de la incertidumbre asociada a las simulaciones continuas realizadas a escala horaria con el modelo TETIS en puntos no aforados de la cuenca se proponen dos aproximaciones diferentes, las cuales se describen en los párrafos sucesivos. Como caso de estudio para la aplicación de estas metodologías se ha seleccionado la cuenca del Río Illinois hasta la estación de Tahlequah, localizada en los estados de Arkansas y Oklahoma de EE.UU., con un área de drenaje de unos 2484 km<sup>2</sup>. Esta cuenca está incluida en la segunda fase del proyecto de intercomparación de modelos hidrológicos distribuidos (DMIP2) (Smith et al, 2004), el cual surgió del interés del National Weather Service (NOAA/NWS) en incorporar este tipo de modelos en la predicción de avenidas en la gestión de emergencias por inundación.

La primera propuesta está basada en la aplicación de un pos-procesador bayesiano de incertidumbre, denominado Model Conditional Processor (MCP) (Todini, 2008). El MCP permite establecer en las estaciones de aforo, donde se conocen las series de caudal, la función de densidad de probabilidad (fdp) de la variable de interés -el caudal observado- condicionada al caudal simulado con el modelo hidrológico. En esta aproximación, primero se hace una transformación no paramétrica de las observaciones y de las simulaciones del modelo a un espacio multi-Normal mediante la operación Normal Quantil Transform (NQT) (Kelly y Krzysztofowicz, 1997), con la intención de generar nuevas variables análogas en el campo transformado, cada una de ellas con fdp marginal Normal Estándar (Todini, 2008; Coccia y Todini, 2010).

En la transformación NQT, la probabilidad asignada a cada valor de la serie en el campo original será la misma en el campo Gaussiano, siendo esta probabilidad el vínculo de cada variable en los dos campos. Para asignar esta probabilidad en el campo original se puede recurrir a una distribución empírica de los datos del tipo Weibull Plotting Position o similar, o ajustar una fdp analítica normalmente de 3 o 4 parámetros, que permita representar adecuadamente la asimetría en la distribución de los caudales. En este caso de estudio se han probado algunas fdp analíticas, adoptando la *General Extreme Value* (GEV) con parámetros estimados por el método de los L-momentos (Hosking, 1990). Una vez realizada la transformación de las variables correspondientes a los caudales observados y simulados al campo gaussiano, se hipotiza que en el mismo existe una relación lineal entre las variables, es decir, se asume que su distribución conjunta es Normal Bivariada. Esta aproximación se puede extender a simulaciones realizadas con más de un modelo hidrológico, asumiendo en este caso en el campo multinormal que la fdp conjunta es de tipo Normal multivariada o Meta-gaussiana (Todini, 2008).

En el caso simple de un único modelo, y de acuerdo al Teorema de Bayes, a partir de la fdp conjunta Normal bivariada y de la fdp marginal del modelo  $N(0,1)$  en el campo gaussiano, es posible calcular la fdp del caudal

observado condicionado a la estimación del modelo en cada paso de tiempo, la cual también resulta ser una fdp Normal; los momentos de esta fdp dependen únicamente del coeficiente de correlación calculado entre las dos variables en el campo gaussiano. Dada la no linealidad del proceso de transformación NQT, para convertir esta fdp condicionada al campo original, es necesario hacer una discretización de la misma en el campo Normal en un número suficientemente grande de intervalos de igual probabilidad, y posteriormente convertir los cuantiles muestrales resultantes al campo original mediante el proceso de transformación inversa  $NQT^{-1}$ . Una vez hecha la transformación inversa se puede calcular el valor esperado y las bandas de incertidumbre para algún nivel de significancia. Un desarrollo más detallado de la metodología y sus ecuaciones se puede consultar en Coccia y Todini (2010).

Para extender esta aproximación a puntos de la cuenca no aforados, es necesario conocer la distribución de los caudales observados, cuyos parámetros se pueden inferir a partir de los primeros 3 L-momentos; además de lo anterior se requiere estimar el coeficiente de correlación entre los caudales observados y simulados en el campo gaussiano, único parámetro que caracteriza la distribución conjunta entre las dos variables. Para estimar estos 4 parámetros en los puntos no aforados de la cuenca se ha recurrido a una técnica de regionalización mediante la cual se han construido diferentes expresiones funcionales, utilizando como variables independientes el área de drenaje de las subcuencas y la media de los caudales simulados. En este análisis regional se han utilizado los datos y simulaciones correspondientes a las 12 estaciones de aforo con información disponible en la cuenca de estudio. Esta primera aproximación tiene la desventaja de que la incertidumbre en el proceso de regionalización no se incluye explícitamente en la evaluación de la incertidumbre.

La segunda propuesta para evaluar la incertidumbre de los caudales estimados con el modelo hidrológico en puntos no aforados se basa en la utilización de filtros de Kalman mediante la aplicación de una técnica conocida como MISP (Todini, 1978); MISP hace uso de dos filtros acoplados en paralelo para representar el comportamiento dinámico de un sistema lineal discreto. El primer filtro se ocupa de la estimación con mínima varianza del estado del sistema dado un conjunto de parámetros, y el segundo filtro se encarga de actualizar los parámetros de la matriz de transición de estado del primero, también con mínima varianza; este último utiliza el estado estimado en el paso de tiempo actual y en el anterior. En cada momento se tiene en cuenta la interacción entre ambos filtros para conseguir una estimación óptima del estado del sistema y de los parámetros, que en esencia equivale a resolver un problema de tipo no lineal (Todini, 1978).

En la configuración del vector de estado se deben relacionar cantidades que sean medibles a intervalos discretos de tiempo. Las variables que se han incluido en el vector de estado son los caudales observados y simulados en una estación de aforo utilizada como pivote y los caudales simulados en el punto de interés sin aforo. Adicionalmente, también se incluyen las mismas variables en el paso de tiempo anterior, para tener en cuenta la estructura de autocorrelación en el proceso. Previamente a la ejecución del filtro se ha hecho una transformación logarítmica de los datos, buscando conseguir una mejor aproximación de la hipótesis de ruido blanco, tanto en los errores del sistema como en los de medición. Como resultado del filtro se obtiene una estimación de mínima varianza del caudal en el punto de interés y la varianza asociada a la estimación.

Una vez obtenidos los resultados del filtro, se lleva a cabo un pos proceso análogo al descrito del MCP para evaluar la incertidumbre de los caudales estimados con el filtro en relación a los simulados con el modelo; en este caso no es necesario pasar por la transformación NQT porque las variables fueron previamente transformadas al campo logarítmico. En este pos-proceso se han hipotizado fdp Lognormales para las marginales y una fdp conjunta Lognormal bivariada. Aplicando una vez más el teorema de Bayes se obtiene la fdp condicionada, que también resulta ser de tipo Lognormal. En este caso se ha hecho una superposición de la desviación típica resultante de la fdp condicionada y la desviación típica de la estimación realizada con el filtro para tener una descripción completa de la incertidumbre. A partir de la fdp resultante se obtiene el valor esperado y las bandas de incertidumbre para el nivel de significancia establecido.

Los resultados preliminares obtenidos con las dos formulaciones son satisfactorios, mejorando la estimación de los caudales observados respecto a los resultados obtenidos con el modelo hidrológico. Por otro lado, el tamaño de las bandas de incertidumbre está relacionado con el desempeño del modelo hidrológico en las cuencas de estudio, que se manifiesta en una mayor o menor correlación entre los caudales observados y simulados en el campo transformado.

Finalmente, ambas formulaciones tienen aplicabilidad para el análisis de incertidumbre tanto en el caso de estimación histórica como en modo de predicción.