

Calibración automática de las condiciones iniciales de humedad para mejorar la predicción de eventos de crecida

Jorge Julián Vélez Upegui¹ & Félix Francés García²

1. Departamento de Ingeniería Civil, IDEA, Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, Colombia.

2 Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente IIAMA, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.
jjvelez@unal.edu.co; ffrances@hma.upv.es

Recibido para evaluación: 21 de Julio de 2008 / Aceptación: 01 de Octubre de 2008 / Versión Final: 15 de Octubre de 2008

Resumen

El modelo hidrológico distribuido de tipo conceptual TETIS es un modelo lluvia-escurrentía tipo tanque que mantiene el balance hídrico en todas las celdas. El movimiento vertical se basa en las características del suelo empleando diferentes relaciones entre los distintos tanques. La traslación del flujo a lo largo de la red de drenaje se realiza utilizando las características geomorfológicas combinadas con la onda cinemática. El análisis de estimación de la incertidumbre por verosimilitud generalizada (GLUE) muestra la importancia de las condiciones iniciales de humedad durante los eventos. Por lo tanto, las variables que presentan mayor sensibilidad deben ser estimadas mediante calibración automática en tiempo real usando el algoritmo como el SCE-UA. La estrategia de predicción de crecientes se ha dividido en dos fases: fase de calentamiento para un período de tiempo anterior al pronóstico destinado a estimar las condiciones antecedentes de humedad usando la calibración automática y la fase del pronóstico. El período de calentamiento pretende conseguir un mejor ajuste entre los caudales observados y simulados durante el período previo a la predicción y aumentar así su confiabilidad. Los resultados indican que SCE-UA es robusto y eficiente, se destaca que calibrar las condiciones iniciales de humedad permite ajustar las descargas observadas y simuladas durante período antes de la predicción para mejorarla.

Palabras Clave: Humedad del suelo, Calibración automática, Modelación distribuida, Predicción de eventos, Condiciones iniciales.

Abstract

The hydrological conceptual distributed model, TETIS, divides river basins into regular cells, all of which are connected according to the network drainage. The rainfall-runoff process is modelled using linked tanks with different outflow relationships. The vertical movement is based on soil properties. Routing along the channel network has been coupled using geomorphologic basin characteristics and the kinematic wave procedure. The sensitivity analysis carried out using the Generalized Likelihood Uncertainty Estimation (GLUE) methodology demonstrates the importance of some of the initial state variables during flood events in the TETIS model. Therefore, these variables must be estimated. For a real-time automatic calibration of these initial values, the shuffled complex evolution algorithm (SCE-UA) was selected. The flood forecasting has been divided in two phases: the warming period which focuses on a period of time previous to forecasting using real-time data, and the forecasting phase. The main goal during the warming period is to estimate some initial state variables of the TETIS model using automatic calibration. In this way, it is possible to get a better fitting among observed and simulated discharges during the warming period and to increase the forecasting reliability. The results indicated that SCE-UA is robust and efficient. It was highlighted that calibrating initial state variables allowed adjusting properly the observed and simulated discharges during warming period.

Key Words: Initial soil moisture, Automatic calibration; Distributed modelling, Flood forecasting; Initial state variables

1. Introducción

Hay muchas metodologías que pueden explicar los procesos involucrados durante las crecientes en cuencas naturales y pueden proporcionar una valoración confiable de la sincronización de los caudales punta, de la forma del hidrograma y de los volúmenes de agua producidos durante las crecientes, que dependen de las características del modelo seleccionado (Wood y O Connell, 1985). Los modelos conceptuales se pueden considerar como herramientas excelentes para simular procesos lluvia-escorrentía durante eventos de creciente porque tienen pocos parámetros y generalmente son más fáciles de poner en ejecución que los modelos físicamente basados, todo esto si se selecciona la escala adecuada (Wood et al., 1988). La principal ventaja de los modelos distribuidos es que consideran la variabilidad espacial y temporal incluida en los diversos procesos hidrológicos. El ciclo hidrológico es heterogéneo en espacio y tiempo, por lo que se debe asumir que no hay cambio climático y se debe aceptar la hipótesis de estacionaridad en la cuenca. Las variables de entrada a los modelos como la precipitación y evapotranspiración potencial (ETP) cambian en espacio y tiempo, y las características físicas de la cuenca, representadas por los parámetros en cualquier modelo, cambian en el espacio y tiempo (Beven, 2000). En este artículo el modelo distribuido conceptual TETIS es la base para proponer un procedimiento automático para la calibración de las condiciones iniciales de humedad en la cuenca. Luego, se propone una estrategia para el pronóstico de crecientes que se aplica en tres cuencas diferentes para demostrar las ventajas del modelo distribuido y de la estrategia propuesta. Finalmente, se presentan algunas conclusiones relevantes con su respectiva discusión.

2. Marco teórico

El modelo hidrológico distribuido de tipo conceptual TETIS divide la cuenca en celdas rectangulares, interconectadas entre sí, siguiendo la red de drenaje y en cada una de ellas puede simular continuamente los principales componentes del ciclo hidrológico. El modelo ha sido probado satisfactoriamente en diversos climas con una amplia gama de áreas en cuencas de

España, Italia, Francia y Colombia (Vélez, 2001; Francés et al., 2002; Vélez y et al., 2002a, 2002b y 2002c; Vélez, 2003; Va ková et al., 2004; Vélez y Francés, 2004; Francés et al., 2007; Vélez et al., 2008 y Valencia, 2008).

2.1. Comportamiento hidrológico a escala de celda

El modelo se distribuye en el espacio usando una malla rectangular y en cada celda se modela el proceso lluvia-escorrentía usando cinco tanques verticales según las indicaciones de la Figura 1, donde cada tanque representa el almacenamiento del agua en una columna extendida del suelo: la nieve, almacenamientos atmosféricos, superficiales, gravitacionales, y el acuífero. La relación entre los distintos tanques se basa en las características del suelo tales como capacidad del campo y las conductividades hidráulicas saturadas del suelo y el subsuelo. Estas características del suelo han sido estimadas previamente en cada celda usando las principales características y propiedades del suelo como: litología, edafología, usos del suelo, características geomorfológicas y toda aquella información de tipo ambiental disponible que sirva para caracterizar el suelo (Puricelli y Francés, 2002, Puricelli, 2003).

Las conexiones verticales entre los tanques describen los procesos de: precipitación (lluvia y/o nieve), fusión de la nieve, evapotranspiración, infiltración y percolación. Las conexiones horizontales describen el flujo superficial por la tierra, el flujo subsuperficial y el flujo base. Finalmente, la salida de las aguas subterráneas se considera en el tanque más bajo para cerrar el balance de agua en lo que se ha denominado las pérdidas subterráneas. El movimiento horizontal del flujo está definido por un acoplamiento tridimensional de los tanques conectados que drenan hacia el tanque correspondiente a la celda más agua abajo en sentido descendiente, siguiendo los sentidos de la red de flujo hasta que se alcanza la red de drenaje principal. La traslación del flujo a lo largo de la red de flujo hasta la salida de la cuenca se realiza empleando una combinación de las características geomorfológicas de la cuenca en combinación con el método de la onda cinemática conocida como onda cinemática geomorfológico OCG. Una descripción detallada del modelo OCG se puede encontrar en Vélez (2001) y Francés et al. (2002, 2007).

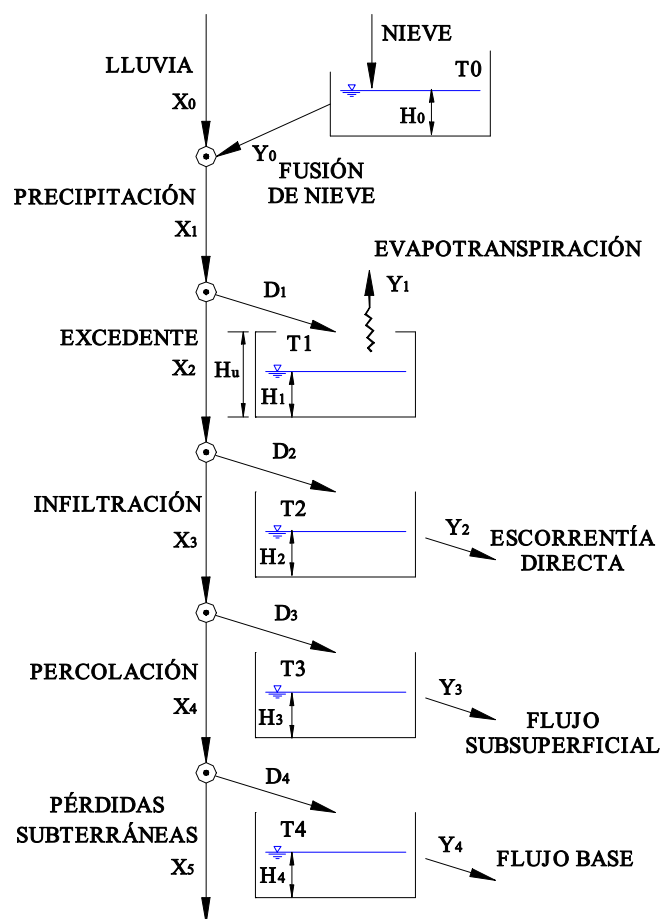


Figura 1. Esquema conceptual del movimiento vertical en cada celda según el modelo TETIS

2.2. Las condiciones iniciales de humedad

Es bien conocido y aceptado que los resultados de los modelos hidrológicos dependen fuertemente de las condiciones antecedentes de humedad, puesto que la evapotranspiración, la capacidad de infiltración, la escorrentía y el almacenamiento en depresiones del suelo se ven afectadas por el estado de humedad al inicio del evento. El efecto de las condiciones iniciales de humedad puede ser disminuido si se trabaja a escalas temporales mensuales o anuales ya que en pocos meses o años el balance se restablece. Sin embargo, este efecto es significativo en modelación de evento y tiene que ser incluido si se desea realizar predicción en tiempo real.

condiciones iniciales de humedad incluidas en modelo TETIS siguientes:

1. de agua equivalente para la nieve, H_0 dado en metros

2. almacenamiento estático, H_1 , que es un porcentaje de capacidad máxima (donde el 100% significa que se ha alcanzado la capacidad máxima)

3. almacenamiento de agua superficial, H_2 dado en metros

4. almacenamiento gravitacional, H_3 dado en milímetros

5. profundidad del flujo en el canal, H_4 dado en el milímetro

6. profundidad del flujo en el canal, H_5 dado como porcentaje del caudal a sección llena, (los valores mayores de 100% indican que el flujo está inundando el cauce de la celda).

La condición inicial asume valores iguales para todas las celdas. La única variable de estado que no fue incluida para este modelo es el almacenamiento en el canal. El principal objetivo del procedimiento propuesto es encontrar las mejores condiciones iniciales de humedad antes de la estrategia de predicción. De esta manera, se ha usado un período del tiempo anterior al pronóstico lo suficientemente largo para calibrar automáticamente las condiciones iniciales de humedad, también llamado período de calentamiento.

El número de parámetros a calibrar es importante porque si es grande, el tiempo de cómputo será más largo. De esta manera, se recomienda optimizar el mínimo número de variables, teniendo en cuenta que para el módulo TETIS el máximo es cinco, porque hay cinco tanques en los cuales es necesario estimar su estado inicial de humedad.

2.3. La calibración automática

Tradicionalmente, la calibración manual se ha utilizado para calibrar modelos hidrológicos, pero requiere de un hidrólogo experto para obtener resultados confiables y generalmente es demandante en tiempo. En la década pasada, diversos procedimientos fueron desarrollados para calibrar automáticamente algunos parámetros de los modelos hidrológicos conceptuales. Estos procedimientos se basan en búsqueda global, múltiple inicio y técnicas de evolución. Entre estas últimas la más conocida es el algoritmo de evolución y

barajado de complejos, el cual ha sido seleccionado para este estudio, método desarrollado en la Universidad de Arizona (por su siglas en inglés SCE-UA) propuesto por Duan et al. (1992). Este algoritmo ha sido probado con resultados satisfactorios en diversos modelos conceptuales y para diversas cuencas (Duan y et al., 1992; Sorooshian y et al., 1993; Duan et al., 1994; Yapo et al., 1996; Gan y Biftu, 1996; Thyer et al., 1999; Lidén y Harlin, 2000; Seranath et al., 2000; Madsen et al., 2002, Vélez, 2003). Otros procedimientos de calibración automática tales como los algoritmos genéticos o el recocido simulado han sido reportados en la literatura científica con buenos resultados, pero cuando se comparan con el SCE-UA no se reportan ventajas (Thyer y et al., 1999; Madsen, 2000; Madsen y et al., 2002, Vélez, 2003).

2.3.1. La función objetivo

El modelo TETIS puede estimar diversas funciones objetivo como: Raíz del error cuadrático medio, (por sus siglas en inglés, RMSE), el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe, R^2 , el estimador de la máxima verosimilitud heteroescedástica, (por sus siglas en inglés, HMLE), y el estimador de la máxima

verosimilitud autocorrelacionada, (por sus siglas en inglés, AMLE). Según Sorooshian y et al. (1983), Gan y Burges (1990), Brath y Rosso (1996) y Vélez y Francés (2004) no está claro cuál es la función objetivo de mejor desempeño. La función objetivo seleccionada para este estudio es el RMSE.

2.3.2. Valores iniciales y rango de búsqueda

El procedimiento de calibración automática SCE-UA requiere de valores iniciales y de un rango de búsqueda para las condiciones iniciales de humedad. El rango de búsqueda debe ser suministrado como valores máximo y mínimo dentro de un rango de factibilidad. Estos valores deben ser previamente definidos por los modeladores de acuerdo con su experiencia. La Tabla I muestra los valores recomendados de acuerdo a la experiencia obtenida en trabajos de investigación previos. (Vélez et al. 2002a; Vélez, 2003; Vélez y Francés, 2004, Francés et al, 2007).

La selección de valores iniciales y de rangos de búsqueda da un carácter subjetivo al proceso de calibración (Beven, 2000). Vélez (2003) y Vélez y Francés (2004) muestran que el resultado final es sensible al rango de búsqueda y a los valores iniciales.

Tabla I. Valores iniciales y rango de búsqueda recomendados para la calibración automática mediante el SCE-UA de las condiciones iniciales.

Variable de estado	Mínimo valor de búsqueda	Máximo valor de búsqueda	Valor Inicial
Almacenamiento estático - H1 (%)	0	100	50
Almacenamiento superficial - H2 (mm)	0	50	0
Almacenamiento gravitacional - H3 (mm)	0	100	0
Acuífero - H4 (mm)	0	1000	10
Cauce - H5 (%)	0	200	20

2.4 Análisis de incertidumbre

El análisis de estimación de la incertidumbre por verosimilitud generalizada, (Generalized Likelihood Uncertainty Estimator, GLUE) propuesto por Beven y Binley (1992) debe ser realizado para todos los casos estudiados si se desea realizar un análisis

de sensibilidad completo. Este análisis es muy útil porque puede mostrar la capacidad de predicción del modelo TETIS y a su vez suministra una valoración cualitativa del desempeño del modelo, destacando en especial aquellas condiciones iniciales de humedad más sensibles en cada aplicación.

3. Metodología propuesta para la estrategia de predicción

Es importante garantizar que el modelo TETIS haya sido calibrado satisfactoriamente en una fase previa, donde los factores de la calibración han sido estimados correctamente y representan adecuadamente el proceso lluvia-escorrentía en la cuenca y solamente las condiciones iniciales de humedad al inicio pueden modificarse para simular correctamente las crecientes. La estimación futura de la precipitación no se ha incluido en el análisis; en este estudio eventos reales han sido utilizados para observar el efecto sobre las condiciones iniciales de humedad.

En primer lugar es necesario determinar las variables más sensibles para lo cual se realiza el análisis de sensibilidad de las variables de estado. Los resultados del análisis de incertidumbre mediante la metodología del GLUE deben ser analizados de forma independiente para cada evento y en cada cuenca. A modo de ejemplo, en la Figura 2 se presentan los resultados de la aplicación de la metodología del GLUE para un episodio en la cuenca del Real Collobrier, en donde se tiene que el estado inicial de humedad para el almacenamiento estático H_1 es una variable muy sensible ya que se observa poca dispersión en los resultados, y es menos sensible el estado inicial en el cauce H_5 , ya que se observa una mayor dispersión de los puntos. Aunque se observa que el rango de variación de la variable de estado H_1 es menor que el de H_5 , la dispersión es mayor para este último.

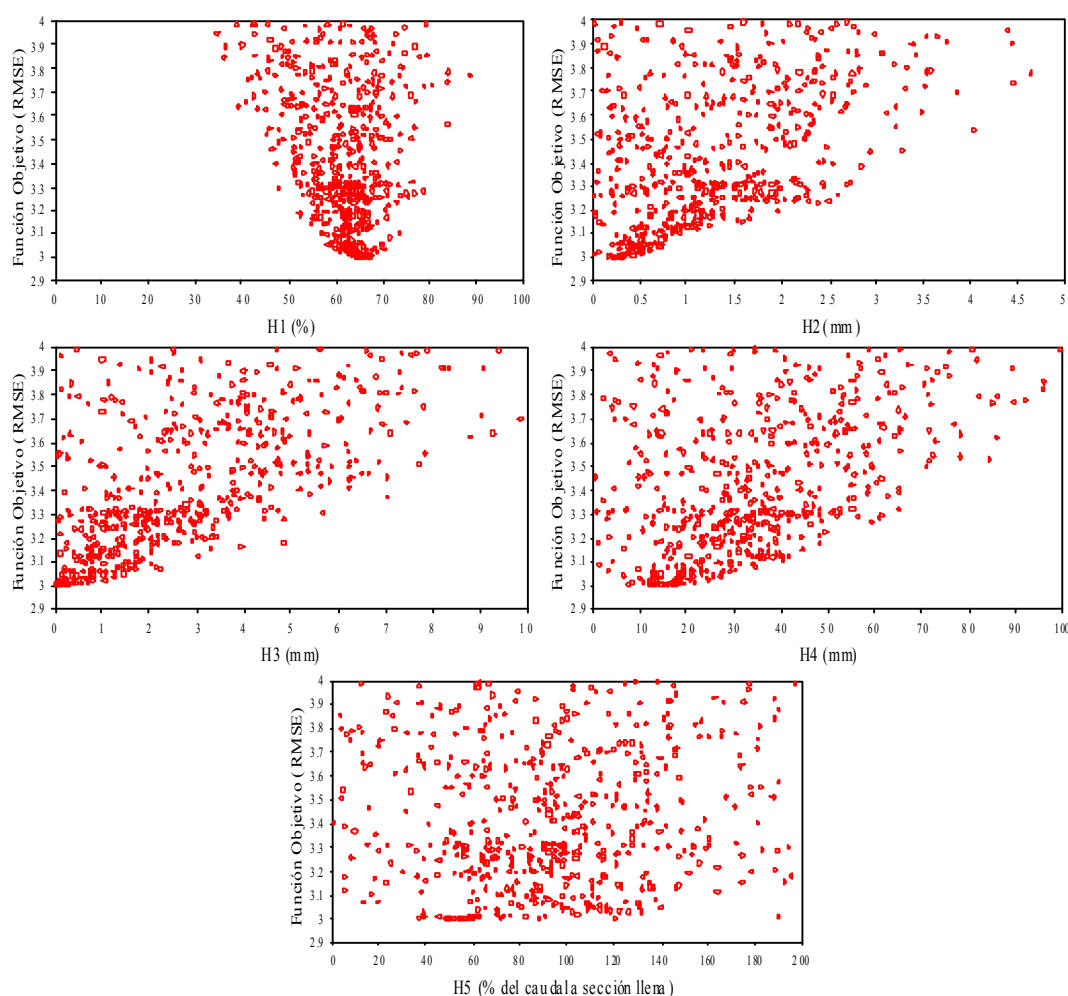


Figura 2. Resultados del proceso de calibración automática de los estados de almacenamiento inicial por el SCE-UA para el la cuenca del Real Collobrier durante un episodio (Tomado de Vélez, 2003)

La estrategia de predicción en tiempo real puede ser consultada en Vélez (2003). El objeto principal es estimar los mejores valores para las condiciones iniciales de humedad del modelo TETIS al inicio de la predicción empleando datos en tiempo real. De esta manera, es posible conseguir un mejor ajuste entre los caudales simulados y los observados durante un período de tiempo anterior al pronóstico (período de calentamiento) y entonces es factible y confiable lanzar el pronóstico con el modelo TETIS. La estrategia propuesta se divide en dos fases:

3.1. El período de calentamiento

El período de calentamiento es el período del tiempo inmediatamente antes de que se ejecute el pronóstico. Durante este período el modelo TETIS recibe la información en tiempo real sobre estaciones de aforo, lluvia y temperatura. Por lo tanto, el período de calentamiento se dedica a calibrar automáticamente las condiciones iniciales de humedad usando el procedimiento SCE-UA para obtener el mejor ajuste posible entre los caudales observados y simulados. Es necesario definir la longitud del período del tiempo anterior al pronóstico según el tamaño de la cuenca y de la escala temporal de datos.

3.2. El pronóstico

La segunda fase es el pronóstico. Si se ha logrado un buen ajuste entre los caudales observados y simulados durante el período de calentamiento, es posible entonces lanzar la predicción con el modelo TETIS con cierta confianza. En la fase del pronóstico el modelo TETIS utiliza las variables del estado inicial obtenidas durante período de calentamiento. El modelo de predicción emplea un tiempo de antelación de un día, empleando una aproximación heurística como precipitación futura. La incertidumbre del proceso de predicción disminuye si se logra un buen acercamiento en la estimación de la precipitación futura, lo cual se realiza en este análisis ya que se emplean eventos reales.

4. Aplicación en diferentes cuencas

Tres cuencas han sido seleccionadas para mostrar las ventajas de los modelos conceptuales distribuidos en la predicción en tiempo real. Estas tres cuencas tienen en cuenta la importancia de las condiciones iniciales de humedad durante el pronóstico de las crecientes. Con estas tres aplicaciones se trata de cubrir un amplio rango en tamaño de cuencas, climas y respuestas hídricas. Una descripción detallada de cada cuenca se encuentra en Vélez (2003).

En todos los casos, los eventos verdaderos fueron procesados y se consideraban como los eventos en tiempo real, de esta manera el efecto real de las condiciones iniciales de humedad en el modelo conceptual distribuido se pueden estudiar sin la influencia de la lluvia y la incertidumbre inducida por la precipitación futura se anula. La precipitación de cada evento verdadero es agregada a la escala horaria y se utilizó como precipitación futura en el modelo TETIS durante la fase del pronóstico.

4.1. La Rambla del Poyo

El cuenca de la Rambla del Poyo, situada en la costa este de España, es un cauce efímero de flujos torrenciales y fue utilizado para probar diversos valores para la variable de estado H_1 (%). Esta cuenca se caracteriza por la presencia de fuertes tormentas convectivas, se trata de una cuenca mediterránea típica donde son frecuentes las inundaciones causadas por crecientes súbitas. Los datos en tiempo real se recogen con una resolución temporal de 15 minutos, que para este estudio han sido agregados a 1 hora. El tamaño de celda utilizado es de 500 m x 500 m. Hay una estación de aforo en el cauce con un área asociada de 193 km² que se emplea para calibrar automáticamente y hay siete estaciones registradoras de lluvia. Sin embargo, durante el proceso de calibración solamente una estación de lluvia fue considerada ya que es la más fiable y se trata de la misma estación con datos para el pronóstico. Este caso de estudio utiliza dos eventos reales registrados el 10 de diciembre de 1988 y el 24 de mayo de 1989. Finalmente, la estrategia del pronóstico fue aplicada a esta cuenca considerando un período de calentamiento de seis horas. Finalmente, el modelo TETIS fue ejecutado para predecir con un día de antelación y los resultados obtenidos se muestran en la Figura 3.

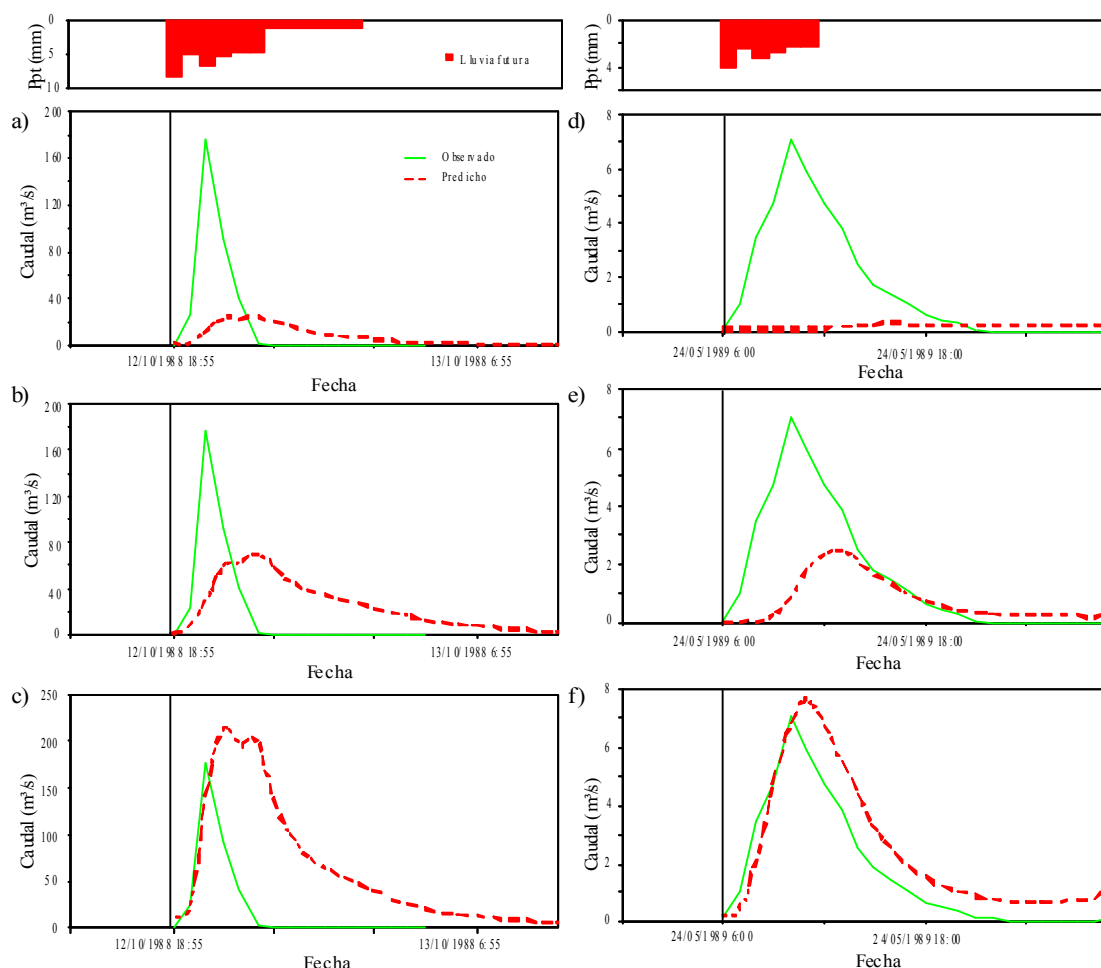


Figura 3. Resultados de los eventos ocurridos los días 12/10/1988 y 05/24/1989 en la Rambla del Poyo. Los gráficos superiores corresponden a los hietogramas y los tres gráficos inferiores corresponden a los hidrogramas predichos con diferentes porcentajes para el almacenamiento estático inicial H_1 , como sigue: a) 10%, b) 50%, c) 70%, d) 0%, e) 50% y f) 90%

La Figura 3 muestra los valores iniciales estimados para el almacenamiento estático H_1 , donde se puede observar la importancia de la selección adecuada de este valor. Por ejemplo, durante la crecida de 1988 los valores máximos predichos varían a partir de 23.5 m³/s a 69.3 m³/s y a 212.9 m³/s para valores del almacenamiento estático inicial de 10%, 50% y 70%, respectivamente. Los valores máximos de 70% y el 90% fueron seleccionados porque valores más altos en almacenamiento estático generan respuestas hidrológicas durante el período de calentamiento, lo cual no corresponde a la realidad ya que el cauce al inicio no presenta flujo. Adicionalmente, para el evento ocurrido el 12/10/1988 los resultados de la calibración automática son aceptables pero

no del todo satisfactorios porque no se observa un balance entre la lluvia y las descargas, además muestra una duración de la lluvia mayor que la duración del flujo observado, lo cual se puede explicar por que no se disponen de aforos en la cuenca que permitan obtener una curva de calibración de caudales en la estación de aforo que sea confiable porque no hay campaña de aforos. Adicionalmente es difícil capturar correctamente la variabilidad espacial y temporal de la lluvia, ya que sólo se empleó una estación de lluvia. Todo lo anterior es típico de las cuencas ubicadas en zonas semiáridas donde las lluvias son cortas e intensas y los flujos son efímeros de tipo torrencial, por lo que este tipo de análisis de las condiciones de humedad inicial toman una mayor relevancia.

4.2. La cuenca de Real Collobrier

La cuenca del Real Collobrier es una cuenca experimental situada en el sur de Francia caracterizada con un clima mediterráneo. Esta cuenca ha sido estudiada extensivamente durante los años recientes. La resolución temporal de datos disponibles es de una hora y el tamaño de celda usado es 500 m x 500 m. Hay tres estaciones de aforo: Maliere y Collobrieres con áreas de 12 km² y 29 km², respectivamente, y Pont de Fer localizada más aguas abajo con un área de 70

km². Hay nueve estaciones registradoras de lluvia dentro de la cuenca y su información es utilizada durante el pronóstico. La metodología de SCE-UA fue utilizada durante un período de calentamiento de 24 horas para estimar las tres condiciones iniciales de humedad: almacenamiento estático H_1 , acuífero H_4 y el cauce H_5 . Finalmente, la estrategia de pronóstico fue aplicada a esta cuenca para predecir con 1 día de antelación en tres episodios según se muestra en la Figura 4. La calibración automática fue realizada solamente en la estación de Pont de Fer durante el período de calentamiento.

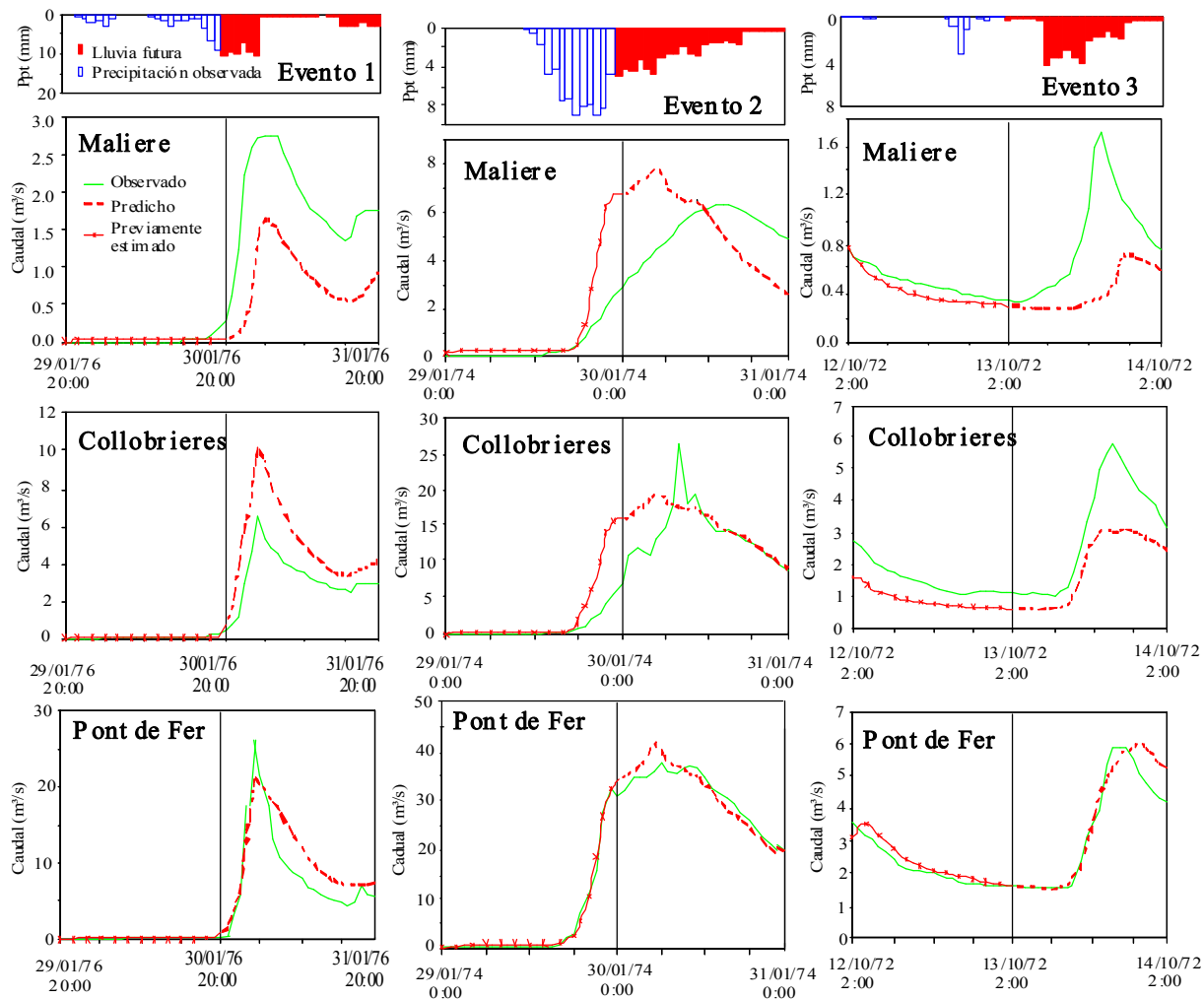


Figura 4. Resultados de los eventos ocurridos los días 29/01/1976, 29/01/1974 y 12/10/1972 en la Real Collobrier. El gráfico superior corresponde al hietograma y los tres gráficos inferiores corresponden a los hidrogramas predichos en Pont de Fer, Maliere y Collobrieres, respectivamente.

En este caso se refleja la principal ventaja de los modelos distribuidos ya que el modelo de predicción en tiempo real se ejecuta en la estación Pont de Fer, pero igualmente se obtienen los resultados en las subcuencas localizadas hacia aguas arriba Maliere y Collobrieres.

4.3. La cuenca del río Alagón

La cuenca del río de Alagón está situada en el occidente de España, con un área aproximada de 1857 km² en la estación de aforo Gabriel y Galán, situada a pocos kilómetros aguas arriba del embalse con el mismo nombre. Hay ocho estaciones de aforo con áreas de drenaje que se extienden a partir de 70 km². La resolución temporal es de 15 minutos, que ha sido agregada a 1 hora para reducir el tiempo de cálculo del modelo. La resolución espacial utilizada es de 500 m x 500 m. En la Figura 5 se observan los resultados en las estaciones Gabriel y Galán y Garcibuey para dos eventos. En este caso se

muestran los resultados de varios pronósticos realizados con una diferencia de seis horas cada uno, como si la predicción en tiempo real se realizara cada seis horas. El período de calentamiento usado en este caso es de 12 horas y se calibraron automáticamente cuatro variables del estado: el almacenamiento estático H_1 , el almacenamiento gravitacional H_3 , el acuífero H_4 y el flujo en el cauce H_5 . En ambas estaciones, el período de calentamiento permite un buen ajuste entre los caudales observados y las descargas simuladas, por lo tanto existe mayor confianza en el pronóstico. La estrategia de predicción en tiempo real fue aplicada para predecir un evento con un día de antelación y los resultados se muestran en la Figura 5.

En la Tabla 2 se presenta un resumen con los Factores de Calibración del modelo TETIS empleados en cada caso de aplicación, los cuales fueron determinados en una fase previa haciendo uso de la calibración manual para el caso de la cuenca del río Alagón y de la calibración automática para la Rambla del Poyo y el Real Collobrier.

Tabla 2. Resumen de los Factores de Calibración empleados en el modelo TETIS.

FACTORES CORRECTORES	Rambla del Poyo	Real Collobrier	Alagón
Almacenamiento estático	1.01	1.24	0.90
Evapotranspiración	1.0	0.94	0.00
Infiltración	1.76	0.63	0.20
Escorrentía	1.24	0.93	0.20
Percolación	0.94	0.69	0.80
Flujo subsuperficial	201.0	449.0	2000.
Pérdidas subterráneas	3.39	0.0	0.00
Flujo base	11879.3	52.1	200
Velocidad del flujo	0.95	0.80	1.00

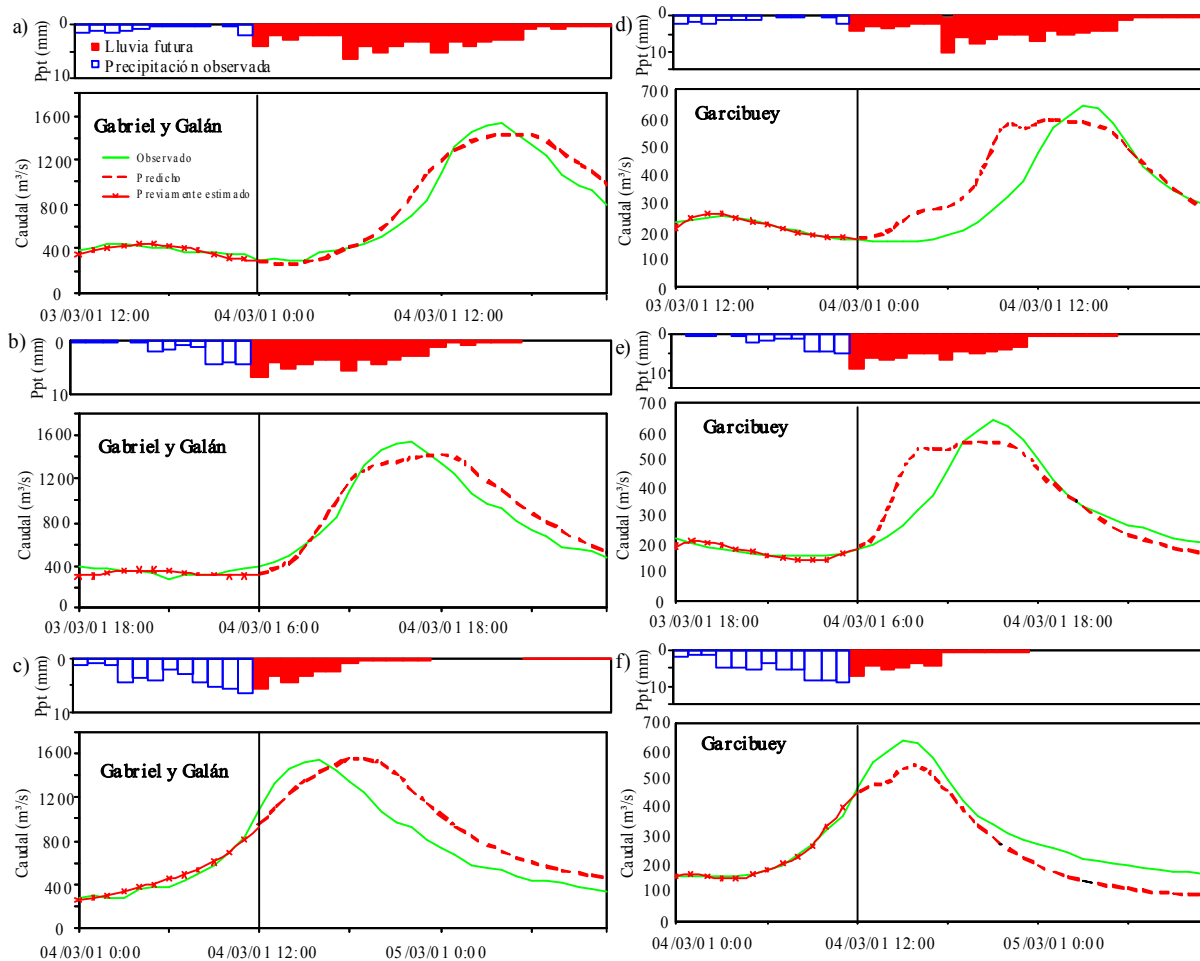


Figura 5. Resultados del modelo TETIS en las estaciones Gabriel y Galán y Garcibuey situadas en la cuenca del río de Alagón. El gráfico superior corresponde al hietograma y los tres gráficos inferiores corresponden a los hidrogramas predichos en: a) 04/03/2001 a las 0:00, b) 04/03/2001 a las 6:00, c) 04/03/2001 a las 0:00, d) 04/03/2001 0:00, e) 04/03/2001 a las 6:00 y f) 04/03/2001 a las 0:00

5. Conclusiones y discusión

El uso de los modelos distribuidos conceptuales en el pronóstico de crecientes ha sido probado y validado. Se destaca que el modelo TETIS es una herramienta robusta para simular las crecientes y puede ser utilizada satisfactoriamente durante el pronóstico en tiempo real. El procedimiento automático de calibración SCE-UA demostró que funciona de forma excelente y eficiente y que los resultados son obtenidos fácil y automáticamente. Por lo tanto, las condiciones iniciales de humedad o condiciones iniciales se pueden calibrar satisfactoriamente durante período de calentamiento usando

el SCE-UA garantizando una mayor fiabilidad en la predicción. La longitud del período de calentamiento debe estar de acuerdo con el área de la cuenca y la escala temporal de trabajo, para garantizar así el éxito del procedimiento automático de calibración, pero se requieren estudios más detallados para proponer valores ajustados para cada caso. En los casos estudiados, que varían de pequeñas a grandes cuencas, una escala temporal de una hora fue propuesta. Esta escala temporal es suficiente para considerar períodos de calentamiento de 6 a 24 horas para un pronóstico con un día de antelación. Los períodos de calentamiento seleccionados muestran el papel relevante de las condiciones iniciales de

humedad y de la calibración automática realizada durante el pronóstico de crecientes. Sin embargo, las crecientes súbitas o torrenciales que se presentan en los ríos efímeros no se pueden predecir fácilmente según lo observado en la aplicación de la Rambla del Poyo. En este caso no fue posible utilizar la calibración automática porque durante el período de calentamiento la hidrógrafa observada es nula, y los resultados dependen fuertemente de las condiciones iniciales de humedad, H_1 y H_4 . Por lo tanto, se requiere un conocimiento anterior del estado de humedad del suelo antes de lanzar el pronóstico en tiempo real.

Esta estrategia del período de calentamiento se puede acoplar a los esquemas del pronóstico cuantitativo de la precipitación (por sus siglas en inglés QPF) para producir mejores resultados y reducir la incertidumbre en eventos reales.

Referencias

- Beven, K. y Binley, A., 1992. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6, pp. 279-298.
- Beven, K.J., 2000. Parameter Estimation and Predictive Uncertainty. En: Beven, K.J., (Ed.), *Rainfall-Runoff Modelling. The Primer*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester. U.K. (Chapter 7).
- Brath, A. y Rosso, R., 1996. Adaptive calibration of a conceptual model for flash flood forecasting. *Water Resources Research*, 29(8), pp. 2561-2572.
- Duan, Q., Sorooshian, S. y Gupta, V.K., 1992. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resources Research*, 24(7), pp. 1163-1173.
- Duan, Q., Sorooshian, S. y Gupta, V.K., 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology*, 158, pp. 265-284.
- Francés, F., Vélez, J.I. y Vélez, J.J., 2007. Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology*, 332, pp. 226-240.
- Francés, F., Vélez, J.J., Vélez, J.I. y Puricelli, M., 2002. Distributed modelling of large basins for a real time flood forecasting system in Spain. *Proceedings Second Federal Interagency Hydrologic Modelling Conference*. Las Vegas, USA. July. CD Format. Gan, T.Y. y Biftu, G.F., 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: Optimization algorithms, catchment conditions, and model structure. *Water Resources Research*, 32(12), pp. 3513-3524.
- Gan, T.Y. y Burges, S.J. 1990. An assessment of a conceptual rainfall-runoff model's ability to represent the dynamics of small hypothetical catchments I. Models, model properties, and experimental design. *Water Resources Research*, 26(7), pp. 1595-1604.
- Lidén, R. y Harlin, J., 2000. Analysis of conceptual rainfall-runoff modelling performance in different climates. *Journal of Hydrology*, 238, pp. 231-247.
- Madsen, H., 2000. Automatic calibration of a conceptual rainfall-runoff model using multiple objectives. *Journal of Hydrology*, 235, pp. 276-288.
- Madsen, H., Wilson, G. y Ammentorp, H.C., 2002. Comparison of different automated strategies for calibration of rainfall-runoff models. *Journal of Hydrology*, 261, pp. 48-59.
- Puricelli, M. y Francés, F., 2002. Estimación de parámetros hidrológicos del terreno en la modelación hidrológica distribuida en grandes cuencas. *Proceedings 3ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Ed. UPV. Valencia, España. Febrero 7-8, pp. 1688-1692.
- Puricelli, M., 2003. Estimación y distribución de los parámetros del suelo para la modelación hidrológica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, España. 454 P.
- Senarath, S., Ogden, F.L., Downer, C.W. y Sharif, H.O., 2000. On the calibration and verification of two-dimensional distributed, Hortonian, continuous watershed models. *Water Resources Research*, 36(6), pp. 1495-1510.
- Sorooshian, S., Gupta, V.K. y Fulton, J.L., 1983. Evaluation of maximum likelihood parameter estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models: Influence of calibration data variability and length on model credibility. *Water Resources Research*, 19(1), pp. 251-259.
- Sorooshian, S., Duan, Q. y Gupta, V.K., 1993. Stochastic

parameter estimation procedures for hydrologic rainfall-runoff models: Correlated and Heteroscedastic error cases. *Water Resources Research*, 29(4), pp. 1185-1194.

Thyer, M., Kuczera, G. y Bates, B.C., 1999. Probabilistic optimization for conceptual rainfall-runoff models: A comparison of the Shuffled complex evolution and simulated annealing algorithms. *Water Resources Research*, 35(3), pp. 767-773.

Valencia, M., 2008. Modelación hidrológica distribuida de tipo conceptual como elemento para ordenación y manejo ambiental de cuencas hidrográficas. Caso de estudio: Cuenca hidrográfica del río La Miel, Caldas, Colombia. Tesis. Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales.

Vaková, I., Francés, F. y Vélez, J.J., 2004. Empleo de la modelación distribuida en el estudio de los recursos hídricos del País Vasco. *Proceedings 4ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*, Figueira da Foz, Portugal. Febrero 3-7.

Vélez, J.I., 2001. Desarrollo de un modelo hidrológico conceptual y distribuido orientado a la simulación de las crecidas. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. 266 P.

Vélez, J.J., Vélez, J.I. y Francés, F., 2002a. Simulación hidrológica de crecidas en grandes cuencas mediante el uso de la modelación distribuida. *Proceedings 3ª Asamblea Hispano-Portuguesa de Geodesia y Geofísica*. Ed. UPV. Valencia, España. Febrero 7-8, pp. 1682-1687.

Vélez, J.I., Vélez, J.J. y Francés, F., 2002b. Modelo distribuido para la simulación hidrológica de crecidas en grandes cuencas. *Proceedings XX Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. La Habana, Cuba. Octubre.

Vélez, J.J., Vélez, J.I., Puricelli, M. y Francés, F., 2002c. Hydrological simulation of flood events at large basins using distributed modelling. *Proceedings XXVII General Assembly European Geophysical Society*. Niza, Francia. Abril 21-26. Ed. Geophysical Research Abstracts. Póster.

Vélez, J.J., 2003. Desarrollo de un modelo distribuido de predicción en tiempo real de eventos de crecidas. Tesis

Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. 266 P.

Vélez, J.J. y Francés, F., 2004. Sensibility analysis of a conceptual distributed model during flood events. In *Proceedings I General Assembly European Geosciences Union*. Nice France. April 26-30. Ed. Geophysical Research Abstracts. CD format.

Vélez, J.J., López Unzu, F., Puricelli, M. y Francés, F., 2008. Parameter extrapolation to ungauged basins with a hydrological distributed model in a regional framework. *Hydrology and Earth System Sciences*, In press. www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/4/909/2007/

Wood, E. F. y O Connell, P. E., 1985. Real-time forecasting. In: *Hydrological forecasting*. (Eds. Anderson, M. G. and Burt, P. T.). John Wiley and Sons Ltd., Chapter 15, pp. 59-84.

Wood, E. F., Sivapalan, M., Beven, K. y Band, L., 1988. Effects of spatial variability and scale with implication to hydrologic modeling. *Journal of Hydrology*, 102, pp. 29-47.

Yapo, P.O., Gupta, H.V. y Sorooshian, S., 1996. Automatic calibration of conceptual rainfall-runoff models: sensitivity to calibration data. *Journal of Hydrology*, 181, pp. 23-48.