

# SEMINARIO INTERNACIONAL MEDIO AMBIENTE Y RECURSOS HIDRICOS

## CALIBRACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO APLICADO A LA CUENCA DEL RÍO JUCAR (ESPAÑA).

**Ramos Fernández Lia, Félix Francés García**

*Instituto de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente IIAMA de la UPV de España.*

*liarf@lamolina.edu.pe, ffrances@hma.upv.es*

### INTRODUCCIÓN

La variabilidad espacial de las precipitaciones y las propiedades de la cuenca tienen impactos significativos en la respuesta hidrológica de las cuencas. Caracterizar y modelar la relación entre la distribución espacial de la lluvia, características de la cuenca, y la generación de escorrentía ha sido objeto de numerosos estudios durante más de dos décadas. Debido a que no se dispone de un marco matemático que explique satisfactoriamente el comportamiento del flujo dentro de una cuenca, la modelación hidrológica distribuida ha sido el punto de interés de la comunidad científica en los últimos años. Las ventajas que presenta la modelación distribuida con respecto a la tradicional modelación agregada, consisten fundamentalmente en la mejor representación de la variabilidad espacial de los fenómenos involucrados dentro de los procesos hidrológicos. Adicionalmente, la modelación distribuida ha surgido en los últimos años para lograr un mejor entendimiento de los procesos a nivel de cuenca y de parcela. Aunque en ocasiones requiere de información detallada de la zona de estudio, este tipo de información día a día se encuentra más a disposición del público gracias al desarrollo que en los últimos años han tenido los ordenadores, la cartografía digital, los sistemas de información geográfica y las mediciones con sensores remotos. Khakbaz, et al (2009).

Para la estimación y la simulación de las crecidas se ha encontrado que los procesos físicos involucrados más importantes son la lluvia y la escorrentía superficial, por lo tanto se ha generalizado en la literatura el término lluvia-escorrentía. Desde su aparición y posterior aplicación, la simulación hidrológica distribuida, poco a poco, se ha convertido en una herramienta cada vez más robusta y eficaz para un sin número de aplicaciones hidrológicas.

Por lo anterior, el objetivo de este trabajo, es obtener la respuesta hidrológica ocasionada por episodios de lluvia, teniendo en cuenta los diferentes procesos físicos involucrados y empleando la modelación distribuida de tipo conceptual aplicándolo a la cuenca del río Jucar.

## CUENCA DEL RIO JÚCAR

El área de estudio es la Cuenca del río Júcar con un área de 21434 km<sup>2</sup> (Figura 1) que incluye parte de las provincias de Albacete, Cuenca y Valencia en España. El río Júcar es uno de los de mayor valor económico en España debido a su uso muy intenso: canales para riego, abastecimiento de agua potable, embalses para generar energía hidroeléctrica, navegación fluvial, pesca fluvial, pesca deportiva, turismo, lo cual intensifica la competencia por el recurso hídrico.

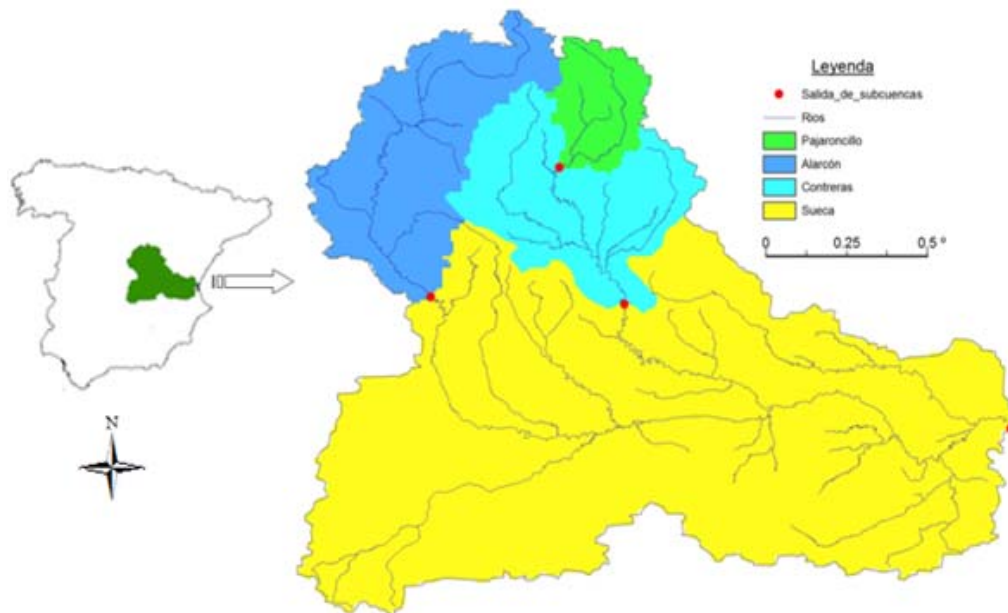


Figura 1.- Cuenca del Río Júcar

En general, tiene un clima mediterráneo con veranos cálidos y secos e inviernos suaves. La temperatura media anual varía de 9°C en las zonas montañosas a 18°C en la costa. El régimen del río en su cabecera es pluvio-nival pero en su curso medio y bajo depende más de las lluvias estacionales, además, fuertes sequías en verano e inundaciones en otoño. El sistema hidrológico se caracteriza por lluvias de muy alta intensidad y corta duración de origen convectivo debido al fenómeno llamado “gota fría”. El entorno de la cuenca puede definirse como una zona semiárida o incluso árida.

En el estudio, se empleó información cartográfica de la cuenca del Júcar (DIHMA, 2002) con tamaño de pixel 500 x 500 m que requirió una actualización y preprocesamiento en ArcGIS para generar los mapas en formato que se ajusten al modelo hidrológico: MED, celdas acumuladas, direcciones de flujo, pendiente del terreno, velocidad en ladera y parámetros hidrológicos del terreno.

## MODELO TETIS

Es un modelo de simulación hidrológica distribuido de tipo conceptual con parámetros físicamente basados, desarrollado por el IIAMA-UPV ([www.iiama.upv.es](http://www.iiama.upv.es)). El agua se distribuye en seis tanques de almacenamiento conectados entre sí. El flujo entre los tanques es función del agua almacenada en ellos, por lo que las variables de estado son los volúmenes almacenados en cada uno de los tanques (Figura 2).

La función que relaciona el flujo con estas variables de estado es función del esquema conceptual adoptado, del tipo de tanque y de las características morfológicas de la celda e hidrológicas del suelo. Todas las celdas drenan hacia la celda aguas abajo hasta que alcancen una celda con un cauce definido en que se realiza la traslación del flujo según la metodología de la “onda cinemática geomorfológica”. El modelo tiene un potente algoritmo de optimización (SCE-UA) para calibración automática de sus parámetros y valores iniciales de las variables de estado. Incluye nueve factores correctores que permiten de forma global una corrección rápida y ágil de los diferentes procesos representados.

El modelo requiere el tamaño de ladera y áreas umbrales. Cuando más información se tenga, se podrá usar un tamaño de ladera más pequeña pero en contrapartida se empleará un tiempo computacional mayor en la modelación. Para el estudio, se empleó un tamaño de ladera de 500x500m en concordancia con el tamaño de pixel de la información cartográfica. Cuanta más pequeña sea el tamaño de ladera, se podrá hacer una diferenciación entre cárcavas y cauces que se ve reflejado en los parámetros geomorfológicos de la cuenca. La información de parámetros geomorfológicos se obtuvo del estudio de la cuenca del Tajo (DIHMA, 2001), en que se detalla cinco zonas geomorfológicas (zona de alta montaña, cuenca media, cuenca baja, zona de cabecera y cauce del río), eligiéndose para la cuenca del Júcar por semejanza de zonas morfológicas. Como estos parámetros influyen en la estimación de los parámetros de producción de escorrentía en la cuenca, la incertidumbre que se genera, se soluciona con la calibración del factor corrector relacionado a la velocidad de ladera ( $FC_9$ ).

CONCEPTUALIZACIÓN VERTICAL

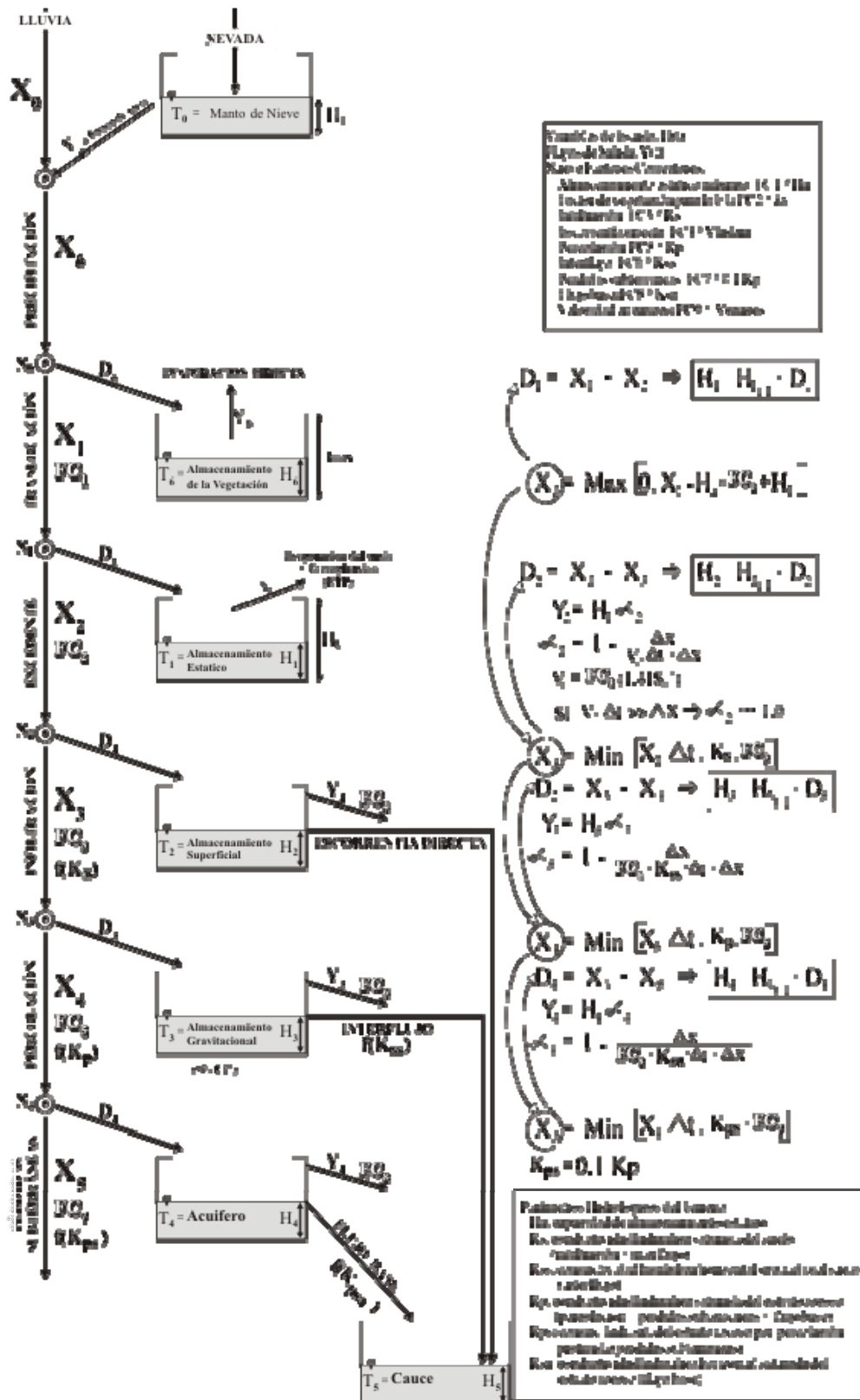


Figura 2.- Esquema conceptual de tanques del modelo TETIS (celda i,j)  
 Fuente: www.iiama.upv.es

## INFORMACIÓN PUNTUAL LOCAL

La información recolectada proviene de estaciones del SAIH y AEMET e incluye series temporales de lluvia, caudales aforados, información de embalses (volúmenes, caudales de entrada, caudales de salida) y temperatura (Tabla 1). Se requirió un arduo trabajo de análisis y posterior verificación de todos los registros, además de un preprocesamiento y codificación para ajustarse al tipo de formato compatible con el modelo TETIS.

**Tabla 1.- Información Puntual Local**

Variable	Fuente	Formato Origen			
		Archivo	Resolución Temporal	Sistema de Coordenadas	Hora
Precipitación	AEMET	CSV	Diario	WGS 1984	GMT 07-07 del día siguiente
Precipitación	SAIH	ASCII	Cinco Minutal	UTM_Zona_30N	Local
Aforos: Pajaroncillo y Sueca	SAIH	ASC	Cinco Minutal	UTM_Zona_30N	Local
Embalses: Contreras y Alarcón	SAIH	ASC	Cinco Minutal	UTM_Zona_30N	Local
Temperatura Máxima y Mínima	AEMET	CSV	Diario	WGS 1984	GMT 07-07 del día siguiente

La evapotranspiración potencial (ETP) se obtuvo con la ecuación de Hargreaves (FAO, 2006) y solo se requirió datos de temperatura y radiación extraterrestre tabulada ( $R_0$ ):

$$ETP = 0.0023(t_{med} + 17.78)R_0 * (t_{max} - t_{min})^{0.5} \quad [1]$$

Previamente, se calibró la ecuación de Hargreaves con valores de Penman-Monteith disponibles:

“Las Tiesas” (disponible en <http://www.itap.es/ITAP-Meteorologia/3infohistorica/InfoHisto3.as>) y “Requena Cerrito”, “Bolbaite” y “Villanueva-Castellón” (disponibles en <http://estaciones.ivia.es/>).

**Tabla 2.- Calibración de Hargreaves con Penman-Monteith**

Estación	Provincia	Error Medio	R <sup>2</sup>	Constante Calibrada
Las Tiesas	Albacete	0.782	<b>0.8617</b>	0.0023679
Requena Cerrito	Valencia	0.407	<b>0.8964</b>	0.0020617
Bolbaite		0.383	0.8900	0.0020366
Villanueva-Castellón		0.465	0.8820	0.0020617

Con la constante calibrada, se obtuvo los valores de ETP diarios para todas las estaciones de la cuenca del Júcar.

## CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

La exacta precipitación no se conoce, sino que su valor se mide con un error. De hecho, la calidad y la precisión de los datos es un problema en la modelación hidrológica, por tanto, existe un grado de incertidumbre asociada. Por ello, el tipo de precipitación es más importante que la elección del modelo hidrológico en términos de producir simulaciones hidrológicas más robustas. Por otro lado, la metodología de estimación de los parámetros involucra una serie de incertidumbres debidas principalmente a la cantidad, calidad y grado de definición espacial de la información básica empleada. Ante, esto, la ventaja del modelo TETIS es que se puede corregir en gran medida todos estos errores, calibrando los factores correctores del modelo (Tabla 3).

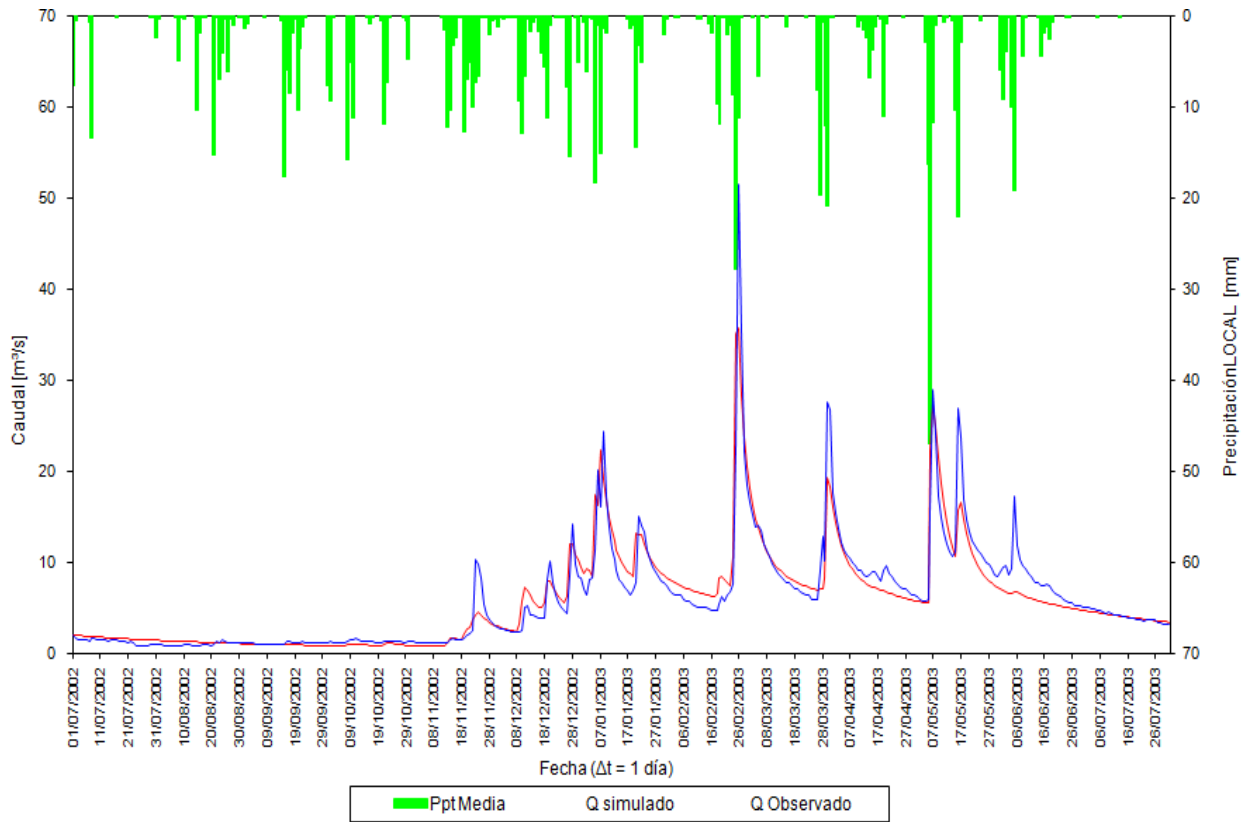
**Tabla 3.- Factores Correctores Calibrados en Pajaroncillo**

Factores Correctores		
FC-1	Almacenamiento estático	0.942
FC-2	Evapotranspiración	0.636
FC-3	Infiltración	0.924
FC-4	Escorrentía directa	0.004
FC-5	Percolación	0.248
FC-6	Interflujo	501.774
FC-7	Perdidas Subterráneas	0.000
FC-8	Flujo Base	2.389
FC-9	Velocidad en los cauces	0.834
Factor de interpolación de lluvia		0.000

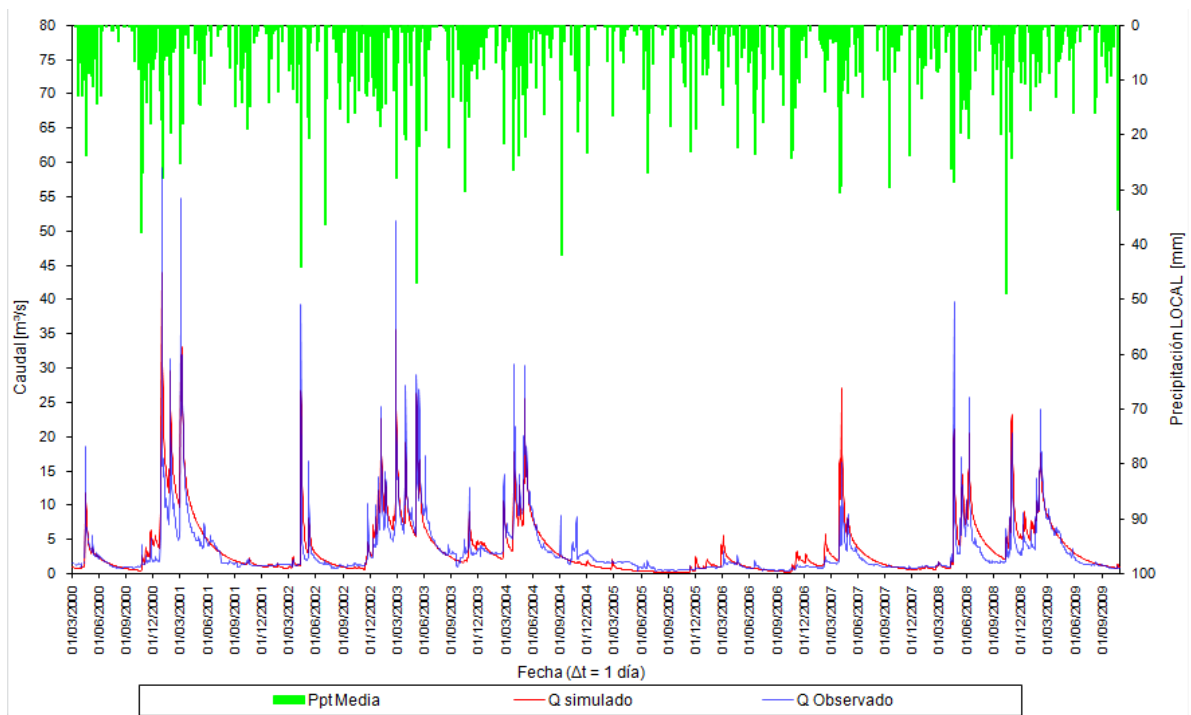
La calibración y validación del modelo hidrológico, con precipitación local diaria, generó buenos resultados, evaluándose el rendimiento del modelo a través del índice de Nash-Sutcliffe, el error en el volumen y el error cuadrático medio RMSE (Tabla 4 y Figuras 3,4,5 y 6).

**Tabla 4.- Calibración y Validación**

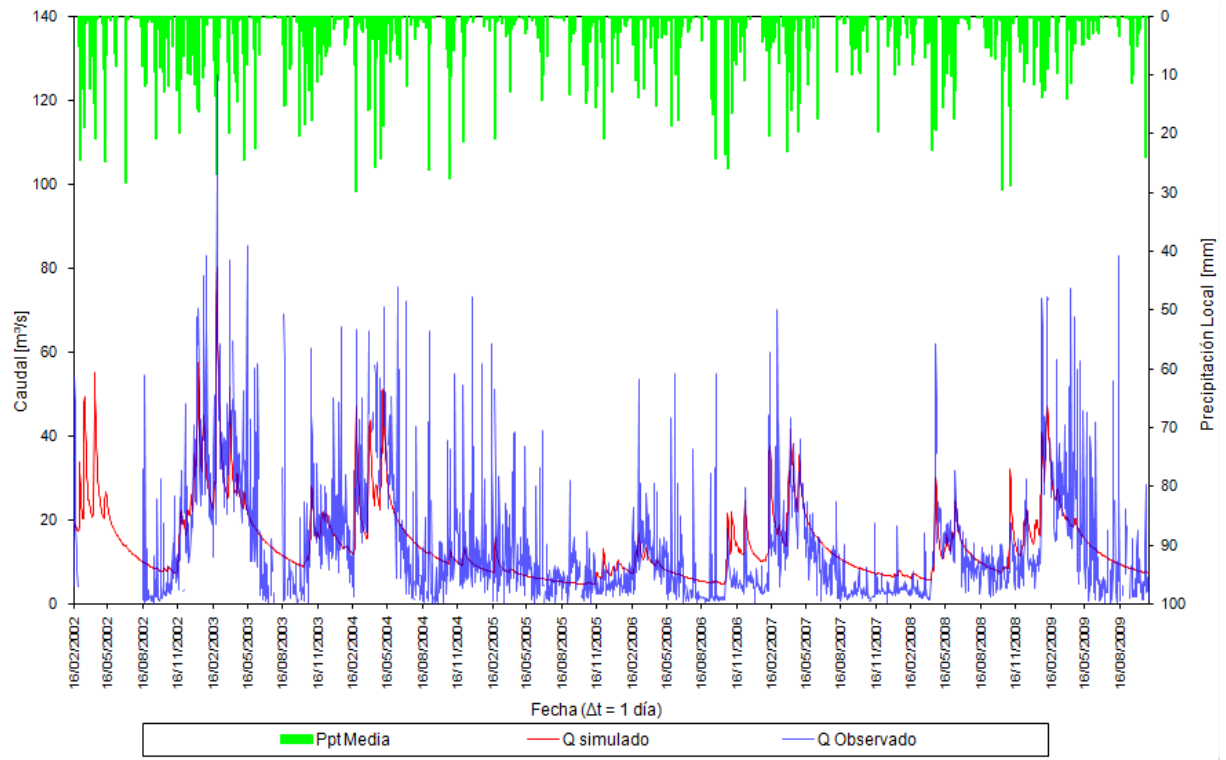
Principales Características	Pajaroncillo		Alarcón	Contreras
	Calibración	Validación Temporal	Validación Espacio-Temporal	Validación Espacio-Temporal
	Jul 02 - Jul 03	Mar 00 - Oct 09	Feb 02 - Oct 09	Mar 00 - Oct 09
Caudal máximo observado (m3/s)	51.525	59.327	125.891	72.523
Caudal máximo simulado (m3/s)	35.793	43.993	80.363	86.111
Nro de datos	396	3511	2472	3505
Caudal medio observado	5.964	3.391	13.801	5.442
Volumen Observado (Hm3)	204.067	1028.772	2947.645	1648.023
Volumen Simulado (Hm3)	199.171	1129.975	2960.145	1658.434
Error en Volumen(%)	-2.40	9.84	0.42	0.63
Indice de Nash-Sutcliffe (NSE)	<b>0.874</b>	<b>0.810</b>	<b>0.509</b>	<b>0.620</b>
Error Cuadrático Medio (RMSE) (m3/s)	2.070	1.916	9.872	3.927



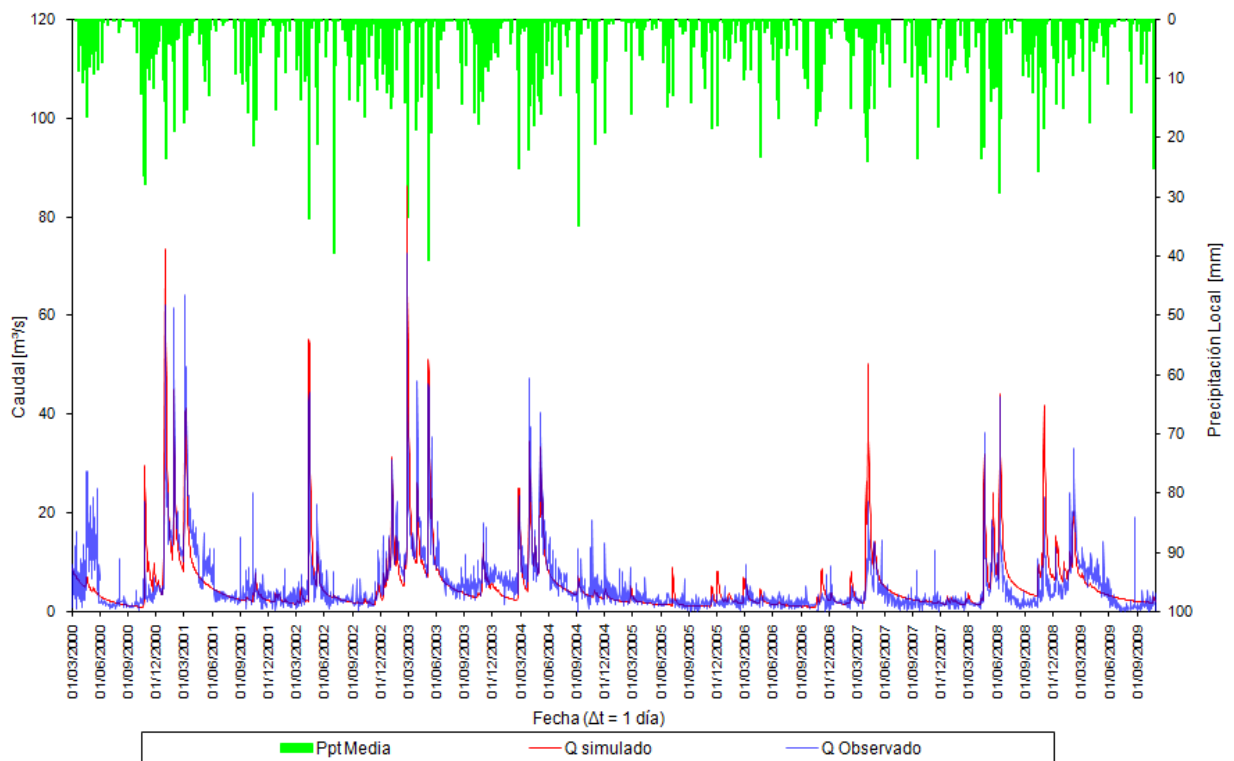
**Figura 3.-** Calibración en Pajaroncillo: Julio 2002 – Julio 2003



**Figura 4.-** Validación Temporal en Pajaroncillo: Marzo 2000 – Octubre 2009



**Figura 5.-** Validación EspacioTemporal en Alarcón: Febrero 2002 – Octubre 2009



**Figura 6.-** Validación Espacio Temporal en Contreras: Marzo 2000 – Octubre 2009



## CONCLUSIÓN

La modelación hidrológica en la cuenca del río Júcar con información de precipitación local tuvo resultados satisfactorios. El mejor rendimiento del modelo se obtuvo con la calibración en Pajaroncillo (julio 2002 a julio 2003), siendo los resultados, 0.874, -2.4% y  $2.070\text{m}^2/\text{s}$  del índice de Nash-Sutcliffe, error en el volumen y error cuadrático medio respectivamente. Análizando el índice de Nash-Sutcliffe en las Validaciones, los mejores resultados obtenidos fueron 0.81 con validación temporal en Pajaroncillo y 0.62 con validación espacio-temporal a la entrada del embalse Contreras.

Es decir, a pesar que la región mediterránea del Júcar, se caracteriza por lluvias de muy alta intensidad y corta duración de origen convectivo, el Modelo distribuido TETIS está representando satisfactoriamente la variabilidad espacial de la precipitación.

Sin embargo, la eficacia de estos modelos depende de la disponibilidad de los datos de entrada (inputs), es por ello que siguiendo con el estudio realizado, se está empleando precipitación obtenida por satélite disponible en tiempo real y que proporciona información en las regiones que son inaccesibles para otros sistemas de observación tales como pluviómetros y radar.

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo ha sido subvencionado por el Ministerio español de Ciencia e Innovación a través del proyecto Consolider-Ingenio "SCARCE" (2010-CSD2009-00065).

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**DIHMA** (2001). Un Modelo de Predicción de Crecidas para el SAIH de la Confederación Hidrográfica del Tajo. Informe Final para UTE SAIH TAJO.

**DIHMA** (2002). Investigación conjunta sobre generación de mapas de caudales máximos en la cuenca del Júcar. Informe Final para el CEDEX.

**FAO** (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Roma. ISBN 92-5-304219-2.

**Frances, F.; Velez, J.; Velez, J.J.** (2007). Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models. *Journal of Hydrology* 332 (1–2), 226–240.

**Francés, F., J. J. Vélez, J. I. Vélez, y M. Puricelli.** (2002). Distributed modelling of large basins for a real time flood forecasting system in Spain. En *Proceedings Second Federal Interagency Hydrologic Modelling Conference*. Las Vegas, USA.

**Gochis, D. J.; Shuttleworth, W. J., and Yang, Z. L.** (2002). Sensitivity of the modeled North American Monsoon regional climate to convective parameterization. *Monthly Weather Review*. **130** 1282-1298.

**Khakbaz, B.; Imam, B.; Hsu, K., and Soroosh, S.** (2009). From lumped to distributed via semi-distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. *Journal of Hydrology*.