

# MODELACIÓN HIDROLÓGICA DISTRIBUIDA EN CUENCAS DE ALTA MONTAÑA UTILIZANDO EL MODELO TETIS

Ismael Orozco, Félix Francés, Jesús López, Miguel I. Barrios

Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, España  
[isorme@posgrado.upv.es](mailto:isorme@posgrado.upv.es), [ffrances@hma.upv.es](mailto:ffrances@hma.upv.es), [jesus\\_lop79@hotmail.com](mailto:jesus_lop79@hotmail.com), [mibarpe@posgrado.upv.es](mailto:mibarpe@posgrado.upv.es)

## Introducción

La modelación hidrológica en cuencas de alta montaña es compleja por la presencia de las variables nieve y hielo, estas afectan significativamente el almacenamiento temporal y la liberación del agua sobre varias escalas de tiempo (Jansson et al., 2003). Según Hock (2003), el éxito de la modelación de escorrentía en cuencas de alta montaña depende en gran medida de la cuantificación que se hace del proceso de fusión. La fusión de nieve puede tomar un papel muy importante en las crecidas al combinarse con un incremento rápido de las temperaturas y lluvias fuertes. Con base en lo anterior la NOAA/NWS propuso dentro del DMIP2 la modelación hidrológica distribuida de dos cuencas de alta montaña (American y Carson). En el DMIP2 se registraron en el año 2007 un total de 36 participantes de diferentes institutos de investigación y universidades, con la finalidad de contribuir en la modelación hidrológica distribuida aplicada a la predicción de crecidas (Smith et al., 2004).

## Objetivo

El objetivo del presente artículo es mostrar la implementación del modelo hidrológico distribuido TETIS, en las cuencas de alta montaña American y Carson EE. UU., para su evaluación dentro del Proyecto Comparación de Modelos Distribuidos fase II (DMIP2 por sus siglas en inglés) para la predicción de crecidas.

## Descripción de los casos de estudio

Las cuencas del río American y río Carson se localizan en Sierra Nevada EE. UU. Entre los estados de California y Nevada (Longitud 118°-124°W y latitud 38°-40°N). Según Simpson et al. (2004), a pesar de que estas cuencas están geográficamente cerca, sus regímenes hidrológicos son bastante diferentes debido a su elevación media y a su ubicación (Figura 1). La cuenca del río Carson tiene un área de 8,084 km<sup>2</sup> y una latitud de 2,417 metros (Carroll et al., 2000). En el caso de la cuenca del río American su área es de 4,740 km<sup>2</sup> y una latitud de 1,270 metros (Shamir y Georgakakos, 2007).

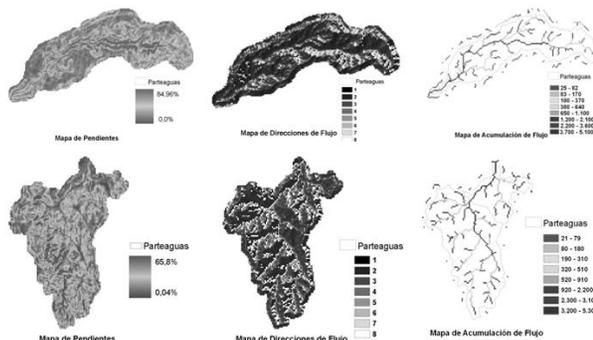


**Figura 1.-** Ubicación de los casos de estudio (subcuenca del río American y río Carson)

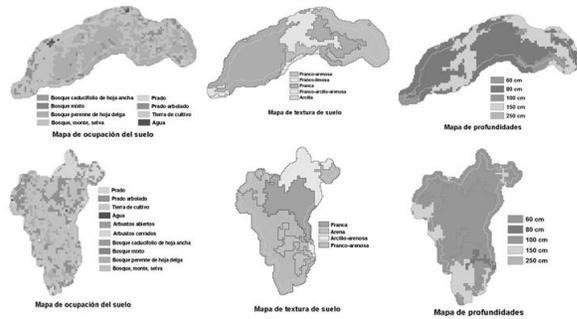
La NOAA/NWS propuso para el DMIP2 utilizar como casos de estudio las subcuencas afluente norte del río American (886 km<sup>2</sup>) y afluente este del río Carson (922 km<sup>2</sup>). En adelante se referirá a estas como subcuenca del río American y subcuenca del río Carson. La precipitación para estas subcuencas es dominada por los efectos orográficos, con una precipitación media anual de 530 mm (Carson) y 813 mm (American) a los 393 msnm, 1,244 mm (Carson) y 1,651 (American) a los 1,676 msnm (Jeton et al., 1996). La precipitación se produce en su mayoría en forma de nieve para la subcuenca del río Carson, mientras que para la subcuenca del río American como lluvia, nieve o la combinación de ambas. El periodo de invierno comprende seis meses de noviembre a abril (Pandey et al., 1999). Registrándose temperaturas que varían entre los 0-18°C.

## Modelo hidrológico TETIS

El modelo hidrológico distribuido TETIS utilizado, es capaz de simular de manera continua los principales componentes del ciclo hidrológico (Vélez et al., 2009). El modelo ha sido probado satisfactoriamente en diferentes escenarios climatológicos en cuencas de España y Francia (Vélez, 2001; Vélez et al., 2002a; Vélez et al., 2002b y Francés et al., 2007). Es un modelo lluvia-escorrentía, según Francés et al. (2007) simula la producción de escorrentía en cuencas naturales realizando un balance hídrico a nivel de celda. Modela fusión de nieve (método grado-día), laminación de embalses y traslación de los caudales en los cauces empleando el método de onda cinemática geomorfológica que es una simplificación de la ecuación de Saint Venant. El modelo TETIS, utiliza un esquema conceptual que incluye seis tanques ( $T_{0-5}$ ), seis variables de estado inicial ( $H_{0-5}$ ), cinco flujos de salida ( $Y_{0-4}$ ) y cinco nodos de control (Vélez y Francés 2005). La información que requiere el modelo es: a) DEM a partir del cual se obtienen los mapas de pendientes, direcciones y acumulación de flujo (Figura 2). b) Los mapas de parámetros de almacenamiento estático ( $H_u$ ), conductividad hidráulica del suelo ( $k_s$ ) y conductividad hidráulica en el substrato rocoso ( $k_p$ ). En la figura 3 se muestra la información raster utilizada para el cálculo de los parámetros anteriores.

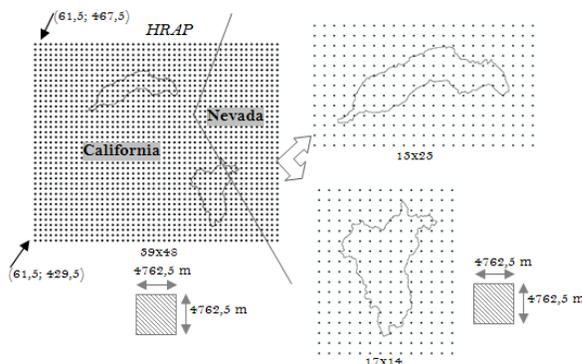


**Figura 2.-** Mapas derivados de los DEMs (tamaño de celda 421 m): mapa de pendientes, direcciones de flujo y acumulación de flujo.



**Figura 3.-** Mapas de ocupación de suelo, texturas de suelo y profundidades de suelo, usados para calcular los parámetros  $H_u$ ,  $k_s$  y  $k_p$

c) Los inputs de precipitación y temperatura que utiliza el modelo TETIS se obtuvieron de un total de 249 estaciones, a partir de las cuales se generaron mallas de lluvia a una resolución de 4,762.5 metros (HRAP) [Greene y Hudlow, 1982]. En formato NEXRAD y proyección polar estereográfica (60°N y 105°W) [Figura 4].



**Figura 4.-** Malla de precipitaciones y temperaturas (421 m), escala horaria, periodo de 1987-2002 (140,256 archivos ascii) y mallas recortadas 12x23 (American) y 17X14 (Carson)

A partir de la malla de precipitaciones NEXRAD se obtuvieron mallas de 13x23 (American) y 17x14 (Carson) con la finalidad de reducir el tiempo de computo. Para lograr lo anterior se programó en IDL una aplicación para formar los archivos de episodios que requiere el modelo para las simulaciones.

En el caso de la fusión de nieve el modelo TETIS cuenta con un submodelo de fusión basado en el método grado-día (Ecuación 1). Según Vélez (2003), se eligió este método por ser ampliamente utilizado por su sencillez, porque requiere poca información y es fácilmente adaptable a los modelos lluvia-escorrentía. El submodelo cuenta con dos componentes básicas: la primera toma en cuenta la acumulación y la segunda la forma como se realiza la fusión de nieve.

$$Y_0 = \begin{cases} M_f (T - T_b), & \text{si } T \geq T_b \\ 0, & \text{si } T < T_b \end{cases} \quad [1]$$

La conceptualización del método grado-día de fusión de nieve dentro del modelo TETIS está representada por el tanque  $T_0$ , donde los inputs son la precipitación y la temperatura. El almacenamiento de la precipitación en forma de nieve en el  $T_0$  es definida bajo la siguiente relación  $D_0 = X_0$ , si  $T < T_b$ . Si la precipitación es en forma de lluvia ( $T > T_b$ ), la aportación por

lluvia ( $X_1 = X_0$ ) es incorporada directamente al sistema. Donde  $X_0$  es el input de precipitación. La nieve es almacenada en  $T_0$  como altura equivalente de agua en milímetros (SWE por sus siglas en ingles) a nivel de celda y distribuida por el modelo TETIS usando el algoritmo de interpolación de inverso de la distancia al cuadrado (IDW por sus siglas en ingles). La calibración del submodelo de fusión se realizó de manera manual utilizando las series de datos de SWE a escala diaria y las imágenes de cubierta de nieve proporcionadas por la NOAA/NWS.

## Resultados

La calibración de los modelos se realizó en tres fases, utilizando las estaciones de aforo del Lago Clementine (38.93611, -121.02278) para la subcuenca del río American y la estación Gardnerville (38.845,-119.70361) para la subcuenca del río Carson. El modelo utiliza nueve factores correctores (FCs), los cuales fueron obtenidos por calibración automática (SCE-UA), se utilizó como función objetivo el índice de Nash-Sutcliffe (NSE). En la fase I se calibraron los modelos para un episodio sin presencia de nieve (SWE=0). La fase II comprendió la calibración del submodelo de fusión de nieve con tres episodios (SWE≠0) y por último la fase III consistió en la calibración combinando ambos procesos, para ello se usaron tres episodios de invierno. En la tabla 1 se muestran los estadísticos obtenidos para la subcuenca del río American.

**Tabla 1.-** Estadísticos de los resultados obtenidos para la subcuenca del río American, tanto en la estación de aforo (Lago Clementine), como en las estaciones SNOTEL (Huysink y Blue Canyon)

E. Aforo y E. SNOTEL	Fase I [NSE]	Fase II [NSE]	Fase III [NSE]
Lago Clementine	0.92		0.83-0.87
Huysink		0.81	
Blue Canyon		0.62	

Los resultados obtenidos para la subcuenca del río Carson son un NSE de 0.8 en la estación de calibración (Gardnerville) y los siguientes NSE en estaciones SNOTEL Spratt Creek (0.77), Blue Lakes (0.92), Ebbetts Pass (0.87) y Poison Flats (0.91).

## Conclusiones

Los resultados obtenidos muestran un desempeño del modelo TETIS muy bueno para ambas subcuencas de alta montaña al obtenerse con los FCs calibrados NSE por encima de 0.8 en la calibración y de buenos en las validaciones temporales realizadas. El submodelo de fusión reproduce adecuadamente tanto el proceso de acumulación como de fusión, sin embargo, como era de esperarse no reproduce las ondulaciones diurnas en los hidrogramas. La distribución de la cubierta de nieve realizada por el modelo (IDW) mostró diferencias del orden de 0.06-27.0% (American) y 0.0-14.0% (Carson).

## Referencias bibliográficas

- Francés, F., Vélez, J.I. and Vélez, J.J. (2007). "Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models". *Journal of Hydrology*, Vol. 332, pp. 226-240.
- Smith, M.B., Seo, D., Koren, V.I., Reed, S.M., Zhang, Z., Duan, Q., Morena, F. and Cong, S. (2004). "The Distributed Model Intercomparison Project (DMIP)". *Journal of Hydrology*, Vol. 298, March 2004, pp. 1-26.