

MODELACIÓN HIDROLÓGICA PARA LA GESTIÓN DEL RIESGO DE INUNDACIONES EN LA CUENCA DEL RÍO DAYMÁN

Vanessa Erasun, Gonzalo Sapriza Azuri, Nicolás Failache y Pablo Gamazo

Departamento del Agua, Centro Universitario Regional Litoral Norte, Universidad de la República, Salto, Uruguay.
E-mail: verasun@unorte.edu.uy, gsapriza@unorte.edu.uy, nicofail@gmail.com, gamazo@unorte.edu.uy

Introducción

Frecuentemente los habitantes de los centros poblados ubicados próximos a las márgenes del río Uruguay, se ven perjudicados por eventos de inundaciones. Los sistemas de alerta temprana de inundaciones (SATI) son herramientas que contribuyen a la reducción de riesgos de estos eventos. Los modelos hidrológicos utilizados en los SATI permiten conocer la dinámica de las crecidas, sus valores límites y sus probabilidades de ocurrencia.

En este trabajo se presentan los resultados del desarrollo de un modelo hidrológico de tipo continuo, con una escala de tiempo diaria, calibrado y validado para la cuenca del río Daymán, tributaria al río Uruguay. Dicho modelo contribuirá a un sistema de alerta temprana y será administrado en conjunto por la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM-SG) y la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU).

Metodología

La cuenca del río Daymán (Figura 1), ubicada en la margen izquierda del río Uruguay tiene un área de aporte de 3.410 km². La longitud del cauce principal es de 134 km, con una pendiente media de la cuenca de 1,1 % y un tiempo de concentración de 16 horas.

A partir de la Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay escala 1:1.000.000 del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP, 1976) se determinaron los suelos predominantes en la cuenca, observándose la presencia de suelos superficiales con baja capacidad de almacenamiento. Según el Mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay (SIT-MVOTMA, 2011) en esta cuenca el campo natural (uso pastoril) ocupa la mayor parte de la superficie. En función de los distintos grupos de suelo CONEAT (Molfino *et al.*, 2001) se determinó el agua disponible promedio en la cuenca, 77 mm (diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitez permanente).

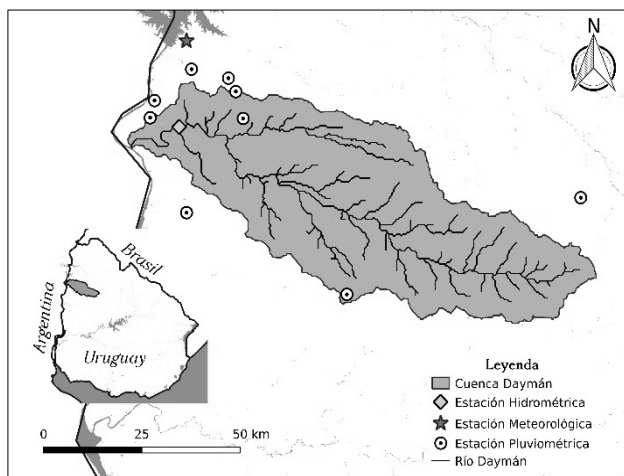


Figura 1.- Ubicación del área de estudio.

Se recopiló información hidrometeorológica de base para determinar las precipitaciones por cuenca y la evapotranspiración potencial. Se realizó un análisis de la calidad de los

datos. Para ello, se identificaron estaciones patrón en diferentes zonas; las mismas fueron seleccionadas en base a su reducido o nulo número de días faltantes, a la ausencia de valores fuera de rango y a su consistencia en la variabilidad inter e intra-anual. Las estaciones con datos faltantes, fueron completadas calculando el valor mediante ponderación por el inverso de la distancia al cuadrado entre los pluviómetros en un radio de búsqueda menor a los 65 km de distancia. Una vez realizado este procedimiento, con las estaciones finales se determinaron las series diarias de precipitaciones medias de la cuenca, generadas a partir de una ponderación por área, utilizando los polígonos de Thiessen. La serie de evapotranspiración potencial utilizada fue estimada mediante el método de Penman-Monteith, brindada por la estación meteorológica del INIA-Salto Grande.

En la estación de aforo se observó que los niveles, estaban afectados por el río Uruguay cuando éste se encontraba a una cota igual o superior a 10,7 m (Figura 2). Por tanto, los caudales determinados de la curva de aforo con niveles superiores a esa cota fueron eliminados de la serie.

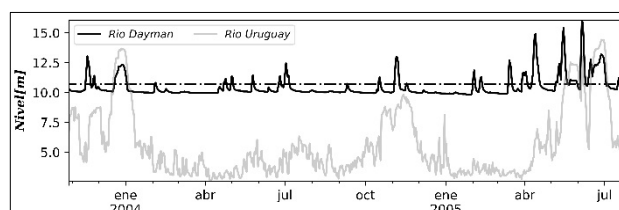


Figura 2.- Niveles del río Uruguay en el puerto de Concordia y en el río Daymán en la estación de aforo

Para llevar a cabo el modelo, se utilizó como plataforma de trabajo el programa HEC-HMS (sigla en inglés de *Hydrologic Engineering Center-Hydrologic Modeling System*), versión 4.2 (HEC, 2000); dentro de éste se utilizó el algoritmo SMA-HMS (*Soil Moisture Accounting - Balance de humedad del suelo*), desarrollado por Bennet (1998). Este algoritmo representa la cuenca mediante un conjunto de depósitos donde se simulan los siguientes procesos hidrológicos: intercepción en la cobertura vegetal, retención superficial, balance de agua en suelo y en dos acuíferos, uno superficial, y otro más profundo. Como método de tránsito se utilizó el método del hidrograma unitario de Clark, y el método de reservorios lineales para el flujo subterráneo.

La calibración del modelo tuvo como objetivo estimar aquellos parámetros efectivos del modelo que no pueden ser medidos de forma directa. Se realizó comparando los hidrogramas de caudales simulados con los observados, en el período comprendido entre el 15 de Abril del 2000 al 9 de Julio del 2009.

Para definir la bondad del ajuste, se utilizaron tres funciones objetivas: el coeficiente de eficiencia de Nash - Sutcliffe (NS), el logaritmo de NS (LogNS), y el porcentaje de error absoluto en el volumen (PEAV).

La calibración se realizó en dos etapas. La primera fue de tipo manual (prueba y error), con el objetivo de evaluar la influencia de cada parámetro en el hidrograma de salida del modelo y en las funciones objetivas utilizadas. Posteriormente, se aplicó calibración multi-objetivo (Gupta *et al.*, 1998) y se utilizó el

código de Borg, que implementa una serie de algoritmos genéticos (Hadka *et al.*, 2013), para su calibración automática.

La validación del modelo, permite evaluar si los parámetros obtenidos durante el proceso de calibración son válidos para otras series de tiempo. En la validación se utilizó un período de datos independiente, no empleado en la calibración (del 01 de Enero del 2010 al 23 de Setiembre del 2015).

Para representar todo el modelo se necesitaron 5 condiciones iniciales, y 17 parámetros a calibrar: 13 corresponden al SMA, 2 al modelo de Clark y 2 al modelo del reservorio lineal. Se consideró un período de calentamiento del modelo de 4 meses para ajustar las condiciones iniciales de manera que éstas no influyeran en la calibración. Análogamente, se realizó el mismo procedimiento en la validación.

Resultados

En la **Figura 3**, se muestran los caudales observados y modelados en la calibración para el año 2007.

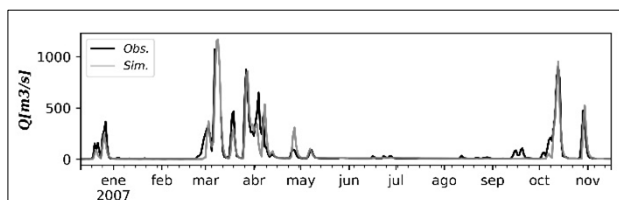


Figura 3.- Caudales observados y simulados para el año 2007.

En la **Figura 4** se presentan los frentes de Pareto para las tres funciones objetivo utilizadas en la calibración y validación.

En la calibración se compara el NS vs. LogNS, LogNS vs. PEAV y PEAV vs. NS respectivamente. En el primer y tercer caso, la variación en el NS es despreciable, por lo tanto, no se producirán efectos contrapuestos con LogNS y PEAV respectivamente; esto podría estar atribuido a que la cuenca presenta una rápida respuesta (fase creciente y recesión) en los eventos de crecida y a un flujo base reducido, con una respuesta más moderada temporalmente. En el segundo caso, se compara LogNS vs PEAV, donde sí se aprecia un leve efecto contrapuesto; una mejora en el ajuste de LogNS (flujo base), implica un peor ajuste en el PEAV, y viceversa. Este comportamiento en la función LogNS está atribuido específicamente a la variación en el parámetro MCPDS1 correspondiente a la máxima capacidad de percolación desde el primer depósito subterráneo al segundo.

Para el período de validación, se mantienen las mismas tendencias. Los valores de las funciones objetivos están dentro del mismo rango.

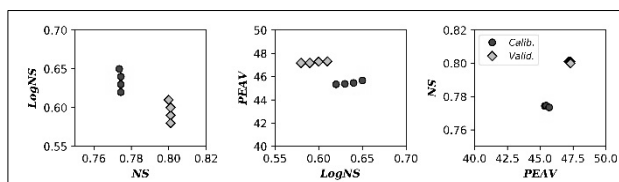


Figura 4.- Frentes de Pareto.

Conclusiones

Se observó que el río Uruguay tiene influencia en la estación en donde se realizan los aforos. Por esta razón, no se consideraron los periodos de caudales afectados por el remanso del río Uruguay.

Reconociendo la incertidumbre existente en los datos disponibles de precipitaciones e hidrogramas de caudales; el modelo desarrollado permitió simular las diferentes componentes de flujo (flujo superficial, subsuperficial y flujo base) para un paso de tiempo diario.

Los resultados obtenidos, según el criterio de Molnar (2001) fueron “*muy buenos*” en la etapa de calibración, y “*excelente*” en la validación. El modelo muestra que tiene utilidad para reproducir los diferentes componentes del hidrograma con una tendencia en algunos eventos a subestimar los caudales máximos.

A partir de este trabajo y de los resultados obtenidos, se sugiere:

- Determinar nuevas curvas de aforo, considerando no sólo los niveles de aforo, sino también los efectos de remanso del río Uruguay. Para ello, sería recomendable la instalación de equipos Doppler; con capacidad para medir perfiles de velocidades en la sección de aforo y realizar las curvas de ajuste en base a las velocidades y niveles.

- Desarrollar un modelo hidrodinámico que contemple los efectos de remanso producidos por la condición de contorno aguas abajo, efectuada por el río Uruguay.

- El SMA es considerado un modelo con muchos parámetros (13 parámetros calibrables). Por tanto, se recomienda la implementación de modelos de simulación de tipo continuo con un menor número de parámetros.

- Se identificó que la distribución de pluviómetros y estaciones meteorológicas era bastante dispersa para la cuenca. Para la puesta en funcionamiento del sistema de alerta temprana sería necesaria la instalación de una red meteorológica y telemétrica para el monitoreo de las cuencas, con una resolución temporal mayor a la actual (frecuencia horaria, preferiblemente).

Referencias

- Bennett, T. H.** (1998). Development and application of a continuous soil moisture accounting algorithm for the Hydrologic Engineering Center Hydrologic Modeling System (HEC-HMS) (Doctoral dissertation, University of California, Davis).
- Gupta, H. V., Sorooshian, S., & Yapo, P. O.** (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and non-commensurable measures of information. *Water Resources Research*, 34(4), 751-763.
- Hadka, D., & Reed, P.** (2013). Borg: An auto-adaptive many-objective evolutionary computing framework. *Evolutionary computation*, 21(2), 231-259.
- HEC** (2000). Hydrologic Modeling System: Technical Reference Manual. US Army Corps of Engineers Hydrologic Engineering Center, Davis, CA.
- MGAP, Dirección de Suelos y Aguas** (1976). “Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000”.
- Molfin, J., & Califra, A.** (2001). Agua disponible en las tierras del Uruguay: Segunda aproximación. Montevideo: MGAP. 12p.
- Molnar, P.** (2011). “Calibration”. *Watershed Modelling*, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich, Switzerland.
- SIT-MVOTMA** (2011). <http://sit.mvotma.gub.uy/shapefiles.htm>, acceso 02/09/2017.