

# EVALUACIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO A TRAVÉS DE UN ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD DINÁMICO

Yelena Medina<sup>1,2</sup> y Enrique Muñoz<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Doctorado en Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.

<sup>2</sup>Centro de Investigación en Biodiversidad y Ambientes Sustentables CIBAS, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.

<sup>3</sup>Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Católica de la Santísima Concepción, Concepción, Chile.

E-mail: ypmolina@ing.ucsc.cl, emunoz@ucsc.cl

## Introducción

El análisis de sensibilidad permite estudiar el comportamiento de la respuesta de un modelo numérico y caracterizar el impacto que produce la variación de los datos de entrada (Pianosi et al., 2016; Sarrazin et al., 2016). Diversos métodos de análisis de sensibilidad han sido propuestos en la literatura, y su aplicación y comparación se ha incrementado en los últimos años (Norton, 2015), siendo reconocido como una herramienta esencial para el desarrollo y evaluación de modelos ambientales (Pianosi et al. 2015). En la actualidad los modelos hidrológicos son componentes irremplazables en estudios relacionados con, por ejemplo, predicción de crecidas y sequías, estimaciones de disponibilidad de recursos hídricos y estudios de impactos por cambio climático (Wagner y Kollat, 2007), entre otros.

La falta de enfoques objetivos para evaluar la estructura de un modelo es una de las principales fuentes de incertidumbre en los procedimientos de modelado. Un enfoque para abordar esta problemática consiste en el Análisis de Identificabilidad Dinámico (DYNIA, por sus siglas en inglés) presentado por Wagner et al. (2003), el cual permite evaluar la estructura de un modelo, localizando, dentro de la serie de tiempo, periodos de alta identificabilidad de cada parámetro en diferentes momentos del período de evaluación. Si bien DYNIA contribuye para la evaluación de modelos a lo largo del período de simulación, carece de una medida objetiva que cuantifique cómo varía la sensibilidad temporal de los parámetros de un modelo a lo largo del período de simulación.

Este estudio tiene por objetivo evaluar un modelo hidrológico de forma dinámica utilizando un índice que cuantifica la sensibilidad temporal de los parámetros del modelo (Análisis de Sensibilidad Dinámico – ASD, definido en el marco de este estudio). Como caso de estudio, se utiliza el modelo hidrológico HBV (Bergström, 1972) aplicado en la cuenca del río Allipén, Chile, en donde el ASD se relaciona con una clasificación de años normales, húmedos y secos en base a registros de precipitaciones.

## Área de estudio

El área de estudio corresponde a la cuenca del río Allipén (Chile) hasta la estación fluviométrica Río Allipén en Los Laureles controlada por la Dirección General de Aguas. El río Allipén se forma en la cordillera de Los Andes y drena la cuenca de 1652 km<sup>2</sup>. Las precipitaciones pueden llegar a los 3000 mm anuales, y las temperaturas medias mensuales oscilan entre -3°C y 18°C (Niemeyer, 1980). La cuenca presenta un aporte principal de tipo pluvial con una leve influencia nival en la parte alta, mostrando un régimen pluvio-nival.

## Métodos

### Modelo hidrológico

El modelo HBV (Bergström, 1972) corresponde a un modelo de balance hídrico pluvio-nival de tipo conceptual. En este estudio se utiliza la versión simplificada presentada por Aghakouchak y Habib (2010). El modelo comprende tres módulos, un módulo

de nieve, un módulo de precipitación efectiva y humedad del suelo, y un módulo de respuesta. Para mayor comprensión del modelo se muestra un diagrama conceptual en la Figura 1.

Adicionalmente, se incorporó un parámetro de ajuste de las precipitaciones (A). Este parámetro permite que el modelo consiga un balance de masa en el largo plazo (Muñoz et al., 2014) y con ello corregir la subestimación de precipitaciones producto de la orografía y de la ausencia de registros en las zonas más altas de la cuenca.

El modelo simula descargas diarias usando series de precipitación y temperatura medias diarias, y promedios mensuales a largo plazo de temperatura y evapotranspiración potencial. Seis estaciones pluviométricas, controladas por la Dirección General de Aguas (DGA), fueron utilizadas para estimar la precipitación media de la cuenca, con datos del periodo 1951-2010.

Debido a la ausencia de registros de temperatura, se utilizaron series grilladas de 0.25° de resolución (~ 25 km) publicadas por el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Princeton (Sheffield et al., 2006). Como método de interpolación espacial de datos se utilizó el método Inverso de la Distancia y se estimó la evapotranspiración potencial a través del método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948).

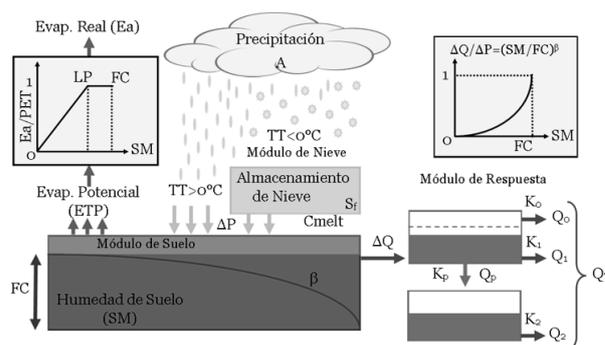


Figura 1.- Diagrama conceptual del modelo hidrológico HBV.

### Análisis de sensibilidad dinámico

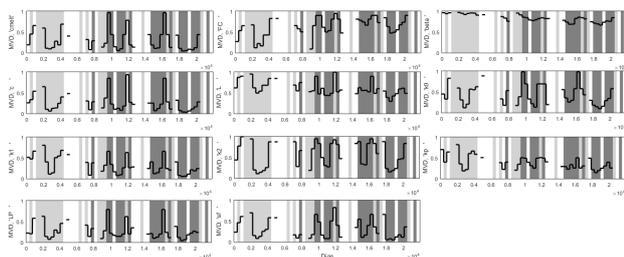
Se realizaron 10,000 simulaciones utilizando conjuntos de parámetros seleccionados de manera aleatoria. A diferencia del DYNIA, las simulaciones realizadas se agrupan en modelos ‘bien comportados’ y ‘no-bien comportados’ en base a una función objetivo. En este caso se utilizó la Eficiencia de Kling Gupta (KGE) que se enfoca en evaluar de manera equitativa la correlación, desviación y variabilidad del hidrograma simulado (Gupta et al., 2009). Se considera un modelo ‘bien comportado’ (BC) cuando el valor de la función objetivo (KGE) es igual o superior a 0.6, mientras que valores de KGE inferiores a 0.6 se consideraron ‘no bien comportados’ (N-BC). De ambos grupos de modelos se obtuvo una función de distribución acumulada, donde la sensibilidad resulta proporcional a la discrepancia entre las funciones de los modelos BC y N-BC. Por lo tanto, la sensibilidad del modelo a un cierto parámetro, se puede

caracterizar como la máxima distancia vertical entre ellas (MDV). Este estadístico es usado en el test de dos muestras de Kolmogorov-Smirnov (Spear y Hornberger, 1980). Al igual que el DYNIA, el ASD, no se aplica a la serie de tiempo completa, sino que utiliza una ventana móvil. En este estudio se utilizó una ventana móvil de 3 años.

Para relacionar los resultados con años húmedos, secos o normales se clasificaron los registros pluviométricos anuales de acuerdo al percentil 33 ( $P_{33}$ ) y 66 ( $P_{66}$ ), donde precipitaciones anuales bajo el  $P_{33}$  se considera un año seco, entre  $P_{33}$  y  $P_{66}$  normal y sobre  $P_{66}$  húmedo (Quintana y Aceituno, 2012).

## Resultados

En la Figura 2 se observa la variación del índice de sensibilidad (MDV) en la serie de tiempo (ASD) para todos los parámetros del modelo. Se observa que el factor de derretimiento de nieve (cmelt), el parámetro para la distribución de la humedad del suelo ( $\beta$ ) y el umbral para separar la escorrentía superficial de la subsuperficial (L), muestran que la sensibilidad tiende a disminuir en años húmedos. Por otro lado, la capacidad de campo (FC) muestra un aumento de sensibilidad en los años húmedos.



**Figura 2.-** Resultados de Análisis de Sensibilidad Dinámico. Línea negra muestra el índice de sensibilidad (MDV), el área gris oscuro indica año húmedo, el área gris claro indica año seco y el área blanca indica año normal.

## Conclusiones

Se elaboró un ASD basado en el índice de sensibilidad presentado por Pianosi y Wagener (2015). Este índice permite detectar la sensibilidad temporal de un modelo con respecto a los parámetros de este de manera independiente, siendo una herramienta recomendada para la evaluación de modelos que incluyen el análisis de series temporales.

Para la cuenca del río Allipén se observa que los parámetros relacionados con la liberación de aguas, ya sea por almacenamiento nival (cmelt), subsuperficial (L) y humedad del suelo ( $\beta$ ), tienden a disminuir su sensibilidad en períodos de mayor precipitación (años húmedos). Por otra parte, se observa que el modelo tiende a ser más sensible a FC en años húmedos, ya que el caudal total se verá más influenciado por la capacidad de almacenamiento de la cuenca.

## Referencias bibliográficas

Aghakouchak, A. y Habib, E. (2010). "Application of a Conceptual Hydrologic Model in Teaching Hydrologic Processes". *International Journal of Engineering Education*, Vol. 26, pp. 963-973.

Bergström, S. (1972). "Utvechling och tillämpning av en digital avrinningsmodell" (Development and application of a digital runoff model, in Swedish), *Swedish Meteorological and Hydrological Institute*. Notiser och preliminära rapporter. Serie HydrologI 22.

Gupta, H., Kling, H., Yilmaz, K. y Martínez, G. (2009). "Decomposition of the mean squared error and NSE performance criteria: implications for improving hydrological modeling". *Journal of Hydrology*, Vol. 377, pp. 80-91.

Muñoz, E., Rivera, D., Vergara, F., Tume, P. y Arumí, J. (2014). "Identifiability analysis: towards constrained equifinality and reduced uncertainty in a conceptual model". *Hydrological Sciences Journal*, Vol. 59, pp. 690-1703.

Niemeyer, H. (1980). "Hoyas hidrográficas de Chile: IX Región". Santiago, Chile: Dirección General de Aguas.

Norton, J. (2015). "An introduction to sensitivity assessment of simulation models". *Environmental Modelling & Software*. Vol. 69, pp. 166-174.

Pianosi, F. y Wagener, T. (2015). "A simple and efficient method for global sensitivity analysis based on cumulative distribution functions". *Environmental Modelling & Software*. Vol. 70, pp. 80-85.

Pianosi, F., Sarrazin, F. y Wagener, T. (2015). "A Matlab toolbox for Global Sensitivity Analysis". *Environmental Modelling & Software*. Vol. 70, pp. 80-85.

Pianosi, F., Beven, K., Freer, J., Hall, J., Rougier, J., Stephenson, D. y Wagener, T. (2016). "Sensitivity analysis of environmental models: A systematic review with practical workflow". *Environmental Modelling & Software*. Vol. 79, pp. 214-232.

Quintana, J. y Aceituno, P. (2012). "Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S". *Atmósfera*. Vol. 25, pp. 1-22.

Sarrazin, F., Pianosi, F. y Wagener, T. (2016). "Global Sensitivity Analysis of environmental models: Convergence and validation". *Environmental Modelling & Software*. Vol. 79, pp. 135-152.

Sheffield, J., G. Goteti, y E. F. Wood. (2006). "Development of a 50-yr high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling". *Journal of Climate*. Vol. 19, pp. 3088-3111.

Spear, R., Hornberger, G. (1980). "Eutrophication in Peel Inlet, II, identification of critical uncertainties via generalised sensitivity analysis". *Water Research*. Vol. 14, pp. 43-49.

Thorntwaite, C. (1948). "An Approach toward a Rational Classification of Climate". *Geographical Review*.

Wagener, T., y Kollat, J. 2007. Numerical and visual evaluation of hydrological and environmental models using the Monte Carlo analysis toolbox, *Environ. Modell. Softw.*, 22, 1021-1033.

Wagener, T., McIntyre, N., Lees, M., Wheeler, H. y Gupta, H. (2003). "Towards reduced uncertainty in conceptual rainfall-runoff modelling: dynamic identifiability analysis". *Hydrological Processes*, Vol. 17, pp. 455-476.