

MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE MACROESCALA EN LA CUENCA MAGDALENA-CAUCA (COLOMBIA)

Erasmus Rodríguez, David Zamora, Inés Sánchez, Nicolás Duque, Felipe Arboleda,
Carolina Vega, Camila García y Luisa Monrroy

Grupo de Investigación en Ingeniería de los Recursos Hídricos (GIREH), Universidad Nacional de Colombia Bogotá, Colombia.
E-mail: earodriguezs@unal.edu.co, dazamora@unal.edu.co, icsanchezr@unal.edu.co, nduqueg@unal.edu.co, pfarboledao@unal.edu.co,
cvegav@unal.edu.co, cagarciae@unal.edu.co, ifmonrroyr@unal.edu.co

Introducción

Una rigurosa modelación hidrológica de cuencas hidrográficas requiere datos hidrometeorológicos de calidad, los cuales, en la mayoría de los casos, provienen de redes de monitoreo en tierra. Sin embargo, a nivel mundial se ha identificado desde los años 80 una tendencia hacia la disminución en el número de estaciones hidrometeorológicas en operación (UN-WWAP, 2015). A manera de ejemplo, en Colombia el número de estaciones con registros de precipitación de calidad en la macrocuenca Magdalena-Cauca (McMC), se ha visto reducido de aproximadamente 1,500 en los años 80 a 1,000 para la última década. Una alternativa complementaria a los datos puntuales, en estos escenarios de información decreciente o escasa, es el uso combinado de datos puntuales con información hidrometeorológica de reanálisis y derivada de sensores remotos.

A este respecto, el proyecto de investigación internacional earth2Observe (www.earth2observe.eu) ha consolidado y puesto para libre consulta y descarga, en el repositorio <https://wci.earth2observe.eu/>, un reanálisis hidrometeorológico para el periodo 1980-2012 a nivel global, con resolución temporal diaria y escalas espaciales de 0.25° y 0.50°, para todas las variables del ciclo hidrológico. Dentro del caso de estudio en la McMC, la información de este reanálisis ha sido validada y analizada con varios propósitos, incluyendo, entre otros, estimación de campos de precipitación, evaluación de caudales diarios y mensuales, como insumo para la asimilación de datos de caudales derivados de sensores remotos, en el cálculo de índices de disponibilidad hídrica y en el desarrollo de campos de precipitación de alta resolución espacial para la macrocuenca (López et al., 2018; Rodríguez et al., 2017).

Es por tanto el objeto de este artículo reportar los principales hallazgos y resultados obtenidos durante la última fase de desarrollo del proyecto de investigación mencionado.

Materiales y métodos

El área de estudio corresponde a la McMC en Colombia, con un área de aproximadamente 257,000 km² (ver Figura 1), precipitación y evapotranspiración promedio anual de 2,150 mm y 1,630 mm, respectivamente, y caudales promedio, registrados en la estación más cercana a su desembocadura en el Mar Caribe (Calamar), de 7,200 m³/s. En la McMC se asienta aproximadamente el 80% de la población colombiana y se genera alrededor del 80% del PIB nacional. A pesar de su indiscutible importancia, como fuente de suministro de agua para diversas demandas y propósitos, y fundamentalmente debido a las limitaciones de información existentes y a la complejidad física del hidrosistema, solo recientemente se han empezado a desarrollar iniciativas integrales de modelación hidrológica para toda la McMC, como la aquí descrita, con fines de planificación y apoyo a la toma de decisiones.

Con relación a la validación de los campos de precipitación provenientes del reanálisis y de los caudales generados por los diferentes modelos hidrológicos globales, estos últimos evaluados en 88 estaciones hidrométricas en la McMC, los resultados han sido reportados previamente (Rodríguez et al., 2016).

En adición a las estimaciones de caudal de los 10 modelos hidrológicos globales incluidos en el reanálisis, se han obtenido estimaciones de caudal a escala regional (0.1°), a través de la implementación, en todo el dominio de la McMC, de tres modelos hidrológicos incluyendo el modelo de macroescala Variable Infiltration Capacity (VIC), el modelo distribuido OpenStreams wflow-hbv y el modelo de balance hídrico a escala mensual Dynamic Water Balance (DWB).

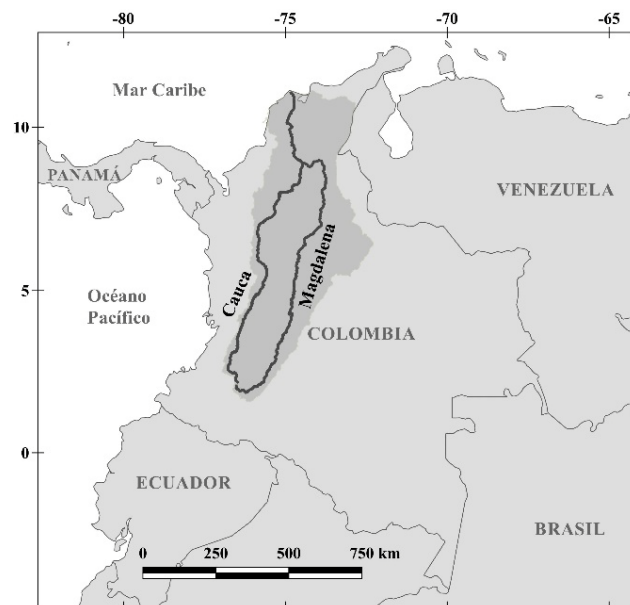


Figura 1.- Localización de la macrocuenca Magdalena-Cauca.

La evaluación de los resultados de los caudales diarios simulados por los modelos hidrológicos globales y regionales, agregados a escala mensual, se ha efectuado comparándolos con las observaciones en las 88 estaciones hidrométricas seleccionadas en la McMC, en los periodos 1980-2000 en fase de calibración y 2001-2011 en validación, a través del cálculo del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE). Los tres modelos regionales se han calibrado con la información de precipitación, temperatura y evapotranspiración proveniente de los datos puntuales, espacializados utilizando métodos geoestadísticos como kriging con deriva externa y cokriging. Asimismo, el desempeño de los modelos regionales ha sido también evaluado con los parámetros calibrados utilizando como forzamiento diario de precipitación los datos del reanálisis para los productos WFDEI (0.50°) y MSWEP (0.25°).

Haciendo uso de estos resultados regionales y en combinación con los resultados de los caudales de los modelos globales, se ha desarrollado un ensamble de modelos y forzamientos (in-situ, WFDEI y MSWEP), cuyos pesos ponderados mes a mes han sido determinados utilizando el método BMA (Bayesian Model Averaging). La evaluación de los resultados del ensamble y su comparación con las estimaciones de los modelos regionales individuales se ha efectuado a través del cálculo de la métrica Kling-Gupta Efficiency (KGE).

Resultados

La Figura 2 presenta un ejemplo de los resultados obtenidos en fases de calibración y validación para uno de los modelos hidrológicos regionales (modelo VIC). Idénticos análisis han sido efectuados para los otros dos modelos regionales implementados. En la Figura 2 la escala de colores grises indica los rangos del NSE, en donde los colores más oscuros representan los mejores resultados a escala mensual. Es evidente que para el modelo VIC, en general, se obtienen resultados satisfactorios para los caudales correspondientes a las cuencas alta y media de la McMC. Es claro que este modelo (también wflow-hbv y DWB) experimentan problemas en la parte alta de la cuenca del río Magdalena, asociados posiblemente con el limitado número de estaciones ubicadas en esta región. Para esta zona, los mismos problemas se han identificado al forzar los modelos con los datos de precipitación del reanálisis, indicando también que los reanálisis tienen problemas para estimar adecuadamente la precipitación en esta zona de relieve complejo ubicada en los Andes colombianos. Resultados poco satisfactorios también se han obtenido con todos los modelos para la cuenca baja del río Magdalena, sobre todo en la depresión Momposina (zona aguas abajo de la confluencia de los ríos Cauca y Magdalena), asociados con las importantes interacciones entre el cauce principal y el sistema cenagoso existente, no incluidas en ninguno de los modelos hidrológicos implementados, debido a la escala de análisis utilizada. Con relación a la validación se obtienen para el modelo VIC resultados mixtos, con algunas zonas, como por ejemplo la cuenca baja del río Cauca, en donde el modelo mejora sus desempeño con valores de NSE superiores a 0.50, mientras que para otras cuencas, como las del río Cesar al norte y el río Chicamocha al oriente, se observa un deterioro con relación a los resultados de la fase de calibración. Análisis similares se han efectuado para los otros dos modelos hidrológicos regionales, obteniendo que en general y debido a su diferente estructura, los modelos alcanzan variados desempeños para una misma zona hidrográfica de la McMC, ratificando la importancia de hacer una modelación hidrológica agrupada, tipo ensamble.

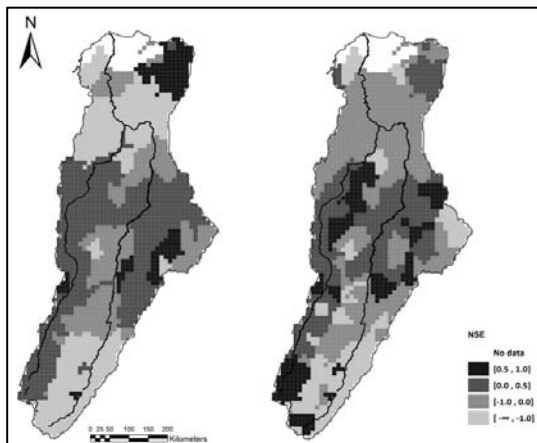


Figura 2.- Resultados del NSE para las fases de calibración (izquierda) y validación (derecha) para el modelo VIC a escala mensual.

A este respecto, la Figura 3 presenta la comparación, en fase de validación, entre los resultados del ensamble de modelos hidrológicos (globales y regionales) y forzamientos (in-situ, WFDEI y MSWEP) desarrollado, y los resultados para el mejor modelo individual regional. En la Figura 3 los tonos más oscuros indican los mayores valores del KGE (mejores desempeños).

Los resultados en la Figura 3 muestran las bondades de utilizar un ensamble para realizar la modelación hidrológica de la McMC, dado que para las diferentes zonas hidrográficas analizadas, los resultados del ensamble son en el 83 % de los

casos superiores a los de cualquiera de los modelos regionales individuales. Resulta también evidente que el ensamble tiene limitaciones, sobretodo en la parte baja de la cuenca, por las razones antes anotadas, y que la adición, como miembros del ensamble, de modelos hidrológicos implementados a escala local ($0.01^\circ \sim 1 \times 1 \text{ km}$) incorporando los intercambios laterales río-ciénaga, tal como ha sido reportado previamente por ejemplo por Camacho et al. (2008), mejorará los resultados hasta ahora obtenidos.

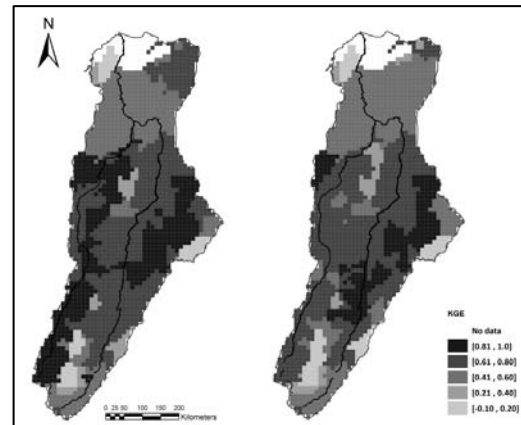


Figura 3.- Resultados en fase de validación para el ensamble (izquierda) y para el mejor modelo individual regional (derecha) a escala mensual.

Conclusiones

A través del caso de estudio en la McMC se han identificado las bondades y limitaciones del uso del reanálisis desarrollado por el proyecto de investigación internacional earth2Observe, para propósitos de modelación hidrológica a nivel de macroescala. Los resultados son satisfactorios e indican el importante aporte que este nuevo tipo de información brinda a los análisis realizados únicamente con información puntual.

Para complementar estos resultados se han implementado rigurosamente en la McMC y a escala regional, tres modelos hidrológicos con diferentes características y estructuras. Los resultados, en términos de caudales de estos modelos hidrológicos regionales y de los modelos globales han permitido desarrollar un ensamble, que si bien es cierto tiene aún limitaciones en algunas zonas de la McMC, perfectamente pudiera empezar a ser utilizado por las entidades encargadas de la planificación del recurso hídrico en la McMC, como herramienta para evaluar la disponibilidad hídrica.

Referencias

- Camacho, L.A., Rodríguez, E., Pinilla, G. (2008). "Modelación dinámica integrada de calidad y cantidad del agua del Canal del Dique y su sistema lagunar". *Memorias del XXIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, Cartagena, Colombia.
- López López, P., Immerzeel W.W., Rodríguez Sandoval E.A., Sterk G., and Schellekens J. (2018). "Impact of high spatial resolution precipitation on streamflow simulations". *Frontiers in Earth Science*, en revisión.
- Rodríguez E., Sánchez I., Duque N., López P., Kaune A., Werner Micha, Arboleda P. (2017). "Combined use of local and global hydrometeorological data with regional and global hydrological models in the Magdalena - Cauca river basin, Colombia". *Geophysical Research Abstracts Vol. 19, EGU2017-10477*, 201.
- Rodríguez, E., Werner, M., Sánchez, I., Ramírez, W., Zamora, D., Duque, N., Arboleda, P. (2016). "El proyecto earth2Observe y su caso de estudio en la macrocuenca Magdalena-Cauca, Colombia". *Memorias del XXVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Lima, Perú.
- UN-WWAP (2015). *The United Nations World Water Development Report 2015: Water for a Sustainable World*.