

Modelación hidrológica para la gestión del riesgo de inundaciones en subcuencas tributarias al río Uruguay

Hydrological modeling for the management of flood risk in tributary sub-basins of the Uruguay river

Vanessa Erasun^{1*}, Gonzalo Sapriza¹, Nicolás Failache¹, Pablo Gamazo¹
Alejandro Arcelus², Alejandro Nardin²

Recibido: 23/07/2018

Aceptado: 08/02/2019

*Autor de correspondencia

Resumen

Frecuentemente los habitantes de los centros poblados ubicados próximos a las márgenes del río Uruguay, se ven perjudicados por eventos de inundaciones; los que ocasionan innumerables daños económicos, sanitarios e inclusive riesgo de vida. Los Sistemas de Alerta Temprana de Inundaciones (SATI), son herramientas que contribuyen a la reducción de riesgos y permiten a las comunidades y servicios de emergencia coordinar con antelación los trabajos de mitigación, ante los efectos adversos de estos eventos. Los modelos hidrológicos utilizados en los SATI son una herramienta fundamental para realizar los pronósticos, dado que permiten simular la dinámica de las crecidas, obtener 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, semi-distribuido espacialmente, calibrado y validado para subcuencas tributarias al río Uruguay, aguas abajo de la represa Salto Grande. Dicho modelo, implementado en las subcuencas Yuquerí y Gualaguaychú en Argentina y Daymán y Queguay en Uruguay, contribuirá a un SATI que será administrado en conjunto por la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM-SG) y la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU). Mediante la aplicación de calibración multi-objetivo los resultados, tanto para el periodo de calibración y validación, de las cuencas Daymán y Queguay presentaron muy buenos ajustes, seguidas de Gualaguaychú, en la que se obtuvieron buenos resultados. En estas cuencas, el modelo hidrológico demostró buena capacidad predictiva con habilidad para reproducir las diferentes componentes del hidrograma (picos, recesiones, estiaje). La cuenca Yuquerí presentó un ajuste insuficiente, fuertemente condicionado a la calidad de los datos observados de caudal. Por último, se pudo identificar la influencia notoria del río Uruguay en varias de las estaciones de aforo, requiriendo, en algunos casos, descartar datos de caudal derivado de curvas de aforo cuando el río Uruguay superaba cierta cota.

Palabras clave: Río Uruguay, Modelación Hidrológica, Sistema Alerta Temprana.

Abstract

The inhabitants of population centers located next to the margins of the Uruguay River are frequently affected by flood events. These events cause significant economic damage, affect the health of the population and even put lives in danger. Flood Warning Systems (FWS) are tools that contribute to the reduction of risks and allow communities and emergency services to coordinate in advance the works of mitigation, before the adverse effects of these events. The hydrological models used in the FWS are a fundamental tool to carry out the forecasts, since they allow knowing the dynamics of the floods, the flooding level limits and their probabilities of occurrence. In this paper we present the results of the development of a continuous hydrological model for tributary sub-basins to the Uruguay River, downstream of the Salto Grande dam. The model has a daily time scale, is spatially semi-distributed and has been calibrated and validated for the Yuquerí and Gualaguaychú sub-basins in Argentina, and the Daymán and Queguay sub-basins in Uruguay. The model will contribute to a FWS that will be administered jointly by the technical international organisms Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM-SG) and Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU). Through the application of multi-objective calibration, the results for calibration and validation period at Daymán and Queguay basins presented very good adjustments, followed by the Gualaguaychú basin, in which good results were obtained. In these basins, the hydrological model demonstrated good predictive capacity with the ability to reproduce the different components of the hydrograph (peaks, recessions, low flows). The Yuquerí basin presented an insufficient adjustment, strongly conditioned by the quality of the observed flow data. Finally, it was possible to identify the notorious influence of the Uruguay River in several of the gauging stations, requiring, in some cases, discarding flow data derived from rating curves, when the Uruguay River exceeded a certain level.

Keywords: Uruguay River, Hydrological Modeling, Flood Warning Systems.

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

2 Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU), Paysandú, Uruguay. arcelus@caru.org.uy ; anardin@caru.org.uy

1. INTRODUCCIÓN

Se ha constatado a nivel internacional que las inundaciones son uno de los eventos que profundizan e incrementan los perjuicios socioeconómicos en las poblaciones y actividades agroindustriales que se ubican en zonas vulnerables. Sobre la población, trae aparejado agravantes tales como: desplazamientos, propagación de enfermedades y pérdidas materiales entre otros. Según la Organización Meteorológica Mundial (WMO, 2011), en la última década del siglo XX, alrededor de 1.500 millones de personas fueron afectadas por crecidas.

En particular, en el tramo del río Uruguay comprendido entre la represa de Salto Grande (SG) y su desembocadura en el Río de la Plata, se han registrado 7 eventos de inundación en los últimos 20 años (comunicación personal con el Centro Coordinador de Emergencias Departamentales (CECOED) en Salto, Uruguay). La concientización y la sensibilidad ante esta problemática, hacen necesaria la búsqueda e implementación de herramientas para una anticipada gestión de estos eventos, por ello, se han identificado dos tipos de soluciones: aquellas que implican la construcción de obras civiles de prevención, y aquellas que refieren a políticas de gestión, como son los Sistemas de Alerta Temprana de Inundaciones (SATI).

La solución ante estos eventos ha sido diferenciada a ambos márgenes. Por su lado, Argentina ha optado por soluciones estructurales, particularmente la construcción de defensas en las principales ciudades afectadas (Concordia y Concepción del Uruguay). En tanto en la margen uruguaya, la solución ha sido de tipo no estructural con la conformación del Sistema Nacional de Emergencia, que coordina múltiples organizaciones cuando se producen inundaciones.

Actualmente no existe un SATI para el río Uruguay, aguas abajo de la represa de SG. Si bien, la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM-SG), posee un sistema operativo para el pronóstico de aportes al embalse, implementado en el sistema Delft-FEWS (Werner *et al.*, 2013), el mismo realiza pronósticos para el río Uruguay aguas arriba de

SG. De forma de extenderlo hacia aguas abajo, la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU) en conjunto con la CTM-SG han firmado un acuerdo de colaboración para el desarrollo de un SATI.

Un componente fundamental de estos sistemas son los modelos hidrológicos e hidrodinámicos. Estos modelos, en base a una serie de datos de entrada (precipitaciones, aportes, condiciones de contorno, etc.) permiten calcular los niveles de crecida de un río. Pueden ser de tipo estocásticos (Georgakakos, 1986), basados en redes neuronales (Campolo *et al.*, 1999), y/o con base física (Moore *et al.*, 2007). Los estocásticos y los basados en redes neuronales, relacionan de forma estadística las precipitaciones y niveles en un río para determinar los pronósticos. Si bien estos modelos son muy eficientes en tiempo de cálculo, tienen poco poder predictivo bajo condiciones de no estacionariedad. En tanto los modelos con base física aplican los principios de conservación de masa y cantidad de movimiento para representar los procesos hidrológicos de transformación lluvia en escorrentía y tránsito que controlan la dinámica de las inundaciones. Existen varios ejemplos en la región de este tipo de sistemas con modelos de base física, en el río Yi (Silveira *et al.*, 2015) y en el río Gualaguay (Bianchi y Goniadzki, 2012) en Argentina.

En este sentido, para la predicción de niveles en el río Uruguay aguas abajo de SG, un modelo hidrológico e hidrodinámico, debería incluir: i) condiciones de contorno aguas arriba, definido por los aportes de la represa de SG, ii) aportes laterales de todas las cuencas tributarias, iii) tránsito hidrodinámico a través del cauce principal y planicie de inundación, y iv) condiciones de contorno aguas abajo definidas por el nivel del Río de la Plata.

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de la componente (ii) referida a la simulación hidrológica para la estimación de los aportes laterales de las cuencas tributarias al río Uruguay. Para ello se desarrolló un modelo hidrológico de tipo continuo, con una escala de tiempo diaria, semi-distribuido espacialmente, calibrado y validado para 4 cuencas piloto: Yuquerí y Gualaguaychú en Argentina, Daymán y Queguay en Uruguay.

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

Se consideró un total de 4 cuencas (figura 1-a). La delimitación espacial de las subcuencas (figura 1-b), se realizó identificando estaciones de aforo provenientes de la Dirección Nacional

de Aguas (DINAGUA) en Uruguay, y de la Base de Datos Hidrológica Integrada (BDHI) en Argentina. Esta delimitación, juntamente con la definición de las redes de drenaje y direcciones de flujo, se hizo utilizando los datos disponibles de Modelos Digitales de Terreno (MDT) de HydroSHEDS (Lehner y Grill, 2013).

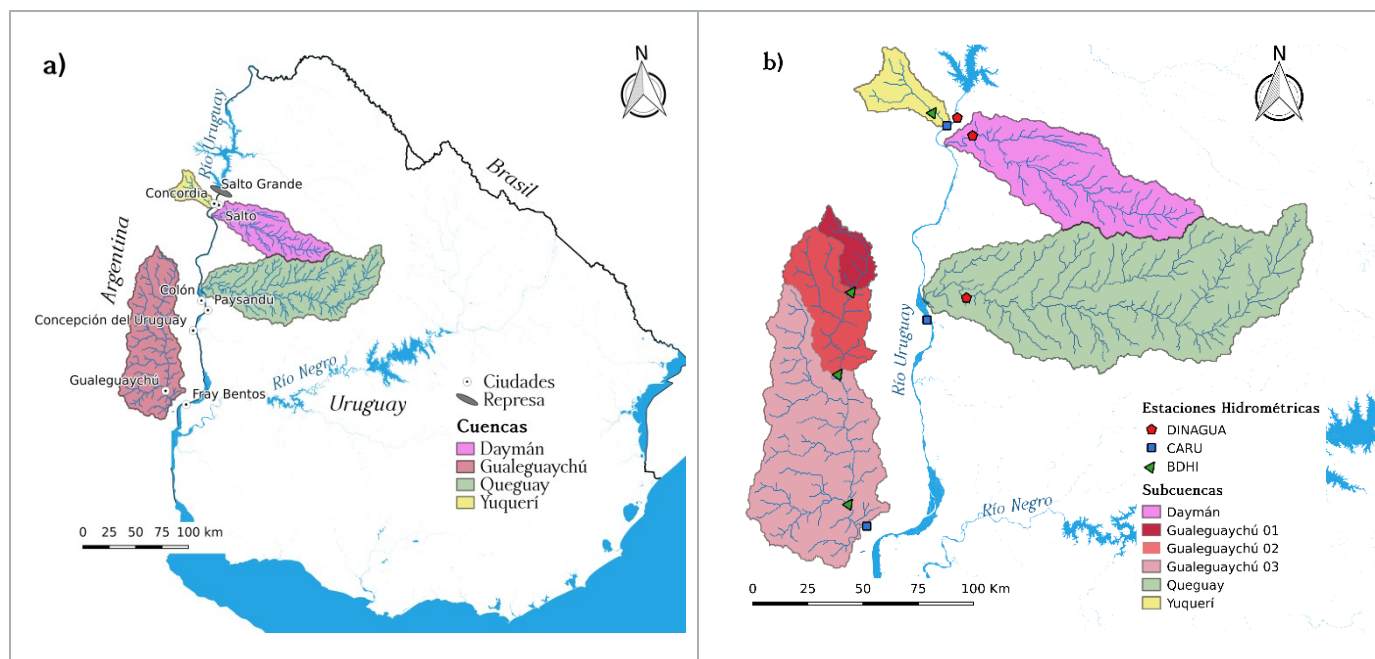


Figura 1. En el gráfico de la izquierda (a) se presentan las cuencas de estudio. En el gráfico de la derecha (b) se presentan las estaciones limnigráficas de medición de niveles del río Uruguay, y las subcuencas delimitadas en función de las estaciones de aforo

Utilizando el MDT, se determinaron para las subcuencas características morfológicas (ver tabla 1) como longitud del cauce principal (LCP), pendiente media de la cuenca (PMC), pendiente media del cauce principal (PMCP) y se estimó el tiempo de concentración (TC) mediante Kirpich (1940). 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 las cuencas. Se observó que eran en su mayoría suelos superficiales, con baja capacidad de almacenamiento. En el territorio argentino, a partir del Atlas de Suelos de la República Argentina (INTA, 1990), se observó que los suelos eran en general profundos y bien drenados.

Según el Mapa de Cobertura del Suelo de Uruguay (SIT – MVOTMA, 2011) en las cuencas Daymán y Queguay, el campo natural (uso pastoril) ocupa la mayor parte de la superficie. Al suroeste de la cuenca Queguay se observa que predomina la plantación forestal. Las áreas cultivadas también se hacen presentes en ambas cuencas, pero en menor proporción. A partir del Mapa de Cobertura del Suelo de la República Argentina escala 1:500.000 (INTA - <https://inta.gov.ar/>) se observa, que en las cuencas Gualaguaychú y Yuquerí predominan los cultivos agrícolas en secano; y en menor medida, las áreas destinadas a la forestación de bosques.

En función de los distintos grupos de suelo CONEAT (Molfino y Califra, 2001), se determinó el agua disponible (AD) promedio en las cuencas del margen izquierdo del río

Uruguay, en Daymán fue de 77 mm, y en Queguay de 70 mm. El AD está definido como la diferencia entre la capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP). Para

las cuencas argentinas no fue posible la estimación del AD, ya que no existía información disponible.

Tabla 1. Características morfológicas de las subcuencas

Subcuenca	Área (km ²)	LCP (km)	PMC (%)	PMCP (%)	TC (horas)
Daymán	3.194	134,0	1,10	0,11	16,4
Queguay	7.882	238,0	1,43	0,12	23,0
Yuquerí	634	41,8	0,80	0,09	7,6
Gualeguaychú -01	470	48,4	0,48	0,05	10,0
Gualeguaychú-02	1.558	63,7	0,53	0,03	12,2
Gualeguaychú-03	4.305	100,6	0,63	0,02	16,3

2.2 Datos hidrometeorológicos

Se recopiló información hidrometeorológica de base para determinar las precipitaciones por cuenca, las evapotranspiraciones potenciales, y niveles y caudales de los cursos de agua estudiados y del río Uruguay.

2.2.1 Precipitación

Para generar las precipitaciones promedio por cuenca 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 (periodos secos y húmedos).

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 las subcuencas, generadas a partir de una ponderación por área, utilizando los polígonos de Thiessen (figura 2).

2.2.2 Evapotranspiración potencial

La serie de evapotranspiración potencial utilizada para las cuencas Daymán y Queguay, fue la estimada mediante el método de Penman-Monteith (Allen *et al.*, 1998), brindada por las estaciones meteorológicas del Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA)-Salto Grande e INIA-Tacuarembó respectivamente. En las cuencas argentinas, se pretendió utilizar las series perteneciente al Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), pero las mismas cuentan con registros de datos a partir del año 2012, y poseen períodos con datos faltantes. Frente a esta situación, se utilizó la estación INIA-Salto Grande para ambas cuencas.

2.2.3 Niveles y caudales

Se utilizaron 3 estaciones limnigráficas provenientes de DINAGUA y CARU para el río Uruguay (ver figura 1-b), para identificar la afectación de éste en los niveles de los ríos tributarios estudiados. En Daymán, se observó que los niveles en la estación de aforo N° 140, estaban afectados por el río Uruguay (figura 3) cuando éste se encontraba a una cota de 10,7 m (cero Wharton) en el puerto de Concordia. Por tanto, los caudales que fueron obtenidos de las curvas de aforo no eran válidos para esos períodos, los cuales finalmente no fueron considerados.

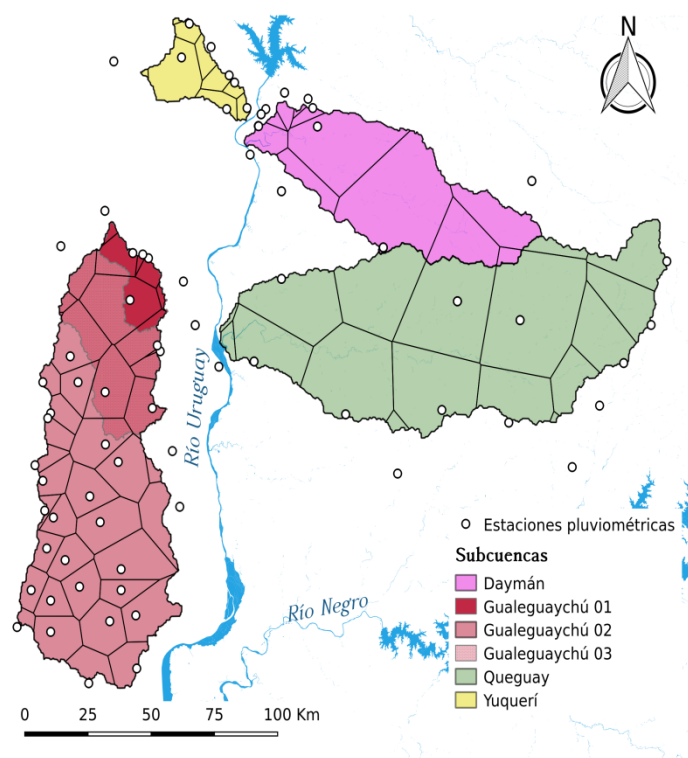


Figura 2. Estaciones hidrometeorológicas recopiladas para las cuencas de estudio, junto con los polígonos de Thiessen generados

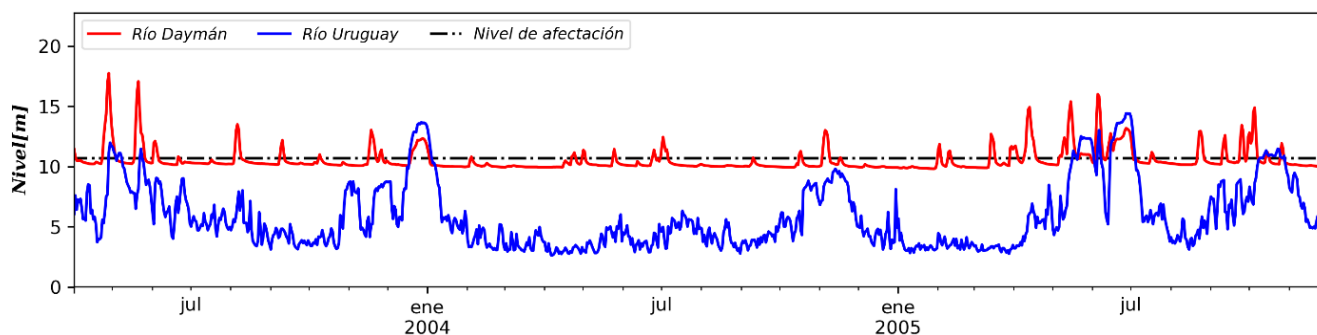


Figura 3. Niveles en el río Uruguay (en azul) en el puerto de Concordia, en el río Daymán (en rojo) en la estación de aforo y nivel del río Uruguay a partir del cual se considera afectación de niveles en el río Daymán (en negro)

En Queguay, no se identificó que los niveles en la estación de aforo N° 141 estuvieran afectados por el remanso del río Uruguay. Cabe destacar que los valores más cercanos de niveles observados en el río Uruguay, procedentes de la CARU (Colón, Entre Ríos), se encontraban aguas abajo de dicha estación de aforo.

En Yuquerí, también se observó la gran afectación del río Uruguay sobre los niveles en

la estación de aforo y por tanto, en los valores finales de caudales. Se identificó en 12,9 m (cero Wharton) la cota en el puerto de Concordia sobre la cual los niveles en la estación de aforo eran afectados por el remanso del río Uruguay (ver figura 4). No se consideraron para este estudio los niveles en el río Yuquerí superiores a la mencionada cota. A su vez, en el lugar en donde se registran los niveles del río Yuquerí, no sólo existe una importante afectación por los eventos

de crecida del río Uruguay, sino que también se constataron variaciones temporales en el tamaño y ubicación de islotes o dunas. Por tanto, es de esperar que la sección donde se realizan las mediciones de nivel sufra continuos cambios. Estos factores contribuyen a que se genere una gran incertidumbre en la relación caudal-tirante para el período observado.

Para las subcuencas Gualeguaychú-01 y Gualeguaychú-02, se determinó la relación anual entre el caudal (Q) y la precipitación (P). Como se observa en la figura 5, la subcuenca Gualeguaychú-01, cuya estación de aforo es la N°3031, presentó valores Q/P mayores a 0,6 e incluso a 1 (para el período 1998-2003). Esto implicaría que más del 60% de la precipitación se transformaría en escorrentía y/o que exista un aporte significativo de agua subterránea o un

trasvase de otras cuencas. Esto no es razonable considerando la relación Q/P de la subcuenca Gualeguaychú-02, cuya estación de aforo es la N°3030. Por tanto, estos períodos no fueron considerados para la calibración y validación de las subcuencas.

En la cuenca Gualeguaychú-03 se determinó el coeficiente de correlación entre los niveles del río Gualeguaychú en la estación de aforo N°3062, y los niveles del río Uruguay en la boca de Gualeguaychú (sin compatibilizar los cerros de referencia). Se obtuvo un coeficiente $R^2=0,86$; esto implica que las variaciones de niveles en la estación de aforo de Gualeguaychú son explicadas en su mayoría por las variaciones de niveles del río Uruguay. Por tanto, no se realizó la calibración de esta subcuenca.

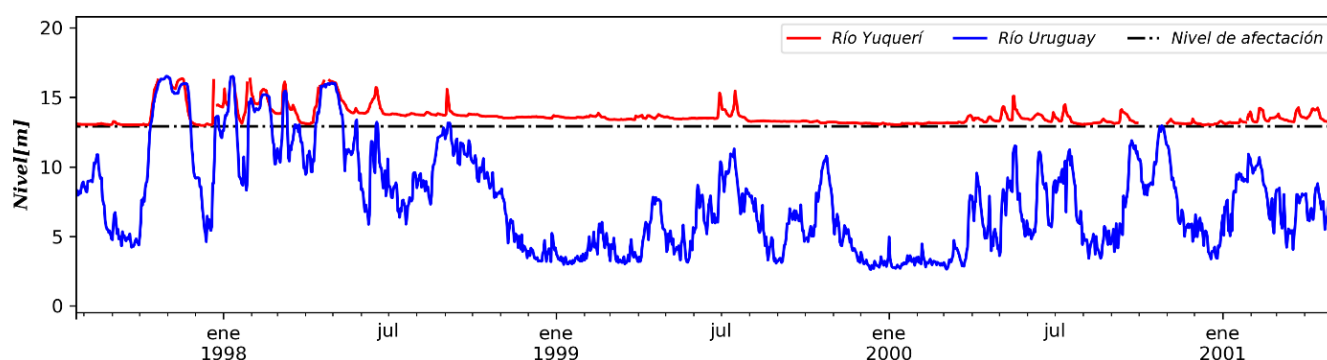


Figura 4. Niveles en el río Uruguay (en azul) en el puerto de Concordia, en el río Yuquerí (en rojo) en la estación de aforo y nivel del río Uruguay a partir del cual se considera afectación de niveles en el río Yuquerí (en negro)



Figura 5. Relación anual Q/P para las subcuencas Gualeguaychú-01 y 02

2.3 Modelo Hidrológico

Para llevar a cabo un modelo de simulación continua, con un paso de tiempo diario, se utilizó 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*), desarrollado por Bennett (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. El primer nivel de almacenamiento representa la parte de precipitación que no alcanza la superficie del terreno porque es interceptada por la vegetación. El siguiente depósito representa el volumen de agua retenido en las irregularidades del terreno. El siguiente nivel, constituye el almacenamiento en el suelo, para el cual se distinguen dos zonas: *Upper zone*, donde el suelo es capaz de perder agua por evapotranspiración o percolación y *Tensión zone*, la parte del suelo que pierde agua exclusivamente por evapotranspiración. Esta subdivisión del suelo representa la distribución de la humedad, en donde se trata de diferenciar la existencia de agua libre y de agua capilar en el interior del mismo. HMS distingue dos depósitos subterráneos para reproducir el almacenamiento en acuíferos: el primero de ellos más superficial, para representar el flujo hipodérmico; y el segundo más profundo, para representar el flujo base.

Se utilizó el método del hidrograma unitario de Clark, para representar de forma agregada el tránsito en la cuenca, que incluye los procesos de traslación y la atenuación. La traslación a través de la cuenca se realiza mediante una función lineal aplicando el método de las isócronas área-tiempo. Mientras que la atenuación se realiza mediante un reservorio lineal, que se supone se ubica a la salida de la cuenca. Para esto es necesario dos parámetros: el tiempo de concentración y el coeficiente de almacenamiento del reservorio lineal (Feldman, 2000).

Para determinar el hidrograma de flujo subterráneo, se utilizó el método de reservorios lineales que se usa en conjunto con el modelo SMA. Este modelo de flujo base, simula el almacenamiento y movimiento del flujo subsuperficial como reservorios lineales. Finalmente, el hidrograma de caudales resultante de la cuenca es la suma de los hidrogramas superficial y de flujo subterráneo. En la cuenca Gualaguaychú, se implementó un modelo semi-distribuido. El tránsito de dicho modelo se realizó con Muskingum-Cunge (Cunge, 1969), método que contempla la difusión de la onda a medida que viaja a través del canal, y es utilizado para tener la capacidad de predecir la atenuación de la onda del hidrograma. Los parámetros de este modelo son determinados a partir de las características morfológicas e hidráulicas del curso; entre ellas, la rugosidad de Manning en el lecho del canal (NL) y en la planicie de inundación (NP), así como también por la pendiente y longitud del cauce.

2.3.1 Parámetros del modelo

Para representar todo el modelo se necesitaron 5 condiciones iniciales y 17 parámetros, que se detallan en la tabla 2. Los primeros 13 parámetros corresponden al SMA; los 2 siguientes, al modelo de Clark; los penúltimos 2, al modelo del reservorio lineal; y los últimos 2, al tránsito de Muskingum-Cunge.

De los 13 parámetros del SMA, 11 fueron calibrados. El porcentaje de zona impermeable de la cuenca *Impervious* se tomó como 0 por ser cuencas naturales. La capacidad de almacenamiento en la zona de tensión del suelo (CAZTS) tampoco fue calibrada, se ajustó su valor en la etapa de calibración manual en base a las cartas de agua disponible (Uruguay) y tipo de suelo (Argentina). Las condiciones iniciales representan las variables de estado de cada uno de los reservorios considerados en el modelo SMA y son expresadas como porcentajes respecto a las capacidades máximas de cada reservorio. Ninguna condición inicial fue calibrada. Se tomaron los datos de lluvia y caudal en un período de aproximadamente 4 meses antes de la calibración, dando así al

programa un período de calentamiento para que se ajusten las condiciones iniciales y no influyan en los resultados al inicio de la calibración. Análogamente, se realizó el mismo procedimiento en la validación.

En la tabla 3 se presenta el rango de variación de los parámetros que fueron adaptados a la región de estudio, en base a las características morfológicas (pendiente, densidad de drenaje) y fisiográficas de las cuencas (suelos, geología).

Tabla 2. Parámetros calibrables de los modelos

Nombre HMS	Descripción y Unidad	Nombre
<i>Canopy Storage</i>	Cap. de almacenamiento por intercepción de vegetación (mm)	INTVEG
<i>Surface Storage</i>	Cap. de almacenamiento por retención en depresiones (mm)	CADSUP
<i>Max. Infiltration</i>	Máxima cap. de infiltración en el suelo (mm/h)	MCIS
<i>Impervious</i>	Impermeabilidad (%)	
<i>Soil Storage</i>	Cap. de almacenamiento del suelo (mm)	CAS
<i>Tension Storage</i>	Cap. de almacenamiento en zona de tensión del suelo (mm)	CAZTS
<i>Soil Percolation</i>	Máxima cap. de percolación del suelo (mm/h)	MCPS
<i>GW1 Storage</i>	Cap. de almacenamiento depósito subterráneo 1 (mm)	CADS1
<i>GW1 Percolation</i>	Máxima cap. de percolación depósito subterráneo 1 (mm)	MCPDS1
<i>GW1 Coefficient</i>	Coef. de almacenamiento depósito subterráneo 1 (h)	TADS1
<i>GW2 Storage</i>	Cap. de almacenamiento depósito subterráneo 2 (mm)	CADS2
<i>GW2 Percolation</i>	Máxima cap. de percolación depósito subterráneo 2 (mm/h)	MCPDS2
<i>GW2 Coefficient</i>	Coef. de almacenamiento del depósito subterráneo 2 (h)	TADS2
<i>Time of concentration</i>	Tiempo de concentración (h)	TC
<i>Storage Coefficient</i>	Coeficiente de almacenamiento (h)	SC
<i>GW 1 Coefficient</i>	Tiempo de respuesta del depósito subterráneo 1 (h)	GW1C
<i>GW 2 Coefficient</i>	Tiempo de respuesta del depósito subterráneo 2 (h)	GW2C
<i>Manning's n</i>	Rugosidad de Manning en el lecho del canal	NL
<i>Left-Right Manning's n</i>	Rugosidad de Manning en la planicie de inundación	NP

2.4 Calibración y validación

La calibración del modelo tuvo como objetivo estimar aquellos parámetros efectivos del modelo que no pueden ser medidos de forma directa en la escala de cuenca en la que se encuentran definidos. Se realizó comparando los hidrogramas de caudales simulados con los observados en todas las cuencas aforadas.

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.

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 objetivos utilizados. 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 y Reed, 2013), para su calibración automática. Al aplicar algoritmos multi-objetivos, se generan dos grupos de soluciones: (i) soluciones no dominadas, serán mejores en una o más funciones objetivos, pero peores en otras funciones comparadas a todas las restantes; y (ii) soluciones dominadas, que considerando todos las funciones objetivos definidas, son peores que las otras. El conjunto de las soluciones no dominadas son el resultado

final del problema multi-objetivo. Dicho conjunto forma una región de Pareto (Gupta *et al.*, 1998) con las soluciones (parámetros calibrados). Los algoritmos genéticos se encargan de buscar los parámetros – soluciones- para definir la región de Pareto.

Para definir la bondad del ajuste, se utilizaron tres funciones objetivos: el coeficiente de eficiencia de Nash - Sutcliffe (NS) (Nash y Sutcliffe, 1970), el logaritmo de NS (LogNS) estimada a partir de transformar los caudales simulados y observados a logarítmico, y el porcentaje de error absoluto en el volumen (PEAV), tabla 4.

Tabla 3. Rango de los parámetros

Nombre	Daymán	Queguay	Gualeguaychú-01	Gualeguaychú-02	Yuquerí
INTVEG	0,0 – 3,0	-	0,0 – 3,5	0,0 – 3,5	3,0 – 8,0
CADSUP	0,0 – 5,0	-	0,05 – 3,5	2,0 – 5,0	4,0 – 20,0
MCIS	0,005 – 4,0	0,5 – 4,5	0,5 – 2,5	1,0 – 5,0	1,0 – 8,0
CAS	85,0 – 150,0	100,0 – 160,0	80,0 – 150,0	80,0 – 190,0	100,0 – 250,0
MCPS	0,005 – 3,5	0,05 – 2,5	0,05 – 1,5	0,1 – 1,5	0,05 – 2,0
CADS1	10,0 – 700,0	50,0 – 200,0	50,0 – 250	50,0 – 250,0	20,0 – 150,0
MCPDS1	0,001 – 2,0	0,05 – 1,5	0,05 – 1,5	0,05 – 1,5	0,05 – 1,5
TADS1	2,0 – 300,0	20,0 – 100,0	20,0 – 150,0	20,0 – 150,0	20,0 – 140,0
CADS2	10,0 – 500,0	10,0 – 150,0	10,0 – 250,0	10,0 – 250,0	25,0 – 200,0
MCPDS2	0,0001 - 1,0	0,001 – 1,0	0,00009 – 0,8	0,0001 – 0,8	0,001 – 0,8
TADS2	400,0 – 1200,0	50,0 – 500,0	50,0 - 1500	50,0 – 1500,0	500,0 – 1650,0
TC	18,0 – 35,0	15,0 – 60,0	5,0 – 20,0	10,0 – 30,0	5,0 – 15,0
SC	25,0 – 38,0	30,0 – 90,0	10,0 – 30,0	15,0 – 35,0	10,0 – 24,0
GW1C	10,0 – 50,0	30,0 – 80,0	10,0 – 300,0	20,0 – 200,0	10,0 – 200,0
GW2C	350,0 – 800,0	50,0 – 700,0	50,0 – 1700,0	50,0 – 1700,0	200,0 – 1800,0
NL	-	-	-	0,02 – 0,08	-
NP	-	-	-	0,03 – 0,1	-

Tabla 4. Funciones objetivo utilizadas

NS	LogNS	PEAV
$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$	$LogNS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log(Q_{sim,i}) - \log(Q_i))^2}{\sum_{i=1}^n (\log(Q_i) - \log(\bar{Q}_i))^2}$	$PEAV = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{sim,i} - Q_i }{\sum_{i=1}^n Q_i} * 100$

El uso de calibración multi-objetivo permite ajustar las diferentes partes de hidrograma (fase creciente, caudal máximo, recesión y flujo base) a través de las funciones objetivos utilizadas.

Esto está atribuido a que los parámetros que controlan los diferentes procesos (partes del hidrograma), tienen una influencia mayor/menor según qué función objetivo sea utilizada. Por ejemplo, los parámetros que controlan la respuesta rápida y caudales máximos, tendrán una sensibilidad mayor respecto al NS pero no así al LogNS. Y por el contrario, los parámetros que controlan las recesiones y el flujo base serán insensibles respecto al NS, pero muy sensibles al LogNS.

En el caso del PEAV, permite evaluar el sesgo absoluto del volumen. Según Finger (2011), el

efecto que tiene el criterio de Nash (escalar o logarítmico) sobre la simulación es de “desplazar verticalmente” hacia arriba o hacia abajo toda la serie, mientras que el error en el volumen permite “desplazar horizontalmente” la serie.

Según la clasificación de Molnar (2011), valores de NS y LogNS menores a 0,2 implica que el ajuste es insuficiente, entre 0,2 y 0,4 es satisfactorio, entre 0,4 y 0,6 es bueno, entre 0,6 y 0,8 es muy bueno, si es mayor a 0,8 es excelente, y un valor cercano a uno representa el ajuste perfecto.

El periodo seleccionado para la calibración y validación de cada una de las subcuencas se presenta en la tabla 5. En la etapa de calibración se realizaron 30.000 iteraciones para cada una de las subcuencas.

Tabla 5. Períodos de calibración y validación de las subcuencas

Subcuenca	Calibración	Validación
Daymán	15 Abr 2000 – 09 Jul 2009	01 Ene 2010 – 23 Set 2015
Queguay	01 Ene 2000 – 09 Jul 2009	01 Ene 2010 – 10 Jul 2015
Gualeduaychú-01	15 Abr 2010 – 07 Ene 2015	01 Ene 2006 – 31 Dic 2007
Gualeduaychú-02	01 Ene 2010 – 07 Ene 2015	01 Ene 2006 – 31 Dic 2007
Yuquerí	15 Abr 2000 – 09 Jul 2009	01 Ene 2010 – 09 Jul 2014

3. RESULTADOS

En las figuras 6, 7, 8, 9 y 10 se muestran un sub-período de los caudales observados y simulados para el periodo de calibración y validación en las cuencas estudiadas.

En la figura 11 se presentan los frentes de Pareto para las 3 funciones objetivos definidas tanto para la calibración como para la validación para las cuencas de Daymán, Gualeduaychú y Queguay.

En esta figura se comparan el NS vs. LogNS, LogNS vs. PEAV y PEAV vs. NS respectivamente.

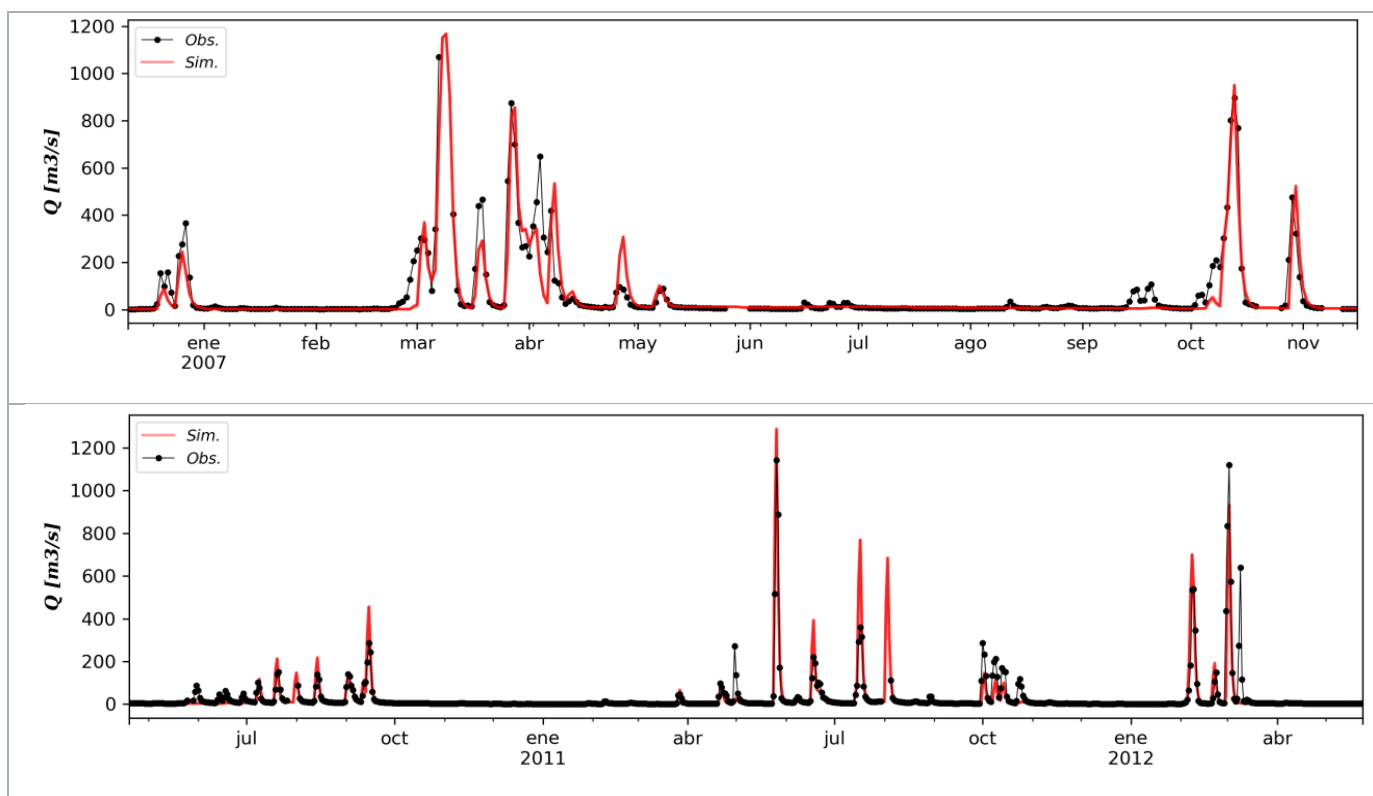


Figura 6. Caudales observados y simulados en Daymán para un subperíodo de calibración (arriba) y validación (abajo)

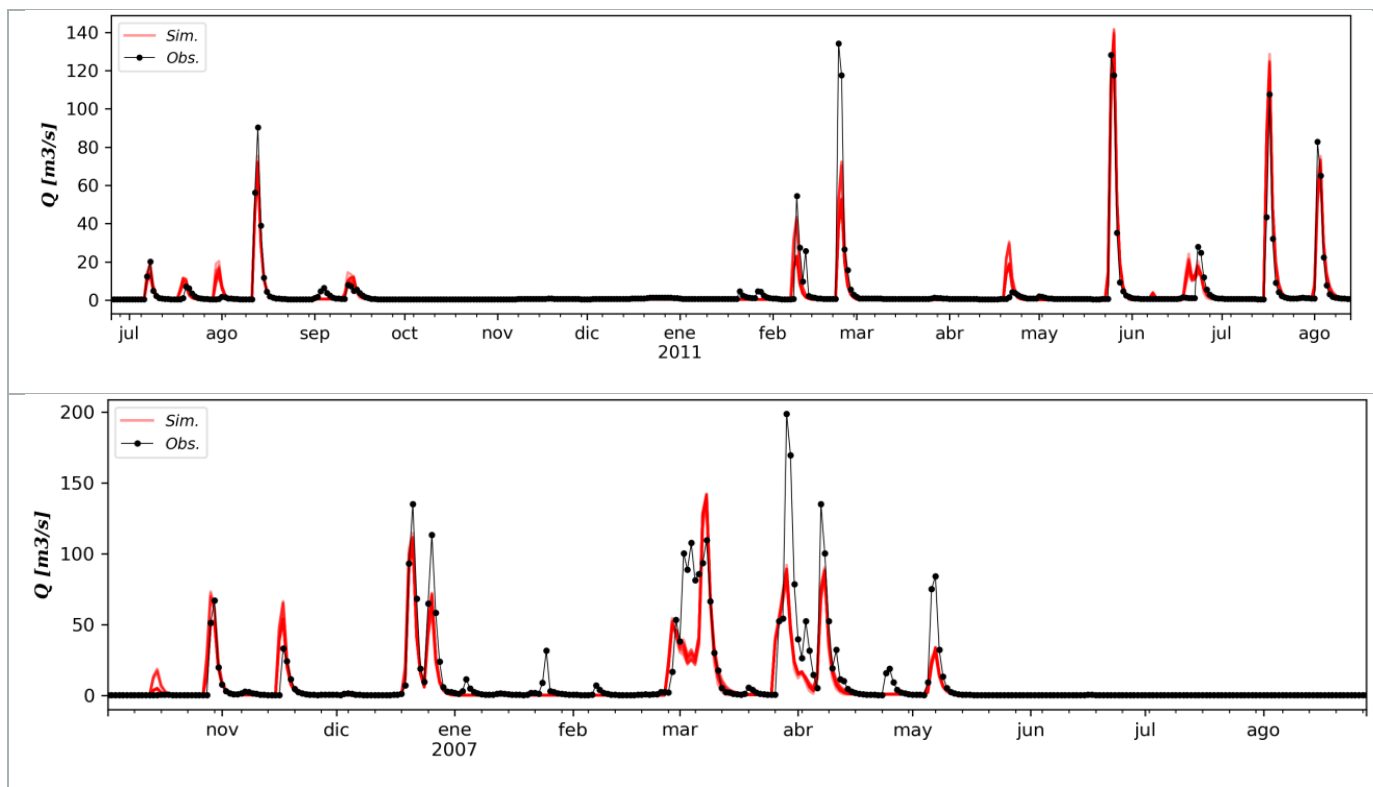


Figura 7. Caudales observados y simulados en Gualeguaychú-01 para un subperíodo de calibración (arriba) y validación (abajo)

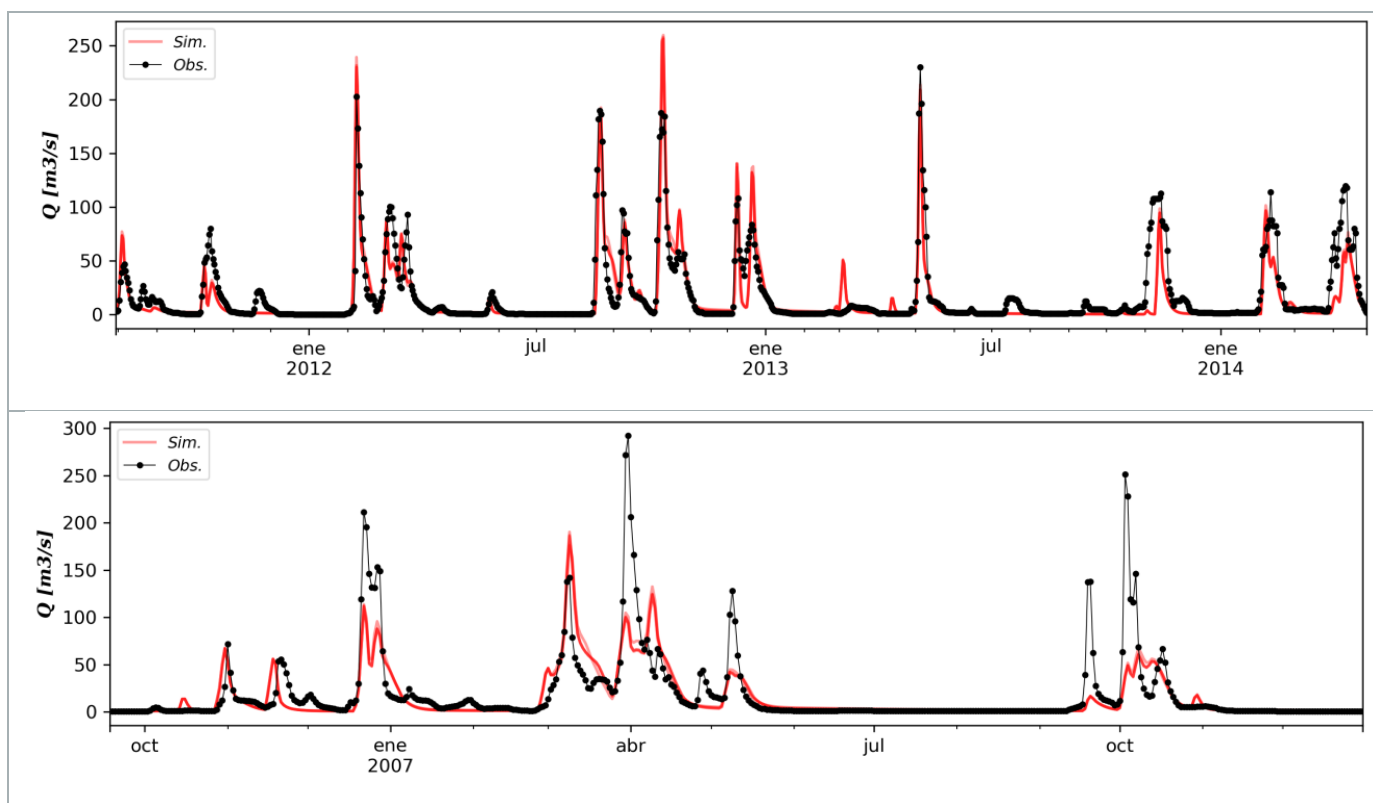


Figura 8. Caudales observados y simulados en Gualeguaychú-02 para un subperíodo de calibración (arriba) y validación (abajo)

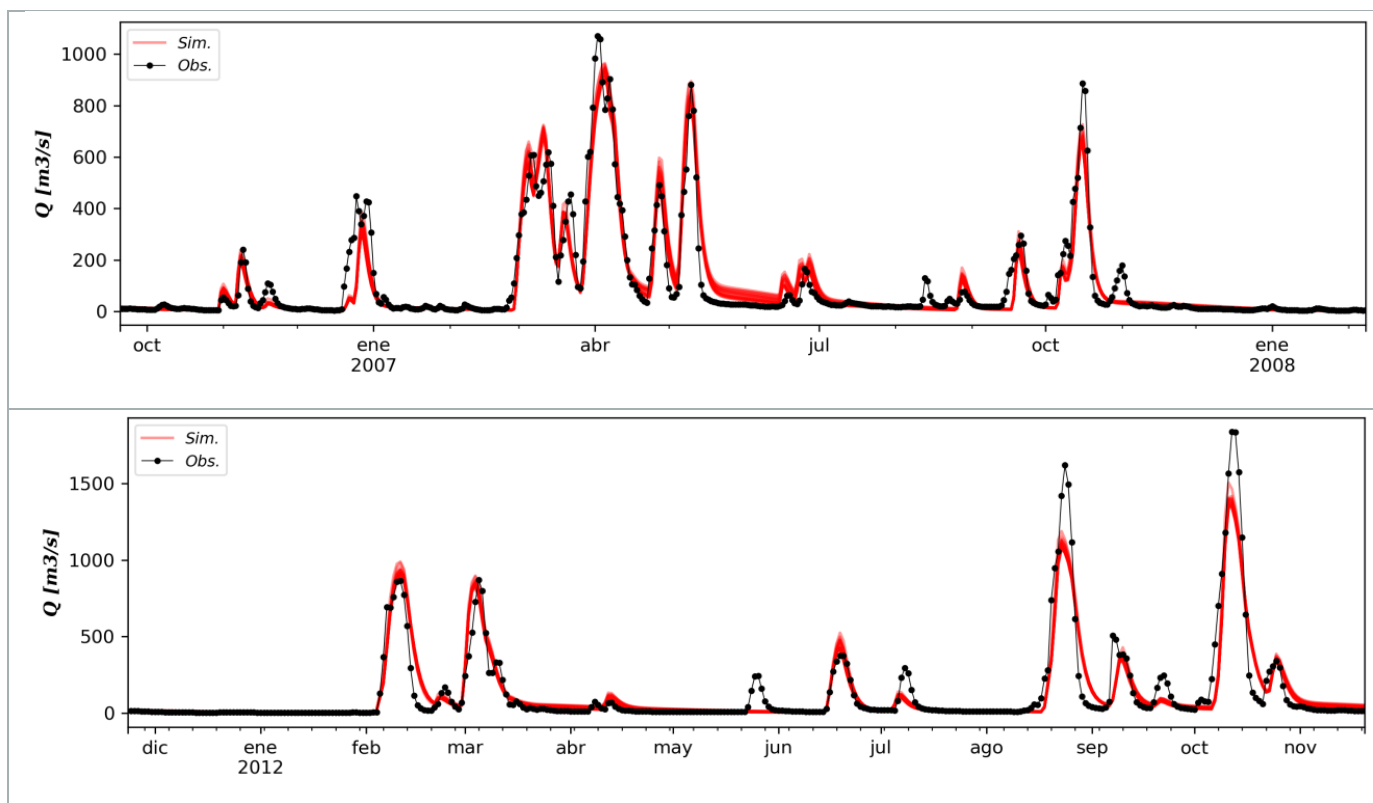


Figura 9. Caudales observados y simulados en Queguay para un subperíodo de calibración (arriba) y validación (abajo)

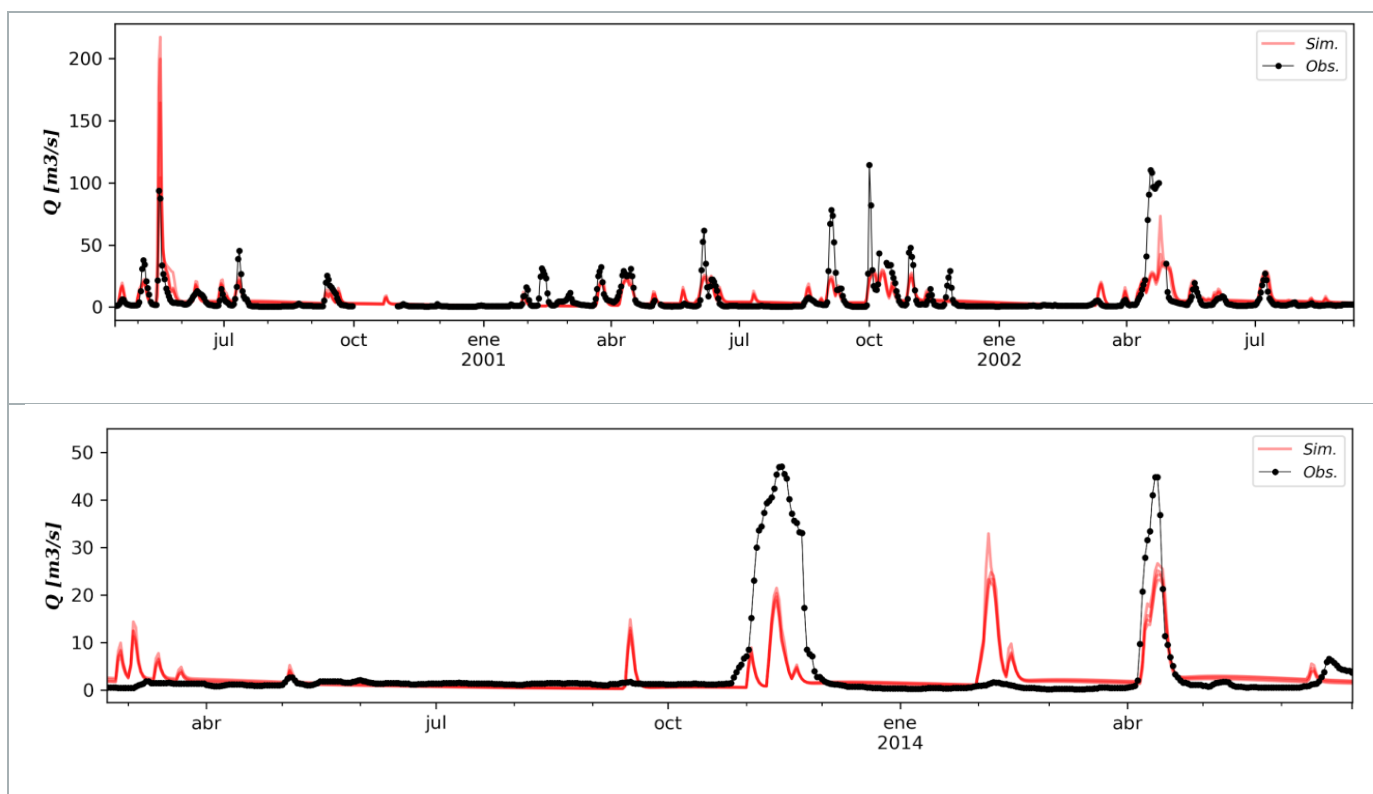


Figura 10. Caudales observados y simulados en Yuquerí para un subperíodo de calibración (arriba) y validación (abajo)

4. DISCUSIÓN

En Daymán se observa que 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 (figura 13), descrito anteriormente.

En Gualeguaychú-01 se observa que la variación en el NS, en general, produce efectos contrapuestos con LogNS; pero no se observan tendencias de efectos contrapuestos entre el

PEAV vs. NS; mejoras en el PEAV implican mejoras en el NS. En LogNS vs PEAV, sí se aprecia un leve efecto contrapuesto. Una mejora en el ajuste de LogNS (mejor aproximación del flujo base), implica un peor ajuste en el PEAV, y viceversa. Para el período de validación se observa una desmejora (en general) en los ajustes de las funciones objetivos.

En Gualeguaychú-02 se refleja en la etapa de calibración, que las funciones objetivos presentan el mismo comportamiento de Daymán; producto del comportamiento monótono de los parámetros en las diferentes evaluaciones (figura 13). Para el período de validación, en general, se observa una desmejora en los ajustes de las funciones objetivos respecto a la calibración.

En Queguay se observa que 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 en

los eventos de crecida; y a un flujo base reducido, con una respuesta más moderada temporalmente. En la comparación del LogNS vs. PEAV, sí se aprecia un leve efecto contrapuesto. Para el período de validación se mantienen las mismas tendencias. En general, se observa una mejora en los ajustes de las funciones objetivos respecto a la calibración. En la figura 12 se presentan los frentes de Pareto para las tres funciones objetivos utilizadas en la calibración y validación respectivamente de la cuenca del Yuquerí. Tanto en la calibración como en la validación, no se aprecian tendencias claras. En ambas instancias no se obtuvieron buenos resultados. Esto puede deberse a la mala calidad de los datos observados, atribuidos a la sección variable que presenta la estación de

aforo mencionado anteriormente. Se observa una desmejora en los ajustes de las funciones objetivos respecto a la calibración.

En la figura 13 se muestra la combinación de los parámetros (normalizados entre 0 y 1, correspondiente al rango establecido en la tabla 3) obtenidos para cada solución de la región de Pareto para las cuatro cuencas (Daymán, Gualaguaychú-01, Gualaguaychú-02 y Queguay). Se puede observar que para las cuencas que presentan un mayor efecto contrapuesto en los frentes Pareto (ej. Queguay y Gualaguaychú-01) existe una menor claridad en identificar de los parámetros calibrados, dentro del rango definido de variación (CADS2 en la cuenca Queguay).

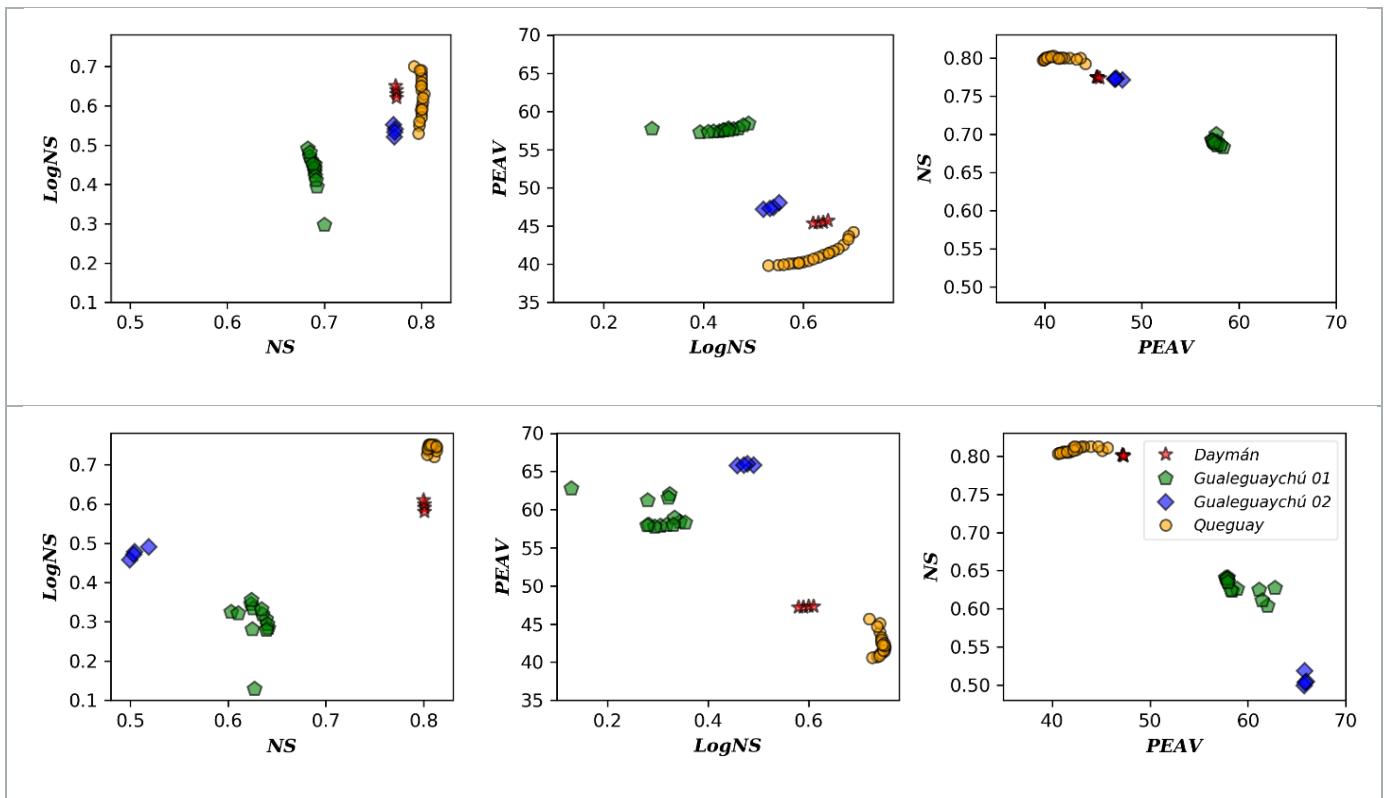


Figura 11. Frentes de Pareto para las cuencas Daymán, Queguay, Gualaguaychú 01 y 02 para los periodos de calibración (arriba) y validación (abajo)

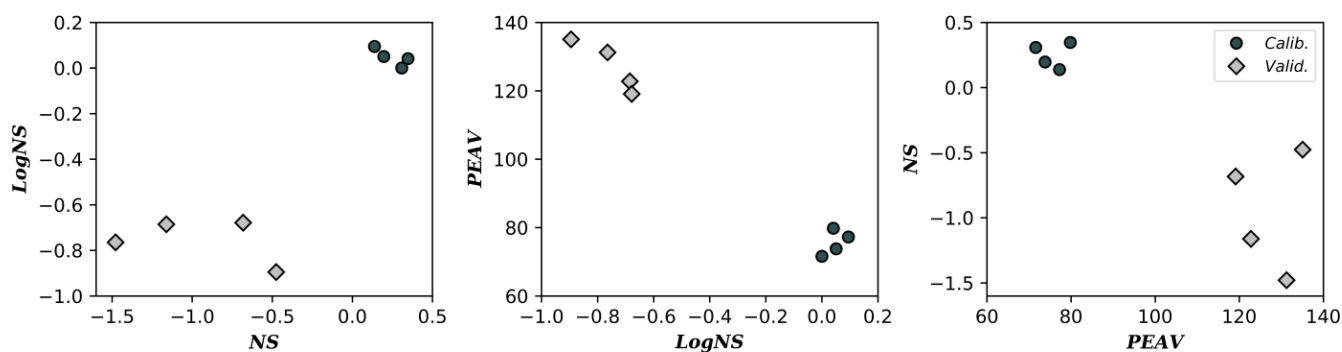


Figura 12. Frentes de Pareto para la cuenca Yuquerí para el periodo de calibración y validación

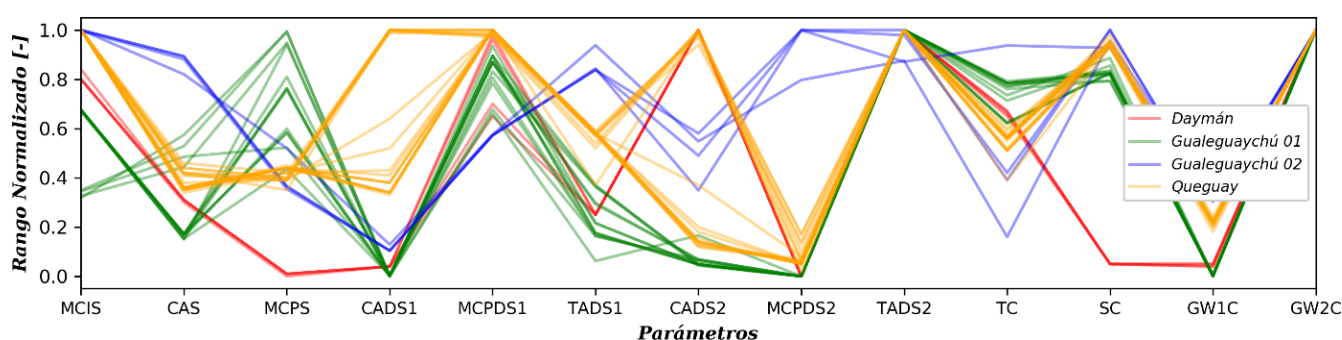


Figura 13. Variación de los parámetros normalizados entre [0,1] para las cuencas calibradas

5. CONCLUSIONES

En general los resultados obtenidos para las cuencas simuladas fueron muy buenos incluso excelentes, tanto para el periodo de calibración, como de validación, según el criterio de Molnar (2011), a excepción de la cuenca Yuquerí, donde la calidad de los datos utilizados era deficiente.

Los resultados obtenidos en Daymán, fueron “muy buenos” en la etapa de calibración, y “excelente” en la validación. Se observó en la calibración, que para algunos períodos se obtuvieron subestimaciones de los caudales máximos.

En las subcuencas Gualeguaychú-01 y Gualeguaychú-02 fue necesario considerar un modelo semi-distribuido espacialmente, modelando el tránsito con el modelo Muskingum-Cunge, y de esta manera poder

contemplar los efectos del almacenamiento (identificados en el cauce principal del río Gualeguaychú), que produce efectos de laminación en los hidrogramas. El ajuste, según el criterio mencionado anteriormente, en la calibración fue “muy bueno”, pero se observó una desmejora en la etapa de validación (calificación “bueno”).

En la estación de aforo N° 141 del río Queguay no se observó la influencia del río Uruguay. El ajuste en las etapas de calibración y validación, fue “excelente” (NS en el rango de 0,8 y LogNS en el rango de 0,7).

El modelo desarrollado permitió simular apropiadamente las diferentes componentes de flujo (flujo superficial, hipodérmico y flujo base) para un paso de tiempo diario.

Reconociendo la incertidumbre existente en los datos disponibles de precipitaciones e hidrogramas de caudales, fue posible calibrar y validar (para su aplicación en tiempo real) cuencas afluentes al río Uruguay, con un paso de tiempo diario.

Sin embargo, para las estaciones de aforo afectadas por remansos del río Uruguay, dado que no existen registros continuos de velocidades medias del curso, sería recomendable la instalación de equipos ADCP (sigla en inglés de Acoustic Doppler Current Profiler) con capacidad para medir en forma continua niveles y perfiles de velocidades en la sección de aforo. De esta forma, se podrían contemplar los efectos de remanso realizando las curvas de ajuste en base a las velocidades, niveles y caudales aforados.

Se identificó que la distribución de pluviómetros y estaciones meteorológicas es bastante dispersa, sobre todo para las cuencas Queguay y Daymán. En las cuencas argentinas, si bien la distribución es mejor, la calidad de los datos es un tanto deficiente. Para la puesta en funcionamiento del SATI 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).

Por último, sería de gran importancia para el SATI del río Uruguay, poder identificar y cuantificar cuáles son las principales fuentes de incertidumbre que afectan la estimación de niveles. Las principales causas podrían estar atribuidas a los aportes de Salto Grande, a condiciones de contorno aguas abajo (río de la Plata, descarga del río Paraná), lluvias, curvas de aforo, parámetros, modelos hidrológicos e hidrodinámicos utilizados, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

A la Comisión Administradora del Río Uruguay (CARU) por haber financiado este proyecto. A la Dirección Nacional de Agua (DINAGUA) y al Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET) por la información brindada. Las opiniones y conceptos expresados en este artículo no reflejan la posición oficial de la CARU.

REFERENCIAS

- Allen, R., Pereira, L., Raes, D., Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration-Guidelines for computing crop water requirements-FAO*. Irrigation and drainage paper 56. FAO, Rome, 300(9), D05109.
- Bennett, T. (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, USA.
- Bianchi, J., Goniadzki, D. (2012). *Modelación hidrológica de la cuenca del río Gualeguay para pronóstico y alerta hidrológico utilizando información de sensores remotos de microondas*. 1er Encuentro de Formadores en Investigación en Recursos Hídricos. 14 y 15 de junio, Ezeiza, Bs. As., Argentina.
- Campolo, M., Andreussi, P., Soldati, A. (1999), River flood forecasting with a neural network model, *Water Resources Resources*. 35(4), 1191–1197, doi: 10.1029/1998WR900086.
- Cunge, J. (1969). On the subject of a flood propagation computation method (Muskingum method). *Journal of Hydraulic Research*. 7(2), 205-230.
- Feldman, A. (2000). Hydrologic Modeling System Technical Reference Manual, (March).
- Finger, D. (2011). *Calibration of Hydrological Models*. Hydrological Processes and Modelling, SS 2011. Swiss Federal Research Institute WSL. Switzerland.

- Georgakakos, K. (1986). A generalized stochastic hydrometeorological model for flood and flash-flood forecasting: 1. Formulation, *Water Resources Resources*. 22(13), 2083–2095, doi: 10.1029/WR022i013p02083.
- Gupta, H., Sorooshian, S., Yapo, P. (1998). Toward improved calibration of hydrologic models: Multiple and noncommensurable 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.
- INTA (1990). *Atlas de Suelos de la República Argentina*, E 1:500.000 y 1:1.000.000. SAGyP, INTA CIRN-Proyecto PNUD ARG 85/019.
- Kirpich, Z. (1940). *Time of concentration of small agricultural watersheds*. Civil Engineering, 10(6), 362.
- Lehner, B., Grill, G. (2013). Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes*. 27(15), 2171-2186.
- MGAP, Dirección de Suelos y Aguas (1976). *Carta de Reconocimiento de Suelos del Uruguay a escala 1:1.000.000*. Montevideo, Uruguay
- Molfino, 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.
- Moore, R. (2007). The PDM rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 11(1), 483-499.
- Nash, J., Sutcliffe, J. (1970). River flow forecasting through conceptual models part I. A discussion of principles. *Journal of hydrology*, 10(3), 282-290.
- Silveira, L., Chreties, C., Crisci, M., Usera, G., Alonso, J. (2015). *Sistema de alerta temprana para previsión de avenidas en la ciudad de Durazno*. Innotec, (10 ene-dic), 56-63.
- SIT-MVOTMA (2011). *Sistema de Información Territorial MVOTMA*. 02/09/2017. <http://sit.mvotma.gub.uy/shapefiles.htm>
- Werner, M., Schellekens, J., Gijsbers, P., van Dijk, M., van den Akker, O., Heynert, K. (2013). *The Delft-FEWS flow forecasting system*. Environmental Modelling & Software, 40, 65-77.
- WMO (2011). *Manual on flood forecasting and warning*. Ginebra: WMO 1072. ISBN 978-92-63-11072-5.