

Avances en la modelación del escurrimiento superficial de una cuenca del sudoeste bonaerense. Caso de estudio: Sector Superior Cuenca Alta del Río Sauce Grande (Argentina)

Sandra N. Fernández*

Daniel E. Pérez**

Laura D. Brandizi***

Martín Serralunga^o

Carlos F. Weis^{oo}

Pablo O. Abalo^{ooo}

Resumen

Se presenta la calibración del modelo de simulación hidrológica determinístico aplicado a un área de drenaje correspondiente al sector superior del río Sauce Grande, ubicado en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). Se cuenta con datos de una Estación Meteorológica con pluviógrafo y una Estación Limnigráfica en el sector superior de la cuenca alta del río Sauce Grande. Se adopta el programa HEC-HMS 4.2.1 del Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers. Se procedió a extraer el flujo base del hidrograma observado por medio del método de la pendiente variable, obteniéndose así los hidrogramas de flujo superficial observado. Las pérdidas por infiltración y abstracciones de lluvia se calculan mediante el método del Número de Curva del Soil Conservation Service. Se implementa el método de Muskingum de traslado de onda de crecida. Los ajustes logrados para los eventos analizados representan muy bien los hidrogramas de flujo superficial observado. Valores de caudal, hora del pico de crecida y volúmenes de escorrentía de los hidrogramas de flujo superficial simulado fueron muy similares a sus correspondientes observados. Los valores del estadístico analizado fueron altamente satisfactorios, demostrando que el modelo representa adecuadamente la respuesta de la cuenca ante eventos reales.

Palabras clave: Río Sauce Grande, Escorrentía superficial, Simulación de crecidas, Modelo hidrológico HEC-HMS.

* Docente del Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca. Investigador Asociado de la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC). Calle 526 e/10 y 11. La Plata. sfernand@uns.edu.ar

** Docente del Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca. perezdanielenrique@gmail.com

*** Docente de la Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia, Trelew. laurabrandizi@gmail.com

^o Docente del Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca. martin.serralunga@uns.edu.ar

^{oo} Técnico Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca. cweis@uns.edu.ar

^{ooo} Técnico Laboratorio de Hidráulica del Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca. pabalo@uns.edu.ar

Advances in the modeling of surface runoff from a basin in the southwest of Buenos Aires. Case study: Upper Basin of the Sauce Grande River (Argentina)

Abstract

This work presents the calibration of the deterministic hydrological model applied to the drainage area of the upper area of the Sauce Grande River, in the southwest of the province of Buenos Aires, Argentina. There is data from a Meteorological Station and a Limnigraphic Station on the upper Sauce Grande River. The HEC-HMS 4.2.1 program of the Hydrologic Engineering Center developed by the US Army Corps of Engineers was used. The Base flow was extracted by means of the variable slope method, thus obtaining the observed surface runoff hydrograph for each storm. Rain infiltration and abstractions are calculated using the Curve Number method from the Soil Conservation Service. The Muskingum method of flood wave transfer is applied. The output obtained from the analyzed events fit accurately the observed surface runoff hydrographs. Simulated peak flow rates, peak time, and surface runoff volumes were very similar to those observed. The values of the statistic fitting parameter obtained were highly satisfactory, demonstrating that the model adequately represents the response of the basin to real events.

Key words: Río Sauce River, Runoff, Flood simulation, Hydrological model HEC-HMS.

Introducción

El conocimiento de los procesos hidrológicos es fundamental debido a que es en las cuencas hidrográficas donde se genera el agua para diferentes usos del suelo o consumo urbano. Por tanto, el desarrollo y puesta a punto de herramientas que permitan simular el rendimiento hídrico se revela como estratégico para el manejo del agua.

El río Sauce Grande recorre desde su nacimiento en el Sistema de Ventania una longitud total de 170 km hasta su desembocadura en el océano Atlántico. Su cuenca total es la más importante del sudoeste bonaerense con un área total de 4609 km² (Gil, 2009). La Cuenca Alta del Río Sauce Grande (CASG), integrada por 18 subcuencas que drenan al curso principal, abarca una superficie de 1490 km² y recorre una longitud de 76 km hasta su llegada al embalse Paso de las Piedras (Universidad Nacional del Sur [UNS], Aguas Bonaerenses SA, Organismo Regulador de Agua Bonaerense y Autoridad del Agua, 2004). Este embalse, de 328 hm³ de volumen máximo (Schefer, 2004) y construido a comienzos de la década de 1970, constituye en la actualidad la principal fuente de abastecimiento de agua potable para las ciudades de Bahía Blanca y Punta Alta y de agua cruda al polo industrial cercano, lo cual pone de relieve la importancia del mismo.

La zona de estudio del río Sauce Grande se encuentra ubicada en el contexto geológico de las Sierras Australes, presentando tres unidades geomorfológicas importantes: las serranías, los niveles de piedemonte con cobertura loésica y el valle del río (Rabassa, 1982). La primera incluye las sierras de la Ventana y de Las Tunas con pendientes pronunciadas en la zona de divisoria de aguas. En esa zona se observan cárcavas de carácter torrencial que dan lugar a la formación de la mayoría de los afluentes, algunos permanentes y otros temporarios, que discurren en pequeños y profundos cañadones sobre las pendientes más pronunciadas. Posteriormente, se presenta la zona del piedemonte, que alcanza áreas de menores pendientes. Por último, la unidad geomorfológica correspondiente a la llanura aluvial del río, compuesta principalmente por material sedimentario moderno con un espesor variable y pendientes más moderadas. Se destaca la presencia de barrancas cuyas paredes verticales y alturas variables entre 3 y 8 m encajonan y controlan el cauce del río (Luque, Paoloni y Bonorino, 1979).

En la zona de estudio las explotaciones agrícolas y ganaderas son las principales actividades que determinan la presencia de una importante población rural residente y estable (Aduriz, Gargano, Chimeno, Saldungaray y Conti, 2003). Por otra parte, existen asentamientos urbanos, Sierra de la Ventana, Villa Ventana y Saldungaray, que representan polos de desarrollo turístico de creciente trascendencia local, provincial y nacional, que incrementan la demanda de agua para consumo humano.

El clima es templado, con una temperatura media en el mes de julio de 7 °C y de 23,5 °C en enero; las precipitaciones anuales en la zona de estudio oscilan entre 650 y 950 mm (Vouilloud, Sala y Sabbatini, 2005). Los registros de lluvias no son regulares a lo largo del año, sino que se concentran principalmente durante primavera y otoño. Esto hace que el río presente variaciones muy importantes en el nivel de agua y en la velocidad de la corriente hasta su llegada al dique, a partir del cual el caudal del río depende de los niveles de erogación del embalse (López Cazorla, Durán y Tejera, 2003).

Cazenave y Vives (2014), en su trabajo de predicción de crecidas en la cuenca superior del arroyo del Azul, ubicada en la región central de la provincia de Buenos Aires, destacan que la alternancia de ciclos de excesos y déficits hídricos en la llanura pampeana ya fue citada por Ameghino (1884) y que los problemas asociados a estas condiciones se advierten en la zona de manera recurrente. En los ciclos húmedos las frecuentes e intensas precipitaciones, saturan el suelo y ponen en riesgo de inundación a las poblaciones ribereñas e infraestructuras viales.

Las grandes avenidas registradas en la CASG se originan a partir de lluvias torrenciales de baja frecuencia (Gil, 2009). Esto puede ser ejemplificado por la siguiente situación extrema informada por Schefer (2004) y Fernández y Sequeira (2017): el evento del 9 de noviembre de 2002 originó un pico de más de 1000 m³/s. El efecto regulador del embalse permitió atemperar los daños potenciales aguas abajo al descargar por su vertedero un caudal máximo de 455 m³/s.

En este contexto y como paso previo a la simulación hidráulica que permita estimar las zonas inundables, es importante poner a punto una herramienta que describa la respuesta hidrológica de la cuenca ante diversos eventos meteorológicos, ya sean históricos, de diseño correspondientes a una recurrencia determinada o escenarios que atañen al cambio climático.

Desde principios de los años 60 se ha desarrollado una gran cantidad de modelos determinísticos de simulación hidrológica, los cuales se clasifican en modelos de evento y de simulación continua. Los primeros modelan un evento único de lluvia-escorrentía, mientras que los segundos incluyen procedimientos para tener en cuenta el contenido de humedad del suelo con el fin de simular la escorrentía causada por lluvias con intervalos de días u horas a los largo de grandes períodos (Chow, Maidment y Mays, 1993). Un modelo de simulación de evento, de libre acceso y disponibilidad cuya aplicación está muy extendida en el ejercicio profesional, es el modelo de hidrogramas de crecientes del US Army Corps of Engineers HEC-HMS.

Brandizi, Sequeira y Fernández (2013) han utilizado información hidrometeorológica en el período 2009-2012 proveniente de la CASG para calibrar y validar el modelo hidrológico de simulación continua denominado Soil & Water Assessment

Tool (SWAT). Este modelo simula la escorrentía causada por lluvias en intervalos de días durante largos períodos de tiempo. En los períodos de calibración y validación el coeficiente de correlación, entre las series de caudales observados y simulados en cada período, resultó mayor o igual a 0,80 y el error estándar normalizado mayor a 0,60, superando el umbral de 0,50 que establece un buen ajuste entre las series. Estos resultados indican un ajuste satisfactorio del modelo en los períodos de calibración y validación. Los parámetros del modelo SWAT más sensibles en la cuenca del río Sauce Grande están relacionados con procesos como la infiltración, que influye en la cantidad de escorrentía superficial generada para cada evento de precipitación, y por procesos relacionados con el aporte de agua subterránea que es significativo en esta región.

Espósito (2014) aplica el modelo HEC-HMS, en su versión 3.3, a la cuenca del arroyo El Divisorio de 400 km² que en su desembocadura aporta el 20 % del agua al embalse Paso de las Piedras. El modelo reproduce satisfactoriamente el comportamiento hidrológico, por ende resulta una herramienta útil para la estimación de caudales y volúmenes de escorrentías ante la ocurrencia de distintos eventos en esta cuenca.

Cazenave y Vives (2014) estudian la cuenca superior del arroyo del Azul cuya superficie de aporte es de 1150 km², su pendiente media es de 1 %, su altitud máxima es de 360 m s. n. m. y la mínima de 135 m s. n. m. Sus principales tributarios son el arroyo Videla de 136 km² y el arroyo Santa Catalina de 138 km². Para la modelación matemática de la cuenca del arroyo del Azul se utilizó el programa HEC-HMS, en su versión 3.0.1. A partir de la información registrada en la estación del Servicio Meteorológico Nacional (SMN), los datos de lluvia total tomados en los establecimientos agropecuarios y mediciones de niveles registrados por limnigrafos ubicados en secciones de control, se obtiene una calibración aceptable del modelo con el cual se representan los eventos en las secciones de los arroyos del Azul, Santa Catalina y Videla. Para el conjunto de eventos de validación y simulados posteriormente, el modelo representa adecuadamente la respuesta de la cuenca ante eventos intensos y en condiciones de exceso. En estas condiciones, desde un punto de vista hidrológico, los autores consideran que se cuenta con una herramienta de predicción en la cual se calculan de forma ajustada los caudales y tiempos al pico.

En la presente publicación se presenta la calibración del modelo de simulación hidrológica HEC-HMS aplicado a un área de drenaje correspondiente al sector superior de la CASG y cuyo punto de cierre coincide con una estación limnigráfica instalada sobre el cauce principal del río Sauce Grande. La verificación de la exactitud de la aplicación de esta herramienta en un área de las características de la CASG, cuya hidrología afecta directamente al embalse de abastecimiento Dique Paso de las Piedras, es de estratégica importancia para propósitos de diagnóstico, diseño de políticas de manejo de agua y toma de decisiones gubernamentales.

Materiales y métodos

Área de estudio

El área de estudio representa el sector superior de la CASG que corresponde a la cuenca de drenaje cuyo punto de cierre coincide con la Estación Limnigráfica L1 instalada sobre el cauce principal del río Sauce Grande a 16 y 50 km aguas arriba de la localidad de Sierra de la Ventana y del embalse Paso de las Piedras, respectivamente. La superficie de aporte total es de 177,042 km², la longitud del perímetro de la cuenca es de 80,6 km, la longitud del curso principal de agua más largo medido desde la naciente es de 20,26 km, su pendiente media es de 2,7 %, su altitud máxima es cercana a 900 metros sobre el nivel del mar (m s. n. m.) y la mínima de 300 m s. n. m. En su recorrido el cauce principal recibe el aporte de diversos afluentes: arroyos del Abra, El Atravesado y Mambaches sobre su margen izquierda, y arroyos Horqueta del Sauce, Destierro Primero, de los Remansos y del Oro sobre su margen derecha (Figs. 1a y 1b).

Delimitación de la cuenca

La cuenca estudiada se delimitó mediante la digitalización de las cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional, en escala 1:50.000, correspondientes a Sierra de la Ventana y Peralta, con equidistancias de 25 m y Sierra de Las Tunas y Tornquist, con equidistancia de 10 m. En base a estas cartas se realizó un modelo de terreno utilizando la herramienta AutoCAD versión 2010. Se complementó la información con imágenes satelitales provenientes de Google Earth. La georreferenciación de las estaciones meteorológica y limnigráfica se realizó mediante un GPS Garmin 276C (con altimetría).

Monitoreo hidrometeorológico

Se contó con datos de la Estación Meteorológica M1 provista con un pluviógrafo de cubeta basculante y la Estación Limnigráfica L1 ubicadas en el sector superior de la CASG (Fig. 1b). Los datos de precipitación se registraron cada quince minutos y las mediciones de niveles de aguas superficiales cada hora. En la tabla I se presentan las coordenadas de las dos estaciones utilizadas en esta publicación. Las figuras 2a y 2b ilustran las estaciones mencionadas.

La sección de control situada en la Estación Limnigráfica L1 sobre el cauce principal del río Sauce Grande cuenta con la curva de altura caudal o curva h-Q. La misma fue determinada y calibrada mediante relevamientos de secciones transversales y longitudinales con elevaciones y progresivas, aplicación del método área-pendiente y la realización de diez aforos con molinete en distintos estados del

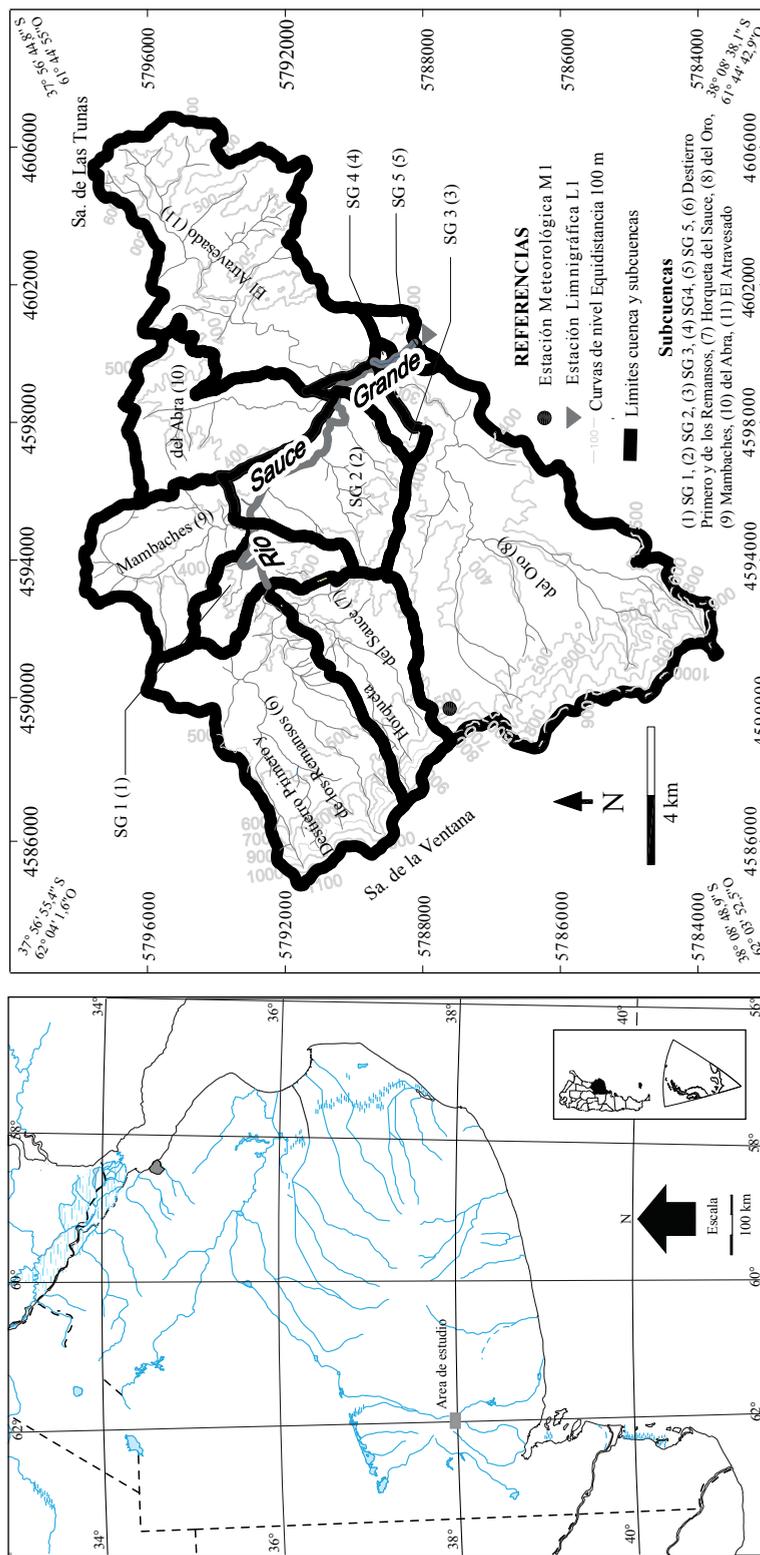


Figura 1. a) Ubicación de la zona de estudio en la Cuenca del río Sauce Grande. b) Cuenca de estudio, estaciones de medición y delimitación de subcuencas. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez sobre la base de cartas topográficas del Instituto Geográfico Nacional.

río (Figs. 3a y 3b). Estas tareas se llevaron a cabo en el marco de los proyectos de investigación “Cuencas del sur de la región pampeana-predictibilidad climática, hidrología, calidad y modelización de los recursos hídricos. Fase II” y “Cuencas del sur de la región pampeana. Hidrología, calidad y modelización de los recursos hídricos. Fase III”, dirigidos por los docentes Ing. Mario Sequeira y Dra. Ing. Sandra Fernández del Departamento de Ingeniería de la UNS, y financiadas por la Secretaría de Ciencia y Tecnología de la UNS. Esta ecuación permitió determinar los caudales escurridos y se usó para calibrar el modelo.

Tipo de Estación	Coordenadas Gauss-Kruger (Zona 4-Campo Inchauspe)		Elevación (m.s.n.m.)
	X (m)	Y (m)	
Limnigráfica L1	5788024,36	4600254,23	300
Meteorológica M1	5787918,08	4589627,46	580

Tabla I. Latitud, longitud y elevación de las estaciones utilizadas.

Fuente: elaborado por Fernández y Pérez sobre la base de relevamiento en campo.



Figura 2. a) Estación Meteorológica M1. b) Estación Limnigráfica L1.

Fuente: Fotografías tomadas por Pablo Ábalo.



Figura 3. a) Sección de aforo correspondiente a la Estación Limnigráfica L1. b) Tareas de aforo con equipo de correntómetro electrónico digital con integración de velocidad media y máxima. Fuente: Fotografías tomadas por Pablo Ábalo.

Aplicación del modelo hidrológico

Con el fin de analizar eventos aislados de tormentas se adoptó el programa HEC-HMS, en su versión 4.2.1, creado por el Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers. Este software permite simular la transformación de lluvia histórica o hipotética en escorrentía mediante un sistema que integra diferentes métodos hidrológicos y se basa en estructurar la cuenca origen en subcuencas asociadas a los cauces de la red fluvial (Fig. 4). El programa realiza, entre otras tareas, los balances entre infiltración y escorrentía superficial, brindando el caudal pico y el momento en que este se produce una vez iniciada la tormenta.

La simulación se realizó a partir de la escorrentía superficial, por lo que se procedió a extraer el flujo base del hidrograma observado por medio del método de la pendiente variable (Chow et al., 1993). En este método la curva de flujo base antes que se inicie la escorrentía superficial se extrapola hacia adelante hasta alcanzar el tiempo de pico de caudal. La curva de flujo base después de que ha cesado la escorrentía superficial se extrapola hacia atrás hasta el momento del punto de inflexión en el segmento de recesión. Luego se utiliza una línea recta para conectar los extremos de las líneas que se extrapolan. A continuación, se extrae el flujo base del hidrograma total observado, obteniéndose así el Hidrograma de Flujo Superficial Observado (HFSO).

Las pérdidas por infiltración y abstracciones de lluvia se calculan mediante el método del Número de Curva, conocido como CN, del Soil Conservation Service del United States Department of Agriculture (USDA) que permite calcular la precipitación efectiva de una tormenta y el escurrimiento superficial (Hydrologic Engineering Center, 2000; Hydrologic Engineering Center, 2016). Los valores del número de curva iniciales correspondientes a cada subcuenca y evento de tormenta se adoptaron sobre la base de:

- a) Discusión grupal mantenida entre el Ing. Mario Sequeira e investigadores especializados en suelos del Departamento de Agronomía (UNS) y del Centro de Recursos Naturales Renovables de la Zona Semiárida (Sequeira, comunicación personal, junio 2014).
- b) Gil (2009), en el capítulo 5 de su tesis doctoral, asignó los Grupos hidrológicos C y D a los suelos presentes en su área de estudio en la cuenca alta del río Sauce Grande. Además, considera un grupo C⁺ en los casos de material muy diaclasado que compone las sierras. El United States Department of Agriculture y Chow et al. (1993) explican las características para cada grupo de suelo y Luque et al. (1979) incorporan las propias de la región. Así, los suelos que poseen de moderado a alto potencial de escurrimiento cuando están saturados de agua, con una restringida transmisión de agua en su interior, poco profundos en general y de textura franca, franco-limoso y

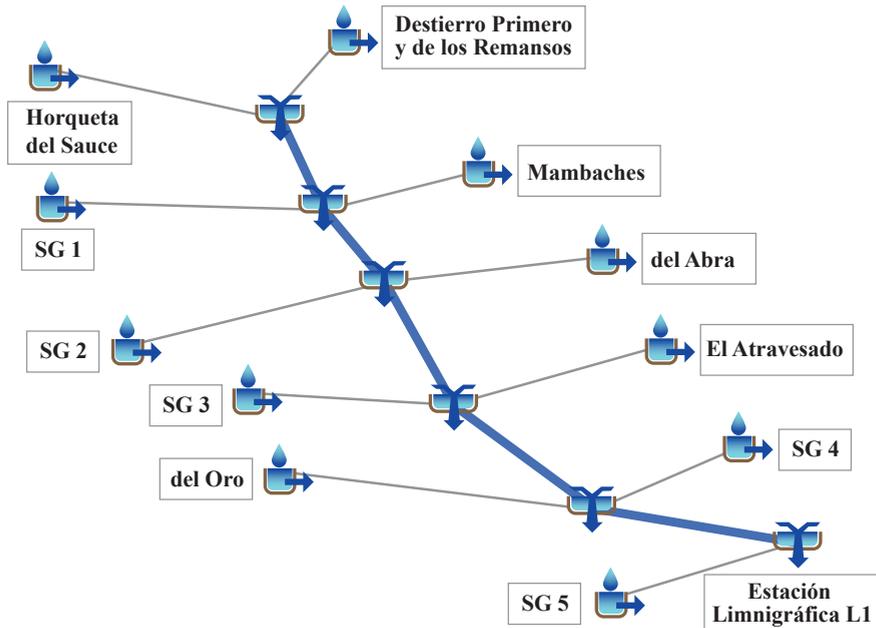


Figura 4. Modelo de la cuenca de estudio estructurada por el programa HEC-HMS. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez sobre la base del programa HEC-HMS.

franco-arenoso-limoso, con capacidad de infiltración inferior a la media una vez humedecidos, clasifican en el grupo hidrológico C. Por otra parte, los suelos con un alto potencial de escurrimiento, con una muy restringida o casi nula transmisión de agua en el interior del suelo, los suelos arcillosos, los rocosos de montañas y todos aquellos que presentan horizontes impermeables cerca de la superficie, con capacidad de infiltración baja en general, son característicos del grupo hidrológico D.

- c) Fernández, Sequeira, Espósito y Paoloni (2015) estudiaron las características hidrológicas superficiales fundamentales del sistema conformado por las Subcuencas Superiores Ia, Ib y la Media Alta del río Sauce Chico que nace en las estribaciones occidentales de las Sierras Australes de la provincia de Buenos Aires y descarga sus aguas en la costa atlántica. La zona de estudio tiene un área de aporte de 1235,8 km², que representa el 80 % de la cuenca total y donde se emplazan sectores de importancia bajo riego. Para cada subcuenca se determinaron las superficies parciales correspondientes a los distintos tipos de suelo (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) y la clasificación hidrológica apropiada tabulada, con base en el tipo de suelo y el uso de la tierra, por el Soil Conservation Service. Se distinguen los grupos hidrológicos C y B. Al efectuar la simulación hidrológica que analiza el efecto de un evento de tormenta sobre los escurrimientos se adoptó un número de curva ponderado para cada subcuenca.

d) Observación de la imagen satelital provista por Google Earth.

Se implementó el método de Muskingum para el tránsito de avenidas. Este método modela el almacenamiento volumétrico de creciente en un río mediante la combinación del almacenamiento de cuña y prisma (Linsley, Kohler y Paulus, 1986).

Datos de los eventos utilizados para la calibración

En la tabla II se muestran las fechas de cinco eventos de tormenta observados en el año 2015, los valores de precipitación acumulada en mm y el caudal en el pico en m³/s del hidrograma observado obtenido de la curva de h-Q.

Fecha del Evento	Precipitación acumulada (mm)	Caudal en el pico Hidrograma observado (m ³ /s)
21/09/2015	16,8	3,69
01/10/2015	21,9	6,85
14/10/2015	24,9	7,67
20/10/2015	13,8	5,65
16/12/2015	31,5	5,65

Tabla II. Eventos de tormenta observados: fecha, precipitación acumulada y caudal en el pico del hidrograma total observado. Fuente: elaborado por Fernández sobre la base de los datos de las estaciones hidrometeorológicas.

Las figuras 5 a 9 detallan los hietogramas e hidrogramas totales observados que se produjeron en las correspondientes fechas.

Calibración

Los datos recopilados provenientes de información como Google Earth, cartas topográficas, precipitaciones o HFSO se implementaron en el modelo. Seguidamente se adoptaron valores de algunos parámetros que produjeron salidas del modelo simuladas. Estos valores se compararon con los caudales observados. Este proceso se repite, en forma iterativa, hasta lograr un buen ajuste entre valores de caudales de flujo superficial simulados y observados.

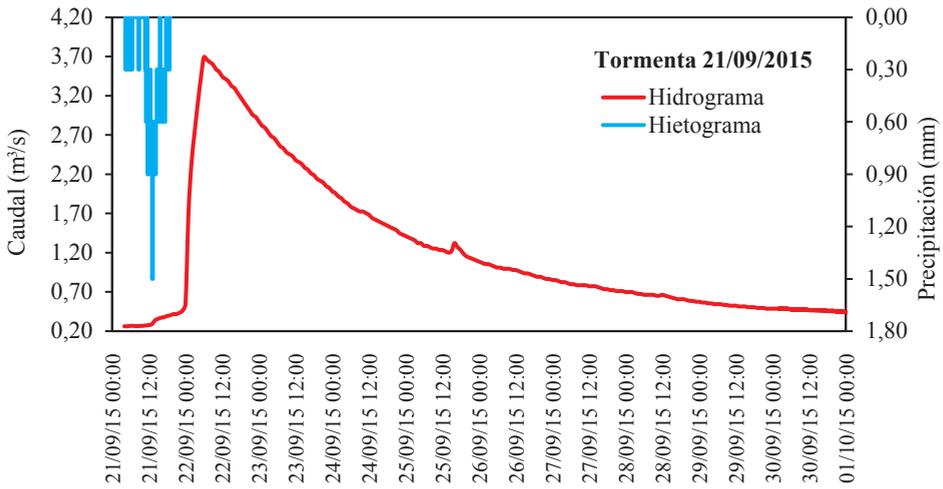


Figura 5. Hietograma e hidrograma observado registrados en la Estación Meteorológica M1 y la Estación Limnigráfica L1 respectivamente para el evento del 21/09/2015. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez.

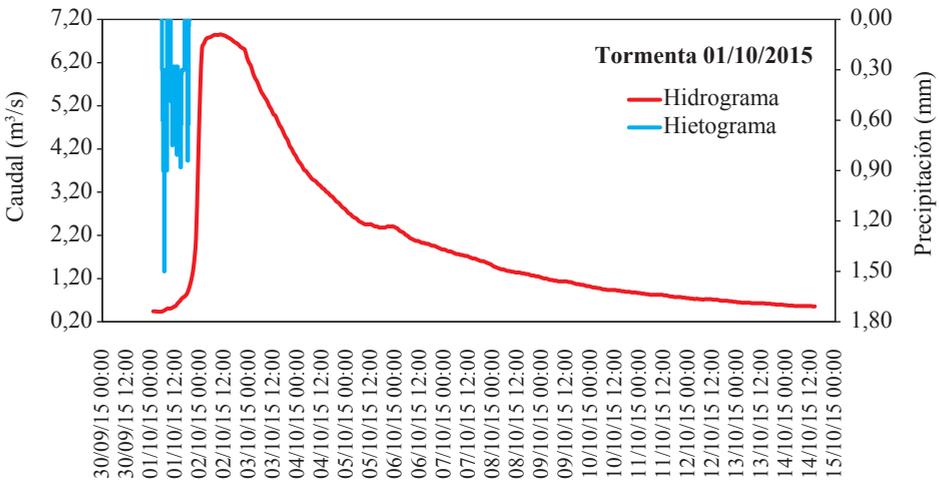


Figura 6. Hietograma e hidrograma observado registrados en la Estación Meteorológica M1 y la Estación Limnigráfica L1 respectivamente para el evento del 01/10/2015. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez.

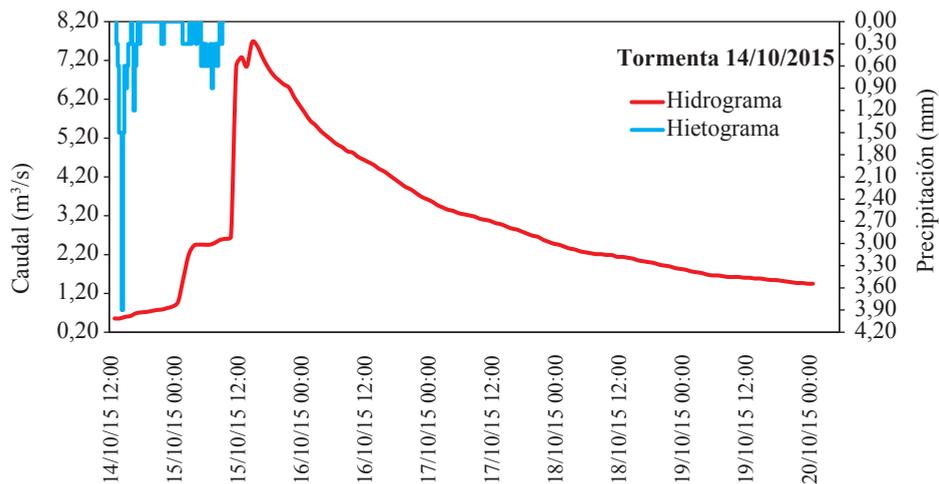


Figura 7. Hietograma e hidrograma observado registrados en la Estación Meteorológica M1 y la Estación Limnigráfica L1 respectivamente para el evento del 14/10/2015. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez.

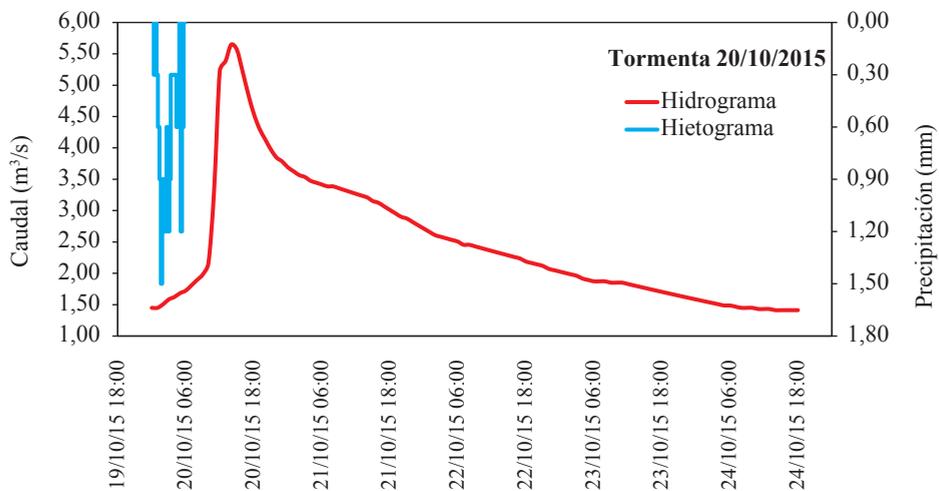


Figura 8. Hietograma e hidrograma observado registrados en la Estación Meteorológica M1 y la Estación Limnigráfica L1 respectivamente para el evento del 20/10/2015. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez.

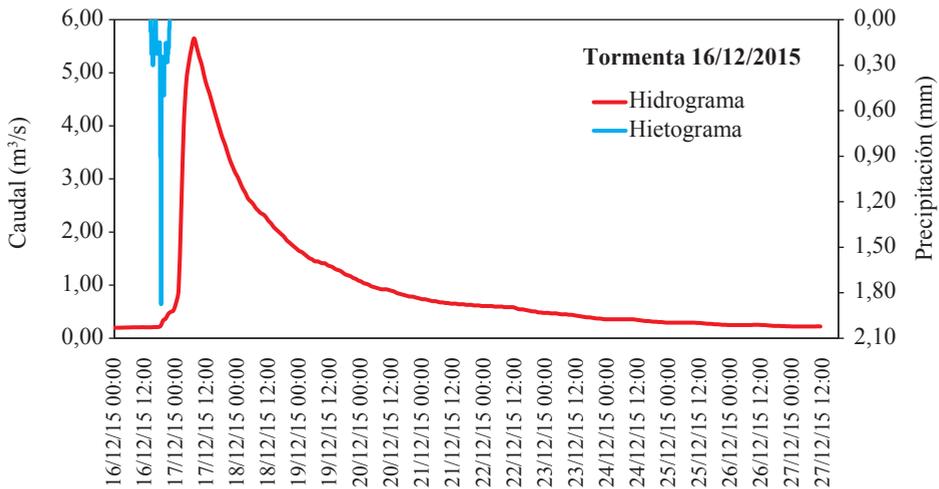


Figura 9. Hietograma e hidrograma observado registrados en la Estación Meteorológica M1 y la Estación Limnigráfica L1 respectivamente para el evento del 16/12/2015. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez.

Medidas de bondad de ajuste

La cuantificación de la bondad de ajuste del modelo se efectuó por medio del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) (Nash y Sutcliffe, 1970), cuya expresión es la siguiente:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{SIM} - Q_i^{OBS})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{OBS} - \bar{Q}_i^{OBS})^2}$$

En donde Q_i indica el caudal, n es el número de datos simulados, los superíndices SIM y OBS indican valores simulados y observados respectivamente y la barra superior indica el valor medio en el período de estudio. Este indicador mide cuanto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación y produce resultados menores o iguales a 1. Si el resultado es 1 el ajuste es perfecto, si es cero el error es del mismo orden de magnitud que la varianza de los datos observados por lo que la media de los datos observados tendrá una capacidad predictora similar al modelo. En este trabajo se adopta la propuesta de Molnar (2011) para clasificar los valores de E, de acuerdo con la tabla III.

Eficiencia Nash-Sutcliffe	Ajuste
< 0,2	Insuficiente
0,2-0,4	Satisfactorio
0,4-0,6	Bueno
0,6-0,8	Muy bueno
> 0,8	Excelente

Tabla III. Valores referenciales de Criterio de Nash-Sutcliffe.
Fuente: Molnar (2011).

Resultados y discusión

El comportamiento hidrológico de la zona de estudio fue calibrado mediante el modelo determinístico de simulación de eventos HEC-HMS, en su versión 4.2.1, y sus resultados se muestran en las figuras 10 a 14.

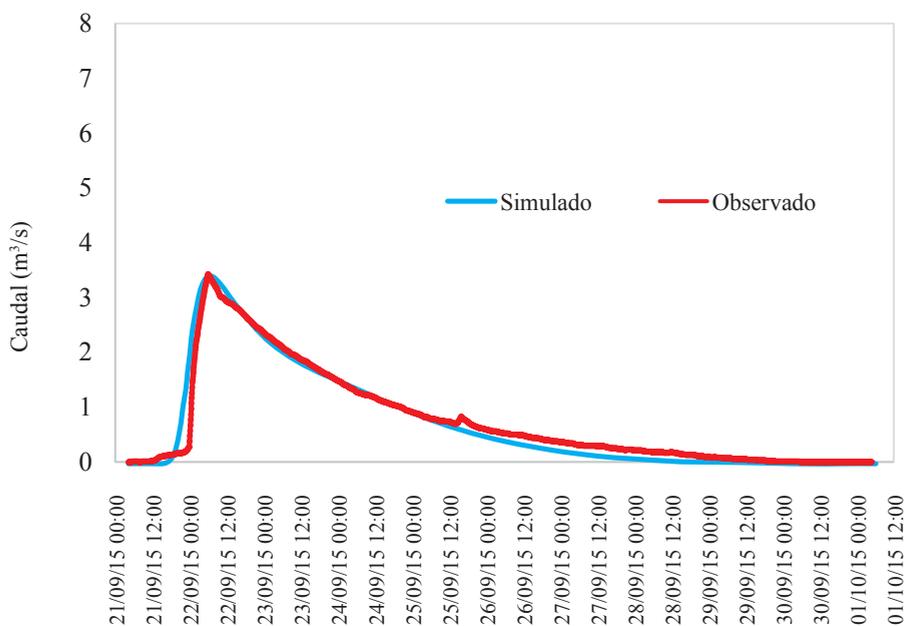


Figura 10. Comparación entre el hidrograma de flujo superficial simulado y HFSO en la Estación Limnigráfica L1 para el evento del 21/09/2015.
Fuente: elaborado por Fernández y Pérez.

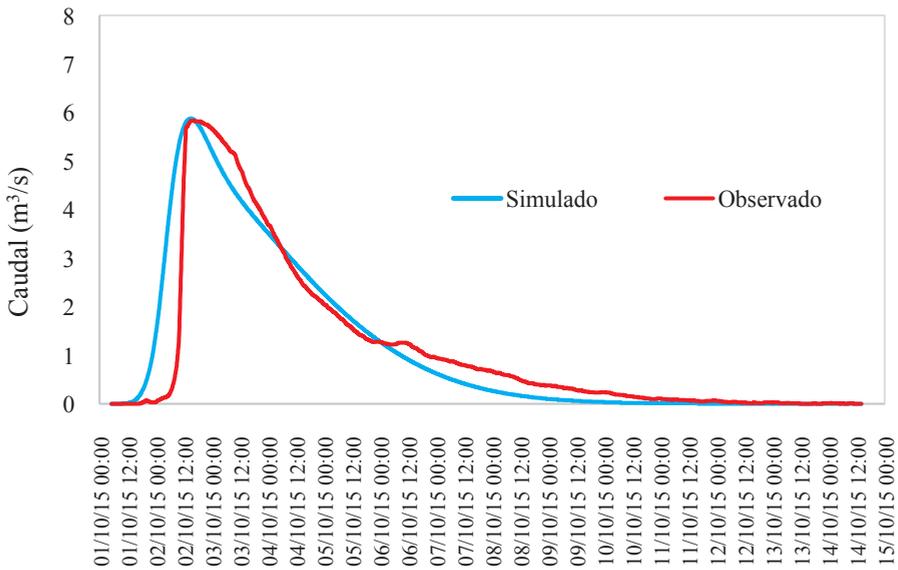


Figura 11. Comparación entre el hidrograma de flujo superficial simulado y HFSO en la Estación Limnigráfica L1 para el evento del 01/10/2015.
Fuente: elaborado por Fernández y Pérez.

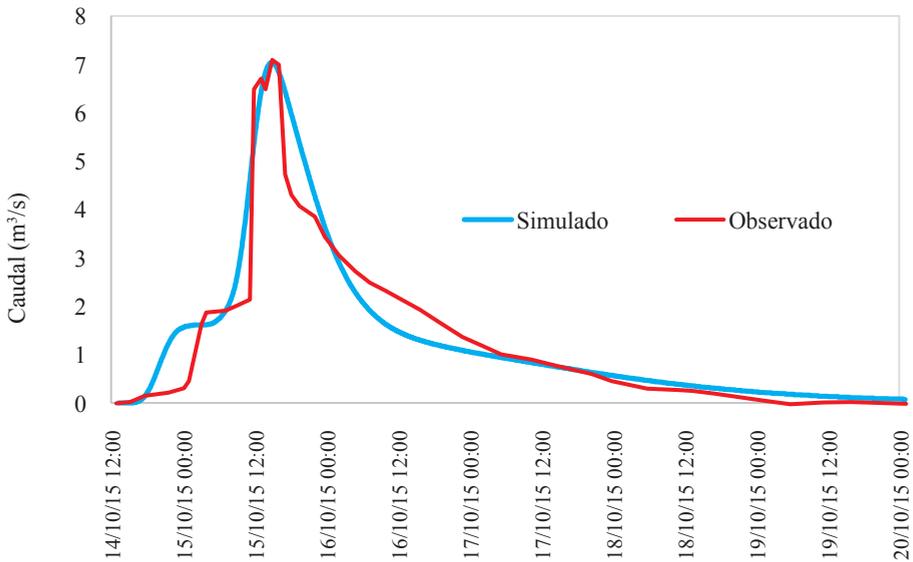


Figura 12. Comparación entre el hidrograma de flujo superficial simulado y HFSO en la Estación Limnigráfica L1 para el evento del 14/10/2015.
Fuente: elaborado por Fernández y Pérez.

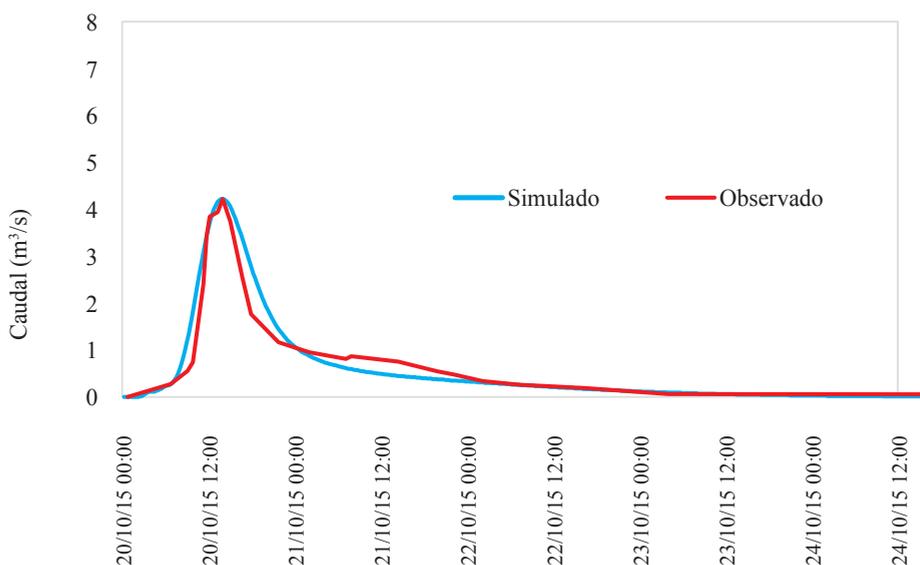


Figura 13. Comparación entre el hidrograma de flujo superficial simulado y HFSO en la Estación Limnigráfica L1 para el evento del 20/10/2015.
Fuente: elaborado por Fernández y Pérez.

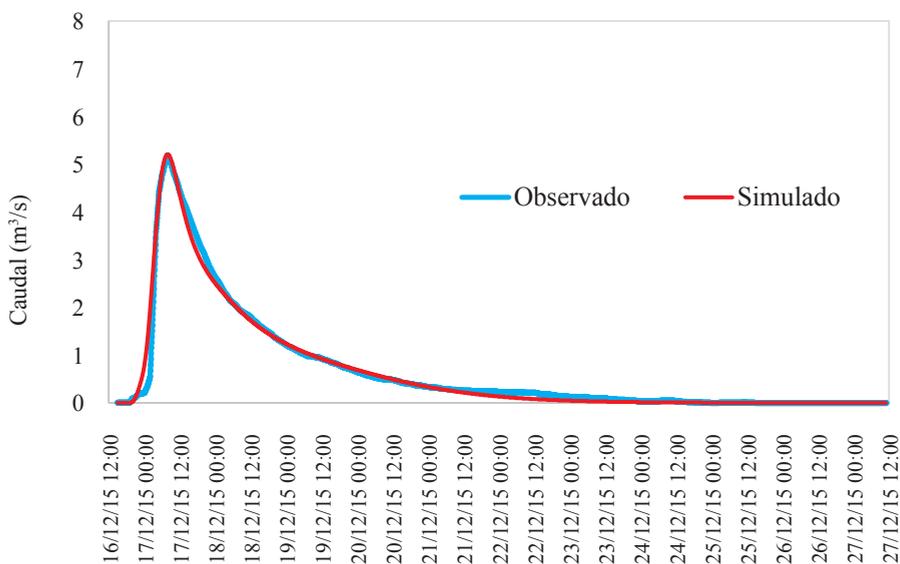


Figura 14. Comparación entre el hidrograma de flujo superficial simulado y HFSO en la Estación Limnigráfica L1 para el evento del 16/12/2015.
Fuente: elaborado por Fernández y Pérez.

Evento	Valores Escorrentía Superficial Observados			Valores Escorrentía Superficial Simulados			Eficiencia Nash-Sutcliffe
	Hora del pico	Caudal en el pico (m ³ /s)	Volumen escorrentía (mm)	Hora del pico	Caudal en el pico (m ³ /s)	Volumen escorrentía (mm)	
21/09/2015	22/09/2015 06:00	3,43	3,30	22/09/2015 06:05	3,43	3,27	0,936
01/10/2015	01/10/2015 15:00	5,83	6,73	02/10/2015 15:05	5,88	6,76	0,825
14/10/2015	14/10/2015 14:55	7,12	3,01	14/10/2015 15:00	7,04	3,19	0,906
20/10/2015	20/10/2015 14:00	4,20	1,08	20/10/2015 14:00	4,22	1,13	0,915
16/12/2015	17/12/2015 17:55	5,19	3,22	17/12/2015 18:00	5,20	3,13	0,986

Tabla IV. Valores de hora del pico, caudal en el pico y volumen total de escorrentía, observado y simulado. En la última columna, el coeficiente de Nash-Sutcliffe de eficiencia del ajuste para los cinco eventos de tormenta. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez sobre la base de los resultados del programa HEC-HMS.

Subcuenca	Número de Curva (CN)	
	Promedio	Desvío Estándar
Arr. El Atravesado	86	1,26
Arr. del Abra	86	2,71
Arr. Del Oro	87	2,14
Arr. Destierro Primero + Arr. de los Remansos	81	5,47
Arr. Horqueta del Sauce	82	5,11
Arr. Mambaches	82	5,35
Sauce Grande 1-SG1	80	5,71
Sauce Grande 2-SG2	80	5,71
Sauce Grande 3-SG3	80	5,71
Sauce Grande 4-SG4	80	5,71
Sauce Grande 5-SG5	80	4,22

Tabla V. Valores promedio y desvío estándar del número de curva CN en cada subcuenca para los cinco eventos de tormenta. Fuente: elaborado por Fernández y Pérez sobre la base de los resultados del programa HEC-HMS.

La tabla IV presenta los valores de hora del pico, caudal en el pico y volúmenes de escorrentía superficial, simulados y observados. La última columna indica el valor del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe, que evalúa la bondad del ajuste.

Se puede observar que los ajustes logrados para los eventos analizados representan muy bien los hidrogramas de escorrentía medidos. El estadístico de eficiencia de Nash-Sutcliffe presenta valores de bondad de ajuste correspondientes a muy buenos y excelentes (Tabla III). Asimismo, se lograron valores de caudal en el pico, hora del pico de crecida y volumen total de escorrentía muy similares entre los HFSO y el hidrograma de flujo superficial simulado.

Se puede observar que las tormentas del 16/12/2015 y del 14/10/2015 presentan caudales pico de $5,19 \text{ m}^3/\text{s}$ y $7,12 \text{ m}^3/\text{s}$ respectivamente (Tabla IV). Sin embargo, la precipitación acumulada registrada en diciembre fue de 31,5 mm contra 24,9 mm de la registrada en octubre (Tabla II). Esto indica que la respuesta de la cuenca es muy variable, y podría reflejar la falta de uniformidad en tiempo y espacio de la precipitación, así como el antecedente de humedad de la misma.

Espósito (2014) concluye que los análisis de las relaciones precipitación-escorrimento de las tormentas extraordinarias a lo largo de la cuenca del arroyo El Divisorio indican que las influencias de las lluvias como generadoras del escurrimiento fluvial estaban condicionadas por el grado de humedad del suelo previo al desarrollo de un determinado evento. Así, los caudales máximos y el volumen derramado serían más elevados cuando el suelo se encuentra en condiciones normales de humedad.

Los valores de CN que produjeron las simulaciones de las figuras 10 a 14 muestran una ligera variación entre tormentas. En la tabla V se presentan los valores promedio y el desvío estándar del número de curva CN en cada subcuenca para los cinco eventos de tormenta analizados. Estos resultados concuerdan con Gil (2009), quien asigna los grupos hidrológicos C y D a los suelos de la CASG, espacio que incluye el sector de estudio de este trabajo. Asimismo, Sequeira, en comunicación personal, sugiere valores de CN próximos a 90 para las subcuencas con afloramientos rocosos correspondientes al grupo D y entre 70 y 82 para sectores de piedemonte o valles propios del grupo C. Espósito (2014) adopta un valor de CN de 70 para la cuenca del arroyo El Divisorio. Este valor proviene de ponderar las superficies con distinta capacidad de generar escurrimientos ante determinadas precipitaciones. La mayoría de los suelos de la cuenca del arroyo El Divisorio se encuentran dentro del grupo hidrológico B, que comprende suelos con moderado a bajo potencial de escurrimiento cuando están saturados de agua, con capacidad de infiltración superior a la media una vez humedecidos y de textura franco-arenosa. En consecuencia, los valores presentados para la zona de estudio en el presente trabajo son coherentes con el calculado por Espósito (2014), ya que los suelos de

la misma pertenecen mayoritariamente a los grupos hidrológicos C y D, con mayor potencial para generar escorrentía superficial.

Conclusiones

Se obtuvieron hietogramas de tormentas cada 15 minutos. Asimismo, se estableció una sección de aforo en la Estación Limnigráfica L1 y se determinó la curva h-Q de la sección. Esto permitió asignar a cada hietograma, el hidrograma total observado de crecidas correspondiente.

Los ajustes logrados para los eventos analizados representan muy bien los HFSO. Asimismo, se lograron valores de caudal, hora del pico de crecida y volúmenes de escorrentías muy similares entre los HFSO y el hidrograma de flujo superficial simulado. El estadístico utilizado alcanzó valores altamente satisfactorios para el conjunto de eventos de calibración, demostrando que el modelo representa adecuadamente la respuesta de la cuenca ante eventos reales.

Los resultados indican una gran variabilidad en el comportamiento de la cuenca. Esto sugiere que son necesarias más mediciones y calibraciones para poder determinar con mayor precisión la respuesta de la misma ante diferentes tormentas. Es vital seguir desarrollando bases de datos hidrometeorológicos, considerando que son fundamentales al momento de calibrar y validar los modelos hidrológicos.

La asignación de un grupo hidrológico a cada suelo propuesto por Gil (2009) se corresponde con los resultados obtenidos de la calibración presentada en este trabajo. Asimismo, el valor de CN obtenido para la cuenca del arroyo El Divisorio es coherente con el grupo hidrológico tipo B.

Se demuestra que el programa HEC-HMS, correctamente calibrado, es una herramienta adecuada para la simulación de la escorrentía superficial en el sector superior de la CASG a pesar de la variabilidad en la respuesta de la misma.

Agradecimientos

El presente estudio fue financiado por la Secretaría General de Ciencia y Tecnología (UNS) con fondos correspondientes al proyecto de investigación “Cuencas del sur de la región pampeana. Hidrología, calidad y modelización de los recursos hídricos. Fase III” (PGI 24/J066). Los autores desean agradecer al Dr. Walter Melo por su colaboración para la concreción de este trabajo y al Laboratorio de Hidráulica (UNS)-CERZOS como fuente de datos.

Referencias

- Aduriz, M. A., Gargano, A. O., Chimeno, P., Saldungaray, M. C. y Conti, V. P. (2003). Caracterización de los Agrosistemas predominantes de la Cuenca alta del río Sauce Grande. *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, 32(3), 3-26.
- Ameghino, F. (1884). *Las secas y las inundaciones en la Provincia de Buenos Aires*. La Plata: Ministerio de Asuntos Agrarios, provincia de Buenos Aires.
- Brandizi, L., Sequeira, M. y Fernández, S. (2013). *Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires*. Trabajo presentado en el XXIV Congreso Nacional del Agua CONAGUA 2013, San Juan, provincia de San Juan.
- Cazenave, G. R. y Vives, L. (2014). Predicción de inundaciones y sistemas de alerta: Avances usando datos a tiempo real en la cuenca del arroyo del Azul. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 33, 83-91.
- Chow, V. T., Maidment, D. R y Mays L. W. (1993). *Hidrología Aplicada*. Santafé de Bogotá: McGraw-Hill.
- Espósito, M. (2014). Hidrología e hidroquímica de la cuenca del arroyo El Divisorio, provincia de Buenos Aires (Tesis de Doctorado). Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca.
- Fernández, S., Sequeira, M., Espósito, M. y Paoloni, J. (2015). Estudio del comportamiento fluviométrico e hidrológico superficial de una cuenca del sur de la región pampeana con datos limnigráficos diarios instantáneos - Caracterización hídrica para los fines del riego. *Cuadernos del Centro Universitario Rosario de Investigaciones Hidroambientales*, 21, 41-54.
- Fernández, S. y Sequeira, M. (2017). *Respuesta del sistema Cuenca-Embalse Paso de las Piedras. Evento significativo en 2002*. Trabajo de cartel presentado en el Primer Congreso Latinoamericano de Ingeniería (CLADI 2017), Paraná.
- Gil, V. (2009). *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce Grande aplicada al peligro de crecidas* (Tesis de Doctorado). Recuperada de la Universidad Nacional del Sur, Biblioteca Central: <http://catalogo.uns.edu.ar/vufind/Record/oai:repositorio.bc.uns.edu.ar:123456789-2069>
- Hydrologic Engineering Center (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual*. Davis, California: US Army Corps of Engineers.

Hydrologic Engineering Center (2016). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual, Version 4.2*. Davis, California: US Army Corps of Engineers.

Linsley, R. K., Kohler, M. A. y Paulus, J. L. H. (1986). *Hidrología para Ingenieros* (segunda edición). México: Mc Graw-Hill.

López Cazorla, A., Durán, W. y Tejera, L. (2003). Alimentación de la ictiofauna del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Biología Acuática*, 20, 73-79.

Luque, J. A., Paoloni, J. D. y Bonorino, G. A. (1979). *Estudio hidrológico e hidrogeológico de la cuenca del río Sauce Grande. S. Hidrología 3*. Bahía Blanca: Departamento de Ciencias Agrarias y de Ciencias Naturales. Universidad Nacional del Sur.

Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling, SS 2011*. Zürich: Institute of Environmental Engineering.

Nash, J. E. y Sutcliffe, J. V. (1970). River flow forecasting through conceptual models: Part I. A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282-290.

Rabassa, J. (1982). Variación regional y significado geomorfológico de la densidad de drenaje en la cuenca del Río Sauce Grande, Provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 37(3), 268-284.

Schefer, J. C. (2004). Los recursos hídricos y el abastecimiento de agua. Región de Bahía Blanca. Bahía Blanca: Publicación del CEPADE.

Universidad Nacional del Sur (UNS), Aguas Bonaerenses SA (ABSA), Organismo Regulador de Agua Bonaerense (ORAB) y Autoridad del Agua (ADA) (2004). *Informe Final Convenio*. Bahía Blanca: Universidad Nacional del Sur.

Vouilloud, A. A., Sala, S. E. y Sabbatini, M. R. (2005). Diatomeas perifíticas de la cuenca del Río Sauce Grande (Buenos Aires, Argentina). *Iheringia. Série Botânica*, 60(1), 77-89.

Fecha de recepción: 28 de diciembre de 2018

Fecha de aceptación: 26 de marzo de 2019

© 2019 por los autores; licencia otorgada a la Revista Universitaria de Geografía. Este artículo es de acceso abierto y distribuido bajo los términos y condiciones de una licencia Atribución-NoComercial 2.5 Argentina de Creative Commons. Para ver una copia de esta licencia, visite http://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.5/ar/deed.es_AR