



Aplicación del HEC-HMS en la cuenca del arroyo El Negro, Buenos Aires, Argentina, para determinar parámetros hidrológicos por medio de simulaciones.

Application of HEC-HMS in the El Negro Stream basin, Buenos Aires, Argentina, to determine hydrological parameters through simulations.

Fernández, Sandra N.¹ 

¹ Universidad Nacional del Sur. Departamento de Ingeniería. Bahía Blanca, Buenos Aires. Ministerio de Producción, Ciencia e Innovación Tecnológica. Comisión de Investigaciones Científicas. La Plata – Buenos Aires. Argentina.

sandrafernandezpretini@gmail.com

Pérez, Daniel E.² 

² Universidad Nacional del Sur. Departamento de Ingeniería. Bahía Blanca - Buenos Aires. Argentina

perezdanielenrique@gmail.com

Fagoaga, Nicolás D.³ 

³ Universidad Nacional del Sur. Departamento de Ingeniería. Bahía Blanca - Buenos Aires. Argentina

fagoaga.ing@gmail.com

Abalo, Pablo O.⁴ 

⁴ Universidad Nacional del Sur. Departamento de Ingeniería. Bahía Blanca - Buenos Aires. Argentina

pabalo@uns.edu.ar

Flores, Miguel A.⁵ 

⁵ Universidad Nacional del Sur. Departamento de Ingeniería. Bahía Blanca - Buenos Aires. Argentina

miguel.flores@uns.edu.ar

Recibido: 08/07/2025

Aceptado: 09/10/2025

RESUMEN

Se presenta la modelación de la cuenca del arroyo El Negro, que es una subcuenca del río Sauce Grande en la provincia de Buenos Aires, en base a calibraciones previas. Se introdujeron los datos a QGIS para sistematizar diversas fuentes de información. Se implementó el software HEC-HMS con el método del número de curva del Soil Conservation Service, el método de Muskingum para el tránsito de crecida y la fórmula de Kirpich para los tiempos de concentración de las subcuencas. Los hidrogramas de referencia fueron los obtenidos de los resultados de la calibración del modelo cuenca alta del río Sauce grande aguas arriba del embalse Paso de las Piedras. Se lograron ajustes excelentes a buenos para los 9 eventos. El modelo es un aporte original para la cuenca en estudio, ya que no se conocen antecedentes de simulaciones hidrológicas.

Palabras clave: arroyo El Negro, HEC-HMS, simulación hidrológica, recursos hídricos



ABSTRACT

The modeling of the El Negro creek basin, which is a sub-basin of the Sauce Grande River in the province of Buenos Aires, is presented based on previous calibrations. Data were transferred to QGIS to systematize various information sources. HEC-HMS software was implemented using the Soil Conservation Service curve number method, the Muskingum method for flood flow, and the Kirpich formula for sub-basin times of concentration. The reference hydrographs were obtained from the calibration results of the upper Sauce Grande River basin model, upstream of the Paso de las Piedras Reservoir. Excellent to good fits were achieved for all nine events. The model is a unique contribution to the study basin, as no previous hydrological simulations are known.

Keywords: El Negro creek, HEC-HMS, hydrological simulation, water resources

1. Introducción

1.1 Zona de estudio

El arroyo El Negro, es un afluente del Sauce Grande y constituye una de las subcuencas más importantes de la cuenca superior del Río Sauce Grande (CASG) (Figura 1). Se encuentra dentro del Sistema de Ventania entre las coordenadas 5797500 a 5778500 Norte y 602500 a 627500 Este según Universal Transverse Mercator (UTM), aproximadamente a 100 Km de la ciudad de Bahía Blanca (Figura 1b). El área de la cuenca de aporte del arroyo El Negro es de 200.48 Km², y la longitud del río principal es de 27 Km. El mencionado arroyo, recoge las aguas de su afluente arroyo el Toro Negro, de 13 Km de longitud (Figura 1). Sus nacientes se encuentran entre los 450 y 600 m de altura, y en su confluencia con el Sauce Grande se encuentra la localidad de Sierra de la Ventana.

La vegetación, fuera de los valles de inundación corresponde a estepa o pseudo estepa de gramíneas cuyo género predominante es STIPA (Flechillar). La vegetación ribereña consta de árboles introducidos por el hombre, que ha reemplazado el endémico pastizal Pampeano (Campo et al., 2016).

La variabilidad de las precipitaciones anuales en la cuenca del arroyo El Negro va desde un mínimo de 343 mm/año a 1009 mm/año, presentando máximos en otoño y primavera (Gil, 2011).

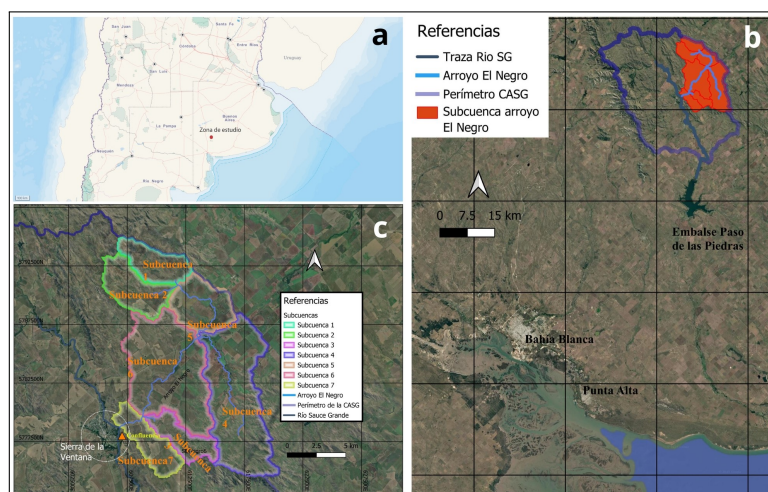


Figura 1. Ubicación de la Subcuenca del arroyo El Negro, dentro de la CASG.

Fuente: Elaboración propia

Más allá de la explotación agropecuaria presente, se desarrolla una actividad turística en crecimiento sostenido. La CASG, aporta su caudal al embalse Paso de las Piedras (Figura 1b), que es la principal fuente de agua para consumo humano de Bahía Blanca y la zona (Schefer, 2004). Desde el punto de vista de la conservación, dentro de la zona de interés, se encuentra el Área Protegida Parque Provincial Ernesto Tornquist,



donde se estudian y protegen especies endémicas y raras propias del sistema de Ventania (Williams et al., 2023; Konopko et al., 2009; López Cazorla et al., 2003). Además, se verifica un crecimiento poblacional sostenido desde 1991 a la fecha en los diferentes centros poblados de la zona. Todo lo mencionado, implica un desafío para el desarrollo sostenible y armonioso de la zona.

La actividad turística en la zona de estudio ha venido en aumentando consistentemente, salvo durante la pandemia de COVID. La Figura 2 muestra una comparativa anual desde 2013 a 2024 (Google Analytics para www.sierrasdelaventana.com.ar). El año 2021 marca el récord histórico, por efecto post- COVID. El año 2024 la actividad creció un 3,64% en relación al año anterior.



Figura 2. Datos de la evolución del mercado turístico a la zona de estudio.

Fuente: Google Analytics [www.sierrasdelaventana.com.ar](<http://www.sierrasdelaventana.com.ar>).

Además, se verifica un crecimiento de la población en la zona. La Tabla 1 muestra el crecimiento intercensal de habitantes para Sierra de la Ventana, Villa Ventana y Saldungaray, según datos recuperados de Rodríguez (2022). En el período 2010 a 2022, la población de la Provincia de Buenos Aires creció un 11.6%. Esto implica que, en promedio, la tasa de crecimiento de la región duplica a la de la provincia.

Tabla 1. Crecimiento poblacional de las localidades de la zona

| Localidad | Tasa de crecimiento intercensal (%) | | |
|----------------------|-------------------------------------|------------------|------------------|
| | Censos 1991-2001 | Censos 2001-2010 | Censos 2010-2022 |
| Sierra de la Ventana | 51.4 | 27.5 | 18.2 |
| Villa Ventana | 126.7 | 30.9 | 43.9 |
| Saldungaray | 6.6 | 4.5 | 26.0 |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de [Rodríguez \(2022\)](#)

De lo expuesto, es de esperar una sobrecarga a los servicios existentes. Específicamente el uso del recurso hídrico para consumo humano, riego, piscinas, etc. Asimismo, gran parte del escurrimiento de la cuenca desagota en el embalse Paso de Las Piedras, el cual abastece de agua a Bahía Blanca, Punta Alta y la zona.

2. Marco teórico y antecedentes

Programas de simulación, como el HEC-HMS del Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos [USACE], el cual ha sido extensamente usado en todo el mundo, provee una sólida base para lograr un conocimiento profundo del comportamiento hidrológico de la cuenca estudiada. Este programa es de uso libre, permite simular, validar y calibrar datos medidos. Correctamente calibrado, la simulación hidrológica se presenta como una herramienta adecuada a la hora de tomar decisiones, proyectar obras, prepararse para situaciones extremas y/o urgentes, etc.

[Gil \(2010\)](#) recopila y analiza datos de diversas fuentes y establece el comportamiento general de la CASG, incluso reconstruye por medio de entrevistas las inundaciones de 1944 y 2003. [Gil \(2011\)](#) presenta valores geomorfológicos, caudales medios mensuales y precipitaciones medias mensuales (1938 a 1943 y 2004 a 2007) para el arroyo El Negro, así como una serie temporal de precipitaciones medias mensuales entre 1915 y 2005. Se verificó la dependencia entre las precipitaciones y caudales escurridos.

[Fernández et al. \(2019; 2021; 2022\)](#), simularon y calibraron la totalidad de la CASG en base a sus propios registros. El software HEC-HMS produjo hidrogramas de flujo directo en cada una de las confluencias entre el curso principal del Sauce Grande y sus afluentes dentro de la CASG. Es así, que en el caso particular del arroyo El Negro, se dispone de hidrogramas de escurrimiento superficial surgidos de la calibración. Se utilizan entonces estos resultados parciales, correspondientes a los hidrogramas en la confluencia del arroyo El Negro con el río Sauce Grande, para contrastar los resultados de las simulaciones realizadas sobre la subcuenca del arroyo El Negro.

La zona de estudio suele sufrir incendios forestales en forma recurrente. Uno de los principales problemas que surgen a la hora de combatirlos, es la falta de disponibilidad de agua. Es posible generar una red de pequeños azudes distribuidos en la zona, que permitirían el acceso al agua, y hacer más eficiente la extinción de los eventos mencionados, con la consecuente salvaguarda de la flora y fauna del lugar. Al mismo tiempo, esta red de azudes, es factible de ser utilizada con fines recreativos, aumentando así la oferta turística que la zona ofrece.

Existe la necesidad de contar con un modelo hidrológico que permita cuantificar el recurso hídrico, con el fin de regular, evaluar el impacto de las actividades antrópicas en la zona y tomar decisiones estructurales y no estructurales que acompañen el crecimiento en forma armoniosa con el ambiente.

Se plantea la siguiente Hipótesis:

- El software HEC-HMS permite desarrollar modelos hidrológicos que describen los procesos precipitación-escurrimiento adecuadamente para la cuenca del arroyo El Negro.



El presente trabajo tiene los siguientes objetivos:

- Utilizar el HEC-HMS en la cuenca del arroyo El Negro para simular eventos de precipitaciones-escorrentías.
- Determinar caudales de pico, tiempo de llegada de crecidas y volúmenes de caudales escurridos e hidrogramas en la confluencia del arroyo El Negro y el río Sauce Grande.
- Ajustar los hidrogramas simulados en la cuenca del arroyo El Negro con valores de referencia obtenidos en calibraciones existentes.
- Aportar al desarrollo de un modelo hidrológico específico para la cuenca del arroyo El Negro, que permita sustentar la toma de decisiones para la solución de las problemáticas planteadas.

3. Materiales y métodos

3.1 Modelo de terreno

El Instituto Geográfico Nacional [IGN], s.f. a partir de datos capturados por las misiones satelitales SRTM y ALOS, desarrolló el modelo de elevación MDE-Ar v2.1 ([IGN], s.f.), que cubre la totalidad del territorio continental nacional, con un mallado de 30x30 metros y cuya referencia vertical coincide con el Sistema de Referencia Vertical Nacional (SRVN16) ([IGN], s.f.). Para definir el modelo de terreno se usaron los modelos de datos raster 3763-35, 3763-36, 3963-5, 3963-6 (Figura 3) usando el software QGIS. Por medio de las herramientas GIS (Geographical Information System) incorporadas en HEC-HMS versión 4.12 se procedió a mejorar el modelo de terreno, ubicar la sección de control de la cuenca del arroyo El Negro y delimitar las subcuencas, de la siguiente manera:

- Preprocesamiento de sumideros (Preprocess Sinks). Se aplica un algoritmo al Raster extraído del Instituto Geográfico Nacional, por el cual se detectan y corrigen los puntos sin información o con información incorrecta, mejorando la calidad del modelo de terreno.
- Preprocesamiento del drenaje (Preprocess Drainage). Este algoritmo calcula la dirección del escurrimiento y áreas de acumulación del flujo para la imagen Raster corregida.
- Identificación de cursos (Stream identification). Algoritmo que detecta los cursos de los arroyos en base a la información obtenida en el paso anterior.
- Secciones de control (Break Points). Por medio de este paso se fija la sección de control sobre el curso del arroyo.
- Delimitación de cuenca y subcuencas (Deliniate Elements). Algoritmo que define los límites de la cuenca, así como las subcuencas en la zona de estudio.



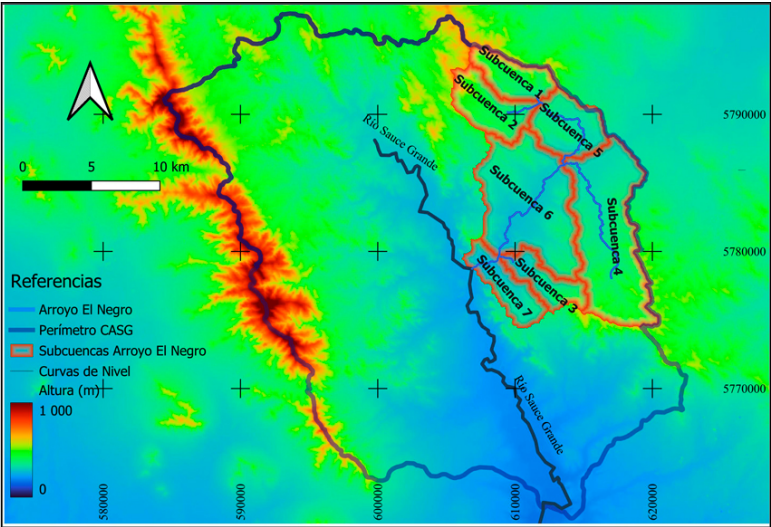


Figura 3. Modelo de terreno usado para la simulación
Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes del IGN

3.2 Precipitaciones

Se adoptaron nueve eventos de precipitación (Tabla 2). Los valores totales, se obtuvieron en base a dos estaciones meteorológicas M1 y M2 (Figura 4). Las precipitaciones caídas en cada subcuenca del arroyo El Negro se determinaron como promedios ponderados del área de influencia de cada pluviógrafo (Figura 4). El área de influencia de cada pluviógrafo fue determinada de la siguiente manera: se une la posición de las estaciones meteorológicas entre sí, trazando luego la mediatriz del segmento de unión. Las intersecciones de esta mediatriz con los límites de las subcuencas, determinan el área de influencia de cada pluviógrafo sobre las distintas subcuencas. Los hietogramas así obtenidos, se ilustran en las Figuras 5 a 9.

Tabla 2. Precipitaciones totales adoptadas para el estudio

| Fecha inicio | Precipitación Total (mm) |
|--------------|--------------------------|
| 11/07/2015 | 20.5 |
| 30/07/2015 | 28.6 |
| 21/09/2015 | 19.7 |
| 01/10/2015 | 40.1 |
| 14/10/2015 | 32.4 |
| 19/10/2015 | 10.6 |
| 07/12/2015 | 29.8 |
| 16/12/2015 | 45.7 |
| 28/12/2015 | 9.8 |

Fuente: Fernández et al. (2022)

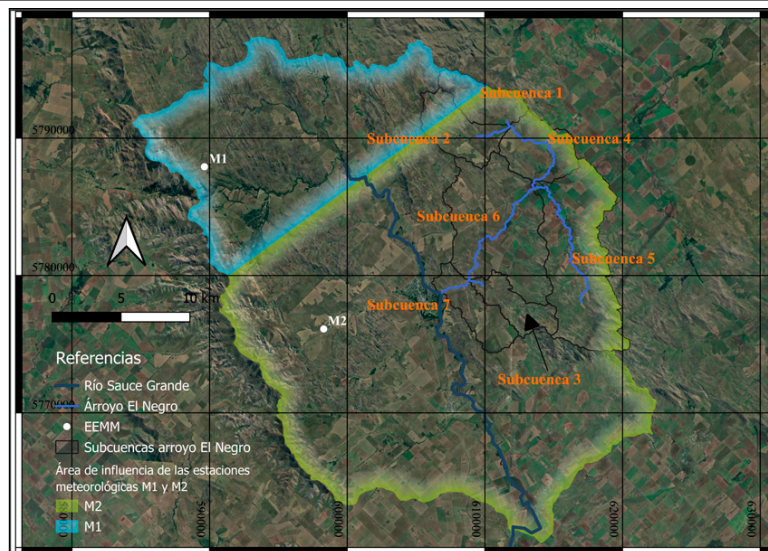


Figura 4. Áreas de influencia de los pluviómetros

Fuente: Elaboración propia en base a (Fernández et al., 2022)

3.3 Implementación de HEC-HMS en la cuenca del arroyo El Negro.

Se introdujeron los parámetros característicos en el software, correspondientes a las 7 subcuencas del arroyo El Negro (Figura 3).

El tiempo de concentración de cada subcuenca fue establecido por medio de la expresión de Kirpich (Ecuación 1) (Chow et al., 1994).

$$T_c = 0.01957 L^{0.77} i^{0.385} \quad (1)$$

Donde T_c en minutos es el tiempo de concentración de la subcuenca en estudio, L es la longitud del curso principal del río, i es la pendiente del curso, todo en unidades del SI. El valor de la pendiente fue estimado como moda de los valores de pendiente de cada subcuenca, mientras que la longitud de los cauces fue obtenida del modelo digital de terreno. Estos valores fueron estimados por algoritmos geométricos de QGIS.

Se adoptó el método del Número de Curva [CN] del Soil Conservation Service [SCS] (Hydrologic Engineering Center, 2025) y una modelación de la vegetación correspondiente a *simple canopy*.

Se adoptó el método de Muskingum para modelar el tránsito de avenidas en la cuenca, el cual exige fijar dos parámetros, K y X (Chow et al., 1994; Cunge, 1969) para considerar el efecto de almacenamiento del cauce en la crecida. En el caso de los tramos en el sector superior de la cuenca de estudio, se propusieron como valores iniciales aproximados, los de (Fernández et al. 2019; 2021; 2022).

La calibración se llevó a cabo a partir de los siguientes parámetros de ajuste:

- CN (Número de Curva del Soil Conservation Service del United States Department of Agriculture (U.S.D.A.) que contempla el tipo de suelo de la cuenca, su humedad inicial y permite calcular la precipitación efectiva de una tormenta y el escurrimiento superficial.
- Abstracción inicial. Evalúa la capacidad de la cuenca de retener y percolar la precipitación. El agua escurre una vez que la lluvia alcanza el valor de la Abstracción Inicial.
- Almacenamiento máximo e inicial. Toma en cuenta la retención de agua por el efecto de árboles, arbustos, pastos y cultivos. Una vez colmada esta capacidad de retención, el agua comienza a caer al suelo. El volumen retenido por la cubierta vegetal es evaporado en su totalidad, si las condiciones meteorológicas lo permiten (Hydrologic Engineering Center, 2025).

Se adoptaron los valores iniciales presentados por [Fernández et al. \(2022\)](#). Luego se procedió a variar los parámetros de ajuste sucesivamente para lograr reproducir los hidrogramas de referencia.

3.4 Medidas de bondad de ajuste

La cuantificación de la bondad de ajuste de las simulaciones se efectuó por medio del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe ([Ecuación 2](#)) ([Nash y Sutcliffe, 1970](#)), cuya expresión es la siguiente:

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

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 3](#)).

Tabla 3. Valores referenciales de Criterio de Nash-Sutcliffe

| 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 |

Fuente: [Molnar \(2011\)](#)

4. Resultados

Las Figuras [5 a\) y b\)](#); [6 a\) y b\)](#); [7 a\) y b\)](#); [8 a\) y b\)](#) y [9](#) muestran los hidrogramas de referencia que fueron recuperados de una simulación previa que abarca la totalidad de la CASG ([Fernández et al., 2022](#)), para la confluencia del arroyo El Negro y el Sauce Grande. Asimismo, dichas figuras superponen los hidrogramas simulados en base a los datos implementados en el Software HEC-HMS y las correspondientes precipitaciones causantes de las crecidas.



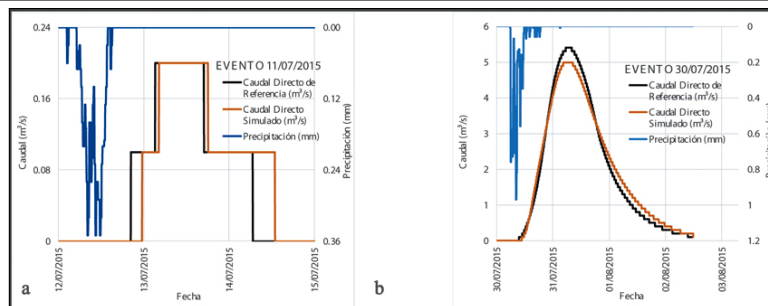


Figura 5 a) Precipitación, hidrogramas de escurrimiento directo de referencia y simulado para la cuenca del arroyo El Negro para el evento del 11/07/2015 y b) Precipitación, hidrogramas de escurrimiento directo de referencia y simulado para la cuenca del arroyo El Negro para el evento del 30/07/2015

Fuente: Elaboración propia en base a [Fernández et al. \(2022\)](#)

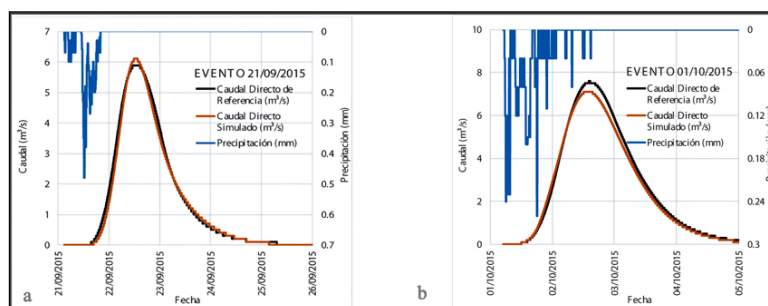


Figura 6. a) Precipitación, hidrogramas de escurrimiento directo de referencia y simulado para la cuenca del arroyo El Negro para el evento del 21/09/2015 y b) Precipitación, hidrogramas de escurrimiento directo de referencia y simulado para la cuenca del arroyo El Negro para el evento del 01/10/2015

Fuente: Elaboración propia en base a [Fernández et al. \(2022\)](#)

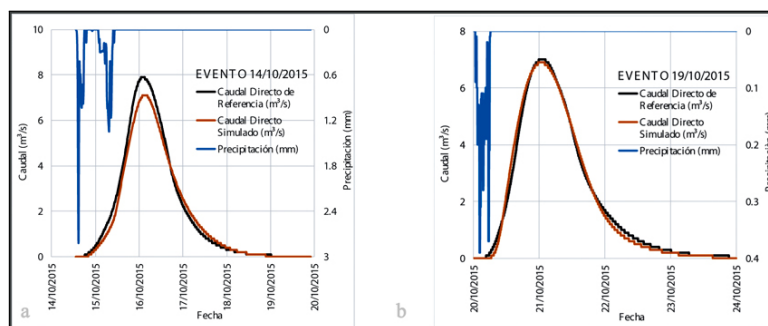


Figura 7. a) Precipitación, hidrogramas de escurrimiento directo de referencia y simulado para la cuenca del arroyo El Negro para el evento del 14/10/2015 y b) Precipitación, hidrogramas de escurrimiento directo de referencia y simulado para la cuenca del arroyo El Negro para el evento del 19/10/2015.

Fuente: Elaboración propia en base a [Fernández et al. \(2022\)](#)



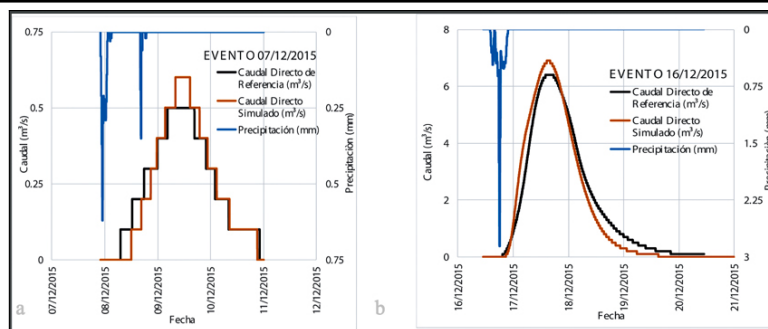


Figura 8. a) Precipitación, hidrogramas de escurrimiento directo de referencia y simulado para la cuenca del El Negro para el evento del 07/12/2015. b) Precipitación, hidrogramas de escurrimiento directo de referencia y simulado para la cuenca del arroyo El Negro para el evento del 16/12/2015.

Fuente: Elaboración propia en base a [Fernández et al. \(2022\)](#)

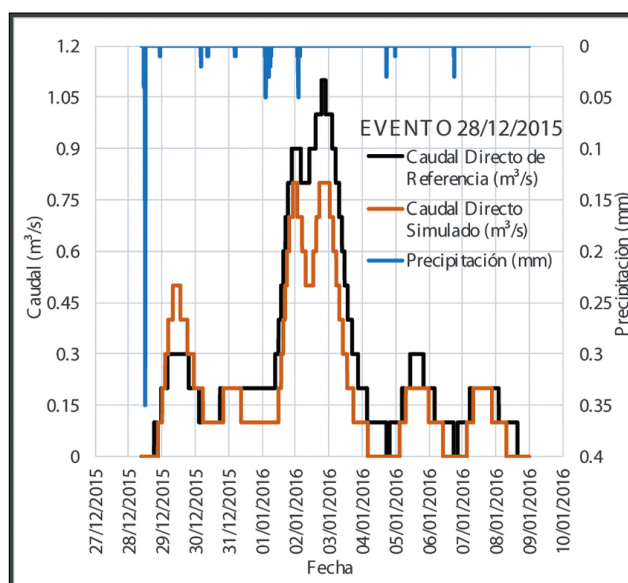


Figura 9. Precipitación, hidrogramas de escurrimiento directo de referencia y simulado para la cuenca del arroyo El Negro para el evento del 28/12/2015.

Fuente: Elaboración propia en base a [Fernández et al. \(2022\)](#)

La [Tabla 4](#) muestra el tiempo de llegada del pico de la crecida. Los mismos corresponden al escurrimiento directo de referencia y simulado. La tormenta correspondiente al 11/07/2015 presenta un desfase importante en las horas de llegada del pico de la crecida. Probablemente, la escasez de la precipitación y el bajo caudal con que la cuenca respondió, sean la causa de la mencionada diferencia. Para mejorar el grado de certeza es necesario disponer de mayor cantidad de mediciones de campo.



Tabla 4. Hora de arribo del pico, para los valores de referencia y simulados.

| Fecha del evento | Hora de llegada del Pico de la crecida de referencia | Hora de llegada del Pico de la crecida de simulada |
|------------------|--|--|
| 11/07/2015 | 03:10 | 09:50 |
| 30/07/2015 | 17:35 | 18:30 |
| 21/09/2015 | 11:05 | 12:40 |
| 01/10/2015 | 14:08 | 13:48 |
| 14/10/2015 | 01:00 | 03:00 |
| 19/10/2015 | 23:45 | 00:40 |
| 07/12/2015 | 04:24 | 11:16 |
| 16/12/2015 | 14:00 | 15:20 |
| 28/12/2015 | 18:42 | 20:44 |

Fuente: Elaboración propia

Las Figuras 10 y 11 muestran los resultados de caudales pico y volúmenes totales escurridos simulados, representados en función de los mismos parámetros de referencia recuperados de Fernández et al. (2022). Una recta a 45° en este tipo de gráfico representa el caso ideal donde el modelo planteado proporciona exactamente los mismos valores que los de referencia.

Cada evento en las Figuras 10 y 11, tiene asociado el coeficiente de bondad de ajuste de Nash-Sutcliffe. Para 7 tormentas el coeficiente evalúa al ajuste como excelente. Las dos restantes, resultan en ajustes muy bueno y bueno respectivamente (28/12/2015 y 11/07/2015) según Molnar (2011) (Tabla 3).

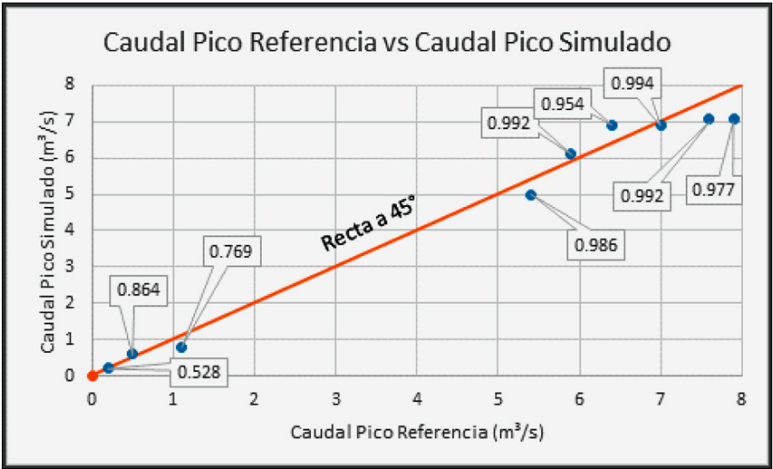


Figura 10. Caudal pico de referencia vs simulado, con sus correspondientes valores de bondad de ajuste Nash-Sutcliffe
Fuente: Elaboración propia

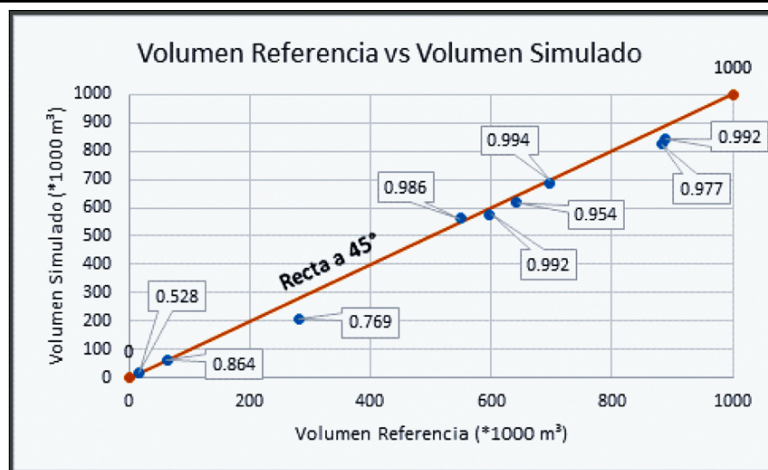


Figura 11. Volúmenes escurridos de referencia vs. simulados, con sus correspondientes valores de bondad de ajuste Nash-Sutcliffe.

Fuente: Fuente: Elaboración propia

Las pendientes de las rectas de regresión en cada una de las Figuras 10 y 11, fueron comparadas estadísticamente con la pendiente de una recta a 45°. Para ambos casos se realizaron los correspondientes test tipo t. Previamente, se requiere determinar si las varianzas de las pendientes son homogéneas. Para ello, se aplicó un test F que evalúa la homogeneidad de las series usadas. El estadístico F responde a la Ecuación 3.

$$F = \frac{S_{b1}^2}{S_{b2}^2} \quad (3)$$

Donde S_{b1}^2 y S_{b2}^2 son las varianzas de las pendientes.

El valor de los estadísticos F para caudales críticos y volúmenes escurridos exceden en mucho el valor Crítico de $F_{(7,7,99\%)} = 4.995$, por lo que nos encontramos ante series no homogéneas. Como consecuencia se debe usar el estadístico t (Ecuación 4).

$$t_{\text{calc}} = \frac{t_1 \frac{S_{b1}^2}{s_{b1}^2} + t_2 \frac{S_{b2}^2}{s_{b2}^2}}{s_{b1}^2 + s_{b2}^2} \quad (4)$$

Donde t_1 y t_2 son estadísticos correspondientes a $n-1 = 8$ grados de libertad de la tabla de t de Student.

La hipótesis nula es que la pendiente de la recta de regresión es estadísticamente igual a la recta de pendiente 1. La Tabla 5 muestra los estadísticos de cada regresión, el valor crítico y la conclusión del test.

Tabla 5. Valores de los estadístico t de las regresiones de Volúmenes escurridos y caudales pico, Valor de t crítico y resultado de los test.

| Estadístico t para los caudales pico | Estadístico t para los volúmenes | t crítico _(16, 99%) | Hipótesis nula para Caudales | Hipótesis nula para Volúmenes |
|--------------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|---|--|
| 0.0855 | 0.0385 | 2.92 | No hay rechazo a la hipótesis nula (pendientes son iguales) | No hay rechazo a la hipótesis nula. (pendientes son iguales) |

Fuente: Elaboración propia

Como consecuencia, la pendiente de regresión de los caudales de pico y volúmenes escurridos son estadísticamente iguales a una recta a 45° con un nivel de significancia del 1%.

Es por ello que, dentro del rango de tormentas estudiadas, el modelo desarrollado para la cuenca del arroyo El Negro usando el programa HEC-HMS, representa adecuadamente el comportamiento precipitación-escurritia. Se sustenta de esta manera, la hipótesis planteada, por la cual el HEC-HMS es un software adecuado



para el desarrollo de modelos en la zona de estudio.

5. Conclusión

La hipótesis básica planteada quedó demostrada ya que las simulaciones realizadas con el modelo generado representan adecuadamente todos los fenómenos de precipitación-escorrentía de la zona, dentro del rango de los eventos disponibles. De esta conclusión, el programa HEC-HMS es adecuado para generar modelos en la zona de estudio. Es necesario disponer de más datos para mejorar la performance del modelo y aumentar el rango de caudales y volúmenes escurridos logrados al momento.

Los objetivos planteados fueron alcanzados. Se pudo usar el software HEC-HMS para simular cada uno de los eventos de precipitación-escorrentía medidos en campo. Se determinaron valores de caudales en el pico, volumen de escorrentía y hora de llegada del pico de crecida para cada uno de los eventos estudiados en la cuenca del arroyo El Negro. Los valores estimados fueron comparados y usados para ajustar los parámetros hidrológicos en todos los eventos considerados, dando ajustes entre excelentes a buenos.

Valores simulados de caudal máximo y volumen escurrido pueden ser adoptados como parámetros de diseño de estructuras hidráulicas tales como, desagües pluviales, defensas, reservorios, alteos de caminos, alcantarillado, etc. Por su parte, los tiempos de llegada de crecidas aportan al diseño de sistemas de alertas tempranas. Además, los hidrogramas producidos por las simulaciones, conforman las condiciones de borde de programas de modelado hidrodinámico (ejemplo HEC-RAS), permitiendo evaluar condiciones de inundación, proyectos de reservorios, generación de embalses, determinación de líneas de ribera, entre otras aplicaciones. Por lo tanto, el modelo presentado presenta parámetros hidrológicos básicos que permiten formular soluciones con apoyo científico.

El modelo desarrollado para la subcuenca del arroyo El Negro usando HEC-HMS, responde al proceso natural de precipitación-escorrentía para los rangos de tormentas analizadas. Este es un aporte original al conocimiento de cuenca estudiada, ya que no se conocen antecedentes de simulaciones ni validaciones en esta cuenca.

El modelo planteado puede mejorarse en base a nuevas mediciones de caudal y precipitación, modelo de terreno, etc. Esto beneficiaría la calidad de los resultados obtenidos de la cuenca en estudio.

6. Agradecimientos

A la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur (UNS), quien financió el presente estudio con fondos correspondientes al Proyecto de Investigación "Hidrología, Calidad y Modelización. Gestión Integral de los Recursos Hídricos en Cuencas del Sur de la Región Pampeana. Fase 2".

Referencias bibliográficas

- Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill Interamericana.
- Campo, A.M., Gil, V., Ybarra Alcaráz, G. y Volonté, A. (2016). Tipificación Morfológica de Cursos Principales. Cuenca del Arroyo El Negro, Sistema de Ventania, Argentina. *Boletín Geográfico Año XXXVII*, (38), 49-60. <https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/1363/pdf>
- Cunge, J. A. (1969). On the Subject of a Flood Propagation Computation Method (Muskingum Method). *Journal of Hydraulic Research*, 7(2), 205-230. <https://doi.org/10.1080/00221686909500264>
- Fernández, S., Pérez, D., Brandizi, L., Serralunga, M., Weis, C. y Abalo, P. (2019). 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). *Revista Universitaria de Geografía*, 28 (2), 11-32. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-42652019000200002
- Fernández, S., Pérez, D., Weis, C., Flores, M. A. y Abalo, P. (2021). Validación de simulaciones de tormentas en el Sector Superior de la Cuenca Alta del Río Sauce Grande (Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 30(1), 43-76. <https://revistas.uns.edu.ar/rug/article/view/4024>
- Fernández, S. N., Pérez, D. E., Weis, C. F. y Flores, M.A. (2022). Calibración de simulaciones de crecidas de la cuenca alta del río Sauce Grande, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Cuadernos del CURIHAM*, 28, 25-42. <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.179>
- Gil, V. (2010). *Hidrogeomorfología de la cuenca alta del río Sauce grande aplicada al peligro de crecidas* [Tesis doctoral en Geografía. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca]. https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/2069/TESIS_GIL.pdf
- Gil, V. (2011). Geomorfología fluvial del Arroyo El Negro, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Revista Universitaria de Geografía*. 20(1), 151-169. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-42652011000100007
- Hydrologic Engineering Center (2025). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Reference Manual*. <https://www.hec.usace.army.mil/confluence/hmsdocs/hmsum/4.5/subbasin-elements/selecting-a-canopy-method>
- Instituto Geográfico Nacional [IGN] (s/f). *Modelo de elevación digital*. <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>
- Konopko, S., Mazzucconi S., López Ruf, M. y Bachmann, A. (2009). Los heterópteros acuáticos y semiacuáticos del Parque Provincial Ernesto Tornquist (Provincia de Buenos Aires, República Argentina). *Revista de la Sociedad de Entomología Argentina*, 68(3-4), 271-282. https://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0373-56802009000200004
- 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. https://www.researchgate.net/publication/228707759_Alimentacion_de_la_ictiofauna_del_rio_Sauce_Grande_provincia_de_Buenos_Aires_Argentina
- Molnar, P. (2011). *Calibration. Watershed Modelling, SS 2011*. Institute of Environmental Engineering, ETH Zürich.
- 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. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Rodríguez, G. M. (2022). *Cartografía de radios censales de Argentina corregidos, completados y estandarizados de 1991, 2001, 2010 y 2022*. Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas. (dataset). <http://hdl.handle.net/11336/149711>
- Schefer, J. C. (2004). *Los recursos hídricos y el abastecimiento de agua. Región de Bahía Blanca*. CEPADE (Centro de Estudios y Participación para el Desarrollo local y Regional).
- Williams, J., Pietro, D. & Vera, D. (2023). *Anfibios y Reptiles de las sierras de Ventania*. Ediciones LBN. https://www.researchgate.net/publication/368328436_Anfibios_y_Reptiles_de_las_sierras_de_Ventania/link/63e26fd9642523756393f9d8/download?_tp=eyJjb250ZXh0Ijp7InBhZ2UiOiJwdWJsaWNhdGlvbilSInByZXZpb3VzUGFnZSI6bnVsbH19

