



Reconstrucción hidrológica de crecidas en base a datos históricos en la cuenca alta Arroyo Napostá Grande mediante simulación. (Buenos Aires, Argentina)

Hydrological reconstruction of floods based on historical data in the upper Arroyo Napostá Grande basin through simulation. (Buenos Aires, Argentina)

Fernández, Sandra N.¹ 

Pérez, Daniel E.² 

Abalo, Pablo O.³ 

Flores, Miguel A.⁴ 

¹ Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina. Comisión de Investigaciones Científicas, La Plata, Argentina. sandrafernandezpretini@gmail.com

² Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina. perezdanielenrique@gmail.com

³ Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina. pabalo@uns.edu.ar

⁴ Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS), Bahía Blanca, Argentina. miguel.flores@uns.edu.ar

Recibido: 11/07/2024

Aceptado: 27/11/24

RESUMEN

El presente trabajo recopila datos históricos que fueron procesados y simulados de manera de poder conocer la magnitud de las crecidas. Se utilizó el programa HEC-HMS, implementando el método del Soil Conservation Service. Los parámetros como Número de curva y abstracción inicial, fueron calibrados solo donde se disponía de información suficiente. El resto fue ajustado por medio de los picos de crecidas disponibles en la información original. Los resultados de las simulaciones de 14 tormentas, presentaron una gran concordancia con estudios anteriores en cuencas vecinas y con estimaciones del número de curva satelital, disponible en internet. Se alcanzaron los objetivos planteados: calibración, caracterización de parámetros y puesta en valor de la serie de datos hidrometeorológicos disponibles.

Palabras Clave: Crecida; HEC-HMS; Simulación Hidrológica

ABSTRACT

This paper compiles historical data which were processed and simulated in order to determine the magnitude of the floods. HEC-HMS program was used, implementing the Soil Conservation Service method. Some parameters, such as Curve Number and initial abstraction, were calibrated only where sufficient information was available. The rest was adjusted using the available flood peaks in the original data. The

simulation results of 14 storms showed a high degree of agreement with previous studies in neighboring basins and with estimates of the satellite-derived curve number available online. The stated objectives were achieved: calibration, characterization of parameters and enhancement of the series of available hydrometeorological data.

Key words: River flood; HEC-HMS; Hydrologic Simulation

1. Introducción

Los primeros pobladores (1828 a 1889) contaron con el arroyo Napostá Grande y Maldonado como un recurso básico para la supervivencia (Mastrandrea y Perez, 2020). La llegada del ferrocarril a Bahía Blanca en 1889 hasta 1948 produjeron condiciones favorables para el crecimiento económico de la mano del ferrocarril y del sistema portuario. Las vías férreas y los arroyos Maldonado y Napostá se convirtieron en barreras para la expansión urbana (Bróndolo et al., 1994; Ardissono, 1998). Las vías provocan una redistribución del escurrimiento natural ya que sus terraplenes actúan como diques que interfieren con el escurrimiento natural (Torrero, 2005). Entre marzo de 1933 y abril de 1944 se produjeron lluvias que provocaron anegamientos, inundación de viviendas y no solo pérdidas materiales sino humanas (Fuentes, 1994; Schefer, 2004). A partir de 1950 se ejecutan las obras del canal Maldonado, proyectadas y calculadas por Félix Laghman, Ingeniero de la Dirección de Hidráulica de la Provincia de Buenos Aires. Las obras, que aún están operativas, solo son capaces de evacuar la mitad del caudal erogado por la cuenca en los años 1933 al 1944. A largo plazo y para solucionar el riesgo generado por lluvias de mayor recurrencia, debía considerarse la construcción de un embalse en Puente Canessa, lugar que regula la cuenca alta y media del arroyo (Universidad Nacional del Sur y Comisión de Investigaciones Científicas, 1990). En la década de 1970 la consultora IATASA realizó un estudio hidrológico en el cual propone la construcción de una represa en Puente Canessa para despejar los peligros de lluvias de mayores recurrencias en la cuenca. Esta obra no se ha llevado a cabo aún.

Uno de los problemas más importantes para la investigación y desarrollo del conocimiento de la hidrología de las cuencas de sudoeste de la Provincia de Buenos Aires es sin duda, la falta de registros hidrometeorológicos. Las bases de datos presentan vacíos en la información, no están disponibles o son muy antiguas. Es por ello que, en estas circunstancias, los datos existentes deben ser aprovechados al máximo.

En la Cuenca alta del Arroyo Napostá Grande, se han producido precipitaciones muy abundantes, las que repercutieron en la zona urbana de Bahía Blanca. Un ejemplo se dio en el 8 de abril de 1944, cuando se registraron alrededor de 170 mm de precipitación, generándose una crecida en la cuenca Alta de 220 m³/s de caudal pico (Carrica, 1998). Durante este evento se produjeron víctimas fatales en la zona además de cuantiosos daños y fue uno de los motivos de la posterior ejecución de importantes obras hidráulicas para prevenir futuras inundaciones, a fines de la década de 1940. A pesar de esta circunstancia, el monitoreo de los recursos hídricos de la zona, no se ha mejorado y solo se cuenta con un escaso conjunto de registros.

Los exiguos datos disponibles, encierran mucha información aún vigente, aunque tengan varias décadas de haberse obtenido. Por ello estas resultan invaluable para las circunstancias actuales donde las bases de datos escasean, son insuficientes o inaccesibles.

No se ha encontrado ningún estudio de simulaciones ni validaciones de lluvias-escorrentías para la cuenca alta del Arroyo Napostá Grande en la bibliografía consultada. Además, son escasos los datos de precipitaciones, caudales, etc. a excepción de Carrica (1998) y Lexow (2002). Sin embargo, cuencas vecinas, que comparten sus nacientes en el Sistema de Ventania, fueron estudiadas y simuladas por medio de técnicas similares (Brandizi, et al., 2013; Espósito, 2014; Fernández et al., 2019; 2021; 2022; 2023).

Los objetivos de este trabajo son:

- Calibrar una tormenta en base a su hidrograma de caudales medidos y la reconstrucción de su hietograma

y calibrar 13 tormentas a partir de su caudal pico de crecida y su hietograma reconstruido.

- Caracterizar estadísticamente los valores de Número de Curva [CN] del Soil Conservation Service [SCS] simulados y comparar con valores areales disponibles en Internet.

2. Zona de estudio y antecedentes

El Arroyo Napostá Grande escurre en dirección norte-sur predominantemente y se ubica al sudoeste de la Provincia de Buenos Aires. Nace en las estribaciones sudorientales de los Sistemas de Ventania y Cura Malal, atraviesa la ciudad de Bahía Blanca y desemboca en el Estuario de Bahía Blanca (Figura 1a y 1b). Al este limita con la cuenca del río Napostá Chico, y al oeste con las cuencas del Sauce chico y Saladillo de García.

El conocimiento de la hidrología de la cuenca alta del Arroyo Napostá Grande es importante debido a:

- Limita y regula el funcionamiento de la red de drenaje de la cuenca del Arroyo Napostá Grande, a pesar de tener solo el 16% de área total.
- Es la principal generadora de avenidas del Arroyo Napostá Grande
- Es el principal sector de recarga de los acuíferos de la región.
- Representa una fuente de agua potencial para el consumo humano de agua de la ciudad de Bahía Blanca y alrededores.

Las temperaturas dentro de la zona de estudio tienen un promedio anual de 14.6°C, siendo el promedio de las mínimas mensuales de 6.7°C registradas en los meses de julio, y la máxima promedio mensual de 23°C registrada en los meses de febrero (Carrica, 1998).

Las precipitaciones medias de la cuenca alta del Arroyo Napostá grande rondan los 758 mm anuales siendo las estaciones lluviosas la primavera y el otoño (Carrica, 1998). Los vientos predominantes son del Norte y noroeste con velocidades medias anuales de 9 km/h, registrándose mayores intensidades y frecuencia durante el otoño y la primavera.

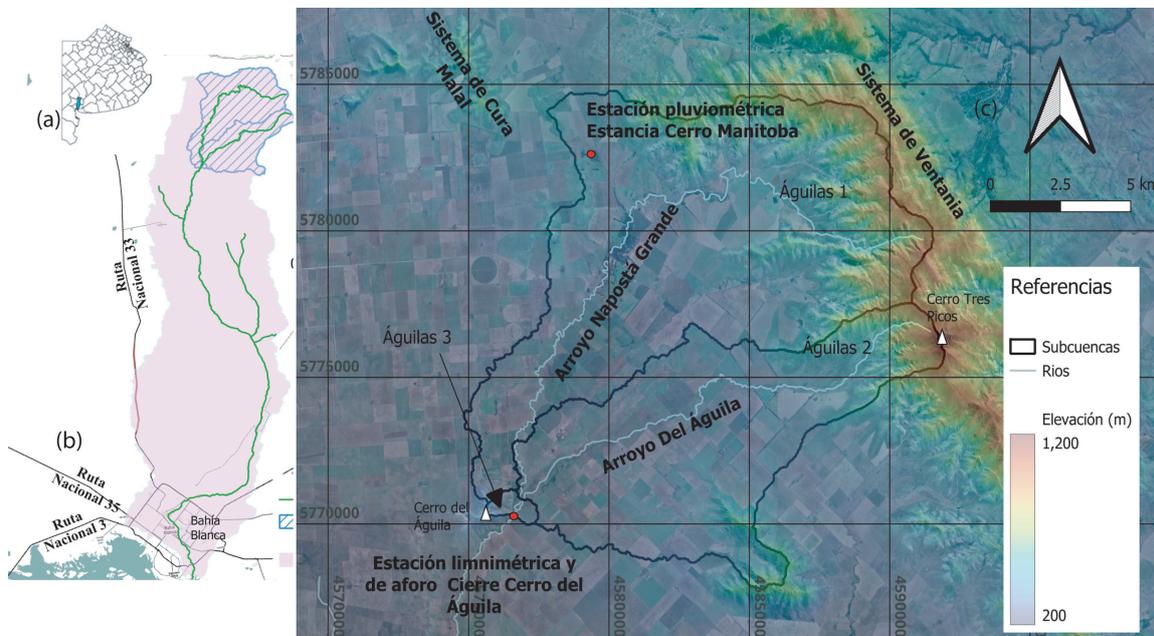


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia en base a cartas e imágenes satelitales del Ministerio de Defensa. Instituto Geográfico Nacional (s.f.).
<https://www.ign.gov.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>

El área de estudio del presente trabajo es la cuenca alta del Arroyo Napostá Grande, cuyo cierre está en el desfiladero entre los cerros del Águila, tiene un área de 188 Km² y la longitud del curso principal es de 30 km (Figura 1c). Recibe además el aporte de los afluentes Arroyo del Águila (17.6 Km de longitud) y El Zanjón, cuyos caudales son intermitentes y el módulo en el Cerro del Águila es de 0,392 m³/s (Carrica, 1998). La máxima altura se produce en el cerro Tres Picos (1243 msnm) y en el cierre de la cuenca alcanza 240 msnm (Carrica, 1998) (Figura 1c).

La cuenca motivo del presente estudio se subdivide a su vez en tres subcuencas: Águilas 1, Águilas 2 y Águilas 3, que son unidades de escurrimiento que aportan a la sección de cierre (Figura 1c). Las cumbres de los cerros presentan afloramientos de rocas que representan un 30% del área de la cuenca, la cual fue considerada impermeable (impervious) (Carrica, 1998). Fuera de la zona de las sierras, los suelos dominantes en el área de la cuenca se han desarrollado sobre sedimentos recientes por acción primordialmente eólica. Los suelos son someros, limitados en profundidad por las rocas paleozoicas. Son suelos de textura franco arenosa a franco arcillosa, bien drenados, sin alcalinidad y no salinos.

La vegetación predominante es la estepa de gramíneas, formadas por grandes matas de *Stipa spp*, entre las cuales el suelo queda desnudo gran parte del año. Otras especies que se encuentran en la zona son las *Discaria logispina*, *paja colorada*, *Festuca ventanícola*, *Stipa pampeana* y *Stipa juncoide* entre otras. Un carácter general de la vegetación de la zona es la escasez de árboles, se los encuentra en cascós de estancias plantados por el hombre a modo de reparo. Se distinguen distintas especies de eucaliptos, plátanos, paraísos, cipreses, álamos, tuyas, tamariscos, sauces, etc. La práctica agrícola trae como consecuencia la destrucción de la vegetación autóctona, resultando a su vez los campos invadidos por malezas como el cardo ruso (*Salsola kali*), alfalfa criolla (*Kochia scoparia*) y cardo (*Carduus acanthoides*). Los cultivos más frecuentes son de trigo, girasol, avena, cebada y sorgo, con una práctica rotativa, entre las que se suele incorporar períodos de uso ganadero (Lexow, 2002).

3. Metodología

3.1. Modelo de terreno

Para definir el modelo de terreno se utilizaron los modelos de elevación [MDE] de 30x30 m del Instituto Geográfico Nacional [IGN] correspondientes a las imágenes tipo raster 3963-5 y 3963-6 (Ministerio de Defensa. Instituto Geográfico Nacional, s.f.). Por medio de las herramientas GIS (Geographical Information System) implementadas en HEC-HMS versión 4.1.1 se procedió a mejorar el modelo de elevación por medio de la aplicación de las siguientes herramientas en forma secuencial (Figura 2):

- Preprocesamiento de sumideros (Preprocess Sinks). Aplica un algoritmo que mejora la calidad del MDE.
- Preprocesamiento del drenaje (Preprocess Drainage). Este algoritmo calcula la dirección y acumulación del flujo para cada celda de datos de la imagen raster.
- 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.

Una vez delimitada la cuenca y todos sus elementos se procedió a chequear los resultados obtenidos en con las cartas topográficas del Ministerio de Defensa. Instituto Geográfico Nacional, s.f., Escala 1:50.000, correspondientes a Sierra de la Ventana (equidistancia de 25 m); Sierra de la Ventana, Tornquist, Tres Picos

y Estación Napostá con equidistancia 10 m.

3.2. Datos de hidrométricos

Para el presente trabajo se cuenta con una serie de eventos cuyos datos consignan: la fecha, precipitación total acumulada, Caudal de pico, y tiempo de recesión (Tabla 1) (Carrica, 1998).

Tabla 1. Datos de precipitación, caudal pico, fecha y tiempo de recesión para Cerro del Águila. Evento del que se conoce el hidrograma de caudales completo en negrita itálica.

Fecha	Caudal Pico (m ³ /s)	Tiempo recesión (días)	Pluviometría (mm)
22/02/1936	10	7	69
08/05/1937	30	15	54
21/07/1939	13.4	62	51.5
12/07/1941	62	25	100
11/08/1941	12.6	38	63.5
07/10/1942	8.1	50	34
01/07/1943	24	25	38
08/04/1944	220	25	196
06/05/1944	25	126	54.5
18/10/1988	2	20	25
16/05/1989	16	15	92
01/06/1989	3	25	18
15/02/1990	0.3	32	13
31/12/1990	1.9	27	35

Fuente: Extraído de Carrica (1998)

3.2.1. Caudales

Los caudales pico mostrados en (Tabla 1) fueron tomados de la serie de la cuenca superior del Arroyo Napostá Grande (cierre en Cerro del Águila) (Figura 1c), de la estación de aforo perteneciente a Agua y Energía de la Nación, que funcionó ininterrumpidamente entre 1935 y 1945, lográndose completar 9 años de registros diarios (1936-1944). A esta serie se le han agregado 3 años completos (1988 a 1990) de registros horarios provenientes de un limnómetro digital instalado en el antiguo lugar de emplazamiento de la estación de Agua y Energía, ubicada entre los cerros Del Águila y Aguilucho, en el denominado cierre de la cuenca superior. Se procedió a ubicar una sección adecuada, la cual se relevó topográficamente. Se instaló el limnógrafo de registro horario continuo marca ILN modelo LF203. El procesamiento de la información limnimétrica generada permitió a través del empleo de Chézy-Manning (Linsley et al, 1986) calcular el caudal instantáneo. Además, se implementaron aforos con molinetes hidrométricos periódicos. Los parámetros geométricos de la sección (pendiente del cauce, sección transversal y radio hidráulico) se cuantificaron en campo mediante nivelación óptica.

3.2. 2 Precipitaciones

Los datos pluviométricos mostrados en (Tabla 1), pertenecen a la estación pluviométrica ubicada en la Estancia Cerro Manitoba (X: 4579496, Y: 5782509, UTM 20S) altitud: 370 msnm (Figura 1c).

Al no disponer del hietograma de cada tormenta, se procedió a adoptar una duración de los eventos de 10 horas (aproximado al mayor tiempo de concentración de las subcuencas). Con la duración y la precipitación total, se aplicó el método de Huff (Huff, 1967) para generar los hietogramas. El método se basa en estadísticas hechas sobre tormentas reales, cuyos duración y precipitación están normalizadas, y determina la distribución de las lluvias en intervalos más pequeños para distintas probabilidades. Se utilizó la curva correspondiente al 2^{do} cuartil, 50% probabilidad de ser superada, para cuencas mayores a 5 millas cuadradas (129 km²) (Figura 2).

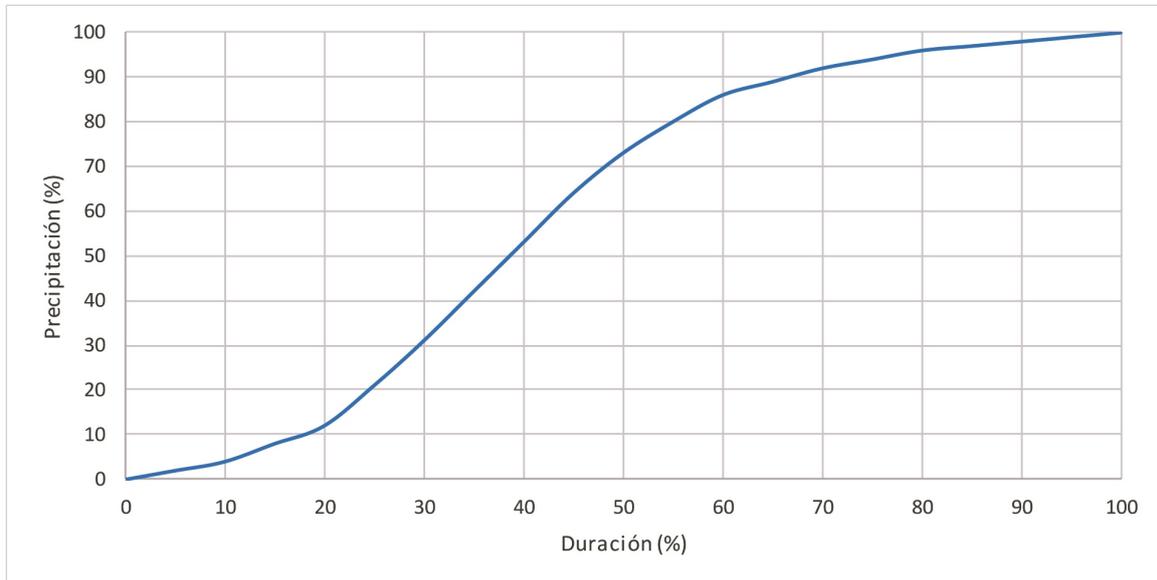
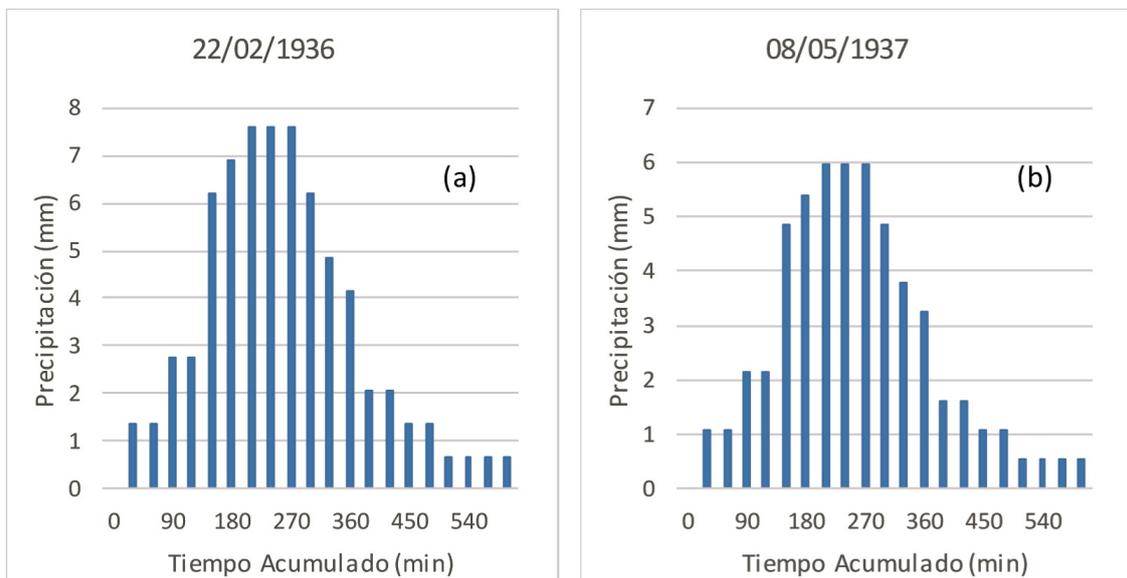
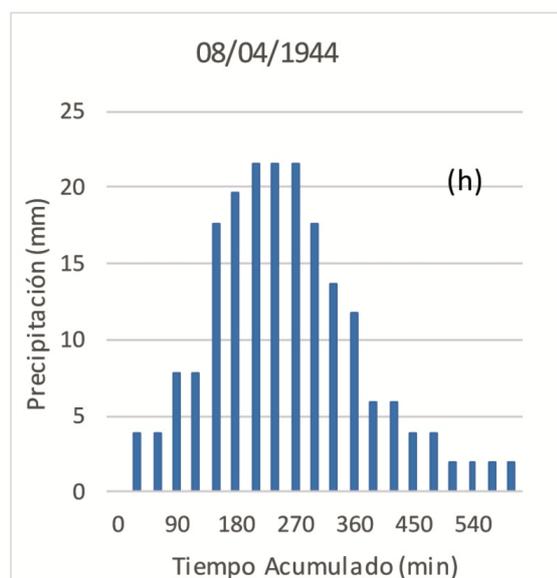
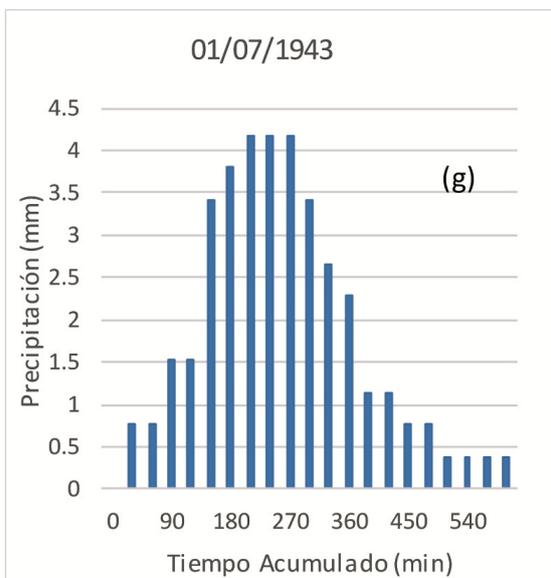
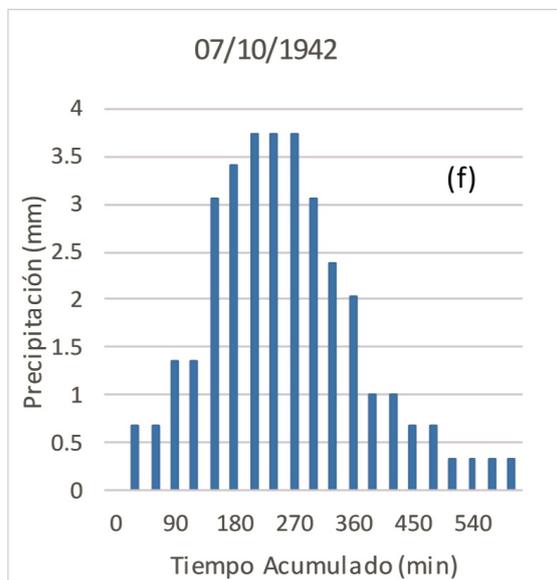
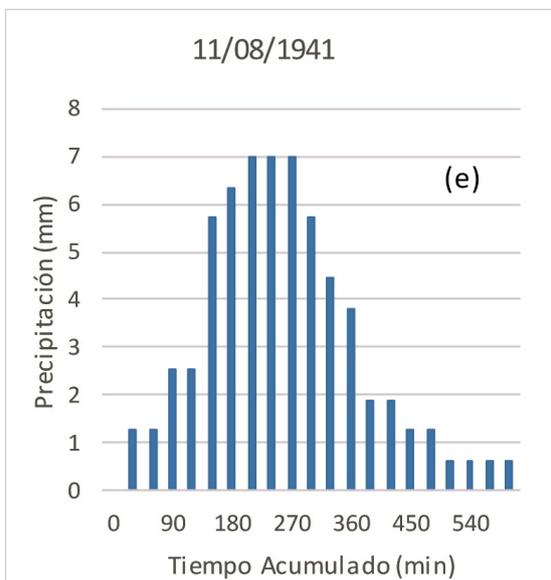
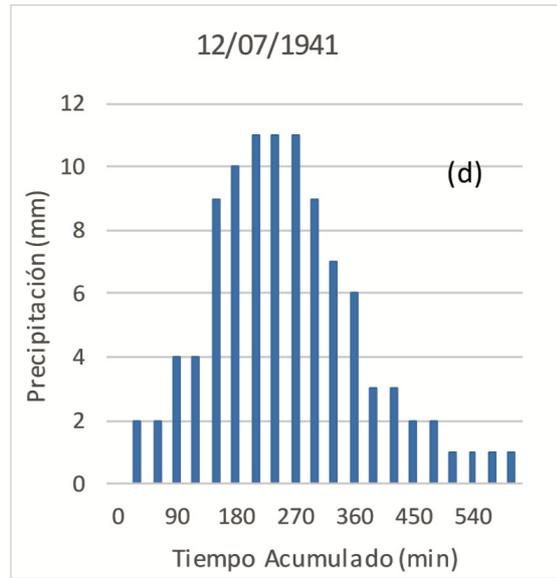
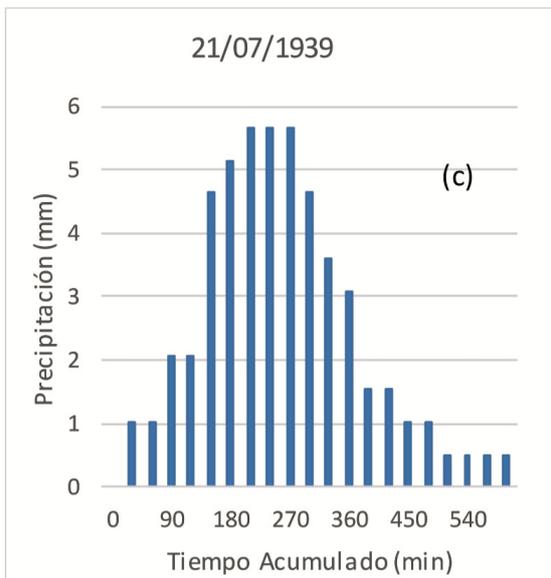


Figura 2. Curva de Huff correspondiente al 2^{do} cuartil para cuencas de áreas mayores a 129 km².
Fuente: Elaboración propia en base a tablas de Huff (1967).

Las Figura 3 (a-b, c-d, e-f, g-h, i-j, k-l, m-n) muestran los hietogramas generados por el método de Huff (1967) para 10 tormentas seleccionadas para este trabajo.





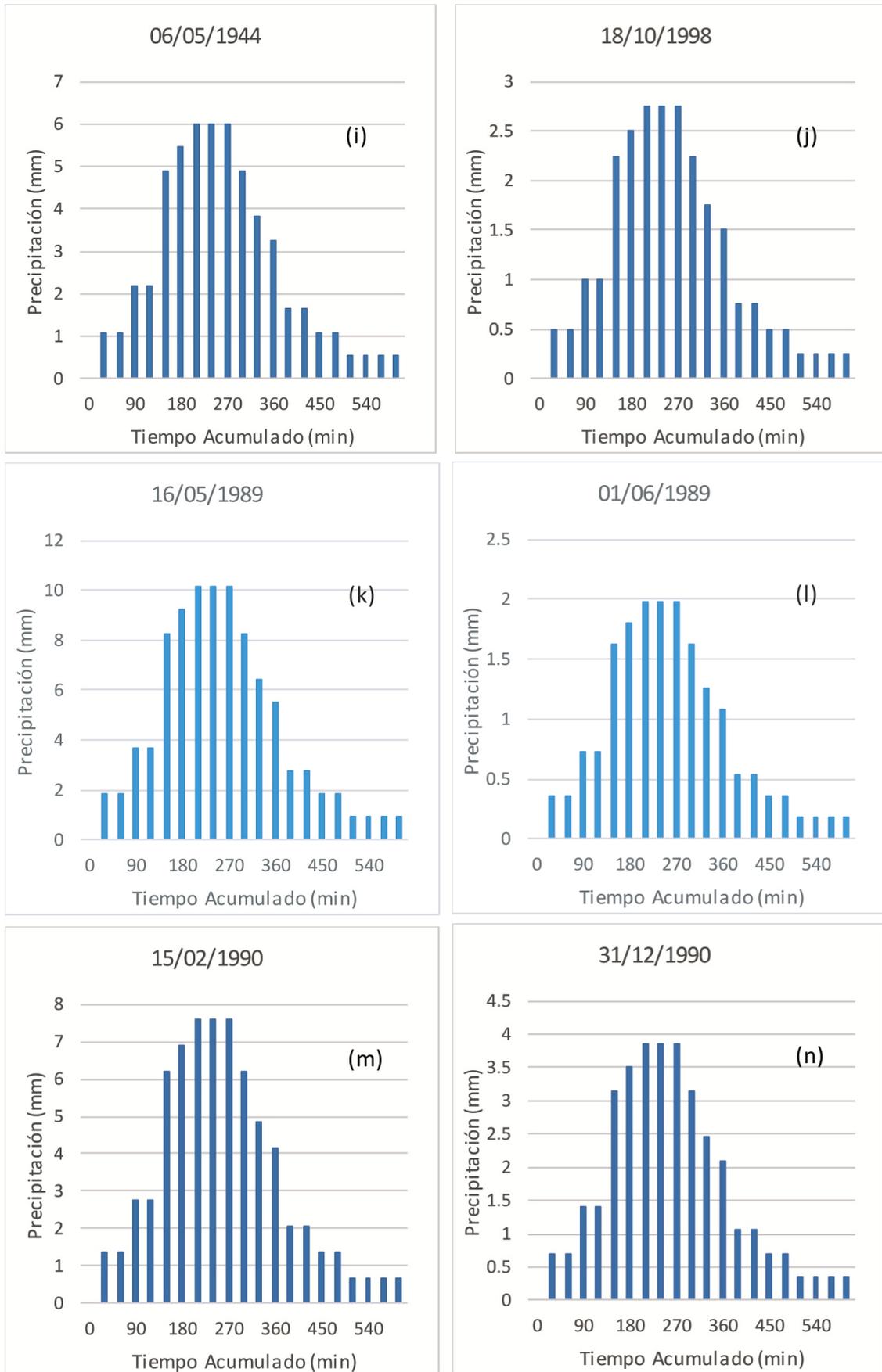


Figura 3. Hietogramas generados para las tormentas indicadas. (Método de Huff tormentas del 2^{do} cuartil y 50% de probabilidad de ser superada)

Fuente: Elaboración propia en base a tablas de Huff (1967).

3.3. Calibración del evento de 16 de mayo de 1989

Se cuenta además con un hidrograma medido para la tormenta del 16 de mayo de 1989 (Figura 4) (Carrica, 1998). El mismo fue digitalizado y sus valores interpolados. En la (Tabla 1), los datos de precipitación correspondientes se marcan con sombreado verde.

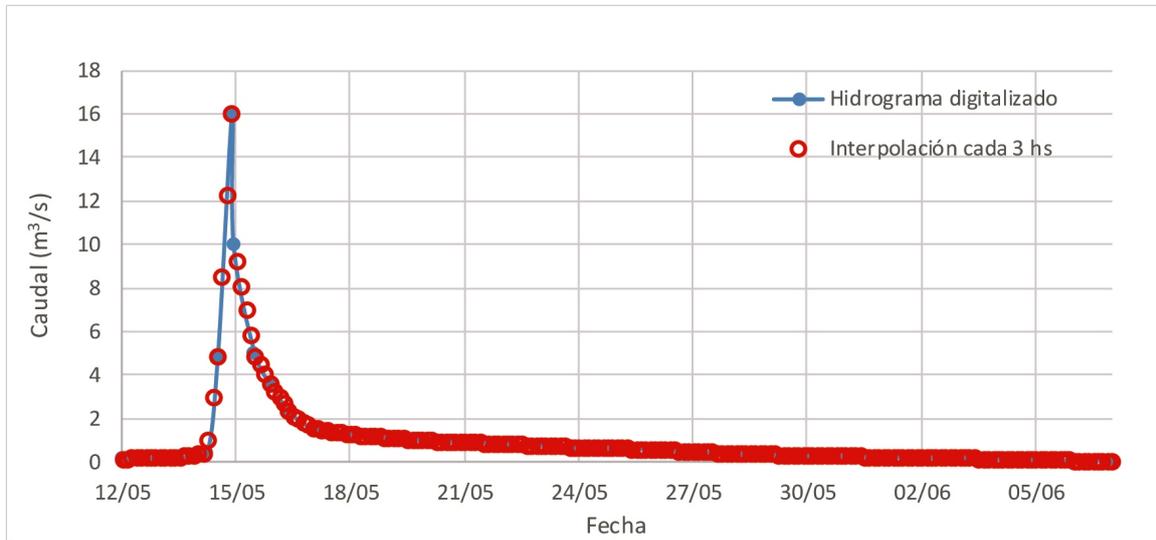


Figura 4. Hidrograma digitalizado e interpolado de la tormenta del 16 de mayo de 1989.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Carrica (1998).

El hidrograma medido contiene el escurrimiento base sumado al superficial. Se procedió entonces a extraer el flujo básico del hidrograma obteniéndose así el hidrograma de flujo superficial observado [HFSO]. Esta tarea se llevó a cabo por medio de un filtro estocástico aplicado a la serie de caudales medidos.

El algoritmo numérico adoptado es el de un parámetro (Ecuación 1) (Gómez-Isidro y Gómez-Ríos, 2016).

$$Q_{b(i)} = \frac{K}{2-K} Q_{b(i-1)} + \frac{1-K}{2-K} Q_{(i)} \quad (1)$$

Donde $Q_{b(i)}$ es el caudal base en cada tiempo i , K es el factor de agotamiento de la curva, $Q_{(i)}$ es el caudal observado en cada instante i . El factor de agotamiento de la curva se obtiene por medio de la (Ecuación 2).

$$Q_t = Q_0 e^{-kt} \quad (2)$$

Donde k (horas^{-1}), la constante de recesión, la cual se obtiene por medio de una regresión lineal de los valores logarítmicos del caudal en el tiempo, a partir de que se inicia la recesión. El algoritmo numérico requiere de un solo parámetro: K que responde a la (Ecuación 3) y representa las condiciones físicas de la cuenca y propiedades del hidrograma (Gómez-Isidro y Gómez-Ríos, 2016).

$$K = e^{-k} \quad (3)$$

La cuantificación de la bondad de ajuste del modelo se efectuó por medio del índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe mostrado en la (Ecuación 5) (Nash y Sutcliffe, 1970).

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i^{SIM} - Q_i^{OBS})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i^{OBS} - \bar{Q}_i^{OBS})^2} \quad (5)$$

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 2).

Tabla 2. 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: Extraído de Molnar (2011).

3.4. Eventos sin sus correspondientes hidrogramas asociados

Se cuenta con datos de varias tormentas (Tabla 1), pero de ninguna de ellas, excepto la del 16 de mayo de 1989, se conocen los correspondientes hidrogramas asociados. Por ende, las tormentas simuladas presentan como único valor de cierre, el caudal de pico máximo, el cual se obtiene de sumar el caudal base más la escorrentía superficial. Usando la Ecuación 1 se desprende la (Ecuación 4):

$$Q_{b(i)} = KQ_{b(i-1)} + (1 - K)Q_{e(i)} \quad (4)$$

Donde $Q_{e(i)}$ es el caudal superficial simulado para el instante i . De esta manera, la simulación debe iterarse sucesivas veces, hasta lograr que el caudal pico medido se aproxime la suma del caudal simulada más su correspondiente caudal básico.

3.5. Implementación de las simulaciones con HEC-HMS

Se ha implementado el HEC-HMS 4.12 creado por el Hydrologic Engineering Center del U. S. Army

Corps of Engineers para la simulación de la cuenca superior de Arroyo Napostá Grande. En este caso en particular, se adopta en método del Soil Conservation Service [SCS] del United States Department of Agriculture [U.S.D.A.], por medio del diagrama unitario del SCS, así como el número de curva [CN] que toma en cuenta la infiltración y humedad antecedente y calcula la escorrentía por exceso de lluvia (Hydrologic Engineering Center, 2016).

Se adoptó el método de Muskingum para el tránsito de avenidas entre las subcuencas, el cual exige fijar dos parámetros, K y X , en cada tramo para considerar el efecto de almacenamiento del cauce en la crecida. Se propusieron como valores iniciales aproximados a los obtenidos en Fernández et al. (2019; 2021) para cuencas de la zona serrana. Se considera una zona de Impervious del 15% del área total (Carrica, 1998).

Asimismo, los valores de los tiempos de concentración fueron adoptados en base a Kirpich (Chow et al., 1994), y sus valores permanecieron constantes en todas las tormentas.

3.5.1. Simulación y calibración de la tormenta del 15 de mayo de 1989 (con hidrograma)

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

- CN (Número de Curva del SCS que contempla el tipo de suelo de la cuenca y su humedad inicial y permite calcular la precipitación efectiva de una tormenta y el escurrimiento superficial (Hydrologic Engineering Center, 2000; Hydrologic Engineering Center, 2016).
- Superficie. Toma en cuenta los desniveles que quedan rellenos de agua y no escurren hacia el río (Sumideros). Los volúmenes así captados son, o bien evaporados o infiltrados. Esta porción de la precipitación toma importancia especialmente cuando suceden durante o después de sequías. Además, la cuenca es la zona de recarga de los acuíferos lo que indica una fuerte infiltración en la zona de pedemonte (Carrica, 1998).
- Abstracción inicial. Evalúa la capacidad de la cuenca de retener y percolar la precipitación. El agua escurre solo 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. Este volumen es evaporado en su totalidad si las condiciones meteorológicas lo permiten.

3.5.2. Ajuste de valores de caudal pico para las tormentas sin hidrogramas asociados

Se procede a ajustar los parámetros antes mencionados dejando el resto de los valores de la cuenca fijos. Para ello se procede a simular el caudal superficial, luego se corre el filtro estocástico que agrega el flujo base. Con estos valores se compara el caudal máximo de pico simulado y medido. Esta operación se repite hasta lograr un buen valor de ajuste de caudal de pico aceptable.

4. Resultados

4.1. Calibración del evento del 15 de mayo de 1989

Se adopta el valor de coeficiente de decaimiento de la crecida, estimado por Carrica (1998), $k = 0.0765$ horas⁻¹. La (Figura 5) muestra el HFSO de la tormenta del 15 de mayo de 1989 junto a la simulación obtenida.

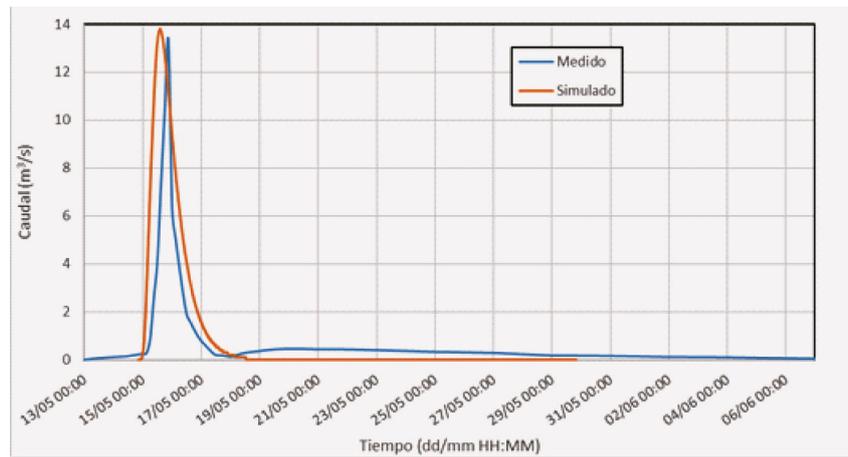


Figura 5. Hidrogramas simulado y medido para el evento del 16/05/1989.

Fuente: Elaboración propia en base a datos de Carrica (1998).

El coeficiente de eficiencia de ajuste de Nash-Sutcliffe para la tormenta disponible es de 0.705, correspondiendo a un ajuste muy bueno según Molnar (2011) (Tabla 2).

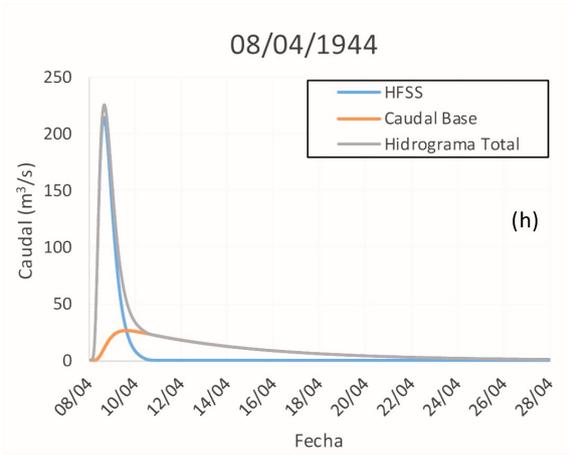
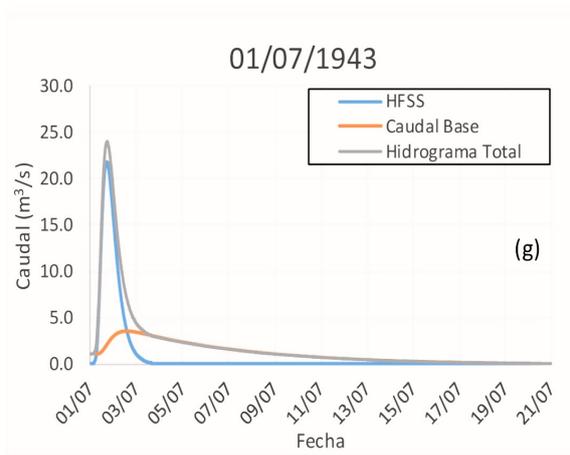
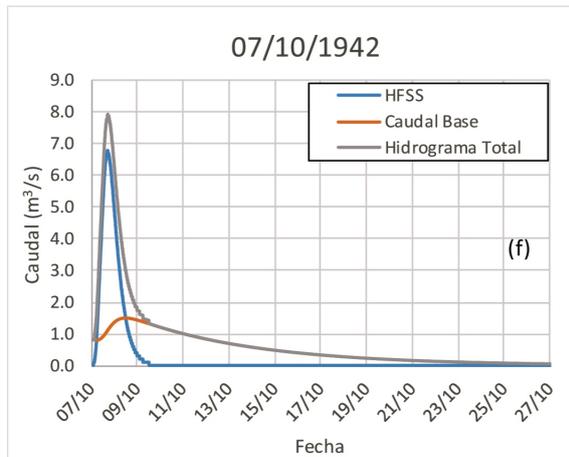
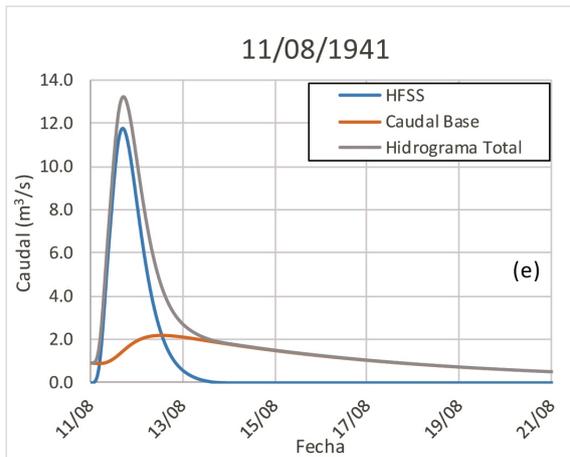
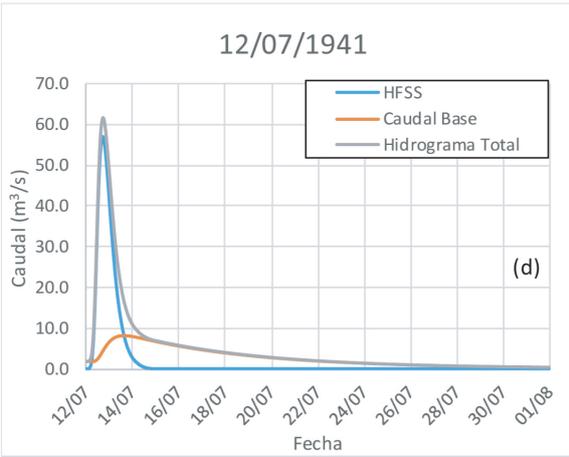
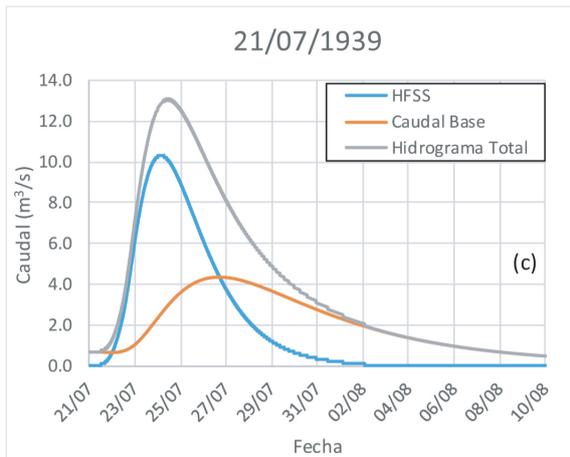
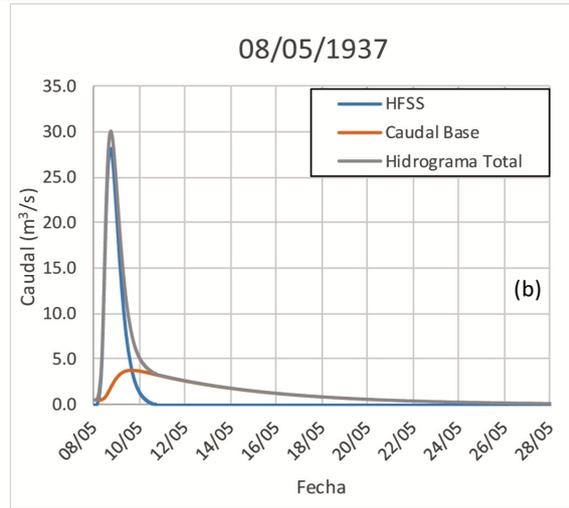
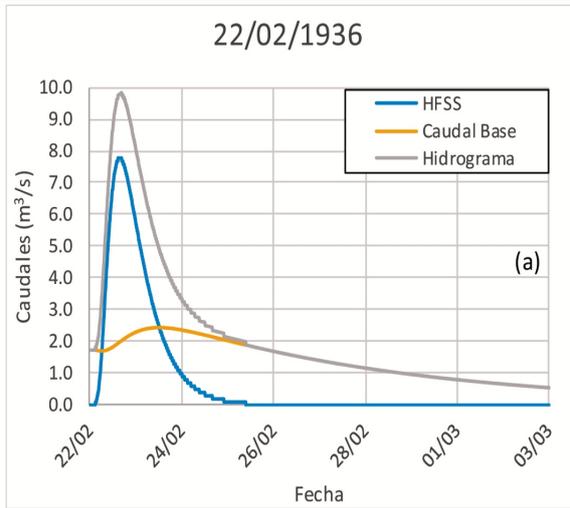
4.2. Resultados de los ajustes de valores de caudal pico para las tormentas sin hidrogramas asociados.

Un importante número de datos fueron procesados en base a la metodología reseñada anteriormente. Para cada tormenta analizada, fue necesario estimar el caudal base que sumado al hidrograma superficial simulado (HFSS), proporciona el hidrograma total. El pico del hidrograma total simulado así obtenido debe ser igual al pico máximo medido. Los parámetros de ajuste usados fueron los mencionados anteriormente en la metodología. La (Tabla 3) muestra los valores ajustados de caudales picos simulados y medidos en cada caso, para diversas tormentas. Las Figura 6 (a-b, c-d, e-f, g-h, i-j, k-l y m) ilustran los hidrogramas de crecida simulados a partir de los datos procesados

Tabla 3. Resultados de los ajustes a los picos de crecida de diversas tormentas.

Fecha	Caudal Pico del escurrimiento superficial simulado (m ³ /s)	Caudal Base máximo estocástico (m ³ /s)	Caudal pico simulado (Base + superficial) (m ³ /s)	Caudal pico Medido (m ³ /s) (Carrica, 1998)	Precipitación total (mm)	Error %
22/02/1936	7.8	2.0	9.8	10.0	69.0	2
08/05/1937	28.1	3.8	30.1	30.0	54.0	0
21/07/1939	10.3	4.4	13.1	13.4	51.5	2
12/07/1941	57.1	8.3	61.5	62.0	100.0	1
11/08/1941	11.8	2.2	13.2	12.6	63.5	5
07/10/1942	6.8	1.5	7.9	8.1	34.0	2
01/07/1943	21.8	3.6	24.0	24.0	38.0	0
08/04/1944	214.6	26.1	225.1	220.0	196.0	2
06/05/1944	19.3	8.2	24.5	25.0	54.5	2
18/10/1988	1.8	0.5	2.2	2.0	25.0	10
01/06/1989	2.2	1.2	3.0	3.0	18.0	0
15/02/1990	0.2	0.3	0.3	0.3	13.0	0
31/12/1990	1.7	0.4	2.0	1.9	35.0	7

Fuente: Elaboración propia en base a Carrica (1998).



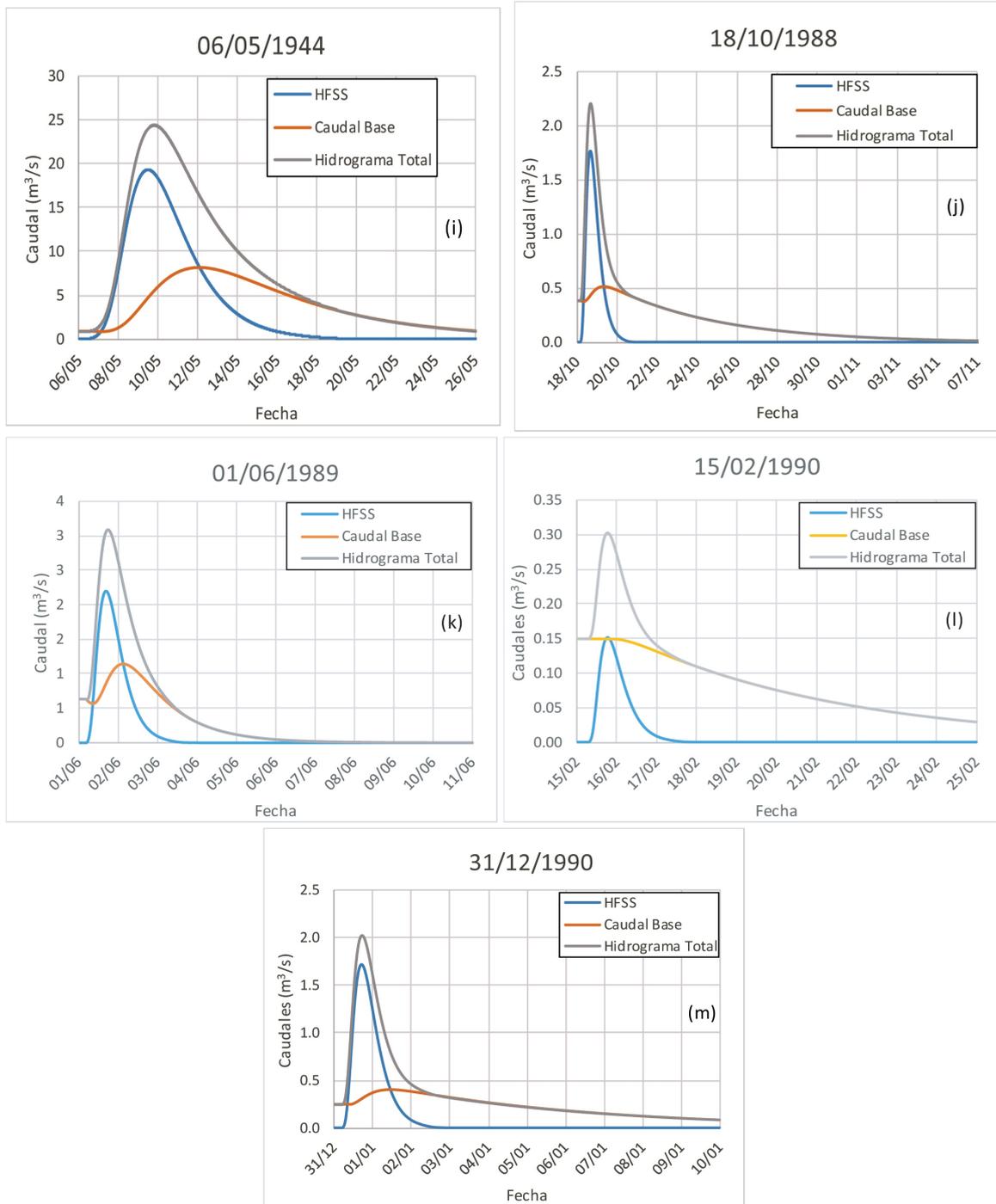


Figura 6. Hidrogramas simulados de caudal superficial (HFSS), base y total para los eventos

Fuente: Elaboración propia.

La serie de datos considerada posee dos valores de caudal pico grandes, correspondientes a los eventos del 08/04/1944 (Caudal pico = 220 m³/s) y 12/07/1941 (Caudal pico = 62 m³/s) (Tabla 1). Existe la posibilidad que sean valores atípicos. Según el método del rango intercuartílico (IQR), un dato es un valor atípico extremo si se encuentra a más de 3 veces el (IQR) por encima del tercer cuartil y es atípico leve si supera 1.5 veces el IQR por encima del tercer cuartil. Este método es útil para datos que no siguen una distribución normal (Andrade, 2024). Se determinaron los valores del primer y tercer cuartil ($Q_1 = 4.27$, $Q_3 = 24.75$) para la serie de valores disponible. Luego el valor límite extremo (vle) para valores atípicos extremos es $vle = Q_3 + 3 \cdot (Q_3 - Q_1) = 86.17$. El límite para considerar un valor atípico leve (vll) en la serie es $vll = Q_3 + 1.5 \cdot (Q_3 - Q_1) = 55.46$. Para la serie de tiempo de caudales estudiada $220 > 86.17$ y $62 > 55.46$. Por lo tanto, los caudales

picos de los eventos registrados el 08/04/1944 y 12/07/1941 corresponden a valores atípicos extremo y leve respectivamente. Consecuentemente, la presencia de estos valores genera una gran distorsión en los datos, ya que dichos eventos poseen una alta recurrencia.

La Figura 7, muestra los valores de caudales iniciales correspondientes al instante previo al comienzo de la precipitación (Caudal Inicial) en función de los valores de CN (excluidos los valores atípicos).

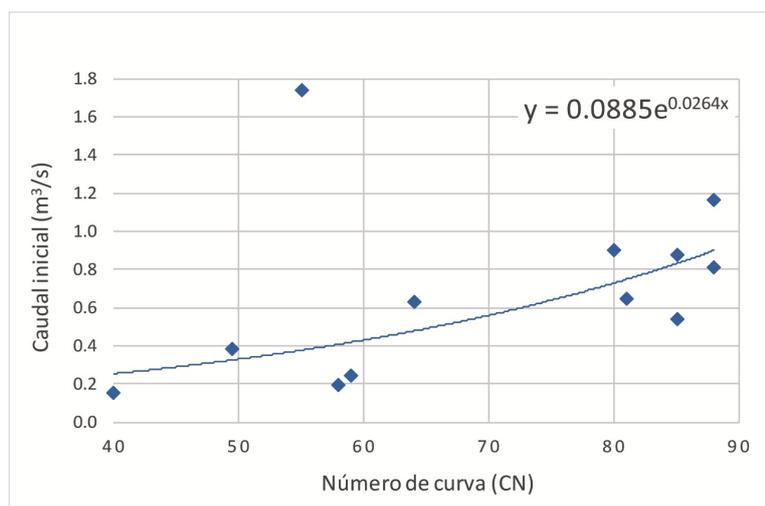


Figura 7. Caudal inicial versus número de curva (CN).

Fuente: Elaboración propia.

Los valores de caudales iniciales están relacionados con la humedad inicial de la cuenca. Se observa que los valores estimados de CN muestran un ajuste exponencial con los caudales iniciales (Figura 7). Se aplicó análisis de la varianza a la regresión, excluidos los valores atípicos previamente detectados, y se pudo rechazar la hipótesis nula (H_0 = la regresión no es significativa), lo cual indica que la regresión de la Figura 7 es significativa a un nivel de significancia del 5%.

5. Discusión

La regresión mostrada en la Figura 7 exhibe un valor que se separa notoriamente del resto de los datos (22/02/1936) (Tabla 1). Para descartar este valor de la serie es necesario aplicar un método para el cual no se cuenta con el número de observaciones mínimas necesarias. Por lo tanto, no es rigurosamente correcto descartarlo. Sin embargo, se demostró que la regresión es significativa con un nivel del 5%.

Los eventos estudiados con y sin hidrogramas disponibles, permitieron estimar coeficientes CN en cada caso. El valor promedio obtenido es de $CN = 70$, con un desvío estándar de 15.6, basado en 39 valores. La Figura 8 muestra un histograma de los valores de CN donde se verifica un comportamiento bimodal. Se observa un pico alrededor de CN entre 80 y 90, y otro alrededor de CN entre 50 y 60. Esto revela la influencia de ciclos húmedos y secos en la cuenca. Esta conclusión es coherente con las halladas por Carrica (1998).

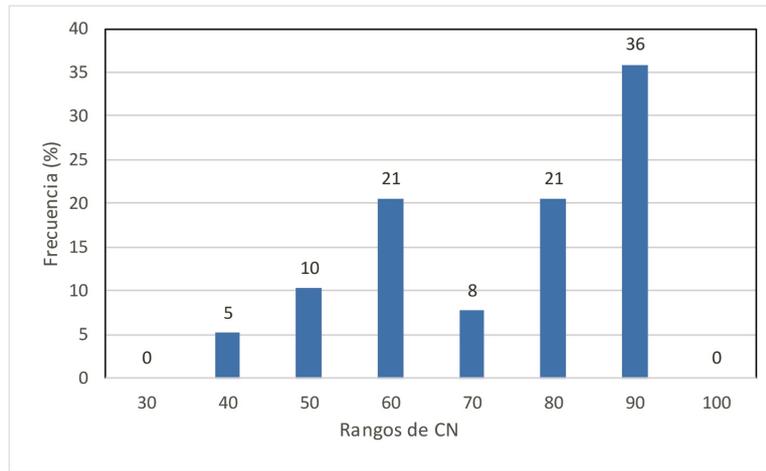


Figura 8. Histograma de los valores de CN hallados en las simulaciones.

Fuente: Elaboración propia.

Jaafar et al. (2019) presentaron un mapa global de CN, dentro de celdas de 250x250 m, en base a datos de sensores satelitales. El valor del parámetro en cuestión se muestra para situaciones secas y húmedas en las Figura 9 a,b. La distribución de CN en el área de estudio fue extraída de las imágenes presentadas por Jaafar et al. (2019).

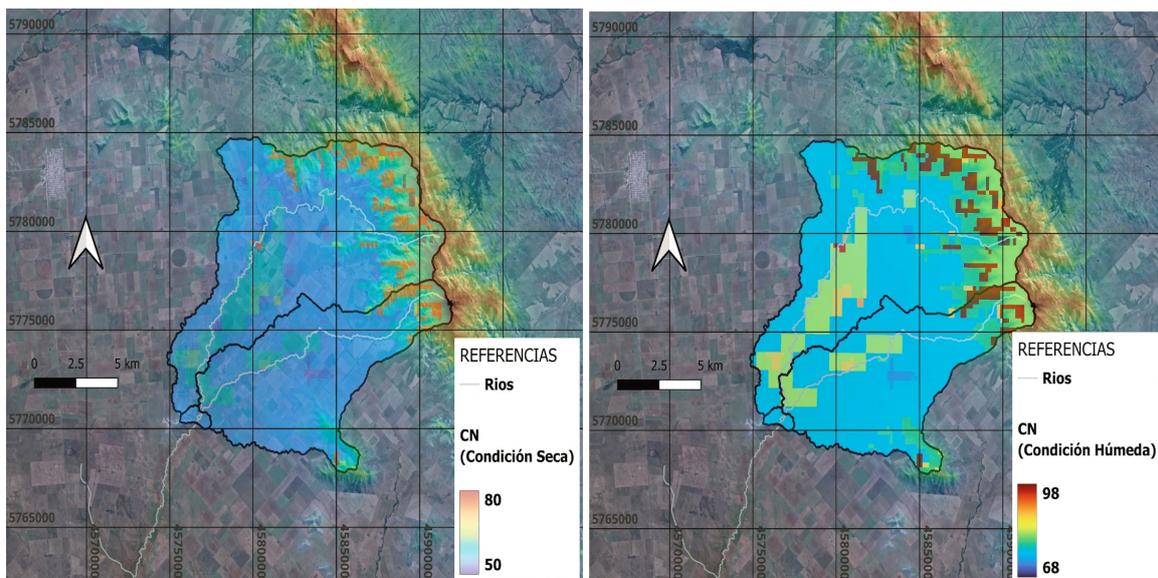


Figura 9. Distribución de CN en el área estudiada en condición seca (a) y condición húmeda (b).

Fuente: Jaafar et al. (2019).

El promedio ponderado en el área para las imágenes de las Figura 9 a,b es de 59 y 88 respectivamente, valores que se verifican en el histograma de la Figura 8. Se puede concluir que los valores de CN globales para el caso en la cuenca estudiada se ven bien representados por los propuestos por Jaafar et al. (2019).

6. Conclusiones

En el presente trabajo se alcanzaron los objetivos propuestos. Se logró calibrar una tormenta por medio de la reconstrucción de su hietograma a partir de la precipitación total, y su correspondiente hidrograma. Se aplicaron modelos estocásticos para simular el caudal base, aplicando valores de coeficiente de decaimiento de

crecida presentados por Carrica (1998). El coeficiente de eficiencia de ajuste de Nash-Sutcliffe para la tormenta es de 0.705, correspondiendo a un ajuste muy bueno según Molnar (2011).

Seguidamente, usando técnica mencionada previamente, para las restantes 13 tormentas, se simularon los hidrogramas de crecidas correspondientes a cada una de ellas, de manera que el pico de la crecida simulado fuera igual al medido. Nuevamente, los caudales base se estimaron aplicando el coeficiente de decaimiento de la crecida presentado por Carrica (1998).

Se detectaron un par de eventos que corresponden a valores atípicos (uno extremo y el otro leve). Es de gran importancia identificar estos eventos, ya que, representan condiciones extremas que son indispensables para proyectos de obras de distinto tipo (camino, tendidos de redes eléctricas, protecciones, puentes, diques, etc.) en la zona.

Se realizó estadística de los valores de CN simulados, llegándose a determinar un comportamiento bimodal, correspondientes a condiciones secas y húmedas de la cuenca. Estas condiciones respaldan las conclusiones de Carrica (1998) y demuestran ser compatibles con los valores propuestos por Jaafar et al. (2019).

Esta secuencia alternante entre ciclos secos y húmedos se revela bien marcada en la cuenca alta del Arroyo Napostá Grande durante los períodos estudiados y muestran coherencia con los valores correspondientes a los proporcionados por los satélites. Por lo tanto, la cuenca puede ser aceptablemente modelada usando valores de CN provistos por Jaafar et al. (2019), los cuales están disponibles en internet.

Se recomienda elaborar una política hídrica para el aprovechamiento racional e integral del recurso hídrico de la cuenca. Dicha política debe contemplar como objetivo básico inicial, continuar con los estudios hidrológicos con un progresivo nivel de detalle, a los efectos de planificar una explotación del recurso hídrico de la cuenca con el mínimo grados de incertidumbre posible. El uso y manejo adecuado de este patrimonio redundará en beneficio de las generaciones presentes y futuras, puesto que el hombre y su bienestar es el fin ulterior de toda planificación.

Referencias bibliográficas

Andrade, F. (2024). *Estadística Descriptiva - Fundamentos*. Medium. <https://medium.com/@ingenieroa Andrade/estad%C3%ADstica-descriptiva-fundamentos-9fac2b866b77>

Ardissono, M. L. (1998). *La funcionalidad del arroyo Napostá y su área circundante dentro de la estructura urbana de Bahía Blanca* [Tesis de Licenciatura en Geografía, Universidad Nacional del Sur].

Brandizi, L., Sequeira, M. y Fernández, S. (2013). Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Sauce Grande, provincia de Buenos Aires [Ponencia]. *XXIV Congreso Nacional del Agua CONAGUA 2013*, San Juan, Argentina

Bróndolo, M., Zinger, S., Del Pozo, O., Lorda M. A. y Campos, M. (1994). *Geografía de Bahía Blanca*. Ediciones Encestando.

Carrica, J. (1998). *Hidrogeología de la cuenca del arroyo Napostá Grande, provincia de Buenos Aires* [Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur]. <http://catalogo.uns.edu.ar/vufind/Record/EUN.um066410>

Chow, V. T., Maidment, D. R. y Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw Hill Interamericana.

Espósito, M. (2014). *Hidrología e hidroquímica de la cuenca del arroyo El Divisorio, provincia de Buenos Aires* [Tesis de Doctorado, Universidad Nacional del Sur]. <http://repositoriodigital.uns.edu.ar/handle/123456789/3635>

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.researchgate.net/publication/340397137_Avances_en_la_modelacion_del_escorrimento_superficial_de_una_cuenca_del_sudoeste_bonaerense_Caso_de_estudio_Sector_Superior_Cuenca_Alta_del_Rio_Sauce_Grande_Argentina

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. DOI: <https://doi.org/10.52292/j.rug.221.30.1.0016>. <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. <https://doi.org/10.35305/curiham.v28i.179>

Fernández, S. N., Pérez, D. E., Flores, M. A. y Abalo, P. O. (2023). Análisis de los factores de peligrosidad ante eventos de inundación de la ciudad de General Daniel Cerri (Buenos Aires, Argentina). *Revista Universitaria de Geografía*, 32(2), 162–184. <https://revistas.uns.edu.ar/rug/article/view/4656>

Fuentes, A. M. (1994). Transformación ambiental en el valle inferior del Arroyo Napostá Grande. Sector del curso hídrico comprendido entre el derivador de aguas en el Parque de Mayo y el área antiguamente ocupada por el barrio Palihue Chico. Período 1828-2004. Partido de Bahía Blanca, provincia de Buenos Aires, República Argentina [Tesis de Licenciatura en Geografía, Universidad Nacional del Sur].

Gómez-Isidro, S. y Gómez-Ríos, V. (2016). Baseflow analysis using master recession curves and numerical algorithms in mountain basins: Suratá's river and Oro's river (Santander, Colombia). *DYNA*, 83 (196), 213-222. <https://doi.org/10.15446/dyna.v83n196.53222>

Huff, F. A. (1967). Time Distribution Rainfall in Heavy Storm. *Water Resources Research*, 3(4), 1007-1019. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/WR003i004p01007>

Hydrologic Engineering Center (2000). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual*. U. S. Army Corps of Engineers. Hydrologic Engineering Center, HEC

Hydrologic Engineering Center (2016). *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. User's Manual, Version 4.2*. U. S. Army Corps of Engineers. Institute for Water Resources. Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC)

Jaafar, H. H., Ahmad, F. A. & El Beyrouthy, N. (2019). GCN250, new global gridded curve numbers for hydrologic modeling and design. *Sci Data*, 6(145). <https://doi.org/10.1038/s41597-019-0155-x>

Lexow, C. (2002). Hidrodinámica de la zona no saturada aplicada al estudio del balance hidrológico y de contaminantes de los recursos hídricos subterráneos (Cuenca del arroyo del Águila) [Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur].

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

Mastrandrea, A. y Pérez, M. I. (2020). Representaciones sociales del riesgo hídrico en el sector inferior de la cuenca del arroyo Napostá Grande: un abordaje histórico-ambiental (1828-2018). *Investigaciones Geográficas*, (74), 197-222. <https://doi.org/10.14198/INGEO2020.MP>

Ministerio de Defensa. Instituto Geográfico Nacional. (s.f.). Modelo de elevación digital. <https://www.ign.gob.ar/NuestrasActividades/Geodesia/ModeloDigitalElevaciones/Mapa>

Molnar, P. (2011). Calibration. *Watershed Modelling*, SS 2011. Institute of Environmental Engineering, Chair of Hydrology and Water Resources Management, ETH Zürich. Switzerland.

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.

Schefer, J. C. (2004). Los recursos hídricos y el abastecimiento de agua. Región de Bahía Blanca, Bahía Blanca. CEPADE (Centro de Estudios y Participación para el Desarrollo Local y Regional).

Torrero, M. (2005). Variabilidad hidroclimática y actividades antrópicas en la cuenca inferior del arroyo Napostá Grande [Tesis de licenciatura en Geografía, Universidad Nacional del Sur]. <https://repositoriodigital.uns.edu.ar/bitstream/handle/123456789/1978/Torrero.pdf;jsessionid=C007D703806986003E462734822506F0?sequence=1>

Universidad Nacional del Sur y Comisión de Investigaciones Científicas. (1990). Plan Integral de Abastecimiento de Agua a Bahía Blanca y Gran Bahía Blanca. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca.