

Análisis de los factores de peligrosidad ante eventos de inundación de la ciudad de General Cerri (Buenos Aires, Argentina)

Sandra N. Fernández^{*}
Daniel E. Pérez^{**}
Miguel A. Flores^{***}
Pablo O. Abalo[°]

Resumen

General Daniel Cerri (GDC) está ubicado sobre el estuario de Bahía Blanca en una zona altamente antropizada, donde convergen dos cursos de agua y sufre recurrentes inundaciones. Se impone la necesidad de un mejor conocimiento de la peligrosidad de estos eventos ante el crecimiento poblacional de la zona. Los objetivos son identificar las interferencias al escurrimiento natural (Anillo de GDC), ubicar y caracterizar las estructuras hidráulicas, determinar las probabilidades de ocurrencia de mareas eólicas extraordinarias y generar hidrogramas de crecidas (HEC-HMS) para tormentas de recurrencias determinadas. Se implementó el modelo de terreno a partir de imágenes del Instituto Geográfico Nacional, identificándose el Anillo de terraplenes y sus estructuras hidráulicas. La simulación arrojó caudales máximos, tiempos de llegada del pico, volúmenes de descarga e hidrogramas de crecida, para los cursos de agua que convergen en la zona. Se caracterizaron las mareas eólicas extraordinarias mediante un modelo estadístico. Los resultados proporcionan volúmenes de agua y el desfase temporal en la llegada de la crecida. Las alturas del mar alcanzan valores que permiten el ingreso de agua salada al Anillo, por lo cual generan un ahogamiento del escurrimiento. El conjunto de resultados constituye información relevante para el desarrollo urbano.

Palabras clave: General Daniel Cerri, Simulación esorrentía superficial, HEC-HMS, Niveles máximos de marea, Peligrosidad.

[°] DOI: <https://doi.org/10.52292/j.rug.2023.32.2.0063>

^{*} Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS), Avenida Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina, e-mail: sfermand@uns.edu.ar Investigador Asociado de la Comisión de Investigaciones Científicas (CIC). Calle 526 e/10 y 11. La Plata.

^{**} Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS), Avenida Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina, e-mail: perezdanielenrique@gmail.com

^{***} Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS), Avenida Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina, e-mail: miguel.flores@uns.edu.ar

[°] Departamento de Ingeniería, Universidad Nacional del Sur (UNS), Avenida Alem 1253, Bahía Blanca, Argentina, e-mail: pabalo@uns.edu.ar

Analysis of flood hazard factors in the city of General Daniel Cerri (Buenos Aires, Argentina)

Abstract

General Daniel Cerri (GDC) is located on the Bahía Blanca estuary in a highly anthropized area where two watercourses converge leading to recurrent flooding events. There is a need for better understanding of the hazards associated with these events due to the area's population growth. The objectives of this study are to identify interferences with natural runoff (GDC Ring), locate and characterize hydraulic structures, determine the probabilities of occurrence of extraordinary wind tides and generate flood hydrographs (HEC-HMS) for specific recurrence interval storms. The terrain model was developed using images from the National Geographic Institute, which helped identify the embankment ring and its hydraulic structures. The simulation showed maximum flows, peak arrival times, discharge volumes, and flood hydrographs for the watercourses converging in the area. Extraordinary wind tides were characterized using a statistical model. The results provide water volumes and the time lag in the arrival of the flood. The sea levels reach values that allow saltwater to enter the Ring causing a drowning of the runoff. This collection of results provides relevant information for urban development.

Key words: General Daniel Cerri, Runoff simulation, HEC-HMS, Sea-water level, Flood.

Introducción

El tema de los desastres naturales ha tomado importancia en el debate público. En efecto, un gran número de eventos naturales extraordinarios han afectado a la población e infraestructuras. La Asamblea General de las Naciones Unidas declaró la década de 1990 como Decenio Internacional para la reducción de Desastres Naturales. En particular, la tormenta del 24 de marzo de 2022 en General Daniel Cerri (GDC), en el sudoeste de la Provincia de Buenos Aires (Fig. 1b), destruyó por completo un muelle centenario y produjo inundaciones.

La localidad de GDC, en el periurbano de Bahía Blanca, está emplazada en una zona altamente antropizada (González, 2018) donde se ha reconfigurado la red de drenaje natural. Sobre ella convergen las cuencas del Saladillo de García con su afluente el Dulce, y el canal Cuatrerros, que deriva agua para riego del río Sauce Chico (Fig. 1c). En adición, la localidad se encuentra a orillas del estuario de Bahía Blanca, por lo que el casco urbano se ve afectado por las mareas extraordinarias.

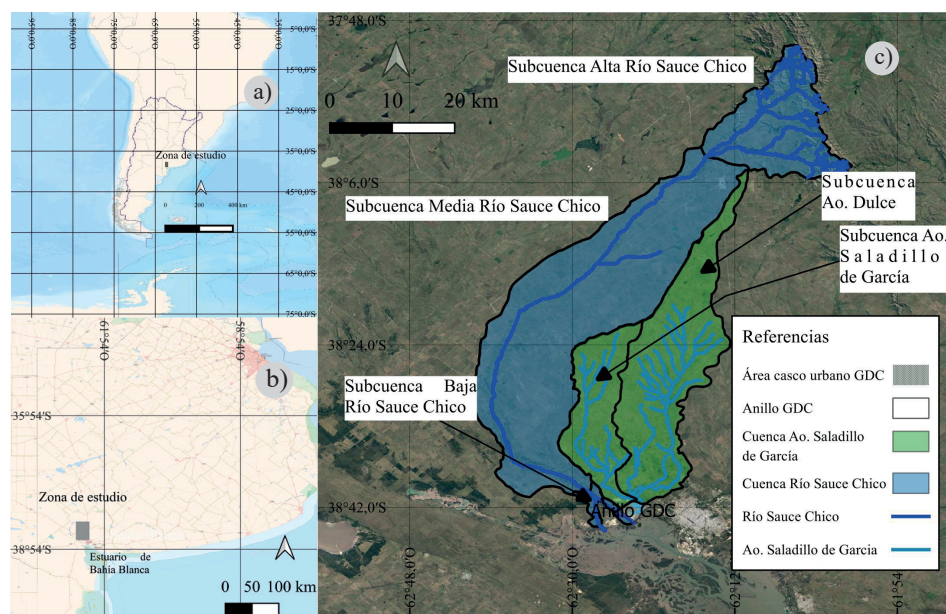


Figura 1. Ubicación y áreas de las cuencas que afectan al Anillo de GDC.

Fuente: elaboración propia en base a mapas del IGN y Google Earth.

La localidad de General Daniel Cerri, declarada ciudad el 11 de agosto de 1999 por el Poder Ejecutivo Bonaerense, se sitúa en el periurbano de Bahía Blanca, al sudoeste de la Provincia de Buenos Aires (Fig. 2). El casco urbano de la ciudad se encuentra rodeado por vías de ferrocarril y carreteras, todas terraplenadas, conformando un Anillo, que corta el drenaje natural, dejando solo los puentes para que

el caudal excedente de precipitaciones y sudestadas (mareas eólicas causadas por el viento sudeste) circule por la zona (Mastrandrea y Pérez, 2016).

En la zona de estudio, las Sudestadas son frecuentes. Éstas se caracterizan por un fuerte viento del sudeste de más de 35 km/h que genera una elevación del nivel del mar (Capelli de Steffens y Campo de Ferreras, 2004; Campo de Ferreras, Gabella y Zapperi, 2012). Por otra parte, vienen acompañadas de intensas precipitaciones y descenso de temperatura. Fue este el caso del evento registrado el 24 de marzo de 2022, que produjo una marea eólica extraordinaria, sumada a una crecida que terminó destruyendo un espigón centenario. Es por eso que la combinación de crecidas y mareas eólicas extraordinarias, que se superponen, pueden tener consecuencias sobre los bienes y personas del lugar.

General Daniel Cerri surgió como un centro industrial y hortícola. Sus inicios comienzan a partir de la construcción del Fortín Cuatrerros a fines de 1876 al mando del General Daniel Cerri, construidos en el sur de la provincia de Buenos Aires con el fin de demostrar la consolidación de las tierras libres de los aborígenes. A partir de ahí se inicia la consolidación del núcleo urbano (Lorda, 2005). Dentro de la localidad se instalaron dos grandes industrias que son el Frigorífico Sansinena y el lavadero de pieles Soulas Fils, que luego se transformaría en Lanera Argentina. También se produce un crecimiento de la localidad con el trazado de las vías férreas a partir de 1884 y la creación del Puerto de Ingeniero White en 1885 (Rubio y Silva, 2008). Si bien el Frigorífico C.A.P. y Lanera Argentina ya no existen, GDC sigue relacionado con la industria alimenticia, creció la producción hortícola (Sauce Chico y Alférez San Martín), se radicó una industria aceitera, un molino harinero, una fábrica de lácteos y continúa con su actividad el Frigorífico ubicado en la ruta 3 sur.

Durante el siglo XX, GDC fue un pujante núcleo industrial de carácter internacional que vinculaba su dinamismo a los frigoríficos, estaciones ferroviarias y actividad portuaria (Kraser, 2013). Rubio y Silva (2008) analizan los datos extraídos de INDEC de 1960, 1970, 1980, 1991 y 2001. A partir de estos se puede decir que la población de GDC fue creciendo y fue en aumento década a década, pero en forma lenta y paulatina. Además, se puede mencionar que hubo un retroceso de 1991 a 2001 donde se dio una disminución de la cantidad de habitantes. Estos datos están reflejando, por un lado, la apertura y, por otro lado, el cierre de industrias que dieron auge y crecimiento a la localidad de GDC.

El conocimiento integrado de los factores de la peligrosidad de inundación de la cuenca del Saladillo de García constituye un aporte de relevancia para el ordenamiento del crecimiento de GDC así como el periurbano de Bahía Blanca. En este sentido, González (2018) ha establecido comparaciones históricas de la hidrogeomorfología de la cuenca y ha sugerido una serie de propuestas de ordenamiento del espacio.

Sin embargo, no se ha encontrado referencias a la peligrosidad debida a inundaciones ocasionadas por el Saladillo de García ni las causadas por mareas eólicas en GDC. En resumen, para éste caso particular no se ha encontrado en la bibliografía disponible ningún trabajo que simule caudales, tiempos de llegada del pico de crecida, ni volúmenes de agua de crecidas asociadas a recurrencias, ni estudios estadísticos de niveles de marea para la zona. Los terraplenes carreteros y ferroviarios que circundan a GDC son someramente descriptos (González, 2018) y no se hallaron datos de los puentes sobre los mencionados terraplenes.

Los objetivos del presente trabajo son:

- Identificar las interferencias al escurrimiento natural del arroyo Saladillo de García en la zona de GDC (Anillo de GDC)
- Ubicar e ilustrar las estructuras hidráulicas que permiten el ingreso y egreso del agua al Anillo de GDC
- Determinar las probabilidades de ocurrencia de mareas eólicas extraordinarias
- Generar hidrogramas de crecidas a partir de modelación con HEC-HMS para tormentas de diseño de distintas recurrencias.

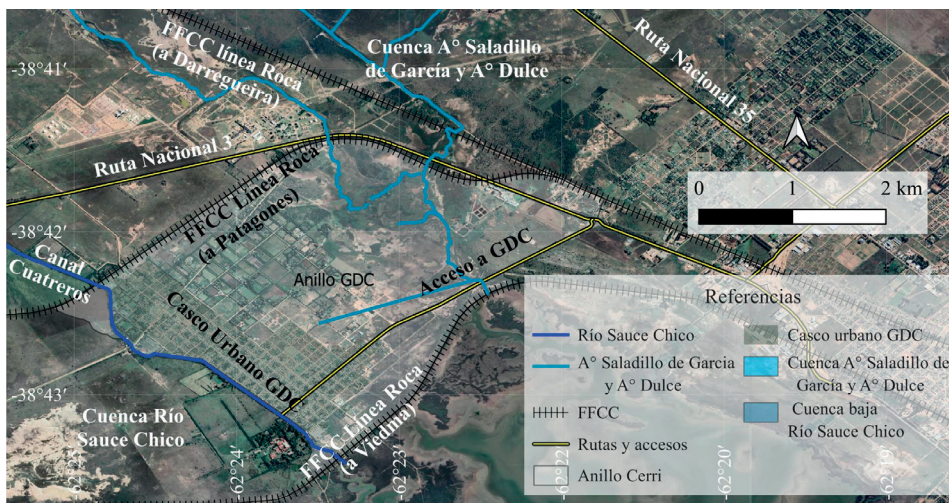


Figura 2. Anillo vial y ferroviario que circunda a GDC. Fuente: elaboración propia.

Materiales y métodos

Área de estudio

El casco urbano de General Daniel Cerri está rodeado por estructuras viales y ferroviarias, las cuales fueron construidas sobre terraplenes, que en ciertos puntos pueden elevarse hasta 5 m sobre el nivel del suelo. Esto configura un Anillo alre-

dedor de la localidad que modifica por completo el escurrimiento superficial (Fig. 2). Este Anillo puede actuar como contención de crecidas provenientes del continente. Las mareas extraordinarias del estuario, sin embargo, ahogan las descargas fluviales y lo que en un principio era una protección se transforma en un factor negativo. El agua excedente no puede ser evacuada desde el interior del Anillo en forma natural, produciéndose anegamientos e inundaciones.

Debido a lo descrito anteriormente, los puentes y alcantarillas sobre los terraplenes ferroviarios y viales son precisamente los lugares por donde ingresa y egresa el agua a la zona del Anillo que rodea GDC. Por ende, estas estructuras hidráulicas son parte fundamental en las inundaciones y anegamientos, ya que permiten el ingreso y egreso del agua en la zona del casco urbano de GDC.

En general se distinguen tres factores hidráulicos que se combinan para definir la peligrosidad de GDC ante un evento de inundación (Fig. 3):

- Arroyo Saladillo de García (con su afluente Arroyo Dulce)
- Río Sauce Chico (Canal Cuatrerros)
- Nivel de marea

El caudal de estos cursos de agua depende de las lluvias ocasionadas en el sistema de Ventania, pudiendo ocurrir desbordes en épocas de precipitaciones extraordinarias. Además, el horizonte freático en GDC está alto, provocando anegamientos en épocas de excedente hídrico. Las zonas más próximas al mar son cubiertas por la acción de las mareas, dependiendo del nivel de las pleamares y la influencia de los vientos (Spagnolo, 2011).

Los puentes PF1, PF2, PC1 y PC3 (Tabla I y Fig. 10) se encuentran sobre los lechos del arroyo Saladillo de García y del arroyo Dulce, y es a través de ellos que las crecidas ingresan al Anillo de GDC, mientras que PF4, PF5, AF1 y PC5 (Tabla I y Fig. 10) alternativamente dejan ingresar y salir agua de mar y dulce al Anillo.

Cuenca del arroyo Saladillo de García

La cuenca del A. Saladillo de García se encuentra ubicada geográficamente entre los meridianos 62° 12' O y 62° 32' O y los paralelos de 38° 09' S y 38° 43' S, cubriendo una superficie total de 834 km² y la longitud del río es de 39 km. Limita hacia el este con la cuenca del A. Napostá Grande y al oeste con la cuenca del río Sauce Chico (Fig. 1). La cuenca se subdivide en dos, la correspondiente al A. Saladillo de García propiamente dicho y la de su afluente el Dulce. Ambos nacen en las estribaciones del sistema de Ventania, de carácter intermitente y se desarrollan en un ambiente de llanura en el cual predominan, en general, valores bajos de pendiente (González, 2018). La cuenca se ha degradado debido a las actividades

antropogénicas, entre ellas el vertido de aguas servidas y los desechos de los frigoríficos (Spagnolo, 2011). La confluencia entre el Dulce y el Saladillo de García propiamente dicho se produce dentro del Anillo que rodea a la localidad de GDC, para luego desembocar en el estuario de la Bahía Blanca.



Figura 3. Fuentes causantes de inundación de GDC con las secciones de control (Puentes) de entrada y salida de agua al Anillo. Fuente: elaboración propia sobre la base de imagen satelital Google Earth.

Cuenca del río Sauce Chico

El río Sauce Chico, principal curso de agua en el sector, está ubicada en el sudoeste de la Provincia de Buenos Aires y geográficamente se encuentra entre los paralelos $37^{\circ} 51' S$; $38^{\circ} 44' S$ y meridianos $61^{\circ} 59'$; $62^{\circ} 41'$ Oeste. Limita al este con la cuenca del Saladillo de García (Fig. 1c). Nace en los faldeos occidentales del sistema de Ventania y desemboca en el estuario de Bahía Blanca. Posee un área de 1596 km^2 y la longitud del río es de 162 km. En función de las pendientes se puede subdividir la cuenca en cuenca alta, media y baja (Fig. 1c). La parte alta corresponde a las nacien-

tes y recibe el aporte de las sierras del sistema de Ventania. En la subdivisión media no recibe aportes substanciosos y se desarrolla en pendientes relativamente bajas. La cuenca inferior se considera que comienza en el partidor ubicado en el paraje La Horqueta, donde una porción del caudal es desviada por el canal Cuatrerros con fines de riego y pasa a través de la localidad de GDC. El cauce natural desemboca más al sur del estuario de Bahía Blanca (Fig. 3) (Torrero, 2009). De esta manera, el Sauce Chico presenta dos desembocaduras bien diferenciadas siendo el canal Cuatrerros el que puede producir inundaciones en el casco de la ciudad (Spagnolo, 2011). Sin embargo, el mencionado canal, cuenta con compuertas que regulan el caudal de entrada al mismo, controlando el riesgo de inundación.

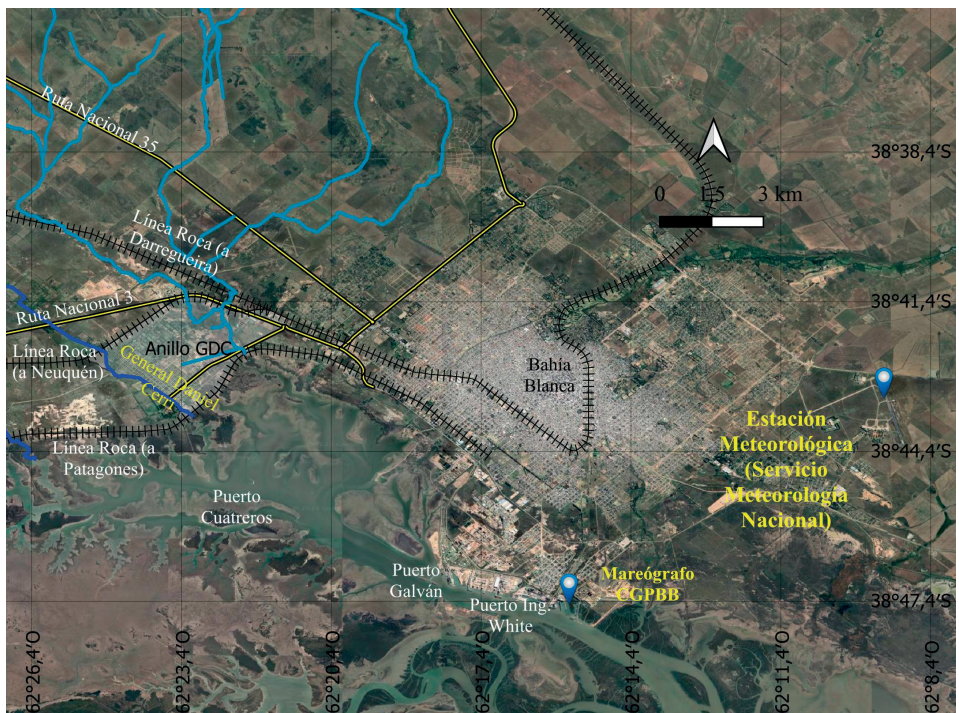


Figura 4. Puertos, mareógrafo y estación meteorológica. Fuente: elaboración propia sobre imagen satelital Google Earth en base a datos del Servicio meteorológico Nacional y del CGPBB.

Niveles de marea

La circulación general del estuario de Bahía Blanca es dominada por una onda de marea semidiurna (Perillo y Piccolo, 1991) con un rango medio, en el canal Principal, de 3,04 m en sicigia y 2,5 m en cuadratura. Las corrientes son reversibles con velocidades máximas promediadas verticalmente de 1,2 y 1,05 ms^{-1} para condiciones de reflujos y flujos, respectivamente (Perillo et al., 1987).

Las mareas meteorológicas provocadas por tormentas extraordinarias (sudestadas) sumadas a las mareas astronómicas, hacen subir el nivel del mar a tal punto que puede ahogar el drenaje natural de los ríos, y el agua de mar ingresa en la zona rodeada por los terraplenes donde se encuentra el casco urbano. Se cuenta con series de tiempo históricas para los niveles de marea en los puertos Galván e Ing. White, localizados algunos km hacia la boca del estuario. Los archivos corresponden al mareógrafo que está en Ingeniero White operado por el Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca (2023) (CGPBB), $38^{\circ} 47' 27.10''\text{S}$, $62^{\circ} 16' 7.42''\text{O}$ (Fig. 4). Las observaciones están referidas al *datum* localizado 2,63 m debajo del nivel medio.

Se extrajeron los máximos anuales de una serie de 59 años que abarca desde 1965 hasta 2022 para hacer un estudio de valores extremos del nivel en el área del estuario e la zona de Puerto Cuatros (GDC) (Fig. 5)

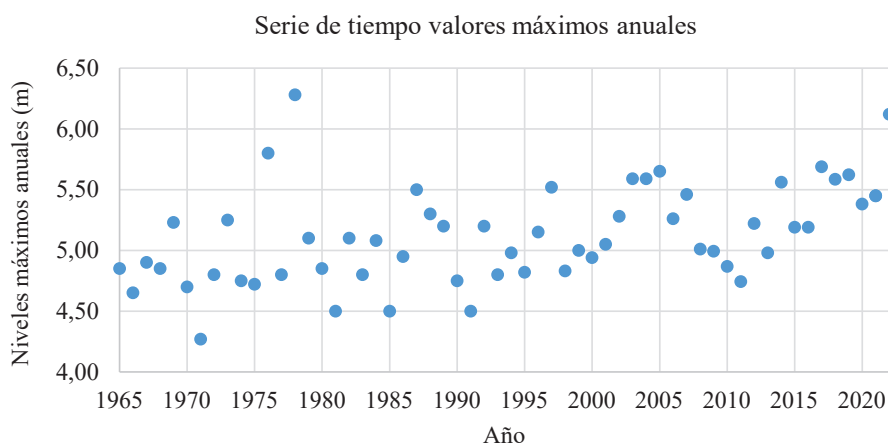


Figura 5. Serie de tiempo de valores extremos de nivel de marea. Fuente: elaboración propia en base a datos proporcionados por CGPBB.

Dentro de los valores registrados los correspondientes a los años 1978 y 2022, fueron los más altos (6,28 m y 6,12 m respectivamente).

Tormentas de diseño

En el presente estudio se aplica la relación entre la intensidad, duración y frecuencia de las precipitaciones (curvas IDF) en Bahía Blanca presentada por Sequeira (2006) (Fig. 6). La relación resultó del análisis de la información pluviográfica proveniente de 248 tormentas, de alta intensidad y corta duración, registradas en mm y cada cinco minutos en la estación meteorológica (Lat.: $38^{\circ} 44'\text{S}$, Long: $62^{\circ} 16'\text{O}$, Altitud.: 75 msnm) de la ciudad de Bahía Blanca del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) (Fig. 4). El período de mediciones abarca desde 04/05/51 al 12/03/88.

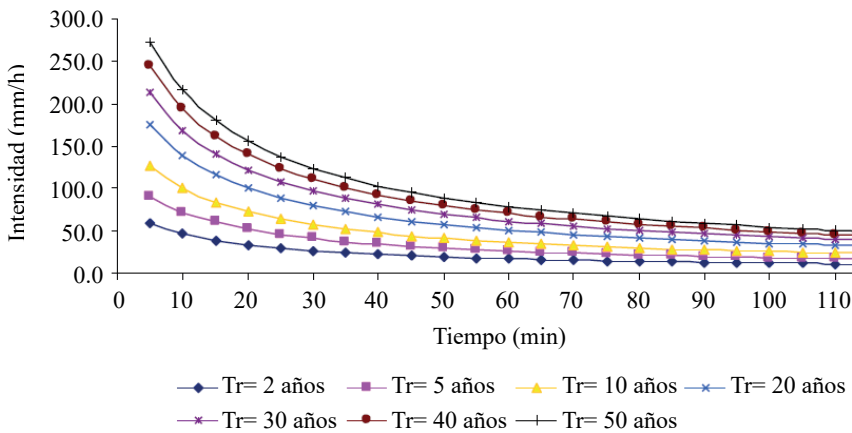


Figura 6. Curvas intensidad duración y frecuencia para la ciudad de Bahía Blanca. Fuente: Sequeira (2006).

La expresión de las curvas IDF viene dada por la Ecuación 1.

$$I = \frac{372.6613 \times Tr(\text{años})^{0.4786}}{(D(\text{min}) + 10)^{0.8072}} \quad (1)$$

Donde I es la intensidad de la lluvia, Tr es el tiempo de recurrencia y D es la duración de la lluvia.

En el presente trabajo se plantearon 3 escenarios para las simulaciones: Lluvias con recurrencia 5, 10 y 50 años. Las dos primeras fueron seleccionadas porque usualmente proporcionan caudales para obras de tipo vial e hidráulicas urbanas, mientras que la de mayor recurrencia, presenta el caso más desfavorable. Los histogramas resultantes de las tormentas de modelo se obtuvieron por el método de los bloques alternos (Chow, Maidment y Mays, 1994) para una duración de la tormenta de 3 horas y se muestran la siguiente figura 7.

Modelo digital del terreno

El modelo digital del terreno de las cuencas estudiadas se estableció mediante la utilización de modelos de elevación del Instituto Geográfico Nacional (IGN), para una red de 30x30 m de tamaño de celda, sobre las cuales se determinaron las curvas de nivel correspondientes y se definieron sus límites divisorios de las cuencas y subcuencas. Para el caso de sector del casco urbano de GDC, se corrigieron las curvas de nivel en base a la carta de Bahía Blanca escala 1:50000 del IGN. Toda la infor-

mación fue chequeada por medio de la imagen satelital, a partir de Google Earth. La Figura 8 muestra el modelo de terreno adoptado para cada una de las cuencas.

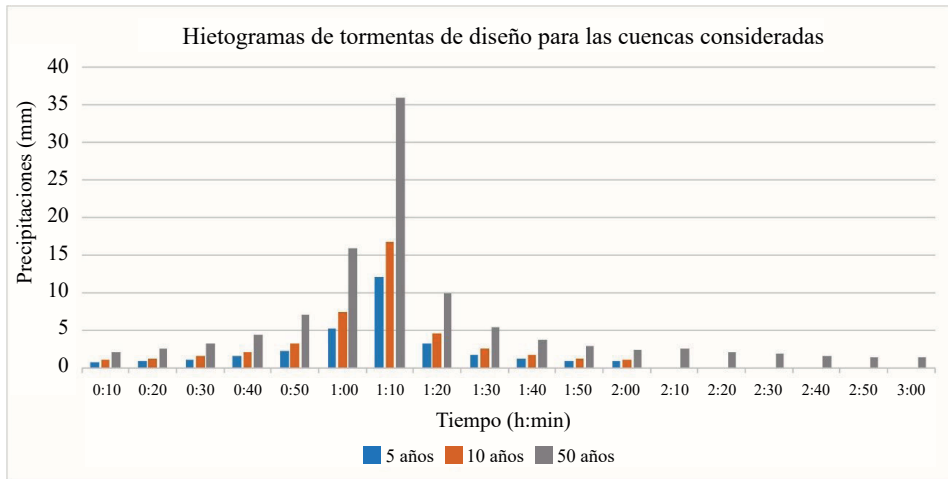


Figura 7. Histogramas calculados en base a las curvas IDF de Bahía Blanca con duración de 3 horas, aplicadas a las cuencas en estudio.

Fuente: elaboración propia.

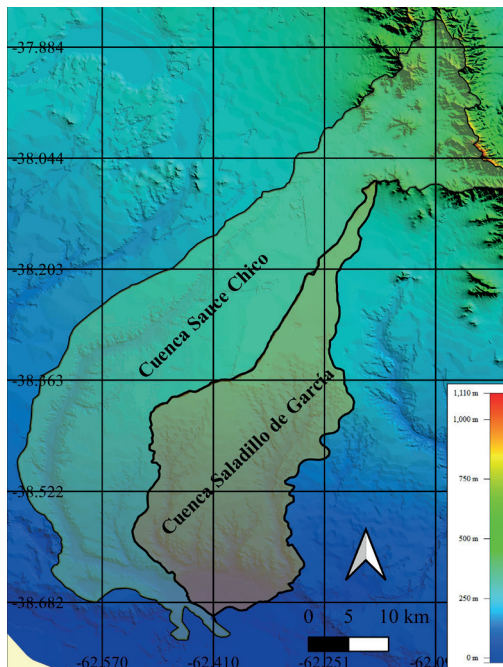


Figura 8. Modelo digital del terreno usado para el cálculo de las crecidas en las cuencas estudiadas. Fuente: elaboración propia en base a imágenes del Instituto Geográfico Nacional (IGN).

Estructuras hidráulicas

Las estructuras presentes en los terraplenes como puentes peatonales, carreteros y ferroviarios desempeñan roles principales en el escurrimiento. Se llevaron a cabo campañas de campo con el fin de relevar en el terreno e identificar los componentes de dichas estructuras (Fig. 9 a y b). Se determinaron luces de puentes, anchos, espesores de plateas y ubicación de pilares en caso que los hubiere, se elaboró un registro fotográfico de los mismos, materiales de construcción, tipos de embocaduras, etc.

La sección hidráulica (es decir el área específica de circulación del agua), fue determinada por medio de escandallo, cinta métrica de 50 m y GPS. Se relevaron las alturas respecto del borde inferior de cada puente, hasta el lecho, cada 1 m de distancia. La Figura 10 representa las estructuras relevadas en las campañas y se complementa con la Tabla I que brinda una descripción de la ubicación de cada puente relevado, así como sus coordenadas.

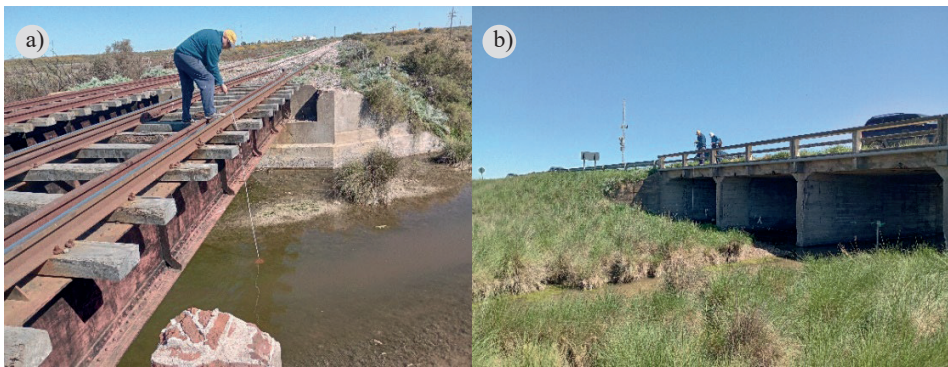


Figura 9 a y b. Metodología medición de puentes. Fuente: elaboración propia.

Nombre	Descripción	Coordenadas geográficas	
		Latitud (Sur)	Longitud (Oeste)
PC1	Puente en Ruta Nacional 3 (RN3) sobre A. Saladillo de García	38°41'17.66"	62°23'19.75"
PF1	Puente en ramal línea Roca (a Neuquén) sobre A. Saladillo de García	38°41'19.70"	62°23'19.35"
PC2	Puente en RN3 sobre A. Dulce	38°41'27.68"	62°22'33.98"
PF2	Puente en ramal línea Roca (a Neuquén) sobre A. Dulce	38°41'30.77"	62°22'35.82"
PC3	Puente en Joaquín V. González sobre A. Saladillo de García y A. Dulce	38°42'22.02"	62°22'11.07"

PF3	Puente en ramal línea Roca (a Patagones) sobre A. Saladillo de García y A. Dulce	38°42'27.38"	62°22'8.85"
AF1	Alcantarilla en ramal línea Roca (a Patagones) sobre canal Drenaje	38°43'17.81"	62°22'47.06"
PC4	Puente en ruta de acceso a Puerto Cuatreros sobre canal Cuatreros	38°43'40.96"	62°23'13.73"
PF4	Puente en ramal línea Roca (a Patagones) sobre canal Cuatreros	38°43'40.01"	62°23'14.85"
PC5	Puente en acceso al Club Sansinena Social y Deportivo (Avda. 9 de Julio) sobre canal Cuatreros	38°43'6.83"	62°24'1.57"
PP1	Puente peatonal en Avda. 9 de Julio 241 sobre canal Cuatreros	38°43'2.48"	62°24'7.80"
PC6	Puente en Avda. Pernici sobre canal Cuatreros	38°42'50.52"	62°24'46.74"

Tabla I. Nomenclatura, descripción, latitud y longitud de las estructuras hidráulicas relevadas. Fuente: elaboración propia sobre la base de relevamiento en campo.

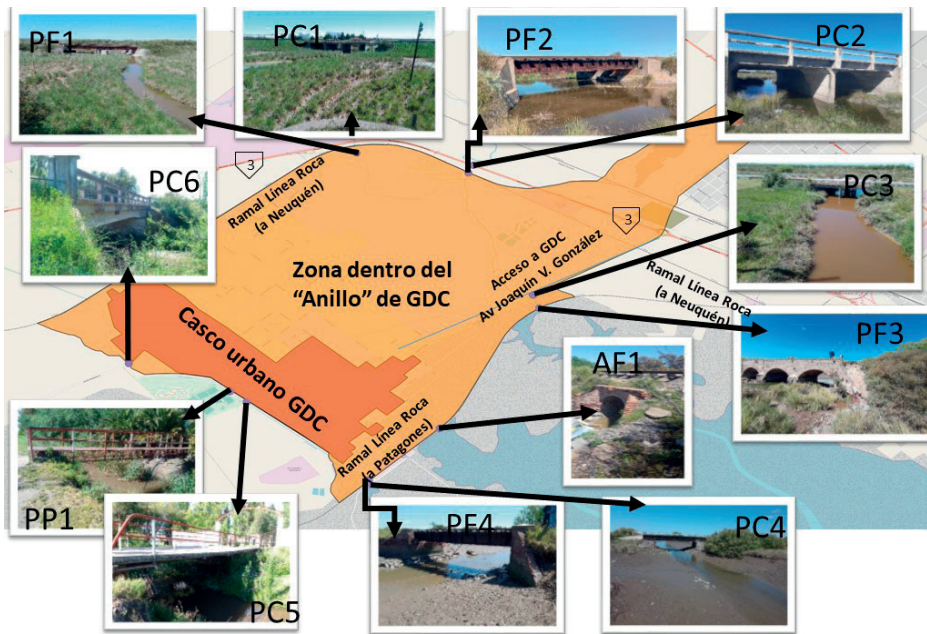


Figura 10. Ubicación y fotos de puentes ferroviarios y carreteros que circundan a GDC. Fuente: elaboración propia.

Implementación modelo HEC-HMS

Se usó el programa HEC-HMS, en su versión 4.2.1, creado por el Hydrologic Engineering Center del U. S. 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. 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). Los parámetros fueron adoptados en base a Fernández, Sequeira, Espósito y Paolini (2019); Fernández, Pérez, Weis, Flores y Abalo (2021), Fernández, Pérez, Flores y Abalo (2022) y los valores aconsejados por el Soil Conservation Service (SCS). Asimismo, los valores de los tiempos de concentración fueron adoptados en base a Kirpich (Chow et al., 1994), y permanecieron constantes en todas las tormentas. Se adoptaron los valores de 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 y su humedad inicial, permitiendo calcular la precipitación efectiva de una tormenta y el escurrimiento superficial (Hydrologic Engineering Center, 2000; Hydrologic Engineering Center, 2016).

Los valores de Abstracción inicial, almacenamiento máximo e inicial que evalúa la capacidad de la cuenca de retener y percolar la precipitación fueron adoptados en función de las características de los suelos y teniendo en cuenta los valores presentados por Fernández et al. (2015, 2019, 2021, 2022) para cuencas de similares características.

Resultados

Hidrogramas simulados

El Saladillo de García recibe su afluente más importante, el Dulce, dentro del Anillo que circunda a GDC, por lo que los hidrogramas de ambos cursos (Figs. 11 y 12) fueron simulados por separado considerando ingresos de crecidas correspondientes a la sección de control ubicada en el puente carretero PC2 en la RN 3 Sur sobre el Dulce (Tabla 1 y Fig. 10) y el puente carretero PC1 en la Ruta Nacional 3 sobre el Saladillo de García (Tabla 1 y Fig. 10). El hidrograma del Sauce Chico (Fig. 13) se calcula hasta la bifurcación en el paraje La Horqueta, donde se deriva agua para riego al Canal Cuatrerros por medio de compuertas (Fig. 3).

La Tabla II muestra que los caudales máximos producidos para cada recurrencia, son del mismo orden para los tres cursos de agua que ingresan al Anillo de GDC. Sin embargo, sus tiempos de llegada difieren. El pico de la crecida del Saladillo

de García propiamente dicho, llega primero, seguido del Dulce y finalmente el Sauce Chico. Por su parte los volúmenes de descarga son congruentes con el tamaño de la cuenca de aporte, por lo que el volumen ingresante al Anillo de GDC más grande es el del Sauce Chico, seguido por el Dulce y el Saladillo de García respectivamente. Cabe aclarar que los valores de la Tabla II correspondientes al Sauce Chico, muestran al hidrograma que se produce en la bifurcación del río, donde se encuentran las compuertas reguladoras. Por lo tanto, sólo una fracción de la crecida es derivada a Canal Cuatrerros.

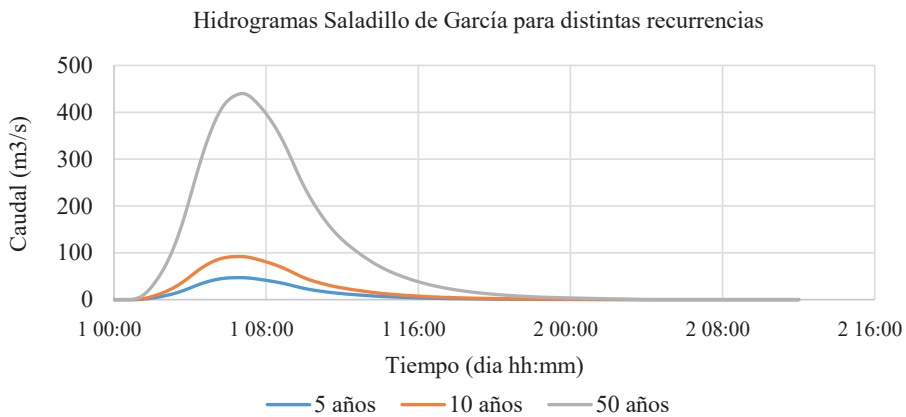


Figura 11. Hidrogramas simulados a partir de las tormentas de diseño para la sección de entrada al Anillo por debajo del puente carretero PC1. Fuente: elaboración propia.

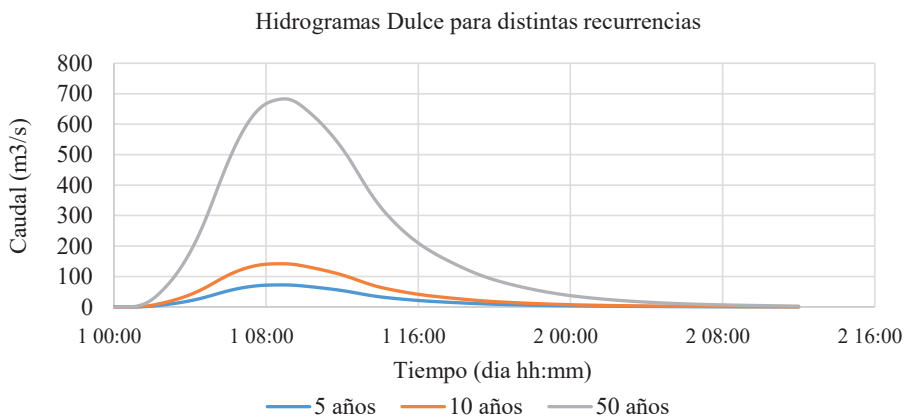


Figura 12. Hidrogramas simulados a partir de las tormentas de diseño para la sección de entrada al Anillo por debajo del puente carretero PC2. Fuente: elaboración propia.

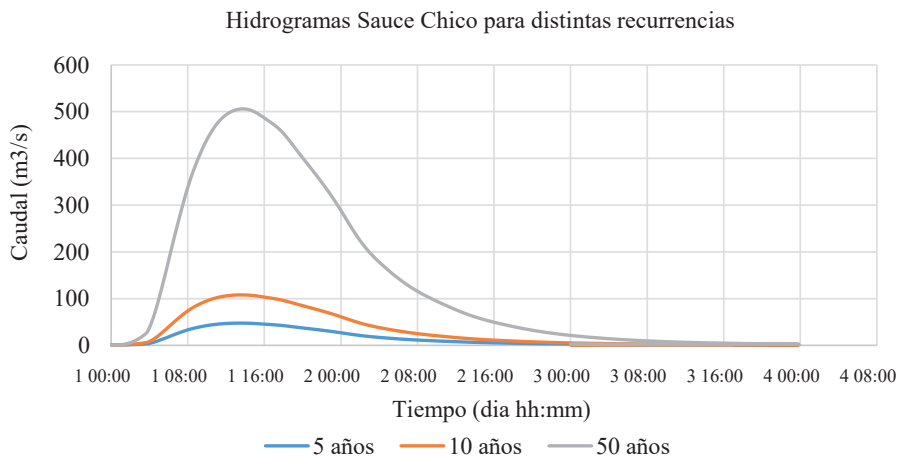


Figura 13. Hidrogramas simulados a partir de las tormentas de diseño para la bifurcación del Sauce Chico y Canal Cuatrerros. Fuente: elaboración propia.

Caudales pico (m³/s)			
Recurrencias (años)	Saladillo de García	Dulce	Sauce Chico
5	47	70	30
10	92	142	108
50	440	683	506
Tiempo de llegada del pico desde el comienzo de la precipitación (Hs)			
5	6:40	8:50	13:30
10	6:30	8:50	13:30
50	6:40	9:00	13:50
Volúmenes de descarga (m³ * 1000)			
5	1200	2600	4234
10	2370	5129	8600
50	11400	24800	37600

Tabla II. Caudales máximos, tiempos de llegada del pico y volúmenes de descarga en función de sus respectivas recurrencias simuladas. Fuente: elaboración propia.

El terraplén de la RN 3 Sur representa un obstáculo para las crecidas de los ríos y arroyos que se aproximan a su desembocadura (Fig. 3). Los terraplenes no poseen registros de haber sido superados por crecidas, por lo que el ingreso de agua al Anillo de GDC se produce a través de PC1 y PC2 (Tabla I y Fig. 3). Una vez que la crecida transpone estos puentes, otro terraplén, esta vez ferroviario, Línea Roca a Neuquén, es sorteado escurriendo debajo de las estructuras hidráulicas PF1 y PF2 (Tabla I y Fig. 3).

Modelo estadístico de valores máximos anuales

Se ha desarrollado un modelo de análisis de frecuencias utilizando la distribución de valores extremos de Weibull (Fig. 14) para los datos máximos anuales de nivel de marea.

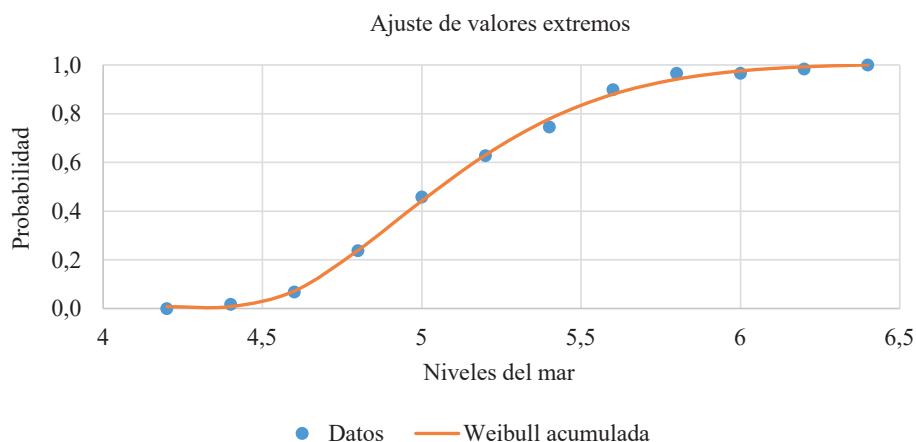


Figura 14. Ajuste de la distribución de Weibull acumulada a los datos procesados. Fuente: elaboración propia.

La distribución de valores extremos ajusta con un r^2 de 0.998, basada en una serie de 59 años de datos (1965 hasta 2022). Se realizó un test de Kolmogorov-Smirnov para indicar la bondad de ajuste, donde la hipótesis nula es: La serie de frecuencias de datos sigue una distribución de Weibull. El test indica que la mencionada hipótesis no puede ser rechazada para un nivel de significación de contraste $\alpha = 0,01$. Esta curva indica la probabilidad que tiene de producirse un valor menor o igual a un determinado valor de altura de marea máxima anual.

La Tabla III muestra las probabilidades de los valores extremos de los niveles máximos del mar en la zona de Ingeniero White de ser superados según la Distribución de Valores Extremos de Weibull.

Altura de marea (m) para la lectura del mareógrafo de CGPBB)	Probabilidad de altura de ser mayor (%)
4.2	99.2
4.4	99.2
4.6	92.8
4.8	76.1
5	55.8
5.2	37.0
5.4	22.2
5.6	12.0
5.8	5.9
6	2.5
6.2	0.8
6.4	0.0

Tabla III. Probabilidad estimada por Weibull de superar una altura máxima anuales en la zona de Ingeniero White. Fuente: Elaboración propia

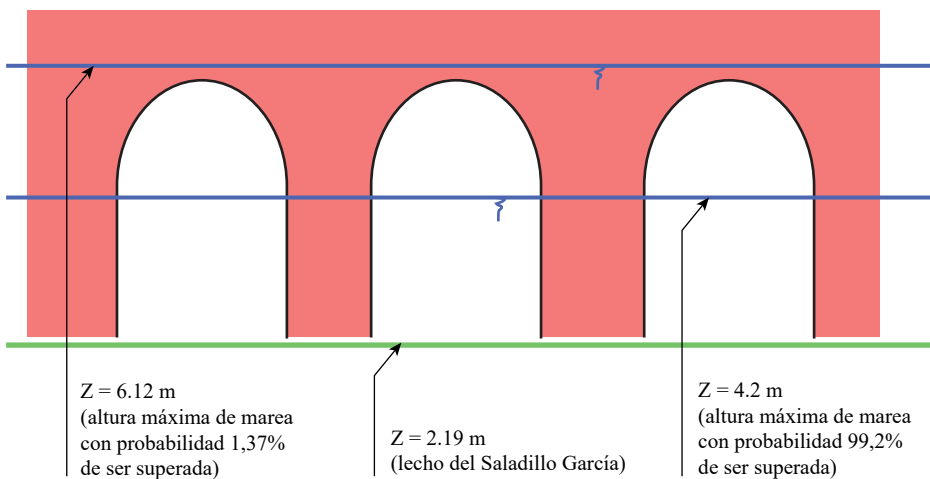


Figura 15. Esquema del puente sobre el Saladillo de García en el terraplén del ferrocarril línea Roca hacia Viedma (PF4 en Fig. 10), con marcas de niveles máximos de mareas asociados a sus probabilidades de ser igualados o superados. Fuente: elaboración propia.

En particular, la probabilidad asignada por la distribución de valores extremos para los dos máximos de la serie ocurridos en 1978 (6,28m) y 2022 (6,12m), tienen una probabilidad de ser superados del 0,37% y 1,3% respectivamente. Esto quiere

decir que al menos una vez al año, la altura de marea alcanzara o superará la cota indicada en Tabla III, con la probabilidad indicada.

El nivel de agua de 6,12 m, correspondiente al 1,37% de probabilidad de ser superado, está muy por encima de los 2,19 m de altura de fondo del lecho del Sauce Chico y del Saladillo de García en los puentes PF3, PF4, AF1 y PC4 (Tabla I y Fig. 10). Esto indica que los puentes por donde tiene que escurrir el agua, se encuentran anegados (Fig. 15).

Discusión y conclusión

El alto impacto humano en la zona del casco urbano, provoca la total afectación del drenaje natural de la zona de GDC (González, 2018). Es debido a ello que los terraplenes de los ferrocarriles y la red vial de la zona, que conforman un Anillo, constituyen barreras que pueden a veces proteger de las crecidas y otras entorpecer el escurrimiento. Es por ello que las estructuras sobre los terraplenes (puentes peatonales, viales, ferroviarios y alcantarillas) que circundan a GDC juegan un papel fundamental en la evacuación de las crecidas. Los niveles de marea alcanzados en circunstancias extraordinarias, no solo ahogan la salida del agua de los ríos, sino que provocan el ingreso de agua del estuario al Anillo.

Las precipitaciones sobre las cuencas de captación producen valores de escurrimiento directo del mismo orden para cada recurrencia considerada, pero los tiempos de llegada del pico de crecida se muestran distintos. La cercanía y dimensiones de la cuenca del Saladillo de García y el Dulce, producen caudales máximos similares al del Sauce Chico, a pesar de tener menores áreas. Pero el ingreso de la onda de crecida se hace notar antes en estos arroyos. La llegada del pico para el Saladillo de García y su afluente el Dulce rondan 6:40 y 9:30 respectivamente, lo que deja poco margen para reaccionar ante eventos como los simulados.

El Canal Cuatrerros, cuenta con su propia historia de inundaciones, las cuales cesaron a partir de la construcción de compuertas en el paraje La Horqueta. El tiempo en que el pico de la crecida llega a la desembocadura según Torrero (2009) se encuentra entre 7:30 y 14:30 h, lo cual resulta coherente con el tiempo de llegada del pico de crecida a la bifurcación de Canal Cuatrerros hallada. Asimismo, Torrero en base a series de datos de una estación hidrométrica de Dirección de Agua y Energía Eléctrica en Paso Bower presenta valores de caudales medidos entre 1945/46, donde se produjo un máximo histórico de 570 m³/s. Si bien el área de la cuenca considerada entonces era solo de 420 km², el valor simulado para la recurrencia de 50 años (505 m³/s) está dentro del mismo orden.

Las sudestadas causantes de las mareas eólicas, pueden o no coincidir con precipitaciones de alta recurrencia sobre las cuencas que desaguan en la zona de GDC.

Por ello, el escenario más desfavorable sería una tormenta que produzca crecidas en las cuencas del continente y mareas eólicas que ahoguen las salidas de los puentes de desagüe y eventualmente ingresen al Anillo que rodea a GDC. Este tipo de eventos se conocen como sudestadas, las cuales son frecuentes en la zona y pueden producir daños severos.

Los objetivos planteados en el trabajo fueron alcanzados. Se identificó al Anillo de GDC con todos sus terraplenes tanto carreteros como ferroviarios, se ubicaron e ilustraron las estructuras hidráulicas por las que el flujo circula. En cuanto a los niveles de marea, se estableció un modelo de Weibull para una serie de 59 años (1965-2022) en la zona de Ing. White. El test de Kolmogorov-Smirnov no rechaza la hipótesis nula para un valor de $\alpha = 0,01$, estableciéndose así la ley de probabilidades para los niveles máximos anuales evaluados.

Se implementó el HEC-HMS con éxito, a partir de tormentas de diseño con sus correspondientes recurrencias en base a curvas IDF. La simulación permitió hallar hidrogramas de crecidas, caudales del pico de crecidas, tiempo de llegada del máximo caudal y volúmenes de descarga para cada uno de los cursos de agua a la entrada del Anillo de GDC.

Se corroboró que la altura de marea para una sudestada de probabilidad de 1,37% de ser superada (6,12 m), provoca que los puentes sobre el terraplén sudoeste (línea Roca a Patagones) se ahoguen, obstaculizando el libre drenaje hacia el estuario de Bahía Blanca.

Referencias

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

Campo de Ferreras, A. M., Gabella, J. y Zapperi, P. A. (2012). *Medioambiente y Ordenamiento Urbano. Problemáticas hidroambientales en la ciudad de Bahía Blanca*. Trabajo presentado en IX Jornadas Nacionales de Geografía Física, Bahía Blanca. ISBN: 978-987-1648-32-0. Pp. 130-146. Recuperado de https://www.academia.edu/15326201/MEDIO_AMBIENTE_Y_ORDENAMIENTO_URBANO_PROBLEMATICAS_HIDROAMBIENTALES_EN_LA_CIUADAD_DE_BAHIA_BLANCA

Capelli de Steffens, A. M. y Campo de Ferreras, A. M. (2004). *Climatología del estuario de Bahía Blanca*. Departamento de Geografía. Universidad Nacional del Sur. Bahía Blanca. Recuperado: https://ggfaweb.files.wordpress.com/2018/12/2004_capelli-y-campo_climatologia-del-estuario-de-bahc3ada-blanca.pdf

Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca (CGPBB) (2023). *Datos históricos de niveles de marea en Ingeniero White, Puerto Galván y Puerto Belgrano*. Bahía Blanca: CGPBB. Recuperado de: <https://puertobahiablanca.com/vts-online.html>

Fernández, S. N., Pérez, D.E., 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. Recuperado de <https://ojs.uns.edu.ar/rug/article/view/4193/2312>

Fernández, S. N.; Pérez, D. E., Weis, C. F., Flores, M. A., y Abalo, P. O. (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. Recuperado a partir de <https://ojs.uns.edu.ar/rug/article/view/4024>

Fernández, S. N., Pérez, D. E., Weis, C. F., y Flores, M. Ángel. (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>

González, M. A. (2018). *Hidrogeomorfología de la cuenca del arroyo Saladillo de García Aplicada al Ordenamiento del Periurbano de Bahía Blanca*. (Tesis de grado). Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo, Bahía Blanca.

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

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

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC) (2001). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas*.

Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INDEC) (2010). *Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas*.

Kraser, M.B. (2013). El patrimonio edificado como testimonio de la historia local. Propuesta interpretativa en General Cerri (Argentina). *Perspectiva. Revista Electrónica Científica*, Recuperado de https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/10106/CONICET_Digital_Nro.14018.pdf?sequence=1&isAllowed=y

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

Lorda, M. A. (2005). *El desarrollo local, estrategia de gestión ambiental de la actividad agrícola en espacios próximos a la ciudad de Bahía Blanca* (Tesis doctoral inédita). Universidad Nacional del Sur, Departamento de Geografía y Turismo, Bahía Blanca.

Mastrandrea, A. y Pérez, M. I. (2016). *Percepción social del riesgo hídrico en barrios de las delegaciones Norte, Villa Harding Green y Villa Rosas de la ciudad de Bahía Blanca*. Trabajo presentado en las Primeras Jornadas de Hábitat y Ambiente, Mar del Plata. Recuperado de https://www.academia.edu/36566233/Percepci%C3%B3n_social_del_riesgo_h%C3%ADrico_en_barrios_de_las_delegaciones_Norte_Villa_Harding_Green_y_Villa_Rosas_de_la_ciudad_de_Bah%C3%ADa_Blanca.

Perillo, G. y Piccolo, M.C. (1991). Tidal response in the Bahía Blanca Estuary, Argentina. *Journal of Coastal Research*, 7(3), 437-449. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/4297848>

Perillo, G.M.E., Piccolo M.C., Arango y M.E. Sequeira J.M. (1987). *Hidrografía y circulación del estuario de Bahía Blanca (Argentina) en condiciones de baja descarga*. Trabajo presentado en el Segundo Congreso Latinoamericano sobre Ciencias del Mar, Lima, Perú. Recuperado de: https://www.researchgate.net/profile/Gerardo-Perillo/publication/284682416_Hidrografia_y_circulacion_del_estuario_de_Bahia_Blanca_Argentina_en_condiciones_de_baja_descarga/links/56ba425708ae6a0040ade5b2/Hidrografia-y-circulacion-del-estuario-de-Bahia-Blanca-Argentina-en-condiciones-de-baja-descarga.pdf

Rubio, M.L. y Silva, A. M. (2008). Transformación espacial de la delegación de General Daniel Cerri en el periodo 1967-2008. *Boletín Geográfico*, (31), 319–332. Recuperado a partir de <https://revele.uncoma.edu.ar/index.php/geografia/article/view/149>

Sequeira, M. (2006). Determinación de la relación entre la intensidad, la duración y la frecuencia de las precipitaciones en Bahía Blanca. En *Ambiente natural, campo y ciudad: estrategia de uso y conservación en el sudoeste bonaerense* (pp. 67-74). Bahía Blanca: Archivo de la Memoria.

Spagnolo, S. (2011). Gestión ambiental del desarrollo urbano. Estudio de caso: localidad de General Daniel Cerri. *Huellas*, (15), 180-197. Recuperado de <https://repo.unlpam.edu.ar/handle/unlpam/2754>

Torrero M.P. (2009). *Río Sauce Chico: Estudio hidrográfico para un desarrollo sustentable* (Tesis doctoral inédita). Universidad Nacional del Sur. Departamento de Geografía y Turismo, Bahía Blanca.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Ingeniero Civil Pablo Pascualetti, por su colaboración en la obtención de datos de marea, y, asimismo, a María Parodi y Mariano Fernández, por su participación en los trabajos de relevamiento de campo. El presente estudio fue financiado por la Secretaría General de Ciencia y Tecnología de la Universidad Nacional del Sur (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”.

Fecha de recepción: 22 de marzo de 2023

Fecha de aceptación: 17 de octubre de 2023

© 2023 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