

Estimación y análisis espacial de la susceptibilidad hídrica en cuencas hidrográficas de llanura (Argentina)

Spatial analysis and estimation of the hydric susceptibility in hydrographical basins of plains (Argentina)

VANESA YAEL BOHN¹  0000-0002-4050-8664

ALDANA MASTRANDRE¹  0000-0001-6902-1692

¹ Universidad Nacional del Sur (UNS), CONICET, DGyT. Bahía Blanca, Argentina.

Resumen

La ocurrencia de eventos extremos de precipitación produce impactos en la dinámica de las cuencas hidrográficas, ocasionando fenómenos de anegamiento, variabilidad de la humedad del suelo y desbordes de cursos de agua, entre otros. En la llanura pampeana argentina, es habitual la alternancia de períodos secos y húmedos. Por esta razón, los estudios de las consecuencias de estos eventos son de gran utilidad para la gestión de los recursos y el uso de la tierra. El objetivo de esta investigación fue estimar la susceptibilidad hídrica en dos cuencas hidrográficas de la llanura argentina, mediante una evaluación multicriterio que incluyó el análisis y ponderación de variables climáticas, fisiográficas, edáficas e hidrológicas. El procesamiento de los datos se realizó en un entorno de SIG (Sistemas de Información Geográfica) y a partir de información proveniente de bases de datos publicadas de libre acceso (ej: bases de datos HydroBASINS e HydroLAKES [Lehner y Grill, 2013]), en formato ráster y vectorial. Como resultado se obtuvo mayor representatividad de la categoría de susceptibilidad hídrica baja (83 % y 52,9 % en las cuencas de los arroyos Napostá Chico y Chasicó, respectivamente) y moderadamente baja en ambas cuencas (14,3 % y 43,8 % en las cuencas de los arroyos Napostá Chico y Chasicó, respectivamente). De las variables analizadas, mediante la elaboración de una matriz de consistencia, se determinó que las de mayor peso en la estimación de la susceptibilidad fueron el desarrollo de paleocanales y los rasgos geomorfológicos.

Fechas • Dates

Recibido: 2023.06.09
Aceptado: 2023.09.13
Publicado: 2024.10.07

Autor/a para correspondencia Corresponding Author

Vanessa Yael Bohn
vanesa.bohn@uns.edu.ar

Palabras clave: evaluación multicriterio; SIG (Sistemas de Información Geográfica); ponderación de variables; matriz de consistencia.

Abstract

Rainfall extreme events occurrence impacts the hydrographical basins by flooding, soil humidity variation and creeks and river overflows. In the study area, the alternate wet and dry periods is usual. For this reason, studies about the events effects are relevant for resources and land use management. The objective of this study was to estimate the hydrological susceptibility in two hydrological basins of Argentinean plains, by a multicriteria evaluation which includes the analysis and weighing of climatological, physiographic, edaphic, and hydrological variables. The data processing was done within a GIS (Geographic Information System) and from database information, previously published, and available (i.e.: HydroBASINS and HydroLAKES databases [Lehner y Grill, 2013]), in a raster and vector format. As a result, the hydrological susceptibility category with the highest representativity was low (83 % y 52,9 % in Napostá Chico y Chasicó basins, respectively) and moderately low in both cases (14,3 % y 43,8 % in Napostá Chico y Chasicó basins, respectively). From the analyzed variables, by the consistency matrix elaboration, there was determined that the highly weighted variables were the paleochannels development and the geomorphological features.

Keywords: multicriteria evaluation; GIS (Geographic Information System); variable weighting; consistency matrix.

1. Introducción

Los eventos de inundación están entre los desastres naturales más frecuentes y costosos en términos de pérdidas humanas y económicas en diversos lugares del mundo (Pradhan y Youssef, 2011; Olcina Cantos, 2017; Pinos et al., 2017; EM-DAT, 2021; López-Martínez, 2023). Cuando se generan en forma natural, solo se cuenta con las herramientas de la mitigación y la adaptación. Para la planificación de ambas medidas, es necesario contar con un conocimiento basado en estudios retrospectivos de la dinámica de los factores edáficos (textura predominante), topográficos (pendiente), de uso y cobertura de la tierra y, en especial, de los factores climáticos. Estos últimos incluyen el estudio de eventos extremos de precipitación, los que se definen en relación a los excesos o carencias del agua y conforman el 90 % de los llamados desastres “naturales”. Este tipo de eventos remiten a episodios cuya duración es menor a una semana. Cuando superan dicho rango temporal, se trata de eventos climáticos extremos (Barros y Camilloni, 2016). La mayor o menor predisposición a la ocurrencia de un evento en el espacio geográfico, se refiere al concepto de susceptibilidad (Sepulcri et al., 2012). La misma depende del régimen de precipitaciones, uso de la tierra, topografía del terreno (Olivera Acosta et al., 2011) características de permeabilidad y procesos degradativos del suelo (Vélez et al., 2023). La mayor susceptibilidad hídrica se observa en las áreas más afectadas ante un evento de inundación (Soldano, 2009) y es la probabilidad de que una inundación ocurra en un área en dependencia de las condiciones topográficas y de las posibles medidas de adaptación/mitigación. En relación a este concepto, se desarrolló un método para la identificación de las áreas susceptibles a inundaciones sobre la base del mapeo y el cómputo de dos índices, referidos a su potencialidad. Los mismos se obtuvieron a partir de la integración de variables geográficas en un Sistema de Información Geográfica (SIG) y se aplicaron en diferentes zonas (montañosas y de menor altitud) dentro de la cuenca del río Prahova (Rumania). Como resultado se obtuvo una zonificación de la susceptibilidad a las inundaciones proveyendo de información cartográfica a aquellas regiones que carecen de mapas de riesgo de inundación. Se constató que los mapas resultantes constituyeron un paso preliminar para el asesoramiento a la población acerca del riesgo de inundación y la vulnerabilidad (Zaharia et al., 2017). Las carac-

terísticas de las cuencas hidrográficas y sus respuestas hidrológicas pueden tener efectos severos en la ocurrencia y la extensión de las inundaciones. En Australia, los mapas de susceptibilidad a las inundaciones se calcularon a partir de índices morfométricos que fueron obtenidos a partir de datos de topografía (DEM SRTM), mapas topográficos y geológicos. Posteriormente a ello, estos índices morfométricos fueron agrupados de acuerdo a su influencia en la ocurrencia de inundaciones. Para la validación del método se tuvieron en cuenta mapas históricos de inundación (Ahmed, Hewa y Alrajhi, 2021) y los resultados brindaron información clave para los sectores encargados de la gestión y toma de decisiones. La susceptibilidad hídrica fue estimada sobre la base de la elaboración de cartografía para la región del Delta del Paraná (Argentina) con el objetivo de proporcionar conocimiento a los sectores agropecuarios y forestales. El grado de afectación del agua se estimó para el tramo medio del delta Paranaense, durante el período 1980 - 2010, mediante el procesamiento de imágenes satelitales de alta resolución. Dicha información analizada en conjunto con las cartas topográficas de la zona constituyó una herramienta clave para los productores agropecuarios, a fin de conocer los impactos derivados de una mayor frecuencia y/o intensidad de fenómenos hidrometeorológicos extremos en un área determinada (Sepulcri et al., 2012). Para el sector inferior de la cuenca hidrográfica del río Negro (Patagonia argentina), a nivel temporal, se constató un aumento de dicha susceptibilidad durante períodos pluviométricamente húmedos con el desarrollo de pequeñas lagunas y modificaciones a lo largo del curso de agua principal (García Bu Bucogen, Bohn y Piccolo, 2021). La alternancia de inundaciones y sequías y su ocurrencia en la región pampeana argentina es un fenómeno que forma parte de un mismo proceso que involucra el clima, la red de drenaje deficiente y las limitantes de los suelos para el almacenamiento de los excedentes (Taboada y Damiano, 2017).

El área de estudio involucra dos cuencas hidrográficas de la llanura pampeana argentina: cuenca del arroyo Chasicó y cuenca del arroyo Napostá Chico o Bajo Hondo (Figura 1). En relación al clima, de acuerdo a la regionalización del área pampeana realizada por Aliaga et al. (2017), el área de estudio se desarrolla en las zonas climáticas semiárida y templada del sistema de Ventania. En el primer caso, que incluye las porciones inferiores de ambas cuencas, presenta escasa precipitación anual, vientos intensos y una alta variabilidad de las precipitaciones en cuanto a la ocurrencia de períodos secos y húmedos. En cuanto a la región templada, que incluye a las zonas de cuenca media y alta (en ambos casos), presenta predominio de los vientos del NO e influencia de frentes fríos principalmente en invierno. Los períodos secos no son usuales y, cuando ocurren, presentan baja intensidad y duración (Aliaga et al., 2017).

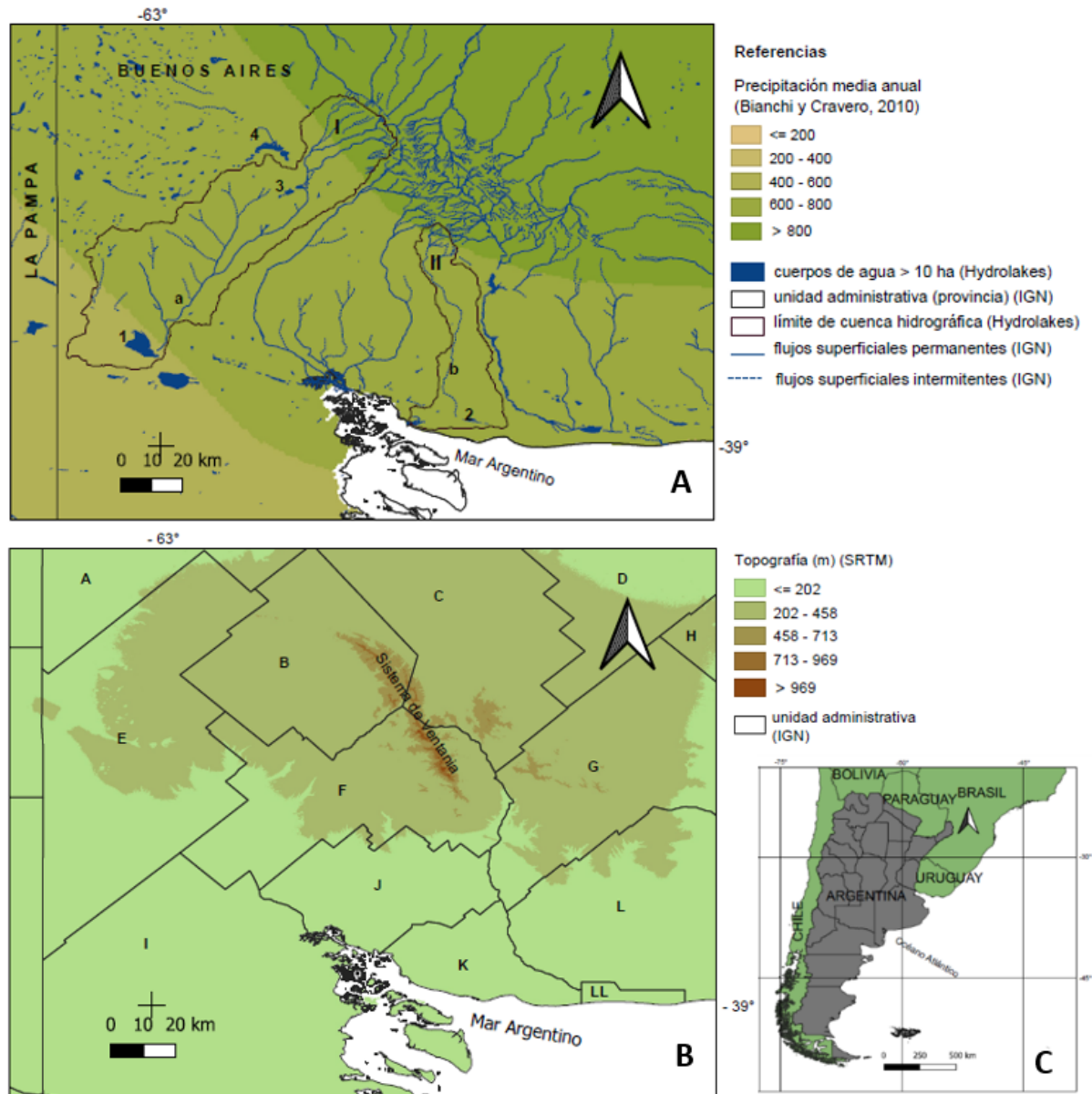
Las precipitaciones, en ambas zonas climáticas, presentan los montos mínimos mensuales durante el invierno, alcanzando 692 mm/año y 369 mm/año, para el período 1960 - 2010 en la región templada del sistema de Ventania (sector medio y superior de ambas cuencas hidrográficas) y semiárida (cuencas hidrográficas inferiores), respectivamente. En cuanto a las temperaturas medias anuales, las mismas fueron de 16 °C y 15 °C, respectivamente, para las mismas regiones y período (Aliaga et al., 2017). La totalidad del área de estudio presentó estaciones térmicas diferenciadas, con valores medios mensuales de 20 - 25 °C durante los meses de verano y de 6 - 15 °C durante el invierno. En cuanto a la topografía, el área de estudio presenta una amplitud de relieve cercana a los 1000 msnm, teniendo en cuenta que la altura máxima se registra en el sistema de Ventania (Figura 1). Desde un punto de vista geomorfológico, incluye las unidades de Positivo Bonaerense y Cuenca tectónica del Salado (Zárate y Rabassa, 2005). Desde el punto de vista hidrológico, ambas cuencas se sitúan en una región de 0,04 km/km² de densidad de drenaje (Kruse y Laurenzana, 2005). En cuanto al uso del suelo, predominan las actividades agropecuarias (Puntoriero, Volpedo y Fernández Cirelli, 2014). Específicamente, la cuenca del arroyo Chasicó (Figura 1) se

localiza en el extremo oeste de la región pampeana argentina e incluye las unidades administrativas de Puán, Saavedra, Tornquist y Villarino, alcanzando un área aproximada de 3764 km². Su orientación es NE – SO y limita con las cuencas hidrográficas del río Sauce Chico (al E) y la cuenca del arroyo Pigüé (al N). Presenta dos arroyos principales, el Cochenleufú Grande y Chico, cuyas nacientes se encuentran en las sierras de Curamalal (Sistema de Ventania). Estos confluyen con arroyos menores y desembocan en la laguna Los Chilenos (Figura 1) desde la cual surge el Chasicó, como arroyo efluente. A lo largo de su recorrido recibe el aporte de los arroyos Pelicurá, San Ramón y Sanquilco Grande (Bonorino, Ruggiero y Mariño, 1989). Se trata de una cuenca de carácter endorreico siendo, la laguna Chasicó, el cierre de la misma. La laguna, con un área y profundidad aproximada de 50 km² y 10 m, respectivamente, se localiza en una faja tectónica por debajo del nivel del mar (Volpedo y Fernández Cirelli, 2013). Su fuente de alimentación es la precipitación directa, la descarga de agua subterránea y el escurrimiento superficial de toda la cuenca (Bonorino, Ruggiero y Mariño, 1989). La cuenca presenta un comportamiento hidrológico ligado a los aportes de la precipitación, como así también, a aquellos provenientes de la descarga subterránea, recibidos por el arroyo Chasicó en su trayecto (Bonorino, Ruggiero y Mariño, 1989). Dicha dinámica involucra períodos de integración del sistema, con excedentes hídricos y de desconexión, con déficit. Las variaciones en relación con la población local también han sido estudiadas por Zinger (2000) desde la perspectiva de la relación sociedad – naturaleza. Específicamente para el área de la laguna Chasicó, que constituye el cierre de la cuenca endorreica, se han realizado estudios vinculados con las variaciones de su área mediante modelos matemáticos, los cuales contemplaron la evaporación, datos meteorológicos e hidráulicos. Se modeló el comportamiento hidrológico de la laguna en situaciones de extrema sequía para observar sus efectos en los niveles de salinidad y sus condiciones ecológicas (Siniscalchi et al., 2018). Sobre la base de estudios históricos, que mostraron la influencia de la sequía en la salinidad y extensión areal de ciertos cuerpos de agua de la llanura argentina, Kopprío et al. (2014) desarrollaron un modelo ecohidrológico orientado a plantear perspectivas de manejo futuro en la laguna Chasicó. También sus características ópticas y morfométricas fueron analizadas (Bohn, Piccolo y Perillo, 2013; Bohn et al., 2019) para lograr una zonificación espacial y caracterización general. Se demostró la influencia del arroyo en los niveles de turbidez y su profundidad máxima en 2010 fue de ~ 5 m. Los cambios en la biomasa de *O. bonariensis* en relación con el cambio climático y las variaciones de salinidad entre los años 1997 y 2013 fueron analizados (Berasain et al., 2015) y tras ello se detectó que desde 2004 a 2013, cuando comenzó un período seco, se produjo una reducción del área y un aumento de la salinidad tras lo cual *O. bonariensis* mostró un decrecimiento. Por otra parte, el sistema hidrológico de la cuenca del arroyo Chasicó también incluye a la laguna Los Chilenos, la cual actúa como receptora de los caudales de los arroyos cuyas nacientes se encuentran en el sistema serrano y luego confluyen hacia el arroyo principal. Arias y Geraldi (2019) analizaron la respuesta areal de la laguna en relación a eventos secos y húmedos y determinaron que existe correlación.

Al igual que la cuenca del arroyo Chasicó, la del arroyo Napostá Chico es de tipo endorreica (1320 km²). El cierre de la misma lo constituye la laguna Unamuno, de carácter permanente (Bohn, 2009) y, de extensiones areales variables (en dependencia de las precipitaciones), de aproximadamente 9,7 km² (Bohn, Piccolo y Perillo, 2007). En dicha área, se estudiaron los eventos húmedos y secos durante un período mayor a 60 años y se obtuvo una ocurrencia de 17 y 12 eventos húmedos y secos, respectivamente con duración de entre 2 y 6 meses (en los de categoría moderada) y de 5 - 19 meses para los de categoría extrema (tanto secos como húmedos). Dicha variabilidad y ocurrencia de eventos extremos permite observar la necesidad de un estudio re-

prospectivo con un enfoque desde la estimación de las probabilidades de ocurrencia de desastres naturales tales como inundaciones y sequías (Bohn, 2019).

Figura 1. Localización del área de estudio: A) Delimitación de las cuencas hidrográficas del arroyo Chasicó (I) y arroyo Napostá Chico o Bajo Hondo (II) en el SO de la provincia de Buenos Aires (Argentina): 1) laguna Chasicó; 2) laguna Unamuno; 3) laguna Los Chilenos; 4) laguna De Los Flamencos; a) arroyo Chasicó; b) arroyo Napostá Chico o Bajo Hondo; B) Topografía y unidades administrativas (partidos): A) Adolfo Alsina; B) Saavedra; C) C. Suárez; D) G. La Madrid; E) Puan; F) Tornquist; G) C. Pringles; H) A.G. Chávez; I) Villarino; J) Bahía Blanca; K) C.M.L. Rosales; L) C. Dorrego; LL) Monte Hermoso; C) localización relativa (escala nacional).



Fuente: elaboración propia sobre las siguientes fuentes de datos: Atlas Climático de la República Argentina (Bianchi y Cravero, 2010); Instituto Geográfico Nacional (IGN) de la República Argentina, Modelo de Elevación Digital (DEM SRTM) (CGIAR-CSI, 2004 - 2023) (<https://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/>) y bases de datos HydroLAKES e HydroBASINS (Lehner y Grill, 2013).

Todos los hallazgos anteriormente citados muestran el importante dinamismo y variabilidad hidrológica y climática de las cuencas de la región y su relación con los eventos extremos. Es por ello que el objetivo de esta investigación fue realizar una evaluación multicriterio sobre la base de

características climáticas, fisiográficas, edáficas e hidrológicas para la estimación y análisis de la susceptibilidad hídrica en las cuencas hidrográficas anteriormente mencionadas, localizadas en la llanura pampeana argentina.

2. Metodología

La susceptibilidad hídrica en las cuencas hidrográficas de los arroyos Chasicó y Napostá Chico, en la llanura pampeana argentina (Figura 1) se estimó a partir de información fisiográfica, hidrológica, edáfica y climática del área. Se aplicó el método de evaluación multicriterio (EMC) mediante la consideración de información previa y dentro de ella el método de agregación de proceso analítico jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP). Esta es una metodología multicriterio con fundamentos matemáticos, desarrollada a fines de la década de 1970 por Thomas L. Saaty (Pacheco y Contreras, 2008). Dicha metodología incluye la descomposición de estructuras complejas en sus componentes, ordenándolos en una estructura jerárquica a partir de los cuales se obtienen valores numéricos según los juicios de preferencia y luego se los sintetiza para determinar la prioridad de las variables (Pacheco y Contreras, 2008).

El cálculo de la prioridad se realiza mediante la comparación por pares, teniendo en cuenta la influencia que ejercen unos sobre otros y las jerarquías. De esta manera, se aplica una escala de preferencias (prioridades), mediante la cual se obtiene una matriz con valores de 1 a 9, otorgándoles de igual a extrema importancia (Pacheco y Contreras, 2008). En primera instancia se realizó la ponderación de cada una de las variables y sus categorías. Dicha ponderación, si bien presenta un carácter subjetivo, se sustenta en conocimientos previos y en una exhaustiva revisión bibliográfica. El procedimiento realizado se detalla a continuación para cada una de las variables analizadas: textura de suelo (T), máxima extensión de agua (MEA), desarrollo de paleocauces (P), rasgos geomorfológicos (RG) e índice de aridez de De Martonne (IA), este último calculado para Argentina en el Atlas Climático Digital de la República Argentina (Bianchi y Cravero, 2010). La información vectorial correspondiente a los límites de las cuencas hidrográficas y los cuerpos de agua > 10 ha fueron obtenidas, con libre acceso, de las bases de datos HydroBASINS e HydroLAKES, respectivamente (Lehner y Grill, 2013). Todas las operaciones se realizaron mediante la aplicación del SIG de libre acceso, QGIS 3.16.10.

2.1. Textura de suelo (T)

La textura de suelo para el área de estudio fue analizada a partir del mapa, disponible en formato vectorial, de suelos de la República Argentina (E: 1: 500 000) desarrollado y publicado por el INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) (1990). Las categorías de textura de suelo, presentes para el área fueron las siguientes: franco arenoso, franco limoso, franco arcilloso, areno-franca, franca y arenosa. Las mismas fueron ponderadas (Tabla 1) de acuerdo a los criterios enunciados por FAO (Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación) (2009) en relación con la permeabilidad de los suelos según textura y con la ponderación realizada por Bohn y Piccolo (2019) para la estimación de la vulnerabilidad hidrológica en 3 cuencas hidrográficas de la región pampeana argentina. Por último, la información edáfica vectorial proporcionada por INTA (1990) fue reclasificada y convertida a formato ráster en el SIG QGIS 3.16.10.

2.2. *Máxima extensión de agua (MEA)*

La MEA para la región fue obtenida, en archivo ráster, de la base de datos Global Surface Water (Pekel et al., 2016), desarrollada a escala global. Dicho set de datos utiliza información de imágenes satelitales LANDSAT correspondientes al período 1984-2021. Cada pixel fue clasificado de acuerdo a la presencia o ausencia de agua. La variable analizada, MEA, provee información a lo largo de dichos años y es la unión de todos los sets de datos de cada año. Los valores 0 y 100 fueron asociados a ausencia y presencia de agua, respectivamente (Tabla 1).

2.3. *Índice de aridez (De Martonne)*

Se utilizó el mapa del índice de aridez de De Martonne (IA), elaborado para el Atlas Climático Digital de la República Argentina (Bianchi y Cravero, 2010), sobre la base del índice de aridez mencionado, desarrollado por el geógrafo francés Emmanuel De Martonne en el año 1926. El mismo se calcula hallando el cociente entre la precipitación y la temperatura del aire más el número diez ($Ia = P / (T + 10)$). El mapa, en formato ráster, fue obtenido, con libre acceso y formato ráster, del Geoportal IDESA (<http://geoportal.idesa.gob.ar/>) y corresponde al Atlas climático digital de la República Argentina (Bianchi y Cravero, 2010). A partir del mismo, se determinan áreas desiertas (hiperáridas, IA entre 0 y 5), semidesiertas (áridas, IA entre 5 y 10), semiáridas (IA entre 10 y 20), subhúmedas (IA entre 20 y 30), húmedas (IA entre 30 y 60) y Perhúmedas (IA > 60). Dichas categorías fueron ponderadas de acuerdo a su contribución a la ocurrencia de inundaciones y de mayor humedad del suelo. La misma se realizó según expresa el detalle brindado en la Tabla 1 y sobre la base de conocimientos previos de la hidrología de la región (Bohn, Piccolo y Perillo, 2013; Siniscalchi et al., 2018; Bohn et al., 2019; Arias y Geraldini, 2019). El mapa correspondiente al índice de aridez también fue reclasificado sobre la base de los antecedentes bibliográficos de la climatología del área en relación con la ocurrencia de eventos de anegamiento y sequía en la región (Carbone, Fornerón y Piccolo, 2015; Ferrelli et al., 2021) (Tabla 1) y de acuerdo a la distribución espacial de la precipitación en Argentina (Bustos, Ferrelli y Piccolo, 2017). La misma indica, para la región de estudio, precipitaciones anuales de 800 a 400 mm/año, disminuyendo desde el NE hacia el SO (Figura 1). Dicha información se complementó con datos acerca del número y localización de eventos extremos húmedos registrados en la región (Bohn, Piccolo y Perillo, 2011).

2.4. *Desarrollo de paleocauces*

Esta variable, relacionada a la topografía de la región, fue analizada a partir del modelo de elevación digital (MDE-Ar v2.0) desarrollado por el IGN (Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina) a partir de una combinación de datos capturados por las misiones satelitales SRTM y ALOS. El mismo cubre la totalidad del territorio continental argentino y su referencia vertical coincide con el Sistema de Referencia Vertical Nacional (SRVN16). Tiene una resolución espacial de 30 m y una precisión vertical de aproximadamente 2 m (<https://www.ign.gob.ar/>). La contribución del desarrollo de paleocauces (P) a la generación de lagunas intermitentes y anegamientos fue constatada por Bohn, Perillo y Piccolo (2011) para el centro sur de la provincia de Buenos Aires (Argentina), un sector de llanura cercano al área de estudio y de características físicas similares. Los paleocanales o paleocauces fueron estimados a partir del MDE-ar (IGN) y la aplicación de la herramienta para la determinación de acumulación de flujos disponible en QGIS. El mapa resultante, obtenido en formato ráster, se reclasificó en 2 categorías: presencia (100) y ausencia (0) de paleocanales, teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia de inundaciones. La información obtenida fue contrastada con la información vectorial obtenida de la base de

datos del IGN de la República Argentina referida a cursos de agua permanentes e intermitentes. La ponderación se realizó de acuerdo al detalle brindado en la Tabla 1, indicando mayor susceptibilidad hídrica para los píxeles correspondientes a paleocanales (100).

2.5. Rasgos geomorfológicos

Los rasgos geomorfológicos para ambas cuencas hidrográficas fueron ponderados sobre la base de conocimientos y antecedentes de la hidrología de la región asignada a información vectorial provista por el INTA (1990) en su mapa de suelos de la República Argentina (E: 1: 500 000). De acuerdo a Kruse y Laurencena (2005) el almacenamiento superficial de agua en la provincia de Buenos Aires (Argentina) (Figura 1.c) se produce en cañadas y bajos, que almacenan temporalmente o retardan la infiltración de agua, lo cual se traduce en el presente trabajo como valores altos en relación a la susceptibilidad hídrica (Tabla 1). Para las lagunas pampeanas de Argentina, numerosos estudios han mostrado la variabilidad de sus áreas en relación a la pluviometría. Ante un aumento en la precipitación u ocurrencia de evento húmedo, las áreas aledañas a las lagunas presentaron anegamiento (Bohn, Piccolo y Perillo, 2013; Ferrelli y Aliaga, 2015; Bohn et al., 2016; Brendel et al., 2021; Carbone, Fornerón y Piccolo, 2015) así como también son susceptibles a inundación, las zonas de valle de la región (La Brújula24, 2021). Muchas de ellas se configuran, en épocas de mayor pluviometría, como bañados de desborde fluvial (Rodríguez et al., 2018). Los arroyos que nacen en llanuras serranas (Kruse y Laurencena, 2005) presentan buen drenaje en sus nacientes mientras que, al ingresar en las zonas de menor pendiente, son alimentados por aguas subterráneas, las cuales se encuentran en relación al régimen de precipitación en la región pampeana argentina (Bohn et al., 2020). En el sector SO de ésta, los arroyos son intermitentes y sus caudales se relacionan con la humedad regional y se alimentan de los excedentes drenados superficialmente (Kruse y Laurencena, 2005).

En un esquema acerca de los procesos hidrológicos del sector norte de la región pampeana argentina, realizado por Aragón et al. (2010), se describe el comportamiento de los principales flujos durante una inundación. Al inicio de ésta, se genera un exceso de agua y el nivel freático presenta un ascenso a la superficie como respuesta. En esta etapa, tanto los flujos de agua subterránea como los de agua superficial predominan por igual en tierras bajas y altas. Con el proceso de precipitaciones intensas, los cuerpos de agua aumentan su superficie favoreciendo el transporte de agua desde las tierras altas hacia las zonas más bajas, por lo que presentan menor y mayor susceptibilidad hídrica en la ponderación asignada, respectivamente (Tabla 1).

Tras la asignación de los pesos correspondientes (Tabla 1), se aplicó la ponderación a las variables que fue obtenida a partir de la comparación por pares (método AHP), mediante el complemento AHP del SIG QGIS v 2.8. Finalmente, se obtuvo el mapa final de susceptibilidad hídrica utilizando la calculadora ráster del SIG, tras la suma de los mapas ráster de cada variable, multiplicados por el peso correspondiente.

Tabla 1. Fuentes y características de los datos utilizados para la estimación de la susceptibilidad hídrica de dos cuencas hidrográficas de la llanura argentina.

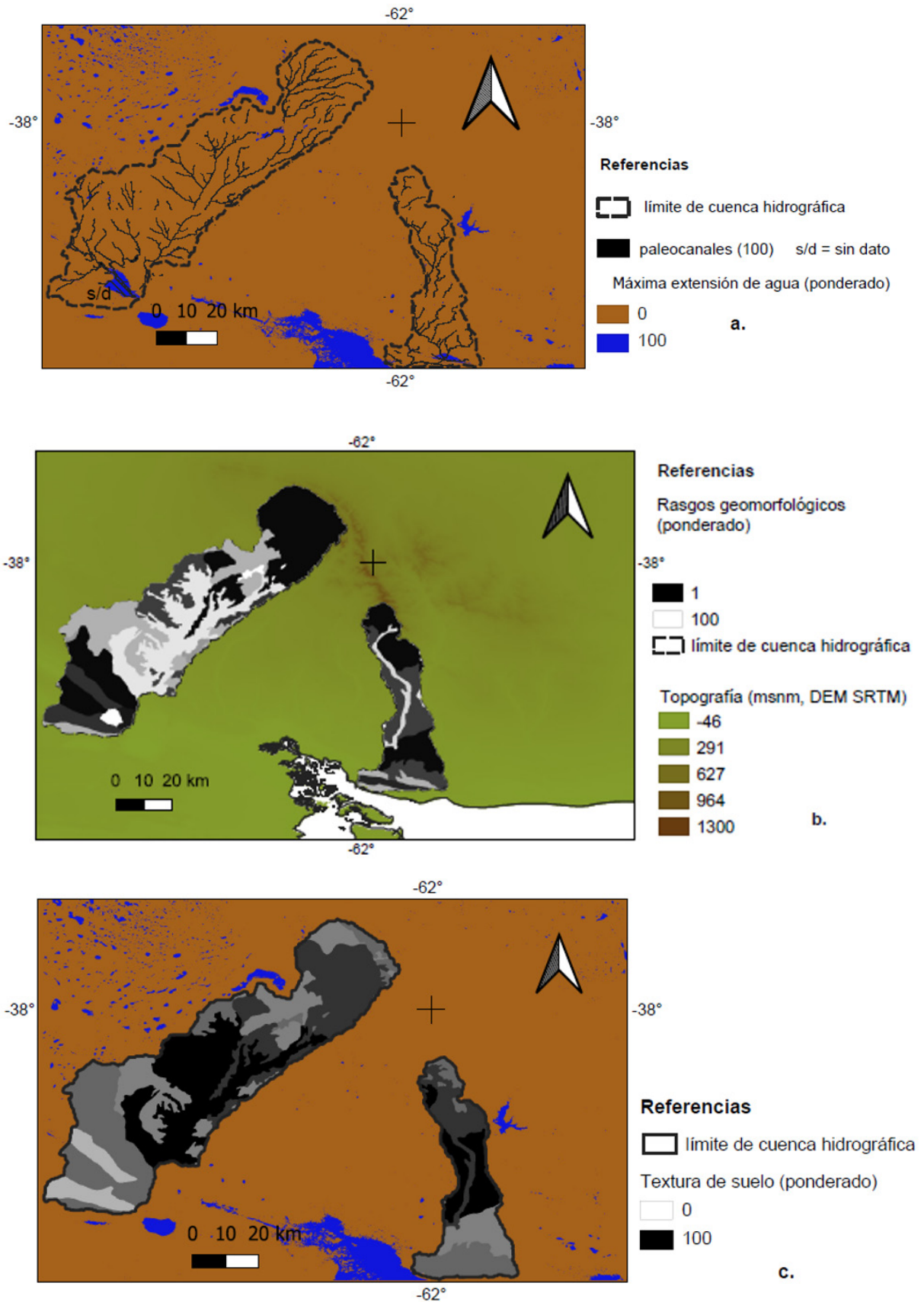
Variable/parámetro		Fuente	Ponderación
Rasgos hidrológicos	Máxima extensión de agua (MEA)	Pekel et al. (2016)	Presencia de agua: 100 Ausencia de agua: 0
Rasgos climatológicos	Índice de aridez de De Martone (IA)	Atlas Climático de la República Argentina (Bianchi y Cravero, 2010)	IA 0-10, desierto y semidesierto = 5 IA 10-20, semárido de tipo Mediterráneo = 20 IA 20-30, subhúmedo = 30 IA 30-60, húmedo = 50 IA > 60, perhúmedo = 70
Rasgos edáficos	Textura del suelo (T)	INTA (1990)	Franco arcillosa: 100 Franco limosa: 80 Franco arenosa y arenosa franca: 60 Franca: 50 Arenosa: 30
Rasgos topográficos	Rasgos geomorfológicos (RG)	INTA (1990)	Pendiente: 5 Afloramiento rocoso: 5 Lomas con tosca subsuperficial: 20 Albardón: 20 Loma medanosa: 20 Loma: 25 Meseta con tosca: 60 Planicie: 70 Llanura: 70 Duna: 15 Planicie arenosa: 10 Borde de valle: 85 Valle: 90 Lago/laguna: 100
	Paleocanales (P)	IGN MED-ar (30 m) Operaciones SIG	Presencia de paleocanales: 100 Ausencia: 0

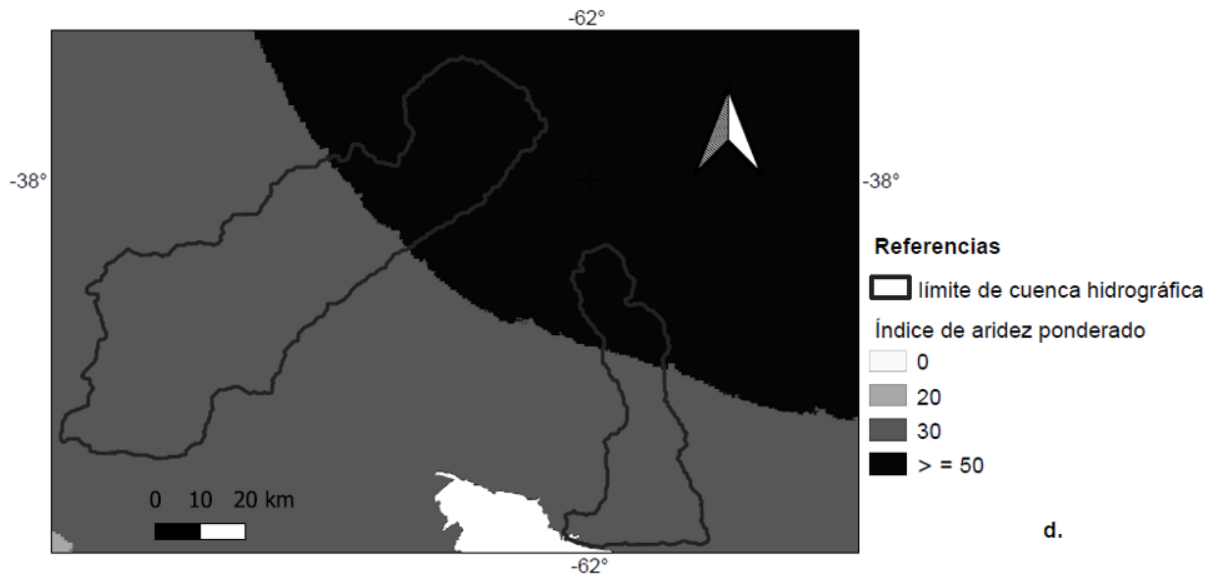
Fuente: Elaboración propia

3. Resultados

Como resultado se obtuvieron los mapas de las variables ponderadas, para ambas cuencas hidrográficas. En el caso de la presencia de paleocanales, estimados a partir del MED-ar, se obtuvo una densidad superior a la de los flujos superficiales (Figura 2.a). Este rasgo se observó en ambas cuencas, en las que, tal como se expresó anteriormente, los arroyos principales son de carácter permanente (Figura 1) y presentan sus nacientes en el sistema de Ventania. En cuanto a la MEA, se destacaron las áreas ocupadas por las lagunas permanentes de la región (Figura 1): Chasicó, Los Chilenos, Los Flamencos, Unamuno y cuerpos de agua con extensión aproximada de 1 km² (Figura 2). En relación a los rasgos geomorfológicos, las zonas de pendiente, planicie, valle y loma presentaron mayor representatividad. En el primer caso, el valor de ponderación fue bajo (5) mientras que, en los 3 restantes, fue alto (25, 70, 90) dada la relación de estas geofomas con la escorrentía y/o el anegamiento (Figura 2.b).

Figura 2. Variables ponderadas (0 – 100) para la estimación de la susceptibilidad hídrica en dos cuencas hidrográficas de la llanura pampeana argentina: a) desarrollo de paleocanales y máxima extensión de agua; b) rasgos geomorfológicos; c) textura de suelo; d) índice de aridez.





Fuente: elaboración propia sobre las siguientes fuentes de datos: Bianchi y Cravero (2010), Instituto Geográfico Nacional de la República Argentina (IGN), Pekel et al. (2016) e INTA (1990).

El mapa de la variable textura edáfica realizado sobre la base del mapa de suelos de la República Argentina (1: 500 000) (INTA, 1990) presentó valores altos (Tabla 1) en la ponderación para los sectores medios de ambas cuencas hidrográficas, dada la presencia de suelos con textura franco arcillosa. En el caso de las zonas de cuenca inferior, en ambos casos predominó la textura arenosa y franco arenosa, por lo que se obtuvieron valores de 30 - 50 para la ponderación. En los sectores de la cuenca alta, en ambos casos, predominó la textura franca y franco limosa (Figura 2.c). La ponderación del índice de aridez mostró relación con el trazado de las isohietas de la región (Bianchi y Cravero, 2010) y la zonificación de la región pampeana según su régimen pluviométrico (Aliaga et al., 2016), con mayor humedad en los sectores de cuenca alta, para ambos casos (Figura 2.d). Tras la elaboración de la matriz de consistencia (Tabla 2), realizada según la escala de Saaty (1980) se obtuvo un CR = 0,05 y los pesos para cada variable fueron los siguientes: MEA, 0,121; índice de aridez, 0,155; textura de suelos, 0,094; desarrollo de paleocanales, 0,339 y rasgos geomorfológicos, 0,292. Con el criterio de probabilidad de susceptibilidad hídrica la ponderación obtenida se consideró acertada, por la contribución de cada variable al mencionado proceso.

Tabla 2. Relación de consistencia entre las variables analizadas, obtenida a partir de los mapas ráster de cada variable ponderada

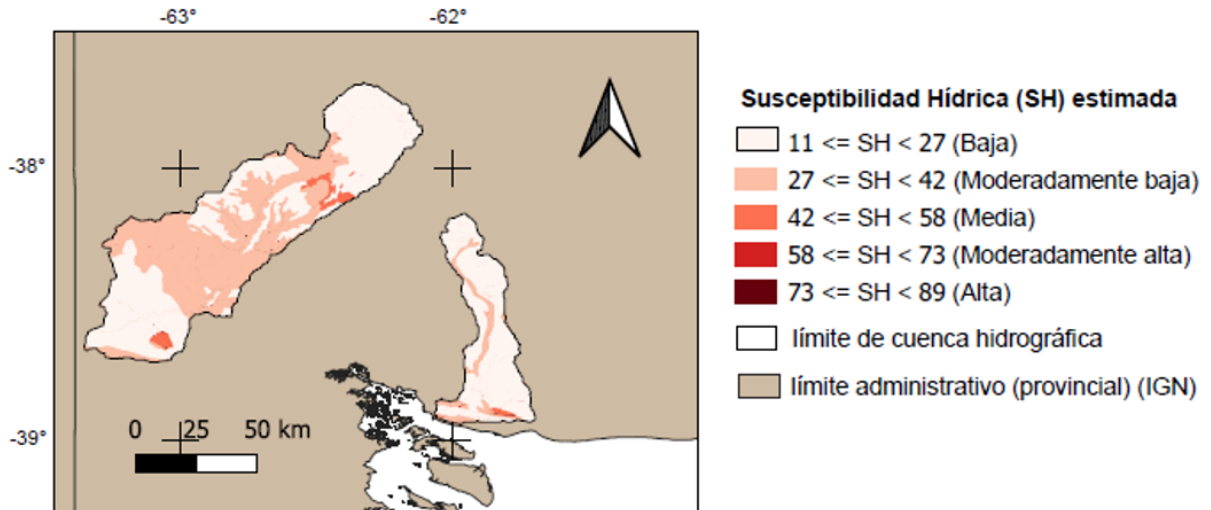
Variable	Índice de aridez	Máxima extensión de agua	Desarrollo de paleocanales	Textura de suelo	Rasgos geomorfológicos
Índice de aridez	1	1	0,50	3	0,33
Máxima extensión de agua	1	1	0,33	1	0,50
Desarrollo de paleocanales	2	3,03	1	5	1
Textura de suelo	0,33	1	0,20	1	0,50
Rasgos geomorfológicos	3,03	2	1	2	1

Fuente: elaboración propia, realizada en el SIG QGIS 3.16.10.

De acuerdo a la ponderación obtenida para cada variable se aplicó la siguiente fórmula, mediante el uso de la calculadora ráster del SIG QGIS:

$$\text{Mapa final de Susceptibilidad hídrica (MFSH)} = (\text{IA.tif} * 0,155) + (\text{MEA.tif} * 0,121) + (\text{P.tif} * 0,339) + (\text{T.tif} * 0,094) + (\text{RG.tif} * 0,292)$$

Figura 3. Mapa final de susceptibilidad hídrica estimada



Fuente: elaboración propia

El MFSH (1 - 100) (figura 3) para las cuencas hidrográficas estudiadas mostró las 5 categorías en ambas cuencas hidrográficas, siendo la Alta, de escasa representatividad. Para la cuenca del arroyo Chasicó, las clases más representativas fueron la de baja y muy baja susceptibilidad hídrica, con el 52,9 y 43,8 %, respectivamente (error en la estimación de la representatividad: 0,66 %). En cuanto a la distribución espacial de estas áreas, las mismas se encontraron en variados sectores: cuencas alta, media y baja (Figura 3), relacionada con afloramientos rocosos (Figura 2.b) y suelos de textura arcillosa, de escasa permeabilidad (Figura 2.c). Los cuerpos de agua que se desarrollan en la cuenca, la laguna Chasicó y Los Chilenos, mostraron SH moderadamente alta, dada su permanencia de agua, densidad de paleocauces en la cubeta y características geomorfológicas (Figuras 2.a y b).

Al igual que en el caso anterior, en la cuenca del arroyo Napostá Chico, la mayor representatividad fue obtenida por las clases de SH baja y moderadamente baja, con el 83 y el 14,3 %, respectivamente (error en la estimación de la representatividad: 0,36 %). Si bien se presentaron todas las categorías de SH, la mencionada unidad hidrográfica mostró mayor homogeneidad en la distribución espacial de la SH, en comparación con la cuenca del arroyo Chasicó. Además de las anteriormente mencionadas, se destacó la categoría de SH media, vinculada con la cubeta de la laguna Unamuno (Figura 3). En ambos casos, no se infiere la influencia del grado de aridez, representada mediante el IA, como elemento forzante en la estimación de la SH (Figuras 2.d y 3).

4. Discusión

El método desarrollado en el presente trabajo, para la estimación de la SH en dos cuencas de la llanura pampeana argentina incluyó variables climáticas, edáficas, topográficas e hídricas, obteniéndose de ese modo, una estimación meramente física. De las mismas, tal como se describió anteriormente, la variable de desarrollo de paleocanales y rasgos geomorfológicos fueron las que presentaron un mayor peso, según su importancia. No obstante, la inclusión de la variable antrópica en el espacio geográfico para la estimación de la SH se prevé en trabajos futuros tal como se ha hecho mediante la inclusión de la variable de usos y coberturas del suelo, en relación a la vulnerabilidad hidrológica de cuencas de llanura (Bohn y Piccolo, 2019). En relación con los resultados hallados, éstos mostraron una mayor representatividad de la clase de SH baja y moderadamente baja, lo cual coincide con la información correspondiente a riesgos de desastres aportada por el SINAGIR (Plan Nacional de Reducción de Riesgo de Desastres 2018 - 2023), brindada a través del IGN de la República Argentina. En ella, los partidos administrativos vinculados a ambas cuencas mostraron media, baja y muy baja cantidad de registros de eventos (base de datos DESINVENTAR) entre los que se destacaron inundaciones regionales, inundaciones de núcleos urbanos, inundaciones de llanura y tormentas severas. Las unidades administrativas de interés, dada su localización (Figura 1) fueron los siguientes: Tornquist (21 eventos registrados), C. de Marina L. Rosales (11), Puan (18), Saavedra (16), Villarino (15), Coronel Suárez (18) y Bahía Blanca. Este último fue el único que registró un nivel medio de registros, con 102 eventos, durante los años 2018 al presente.

La potencialidad de los SIG ha sido nuevamente demostrada en el presente trabajo, al igual que en otros trabajos predictivos de variables ambientales tales como los realizados por Mastrandrea y Ángeles (2021) y García Bu Bucogen, Bohn y Piccolo (2021). Éstos brindan, además, la posibilidad de otorgar dinamismo a las estimaciones a partir de las variables que incorporan el rasgo temporal. En el caso del presente estudio, dicho dinamismo puede lograrse a partir del cálculo del índice de aridez para distintas épocas o períodos. Otro rasgo a discutir en relación con la metodología aplicada es el predominio de la subjetividad en la ponderación de las variables. No obstante, los resultados son validados de acuerdo al respaldo que muestra el proceso de ponderación. En este caso, la misma ha sido basada en bibliografía y conocimientos previos al igual que lo han realizado con éxito otros autores (i.e.: Marcano Montilla y Cartaya Ríos, 2012) y que, en ciertas ocasiones, se completaron con control de campo y/o procesamiento de imágenes satelitales (Varón Gutiérrez y Vargas Cuervo, 2019). En este contexto se destacan, también, metodologías de índole cuantitativa, también basadas en la integración de variables en un entorno SIG, para la estimación de la susceptibilidad hídrica que contemplan el cálculo de índices sobre la base de variables vinculadas a los procesos de inundación y escurrimiento. En este caso, las variables analizadas incluyen la forma de la cuenca hidrológica, índices de humedad, litología, densidad de drenaje, entre otras (Zaharia et al., 2017).

En regiones de escasez de datos, la metodología presentada cobra interés como forma de alcanzar la estimación de susceptibilidad o riesgo y de otros parámetros predictivos. Ello, debido a que se basa en la combinación de diferentes fuentes de datos, publicadas por organismos regionales, nacionales y/o globales las que, mayormente, existen para todas las regiones geográficas. Ante esto, uno de los desafíos que se presentan, es la resolución espacial y las escalas geográficas. La relación espacial de las variables y la calidad de los datos tienen efectos sobre la precisión de los resultados. Ello hace necesaria la validación de los mismos (Zaharia et al., 2017). En el presente trabajo, la utilización de diferentes escalas espaciales en el proceso de estimación de la susceptibi-

lidad hídrica fue validado estadísticamente, mediante el proceso de Jerarquías Analíticas (Saaty, 1980) el cual ofrece un soporte de validación o comprobación estadístico de tales pesos o valores. Estos procedimientos, incluyendo escalas geográficas diferentes en su proceso de estimación, han arribado exitosamente a estimaciones hidrológicas para otras cuencas hidrográficas de Argentina (Bohn y Piccolo, 2019) y en relación a la identificación de áreas susceptibles de inundación y riesgo de inundación, sobre la base de cartografía y datos satelitales, de diferente resolución espacial logrando su validación (Zaharia et al., 2017). Las escalas mayores son utilizadas, también, como herramienta de validación de productos obtenidos a partir de escalas de menor detalle (Esparza, 2019).

5. Conclusiones

El método aplicado en el presente trabajo se realizó sobre la base de fuentes de información disponibles a nivel global y nacional, lo cual permite aplicarlo en otras áreas geográficas de similares características. De todas las variables involucradas en la estimación de la SH, la referida a los aspectos climáticos es la única de tipo dinámica. Esto significa que es posible, sobre la base del método desarrollado en el presente trabajo, el estudio de la evolución de la SH, bajo distintos escenarios climáticos, de eventos secos o húmedos. No obstante, en el presente trabajo, la variable climática se analizó sobre la base de datos promedio y no así teniendo en cuenta su variabilidad anual y/o interanual.

Tal como se enunció en el apartado área de estudio, las cuencas estudiadas poseen características físicas similares y se encuentran cercanas desde el punto de vista geográfico. Climáticamente, la cuenca del arroyo Chasicó se encuentra vinculada a un área de transición y al desarrollo de la diagonal árida argentina (Bruniard, 1982) mientras que la cuenca del arroyo Napostá Chico se localiza en sectores de isohietas de 600 - 800 mm/año. No obstante, a pesar de ello, ambas cuencas son relativamente homogéneas y mostraron escasa representatividad en altos rangos de SH. La mayor SH observada se relacionó con el desarrollo de cuerpos de agua lagunares y tramos de arroyo. Este último constituye un aspecto positivo en cuanto a la posibilidad de predicción de conflictos y/u ocurrencia de daños ante un evento extremo de precipitación. Si bien ambas cuencas son relativamente homogéneas y mostraron escasa representatividad en altos rangos de SH, la cartografía de susceptibilidad hídrica elaborada constituye una herramienta útil y un insumo clave para la toma de decisiones. Particularmente en lo que refiere a la previsión y/o anticipación de los posibles impactos que los eventos hidrometeorológicos extremos generan, especialmente para los habitantes que residen en sus proximidades, así como para el desarrollo de las actividades productivas que se llevan a cabo en el área de estudio.

Bibliografía

- Ahmed, A., Hewa, G., & Alrajhi, A. (2021). Flood susceptibility mapping using a geomorphometric approach in South Australian basins. *Natural Hazards*, 106, 629–653. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04481-z>
- Aliaga, V.S., Ferrelli, F., Alberdi Algañaraz, E.D., Bohn, V.Y., & Piccolo, M.C. (2016). Distribución y variabilidad de la precipitación en la Región Pampeana, Argentina. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 42(1), 261-280. <http://dx.doi.org/10.18172/cig.2867>
- Aliaga, V.S., Ferrelli, F., & Piccolo, M.C. (2017). Regionalization of climate over the Argentine Pampas. *International Journal of Climatology*, 37 (1), 1237-1247.

- Aragón, M.R., Jobbagy Gampel, E.G., & Viglizzo, E.F. (2010). Surface and groundwater dynamics in the sedimentary plains of the Western Pampas (Argentina), *Ecohydrology*, 4 (3), 433-447. DOI:<https://dx.doi.org/10.1002/eco.149>
- Arias, J., & Geraldí, A.M. (2019). "Análisis de la dinámica hídrica espacial de las lagunas Las Encadenadas de Saavedra y Los chilenos con imágenes satelitales ópticas". En *Actas Científicas GAEA*, 80° Semana de la Geografía (pp. 33-40). Actas de la 80° Semana de la Geografía. Corrientes, 4 al 7 de septiembre de 2019. Recuperado de <https://www.gaea.org.ar/>
- Barros, V. y Camilloni, I. (2016). *La Argentina y el cambio climático. De la física a la política*. Buenos Aires: Eudeba.
- Berasain, G.E., Colautti, D.C., Remes Lenicov, F., Argemi, F., Bohn, V.Y., & Miranda, L.A. (2015). Impact of water salinity on *Odontesthes bonariensis* (Actinopterygii, Atherinopsidae) fisheries in Chasicó Lake (Argentina), *Hydrobiologia*, 752 (1), 167-174. Doi: 10.1007/s10750-014-1980-8
- Bianchi, A.R., & Cravero, S.A.C. (2010). *Atlas climático digital de la República Argentina*.
- Salta, Argentina: Ediciones Instituto Nacional de Tecnología agropecuaria. Recuperado de <http://inta.gob.ar/documentos/atlas-climatico-digital-de-la-republica-argentina-1/>
- Bohn, V.Y., Piccolo, M.C., & Perillo, G.M.E. (2007). Aplicación del índice estandarizado de precipitación a la laguna Unamuno. *Geoacta*, 32, 75-81. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11336/98581>
- Bohn V.Y., Perillo G., & Piccolo M.C. (2011). Distribution and morphometry of shallow lakes in a temperate zone (Buenos Aires province, Argentina). *Limnetica*, 30 (1), 89-102. Doi: 10.23818/limn.30.08
- Bohn, V.Y., Piccolo, M.C., & Perillo, G.M.E. (2011). Análisis de los periodos secos y húmedos en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina). *Revista de Climatología*, 11, 31-43. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11336/21270>
- Bohn, V.Y., Piccolo, M.C., & Perillo, G.M.E. (2013). Características bio-ópticas y morfometría de una laguna de zona templada. *Estudios Geográficos*, LXXIV (274), 311-328. <http://dx.doi.org/doi:10.3989/estgeogr.201311>
- Bohn, V.Y., Delgado, A.L., Piccolo, M.C., & Perillo, G.M.E. (2016). Assessment of climate variability and land use effect on shallow lakes in temperate plains of Argentina. *Environmental Earth Sciences*, 75 (9), 1-15. <http://dx.doi.org/10.1007/s12665-016-5569-6>
- Bohn, V.Y. (2019). Análisis estadístico de eventos secos y húmedos en la cuenca del arroyo Napostá Chico (provincia de Buenos Aires, Argentina). En A. Cortelezzi, I. Entraigas, F. Grosman, & I. Masson (eds), *Encuentro de saberes para la gestión responsable de ecosistemas acuáticos pampeanos* (pp. 147-149). Azul, Argentina. Tandil: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Recuperado de <https://ecosistemas.exa.unicen.edu.ar/libro-emeap-2019/>
- Bohn, V.Y., & Piccolo, M.C. (2019). Estimation of hydrological vulnerability in river basins of Argentinean plains. *International Journal of River Basin Management*, 17 (4), 1-13. Doi: 10.1080/15715124.2019.1683855
- Bohn, V.Y., Piccolo, M.C., Perillo, G.M.E., Pralongo, P.D., & Fornerón, C.F. (2019). Caracterización óptica de las lagunas Sauce Grande y Chasicó (Provincia de Buenos Aires). *Biología Acuática*, 27, 51-60. Recuperado de <https://revistas.unlp.edu.ar/bacuatica/article/view/6645>
- Bohn, V.Y., Rivas, R.E., Varni, M.R., & Piccolo, M.C. (2020). Using SPEI in predicting water table dynamics in Argentinian plains. *Environmental Earth Sciences*, 79 (469), 1-16. Doi:10.1007/s12665-020-09210-0
- Bonorino, A.G., Ruggiero, E., & Mariño, E. (1989). *Caracterización hidrogeológica de la cuenca del arroyo Chasicó, provincia de Buenos Aires*. Informe 44. La Plata, Argentina. Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CIC).
- Brendel, A.S., Ferrelli, F., Piccolo, M.C., & Perillo, G.M.E. (2021). Efectos de la variabilidad pluviométrica sobre la morfometría de los recursos hídricos de una cuenca hidrográfica de la Región Pampeana (Argentina). *Revista Geográfica Venezolana*, 62 (1), 92-106. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11336/137216>
- Bruniard, E.D. (1982). La diagonal árida argentina: un límite climático real. *Revista Geográfica*, 95, 5-20. Recuperado de <https://www.jstor.org/stable/40992410?origin=JSTOR-pdf>
- Bustos, M.L., Ferrelli, F., & Piccolo, M.C. (2017) Estudio Comparativo de Tres Modelos Climáticos en Argentina. *Anuário do Instituto de Geociências*, 40 (1), 34-43. http://dx.doi.org/10.11137/2017_1_34_43
- Carbone, M.E., Fornerón, C.F., & Piccolo, M.C. (2015). Impacto de los eventos de sequía en la región de la cuenca hidrográfica de la laguna Sauce Grande (provincia de Buenos Aires, Argentina). *Investigaciones Geográficas*, 63, 131-142 <http://dx.doi.org/10.14198/INGEO2015.63.09>

- EM-DAT (2021). «Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED the international disaster database». School of Public Health, Université Catholique de Louvain, Bélgica. <<https://www.emdat.be/>> [consulta: 4 de septiembre de 2021].
- García Bu Bucogen, G., Bohn, V.Y., & Piccolo, M.C. (2021). “Análisis temporal de la susceptibilidad hídrica en la cuenca inferior de Río Negro”. En: *V Congreso Nacional de Tecnologías de la Información Geográfica y III Congreso Internacional de Tecnologías de la Información Geográfica: “Modelización y TIG aplicados a procesos espaciales urbanos y regionales”*(102-108). Tandil, 10 al 12 de noviembre de 2021. Recuperado de <https://vcongresonacional.wixsite.com/vcongresonacionaltig/>
- Esparza, J.B. (2019). Identificación y análisis de áreas inundables a partir de una metodología de integración de escalas espaciales. Caso de estudio: La Plata, Buenos Aires, Argentina. *Cuaderno urbano*, 27(27), 135-166. Epub 01 de junio de 2019. <https://dx.doi.org/10.30972/crn.27274122>
- Ferrelli, F., & Aliaga, V.S. (2015). *Variabilidad de las precipitaciones y sus efectos sobre la respuesta espacio-temporal de cuerpos de agua en la región pampeana, Argentina* (Trabajo de aplicación final). Universidad Nacional de Luján, Argentina.
- Ferrelli, F., Brendel, A., Piccolo, M.C., Perillo, G.M.E. (2021). Evaluación de la tendencia de la precipitación en la región pampeana (Argentina) durante el período 1960-2018. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*, 51, 41-57. DOI:<http://dx.doi.org/10.5380/raega.v51i0.69962>
- Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) (1990). *Atlas de Suelos de la República Argentina*. Buenos Aires, Argentina: Instituto de Suelos, INTA Castelar.
- Kopprío, G. A., Freije, R.H., Arias-Schreiber, M., & Lara, R. (2014). An ecohydrological adaptive approach to a salt lake in the semiarid grasslands of Argentina: future management perspectives. *Sustainability Science*, 9, 229–238. <https://doi.org/10.1007/s11625-013-0207-7>
- Kruse, E., & Laurencena, P. (2005). “Aguas superficiales. Relación con el régimen subterráneo y fenómenos de anegamiento”. En: *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino*” (313-326). La Plata, Argentina.
- La Brújula24 (7 de enero de 2021). Desbordan arroyos y ríos por las copiosas lluvias en Sierra. La Brújula24. Recuperado de <https://www.labrujula24.com/notas/2021/01/07/desbordaron-arroyos-y-rios-tras-las-abundantes-lluvias-registradas-en-sierra-de-la-ventana-n99725/>
- Lehner, B., & Grill G. (2013). Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes*, 27(15), 2171–2186. <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>
- López-Martínez, F. (2023). Ordenación del territorio y gestión de riesgos de inundación: evolución y análisis normativo a escala nacional. *Documents d'Anàlisi Geogràfica*, 69(1), 81-106.
- Marcano Montilla, A., & Cartaya Ríos, S. (2012). Análisis de la distribución espacial de la susceptibilidad a los movimientos de remoción en masa, empleando Sistemas de Información Geográfica (SIG), en la cuenca del río San Julián, estado Vargas, Venezuela. *Revista de Investigación*, 36(75), 67-88. Recuperado en 07 de junio de 2023, de http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1010-29142012000100005&lng=es&tlng=es
- Mastrandrea, A., & Ángeles, G. (2021). Evaluación Multicriterio aplicada a la determinación de escenarios de peligrosidad en la cuenca del arroyo Napostá Grande (provincia de Buenos Aires, Argentina). *Cuadernos geográficos de la Universidad de Granada*, 60 (1), 181-202. Doi:10.30827/cuadgeo.v60i1.15337
- Olcina Cantos, J. (2017). Incremento de episodios de inundación por lluvias de intensidad horaria en el sector central del litoral mediterráneo español: análisis de tendencias en Alicante. *Sémata: Ciências Sociais E Humanidades*, 29(29). <https://doi.org/10.15304/s.29.4213>
- Olivera Acosta, J., Morales, G.M., García Rivero, A.E., Salgado, E.J., López, M.L., Estrada, R., Campos Dueñas, M., & Miravet, B.L. (2011). El uso de los SIG y la evaluación multicriterio (EMC) para la determinación de escenarios de peligros de inundaciones en cuencas fluviales: caso de estudio: cuenca Guanabo, ciudad de La Habana. *Proyección*, 10, 143-163. Recuperado de <https://bdigital.uncu.edu.ar/13623>.
- Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación. (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma, Italia: FAO.
- Pacheco, J.F., & Contreras, E. (2008). *Manual metodológico de evaluación multicriterio para programas y proyectos*. Serie Manuales 58. Instituto Latinoamericano y del Caribe de Planificación Económica y Social (ILPES). Naciones Unidas. CEPAL.
- Pekel, J.F., Cottam, A., Gorelick, N., & Belward, A.S. (2016). High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540, 418-422. doi:10.1038/nature20584

- Pinos, J., Timbe, L., & Orellana, D. (2017). Métodos para la evaluación del riesgo de inundación fluvial: revisión de literatura y propuesta metodológica para Ecuador. *Maskana*, 8(2), 147–162. <https://doi.org/10.18537/mskn.08.02.11>
- Pradhan, B., & Youssef, A.M. (2011). A 100-year maximum flood susceptibility mapping using integrated hydrological and hydrodynamic models: Kelantan River Corridor, Malaysia. *Journal of Flood Risk Management*, 4 (3), 189-202. [Doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01103.x](https://doi.org/10.1111/j.1753-318X.2011.01103.x)
- Puntoriero, M.L., Volpedo, A.V., & Fernández Cirelli, A. 2014. Riesgo para la población rural en zonas con alto contenido de arsénico en agua. *Acta Toxicológica Argentina*, 22 (1), 15-22. Recuperado de <http://hdl.handle.net/11336/8105>
- Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. London, Reino Unido: Mc Graw Hill.
- Sepulcri, M.G, Pizarro, M.J, Flamengo, E, Herrera, M, Borus, J., & Giordono, L. (2012). Cartografía de susceptibilidad hídrica en el delta del río Paraná. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 38(2), 182-189. Recuperado de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1669-23142012000200013&lng=es&tlng=en
- Rodríguez, M., Cortese, B., Armendáriz, L.C., Simonetti, M.A., Donadelli, J.L., & Rodrigues Capitulo, A. (2018). “Empleo de rasgos bioecológicos de macroinvertebrados como herramientas para la gestión de bañados de desborde fluvial de la llanura pampeana argentina”. En *Actas del III Congreso Latinoamericano sobre Conflictos Ambientales* (116-117). Veracruz, 1 al 5 de octubre de 2018. Recuperado de <https://www.redcolca.org/>
- Siniscalchi, A.G., Kopprío, G., Raniolo, L.A., Gómez, E.A., Díaz, M.S., & Lara, R.J. (2018). Mathematical modelling for ecohydrological management of an endangered endorheic salt lake in the semiarid Pampean region, Argentina. *Journal of Hydrology*, 563, 778 - 789. DOI 10.1016/j.jhydrol.2018.06.014
- Soldano, A., Giraut, M., & Goniadzki, D. (2007). Mapa de susceptibilidad urbana ante inundaciones, Caso: Ciudad de Goya, provincia de Corrientes. En *TELEDETECCIÓN - Hacia un mejor entendimiento de la dinámica global y regional* (pp. 449-456). Mar del Plata, Argentina: Ed. Martin. Recuperado de <http://www.aet.org.es/congresos/xii/arg60.pdf>
- Soldano, A. (2009). “Inundaciones: ¿Qué es susceptibilidad? Conceptos sobre riesgo”. En: *Síntesis temática realizada para el Foro Virtual de la RIMD creado para la Capacitación en Teledetección Aplicada a la Reducción del Riesgo por Inundaciones*. Falda del Carmen, 16 al 20 de marzo de 2009.
- Taboada, M.A., & Damiano, F. (2017). Inundación y manejo de suelos en la Argentina. En S. Waldman, *Inundaciones y manejo de cuencas: Clima, suelo, prácticas agrícolas, medio ambiente* (pp. 145-169), Buenos Aires, Argentina: Orientación Gráfica <http://hdl.handle.net/11336/117125>
- Varón Gutiérrez, S.D., & Vargas Cuervo, G. (2019). Análisis de la susceptibilidad por inundaciones asociadas con la dinámica fluvial del río Guatiquía en la ciudad de Villavicencio, Colombia. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 28 (1), 152-174. Doi: 10.15446/rcdg.v28n1.70856.
- Vélez, C.A.L., Villamar, J.M., & Gil, H.A.P. (2023). Susceptibilidad a eventos por inundaciones en un sector del área urbana del Cantón Rocafuerte (Manabí-Ecuador): aproximación desde un enfoque multicriterio. *Polo del Conocimiento*, 8(5), 186-210.
- Volpedo, A.V., & Fernández Cirelli, A. (2013). El lago Chasicó: similitudes y diferencias con las lagunas pampásicas. *Agua AUGMDOMUS*, 5 (I), 1-18. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/11336/29230>
- Zaharia, L., Costache, R., Prăvălie, R., & Ioana-Toroimac, G. (2017). Mapping flood and flooding potential indices: a methodological approach to identifying areas susceptible to flood and flooding risk. Case study: the Prahova catchment (Romania). *Frontiers of Earth Science*, 11, 229–247. <https://doi.org/10.1007/s11707-017-0636-1>

Agradecimientos

Los autores agradecen a la Universidad Nacional del Sur (UNS) y al Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). El trabajo se desarrolla en el marco del proyecto de investigación PGI VULNERABILIDAD HIDROLÓGICA Y PROBLEMAS AMBIENTALES EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS DE LLANURA (REGIÓN PAMPEANA, ARGENTINA) subsidiado por la UNS. Los autores agradecen a las agencias y autores de las diferentes bases de datos utilizadas en el presente trabajo por permitir el libre acceso.

Contribución de autorías

Conceptualización, V.Y.B.; Metodología, V.Y.B. y A.M.; investigación, V.Y.B. y A.M.; análisis formal, V.Y.B.; análisis de los datos, V.Y.B.; revisión-edición, V.Y.B. y A.M.; escritura, preparación del manuscrito, V.Y.B.

Financiación

El trabajo se realiza en el marco del Proyecto de investigación Vulnerabilidad hidrológica y problemas ambientales en cuencas hidrográficas de llanura (región Pampeana, Argentina), subsidiado por la Universidad Nacional del Sur (UNS, Argentina).

Conflicto de intereses

Las autoras de este trabajo declaran que no existe ningún tipo de conflicto de intereses.