

Indicadores hidrogeopedológicos para la delimitación de humedales en el arroyo El Pescado, Provincia de Buenos Aires, Argentina.

Hydropedological indicators for wetland delimitation of the El Pescado stream in Buenos Aires Province, Argentina.

BOFF, L. D^{1,2} , GIL, J. ^{1,2,3} , VERA D. ^{1,2,3} , ONTIVERO, P. E¹ , MUNTZ, D. E. ^{1,2,4} 

¹ Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata (FCNyM - UNLP).

² Centro de Estudios Integrales de la Dinámica Exógena (CEIDE- FCNyM-FCAYF-UNLP). Avenida 1 nro. 644 (1900), La Plata, provincia de Buenos Aires.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

⁴ Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires (CICBA).

E-mail: lauraboff@fcnym.unlp.edu.ar

RESUMEN. El área de estudio se ubica en la cuenca media del arroyo El Pescado en los partidos de La Plata y Magdalena, Provincia de Buenos Aires, Argentina. El trabajo tiene como objetivo identificar indicadores hidrogeopedológicos e interpretar el gradiente hidromórfico como aporte para la caracterización y delimitación de humedales a escala de detalle. Para ello se llevó a cabo la interpretación hidrogeopedológica en dos sitios mediante transectas perpendiculares al cauce del arroyo, complementada con un levantamiento topográfico de precisión, generación de ortomosaicos y modelos digitales de elevación. Para la caracterización geológica e hidrogeopedológica se hicieron, para ambos sitios, calicatas, perforaciones con barreno, sondeos y muestreo de agua superficial y subterránea. Como resultados se establecieron y clasificaron indicadores hidrogeopedológicos que fueron útiles para definir y categorizar un gradiente hidromórfico. Se evidenció una relación estrecha entre las características hidrogeopedológicas y, la distribución y propiedades de los materiales parentales de los suelos, como así también una directa relación entre la geomorfología y las fluctuaciones hídricas superficiales y subterráneas. Un abordaje hidrogeopedológico integral sumado al uso de tecnología de precisión en campo y procesamiento digital demostró ser una buena herramienta para la caracterización y delimitación de humedales a escala de detalle.

Palabras clave: gradiente hidromórfico, hidrogeopedología, humedales, indicadores.

ABSTRACT. The study area is located in the middle basin of the El Pescado stream, which belongs to the municipalities of La Plata and Magdalena. The objective of this work is to identify hydrogeopedological indicators and to interpret the hydromorphic gradient as a contribution to the detailed characterization and delimitation of wetlands. The hydrogeopedological interpretation was carried out at two sites by conducting transects perpendicular to the stream course. A precision topographic survey was conducted, and orthomosaics and digital elevation models were generated. Pits, auger drilling, soundings, and sampling of surface and groundwater were performed at both sites to support the geological and hydrogeopedological characterization. As a result, hydrogeopedological indicators were established and classified, proving useful in defining and categorizing a hydromorphic gradient. There is a close relationship between hydrogeopedological characteristics and the distribution and properties of the parent materials of the soils, as well as a direct relationship between geomorphology and surface and groundwater fluctuations. An

integrated hydrogeopedological approach combined with the use of precision field technology and digital processing proved to be a proper tool for the detailed characterization and delimitation of wetlands.

Keywords: hydromorphic gradient, hydrogeopedology, indicators, wetlands.

INTRODUCCIÓN

Los ambientes de humedales presentan gran diversidad geográfica, climática, biológica y genética y comparten ciertas características básicas que los identifican. Existen numerosas definiciones de humedal, en este trabajo se tomará la definición establecida para el *Inventario Nacional de Humedales* (Benzaquen *et al.*, 2016), aprobada mediante Resolución N° 329/16 del Consejo Federal de Medio Ambiente (COFEMA) y posteriormente aceptada para el *Inventario de Humedales de la provincia de Buenos Aires* (OPDS, 2019). Se los considera ambientes en los cuales la presencia temporal o permanente de agua superficial o subsuperficial causa flujos biogeoquímicos propios y diferentes a los ambientes terrestres y acuáticos. Rasgos distintivos son la presencia de biota adaptada a estas condiciones, comúnmente plantas hidrófitas, y/o suelos hídricos o sustratos con rasgos de hidromorfismo. Se utiliza esta definición según los lineamientos de Brinson (1993) dado que el autor sostiene que las variables responsables de la mayor parte de las funciones que tienen los humedales son: el emplazamiento geomorfológico, la fuente de agua y su hidrodinámica, criterios que concuerdan con el abordaje hidrogeopedológico del presente trabajo. Además, pretende facilitar la articulación entre el marco teórico tenido en cuenta por los organismos del Estado, con el conocimiento generado en este trabajo y la comunidad, la cual es destinataria directa de las políticas públicas que se generen. Los humedales, considerados como sistemas naturales complejos con variabilidad espacial y temporal, requieren de un análisis e interpretación transdisciplinaria. En este sentido un enfoque hidrogeopedológico, como el

aplicado en este estudio, es fundamental para comprender las interacciones y el funcionamiento complejo de las variables que definen estos ambientes. A su vez cada una de estas variables son en sí mismas sistemas naturales complejos, abiertos y dinámicos como los suelos. Los mismos son el resultado de la interacción conjunta de factores de formación como el clima, la biota, el relieve, el material original, el tiempo y el factor antrópico, que generan procesos pedogenéticos expresados en propiedades morfológicas, físicas, químicas, biológicas y mineralógicas. Estos procesos dejan huellas o indicadores que se mantienen en el tiempo a pesar de los cambios en las condiciones ambientales y su conocimiento es esencial para la clasificación y manejo de los suelos. Además, permiten explicar su distribución, facilitando la elaboración de cartografía básica y utilitaria (Schaetzl & Anderson, 2005). Bockheim & Gennadiyev (2000) afirman que sólo a través del conocimiento de los procesos que formaron los suelos es posible predecir los cambios que ellos pueden experimentar al modificarse algunos de los factores, como las precipitaciones, las temperaturas o la intervención antrópica. En humedales el proceso pedogenético dominante es el hidromorfismo, tiene su origen en la saturación con agua del perfil del suelo, completo o una parte de él, durante períodos más o menos prolongados que provoca déficit de oxígeno. La intensidad del proceso es variable, influyendo la posición topográfica, las características de los materiales del suelo, las oscilaciones del nivel freático, el contenido de oxígeno disuelto en el agua freática, etc. Existe una fuerte relación entre la topografía y el agua del suelo, por eso se utiliza el término hidroposecuencia para referirse a un conjunto de suelos con distinta humedad a lo largo de una catena (Zobeck & Ritchie, 1984).

Para la delimitación de estos ambientes tan complejos todavía no existe una metodología consensuada, ni tampoco criterios precisos y unánimes. Según Tiner (2017) para delimitarlos es necesaria la validación en campo mediante indicadores. Los mismos no son universales y deben ser determinados detalladamente para cada caso de estudio. Hasta el momento en Argentina y particularmente en la provincia de Buenos Aires, la identificación e inventario de humedales se ha realizado a pequeña escala, mayormente utilizando indicadores indirectos (cartográficos, taxonómicos y satelitales) (Minotti y Kandus, 2017; OPDS, 2019; Navarro *et al.*, 2025). Para avanzar hacia un mayor detalle son imprescindibles los relevamientos de campo que permitan definir indicadores desde un abordaje transdisciplinario e integral. En este sentido el trabajo tiene como objetivo, identificar indicadores hidrogeopedológicos e interpretar el gradiente hidromórfico en la cuenca media del arroyo El Pescado, en los partidos de La Plata y Magdalena, Buenos Aires, Argentina como aporte para la caracterización y delimitación de humedales a escala de detalle.

ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del Arroyo El Pescado se encuentra localizada en el noreste de la provincia de Buenos Aires en los partidos de La Plata, Magdalena y Berisso, ocupa un área de 340 km² y vierte sus aguas en el estuario del Río de la Plata. Está limitada al N por divisorias secundarias de las cuencas de los arroyos, El Gato, Pérez, Regimiento, Maldonado y Garibaldi y, al S y O por la divisoria principal de las cuencas que conforman el escurrimiento hacia el río Samborombón. Las nacientes del arroyo El Pescado presentan cotas entre 20 y 25 m s.n.m. Las pendientes varían entre 0,10 y 0,15 % y sus longitudes son muy variables oscilando entre 200 y 1000 m aproximadamente (Cabral *et al.*, 2017). La cuenca está emplazada en el sector más austral de la pampa ondulada, que adquirió su configuración a partir del Pleistoceno inferior

a medio (Fucks *et al.*, 2017). Se considera un origen poligenético, donde se identifican dos ámbitos geomorfológicos bien contrastantes: la planicie continental hacia el suroeste (Fidalgo y Martínez, 1983) y la llanura costera al noreste (Cavallotto, 1995). La planicie continental está formada por sedimentos loessicos eólicos y/o retrabajados por acción fluvial (Hurtado *et al.*, 2006), esencialmente limosos, atribuidos a la Fm. Pampeano (González Bonorino, 1965), y se caracteriza por suaves ondulaciones generadas por ríos y arroyos. Acuñados en esta unidad se encuentran los depósitos marinos del Pleistoceno tardío (MIS 5e) asignados a la Fm. Puente de Pascua (Fucks *et al.*, 2010), conformados principalmente por arenas y coquinas fuertemente cementadas con CaCO₃. La llanura costera conforma una zona llana que contiene una sucesión de formas originadas durante el ciclo transgresivo-regresivo del Holoceno, tales como cordones de conchilla, llanuras de marea y bañados, y está comprendida entre la costa actual del estuario y la cota de 5 m s.n.m. aproximadamente. Su relleno está constituido por diversas facies sedimentarias agrupadas en la Fm. Canal de Las Escobas (Fucks *et al.*, 2010), conformada por una unidad transgresiva de composición esencialmente arcillosa intercalada con lentes arenosos (Mo. Destacamento Río Salado) sobre la cual yacen facies de carácter regresivo: limos arenosos con intercalaciones de arcilla depositados en un ambiente de llanura de mareas (Mo. Canal 18), concentraciones esqueletales de moluscos, rodados calcáreos subordinados y arenas que conforman cordones litorales (Mo. Cerro de la Gloria), y limos y arenas con intercalaciones de arcilla que constituyen la actual llanura estuárica (Fucks *et al.*, 2017). Las áreas deprimidas y los márgenes de ríos y arroyos se encuentran llenadas por facies fluviales y lacustres asignadas al aluvio (Colado *et al.*, 1995), constituyendo la unidad más joven depositada en la zona. El área de estudio se ubica en la cuenca media del arroyo El Pescado en el partido de La Plata y Magdalena, donde se realizó la interpretación hidrogeopedológica en dos sitios (Fig. 1) mediante la realización de

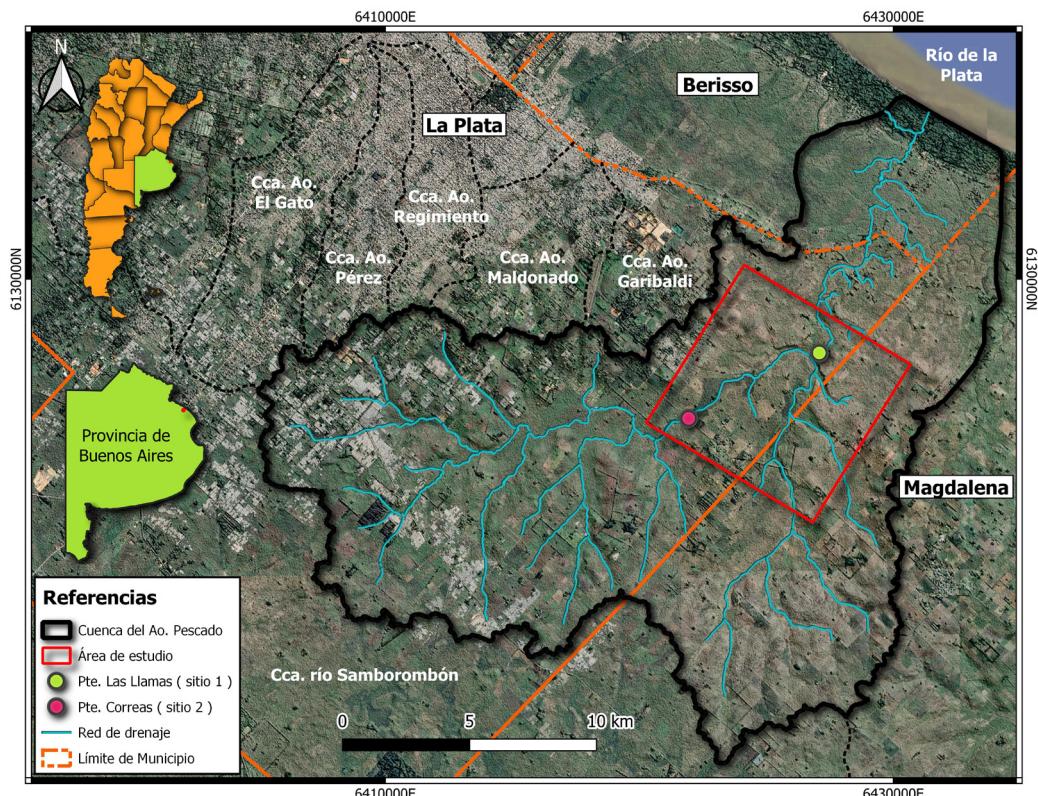


Figura 1. Cuenca arroyo El Pescado en ámbito rural en las cercanías de la Ciudad de La Plata. Ubicación del área de estudio. Imagen de fondo Google Earth.

Figure 1. El Pescado stream basin in the rural area near the City of La Plata. Location of the study area. Background image Google Earth.

transectas perpendiculares al cauce del arroyo: el sitio 1, ubicado en el Puente Las Llamas (Lat. $34^{\circ}59'59.27''S$, Long. $57^{\circ}47'54.91''O$), y el sitio 2, ubicado en el puente de Ignacio Correas, (Lat. $35^{\circ} 1'22.14''S$, Long. $57^{\circ}51'19.58''O$). El clima de la región es subhúmedo-húmedo de tipo B'2 según la clasificación de Thornthwaite (1948). Zanandrea (2022) realizó un análisis de temperaturas y precipitaciones de 110 años (período 1909-2019) para la cuenca, obteniendo valores medios anuales de $16,25^{\circ}C$ y 1047,5 mm/año respectivamente. También, menciona un valor máximo de temperatura media anual de $18,5^{\circ}C$ en el año 2012 y un valor mínimo de $14,8^{\circ}C$ en el año 1923 para el período analizado. Los valores máximos se registran en los meses estivales, presentando el mes de enero un promedio de $22,89^{\circ}C$ y los valores mínimos en los meses invernales siendo julio el más bajo con un valor de $9,95^{\circ}C$. Respecto a las precipitaciones

indica que las mayores se producen en el mes de marzo con valores de 111,5 mm y las menores en el mes de junio con 60,7 mm. Se observa el aumento de las precipitaciones en primavera, manteniendo valores altos hasta finalizada la época estival, donde comienza a disminuir a mediados de otoño, con mínimas durante el invierno. Siendo este un típico régimen Atlántico (Zanandrea, 2022).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se recopilaron y analizaron datos de precipitación y temperatura diaria durante el período 1994-2023 abarcando los últimos 30 años. Los datos de precipitación y temperatura diarios de la estación climatológica La Plata Aero ($34^{\circ}57'47''S$ latitud Sur, $57^{\circ}53' 43''O$ longitud Oeste, altitud

18 m s.n.m.) fueron brindados por el Servicio Meteorológico Nacional de la República Argentina. Se optó por la utilización de dicha estación dado que se encuentra ubicada en el margen de la cuenca de estudio. Se realizaron gráficos de temperatura y precipitación medias anuales, medias mensuales y se realizó el balance hídrico modular (30 años) utilizando la metodología de Thornthwaite y Mather (1955), con los insumos de precipitación y temperatura medias mensuales, el cálculo de la Evapotranspiración potencial (ETP) y la Evapotranspiración real (ETR), para una capacidad hídrica de 200 mm (Hurtado *et al.*, 2006), con identificación de los excesos y déficit hídricos, y su localización interanual. Para definir la ubicación de los sitios de muestreo, fue necesario generar el mapa geomorfológico del sector de la cuenca que se encuentra en el partido de Magdalena, ya que el mapa geomorfológico existente (Cabral *et al.*, 2017) se limitaba a los partidos de La Plata y Berisso, resultando un mapa parcial de la cuenca, insuficiente para realizar un muestreo orientado. Por este motivo y además con el fin de obtener un mapa geomorfológico de la cuenca completa inédito, se llevó adelante un mapeo digital del área no cartografiada, mediante interpretación de imágenes satelitales, fotografías aéreas, mapas topográficos y observaciones de campo. En campo se realizaron levantamientos topográficos de precisión con un vehículo aéreo no tripulado (UAV) marca DJI Phantom 4 Pro (Fig. 2a) y la utilización de un GPS diferencial marca Pentax G7 (Fig. 2c). Se aplicó la técnica SfM-MVS (Structure From Motion Multiview Stereo) en donde se fusionan los principios fotogramétricos clásicos con desarrollos procedentes de avances en los algoritmos de visión por computadora 3D. Se tomaron fotos ortogonales, a 100 metros de altura respecto al terreno con un solapamiento del 75% entre sí. Con el GPS diferencial se tomaron datos puntuales GNSS (sistema global de navegación por satélite) utilizando la metodología de medición en tiempo real de tipo NTRIP. Además de los puntos relevados en ambas márgenes del curso, se realizó la batimetría del arroyo para los dos sitios (Fig. 2b) integrando mediciones puntuales del lecho del cauce con

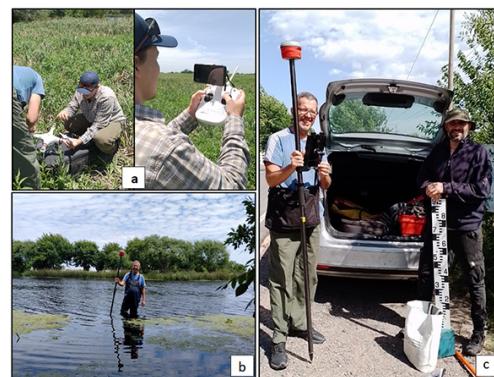


Figura 2.a. Manipulación del VANT y tareas de relevamiento de fotos aéreas en campo. b. Relevamiento de puntos batimétricos arroyo El Pescado. c. Armado de equipo GNSS y materiales de muestreo geológico y pedológico.

Figure 2. a. UAV operation and aerial photo survey tasks in the field. b. Survey of bathymetric points in El Pescado stream. c. Assembly of GNSS equipment and geological sampling materials.

GPS diferencial. En gabinete se procesaron los datos en softwares específicos, dando como productos finales un MDE (Modelo Digital de Elevación) y un ortomosaico para cada sitio. En el sitio 1 se tomaron 454 fotos ortogonales y 35 datos puntuales GNSS, se generó un ortomosaico de 2,73 cm/píxel de resolución y un MDE con resolución de 10,9 cm/pixel, cubriendo un área total de 72 has. En el sitio 2 se tomaron 197 fotos ortogonales y 58 datos puntuales GNSS. Estos datos fueron procesados dando como producto un ortomosaico de resolución 2,91 cm/pixel y un MDE de 11,6 cm/pixel, ambos cubriendo un área de 24 has. (Fig. 3). Para la caracterización geológica e hidrogeopedológica se realizaron para ambos sitios hidroposecuencias transversales al cauce del arroyo, según criterios geomorfológicos. Una hidroposecuencia consiste en un corte transversal del subsuelo donde se integran datos topográficos, geológicos-geomorfológicos, hidrogeológicos y pedológicos, reconocidos a través de perforaciones o calicatas a lo largo de una catena. En el sitio 1 se realizó una perforación con barreno helicoidal para la caracterización de los sedimentos (Fig. 4a), y seis calicatas para la descripción morfológica completa de suelos (Soil Survey Staff, 2022).

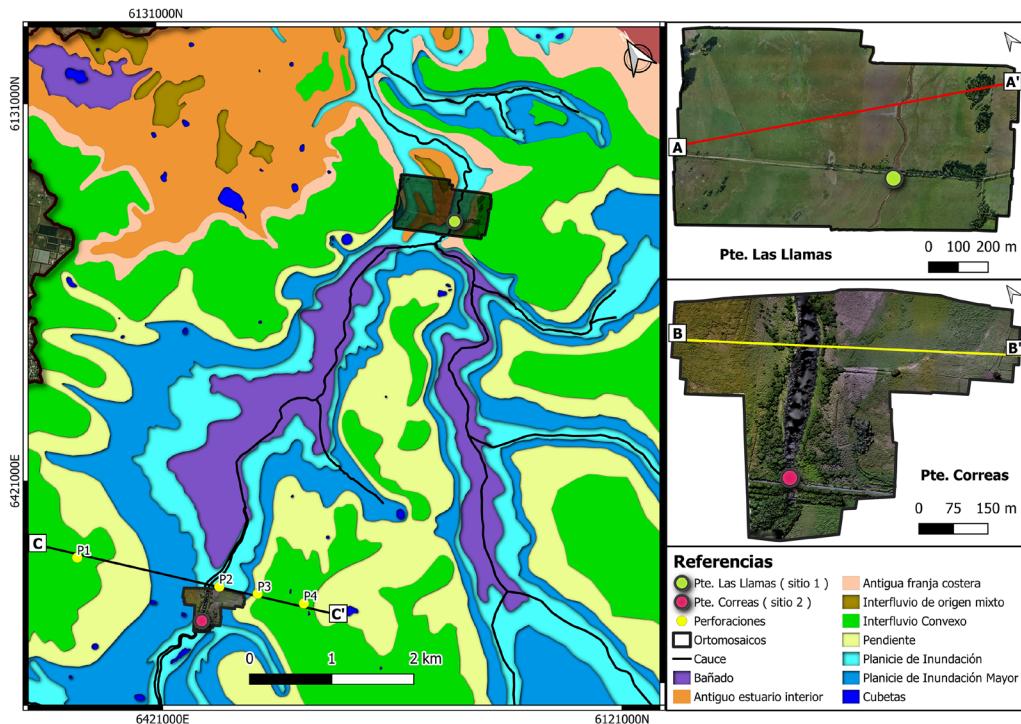


Figura 3. Mapa geomorfológico área de estudio, ortomosaicos sitio 1 y sitio 2, ubicación de Transectas A-A', B-B' y C-C'.

Figure 3. Geomorphological map of the study area, orthomosaics of site 1 and site 2, location of Transects A-A', B-B', and C-C'.



Figura 4. a. Tareas de perforación con barreno helicoidal. b. Realización de calicatas y muestreo. c. Calicata y análisis geopedológico en campo.

Figure 4. a. Drilling tasks with an auger drill. b. Digging pits and sampling. c. Pits and geopedological analysis conducted in the field.

En el sitio 2 se realizaron tres perforaciones con barreno helicoidal, siete calicatas para descripción morfológica de suelos (Fig 4b y 4c) y cuatro observaciones en cortes naturales del terreno y pozos exploratorios de control en

suelos (sin descripción morfológica formal). Una de las perforaciones fue utilizada para la construcción de un freatímetro.

Para la caracterización hidrogeológica, en agosto de 2024, se tomaron muestras de agua subterránea de perforaciones de abastecimiento de predios rurales en torno al sitio 2, y se realizaron múltiples sondeos manuales en ambos sitios. En estos puntos se obtuvieron datos de profundidad de nivel freático (NF), conductividad eléctrica (CE) y pH. Estos datos, junto a las mediciones topográficas de precisión fueron integrados en un modelo conceptual de funcionamiento hidrológico con el objetivo de expresar la relación agua superficial-agua subterránea en torno al humedal. La información obtenida se analizó mediante un sistema de información geográfica (SIG) de uso libre (QGIS, 2020), junto con imágenes satelitales multitemporales en el visor web de Google Earth, para analizar la frecuencia y distribución

de inundaciones, y cartografía preexistente (geomorfológica, pedológica, entre otras) (Cabral *et al.*, 2017). Finalmente, se interpretó y representó la geología para ambos sitios en perfiles topográficos, y se definió el gradiente hidromórfico, a lo largo de la hidrotoposecuencia del sitio 2. A modo de integrar y sistematizar metodologías de análisis se elaboró una lista de indicadores hidrogeopedológicos para el estudio de humedales.

RESULTADOS

Hidrometeorología

La temperatura media anual para el periodo de 30 años analizado (1994-2023) fue de 16,7 °C con un valor máximo de 17,5 °C en el año 2008 y un valor mínimo de 15,8 °C en el año 2016 (Fig.5); observándose una tendencia ascendente y fluctuante año a año. La precipitación media anual para este periodo fue de 1026,7 mm/año. Se observó una tendencia de disminución de las precipitaciones en los últimos años y se reconoció un valor máximo de 1495,8 mm/año en 2002 y un valor mínimo de 579,9 mm/año en 2022 (Fig.6). Para el periodo 2020-2022 se observaron escasas precipitaciones, las cuales

se asociaron a condiciones de una fase fría del fenómeno ENOS- La Niña. Debido a la relación existente entre las fases del fenómeno y la precipitación en la región sur de la Cuenca del Plata y en la zona húmeda del país, La Niña favoreció las lluvias deficitarias observadas, lo que agravó las condiciones secas en el área ya afectada por la sequía (Skansi *et al.*, 2023).

Geología, geomorfología y suelos

En el contexto geológico-geomorfológico y considerando las variaciones topográficas del relieve, se reconocieron unidades morfológicas menores tanto de influencia continental como de influencia marino-estuárica, y en la zona de contacto entre ambas de origen mixto, que a continuación se describen y se representan espacialmente en el mapa geomorfológico de la cuenca del arroyo El Pescado generado en este trabajo (Fig. 7). En el área de influencia continental se reconocieron cinco unidades geomorfológicas. Los interfluvios convexos, consisten en áreas elongadas en sentido de los arroyos desarrolladas sobre materiales loessicos y un gradiente aproximado de 1%. Las áreas

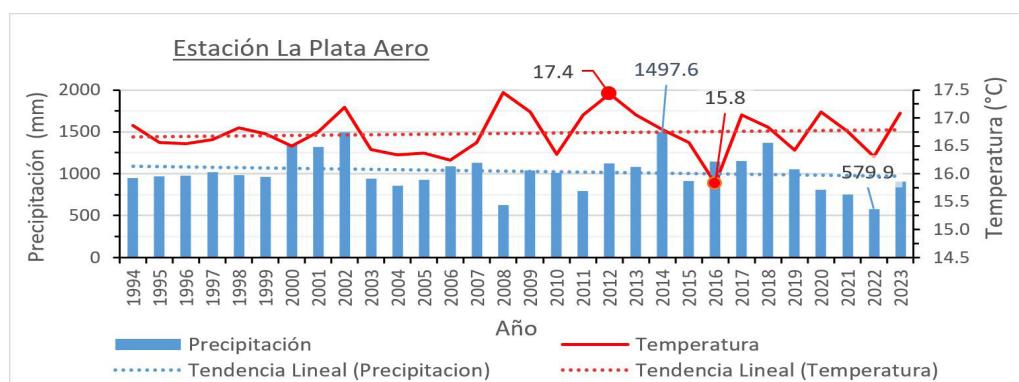


Figura 5. Temperaturas y precipitaciones medias anuales para el periodo 1994-2023, Estación meteorológica La Plata Aero (SMN).

Figure 5. Annual average temperatures and precipitation for the period 1994-2023, La Plata Aero meteorological station (SMN).

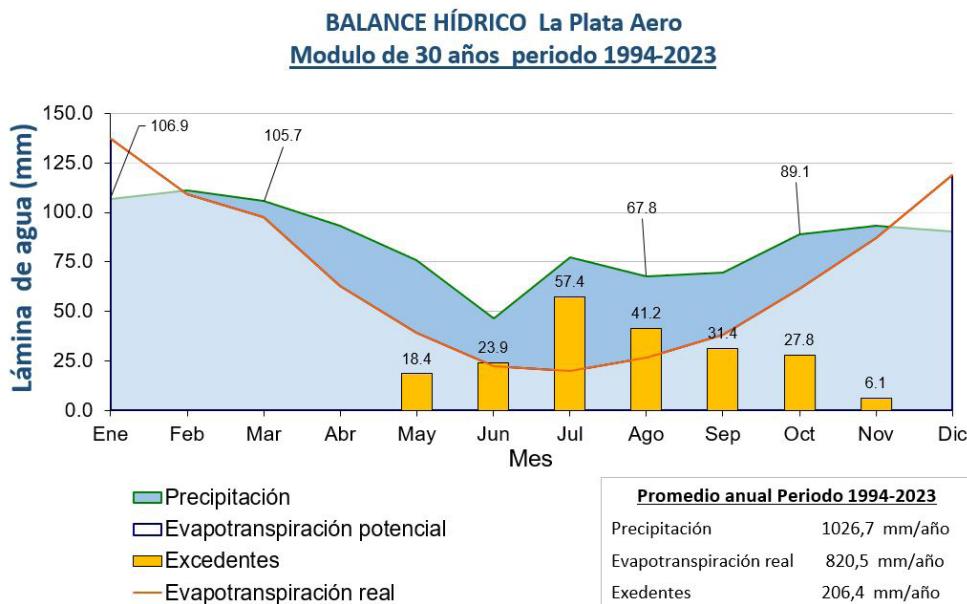


Figura 6. Balance hídrico modular, insumos intervinientes, distribución interanual y promedio anual para el periodo 1994-2023.

Figure 6. Modular water balance, contributing inputs, interannual distribution, and annual average for the period 1994-2023.

con pendiente, que conforman franjas entre la planicie de inundación de los arroyos y los interfluvios presentan gradientes del 0,8 a 2,5% y longitudes de entre 50 y 500 m. La planicie de inundación, área que tiende a ocupar el curso fluvial en épocas de grandes lluvias, que en el caso del arroyo El Pescado puede tener un ancho de más de 1000 m. La planicie de inundación mayor, al igual que la unidad anterior, ha sido definida en base a criterios hidrológicos, corresponde al área afectada por los cursos fluviales cada cierto tiempo por tormentas excepcionales. Finalmente, el cauce del arroyo está formado por cursos de poca profundidad, con canales de estiaje de unos pocos metros de ancho, con agua permanente solo en la parte media y baja de la cuenca (Fig. 8). En el área de influencia marina se identificaron las siguientes unidades: cordón conchil, conformado por acumulaciones de valvas de moluscos enteras y fragmentadas, acompañadas por arenas finas y muy finas, con orientación paralela a subparalela a la línea de costa actual; bañados, son áreas cóncavas que permanecen anegadas en forma casi permanente y cubiertos en gran parte por vegetación higrófila. En

la zona de origen mixto se reconocieron las siguientes unidades: antiguo estuario interior, se trata de áreas inundables que funcionaron como "estuarios" durante la última ingresión marina del Holoceno, generalmente asociadas a depósitos conchiles; antigua franja costera, se desarrolla sobre el paleoacantilado que marcó el límite de la ingresión, representado como un pequeño escalón topográfico de escasos centímetros; interfluvio de origen mixto, son pequeños sectores levemente sobrelevados de relieve plano situados entre los brazos del arroyo o de antiguos canales de marea.

Sitio 1 - Puente Las Llamas

El mapa geomorfológico del sitio presentó ajustes en los límites de las unidades previamente definidas por Cabral *et al.* (2017). Estas modificaciones se basaron en la interpretación de la hidrotoposecuencia A-A, con orientación NO-SE y una longitud de 1600 m, compuesta por seis calicatas (A1, A2, A3, A4, A5 y A6) y una perforación (también en A4) (Fig. 9a), así como en la integración con el

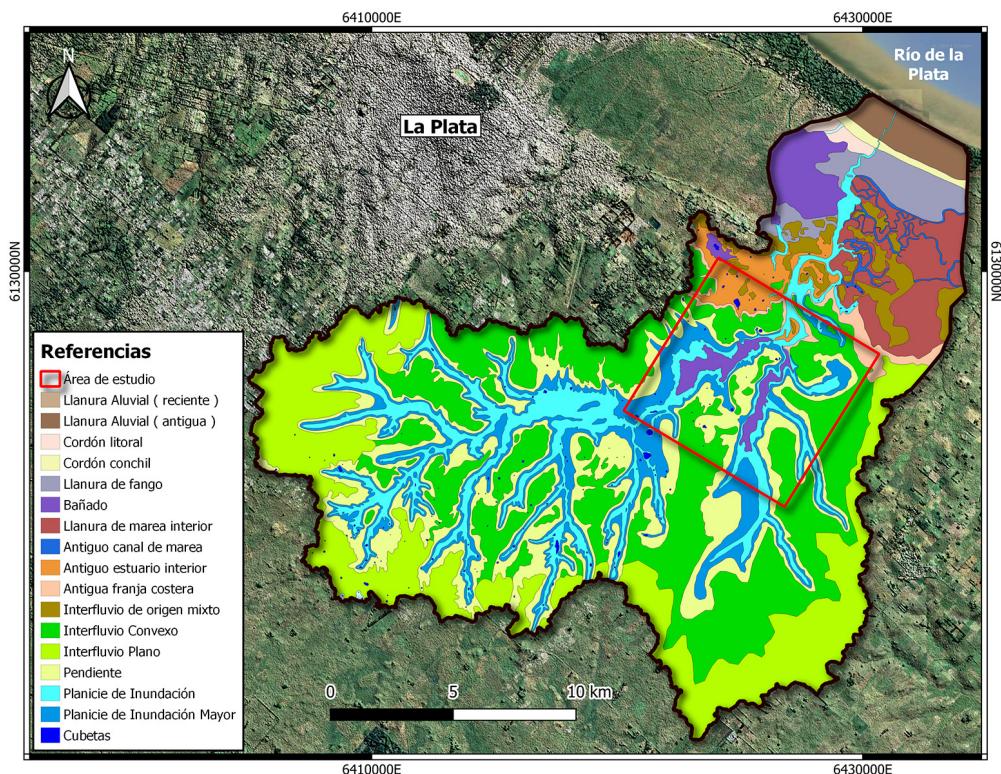


Figura 7. Mapa geomorfológico de la cuenca del arroyo El Pescado sobre Imagen de fondo Google Earth.
Figure 7. Geomorphological map of the El Pescado stream basin overlaid on a Google Earth background image.



Figura 8. Imagen aérea del sitio 2 desde el puente Correas en el mes de agosto de 2024, luego de intensas precipitaciones. La línea punteada blanca representa el límite entre unidades geomorfológicas. La línea continua amarilla representa la transecta sitio 2.

Figure 8. Aerial image of site 2 from Correas bridge captured in August 2024, after a heavy rainfall. The white dotted line indicates the boundary between geomorphological units. The solid yellow line represents the transect at site 2.

MDE del área de estudio realizado (Fig. 9b). En el perfil topográfico generado se representó la interpretación geológica y geopedológica de

la hidrotoposecuencia, donde se observó la relación de las unidades geológicas y los suelos, mostrando la variabilidad del material parental como factor formador de los mismos y su correlación con la topografía y las fluctuaciones de los niveles de agua superficial y subterránea (Fig. 9c). Los suelos descritos en las calicatas A1, A2 y A6 se desarrollaron sobre material loéssico de origen continental. A partir del levantamiento topográfico de precisión se observó que A1 y A6 se ubicaron por sobre los 7 m s.n.m. y se correlacionaron con la unidad geomorfológica interfluvio convexo y la antigua franja costera respectivamente. La calicata A6 se correspondía con la unidad planicie de inundación, pero la descripción morfológica del perfil como su ubicación en el MDE permitió ajustar los límites de las unidades geomorfológicas definidas previamente. El perfil A2 presentó una cota de 4,24 m s.n.m., también se desarrolló sobre material loéssico pero a diferencia de A1 y A6, presentó rodados loéssicos en la base del perfil evidenciando que

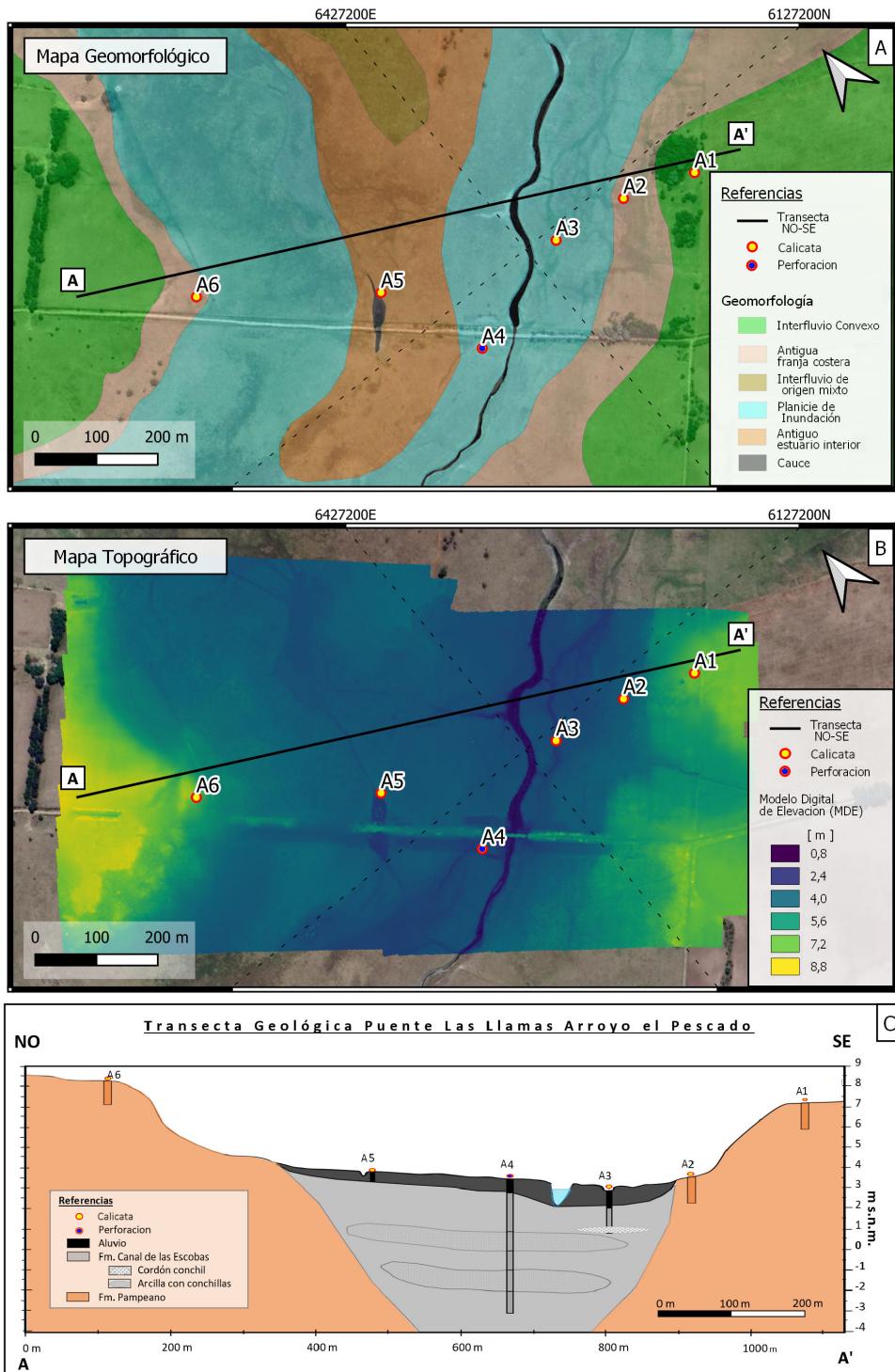


Figura 9. Sitio 1 Puente Las Llamas. a. Mapa geomorfológico y perforaciones. b. Mapa topográfico de alta resolución (MDE) y perforaciones. c. Transecta geológica topográfica.

Figure 9. Site 1 Las Llamas Bridge. a. Geomorphological map and drillings. b. High-resolution topographic map (DEM) and drillings. c. Topographic geological transect.

el material original ha sido retrabajado, esto se asoció con la unidad geomorfológica en la que se ubica, definida como antigua franja costera por Cabral *et al.* (2017), y con la diferencia de cotas que marcó un escalón topográfico coincidente con el paleoacantilado, indicando el límite de la última ingresión marina holocena. Los suelos correspondientes a las calicatas A3, A4 y A5 se desarrollaron por debajo de los 4 m s.n.m., sobre material aluvial reciente con evidencias de hidromorfismo intenso. Subyacen en discontinuidad sedimentos de origen marino muy arcillosos gleizados, con signos de vertisolización intensa y con intercalaciones arenosas. En la calicata A3 a los 95 cm de profundidad y en discontinuidad se encontró un nivel de material carbonático biogénico (conchillas) de 32 cm de espesor con base totalmente cementada de CaCO_3 . Este nivel carbonatado cementado no se expresó en superficie con forma de cordón litoral como suelen presentarse estos materiales. En A4 se describió el desarrollo del ciclo pedogenético actual sobre material aluvial, con las mismas características que A3, se caracterizó un material de origen marino predominantemente arcilloso desde los 57 cm hasta los 6,40 m de profundidad, con dos niveles con conchillas diseminadas entre los 2,50 a 3,50 m y los 4,50 y 5,60 m de profundidad respectivamente. Estas unidades marinas reconocidas en A3 y A4 presentaron un acuñamiento hacia el sector de dominio continental.

Sitio 2 - Puente Correas

El mapa geomorfológico del sitio mostró ajustes en los límites de las unidades previamente definidas por Cabral *et al.* (2017). Dichos cambios derivaron de la interpretación de la hidrotoposecuencia B-B', con orientación NO-SE y una longitud de 600 m, integrada por siete calicatas (B1, B2, B3, B4, B5, B6 y B7), cuatro observaciones y tres perforaciones. (Fig. 10a). Además, se integró al análisis la información obtenida a partir del MDE

del área de estudio realizado (Fig. 10b). Las unidades geomorfológicas y las secuencias de horizontes de las siete calicatas y las tres perforaciones se detallaron en el perfil topográfico, en el que además se representó el gradiente hidromórfico definido a partir de la interpretación hidrogeopedológica. En las tres perforaciones se encontró material loéssico a los 2,20 m de profundidad, el material sobreyacente en discontinuidad fue altamente arcilloso y gleizado de origen aluvial (Fig. 10c). La interpretación pedológica se describió según las unidades geomorfológicas: Pendiente: el perfil B7 se ubicó en la pendiente en posición local de bajo, fue imperfectamente drenado y la cobertura vegetal fue del 100 %, presentó *Cynodon dactylon*, *Lotus tenuis* y *Solanum glaucophyllum*. La secuencia se desarrolló sobre material loéssico con una discontinuidad a los 41 cm de profundidad sobre la que se desarrolló un ciclo pedogenético de escaso desarrollo sin iluvia, con presencia de rodados loéssicos en la base evidenciando que el material original ha sido retrabajado. El horizonte 2BEcb, evidenció eluvia intensa, con una marcada episaturación expresada además por la presencia de moteados de Fe-Mn escasos finos y precisos en el horizonte A, y comunes medios y precisos junto a concreciones ferromanganíferas abundantes en los horizontes ACC y 2BEcb. A partir de los 120 cm de profundidad en el horizonte 2BCgb se observó gleyzación intensa. Las raíces fueron muy abundantes hasta los 41 cm, abundantes hasta los 85 cm y escasas en profundidad. Planicie de inundación mayor: en esta unidad geomorfológica se ubicaron las calicatas B1 y B6, los materiales originales fueron continentales loéssicos y ambas secuencias presentaron una discontinuidad litológica a los 50 cm y 26 cm de profundidad respectivamente. En el ciclo pedogenético reciente se desarrollaron horizontes eluviales e iluviales y se observó en la base rodados loéssicos. B1 se ubicó en el margen NO, el relieve fue plano localmente cóncavo y presentó una clase de drenaje natural imperfectamente drenado; la cobertura vegetal fue del 50 % con predominio de *Cynodon dactylon*, *Distichlis spicata* y *Nostoc* escasos.

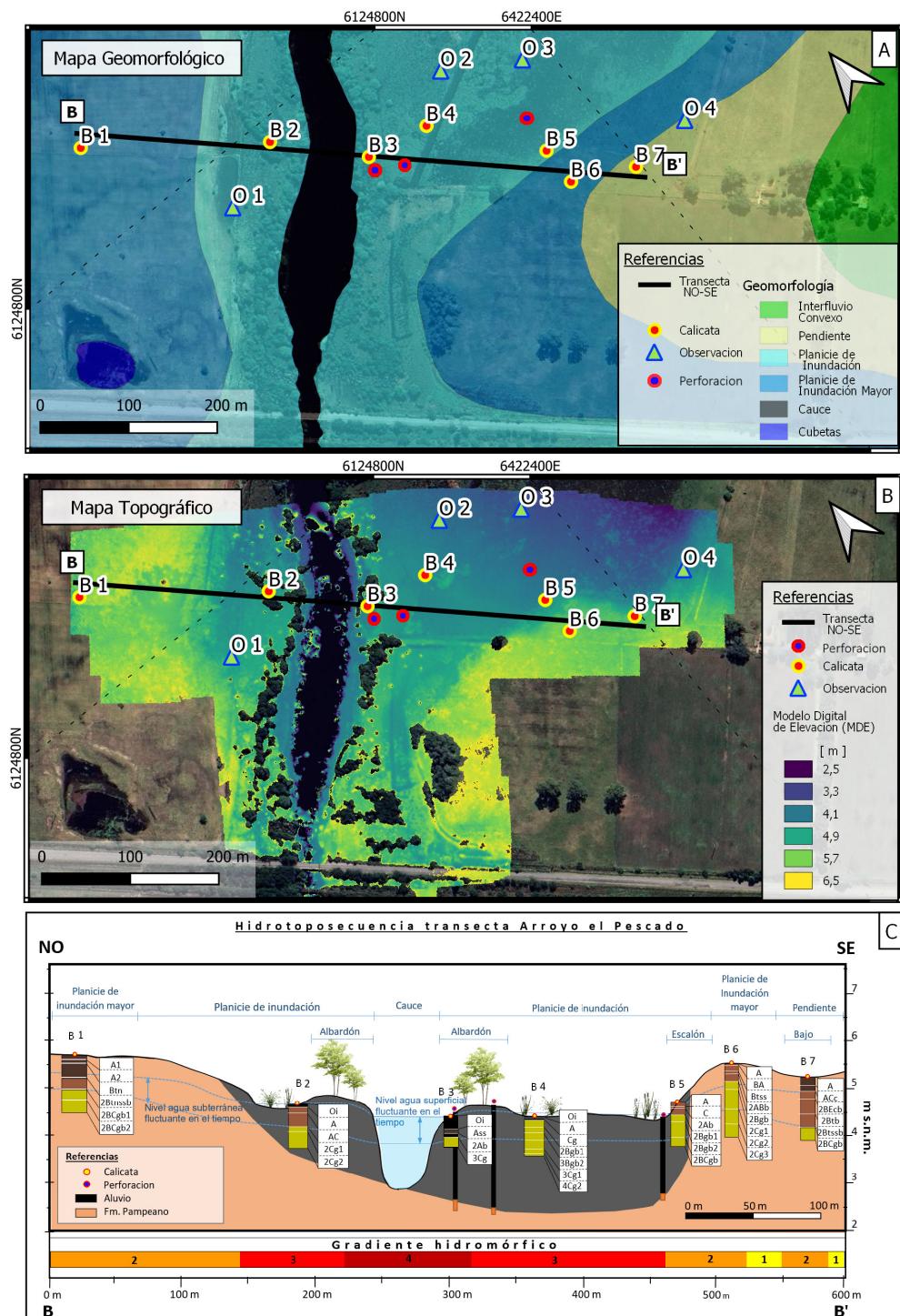


Figura 10. Sitio 2 Puente Correas. **a.** Mapa geomorfológico, calicatas y observaciones. **b.** Mapa topográfico de alta resolución (MDE), calicatas y observaciones. **c.** Hidrotoposecuencia, unidades geológicas y geomorfológicas, secuencia de horizontes y categorías del gradiente de hidromorfismo (4-extremo, 3-fuerte, 2-moderado, 1-débil).

Figure 10. Site 2 Correas Bridge. **a.** Geomorphological map, pits, and observations. **b.** High-resolution topographic map (DEM), pits, and observations. **c.** Hydro-toposequence, geological and geomorphological units, horizon sequences, and hydromorphism gradient categories (4-extreme, 3-strong, 2-moderate, 1-weak).

La secuencia presentó rasgos redoximórficos desde la superficie hasta los 120 cm de profundidad, concreciones de Fe-Mn comunes hasta la discontinuidad litológica y moteados comunes finos y precisos hasta los 75 cm, profundidad a partir de la cual los moteados se presentaron con un tamaño medio y más del 80 % de la matriz de estos horizontes presentó colores gley. El sodio se concentró en los horizontes medios del perfil, esto fue evidenciado por rasgos morfológicos como los colores con elevada luminosidad y valores de pH de campo altamente alcalinos. Estos rasgos reflejaron la episaturación controlada por el cambio textural abrupto con eluvación intensa y la falta de estructura, favorecida por el efecto dispersante del sodio, y generada por los anegamientos frecuentes. La endosaturación fue evidenciada por los colores gley asociados a la presencia del nivel freático en la base del solum. Se encontraron raíces comunes y finas en el horizonte A1, mientras que en el horizonte A2 fueron escasas y estuvieron ausentes a partir de los 75 cm de profundidad. El perfil B6 se ubicó en el margen SE cercano a la pendiente, el relieve fue plano y se consideró una clase de drenaje natural imperfectamente drenado, si bien no presentó rasgos redoximórficos en los horizontes superficiales, la presencia de colores gley desde los 57 cm junto con moteados de Fe abundantes gruesos y sobresalientes, evidenció una fuerte influencia del nivel freático en el perfil; la cobertura vegetal fue del 100 % con predominio de *Cynodon dactylon* y *Baccharis caridifolia*. Las raíces fueron muy abundantes y medianas hasta los 17 cm y decrecieron en abundancia y tamaño hasta los 60 cm. Planicie de inundación: en esta unidad se ubican los perfiles B2 (en el margen NO) y B3, B4 y B5 (en el margen SE) todos desarrollados a partir de materiales originales aluviales. El perfil B2 situado entre el albardón y la planicie de inundación mayor, presentó relieve planocóncavo, fue pobemente drenado, mostró un horizonte orgánico en superficie y una discontinuidad a los 23 cm a partir de la cual los colores fueron gley hasta la aparición del nivel freático a los 85 cm. Los moteados de

Fe-Mn se presentaron en todos los horizontes y fueron aumentando su abundancia, tamaño y expresión en profundidad; el horizonte AC presentó abundantes concreciones de Fe-Mn. Las especies predominantes fueron *Cyperus* y *Eringium eburneum* con un porcentaje de cobertura del 100%. Las raíces fueron muy abundantes en los horizontes A y abundantes en los horizontes Cg. El perfil B3 ubicado entre el cauce y el albardón, con relieve plano, fue muy pobemente drenado y el nivel freático se encontró a 40 cm de profundidad. Mostró un horizonte orgánico muy potente en superficie, un horizonte A enterrado, y una discontinuidad a los 48 cm. La estructura laminar del primer horizonte mineral dió indicios del ambiente de deposición subácteo y mostró marcados rasgos de bioturbación. No se observaron moteados ni concreciones de Fe-Mn. Cabe aclarar que identificar estos rasgos, principalmente los moteados, fue difícil debido al alto contenido de materia orgánica acumulada y el alto grado de melanización. El horizonte Cg se encontró en discontinuidad y con marcado proceso de gleyización. La cobertura vegetal fue del 100%, se observaron principalmente *Typha angustifolia* y *Juncus*, las raíces fueron muy abundantes en todo el perfil. El perfil B4 ubicado entre el albardón y la planicie de inundación mayor, presentó relieve planocóncavo y 100% de *Juncus* como cobertura vegetal. Fue pobemente drenado. Presentó dos discontinuidades a los 23 y 71 cm, la más superficial separando el reciente y poco desarrollado ciclo pedogenético Oi/A/Cg, que presentó marcada melanización y gleyización, con horizontes bien estructurados, alto contenido orgánico y con colores gley. El horizonte subyacente a la discontinuidad más profunda fue masivo y gleyzado. No se identificaron moteados ni concreciones ferromanganíferas. El perfil B5 se encontró sobre un escalón o pendiente local en el margen SE muy cercano al límite con la planicie de inundación mayor. La cobertura vegetal fue del 100% y se identificaron *Cynodon dactylon* y *Cyperus*. El perfil imperfectamente drenado, presentó moteados de Fe-Mn comunes, medios y

precisos desde los 8 cm hasta los 40 cm y la abundancia, tamaño y expresión de los mismos se fue incrementando hasta el horizonte más profundo donde también se observaron colores gley. Las raíces fueron abundantes en los horizontes superficiales y se encontraron presentes hasta los 70 cm. El perfil presentó una discontinuidad a los 13 cm, pero en este caso a diferencia de los perfiles anteriormente descritos, el material original subyacente fue de origen aluvial y el sobrejacente un material loéssico de poco espesor en cuya base se observaron rodados loéssicos, al igual que en las tres calizatas anteriormente descritas. Esto puso de manifiesto un proceso de erosión hidráulica del material loéssico de zonas topográficamente más elevadas y redepositación sobre material aluvial sedimentado y pedogenizado previamente en la planicie de inundación.

Caracterización hidrológica e hidrogeológica

Desde el punto de vista hidrológico, el sector medio de la cuenca del arroyo El Pescado, en torno al cauce principal, fue definido como un bañado de desborde fluvial (BDF) (Rodrigues Capítulo *et al.*, 2020). Los BDF presentan un caudal base aportado principalmente por la descarga del acuífero freático, que se encuentra a escasos centímetros por debajo del terreno. Los cursos se caracterizan por su carácter permanente, aún durante períodos de sequía, con un caudal base constante. La manifestación de los BDF es localizada en relación con ligeras variaciones de la pendiente del curso de agua. Esta condición se traduce en una disminución de la energía y velocidad de flujo y por tanto un ensanchamiento

del cauce principal generando una mayor superficie afectada al humedal, cuyos límites se manifiestan de manera difusa hacia ambas márgenes (Rodrigues Capítulo *et al.*, 2020). En la región el acuífero freático o libre se encuentra alojado en los sedimentos más superficiales, los cuales corresponden a la Formación Pampeano y Aluvio; se recarga a través de la infiltración de las precipitaciones y presenta una relación directa con los cuerpos de agua superficiales. Por debajo de este acuífero y separados por una capa arcillosa se encuentra el acuífero semiconfinado Puelche, el cual está compuesto por arenas medias y es uno de los más explotados en la región para el abastecimiento de agua potable. Los humedales en torno al sitio 2 presentaron el nivel freático a escasos centímetros por debajo del terreno, existiendo una estrecha vinculación entre el sistema hidrológico superficial y subterráneo. Esta relación fue identificada a través de los múltiples sondeos realizados en torno al sitio. En la Tabla 1 se presentan los datos de N.F., C.E. y pH medidos en el Sitio 2. El cauce del arroyo El Pescado, en el área de estudio, presenta agua en superficie en forma permanente, y en períodos húmedos o de intensas precipitaciones, sufre una expansión hacia las planicies de inundación o humedales. En estos humedales el nivel freático se sitúa a escasa profundidad o directamente está aflorando y sus fluctuaciones se asocian a las variaciones en las precipitaciones características de la región (Rodrigues Capítulo *et al.*, 2020). A continuación, se presentan los mapas equipotenciales regionales del acuífero Pampeano y Puelche (Figura 11a y 11b); una imagen satelital en torno al sitio 2, donde se ubicó una sección transversal al curso principal del arroyo (Figura 11c); y el modelo conceptual de funcionamiento hidrológico del sitio 2

Tabla 1. Parámetros monitoreados en las perforaciones en torno al sitio Puente Correa

Table 1. Parameters monitored in the drillings around the Puente Correa site

Pozo	N.F. [m s.n.m.]	C.E. [uS/cm]	pH
P1	2,55	1323	6,36
P2	4,02	2870	6,35
P3	4,01	1856	7,31
P4	4,05	909	7,37

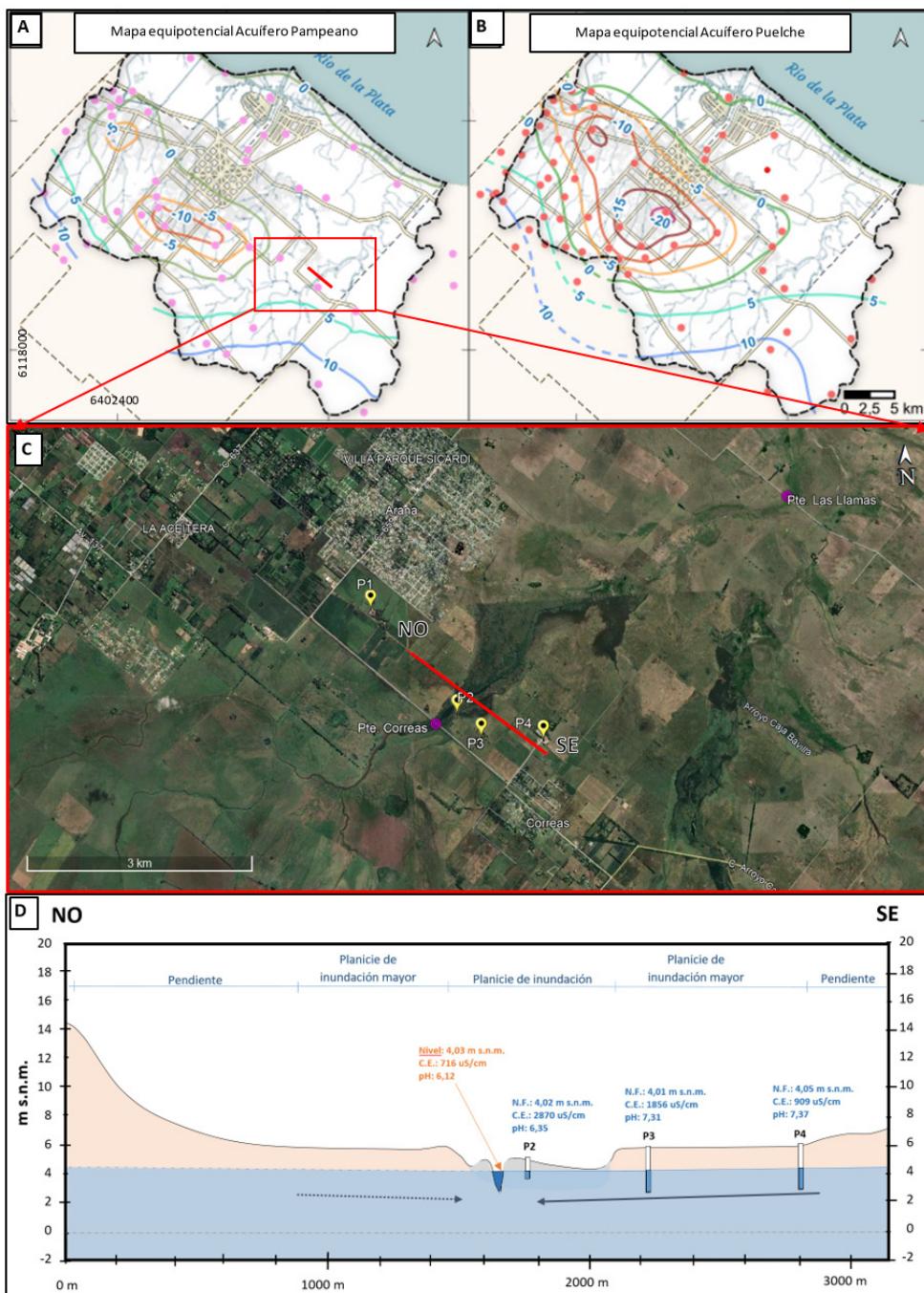


Figura 11. a y b. Mapas equipotenciales acuífero Pampeano y Puelche respectivamente, año 2023. Tomado y modificado de Herrera Niño *et al.*, 2024. **c.** Imagen satelital Google Earth año 2024 en torno al sitio 2, en rojo ubicación de transecta perpendicular al cauce y en amarillo los pozos medidos. **d.** Modelo conceptual de funcionamiento hidrológico para el sitio.

Figure 11. a and b. Equipotential maps of the Pampean and Puelche aquifers, respectively, in 2023. Taken and modified from Herrera Niño *et al.*, 2024. **c.** Google Earth satellite image, in 2024, around Site 2; the location of the transect perpendicular to the channel is shown in red, and the measured wells are shown in yellow. **d.** Conceptual hydrological operating model for the site.

(Figura 11 d), donde se caracterizó la relación agua superficial-agua subterránea durante el mes de agosto de 2024. En las Figuras 11a y 11b se reconoce la existencia de un gran cono de depresión en las afueras del Gran la Plata, generado por el exceso de explotación de estos acuíferos (Kruse *et al.*, 2003; Auge, 2005, Laurencena *et al.*, 2010; García y Zanandrea, 2017; Herrera Niño *et al.*, 2024). Esto se relaciona con el avance de la urbanización y un déficit en la planificación del abastecimiento de agua. Al observar la imagen satelital de detalle del área (Figura 11c), se reconoció un aumento de la urbanización en el margen NO de la cuenca durante los últimos años (localidad de Arana), y en consecuencia la construcción de perforaciones domiciliarias las cuales podrían acentuar el descenso de niveles. En el pozo P1 se encontró el nivel freático a una profundidad de 11,7 m el cual podría estar siendo afectado por los descensos generados por el cono de depresión dado su mayor cercanía a la urbanización. En el modelo conceptual de funcionamiento hidrológico del sitio (Figura 11d) en el pozo P2 el N.F. se encontró a 0,61 m respecto a la superficie y presentó un valor de C.E. de 2870 us/cm. Este valor alto de conductividad eléctrica se asocia con sectores bajos con presencia de sedimentos finos en donde el agua se anega posibilitando una mayor evaporación y concentración de iones en el agua. Los pozos P3 y P4 presentaron niveles muy similares al P2 y se reconoció un gradiente salino en aumento hacia el humedal lo que se vinculó al sentido de flujo de agua subterránea y a las escasas pendientes del terreno que disminuyen hacia el cauce. El agua superficial del cauce presentó un valor de C.E. de 716 us/cm, siendo inferior a los valores medidos en el agua subterránea. Este valor resulta coherente ya que el agua superficial, recargada directamente de las precipitaciones, presenta velocidades de escurrimiento mayores a las del agua subterránea, permitiendo que esta última adquiera mayor cantidad de iones dado el mayor tiempo de residencia en el suelo. Resulta importante destacar que las mediciones de niveles freáticos y parámetros fisicoquímicos in-situ, se realizaron en el mes de agosto 2024,

luego de 3 años consecutivos de una sequía extraordinaria en la región, lo que provocó un descenso de los niveles a valores extremos históricos y eventualmente la desecación total o parcial de cuerpos de agua permanentes.

Indicadores

A partir de la caracterización integral precedente, el análisis satelital multitemporal y cartográfico digital se identificaron y clasificaron indicadores hidrogeopedológicos (tabla 2).

DISCUSIÓN

El análisis e interpretación transdisciplinaria de los resultados da cuenta de la complejidad de estos humedales, de su variabilidad espacial y temporal, y de la relación entre los diversos procesos hidrogeopedológicos que controlan su dinámica. Los resultados muestran concordancia con las unidades geológicas y sus relaciones estratigráficas descritas por diversos autores en los alrededores de la zona de estudio (Fidalgo y Martínez, 1983; Cavallotto, 1995; Hurtado *et al.*, 2006; Fucks *et al.*, 2010; Fucks *et al.*, 2017), como así también las unidades geomorfológicas definidas por Cabral *et al.* (2017). La interpretación geológica y geopedológica de la transecta del sitio 1 indicó que este sector del humedal se corresponde con la zona de transición entre el área de influencia continental y marina. Se define como ambiente de origen mixto ubicado por debajo de los 5 m s.n.m., donde se puede observar un ensanchamiento de las planicies de inundación, que funcionaron como estuarios durante la última ingresión marina. A partir de esta interpretación se pudieron corroborar y ajustar las unidades geomorfológicas antiguo estuario interior, antigua franja costera e interfluvio convexo definidos por Cabral *et al.* (2017). En el sitio 2 los suelos se desarrollan sobre material arcilloso

Tabla 2. Indicadores hidrogeopedológicos; en color gris indicadores principales, en blanco complementarios.
Table 2. Hydrogeopedological indicators; in gray main indicators; in white complementary ones.

Categoría del Indicador	Tipo de Indicador	Indicador	Tipo de variable/rango
Cartográfico/ Satelital	Cartas topográficas	Toponimia (bajos, cañadas, etc.), cotas bajas, forma de curvas de nivel	Cualitativa-relacional /Presencia y/o distribución
	Cartas hidrológicas	Límites de cuenca, tipos de cursos y cuerpos de agua	Cualitativa/Presencia y/o distribución
	Cartas geomorfológicas	Unidades geomorfológicas (planicies de inundación, bañados, lagunas, cubetas, etc.)	Cualitativa/Presencia y/o distribución
	Cartas pedológicas	Unidades cartográficas - Unidades taxonómicas asociadas a hidromorfismo- Fases por drenaje deficiente	Cualitativa/Presencia y/o distribución
	Imágenes satelitales	Geoformas/Vegetación - Tonos - Textura - Patrones de humedad del suelo - imágenes multitemporales	Cualitativa-relacional/ Presencia y/o distribución
	MDE	Cotas bajas-relieve plano a subnormal	Cualitativa-relacional /Presencia y/o distribución
	Fotografía s aéreas	Geoformas/Vegetación - Tonos - Textura - Patrones - Imágenes históricas de anegamiento e inundación (no registradas mediante tecnología satelital)	Cualitativa-relacional/Presencia y distribución
	Fm Geológicas- relaciones estratigráficas	Características paleoambientales- Distribución espacial de las unidades (lateralmente y en profundidad) -Origen y características de los materiales parentales de los suelos.	Cualitativa-relacional/Presencia y distribución
Hidrológicos Hidrogeológicos	De campo	Nivel freático	Presencia Escasa profundidad
	De campo	Conductividad Eléctrica	Cuantitativa/ (Baja- Moderada- Alta - Muy alta) (aplicable para definir tipo de humedal)
	De campo	pH	Cuantitativa/ (Ácido-Neutro-Alcalino) (aplicable para definir tipo de humedal)
	De campo Organoléptica	Color	Cualitativa / (Presencia- Ausencia- Clase)
	De campo Organoléptica	Olor	Cualitativa/ (Presencia- Ausencia- Clase)

Continúa en pág. 18

Taxonómicos	Unidades taxonómicas	Taxones de suelos hidromórficos	Cualitativa/ Presencia y distribución
	Regímenes de humedad	Regímenes Ácuicos y/o Perácuicos	Cualitativa/Presencia
	Características y propiedades de diagnóstico	Condiciones ácuicas (Saturación - Condiciones reductoras - Presencia de rasgos redoximórficos) - Cambio textural abrupto	Cualitativa/Presencia
	Horizontes de diagnóstico	Epipedones Hístico/ Folístico, mólico, endopedones Álbico, Nátrico.	Cualitativa/Presencia
Pedológicos	Morfológico (de campo)	Moteados de Fe-Mn	Cualitativa-Cuantitativa/ Presencia, Distribución, Patrón Color Abundancia: Comunes y Abundantes Tamaño: Medios y/o Gruesos Contraste: Precisos y/o Sobresalientes
	Morfológico (de campo)	Concreciones de Fe-Mn	Cualitativa-Cuantitativa/ Presencia, Distribución, Patrón Color, Forma Abundancia: Comunes y Abundantes Tamaño: Medios y/o Gruesos
	Morfológico (de campo) Color	Colores gley Colores oscuros	Cualitativa-Cuantitativa/ Presencia, Notación Munsell, Profundidad, Distribución, (chroma y value bajos)
	Morfológico (de campo)	Estructura Laminar	Cualitativa/ presencia
	Morfológico (de campo)	Episaturación-Endosaturación- Antrópica-capa colgada)	Cualitativa /Presencia, Frecuencia – Duración(permanente, estacional)
	Morfológico (de campo)	Permeabilidad	Cualitativa/ Lenta a muy lenta
	Morfológico (de campo)	Porosidad	Cualitativa/ Primaria (textura) - Secundaria (estructura)
	Morfológico (de campo)	pH	Cuantitativa (Ácido-Neutro-Alcalino) (aplicable para definir tipo de humedal)
	Morfológico (de campo)Tipo de horizonte	Hz. Oi - Oe - Oa, Hz. E, sufijos g, c, n, horizontes enterrados, discontinuidades litológicas	Cualitativa- Cuantitativa /Presencia, espesores, profundidad
	Drenaje	Clase de drenaje natural	Cualitativa/ Clases 0, 1, 2 y 3
		Anegamiento	Cualitativa-cuantitativa /De permanente a estacional, frecuente a muy frecuente
		Riesgo de inundación	Cualitativa-cuantitativa/ Frecuente a muy frecuente
	Morfológico (de campo) Raíces	Profundidad efectiva	Abundancia y profundidad
Biológicos	Comunidades vegetales	Especies hidrófitas, higrófitas	Cualitativa-cuantitativa/ Presencia, grado de cobertura vegetal

de origen aluvial y limoso de origen loéssico. En el margen de la planicie de inundación se identificó la presencia de rodados loéssicos reconociéndose un proceso de erosión hídrica de zonas topográficamente más elevadas. Estos procesos erosivos identificados concuerdan con lo mencionado por Fucks *et al.* (2017), quienes describen importantes procesos de erosión hídrica mantiforme asociados a pedimentos de flancos y paredes de valles, a pesar de las bajas pendientes del orden de 0,27%. Los únicos antecedentes pedológicos para el área, tanto genéticos, cartográficos y taxonómicos, corresponden a Hurtado *et al.* (2006) y Cabral *et al.* (2017), quienes mapean los suelos como grupo indiferenciado de "Suelos de planicies aluviales del arroyo El Pescado y afluentes (área continental)". La interpretación geológica e hidrogeopedológica de detalle evidencia la variabilidad del material parental como factor formador de los mismos y su correlación con la topografía, las fluctuaciones de los niveles de agua superficial y subterránea y principalmente la pedodiversidad generada a partir de estas interacciones. La definición y categorización de indicadores hidrogeopedológicos a escala de detalle permitió definir el gradiente hidromórfico, donde los suelos presentaron hidromorfismo de grado extremo y fuerte asociado a la planicie de inundación, de grado predominantemente moderado en la planicie de inundación mayor y débil en la pendiente, intensificándose a moderado en posición local de bajo. Estas herramientas son fundamentales para poder delimitar los humedales según el gradiente hidromórfico, entendiendo estos límites como zonas amortiguadoras, o como plantea Vilardy *et al.* (2014), una membrana funcional dentro de una estructura ecológica superior que los integra, que es la cuenca. Los humedales del arroyo El Pescado actúan como cuerpos de almacenamiento de agua amortiguando los picos de las crecidas por eventos de intensas precipitaciones. Estos procesos hídricos, eventuales para los tiempos sociales, son eventos recurrentes a escala de tiempo geológico, manifestándose en el gradiente hidromórfico reconocido en los suelos. Reconocer y delimitar estos ambientes que integran la cuenca es esencial para desarrollar aplicaciones específicas tales como la gestión integrada de los recursos hídricos,

el diagnóstico ambiental y el ordenamiento territorial (Chindamo *et al.*, 2024). Siguiendo los lineamientos de Berkes & Folke (1998) entendiendo a los humedales como sistemas socioecológicos, sistemas complejos adaptativos conformados por las interacciones entre los ecosistemas y la gente. Desde esta perspectiva sistémica, el "todo" es siempre mucho más que la suma de las partes y los humedales como sistemas complejos, no se podrán comprender, ni mucho menos gestionar eficientemente, si no se conocen las dinámicas de los flujos biofísicos, económicos y socioculturales que operan a distintas escalas y que vinculan sus diferentes componentes entre sí. Todo el sistema a su vez está condicionado por las dinámicas de otros factores que se desarrollan a escalas superiores como el clima, la economía y los sistemas políticos (Anderies *et al.*, 2004).

CONCLUSIONES

El análisis de detalle y, la integración de técnicas y metodologías de campo, gabinete y laboratorio, permitieron establecer con gran precisión la distribución espacial de las distintas formaciones geológicas y sus contactos, como así también los límites entre las unidades morfológicas del paisaje. La comprensión del mismo a partir de las condiciones de drenaje de los suelos en base a la integración de múltiples técnicas constituye una herramienta de gran utilidad para interpretar el funcionamiento hidrogeopedológico e identificar la presencia de humedales. Se observa una estrecha relación entre las unidades geológicas y los suelos, mostrando la variabilidad del material parental como factor formador de los mismos; el desarrollo de propiedades y procesos pedogenéticos específicos en relación con la geomorfología y las fluctuaciones de los niveles de agua superficial y subterránea. El abordaje hidrogeopedológico integral, sumado al uso de tecnología de precisión en campo y procesamiento digital permitió identificar y categorizar indicadores. Resultaron de especial importancia en la interpretación la presencia y espesor de horizontes orgánicos (O_i) y/o eluviales; las

discontinuidades litológicas; la distribución y el espesor de horizontes con gleyización y melanización intensas; la profundidad, distribución, tamaño, abundancia y contraste de rasgos redoximórficos como las concreciones y los moteados de Fe-Mn; la presencia de estructura de tipo laminar; la profundidad efectiva; la presencia y profundidad del nivel freático y la clase de drenaje natural. Se concluye que el análisis hidrogeopedológico detallado, sumado a la identificación y clasificación de indicadores demostró ser una herramienta que facilita la interpretación del gradiente hidromórfico, siendo un aporte para la delimitación de humedales. En este sentido es de suma relevancia la incorporación de estos conceptos en el diseño y planeamiento urbano a futuro, previendo aquellas zonas que pueden llegar a constituir un riesgo en períodos de abundantes precipitaciones, y permitiendo conservar estos ecosistemas sensibles que brindan innumerables servicios ecosistémicos. Para abordar la expansión de la frontera antrópica y las problemáticas socio-ambientales se aportan herramientas de gestión territorial desde una perspectiva hidrogeopedológica pensando en mejorar la calidad de vida de los habitantes. Por esta razón resulta importante preservar las zonas amortiguadoras donde se emplazan los humedales, especialmente en el contexto actual de cambio climático donde los eventos extremos de precipitaciones y sequías se presentan cada vez más frecuentemente y con mayor intensidad.

Declaración de contribuciones CRedit

EL.D.B: Conceptualización, curación de datos, Análisis formal, Adquisición de fondos, Investigación, Metodología, Administración del proyecto, Recursos, Supervisión, Validación, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición. **J.G.:** Conceptualización, curación de datos, Análisis formal, Investigación, Metodología, Software, Supervisión, Validación, Visualización, Redacción

– borrador original, Redacción – revisión y edición. **D.V.:** Conceptualización, Investigación, Metodología, Validación, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición. **P.E.O.:** Conceptualización, curación de datos, Investigación, Metodología, Visualización, Redacción – revisión y edición. **D.E.M.:** Conceptualización, Investigación, Metodología, Validación, Visualización, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

REFERENCIAS

- Anderies, J. M., Janssen, M. A. y Ostrom, E. (2004).** A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective. *Ecology and Society*, 9(1), 18. <https://doi.org/10.5751/es-00610-090118>
- Auge, M. P. (2005).** Hidrogeología de La Plata, provincia de Buenos Aires. En Asociación Geológica Argentina (Ed.), *Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino* (pp. 293–312). Editorial Universitaria de La Plata.
- Benzaquen, L., Blanco, D., Bo, R., Kandus, P., Lingua, G., Minotti, P. y Quintana, R. (Eds.). (2016).** Regiones de humedales de Argentina. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sustentable, Fundación Humedales/Wetlands International, Universidad Nacional de San Martín, Universidad de Buenos Aires.
- Berkes, F. y Folke, C. (Eds.). (1998).** *Linking social and ecological systems: Management practices and social mechanisms for building resilience.* Cambridge University Press.
- Bockheim, J. G. y Gennadiyev, A. N. (2000).** The role of soil-forming processes in the definition of taxa in Soil Taxonomy and the World Soil Reference Base. *Geoderma*, 95(1–2), 53–72. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(99\)00083-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(99)00083-X)

- Brinson, M. M. (1993).** *A hydrogeomorphic classification for wetlands (Wetlands Research Program Technical Report WRP-DE-4)*, U.S. Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station.
- Cabral, M., Muntz, D., Giani, E., Hurtado, M., da Silva, M., Boff, L., Palma, J. y Sánchez, C. (2017).** Capítulo 1. Las inundaciones en la Región Capital: Cartografía temática para el planeamiento. En A. Ronco y I. López (Eds.), *Las inundaciones en La Plata, Berisso y Ensenada: Análisis de riesgos y estrategias de intervención. Informe final del proyecto PIO CONICET-UNLP (2014-2016)*. Universidad Nacional de La Plata.
- Cavallotto, J. L. (1995).** *Evolución geomorfológica de la llanura costera del margen sur del Río de la Plata* [Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata]. <https://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/4804>
- Chindamo, M., Entraigas, I., Vercelli, N., Ares, M. G. y Kandus, P. (2024).** El paisaje como predictor de la presencia de humedales: su expresión en una cuenca de la Pampa Deprimida (Argentina). *Revista de la Asociación Argentina de Ecología de Paisajes*, 12(1), 1-17.
- Colado, U., Figini, A., Fidalgo, F. y Fucks, E. (1995).** Los depósitos marinos del Cenozoico superior aflorantes en la zona comprendida entre Punta Indio y el río Samborombón, provincia de Buenos Aires. En N. González (Ed.), *4º Jornadas Geológicas y Geofísicas Bonaerenses. Actas* (Vol. 1, pp. 151-158). Editorial de la Universidad Nacional de la Plata
- Fidalgo, F. y Martínez, O. R. (1983).** Algunas características geomorfológicas dentro del partido de La Plata (Buenos Aires). *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 38, 263-279.
- Fucks, E., D'Amico, G., Pisano, M. F. y Nuccetelli, G. (2017).** Evolución geomorfológica de la región del Gran La Plata y su relación con eventos catastróficos. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 74(2), 141-154.
- Fucks, E., Schnack, E. J. y Aguirre, M. (2010).** Nuevo ordenamiento estratigráfico de las secuencias marinas del sector continental de la Bahía Samborombón, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 67, 27-39.
- García, J. M. y Zanandrea, J. F. (1 de septiembre de 2017).** *Dinámica hídrica del acuífero Puelche en la ciudad de La Plata y alrededores: Resultados preliminares* [ponencia]. IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico de la Provincia de Buenos Aires (CONCYT). Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata. Bernal, Argentina. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/69392>
- González Bonorino, F. (1965).** Mineralogía de las fracciones arcilla y limo del Pampeano en el área de la ciudad de Buenos Aires y su significado estratigráfico y sedimentológico. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 20(1), 67-150.
- Herrera Niño, F., Fabiano, M., Dell'Arciprete, D., Laurencena, P. C. y Kruse, E. E. (2024).** *Efectos de las transformaciones territoriales (2003-2023) sobre la hidrodinámica de los acuíferos Pampeano y Puelche en la Región del Gran La Plata* [ponencia]. XVI Congreso Latinoamericano de Hidrogeología y XII Congreso Argentino de Hidrogeología. La Pampa, Argentina.
- Hurtado, M. A., Giménez, J. E., Cabral, M. G., Silva, M. M. D., Martínez, O. R., Camilión, M. C., Boff, L., Muntz, D. y Lucesoli, H. (2006).** *Ánálisis ambiental del partido de La Plata: Aportes al ordenamiento territorial*. Consejo Federal de Inversiones.
- Kruse, E., Laurencena, P., Deluchi, M., Varela, L., Rosales, E. y Albina, L. (2003).** *Relación hidroquímica superficial-subterránea en cuencas de llanura* [ponencia]. III Congreso de Hidrogeología y I Seminario Hispano-Latinoamericano sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea. Rosario, Argentina.

- Laurencena, P., Deluchi, M., Rojo, A. y Kruse, E. (2010).** Influencia de la explotación de aguas subterráneas en un sector del área periurbana de La Plata. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 66(4), 484-489.
- Organismo Provincial para el Desarrollo Sostenible. (2019).** *Inventario de humedales de la provincia de Buenos Aires. Nivel 2: Sistemas de paisajes de humedales. Primer informe*. Gobierno de la Provincia de Buenos Aires.
- QGIS. (2020).** QGIS geographic information system (Version 3.16) [Software]. QGIS Association. <https://www.qgis.org>
- Rodrigues Capítulo, L., Kruse, E. y Gómez, N. (2020).** Los bañados de desborde fluvial: Una mirada desde la geohidrología. *Biología Acuática*, 35, 011. <https://doi.org/10.24215/16684869e011>
- Schaetzl, R. J. y Anderson, S. (2005).** *Soils: Genesis and geomorphology*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511815560>
- Soil Survey Staff. (2022).** *Keys to soil taxonomy*. (13^a ed.). U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service.
- Thornthwaite, C. W. (1948).** An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55-94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- Thornthwaite, C. W. y Mather, J. R. (1955).** *The water balance*. (Vol. 8, t. 1). Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology.
- Tiner, R. W. (2017).** Practical considerations for wetland identification and boundary delineation. En G. Mulamoottil (Ed.), *Wetlands* (pp. 113-137). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9780203733882-8>
- Vilardy, S., Jaramillo, Ú., Flórez, C., Cortés Duque, J., Estupiñán, L., Rodríguez, J., Acevedo, O., Samacá, W., Santos, A., Peláez, A. y Aponte, C. (2014).** *Principios y criterios para la delimitación de humedales continentales: una herramienta para fortalecer la resiliencia y la adaptación al cambio climático en Colombia*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.
- Zanandrea, J. F. (2022).** *Variaciones del nivel freático en la cuenca del arroyo El Pescado: Periodo 2017-2018* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional de La Plata]. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/143167>
- Zobeck, T. M. y Ritchie, J. T. (1984).** Analysis of long-term water table depth records from a hydrosequence of soils in central Ohio. *Soil Science Society of America Journal*, 48(1), 119-125.