



# Aportes a la estratigrafía de la región de los Bajos Submeridionales, Santa Fe, Argentina

**María Belén THALMEIER<sup>1</sup>, Leticia RODRÍGUEZ<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>CONICET, Santa Fe.

<sup>2</sup>Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe

E-mail: belenthal@gmail.com, leticia@fich.unl.edu.ar

**Editor:** Francisco E. Córdoba

Recibido: 21 de agosto de 2021

Aceptado: 20 de diciembre de 2021

## RESUMEN

La cuenca hidrográfica de los Bajos Submeridionales, ubicada en el NO de la provincia de Santa Fe, SE de Santiago del Estero y SO de Chaco, Argentina, ocupa la sección distal del mega-abanico fluvial del Salado-Juramento, Gran Chaco. Según antecedentes, la columna estratigráfica fue descrita en detalle a partir de una única perforación de investigación de 30 m de profundidad en el centro de los Bajos Submeridionales. A fin de aportar al conocimiento estratigráfico, sedimentológico e hidrogeológico somero, se realizó una perforación exploratoria de 62 m de profundidad en el centro-oeste de la cuenca de los Bajos Submeridionales (28°1'21.60"S, 61°12'11.60"O). Considerando los antecedentes y por correlación estratigráfica con la perforación preexistente de 30 m de profundidad realizada en el centro de esta cuenca, la columna estudiada está representada por las arenas depositadas por el sistema del río Paraná (Fm. Ituzaingó) que conforman un acuífero semi-confinado; en discordancia, suprayacen las arcillas limosas que conforman un acuitardo, y un limo-arcilloso grisáceo a marrón oliva que contiene al acuífero libre, característicos de ambientes palustres (Fm. Fortín Tres Pozos); sobre la que se encuentran arcillas limosas correspondiente a Sedimentos Palustres Superficiales. Los resultados alcanzados aportan al conocimiento estratigráfico somero e hidrogeológico de la región. Asimismo, los análisis mineralógicos de arenas y arcillas, además de contribuir a la identificación de las formaciones que conforman el perfil estratigráfico, constituyen información relevante para la identificación de procesos modificadores de la composición química de las aguas actualmente en investigación.

**Palabras clave:** mega-abanico fluvial, sedimentología, hidrogeología, Cuaternario, humedal

## ABSTRACT

*Contributions to the Bajos Submeridionales stratigraphy, Santa Fe, Argentina.*

The Bajos Submeridionales watershed, located on NW of Santa Fe province, SE of Santiago del Estero province, and SW of Chaco province, Argentina, occupies the distal part of the Salado-Juramento fluvial mega-fan, Gran Chaco. According to background information, the stratigraphic column was described in detail from a single 30 m deep research drilling in the central part of the Bajos Submeridionales. To contribute to the stratigraphic, sedimentological and hydrogeological knowledge, an exploratory drilling of 62 m depth was carried out in the west-center of the Bajos Submeridionales basin (28°1'21.60"S, 61°12'11.60"W). Considering background information and by stratigraphic correlation with existing drilling, the column is represented by the sands deposited by the Paraná River system (Ituzaingó Fm) that constitute a semi-confined aquifer. Overlying in unconformity, the silty clays that comprise an aquitard, and a grayish to olive-brown clay-silt that contains the free aquifer, are characteristics of marshy environments (Fortín Tres Pozos Fm.); on which there lay silty clays corresponding to Sedimentos Palustres Superficiales. The achieved results contribute to the shallow stratigraphic and hydrogeological knowledge of the region. Likewise, the mineralogical analyzes of sands and clays, in addition to contributing to the identification of the formations that comprise the stratigraphic profile, constitute important information to identifying processes that modify the chemical composition of the waters under investigation.

**Keywords:** fluvial mega-fan, sedimentology, hydrogeology, Quaternary, wetland

## INTRODUCCIÓN

La cuenca hidrográfica de los Bajos Submeridionales se encuentra en la sección distal del mega-abanico fluvial del Salado-Juramento en el Gran Chaco Argentino, que se extiende desde las Sierras Subandinas, donde tiene su ápice a 389 m s.n.m., hasta el río Paraná a 56 m s.n.m. (Fig. 1, Iriondo 1993, 2007, Thalmeier et al. 2021). La pendiente del mega-abanico disminuye en dirección NO-SE, y el tamaño de grano de los sedimentos que lo componen y las dimensiones de los cauces/paleocauces disminuyen desde su parte proximal a distal (Thalmeier et al. 2021). El área distal se caracteriza principalmente por presentar depósitos de llanura de inundación mal drenados, representando una superficie topográfica de una cuenca de bajo gradiente con una capa freática elevada, que en años húmedos puede alcanzar la superficie del terreno. Recientemente, Thalmeier et al. (2021) identificaron subunidades geomorfológicas que integran la región de los Bajos Submeridionales propiamente dicha. Desde el punto de vista hidrológico, en la cuenca hidrográfica de los Bajos Submeridionales, el comportamiento del agua en épocas de excesos hídricos se distingue por la acumulación en grandes extensiones y el escurrimiento lento en forma mantiforme, debido a la ausencia de una red de drenaje bien definida (Gioria et al. 2002). El anegamiento estacional del agua superficial en la zona distal del mega-abanico, como lo indicaron Vanlesberg y Kröhling (2010), se asocia a la disminución de la pendiente hacia el pie del abanico y a una zonificación de la permeabilidad del sustrato asociada, entre otros factores.

Los trabajos pioneros de Iriondo (1984, 1987, 1993, 1997, 2007, 2010, 2011) en el Gran Chaco constituyeron la base para la caracterización geológica de la zona de estudio. El Chaco exhibe un variado conjunto de geofomas resultantes de procesos exógenos y endógenos, las cuales contienen una sedimentología característica otorgada en un contexto ambiental y climático determinados durante el Cuaternario, en el cual la neotectónica tuvo un rol importante (Kröhling e Iriondo 2003, Iriondo y Kröhling 2007, Kröhling y Brunetto 2013, Kröhling et al. 2013, Brunetto et al. 2017, Thalmeier et al. 2021). El perfil estratigráfico tipo de la región de los Bajos Submeridionales fue descrito por Iriondo (2007) a partir de una perforación de investigación de 30 m de profundidad en Fortín Tres Pozos (29°10'28.12" S; 61°11'56.79" O), en el centro de la región, área distal del mega-abanico fluvial del Salado-Juramento. Previo a la publicación de Iriondo (2007) y recientemente a partir del trabajo de Thalmeier et al. (2021), en la literatura geológica no existía un análisis exhaustivo del Cuaternario de la región que enmarca a la cuenca hidrográfi-

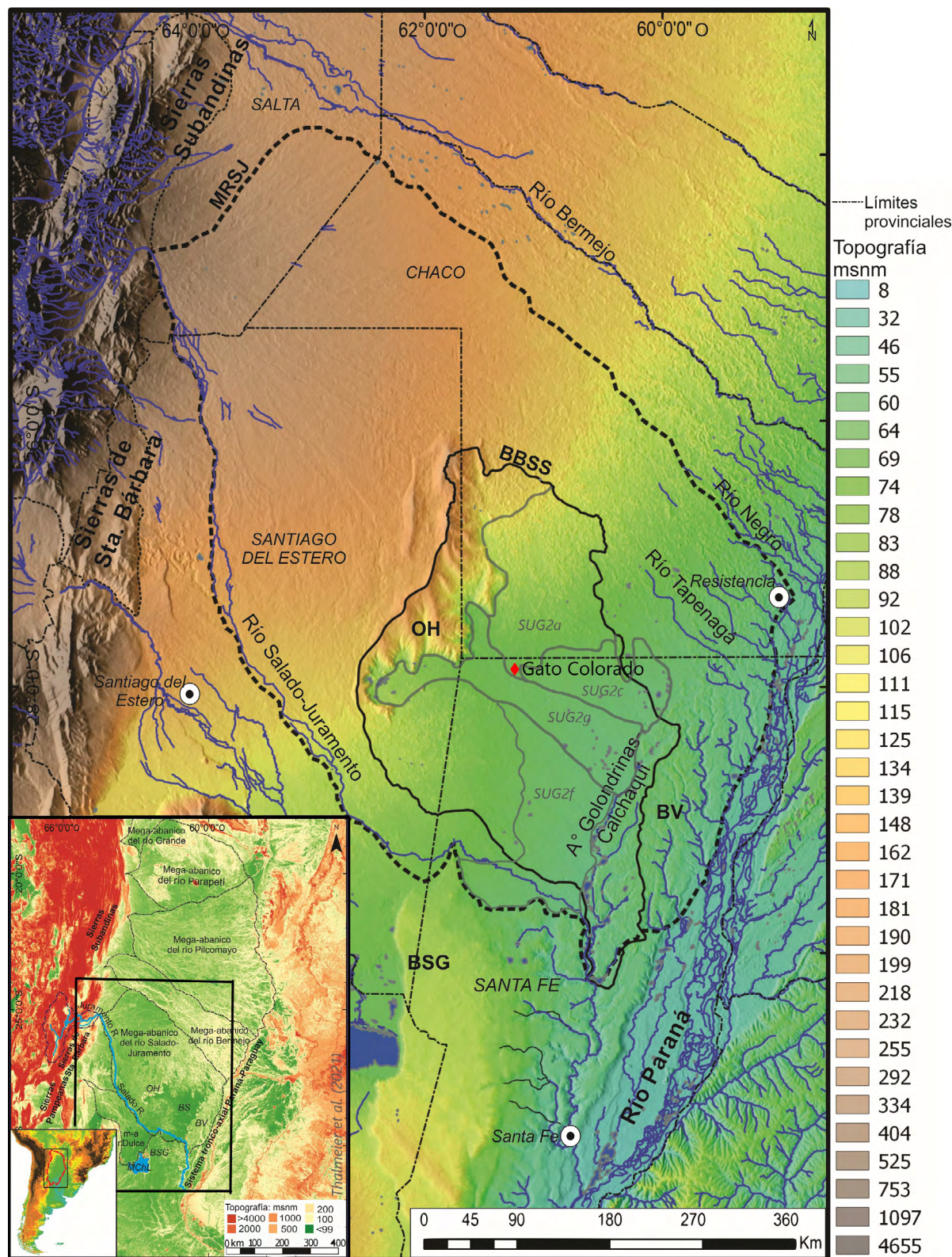
ca de los Bajos Submeridionales. Entre las causas acerca del escaso avance en la descripción geológica de la región se encuentran la falta de afloramientos geológicos, la escasez de perforaciones profundas con descripciones lito-estratigráficas debido a la mala calidad de las aguas subterráneas que limita su exploración y por ende su explotación para diversos usos, extensas zonas anegables en periodos húmedos y la escasa infraestructura para el acceso a zonas de interés, además del limitado reconocimiento de la importancia de la geología del Cuaternario en ambientes de llanura. Para el avance del conocimiento geológico e hidrogeológico de la región de estudio es imprescindible investigar el sistema morfo-sedimentario que comprende a toda la cuenca hidrográfica de los Bajos Submeridionales y su relación con los flujos subterráneos y superficiales. Los antecedentes de la región evidencian la presencia de arenas de la Formación Ituzaingó por debajo de los sedimentos cuaternarios del mega-abanico fluvial del Salado-Juramento (Formación Fortín Tres Pozos), en la extensión de la región geomorfológica de los Bajos Submeridionales (Iriondo 1993, 2007, Thalmeier et al. 2021). No obstante, si bien algunas pocas perforaciones en ese sector han perforado el techo de las arenas de esta formación en busca de acuíferos productivos, el escaso detalle de las descripciones de las columnas perforadas, y la falta de muestras para análisis sedimentológicos/mineralógicos más exhaustivos dificulta identificar el origen de los estratos arenosos hacia el NO de la cuenca.

En este trabajo se presentan los resultados del análisis detallado de una perforación exploratoria de 62 m de profundidad realizada en la localidad de Gato Colorado, Santa Fe, localizada en el centro-oeste de la cuenca hidrográfica de los Bajos Submeridionales (28°1'21.39"S/ 61°12'11.76"O), la cual se correlaciona con la información preexistente, y contribuye al conocimiento estratigráfico somero e hidrogeológico de la región. Asimismo, los análisis mineralógicos constituyen un apoyo a la identificación y correlación de formaciones, y un soporte para futuras investigaciones acerca de los procesos que estarían controlando la composición química de las aguas.

## MARCO GEOLÓGICO

### Área de estudio

La cuenca hidrográfica de los Bajos Submeridionales está ubicada en el NO de la provincia de Santa Fe, SE de la provincia de Santiago del Estero y SO de la provincia de Chaco, Argentina, en la sección distal del mega-abanico fluvial del



**Figura 1.** Ubicación de la cuenca hidrográfica de los Bajos Submeridionales (en línea continua negra) dentro del mega-abanico fluvial del Salado-Juramento (en línea cortada negra) sobre un modelo digital de elevación-MDE SRTM (90 m). En gris, se destacan las subunidades geomorfológicas definidas por Thalmeier et al. (2021). En el recuadro inferior, se observan los mega-abanicos fluviales del Chaco (tomado de Thalmeier et al. 2021) y el recuadro correspondiente al área de estudio regional (en línea negra). MRSJ = Mega-abanico río Salado-Juramento; BBSS = Bajos Submeridionales; OH = Lomadas de Otumpa; BV = Bloque Vera; BSG = Bloque San Guillermo. SUG = Subunidad geomorfológica: 2a=Planicie loésica con hoyas de deflación en paleocauces meandriformes NO-SE del río Salado; 2c=Llanura limo-arcillosa palustre con pantanos y lagunas en hoyas de deflación; 2f=Llanura limo-arcillosa palustre con salinas, pantanos, lagunas y humedales estacionales; 2g=Faja fluvial abandonada del río Salado.

Salado-Juramento (Thalmeier et al. 2021, Fig. 1). La cuenca posee todas las características de las cuencas de grandes llanuras descritas en forma pionera por Kovacs (1978) y posteriormente por Fusquini Mejía (1994). En la mayor parte de la región, la pendiente es inferior a 1 %, con dirección general NO-SE. Debido al escaso gradiente topográfico típico de las llanuras y de las secciones distales de los mega-abanicos, la dinámica del agua superficial es compleja. La morfología del terreno y los excesos hídricos de años húmedos, dificultan la definición clara de divisorias de cuenca en algunos sectores. Esto motiva que algunos autores se refieran a la región hídrica de los Bajos Submeridionales en lugar de cuenca. Según el reciente límite definido por Marchetti et al. (2019), la cuenca hidrográfica cubre un área de 54280 km<sup>2</sup>. Sin embargo, Giraut et al. (2001) establecieron una superficie de 54278 km<sup>2</sup> para la denominada cuenca Propia de los Bajos Submeridionales o Cuenca 22 del Atlas de Cuencas Hidrográficas de la República Argentina desarrollado por la exsubsecretaría de Recursos Hídricos, y cuyos límites, específicamente en el O, no obedecen a las condiciones topográficas de la región. En este sentido, la morfoestructura de las Lomadas de Otumpa en el NO de la cuenca (Peri y Rosello 2010, Thalmeier et al. 2021) define la divisoria de aguas superficial noroccidental de la cuenca hídrica de los Bajos Submeridionales, contemplada en el límite definido por Marchetti et al. (2019).

Las características geomorfológicas, los rasgos tectónicos, el tipo de suelos y las características climáticas condicionan la dinámica hídrica natural. La región posee una red de drenaje natural poco definida o jerarquizada, compuesta por cañadas/paleocauces y lagunas permanentes y semipermanentes localizadas en hoyas de deflación que se interconectan en períodos de excesos hídricos, y aportan al sistema fluvial del arroyo Golondrinas-Calchaquí, ubicado al E de la cuenca, que con dirección aproximada N-S, desemboca en el río Salado (Fig. 1).

Los procesos hidrológicos verticales, como la precipitación, la evapotranspiración e infiltración, predominan en el balance hídrico sobre los horizontales, como los flujos superficial y subterráneo, excepto durante períodos de excedencia hídrica significativa (Gioria et al. 2002, Espinosa Gómez 2021). Durante las lluvias de baja a mediana magnitud, las cañadas/paleocauces y las lagunas reciben el escurrimiento proveniente de las áreas adyacentes; desde allí el agua se evapora y/o infiltra recargando el acuífero freático, y dentro de él, a los numerosos paleocauces que contienen sedimentos de mayor permeabilidad que los de su entorno. Eventualmente puede generarse escurrimiento dependiendo de la magnitud de las lluvias y condiciones de saturación antecedentes en el sistema. En cambio, durante lluvias de gran magnitud,

la escorrentía satisface la capacidad de almacenamiento de las zonas bajas, se superan los umbrales de desborde y se origina un escurrimiento de tipo mantiforme. En la región geomorfológica de los Bajos Submeridionales y en algunos otros sectores, esto ocasiona saturación del suelo, inundaciones, acumulación de sales cerca de la superficie (generalmente de sodio) y desarrollo de pantanos y lagunas poco profundas (Kovacs 1978, Gioria et al. 2002, Espinosa Gómez 2021).

El área de estudio está sujeta a períodos alternantes de extremos hídricos que causan frecuentes inundaciones y sequías severas. Ambos extremos impactan en las principales actividades productivas de la región, la ganadería extensiva y la agricultura en el sector NO, que se ha expandido en las últimas décadas a expensas del monte nativo (Volante et al. 2016). La intervención antrópica también se manifiesta en la densa red de canales de drenaje construidos durante años (Fertonani y Prendes 1984, Gioria et al. 2002), sin un conocimiento de la geología/geomorfología de la región y en ocasiones sin respetar las direcciones naturales de escurrimiento.

## Gran Chaco

El sistema Gran Chaco constituye una provincia geomorfológica caracterizada por una amplia llanura con una fuerte identidad climática, geológica y biogeográfica que cubre parte de Bolivia, Paraguay y Argentina (Fig. 1; Iriondo 1993, 2010). El Chaco se caracteriza por presentar extensas geoformas como los mega-abanicos fluviales, los depósitos eólicos que interactúan con ellos y la faja fluvial de los ríos Paraguay y Paraná (Iriondo 2007, 2010). Estos dos ríos limitan el Gran Chaco en el E a lo largo de una orientación N-S (Fig. 1). El desarrollo de los mega-abanicos fluviales está relacionado con el levantamiento de las Sierras Subandinas y el avance de los sistemas fluviales de los ríos del Gran Chaco. La evolución de los mega-abanicos chaqueños se inició en el Neógeno (Iriondo 1993, Horton y DeCelles 2001), con un gran desarrollo durante el Cuaternario hasta la actualidad (Thalmeier et al. 2019, 2021). Horton y DeCelles (2001) y Latrubesse et al. (2012) documentan las características geomorfológicas y los procesos deposicionales de los mega-abanicos activos del Chaco del sur de Bolivia, los cuales son generados por los principales ríos transversales (Grande y Parapetí). Además, varios estudios analizan las características morfológicas y sedimentológicas principales de los mega-abanicos del Pilcomayo, Bermejo, Salado y Dulce (Iriondo 1984, 1987, 1993, Iriondo et al. 2000, Cafaro et al. 2009, 2010, Latrubesse 2015, McGlue et al. 2016, Thalmeier et al. 2019, 2021; Fig. 1).

La dinámica de los mega-abanicos fluviales del Chaco y sus relaciones con las oscilaciones climáticas a lo largo del Cuaternario han sido abordados por varios autores (e.g. Irion-

do 1993, 2007, Latrubesse et al. 2012, Zani et al. 2012, Assine et al. 2014, Pupim et al. 2017, Thalmeier et al. 2021).

El mega-abanico del río Salado-Juramento, desarrollado por el desplazamiento del río hacia el SE, presenta numerosos paleocauces en un patrón distributivo hacia el E desde su ápice en el Sistema Subandino (Iriondo 2007, Peri y Rosello 2010, Thalmeier et al. 2019, 2021). La parte distal del mismo se caracteriza por grandes pantanos temporales y materiales superficiales con muy baja permeabilidad, que modelan el paisaje típico de las áreas distales de los mega-abanicos fluviales (Iriondo 2007). Los elementos geomorfológicos característicos del área de estudio además de los paleocauces, son las hoyas de deflación con cuerpos de agua temporarios o permanentes. Las subunidades geomorfológicas de la unidad mega-abanico distal del Salado-Juramento, dentro de la provincia geomorfológica del Gran Chaco descritas en Thalmeier et al. (2021), y que son importantes para el área de los Bajos Submeridionales, son (Fig. 1): (2c) una llanura limo-arcillosa palustre con pantanos y lagunas que ocupan hoyas de deflación, (2f) una llanura limo-arcillosa palustre con salinas, pantanos, lagunas y humedales estacionales (área de Fortín Tres Pozos, Iriondo 2007), y (2g) una faja fluvial abandonada del río Salado (área de la Cañada de las Víboras, Iriondo 2007).

Thalmeier et al. (2021) presentan por primera vez un análisis estratigráfico de las secuencias del mega-abanico, donde se observa la heterogeneidad sedimentológica tanto en sentido vertical como horizontal de este sistema. Los autores incluyen además la columna sedimentaria representativa del área distal del mega-abanico, realizada a partir de un análisis sedimentológico detallado de la perforación de investigación de Fortín Tres Pozos, situada en el centro de la región de los Bajos Submeridionales. Un primer estudio del ambiente distal con resultados de dicha perforación es presentado por Iriondo (2007). El ambiente de sedimentación de esta área era principalmente pantanoso y, en menor medida, fluvial. La formación tipo representativa de la sección distal del mega-abanico es la Fm. Fortín Tres Pozos, constituida por tres miembros (Inferior, Medio y Superior) de limos-arcillosos y arcillas-limosas palustres con carbonato de calcio, nódulos de Fe/Mn y cristales de yeso, con esporádicas facies arenosas micáceas que corresponden a paleocauces (Iriondo 2007, Thalmeier et al. 2021). Estos paleocauces en el área constituyen importantes reservas de agua para la región dada su mayor permeabilidad y contenido salino menor a las aguas de su entorno (Veizaga et al. 2019, Thalmeier et al. 2018, 2021, Rodríguez et al. 2021). La Fm. Fortín Tres Pozos se atribuye al Pleistoceno (Iriondo 2007), mediante correlación con las unidades loésicas de la Fm. Tezanos Pinto, Loess A

y Loess B (Kröhling e Iriondo 2003, Iriondo 2007). Thalmeier et al. (2021) determinan una edad OSL de 58.000 años AP en las facies de arcilla del Miembro Medio de la Formación Fortín Tres Pozos. Esta formación es característica del área distal del mega-abanico del Salado-Juramento, donde los paleocauces del Pleistoceno están enmascarados por un manto loésico (Thalmeier et al. 2019). La Formación Fortín Tres Pozos representaría un gran humedal cuaternario formado por una potente (20-40 m) columna de sedimentos limo-arcillosos y arcillo-limosos (Iriondo 2007, Thalmeier et al. 2021). Compone un perfil representado por tres miembros dominados por facies de pantanos con sedimentos finos ricos en materia orgánica y colores oliva a grisáceos indicativos de acumulación de aguas poco profundas y abundante vegetación, y con evidencia de procesos geoquímicos reductores en varios niveles, cubierto por arcillas limosas marrón oscuro, afectadas por pedogénesis actual (Sedimentos Palustres Superficiales; Iriondo 2007, Thalmeier et al. 2021).

En la región de los Bajos Submeridionales, Iriondo (2007) reconoció subyaciendo a la Formación Fortín Tres Pozos, a la Formación Ituzaingó (De Alba 1953, Herbst 1971), desconocida hasta ese momento en la región. Ésta corresponde a depósitos fluviales del río Paraná conformados por cuarzo amarillento y rojizo, arenas limpias, interestratificadas con limo íltico y caolinítico y arcillas en porcentajes bajos (Iriondo 2007). La edad de la Formación Ituzaingó varía entre el Mioceno y el Cuaternario (Frenguelli 1920, De Alba 1953, Herbst 1971, Pascual y Odreman Rivas 1971, 1973, Aceñolaza 1976, 2004, 2007, Bidegain 1993, Cione et al. 2000, entre otros). Las controversias respecto de la edad de esta formación se deben a los diferentes estudios (e.g. estratigráficos, paleontológicos, paleomagnéticos) en distintos niveles de la formación y a la ausencia de dataciones radiométricas para la unidad (Brunetto et al. 2013). En este sentido, los estudios paleobotánicos determinaron una edad Plioceno–Pleistoceno (Anzótegui y Acevedo 1995, Brea y Zucol 2007, Franco 2009, Franco et al. 2013); mientras que los relativos a fauna indicaron una edad Mioceno tardío (Cione et al. 2000, Carlini et al. 2000, Brandoni 2011, entre otros). Por otro lado, ante la falta de dataciones, en este trabajo se toma la edad establecida en el perfil tipo de la región de los Bajos Submeridionales, la cual corresponde para dicha formación al Plio-Pleistoceno (Iriondo 2007).

## METODOLOGÍA

A fin de obtener información de detalle de la columna estratigráfica cuaternaria y como apoyo a la caracterización hi-

drogeológica en un sector del NO de la cuenca hidrográfica de los Bajos Submeridionales, y de verificar la extensión regional de la columna estratigráfica disponible, se realizó una perforación exploratoria de 62 m de profundidad. En esta perforación se recuperaron muestras *cutting* en un sitio donde la información lito-estratigráfica de pozos alcanza generalmente profundidades hasta los 20-30 metros de la columna sedimentaria, y muy puntualmente hasta los 60 m. Además, las descripciones que acompañan las perforaciones (destinadas a consumo de agua) usualmente poseen un grado de detalle limitado. En este trabajo, las muestras obtenidas de la perforación se sometieron a varios análisis según se detalla más abajo, de modo de contribuir al conocimiento estratigráfico somero de la región de los Bajos Submeridionales.

## Perforación

La ubicación de la perforación se definió considerando la extensión de la región de los Bajos Submeridionales en el contexto de la sección distal del mega-abanico del río Salado-Juramento, en la subunidad geomorfológica 2a (Planicie loésica con hoyas de deflación a lo largo de paleocauces meandriformes NO-SE del río Salado), y cercana al límite de la 2c (Llanura limo-arcillosa palustre con pantanos y lagunas que ocupan hoyas de deflación) y 2g (Faja fluvial abandonada del río Salado), de acuerdo a la definición de sub-unidades geomorfológicas recientemente definidas por Thalmeier et al. (2021), en la localidad de Gato Colorado (28°1'21.39" S, 61°12'11.76" O, Fig. 1).

Se realizó una perforación rotativa directa con mecha de 9" de diámetro a inyección directa, con control de avance de la perforación. Se utilizaron aditivos biodegradables en el lodo de perforación a fin de prevenir la contaminación con minerales extraños de los sedimentos atravesados. Se extrajo una muestra de *cutting* en canaleta por cada dos metros de avance de la perforación y/o en cada cambio litológico. A fin de minimizar la mezcla con los niveles superiores, se hizo circular la inyección durante 10 minutos previo al muestreo. Éste consistió en la recolección de *cutting* junto a la boca de pozo. Al avanzar en la columna sedimentaria pudo comprobarse que la mezcla de niveles resultó casi inexistente. Finalizada la perforación, se practicó el perfilaje múltiple. Se obtuvieron registros con las sondas de normal corto y largo espaciamiento, potencial espontáneo y perfil de avance. La profundidad total perforada fue de 62 m, con obtención de 33 muestras de sedimentos.

## Sedimentología

Las muestras se rotularon debidamente, se secaron a temperatura ambiente y se describieron en gabinete a simple

vista y bajo lupa binocular 100x, con el fin de obtener textura, color Munsell, estado de oxidación y trazas de material orgánico. El análisis textural se realizó en cada muestra utilizando la técnica del sentido del tacto en el campo (Thien 1979). Las características sedimentarias y pedógenas se documentaron siguiendo a Catt (1990). Debido a la disponibilidad limitada de datos de dataciones, se aplicó un criterio convencional como relación estratigráfica, color (índice de color Munsell), consolidación, carácter del suelo, mineralogía, etc., para determinar las edades relativas de las diferentes unidades perforadas por correlación con el perfil tipo definido por Iriondo (2007). Las muestras sedimentarias se procesaron de acuerdo con los métodos estándar descritos por Tucker (1988) para el análisis del tamaño de grano y la mineralogía de las diferentes fracciones de los mismos. Las muestras se procesaron previamente, eliminando el contenido de materia orgánica con  $H_2O_2$ , luego se dispersaron mecánica y químicamente. El contenido de  $CaCO_3$  se eliminó por reacción con HCl y se estimó cualitativamente. El análisis granulométrico de las muestras de la perforación se realizó mediante un analizador de partículas marca Horiba-LA910 en el Laboratorio de Sedimentología de la Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas de la Universidad Nacional del Litoral. A su vez, se aplicaron técnicas convencionales por tamizado para la fracción arena ( $> 63 \mu m$ ) y por métodos gravitacionales para la fracción fina (limo, arcilla y coloides  $< 63 \mu m$ ), siguiendo la escala de Wentworth (1922). Se aplicó difracción de rayos X (radiación  $CuK\alpha$  y filtro de Ni) de muestras orientadas de minerales arcillosos, realizado en el Laboratorio de Arcillas del Centro de Investigaciones de Ciencias de la Tierras, Universidad Nacional de Córdoba. Los análisis semicuantitativos se llevaron a cabo siguiendo la técnica de Moore y Reynolds (1997) para la fracción  $< 2 \mu m$ . El estudio mineralógico (técnica de grano suelto) se centró en la fracción de arena modal (arena muy fina:  $63 - 125 \mu m$ ) mediante el uso de métodos ortoscópicos y conoscópicos con un microscopio polarizador, utilizando eugenol como líquido de inmersión ( $n = 1.54$ ). Se contaron un mínimo de dos preparaciones por muestra y 500 granos para cada una de ellas. Los porcentajes mineralógicos expresados en la secuencia sedimentaria reconstruida a partir del pozo corresponden al promedio del conjunto de muestras para cada formación identificada. Además, se realizó la descripción morfoscóptica de la fracción de arena modal.

## RESULTADOS

### Secuencia estratigráfica representativa de los Bajos Submeridionales

Los resultados de los análisis sedimentológicos de la perforación de Gato Colorado de 62 m de profundidad con recuperación de *cutting* cada dos metros de avance, se presentan en la figura 2. En esta figura pueden observarse las curvas de resistividad, la granulometría de toda la secuencia atravesada, la mineralogía de arcillas y el semicuantitativo correspondiente, y la mineralogía de la fracción modal de arenas que corresponde al tamaño de arenas muy finas. El análisis detallado de las 32 muestras obtenidas (denominadas GC32 a GC1 sucesivamente), se describe a continuación, agrupadas en los diferentes estratos perforados y ajustadas con los registros del perfilaje múltiple de pozo.

El perfil comienza (62.0 - 60.3 m b.b.p. - muestra GC32) con arenas muy finas grisáceas amarillentas con arcillas verdosas-azuladas (10 YR 7/1 con GLEY1 5/10GY). Continúan 20.3 m de espesor (60.3 - 40.0 m b.b.p. - muestras GC31 a GC22) de arenas cuarzosas muy finas a finas, amari-

llentas rojizas a marrón pálido (7.5 YR 6/6 a 7.5 YR 5/3) con escasa arcilla. La arena se presenta moderadamente seleccionada y predominantemente formada por granos de cuarzo redondeados a sub-redondeados. El contenido de arcilla (< 10 %) está formado por minerales del grupo de las esmectitas, con caolinita y micas subordinadas en las muestras tomadas entre los 60.3 y 40.0 m b.b.p. (Fig. 3). El conjunto mineral de la fracción de arena muy fina, en promedio, presenta: 68 % de cuarzo, 16 % de feldespatos, 13 % de minerales pesados (opacos, micas, diópsido, augita, enstatita, hornblenda, monacita, turmalina, rutilo, cianita, estaurilita, corindón, circón y titanita) y 4 % de alteritas (Fig. 4). La presencia de pátinas de óxi-hidróxidos férricos recubriendo los granos de cuarzo es común. Esta mineralogía es similar a los resultados mineralógicos de las arenas de los testigos de la perforación de Fortín Tres Pozos (perfil tipo, entre los 30.0 y 19.5 m b.b.p. - Thalmeier et al. 2021), y por correlación con el perfil tipo en la

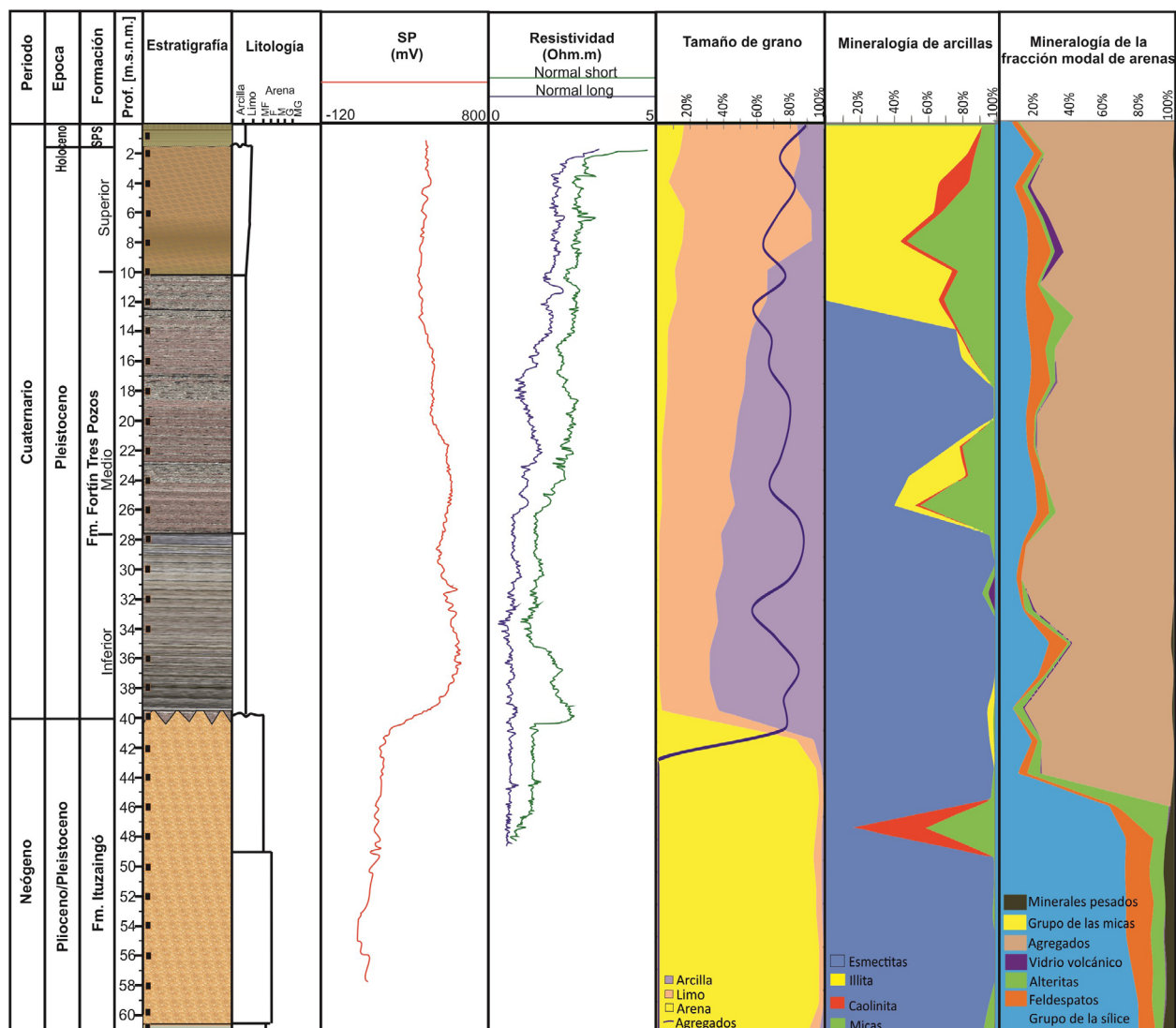
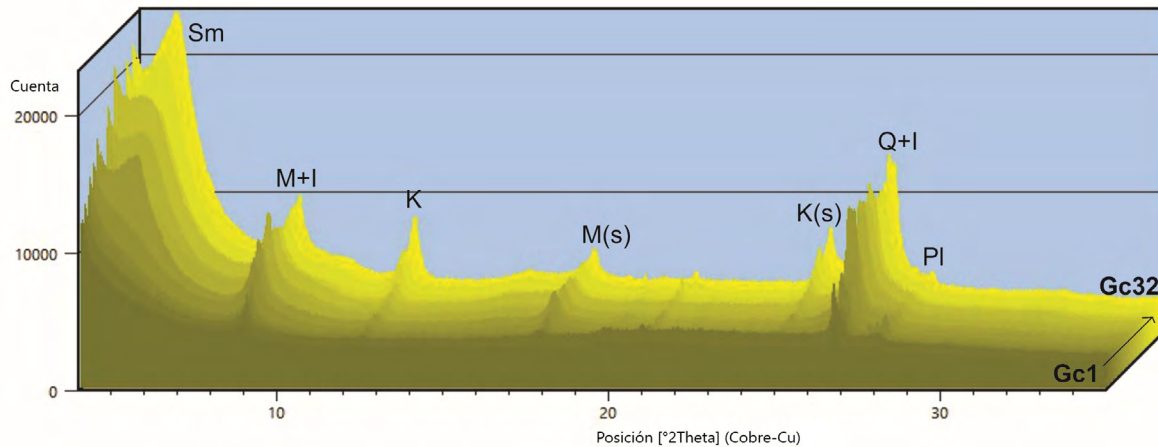


Figura 2. Estratigrafía y sedimentología de la perforación de investigación de Gato Colorado.



**Figura 3.** Difracción de rayos X de arcillas, considerando la muestra más superficial (GC1) hacia la más profunda (GC32). Sm = Esmectitas, M = Micas, I = Illita, K = Caolinita, Q = Cuarzo, PI = Plagioclasa, (s) = secundario.

zona, son interpretadas como pertenecientes a la Formación Ituzaingó, cuya presencia en los Bajos Submeridionales fue identificada por Iriondo (2007), comprobando su extensión hacia el NO de la cuenca hidrográfica de los Bajos Submeridionales. Se interpreta que la base del perfil constituye la transición hacia otra formación, por observarse un aumento en el contenido de arcillas verdosas-azuladas y un cambio de coloración en las arenas, rasgos característicos de la Formación Paraná (Aceñolaza 1976, Kröhling e Iriondo 2003, Maringo 2006, Iriondo 2007).

Suprayacen a la Formación Ituzaingó, arcillas limosas (40.0 - 28.0 m b.b.p. - muestras GC21 a GC16), de color grisáceo a marrón oliva claro (10YR 7/3 a 2.5Y 5/3). Las mismas contienen concreciones comunes de  $\text{CaCO}_3$  medio muy fino (de formas rugosas subangulares y subcuánticas), algunas de ellas parcialmente cubiertas por películas de óxido-hidróxido de Mn. Además, se observan pocos a muy comunes los nódulos de óxido de Mn muy finos y redondeados. Los cristales de yeso son comunes y también los agregados finos rojizos y plásticos formados por limo-arcilla. Suprayacen arcillas limosas (28.0 - 10.0 m b.b.p. - muestras GC15 a GC7) de color marrón a marrón claro (7.5YR 5/3 a 10 YR 6/3) con concreciones de  $\text{CaCO}_3$  y nódulos de óxido-hidróxido de Mn con las mismas características que las observadas en el estrato subyacente, con la presencia de yeso y agregados limo-arcillosos plásticos. Son comunes en este estrato los moteados de Fe (subcuánticos y muy finos). Por encima, se observan limos arcillosos (10.0 - 0.5 m b.b.p. - muestras GC6 a GC2) de color marrón a marrón oscuro (7.5YR 5/6), que contienen pocos nódulos de Fe/Mn muy finos y pocas concreciones de  $\text{CaCO}_3$  muy finas.

Entre los minerales de arcilla del estrato superior (10.0 - 0.5 m b.b.p.) domina la illita, con micas y caolinita subordinadas (Fig. 3), mientras que las arcillas del grupo de las es-

mectitas son mayoritarias en los estratos inferior (40.0 - 28.0 m b.b.p.) y medio (28.0 - 10.0 m b.b.p), con intercalaciones de caolinita, mica e illita en algunos niveles perforados. Los coloides minerales y orgánicos son abundantes a lo largo de todo el perfil. La mineralogía de la fracción arena muy fina de las muestras de estos tres estratos (40.0 - 0.5 m b.b.p.), en promedio está representada por granos subangulares compuestos por 65 % de agregados, 17 % de cuarzo, 6 % de feldespatos, 5 % de alteritas, 4 % de vidrio volcánico, 2 % de micas y 1 % de minerales pesados (enstatita, hornblenda, epidoto y olivino, Fig. 4). Esta mineralogía de arcillas y arenas, por correlación, es similar a la observada en los análisis mineralógicos de los testigos de la perforación de Fortín Tres Pozos correspondientes a la Formación Fortín Tres Pozos (Thalmeier et al. 2021).

En síntesis, las características de estos tres estratos permiten deducir que corresponden a los Miembros Inferior, Medio y Superior, respectivamente, de la Formación Fortín Tres Pozos por correlación con los resultados de la perforación de Fortín Tres Pozos (Iriondo 2007, Thalmeier et al. 2021). El Miembro Inferior de esta formación (40.0 - 28.0 m b.b.p.) representa un ambiente sedimentario de pantanos temporales, mientras que el Miembro Medio (28.0 - 10.0 m b.b.p.), pantanos temporales a permanentes. El Miembro Superior (10.0 - 0.5 m b.b.p.) representa una contribución eólica al pantano, el cual fue expuesto temporalmente a un entorno subaéreo (Thalmeier et al. 2021).

Rematan la columna perforada arcillas limosas (0.5 - 0.0 m b.b.p. - muestra GC1) de color marrón oscuro (10YR 3/3) con frecuentes moldes radiculares finos cubiertos por cutanes, películas de óxido-hidróxido de Fe/Mn, que además presenta concreciones muy finas y rugosas de  $\text{CaCO}_3$ . Las arcillas están representadas por illita con caolinita subordinada. La arena muy fina está compuesta por 77 % de agrega-



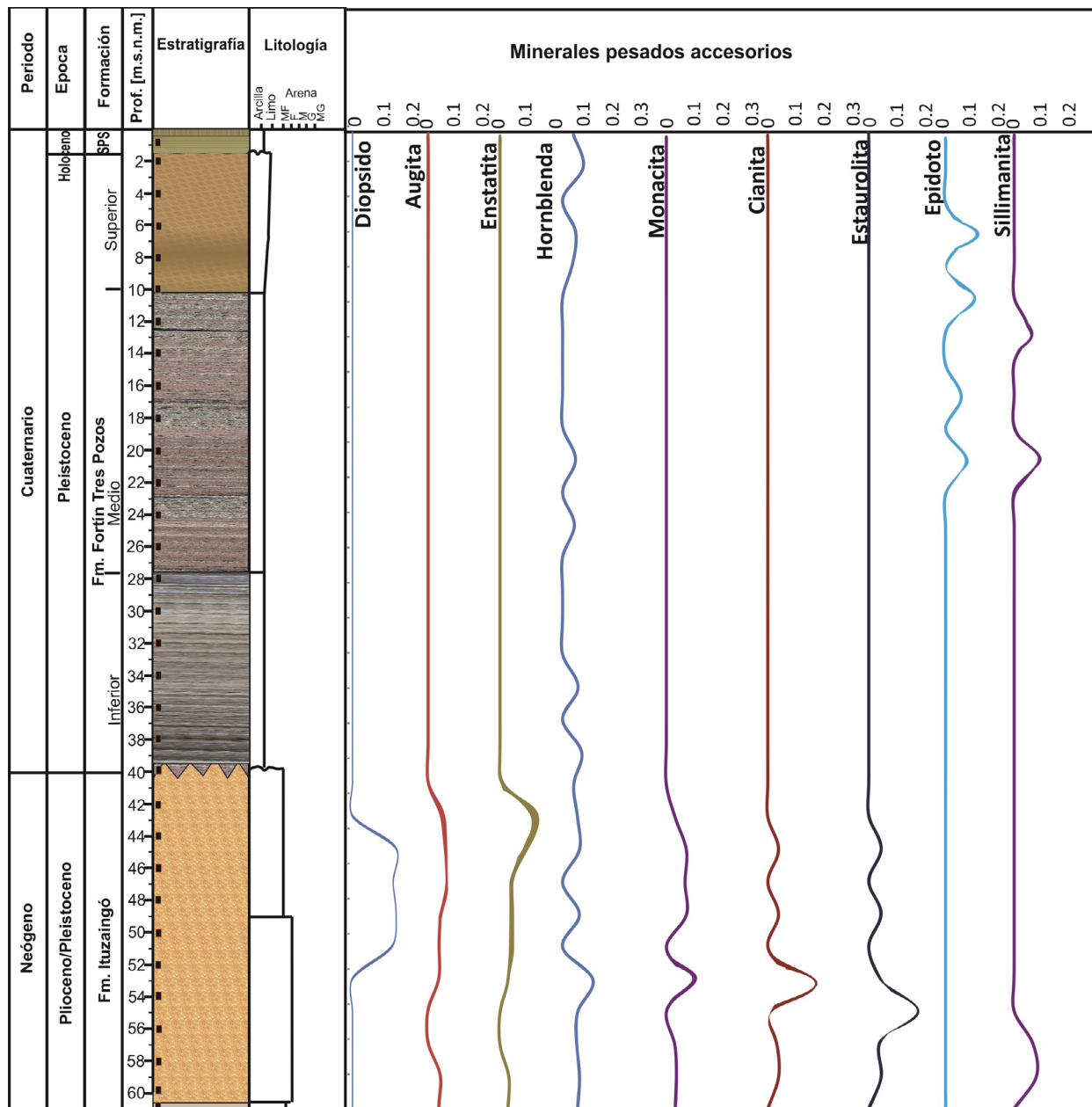


Figura 4. Mineralogía de la fracción pesada de arenas muy finas de la perforación de investigación de Gato Colorado.

dos redondeados, 15 % de cuarzo, 4 % de feldespatos, 2 % de vidrio volcánico, 1 % de micas y 1 % de minerales pesados (olivino, hornblenda, epidoto, augita, enstatita, opacos) (Fig. 4). Corresponden a los Sedimentos Palustres Superficiales, descritos por Iriando (2007) y Thalmeier et al. (2021). Esta unidad se ve afectada por la pedogénesis actual, representada por un suelo hidromórfico del tipo Natracualf.

### Análisis geofísicos de la perforación

El perfilaje múltiple de pozos permite obtener información complementaria sobre algunas características de la columna sedimentaria perforada. Los registros obtenidos están integrados en la figura 2.

El registro de potencial espontáneo (SP) que depende de las fuerzas electrocinéticas y electroquímicas muestra una inflexión hacia la izquierda a partir de los 40 m b.b.p., punto en el que se encuentra el techo de la Formación Ituzaingó identificada previamente mediante los análisis sedimentológicos y mineralógicos, la cual contiene un acuífero semiconfinado cuyas condiciones de semiconfinamiento están dadas por el miembro inferior de la Fm. Fortín Tres pozos. El agua de esta formación posee una salinidad elevada (Thalmeier 2021); la conductividad eléctrica a esa profundidad resultó superior a 60.000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Los registros normales resistivos de corto y largo espaciamiento (0.3 y 1.2 m, respectivamente) permitieron deter-

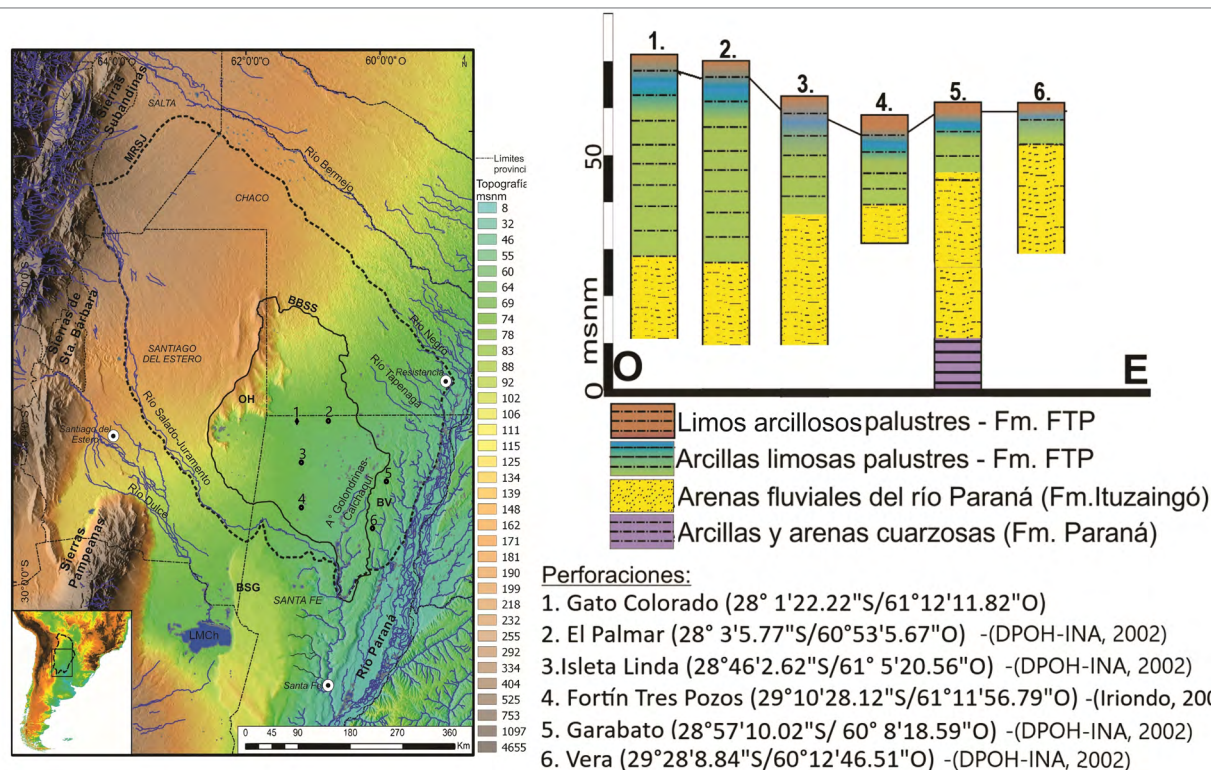
minar la resistividad de las formaciones perforadas, siendo ésta función de la porosidad de los sedimentos y de la salinidad del agua contenida en la misma. Los primeros 32 m del sondeo muestran resistividades medias, relacionadas con los miembros superiores (Medio y Superior) de la Fm. Fortín Tres Pozos. Entre los 32 y 40 m de profundidad se observa una resistividad mayor asociada a una arcilla compacta de esta formación (Miembro Inferior). Luego de los 40 m b.b.p. se observan resistividades bajas, relacionadas con las arenas de la Formación Ituzaingó. El sondeo se interrumpe debido a la alta salinidad que contiene el agua subterránea en esta formación, la cual impide observar una respuesta por la sensibilidad del equipo.

El perfil obtenido a partir del registro de la resistencia del terreno cada 2 m de avance de la perforación, muestra un mayor tiempo de avance en las arcillas plásticas del miembro inferior de la Fm. Fortín Tres Pozos, teniendo un promedio de 10 min/m. El miembro medio y superior de esta formación tienen valores de avance de perforación entre 1 y 3 min/m. La Formación Ituzaingó registró valores menores de 1 min/m.

### Recopilación y correlación de la información hidrogeológica

La ejecución de esta perforación de estudio en condiciones cuidadosamente controladas permite utilizar las descripciones

existentes de otros pozos perforados para provisión de agua. Dichas descripciones normalmente carecen de la caracterización de los sedimentos atravesados por la perforación, sin embargo, son acompañadas por descripciones generales utilizables. Por ende, se aprovecharon eficazmente las descripciones existentes de otros pozos perforados. Estas perforaciones se obtuvieron de la recopilación de información hidrogeológica realizada por el Convenio DPOH-INA (2002), con un total de 24 descripciones de pozos en el área de los Bajos Submeridionales dentro de la provincia de Santa Fe, con profundidades < 30 m, de las cuales, sólo 4 presentan profundidades hasta los 70 m. La interpretación de esos perfiles permite generar correlaciones entre ellos y reconocer los estratos sedimentarios mayores dentro de los Bajos Submeridionales: el estrato limo-arcilloso y arcillo-limoso de la Fm. Fortín Tres Pozos y el estrato infrayacente de la Fm. Ituzaingó (“arenas Puelches”; Herbst 1971, Iriondo 2011). En la figura 5, se observan las correlaciones de las perforaciones para la zona de los Bajos Submeridionales. De esta correlación se deduce que la unidad palustre se extiende regionalmente en gran parte de la sección distal del mega-abanico, lo cual sugiere que la saturación permanente y semi-permanente de la región de los Bajos Submeridionales ha existido por largo tiempo, específicamente en las subunidades geomorfológicas 2a, 2f y 2g.



**Figura 5.** Correlación de algunas perforaciones en los Bajos Submeridionales interpretadas por Thalmeier et al. (2021) con sus respectivas coordenadas y fuentes de información.

## DISCUSIÓN

La región de los Bajos Submeridionales está representada por un perfil lito-estratigráfico conformado por limos-arcillosos y arcillas-limosas de la Formación Fortín Tres Pozos, definida por Iriondo (2007) como la formación cuaternaria tipo de esta región que se extiende, según Thalmeier et al. (2021), en toda la sección distal del mega-abanico fluvial del Salado-Juramento. Esto se corrobora con la perforación realizada en Gato Colorado. La ejecución de esta perforación de investigación permite establecer una correlación con el perfil tipo de la región de los Bajos Submeridionales, obtenido de la perforación de investigación de Fortín Tres Pozos (Iriondo 2007) distante a 125 km al sur.

Iriondo (2007) reconoce además, la presencia de la Fm. Ituzaingó en la región geomorfológica de los Bajos Submeridionales, comprobando su extensión al O en la provincia de Santa Fe mediante la perforación de investigación de Fortín Tres Pozos. A partir de los resultados de la perforación de Gato Colorado, se comprueba la extensión geográfica de la Formación Ituzaingó hacia la zona O y N de los Bajos Submeridionales, a una distancia de 230 km al O de la traza actual del curso principal del río Paraná, y se complementa la información de la extensión de la formación a partir de la perforación de Fortín Tres Pozos.

Los resultados de esta perforación se correlacionan de manera coherente con el modelo estratigráfico propuesto en Thalmeier et al. (2021), donde los autores presentan la estratigrafía sub-superficial del mega-abanico fluvial del Salado-Juramento. Además, Iriondo (2007) y Thalmeier et al. (2021), a partir de la perforación de investigación del centro de los Bajos Submeridionales, determinan un extenso humedal ocupando la región distal del mega-abanico. Sobre la base de correlaciones regionales con otras columnas estratigráficas localizadas en la Llanura Pampeana, las cuales presentan escasos datos geocronológicos, varios autores (e.g. Iriondo y Kröhling 1996, Iriondo 1999, Kröhling e Iriondo 1999, Iriondo 2007, Kröhling y Carignano 2014, Latrubesse et al. 2012, Brunetto et al. 2017, Thalmeier et al. 2021) infirieron que las condiciones climáticas regionales para el Chaco fueron más húmedas durante el MIS (*Marine Isotope Stage*) 3 y más secas para el MIS 2. En este sentido, durante el MIS 3, Iriondo (2007) y Thalmeier et al. (2021) determinaron en la región de estudio, el desarrollo de un extenso humedal ocupando la región de los Bajos Submeridionales, identificado en el Miembro Medio de la Fm. Fortín Tres Pozos (edad OSL de 58 ka. AP; Iriondo 2007, Thalmeier et al. 2021). El cual se reconoce en la perforación de investigación presentada en este trabajo (Fig.

2), y permite comprobar la extensión geográfica del mismo hacia el centro-oeste de los Bajos Submeridionales. Puede considerarse también que el Miembro Superior de la Formación Fortín Tres Pozos, con mayor contenido en limos y  $\text{CaCO}_3$ , se depositó durante el MIS 2 caracterizado por una creciente aridez en las tierras bajas (Iriondo y Kröhling 1996, Iriondo 1999). Por otro lado, se desconocen las edades del Miembro Inferior de la Fm. Fortín Tres Pozos y de la Fm. Ituzaingó perforada en esta región de los Bajos Submeridionales.

## CONCLUSIONES

El análisis detallado de la perforación de investigación realizada en la región de los Bajos Submeridionales en conjunto con los antecedentes de la zona, permitió comprobar la extensión de la unidad palustre de la Formación Fortín Tres Pozos y de las arenas fluviales de la Formación Ituzaingó en el centro-oeste de los Bajos Submeridionales. De este modo, la columna estratigráfica perforada, hasta los 40 m b.b.p. está compuesta por limos-arcillosos y arcillas-limosas palustres de la Formación Fortín Tres Pozos, en la que pueden identificarse el miembro Superior, Medio e Inferior, sobreyaciendo a las arenas fluviales de la Formación Ituzaingó. El techo de estas arenas se encuentra a 40 m b.b.p., a mayor profundidad que el primer estrato arenoso perforado en algunas perforaciones localizadas al sur y al este de Gato Colorado. Sería interesante abordar en futuras investigaciones la migración de los sistemas fluviales con una mirada integral y con nuevos análisis mineralógicos en las secuencias perforadas. La unidad arcillosa del miembro Medio e Inferior de la Formación Fortín Tres Pozos, constituye un acuitardo, otorgando condiciones de semiconfinamiento a las arenas subyacentes de la Formación Ituzaingó, mientras que los limos-arcillosos del Miembro Superior conforman el acuífero libre, aunque de permeabilidad limitada. Las arenas de la Formación Ituzaingó constituyen un acuífero semi-confinado, y presentan características químicas del agua subterránea muy salinas. La construcción de un mapa de la extensión geográfica de esta formación debería ir acompañado del estudio de la composición química de sus aguas. Más allá de los paleocauces actualmente utilizados en la región de los Bajos Submeridionales, los estratos arenosos más permeables de la Formación Ituzaingó constituyen potenciales reservorios explotables de agua. Sin embargo, hasta el momento se desconoce con precisión el límite entre las aguas menos salinizadas localizadas al E y su transición hacia aguas mucho más salinizadas al O localizadas en esos estratos según indican estudios previos.

Se concluye que los resultados de esta perforación cons-

tituyen un gran aporte para el conocimiento de la estratigrafía de los Bajos Submeridionales y un valioso dato que cubre vacíos de información en la extensa región distal del mega-abanico fluvial del Salado-Juramento, que se integra de manera coherente con los análisis previos de la estratigrafía sub-superficial del mega-abanico.

## AGRADECIMIENTOS

La investigación fue financiada dentro del marco del Proyecto PICT-BID 2016 N° 1334 de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica de la Nación. Se agradece a las revisoras Dra. Alicia Folguera y Dra. Gisel Peri por sus valiosos comentarios que permitieron mejorar el manuscrito, como así también la revisión del editor, Dr. Francisco Córdoba.

## REFERENCIAS

- Aceñolaza, F.G. 1976. Consideraciones bioestratigráficas sobre el Terciario marino de Paraná y alrededores. *Acta Geológica Lilloana* 13: 91-108.
- Aceñolaza, F.G. 2004. Paleobiogeografía de la región Mesopotámica. En: Aceñolaza, F.G. (ed.), *Temas de la Biodiversidad del Litoral Fluvial Argentino*, Miscelánea 12: 25-30.
- Aceñolaza, F.G. 2007. Geología y recursos geológicos de la Mesopotamia Argentina. *Serie Correlación Geológica* 22: 1-160.
- Anzótegui, L.M. y Acevedo, T.L. 1995. Revisión de *Ilexpollenites Thiergart* y una nueva especie del Plioceno superior (Formación Ituzaingó) de Corrientes, Argentina. 6° Congreso Argentino de Paleontología y Bioestratigrafía, Actas: 15-21, Trelew.
- Assine, M., Corradini, Pupim, F.N. y McGlue, M. 2014. Channel arrangements and depositional styles in the São Lourenço fluvial megafan, Brazilian Pantanal wetland. *Sedimentary Geology* 301: 172-184.
- Bidegain, J.C. 1993. Primeros análisis paleomagnéticos en sedimentos del Cenozoico tardío en las márgenes del río Paraná. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 48: 247-256.
- Brandoni, D. 2011. The *Megalonychidae* (Xenarthra, Tardigrada) from the late Miocene of Entre Ríos Province, Argentina, with remarks on their systematics and biogeography. *Geobios* 44: 33-44.
- Brea, M. y Zucol, A.F. 2007. *Guadua zuloagae* sp. nov., the first petrified Bamboo Culm record from the Ituzaingó Formation (Pliocene), Paraná Basin, Argentina. *Annals of Botany* 100: 711-724.
- Brunetto, E., Kröhlhling, D., Zalazar, M. y Francisconi, M. 2017. Analysis of the interaction between neotectonic and surface processes in a lowland intracratonic setting of South America. *Quaternary International* 438: 141-159.
- Brunetto, E., Noriega, J.I. y Brandoni, D. 2013. Sedimentología, Estratigrafía y edad de la Formación Ituzaingó en la Provincia de Entre Ríos, Argentina. En: Brandoni, D. y Noriega, J.I. (eds), *El Neógeno de la Mesopotamia Argentina*. Asociación Paleontológica Argentina, Publicación Especial 14: 13-27, Buenos Aires.
- Cafaro, E., Latrubesse, E., Ramonell, C. y Montagnini, M.D. 2009. Channel pattern arrangement along Quaternary fans and mega-fans of the Chaco plain, central South America. En: Vionnet, C., Garcia, M., Latrubesse, E., Perillo, G. (eds.), *RCEM 2009 River Coastal and Estuarine Morphodynamics 1 y 2*, 349-354 p, Amsterdam.
- Cafaro, E., Latrubesse, E. y Ramonell, C. 2010. Estimación de la carga sedimentaria que aportan los Andes y sierras asociadas al Chaco Argentino – Paraguay. XXIV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Actas CD., Punta del Este.
- Carlini, A.A., Scillato-Yané, G.J., Noriega, J.I. y Aceñolaza, F. 2000. Perezosos terrestres (*Xenarthra*, Tardigrada) del "Mesopotamiense" (Fm. Ituzaingó, Mioceno tardío-Plioceno) de la Provincia de Entre Ríos, Argentina. *Studia Geologica Salmanticensia* 36: 13-27.
- Catt, J.A. 1990. Paleopedology manual. *Quaternary International* 6: 1-95.
- Cione, A.L., Azpelicueta, M.M., Bond, M., Carlini, A.A., Casciotta, J.R., Cozzuol, M.A., De la Fuente, M., Gasparini, Z., Goin, F.J., Noriega, J., Scillato-Yané, G.J., Soibelzon, L., Tonni, E.P. y Vucetich, M.G. 2000. Miocene vertebrates from Entre Ríos province, eastern Argentina. En: Aceñolaza, F.G. y Herbst, R. (eds.), *El Neógeno de Argentina*. *Serie Correlación Geológica* 14: 191-237.
- Espinosa Gómez, E.L. 2021. Análisis del comportamiento hidrológico del sistema de llanura Bajos Submeridionales, Argentina. Tesis de Maestría en ingeniería de los recursos hídricos, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral, 157 p., Santa Fe.
- Fertonani, M. y Prendes, H. 1984. Sistemas hidrológicos no típicos. *Congreso del Agua*, Anales 1: 203-207, Olavarría.
- Fuschini Mejía, M. 1994. El agua en las llanuras. Montevideo, UNESCO/ORCYT. Programa Hidrológico Internacional, 58 p., Montevideo.
- Franco, M.J. 2009. Leños fósiles de Anacardiaceae en la Formación Ituzaingó (Plioceno), Toma Vieja, Paraná, Entre Ríos, Argentina. *Ameghiniana* 46: 587-604.
- Franco, M.J., Brea, M., Orfeo, O. y Zucol, A.F. 2013. La paleoflora de la Formación Ituzaingó, Argentina. En: Brandoni, D. y Noriega, J.I. (eds.), *El Neógeno de la Mesopotamia Argentina*. Asociación Paleontológica Argentina, Publicación Especial 14: 41-55, Buenos Aires.
- Frenquelli, J. 1920. Contribución al conocimiento de la geología de Entre Ríos. *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba* 24: 55-256.
- De Alba, E. 1953. Geología del Alto Paraná en relación con los trabajos de derrocamiento entre Ituzaingó y Posadas. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 8: 129-161.
- Gioria, R., Morreri, M.V., Vinzón, E., Lozano, N., Krusse, E. y Vicino, H. 2002. Convenio Consejo Federal de Inversiones Provincia de Santa Fe. Sistema Bajos Submeridionales Subsistema A° Golondrinas – A° Calchaquí – Río Salado. Estudio de verificación del funcionamiento hídrico. 88 p.
- Giraut, M., Laboranti, E., Rey, C., Fioriti, M. y Ludueña, S. 2001. Cuenca

- Propia de los Bajos Submeridionales. Creación de una unidad hídrica independiente. En Seminario Internacional sobre manejo integral de cuencas hidrográficas, 5 p., Rosario.
- Herbst, R. 1971. Esquema Estratigráfico de la Provincia de Corrientes. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 2: 221-243
- Horton, B.K. y DeCelles, P.G. 2001. Modern and ancient fluvial megafans in the foreland basin systems of the central Andes, southern Bolivia: implication for drainage network evolution in fold-thrust belts. *Basin Research*. 13: 43-61.
- INA - Instituto Nacional del Agua. 2002. Recopilación de la información hidrogeológica de la Provincia de Santa Fe. DPOH -Dirección Provincial de Hidráulica (SPAR), Santa Fe.
- Iriondo, M. 1984. The Quaternary of Northeastern Argentina. *Quaternary South American and Antarctic Peninsula*. Balkema 2: 51-78, Rotterdam.
- Iriondo, M. 1987. Geomorfología y Cuaternario de la provincia de Santa Fe. *D'Orbignyana* 4: 1-54.
- Iriondo, M. 1993. Geomorphology and late Quaternary of the Chaco (South America). *Geomorphology* 7: 289-303.
- Iriondo, M. 1997. Models of deposition of loess and loessoids in the upper Quaternary of South America. *Journal of South American Earth Sciences* 10: 71-79.
- Iriondo, M. 1999. Last Glacial Maximum and hypsithermal in the Southern Hemisphere. *Quaternary International*. 62: 11-19.
- Iriondo, M. 2007. El Chaco Santafesino. Neógeno y Geomorfología. Comunicación Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino 13: 1-40.
- Iriondo, M. 2010. Geología del Cuaternario de Argentina. Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino, 437 p., Corrientes.
- Iriondo, M. 2011. Aguas subterráneas y superficiales de la provincia de Santa Fe, Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino, 148 p., Santa Fe.
- Iriondo, M., Colombo, F. y Kröhling, D.M. 2000. El abanico aluvial del Pilcomayo, Chaco (Argentina-Bolivia Paraguay): características y significado sedimentario. *Geogaceta* 28: 79-82.
- Iriondo, M. y Kröhling, D. 1996. Los sedimentos eólicos del noreste de la llanura pampeana (Cuaternario superior). XIII Congreso Geológico Argentino, Actas 4: 27-48.
- Iriondo, M. y Kröhling, D.M. 2007. Non-classical types of loess. *Sedimentary Geology* 202 (3): 352-368.
- Kovacs, G. 1978. Hydrology and water control on large plains. *Hydrological Sciences-Bulletin-des Sciences Hydrologiques*, 23 (3): 305-332.
- Kröhling, D., Costa, C., Carignano, C., Brunetto, E., Piovano, E. y Córdoba, F. 2013. Guía de Campo del Field Training Course and Workshop of the Sam-GeoQuat Group (TERPRO-INQUA) "From the Pampean Ranges to the North Pampa: Tectonic and climatic forcing on the Late Quaternary landscape evolution of Central Argentina", 80 p., Santa Fe.
- Kröhling, D. y Brunetto, E. 2013. Marco Geológico y Geomorfología de la cuenca del Arroyo Cululú, provincia de Santa Fe (Argentina). En: Giayetto, O., Plevich, J., Lallana, V., Pilatti, M. (eds.), Bases Conceptuales y Metodológicas para el Ordenamiento Territorial en el Medio Rural – Región Centro, Argentina. Secretaría de Ciencia, Tecnología e Innovación Productiva de la Nación, 483-512.
- Kröhling, D. y Carignano, C. 2014. La estratigrafía de los depósitos sedimentarios cuaternarios. En: Martino, R. y Guerreschi, A. (eds.), Relatorio del XIX Congreso Geológico Argentino - Geología y Recursos Naturales de la Provincia de Córdoba. Asociación Geológica Argentina, 673-724, Buenos Aires.
- Kröhling, D.M. e Iriondo, M. 1999. Upper Quaternary paleoclimates of the Mar Chiquita Area, North Pampa, Argentina. *Quaternary International* 58: 149-163.
- Kröhling, D. e Iriondo, M. 2003. El loess de la Pampa Norte en el Bloque de San Guillermo. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología* 10(2): 137-150.
- Latrubesse, E.M. 2015. Large rivers, megafans and other Quaternary avulsive fluvial systems: a potential "who's who" in the geological record. *Earth Science Review* 146: 1-30.
- Latrubesse, E.M., Stevaux, J.C., Cremon, E.C., May, J., Tatum, S.H., Hurtado, M.A., Bezada, M. y Argollo, J.B. 2012. Late Quaternary megafans, fans and fluvio-aeolian interactions in the Bolivian Chaco, Tropical South America. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*. 356: 75-88.
- Marchetti, Z.Y., Rodríguez, L., Thalmeier, M.B., Veizaga, E., Espinosa E., Sosa, D., Heredia, J. y Díaz, L.E. 2019. Bajos Submeridionales: un complejo de paisajes, más allá de los clásicos Espartillares. VII Jornadas y IV Congreso Argentino de Ecología de Paisajes. IV Foro Regional Ecovalle, Actas: 73, Cipolletti.
- Marengo, H.G. 2006. Micropaleontología y estratigrafía del Mioceno marino de la Argentina: Las transgresiones de Laguna Paiva y del "Entreterriense-Paranense". Tesis Doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédito), 124 p., Buenos Aires.
- McGlue, M.M., Smith, P.H., Zani, H., Silva, A., Carrapa, B., Cohen, A.S. y Pepper, M.B. 2016. An Integrated Sedimentary Systems Analysis of the Río Bermejo (Argentina): Megafan Character in the Overfilled Southern Chaco Foreland Basin. *Journal of Sedimentary Research* 86: 1359-1377.
- Moore, D.M. y Reynolds, R.C. 1997. X-ray Diffraction and Identification and Analysis of Clay Minerals. Oxford University Press, 379 p., New York.
- Pascual, R. y Odreman Rivas, O. 1971. Evolución de las comunidades de vertebrados del Terciario argentino. Los aspectos paleozoogeográficos y paleoclimáticos relacionados. *Ameghiniana* 8: 372-412.
- Pascual, R. y Odreman Rivas, O. 1973. Las unidades estratigráficas del Terciario portadoras de mamíferos. Su distribución y sus relaciones con los acontecimientos diastróficos. 5° Congreso Geológico Argentino, Actas 3: 293-338, Carlos Paz.
- Peri, V.G. 2012. Caracterización morfoestructural de las Lomadas de Otumpa (Gran Chaco, Santiago del Estero y Chaco): influencias en el

- control del drenaje: Buenos Aires, Argentina. Tesis doctoral, Universidad de Buenos Aires (inédito), 321 p., Buenos Aires.
- Peri, V.G. y Rossello, E.A. 2010. Anomalías morfoestructurales del drenaje del río Salado sobre las Lomadas de Otumpa (Santiago del Estero y Chaco) detectadas por procesamiento digital. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 66(4): 636-648.
- Pupim, F., Assine, M.L. y Sawakuchi, A.O. 2017. Late Quaternary Cuiabá megafan, Brazilian Pantanal: channel patterns and paleoenvironmental changes. *Quaternary International* 438 A: 108-125.
- Rodríguez, L., Heredia, J., Veizaga, E. y Thalmeier, M.B. 2021. Isotopic and chemical assessment of surface water and groundwater in the Bajos Submeridionales Basin, Chaco Austral. 47th IAH Congress, São Paulo.
- Thalmeier, M.B. 2021. Modelo hidrogeológico conceptual y numérico del flujo subterráneo de la región de los Bajos Submeridionales, planicie distal del mega-abanico fluvial del Salado-Juramento, Chaco Argentino. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de Córdoba (inédito), 316 p., Córdoba.
- Thalmeier, M.B., Kröhling, D., Brunetto, E. e Iriondo, M. 2019. Morpho-stratigraphic characteristics and Late Quaternary environmental evolution of the Salado–Juramento fluvial megafan, Chaco Plain, Argentina. 20th Congress of the International Union for Quaternary Research (INQUA), Dublin.
- Thalmeier, M.B., Kröhling, D. y Brunetto, E. 2021. The geomorphology and Late Quaternary sedimentary record of the Salado/Juramento fluvial megafan, Central Andes foreland basin (Chaco Plain, Argentina). *Geomorphology* 373: 107495.
- Thalmeier, M.B., Rodríguez, L., Heredia, J., Sosa, D., Veizaga, E., Díaz, E. y Moreno, L. 2018. Patrones de flujo regionales del Gran Chaco Argentino: región de los Bajos Submeridionales. XIV Congreso Latinoamericano de Hidrogeología, Salta.
- Thien, S. 1979. A flow diagram for teaching texture-by-feel analysis. *Journal of Agronomic Education* 8: 54-55.
- Tucker, M. 1988. *Techniques in Sedimentology*. Blackwell Science Ltd., 408 p., Oxford.
- Vanlesberg, S. y Kröhling, D. 2010. Geomorfología y tendencia en índices climáticos. Su aplicación a la llanura chaco-pampeana. I Congreso Internacional de Hidrología de Llanuras, Actas: 8 p., Azul.
- Veizaga, E., Rodríguez, L., Heredia, J., Thalmeier, M.B., Sosa, D., Moreno, L. y Díaz, E. 2019. Caracterización hidroquímica regional de las aguas de los Bajos Submeridionales, Gran Chaco, Argentina. V Reunión Argentina de Geoquímica de la Superficie, Actas: 30-33, La Plata.
- Volante, J., Mosciaroa, M.J., Gavier-Pizarro, G.I. y Parueloc, J.M. 2016. Agricultural expansion in the Semiarid Chaco: Poorly selective contagious advance. *Land Use Policy* 55: 154-165.
- Wentworth, C.K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal of Geology* 30: 377-392.
- Zani, H., Rossetti, D.F., Cohen, M.L.C., Pessenda, L.C.R. y Cremon, E.H. 2012. Influence of landscape evolution on the distribution of floristic patterns in Northern Amazonia revealed by  $\delta^{13}C$  data. *Journal of Quaternary Science* 27: 854-864.