



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE LA PLATA

Trabajo Final de la Licenciatura en Geología
de la Facultad de Ciencias Naturales y Museo
Universidad Nacional de La Plata, Argentina.

**Particularidades hidrodinámicas del agua subterránea en
un sector de la planicie costera del río de La Plata. Período
2017-2019.**

Julián Aranguren

Director: Lic. Patricia Laurencena

Co-director: Lic. María Soledad Ruíz

2023

Resumen

La planicie costera del Río de la Plata medio constituye una franja de aproximadamente 6 a 10 km de ancho, que se extiende de forma paralela a lo largo de la costa. Esta unidad geomorfológica estrecha e irregular de rumbo noroeste-sureste se encuentra ubicada en el litoral de los partidos de Berisso, Ensenada y La Plata, provincia de Buenos Aires. Está limitada al sur por la llanura interior y al norte por la porción subáctea del delta del Paraná.

Los diversos usos del suelo y la explotación del agua subterránea en esta zona han tenido un impacto significativo en el comportamiento hidrodinámico natural de este sistema. Por esta razón, es necesario un estudio integral del manejo de los recursos hídricos subterráneos de la región. Es fundamental contribuir al control y monitoreo de las aguas subterráneas para asegurar la conservación y sostenibilidad del recurso.

El presente trabajo se centra en un análisis detallado de la caracterización climática, hidrodinámica e hidroquímica de la planicie costera durante el período 2017-2019. El objetivo de este estudio es analizar las variaciones en los niveles subterráneos y la interrelación hidráulica entre los acuíferos Postpampeano, Pampeano y Puelche. Para llevar a cabo esta investigación, se elaboró una base de datos que incluye los registros climáticos de temperatura y precipitaciones proporcionados por la FCAG. Además, se realizaron seguimientos mensuales de los niveles y anuales de los analitos de cada uno de los pozos seleccionados.

A partir de los datos facilitados, se confeccionaron gráficos de precipitación y temperatura media mensual. También, se elaboró un balance hídrico para el período de 1909 a 2019 y otro balance de tipo seriado para el lapso entre 2017 y 2019. Utilizando la información obtenida de los pozos, se crearon gráficos donde se representaron los valores de cota de agua de cada uno de los acuíferos y se elaboraron mapas potenciométricos con el objetivo de analizar la hidrodinámica. Con los valores de los analitos se elaboró un diagrama de Piper con el propósito de caracterizar la composición química de cada uno de los acuíferos.

Los resultados obtenidos muestran que: 1) El intervalo estudiado corresponde a un período húmedo, caracterizado por excesos en todos los años. 2) En los grupos de pozos cercanos al litoral y al límite con la llanura interior, el Puelche presenta valores de carga hidráulica inferiores a los otros acuíferos, mientras que, en la zona del polo petroquímico, los tres acuíferos se encuentran al mismo nivel. 3) La dirección predominante del flujo de agua subterránea para cada acuífero es hacia el noreste. 4) El agua del acuífero Postpampeano y del Puelche se clasifica como clorurada y/o sulfatada sódica, mientras que el agua del acuífero Pampeano es de tipo bicarbonatada sódica.

Abstract

The coastal plain of the middle Río de la Plata constitutes a strip approximately 6 to 10 km wide, extending parallel along the coast. This narrow and irregular geomorphological unit with a northwest-southeast trend is located on the coast of the districts of Berisso, Ensenada, and La Plata, Buenos Aires province. It is bordered to the south by the interior plain and to the north by the subaqueous portion of the Paraná Delta.

The diverse land uses and exploitation of groundwater in this area have had a significant impact on the natural hydrodynamic behavior of this system. For this reason, a comprehensive study of the management of underground water resources in the region is necessary. It is essential to contribute to the control and monitoring of groundwater to ensure the conservation and sustainability of the resource.

This study focuses on a detailed analysis of the climatic, hydrodynamic, and hydrochemical characterization of the coastal plain during the period 2017-2019. The objective of this study is to analyze variations in groundwater levels and the hydraulic interrelation among the Postpampeano, Pampeano, and Puelche aquifers. To carry out this research, a database was compiled, which includes climatic records of temperature and precipitation provided by the FCAG. In addition, monthly monitoring of the levels and annual monitoring of the analytes of each of the selected wells were carried out.

Based on the provided data, precipitation and monthly average temperature graphs were created. Furthermore, a water balance was established for the period from 1909 to 2019, and another serial balance was constructed for the period between 2017 and 2019. Using information obtained from the wells, graphs were generated to represent the water level values for each of the aquifers, and potentiometric maps were developed to analyze the hydrodynamics. Simultaneously, with the analyte values, a Piper diagram was constructed to characterize the chemical composition of each of the aquifers.

The results obtained indicate that: 1) The studied interval corresponds to a wet period, characterized by excesses in all years. 2) In the groups of wells near the coast and at the boundary with the inland plain, the Puelche aquifer presents lower hydraulic head values compared to the other aquifers, while in the petrochemical industrial zone, all three aquifers are at the same level. 3) The predominant direction of groundwater flow for each aquifer is northeastward. 4) Water from the Postpampeano and Puelche aquifers is classified as chloride and/or sulfate-sodium type, while water from the Pampeano aquifer is of the bicarbonate-sodium type.

Índice

| | |
|--|----|
| 1. Introducción..... | 1 |
| 2. Ubicación del área de estudio y consideraciones generales | 3 |
| 3. Materiales y métodos | 5 |
| 3.1. Recopilación de antecedentes | 5 |
| 3.2. Recopilación de datos | 5 |
| 3.3. Elaboración de una base de datos | 7 |
| 4. Marco geológico | 9 |
| 5. Geomorfología | 14 |
| 5.1. Planicie costera | 15 |
| 5.2. Escalón | 15 |
| 5.3. Llanura interior | 16 |
| 6. Hidrogeología | 17 |
| 7. Resultados..... | 20 |
| 7.1. Caracterización climática | 20 |
| 7.2. Hidrodinámica | 23 |
| 7.3. Hidroquímica | 32 |
| 8. Conclusiones..... | 34 |
| 9. Bibliografía..... | 36 |
| 10. Anexos..... | 39 |

1. Introducción

Las áreas costeras sustentan a gran parte de la población mundial y se estima que en la actualidad el 80% de ella vive a menos de 100 km de la costa. Dentro de los ambientes litorales, las planicies costeras son uno de los entornos geohidrológicos más complejos donde la dinámica y química del agua superficial y subterránea dependen de la influencia mareal, la geología, la geomorfología y, en aquellas con desarrollo poblacional, también de las actividades antrópicas (Melo, 2019).

La planicie costera del Río de la Plata es una franja de aproximadamente 6 a 10 km de ancho, que se extiende de forma paralela a lo largo de la costa. Esta área de baja topografía se desarrolla en el litoral noreste y este de la provincia de Buenos Aires (Figura 1). Su límite sur está determinado por la llanura interior, mientras que al norte se encuentra delimitada por la porción subárea del delta del Paraná (Cavallotto, 2002). Al igual que otras regiones llanas de clima húmedo a subhúmedo, la planicie costera, tiene un funcionamiento hidrogeológico particular ya que presenta una morfología de escasa pendiente, por lo que puede considerarse como un escenario hidrológico no típico (Usunoff et al., 1999). Las suaves pendientes generan límites hidrológicos difusos o inexistentes, por lo tanto, pequeños cambios en la morfología condicionan en gran medida los flujos de agua.

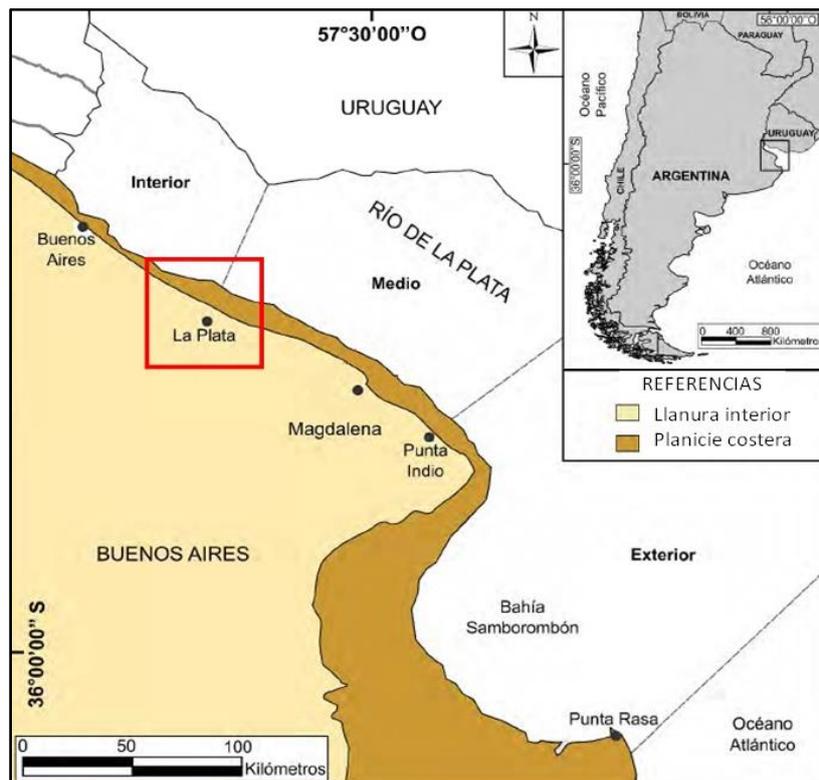


Figura 1. Mapa geomorfológico del noreste de la provincia de Buenos Aires. El recuadro rojo indica la ubicación del área de estudio. Modificado de Melo (2019),

En la región del gran la Plata, la extracción y el consumo del agua subterránea se lleva a cabo fundamentalmente a través del acuífero Puelche, mientras que el acuífero Pampeano se utiliza para riego, ganado y uso doméstico debido a su menor productividad y mayor vulnerabilidad frente a eventos de superficie (Auge, 2005). Estudios realizados en los sectores de la planicie costera adyacentes a la Ciudad Autónoma de Buenos Aires, el Conurbano y La Plata revelaron que tanto los diversos usos del suelo como la explotación del agua subterránea han tenido un impacto significativo en el comportamiento hidrodinámico natural de este sistema. De igual manera, áreas menos pobladas de la planicie también evidencian alteraciones en el comportamiento hidrológico natural, principalmente debido a la actividad minera no sustentable y el desarrollo de obras de ingeniería, como canalizaciones, rutas y terraplenes (Melo, 2019). Por esta razón, es necesario un estudio integral del manejo de los recursos hídricos subterráneos de la región. En este sentido, es fundamental contribuir al control y monitoreo de las aguas subterráneas para asegurar la conservación y sostenibilidad del recurso. En base a esto, el objetivo principal del presente trabajo es estudiar las variaciones de niveles subterráneos, y la interrelación hidráulica de los acuíferos Postpampeano, Pampeano y Puelche para el período 2017-2019, en un sector de la planicie costera ubicado al noreste de la Ciudad de La Plata.

2. Ubicación del área de estudio y consideraciones generales

El área de estudio se ubica en el litoral de los partidos de Berisso, Ensenada y La Plata, provincia de Buenos Aires, y comprende el sector de la planicie costera del Río de La Plata medio (Figura 2).

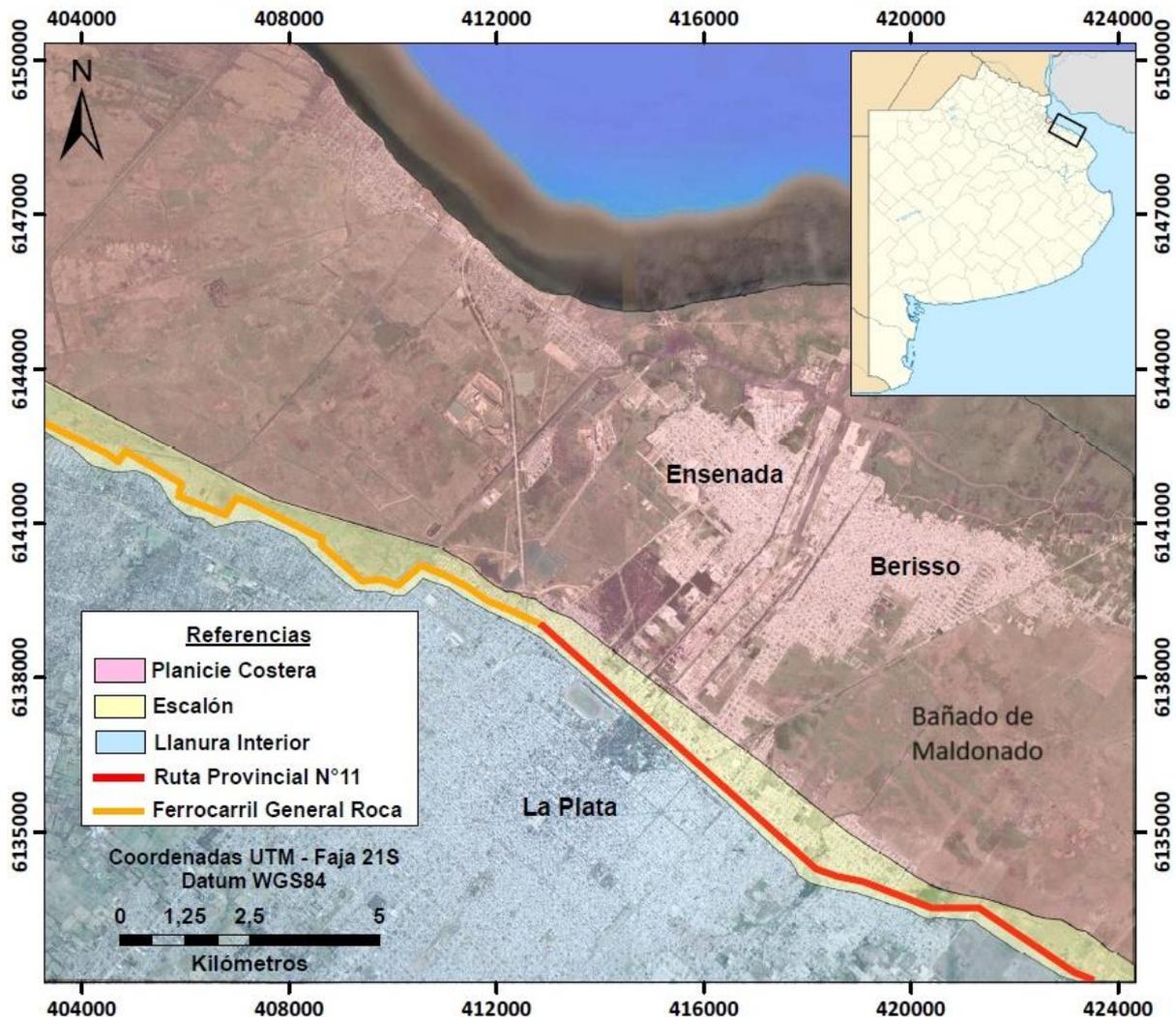


Figura 2. Mapa de ubicación y geomorfológico del área de estudio. Llanura interior, escalón y planicie costera del Río de La Plata medio.

La planicie constituye una unidad geomorfológica estrecha e irregular de rumbo noroeste-sureste. Fue depositada producto de los eventos transgresivos-regresivos que tuvieron lugar durante el Holoceno y, en la actualidad, forma parte de las cuencas inferiores de numerosos arroyos y ríos que drenan hacia el Río de la Plata (Cellone, 2019). Es un área de baja topografía adyacente a la costa que se desarrolla en el litoral noreste y este de la provincia de Buenos Aires. Esta condición topográfica hace que presente suelos mal drenados, como los del Bañado Maldonado, el cual, junto con el Río de la Plata conforman el área de descarga superficial y

subterránea de la llanura interior (García y Zanandrea, 2017). A su vez, además de la topografía, otro de los condicionantes que favorecen el anegamiento en la región es la existencia de cordones costeros de arena y de conchilla dispuestos paralelamente a la línea de la ribera, estos actúan como barreras para los fluvios (Auge, 2005).

La planicie se encuentra limitada al sur por la llanura interior y al norte por la porción subárea del delta del Paraná. La llanura interior es una extensa superficie que se desarrolla en cotas superiores a 5 m y muestra un incremento hacia el sur, alcanzando valores máximos de 35 m antes de descender hacia el Río Salado. Constituye un rasgo topográfico relictos desarrollado durante el pleistoceno y modelado por los procesos de gradación (Cavallotto, 2002). Se caracteriza por sus suelos bien drenados, siendo el proceso hidrogeológico dominante la infiltración; esto es de suma importancia ya que favorece la recarga de los acuíferos Pampeano y Puelche, que es donde se concentran la mayoría de los pozos de explotación (García y Zanandrea, 2017). Su límite con la planicie costera se manifiesta mediante un escalón o cambio de pendiente que se desarrolla desde el sureste hasta la altura de Ensenada, a lo largo de la ruta provincial N° 11, y desde la altura de Ensenada hasta el noroeste, a lo largo de las vías del ferrocarril General Roca (Ramal Constitución-La Plata). Por otro lado, la plataforma deltaica subárea es la extensión del delta del Paraná dentro del ámbito del Río de la Plata propiamente dicho; sus depósitos ocupan casi todo su lecho en correspondencia con los ambientes fluvial y estuárico (Cavallotto, 2002).

3. Materiales y métodos

3.1. Recopilación de antecedentes

Se recopiló información proveniente de publicaciones e informes relacionados con las características geológicas, hidrogeológicas y geomorfológicas de la región. Se dispuso de información existente en la cátedra de hidrología general de la FCNyM y de registros hidrodinámicos, hidroquímicos y climáticos proporcionados por la FCAG. Complementariamente se recurrió a otras fuentes adicionales, como el repositorio institucional de la UNLP (SEDICI) y el motor de búsqueda académica (Google Scholar).

3.2. Recopilación de datos

El área de estudio cuenta con pozos que interceptan tres acuíferos (Postpampeano, Pampeano y Puelche), en los cuales se realizaron mediciones de la profundidad del nivel de agua con frecuencia mensual y determinación analítica en laboratorio con frecuencia anual.

Se dispuso de mediciones mensuales de niveles durante 3 años (2017-2019) con el fin de registrar la variación temporal del nivel de agua subterránea en los tres acuíferos. La base de datos inicial constaba de 49 pozos, sobre los que se realizó una preselección considerando cuestiones tales como ubicación y/o continuidad temporal en el registro de niveles. Del total de pozos disponibles, se seleccionaron 21, los cuales pueden dividirse en 9 grupos denominados J1 a J9. Se trata de pozos en cluster, es decir, pozos adyacentes que intersectan distintos acuíferos. La ubicación de estos grupos se muestra en la Figura 3.

De los grupos mencionados, tres (J4, J5 y J6) interceptan a los tres acuíferos, tres (J1, J2 y J3) al postpampeano y al puelche, y tres (J7, J8 y J9) al pampeano y al puelche. Cabe destacar que, de estos 9 grupos, 6 de ellos se encuentran dentro de la planicie costera (J1 a J6), mientras que los otros 3 se encuentran en el límite con el escalón y la llanura interior (J7 a J9).

A su vez, se dispone de parámetros analíticos antecedentes con frecuencia anual en octubre de 2017, noviembre de 2018 y octubre de 2019. Los resultados se compararon con el fin de analizar posibles variaciones y establecer diferencias significativas en la naturaleza y en las características geoquímicas de los acuíferos. Las muestras seleccionadas, incluyen determinaciones de pH, conductividad, sólidos totales disueltos (STD), iones mayoritarios (sodio, potasio, calcio, magnesio, bicarbonato, sulfato, cloruro) y nitratos.

El pH y la conductividad fueron determinados por electrometría, mientras que los STD se determinaron por gravimetría. Bicarbonato (HCO_3^-), calcio (Ca^{+2}), magnesio (Mg^{+2}) y cloruro (Cl^-) fueron cuantificados por métodos volumétricos. Sodio (Na^+) y potasio (K^+) fueron determinados por fotometría de llama y por espectroscopía de absorción atómica. Mientras que los sulfatos (SO_4^{-2}) y los nitratos (NO_3^-) fueron estimados por turbidimetría y por

espectrofotometría UV respectivamente. En la Tabla 1 del Anexo A se presenta en detalle tanto la técnica de análisis como el método empleado para determinar cada parámetro físico-químico y las concentraciones de los analitos.

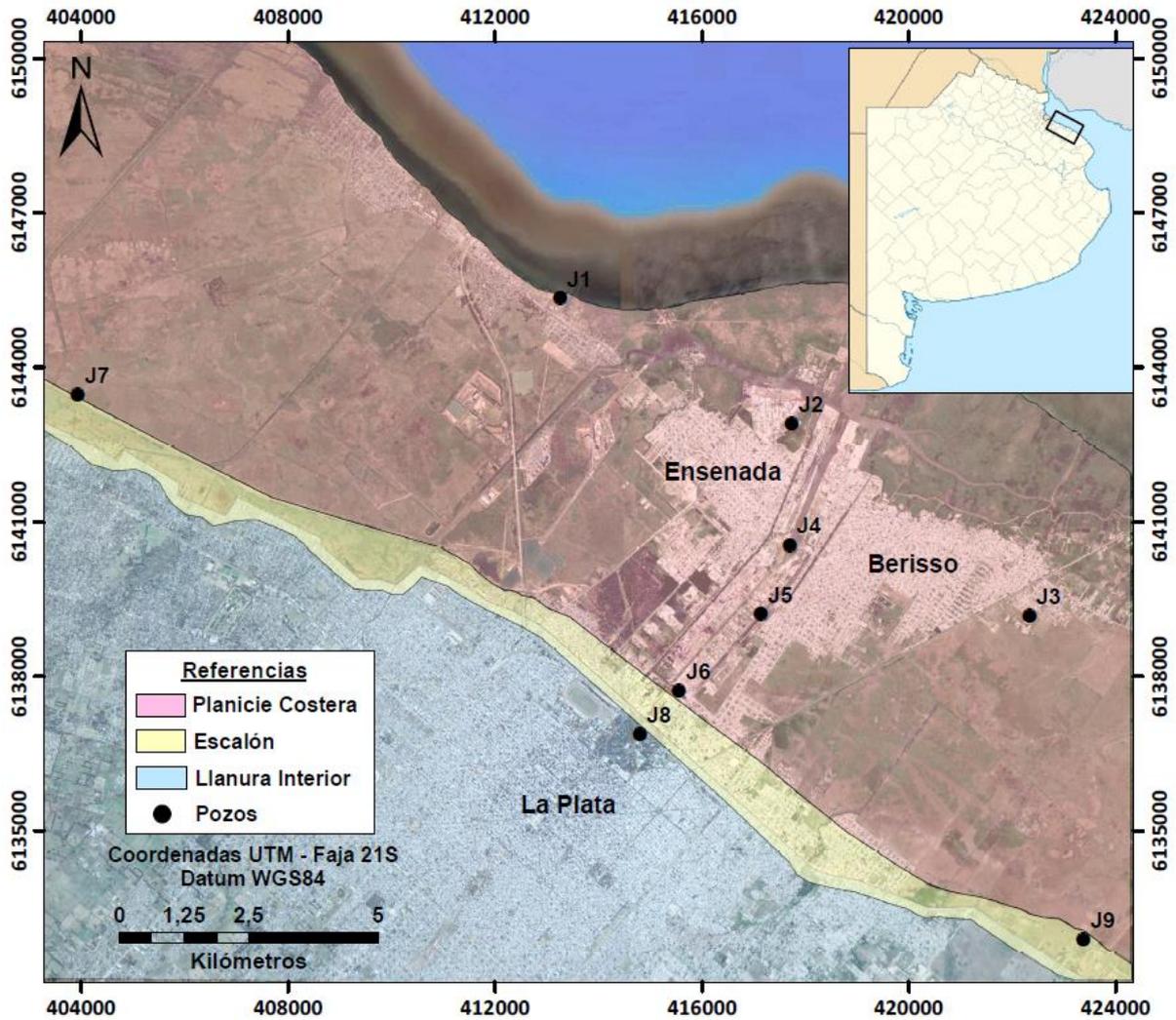


Figura 3. Mapa geomorfológico del Río de La Plata medio junto con los pozos seleccionados.

Para la caracterización climática se emplearon los datos de la Estación Climatológica La Plata-Observatorio Astronómico, dado que cuenta con el mayor registro continuado de precipitación y temperatura (1909 al presente). La estación se ubica en el bosque, en el ejido urbano, a 34° 55' de latitud sur y 57° 56' de longitud oeste y a cota 15 m. La reducida extensión del ámbito estudiado en relación a su carácter llano, permite extrapolar los registros de la estación climatológica de La Plata, al resto de la ciudad y alrededores. Los datos recopilados se utilizaron para realizar una breve caracterización climática de la región y para analizar las variaciones en las precipitaciones a lo largo del tiempo.

3.3. Elaboración de una base de datos

Después de llevar a cabo la lectura de la bibliografía antecedente, se seleccionaron los datos relevantes. Una vez completada esta etapa, se sistematizó la información de interés en una base de datos utilizando la herramienta informática Excel 2010.

Se elaboró una planilla asociada al apartado hidrogeológico, donde se consignaron campos como: cota del terreno (msnm), altura del brocal (m), cota de boca de pozo (msnm), valores mensuales de profundidad de agua (mbbp) y de cota de agua (msnm), valores de precipitación diaria (mm), nombre de pozo y acuífero que intercepta. Inicialmente, se ubicaron los pozos espacialmente mediante Google Earth y luego se extrapolaron al ArcGis. En base a los valores de cota de boca de pozo y profundidad de agua se estimaron los valores de cota de agua para cada pozo. A partir de los datos recopilados, por un lado, se generaron gráficos que permitieron analizar las variaciones temporales de los niveles de agua de cada acuífero en los distintos grupos de pozos. Y, por otro lado, en base a los datos volcados en el ArcGis se trazaron las curvas equipotenciales, que permitieron elaborar un mapa potenciométrico para cada acuífero. Se generó una planilla asociada al apartado de caracterización climática, donde se consignaron campos como: precipitación anual (mm), precipitación media mensual (mm), temperatura media anual (°C) y temperatura media mensual (°C). Estos datos se utilizaron para generar gráficos que permiten caracterizar el clima de la zona de estudio desde 1909 hasta la actualidad. Complementariamente brindan una perspectiva de las precipitaciones durante el período de estudio (2017-2019) en relación a la precipitación media mensual establecida.

Para completar el análisis climático de la zona de estudio, se llevaron a cabo dos balances hídricos: uno para el período 1909-2019 y otro para el período 2017-2019. Para el cálculo de la evapotranspiración potencial se utilizó la formulación de Thornthwaite (1948). Por otro lado, para evaluar la reserva de agua del suelo se consideraron parámetros texturales para determinar el punto de marchitez permanente y la capacidad de campo, y por lo tanto el agua útil en el suelo. Se tomaron las características texturales de los sedimentos de los horizontes superficiales y en función de estas se adoptó un valor de almacenaje de 100 mm. Una vez obtenidos los valores de evapotranspiración potencial y fijado el valor de almacenaje, se llevaron a cabo los dos balances hídricos, siendo el del período 2017-2019 un balance seriado.

En relación a la hidroquímica se elaboró una planilla vinculada con la información de laboratorio de cada uno de los pozos, donde se consignaron campos como: técnica de análisis, unidades, analitos (pH, conductividad, TSD, bicarbonatos, sulfatos, cloruros, nitratos, sodio, potasio, calcio y magnesio) y nombre de pozo. Los analitos fueron interpretados mediante el

programa Easy Quim con el fin de obtener un Diagrama de Piper que evidencie la composición química de los tres acuíferos.

Complementariamente se llevó a cabo una salida de campo junto a las directoras de la tesina y personal de la FCAG. El propósito de la misma fue verificar la altura de los brocales de cada pozo, la metodología de adquisición de los datos de profundidad de agua y adquirir registros fotográficos de cada pozo.

4. Marco geológico

Resulta necesario contar con un estudio geológico previo sobre la estratigrafía y los ambientes sedimentarios, ya que estos condicionan el comportamiento del agua subterránea. A fin de caracterizar a escala regional el área de estudio, se describirá a continuación la estructuración de la cuenca sedimentaria del Salado y su evolución.

El área de estudio se enmarca en el extremo norte de la Cuenca del Salado, la cual forma parte de la Llanura Chaco Pampeana (Figura 4).

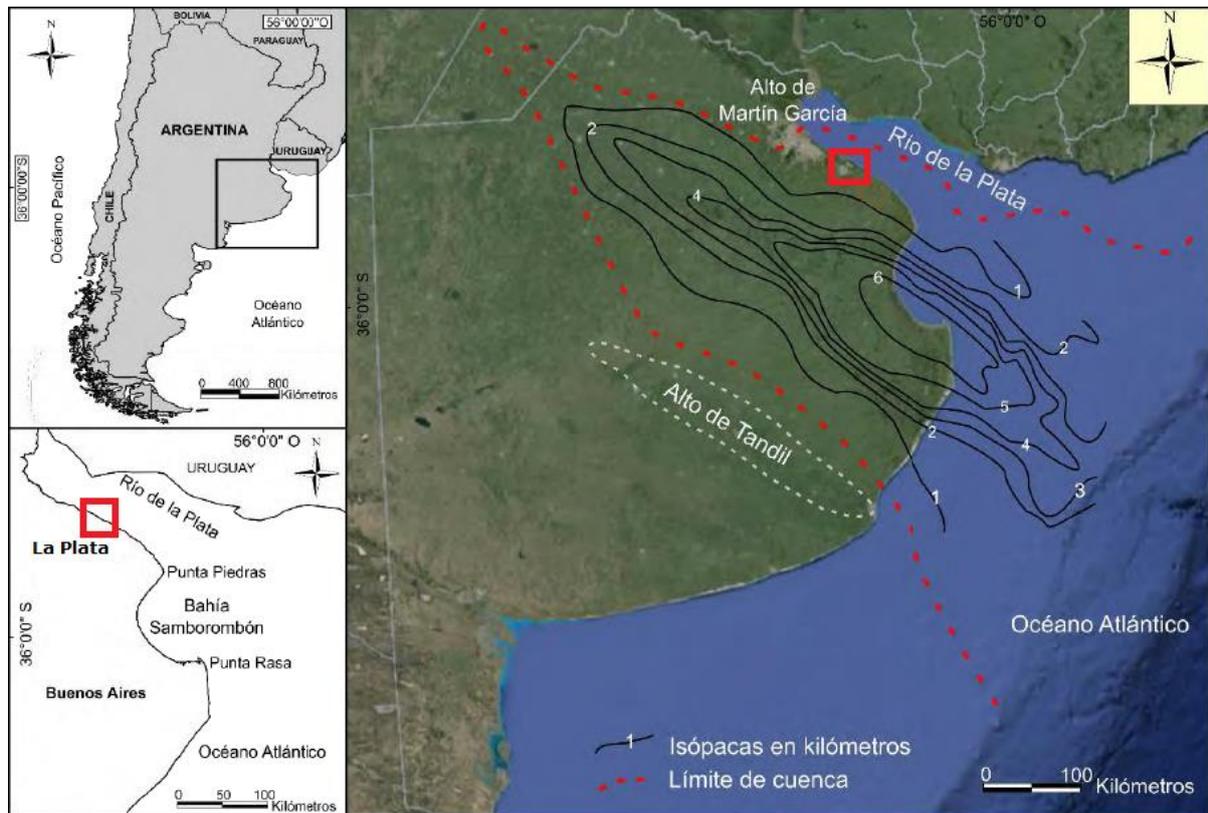


Figura 4. Mapa regional de la Cuenca del Salado. Se muestran las isópacas y el límite de la cuenca, así como los altos estructurales con rocas de basamento paleoproterozoico (altos de Martín García y Tandil). El recuadro rojo corresponde al área de estudio. Modificado de Melo (2019).

La cuenca exhibe una geometría elongada en dirección noroeste-sureste. El extremo noroeste se ubica en el centro norte de la provincia de Buenos Aires, mientras que el extremo sureste intercepta en forma transversal el margen continental atlántico. Los límites noreste y suroeste corresponden respectivamente a los altos de Martín García y Tandil (Yrigoyen, 1975).

Su origen está vinculado con el fracturamiento de Gondwana y la apertura del océano atlántico en el jurásico tardío-cretácico temprano (Bracaccini 1980, Tavella y Wright 1996). La evolución tectono-sedimentaria de la Cuenca del Salado se caracteriza por cuatro estadios o

fases distintivas de: pre-rift, rift, sag y margen pasivo (Yrigoyen, 1999; Tavella, 2005). Cavallotto y Violante (2005) afirmaron que “a lo largo de esta evolución se fue borrando la impronta de las primitivas etapas evolutivas de manera que en la configuración geomorfológica actual quedan registradas prácticamente con exclusividad las correspondientes al Cuaternario”. Estas etapas fueron el resultado de la respuesta local a cambios climáticos de carácter regional y global que se manifestaron a través de la ocurrencia de transgresiones y regresiones marinas que afectaron a todos los sectores de la Cuenca del Salado, incluido el río (Cavallotto y Violante, 2005).

A fin de caracterizar con mayor detalle el área de estudio, a continuación, se presenta una breve reseña de su estratigrafía (Figura 5).

El basamento está representado por dos unidades que consisten por un lado en rocas metamórficas precámbricas intruidas por granitos de la misma edad, y por otro en metasedimentitas del neoproterozoico al paleozoico inferior (Cellone, 2019). Durante el jurásico tardío a cretácico temprano se vio afectado por esfuerzos extensionales producto del estadio de rift, esto produjo fallas con rumbo noroeste-sureste, que generaron el espacio de acomodación donde se depositó el primer relleno de la Cuenca del Salado (Melo, 2019). Se ubica aproximadamente a unos 350 m de profundidad en Buenos Aires y aflora en la Isla Martín García, en la costa uruguaya y cerca de las Sierras de Tandil (Auge et al., 2002).

Durante el estadio de margen pasivo se depositaron secuencias sedimentarias continentales y marinas de disposición transgresiva-regresiva que abarcan desde el eoceno al holoceno y se describen a continuación.

Entre el eoceno y el mioceno inferior, durante un estadio regresivo, se depositaron sedimentos continentales con participación eólica y fluvial, agrupados dentro de la Formación Olivos (Groeber, 1945). Esta unidad, subyace a la anterior mediante un contacto discordante erosivo (Auge et al., 2002) y está integrada por arcilitas, limolitas y areniscas de color pardo rojizo a amarillentas. La secuencia posee un espesor máximo de unos 800 m en el centro de la cuenca (Cellone, 2019), allí se apoya en las unidades del paleógeno, cretácico y probablemente paleozoico (Bracaccini, 1972). Mientras que, en el margen noreste de la Cuenca del Salado (zona de estudio) se apoya directamente sobre el basamento cristalino (Melo, 2019).

En discordancia erosiva sobre la Formación Olivos se dispone la Formación Paraná (Auge, 2005). Esta fue depositada por un nuevo estadio transgresivo llevado a cabo durante el mioceno tardío, conocido como “Mar Paranaense”. Está principalmente constituida por arcilitas gris verdosas a oscuras algo calcáreas, con abundantes fósiles marinos que se intercalan con

areniscas finas a muy gruesas (Yrigoyen, 1975). Su espesor aumenta hacia la Cuenca del Salado y la Bahía Samborombón (Hernández et al, 1975).

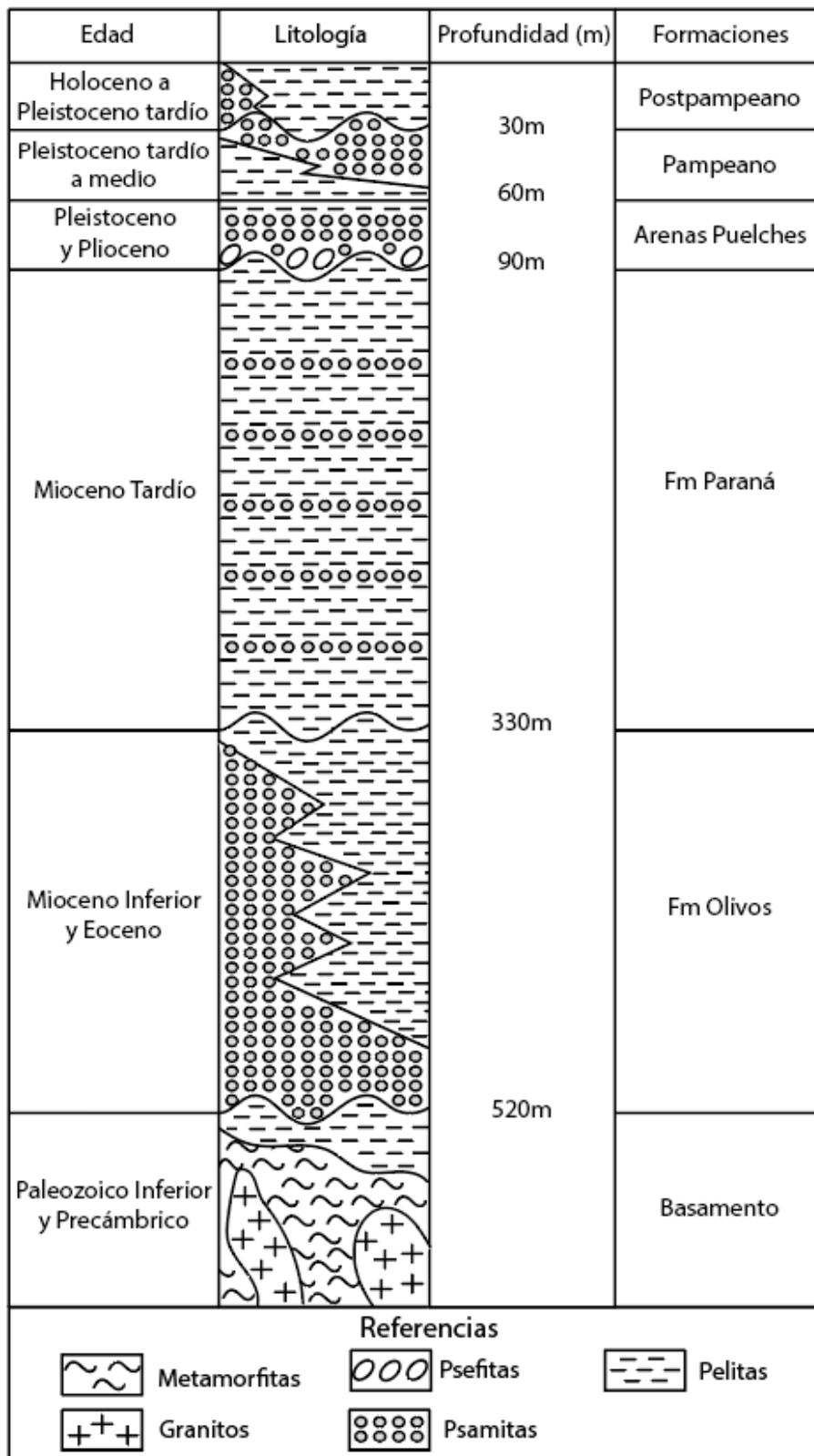


Figura 5. Esquema estratigráfico de la Cuenca del Salado en la Ciudad de La Plata y alrededores. Modificado de Yrigoyen (1975).

En el plioceno-pleistoceno se depositó en discordancia erosiva sobre las arcillas de la Formación Paraná, la Formación Puelches o Arenas Puelches, esta se trata de una secuencia de arenas cuarzosas sueltas, medianas y finas, blanquecinas y amarillentas (Auge, 2005). La secuencia sedimentaria es en general granodecreciente, con extremos de grava en el sector inferior y arena muy fina a limosa en el pasaje a la arcilla que constituye su techo (Cellone, 2019). Algunos autores sostienen que la Formación Puelches tiene su origen por el retiro del Mar Paranense, generando de esta manera condiciones apropiadas para la formación de un gran sistema fluvial sobre los depósitos dejados por este mar (Santa Cruz et al, 1997).

Estas arenas ocupan en forma continua unos 92.000 km² en el subsuelo del noreste de la provincia de Buenos Aires, y se extienden también hacia el norte en Entre Ríos y hacia el noroeste en Santa Fe y Córdoba (Auge et al, 2002). El espesor de la formación es variable, con una media de 34 m, y máximos de 60 m al sur del Río Salado (Cellone, 2019). En la zona estudiada el techo del puelche se ubica entre 20 y más de 50 m de profundidad, y su espesor varía entre algo menos de 20 y algo más de 30 m (Auge, 2005).

Por sobre las Arenas Puelches se apoya una unidad que se extiende más allá de los límites de la Cuenca del Salado, abarcando gran parte de la llanura chaco-pampeana. Estos depósitos, pertenecientes al pleistoceno medio a tardío y de origen continental, han sido agrupados bajo los términos Pampeano o Sedimentos Pampeanos. Esta unidad está formada por sedimentos limo arenosos de origen eólico (loess) y fluvial, con abundante plagioclasa, vidrio volcánico y CaCO₃ (Auge, 2005). Se emplaza por debajo del postpampeano en la planicie costera y subyace a la cubierta edáfica en la llanura alta. El espesor del pampeano está controlado por los desniveles topográficos y por la posición del techo de las Arenas Puelches, variando entre extremos de 50 m en la llanura alta y 0 m en la costa del Río de la Plata, donde fue totalmente erosionado (Auge, 2005).

Los depósitos más recientes corresponden a los Sedimentos Postpampeanos, estos comprenden tanto a depósitos marinos como continentales que van del pleistoceno tardío al holoceno. Los primeros fueron depositados a partir de las transgresiones del cuaternario y se expresan morfológicamente como planicies costeras a lo largo del litoral del Río de La Plata y el litoral marino adyacente. Por otro lado, los segundos, corresponden a depósitos fluviales y eólicos (Zárate, 2005). Esta unidad está formada por arcillas y limos arcillosos-arenosos, y se encuentra acumulada en áreas topográficamente deprimidas (Auge, 2005). Su espesor varía desde pocos centímetros en la llanura alta hasta aproximadamente 25 m en la ribera del Río de La Plata (Auge, 1990).

A continuación, se presenta en la Figura 6 un esquema general del perfil geológico del área de estudio que muestra las unidades estratigráficas más relevantes en términos hidrogeológicos.

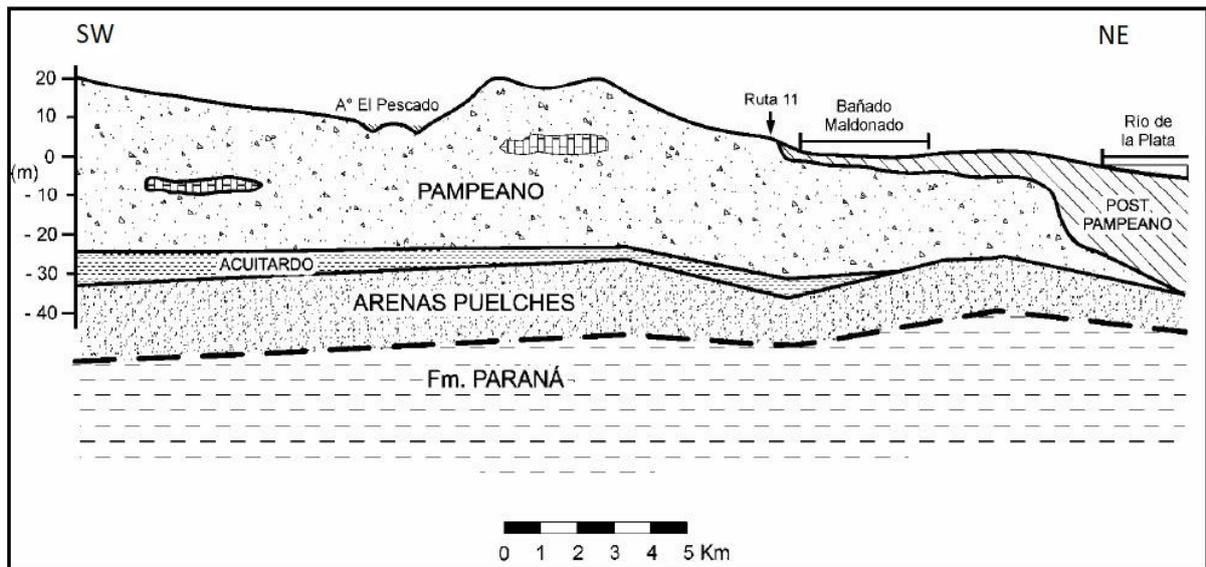


Figura 6. Perfil geológico de las unidades más superficiales a lo largo de una traza que atraviesa la llanura alta y la planicie costera hasta el Río de La Plata. Modificado de Auge (2005).

5. Geomorfología

La provincia de Buenos Aires ha sido subdividida en diferentes regiones, considerando sus características geomorfológicas, hidrológicas, edáficas y vegetales. El área de estudio se encuentra ubicada dentro de la denominada Pampa Ondulada (Figura 7). Esta región se extiende en dirección noroeste-sureste y está delimitada al norte por el Río Carcarañá, al noreste por el Río Paraná y el Río de la Plata, y al sur por el Río Samborombón.

Se trata de una llanura loésica que se caracteriza por la presencia de un relieve suavemente ondulado con una pendiente regional, en general, menor al 2%. El modelado de dicho paisaje con sucesión de áreas de interfluvios y valles, en general planos, es consecuencia del desarrollo de una red de drenaje bien definida conformada por arroyos, cañadas y ríos orientados en dirección suroeste-noreste (Melo, 2019).

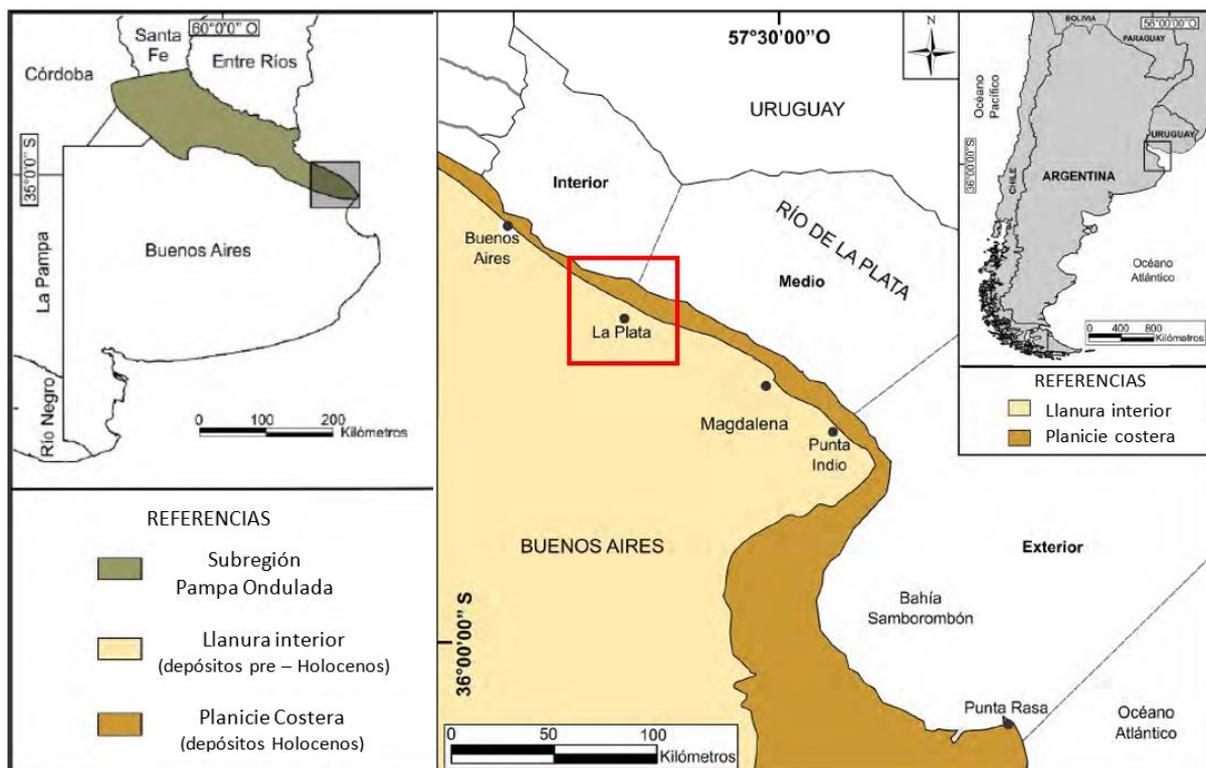


Figura 7. Ubicación de la Pampa Ondulada y mapa geomorfológico del noreste de la provincia de Buenos Aires. El recuadro rojo corresponde al área de estudio. Modificado de Melo (2019).

Dentro de la pampa ondulada Frenguelli (1950) reconoció dos unidades de paisaje diferentes, las cuales denominó llanura alta y llanura baja. En el presente estudio, focalizado en la planicie costera del Río de La Plata, se ha optado diferenciar dos componentes morfológicos principales (planicie costera y llanura alta) y otro de menor relevancia que ensambla a los anteriores

(escalón). Cabe destacar que la llanura interior y la planicie costera, son equivalentes a la llanura alta y la llanura baja mencionadas anteriormente por Frenguelli.

5.1. Planicie costera

La planicie costera es una franja de aproximadamente 6 a 10 km que se extiende de forma paralela a lo largo de la costa del Río de La Plata. Se encuentra limitada al sur por la llanura interior y al norte por la porción subáctea del delta del Paraná (Cavallotto, 2002).

Tiene una extensión aproximada de 320 km² y se extiende entre la cota de 5 m y el nivel del mar, lo que deriva en gradientes topográficos muy bajos, de entre 0,5 y 0,8 m/km (Auge, 2005).

La planicie costera se caracteriza por ser una zona prácticamente sin relieve, casi llana. Esta condición topográfica limita significativamente el flujo superficial, dificultando la llegada natural de las aguas provenientes de la llanura interior hasta el nivel de base regional constituido por el Río de la Plata (Auge, 2005). Cerca del litoral, se observan sectores inundables de entre 1,5 y 3 km de ancho dispuestos en forma paralela a la línea de costa. Estas áreas son propensas a la formación de bañados, como el Bañado de Maldonado. A su vez, los arroyos en esta región tienden a tener cursos poco definidos, lo que resulta en un diseño de drenaje anárquico en la mayoría de los casos (Fidalgo y Martínez, 1983).

Las condiciones topográficas y la cercanía con el litoral “dan lugar a la formación de un ambiente mal drenado, de tipo cenagoso, con agua subterránea aflorante o a muy poca profundidad (generalmente a menos de 1 m), donde predomina notoriamente la dinámica vertical sobre la lateral, lo que hace que funcione como el principal ámbito de descarga subterránea natural de la región” (Auge, 2005, p. 6). Por ello, para que las aguas superficiales lleguen al Río de la Plata, generalmente es necesario efectuar canalizaciones.

Desde el punto de vista estratigráfico, cabe destacar que en la planicie costera dominan superficialmente los sedimentos postpampeanos (Auge, 2005).

5.2. Escalón

El escalón es una forma erosiva labrada en los sedimentos pampeanos y representa la antigua línea de ribera que limitó la ingesión del Mar Querandino. Éste conforma el ámbito de ensamble entre la llanura interior y la planicie costera, y se desarrolla aproximadamente entre las isohipsas de 5 y 10 m, manifestándose con mayor claridad entre la ciudad de La Plata y el extremo noroeste de la región estudiada. Su extensión lateral es variable, en La Plata registra entre 300 y 500 m de ancho, amplitud que mantiene hacia el noroeste. Arealmente ocupa aproximadamente unos 50 km² (Auge, 2005).

5.3. Llanura interior

La llanura interior es una superficie suavemente ondulada que se desarrolla entre cotas de 5 y 35 m, estos valores incrementan hacia el sur hasta alcanzar su máximo y luego descienden hacia el Río Salado (Cavallotto, 2002).

La calle 122 y la Ruta Provincial N° 11 establecen aproximadamente el límite con la planicie costera, aunque sobre cotas algo mayores a los 5 m. Por otro lado, el límite sur está integrado por la divisoria principal que corre en dirección este-oeste (Fidalgo y Martínez, 1983).

La llanura se desarrolla en una superficie aproximada de 700 km² y se dispone en una faja rectangular orientada en dirección noroeste-sureste. En el sector noroeste, las cotas oscilan entre los 10 y 30 m, mientras que en el sector sureste se sitúan entre 7,5 y 23 m (Auge, 2005). Presenta suaves ondulaciones originadas por la erosión fluvial, tiene una pendiente topográfica dominante hacia el noreste (Auge, 2005), y constituye un rasgo topográfico relictos desarrollado durante el pleistoceno y modelado por los procesos de gradación (Cavallotto, 2002). A diferencia de la planicie costera, dentro de la llanura interior se desarrollan una serie de arroyos bien definidos que conforman un conjunto de cuencas de drenaje regularmente integradas (Fidalgo y Martínez, 1983).

Desde el punto de vista estratigráfico cabe destacar que, por debajo del suelo de la llanura interior, se disponen los sedimentos pampeanos. Producto de las condiciones morfológicas y geológicas que la caracterizan es que domina la infiltración o la recarga, particularmente en las divisorias de aguas superficiales, que son las formas de menor pendiente topográfica (Auge, 2005).

6. Hidrogeología

Las zonas costeras asociadas a estuarios se caracterizan por tener un sistema hidrológico con una fuerte interacción entre las aguas subterráneas y superficiales. Particularmente en los ambientes de planicies costeras, la dinámica del agua subterránea es compleja debido a que los aportes de agua pueden provenir de diferentes fuentes, como la inundación causada por el flujo de las mareas, las precipitaciones o incluso las áreas continentales adyacentes (Santucci, 2020). La configuración del sistema de aguas subterráneas de la planicie costera del Río de La Plata medio responde al esquema clásico propuesto para el noreste bonaerense (EASNE, 1972). Para el presente análisis, adquieren mayor importancia las unidades superiores de la secuencia sedimentaria del subsuelo, que incluyen a las Arenas Puelches, los Sedimentos Pampeanos y los Sedimentos Postpampeanos (Kruse et al, 2003).

A fin de comprender con mayor detalle la dinámica del agua subterránea, a continuación, se hará una breve reseña del comportamiento hidrogeológico de cada una de las unidades presentes en el área de estudio.

El basamento constituye una base impermeable debido a la falta de porosidad primaria de las rocas cristalinas que lo conforman. Sin embargo, puede transmitir cantidades reducidas de agua a través de diaclasas, esquistosidad y/o fracturas (Auge, 2005).

La Formación Olivos también actúa como un acuífudo en su sección superior, ya que en ella domina la fracción arcillosa. En cambio, en la sección inferior, se comporta como un acuífero de media a baja productividad debido al predominio de la fracción arenosa (Auge, 2005). Este comportamiento también se observa en la Formación Paraná.

Por otro lado, el Puelche constituye el acuífero más importante de la región por su calidad y productividad. Todos los pozos de agua potable de La Plata y alrededores extraen agua de este acuífero, que también se utiliza para riego e industria.

La trascendencia del acuífero Pampeano radica en su papel como vía para la recarga y la descarga del acuífero Puelche subyacente, así como en la transferencia de sustancias contaminantes generadas principalmente por actividades domésticas y agrícolas, como los nitratos. La sección superior del pampeano contiene a la capa freática, mientras que su base está formada por un limo arcilloso de unos 6 m de espesor de apreciable continuidad areal y de comportamiento acuitardo que lo separa del Puelche, otorgándole a este último un comportamiento de acuífero semiconfinado. Se lo considerara como un acuífero de mediana productividad (Auge, 2005); libre en la sección superior y semilibre en la inferior (Auge et al., 2002).

Por último, el Postpampeano se compone principalmente de depósitos pelíticos que suelen estar localmente cubiertos por sedimentos arenosos y conchiles, que forman los cordones costeros. Los sedimentos pelíticos actúan como acuicludos o acuitardos, y generalmente se asocian con aguas de elevada salinidad. Por otro lado, los sedimentos conchilíferos conforman acuíferos de baja salinidad debido a su elevada porosidad y conductividad hidráulica, lo que favorece la infiltración del agua de lluvia y del agua proveniente de las crecidas del Río de La Plata. Es por esta razón que los sedimentos postpampeanos son de gran importancia hidrogeológica. Aunque estos acuíferos son de dimensiones reducidas (lentiformes) y almacenan volúmenes relativamente pequeños, constituyen las únicas fuentes de agua potable para consumo humano y ganado en la planicie costera (Auge, 2005).

Para Sala y Auge (1973) “las características hidrogeológicas reconocidas permiten establecer la existencia de un único sistema hídrico subterráneo siendo posible considerar que el agua en las unidades Postpampeano, Pampeano y Puelche presentan una continuidad hidráulica, a pesar de que existen diferencias verticales de permeabilidad”.

La comunicación entre los acuíferos Pampeano y Puelche, se lleva a cabo a través del acuitardo. Este permite que el Puelche se recargue por filtración vertical descendente, en aquellos sitios donde el Pampeano presenta mayor potencial hidráulico (divisorias subterráneas), o se descargue por filtración vertical ascendente, donde presenta menor potencial hidráulico que el Puelche (zonas de descarga). Dicha relación se esquematiza en la Figura 8.

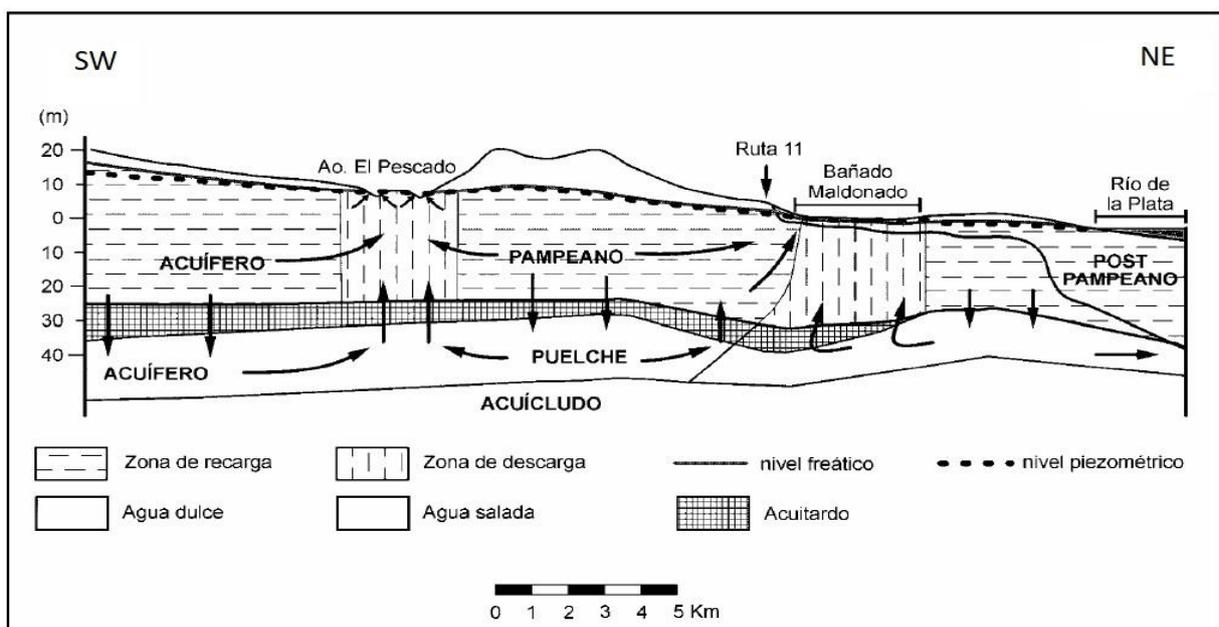


Figura 8. Perfil hidrogeológico. Sección transversal ubicada desde llanura interior hasta planicie costera. Modificado de Auge (2005).

En definitiva, esta intercomunicación vertical entre el Pampeano y el Puelche resulta en potenciales hidráulicos muy similares entre ambos acuíferos (Auge, 2005).

7. Resultados

7.1. Caracterización climática

La precipitación y la temperatura son las variables que ejercen mayor influencia en las características climáticas de una región, y por ello, son las más utilizadas en las clasificaciones climáticas. En ámbitos de llanura como el estudiado, la precipitación muestra una variabilidad temporal mucho más pronunciada que la temperatura, por lo tanto, es necesario disponer de series prolongadas para lograr una caracterización del clima sobre la base de valores medios. En este apartado, inicialmente se llevará a cabo un análisis de las condiciones climáticas en el área durante el período comprendido entre 1909 y 2019. Este estudio a lo largo del último siglo nos permitirá establecer una perspectiva sobre las condiciones climáticas de la región, lo cual es fundamental para contrastar posteriormente con las condiciones observadas durante el período de estudio (2017-2019).

Para el período 1909-2019, el valor de precipitación anual promedio registrado por la Estación Climatológica La Plata-Observatorio Astronómico fue de 1.051 mm. Durante este lapso de tiempo, se observaron variaciones significativas, con máximos de 1.772 mm alcanzados en el año 1963 y mínimos de 417 mm en el año 1916. Se puede observar que las precipitaciones en el período considerado muestran una tendencia levemente positiva (1,8226), mientras que las medias móviles a 5 y 10 años dan cuenta de la alternancia entre períodos secos y períodos húmedos (Figura 9.1).

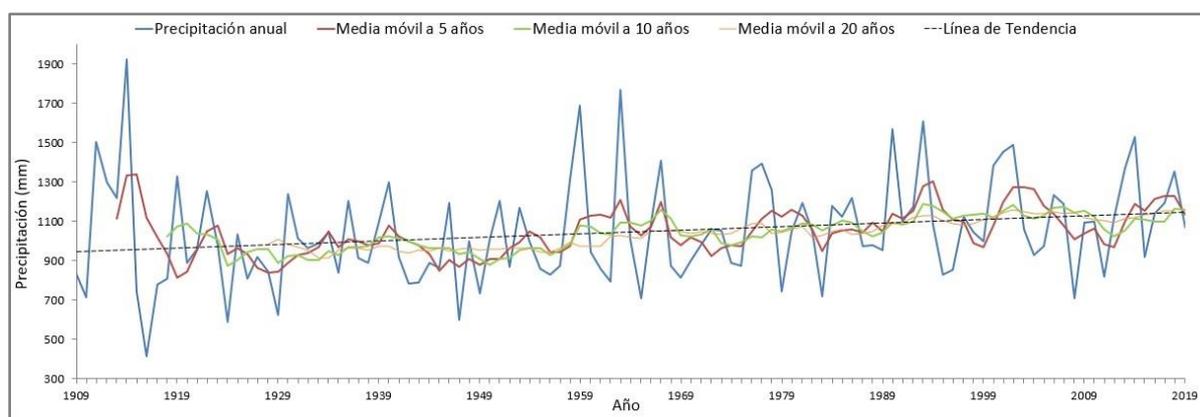


Figura 9.1. Precipitaciones anuales para el período 1909-2019 con sus respectivas medias móviles a 5, 10 y 20 años y la línea de tendencia de la serie.

Adicionalmente, se obtuvieron las frecuencias absolutas de las lluvias con el fin de caracterizar el régimen pluvial. Para ello, se utilizaron los valores mensuales de las precipitaciones de cada uno de los años estudiados. Los datos se agruparon en 26 clases con intervalos de 10 mm de

amplitud y con un rango desde 0 mm hasta más de 250 mm (Figura 9.2). Las clases con una mayor probabilidad de ocurrencia son [30-40], [50-60] y [70-80]. Por el contrario, las clases [0-10], [240-250] y [220-230] presentan la menor probabilidad de ocurrencia.

La temperatura media anual tiene un valor de 16,3 °C. Las máximas temperaturas se presentan en enero, con una temperatura promedio de 22,9 °C, mientras que las mínimas se registran en el mes de julio, con una media de 9,9 °C.

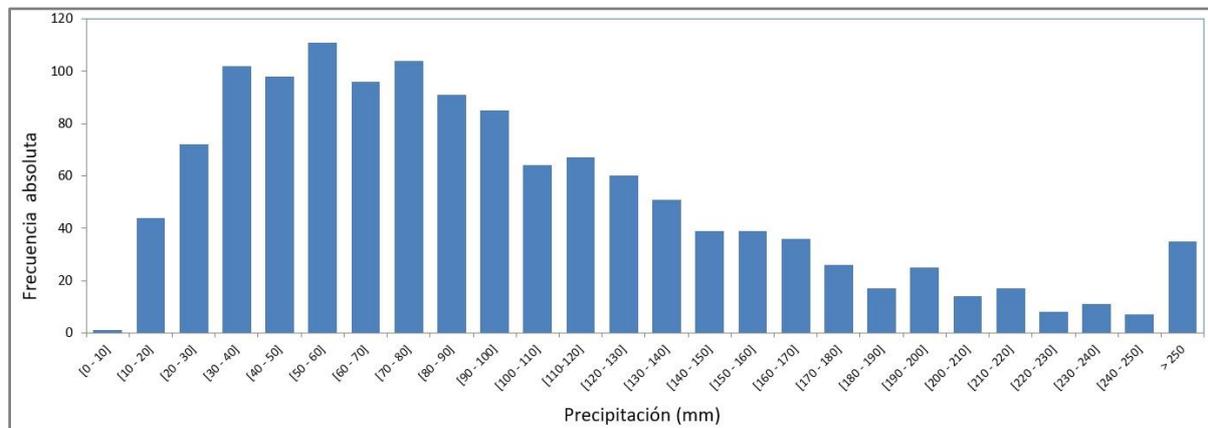


Figura 9.2. Frecuencias absolutas para las precipitaciones mensuales del período 1909-2019.

Se llevó a cabo un balance hídrico mensual en base al promedio de las temperaturas y precipitaciones medias mensuales. Este análisis arrojó una precipitación anual promedio de 1.051 mm/año, una evapotranspiración potencial anual de 792 mm/año y una evapotranspiración real anual de 792 mm/año. Los excedentes totalizan 259 mm anuales y están concentrados entre los meses de abril y noviembre.

Para el período 2017-2019, las precipitaciones medias mensuales se distribuyen de manera relativamente uniforme a lo largo del año con un leve aumento en los meses de verano-otoño y un descenso en los meses de invierno-primavera (Figura 9.3). En promedio el mes más lluvioso es mayo con un total de 147,8 mm y el menos lluvioso es junio con 38,9 mm. Los valores de precipitación media mensual para el período analizado se ajustan a los valores medios del intervalo 1909-2019, las mayores diferencias se registran a fines del otoño (mayo y junio), durante el invierno (julio y septiembre) y en el mes de diciembre.

Los valores de precipitación anual y las medias móviles de la Figura 9.1, nos indican que el intervalo 2017-2019 corresponde a un período húmedo.

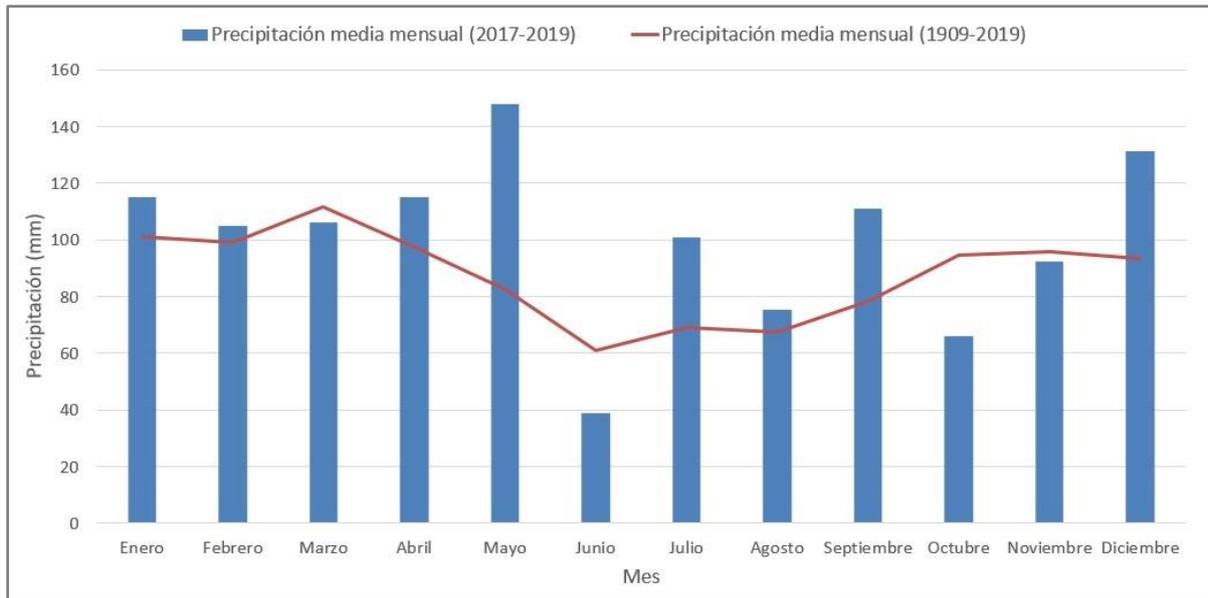


Figura 9.3. Precipitación media mensual para el período 2017-2019 y precipitación media mensual para el período 1909-2019.

La temperatura para el período 2017-2019 exhibe una media de 16,7 °C. Las máximas temperaturas ocurren en enero con una temperatura promedio de 23,4 °C y las mínimas se registran en el mes de julio, con una media de 10,27 °C (Figura 9.4).

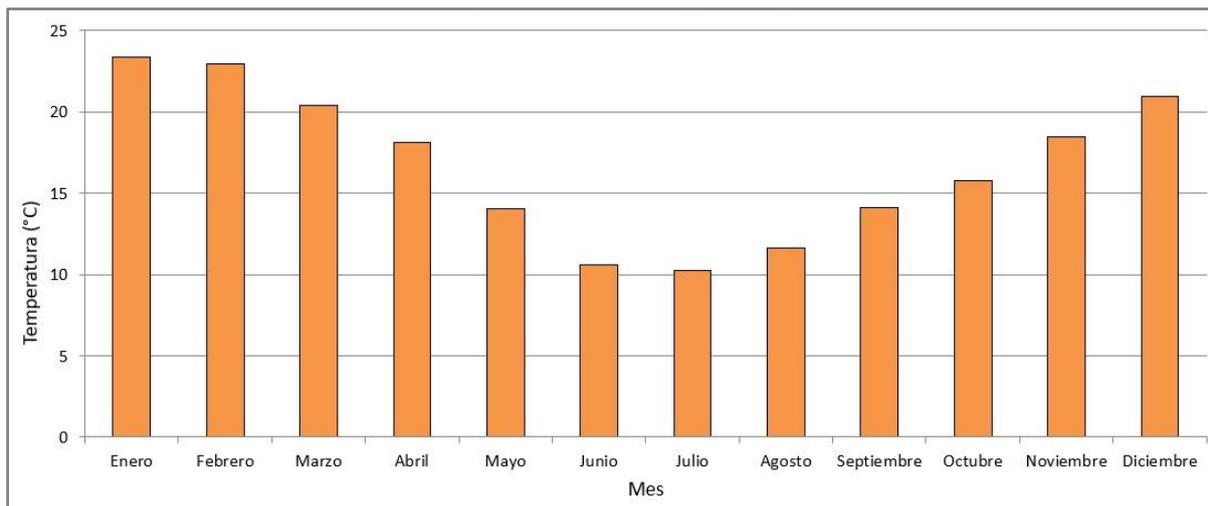


Figura 9.4. Temperatura media mensual para el período 2017-2019.

Se realizó un balance hídrico mensual seriado para el período 2017-2019. La precipitación anual promedio del período es ligeramente mayor que el valor medio, alcanzando 1.205 mm/año. Los años más lluviosos son 2017 y 2018 con valores de 1.192 mm y 1.356 mm respectivamente. La evapotranspiración potencial y la evapotranspiración real mantienen valores muy cercanos al balance anterior, con un promedio anual de 809 mm y 790 mm. Por

otra parte, los excedentes son significativamente mayores, alcanzando un valor medio de aproximadamente 413 mm/año y concentrándose principalmente entre los meses de abril y noviembre. Los años 2017 y 2018 registran los mayores excedentes, con valores de 411 mm y 541 mm.

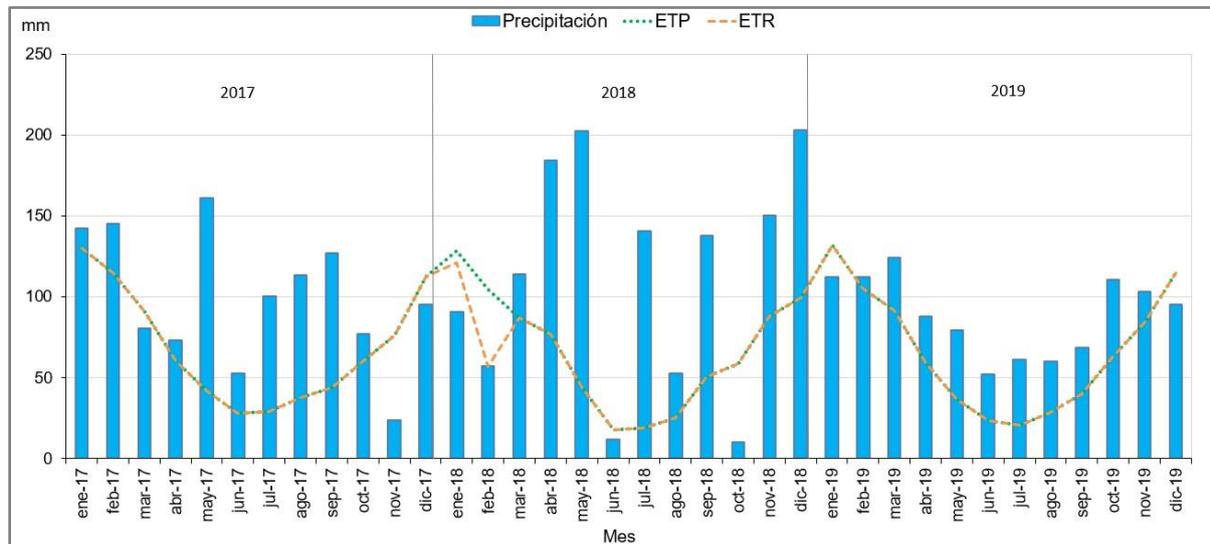


Figura 9.5. Balance hídrico seriado del período 2017-2019.

Los meses con déficit hídrico son escasos y corresponden al verano 2017-2018. En general a lo largo de todo el período, la evapotranspiración real compenso la evapotranspiración potencial (Figura 9.5).

7.2. Hidrodinámica

En los ambientes de llanura, las suaves pendientes topográficas reducen la velocidad y cantidad del escurrimiento superficial a nivel regional, resultando este proceso de poca relevancia en términos generales. Esto implica que el agua permanece en contacto con la superficie del terreno durante más tiempo, lo que favorece la infiltración y la evapotranspiración. Por lo tanto, se destaca la importancia de los procesos de movimiento vertical y las variaciones en la capacidad de almacenamiento. La escasa pendiente resalta también la influencia reguladora de los almacenamientos superficiales y subterráneos.

Con el fin de analizar las variaciones temporales de los niveles de agua de los distintos acuíferos en cada grupo de pozos, se elaboraron gráficos que representan los valores de cota de agua y de precipitación diaria (Figuras 10.1-10.9).

Cabe destacar que los grupos de pozos J1 a J6 están ubicados en el interior de la planicie costera, mientras que los pozos J7, J8 y J9 se encuentran en los límites de la misma.

Los grupos de pozos del J1 al J3 cortan los acuíferos Postpampeano y Puelche (Figuras 10.1, 10.2 y 10.3). En todos los casos la carga hidráulica del Postpampeano es positiva respecto a la del Puelche. En el grupo J1, se observa una diferencia de carga hidráulica promedio entre los acuíferos de aproximadamente 1,8 m, llegando a un máximo de hasta 3 m. En el grupo J2, la diferencia de carga hidráulica es notablemente mayor alcanzando un valor promedio de 2,6 m. El grupo de pozos J3, es el que registra menor diferencia de carga hidráulica entre acuíferos, con valores promedio de aproximadamente 1,3 m. Es una posibilidad que esto se deba a su ubicación geográfica, ya que este grupo de pozos se encuentran dentro del Bañado de Maldonado.

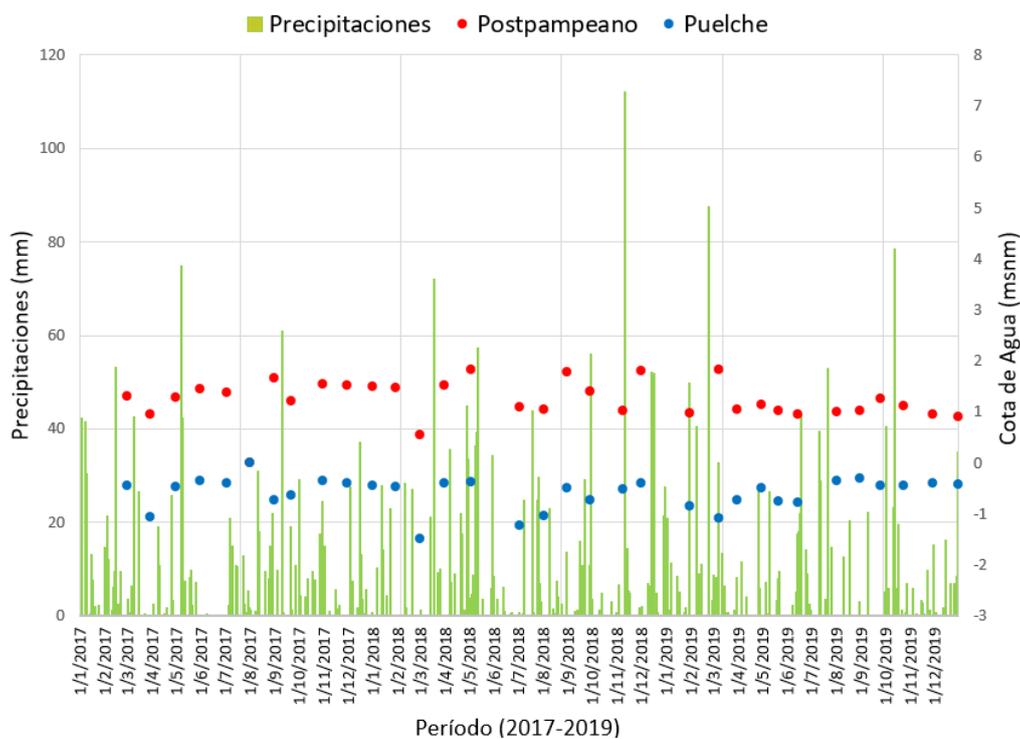


Figura 10.1. Gráfico de precipitaciones y cotas de agua para el grupo de pozos J1.

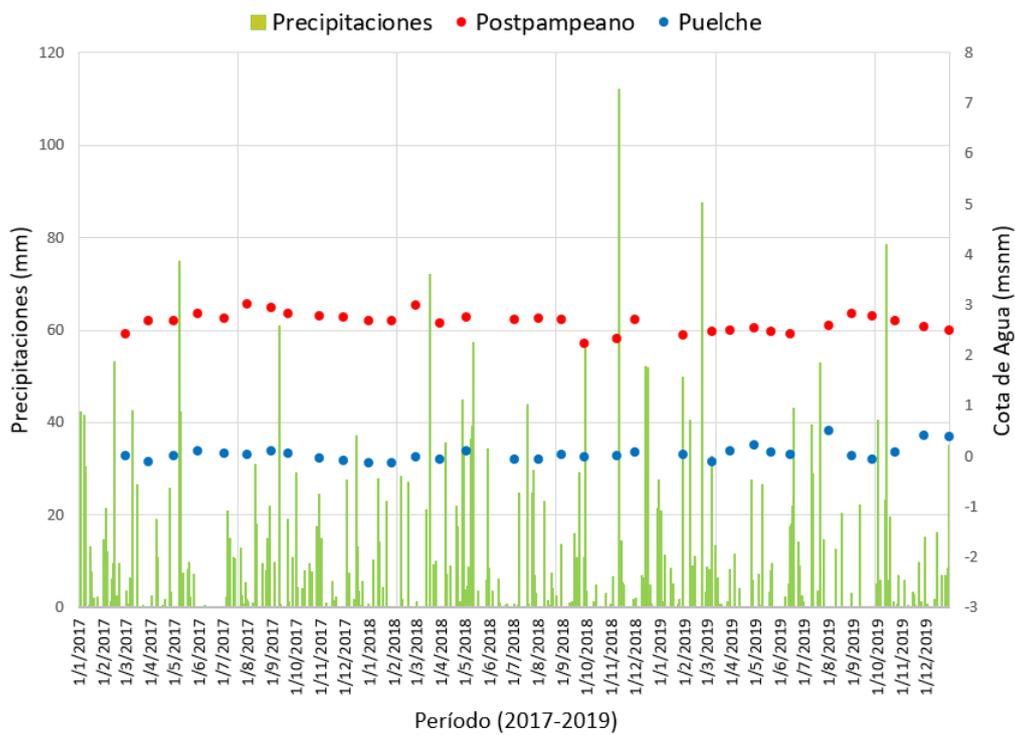


Figura 10.2. Gráfico de precipitaciones y cotas de agua para el grupo de pozos J2.

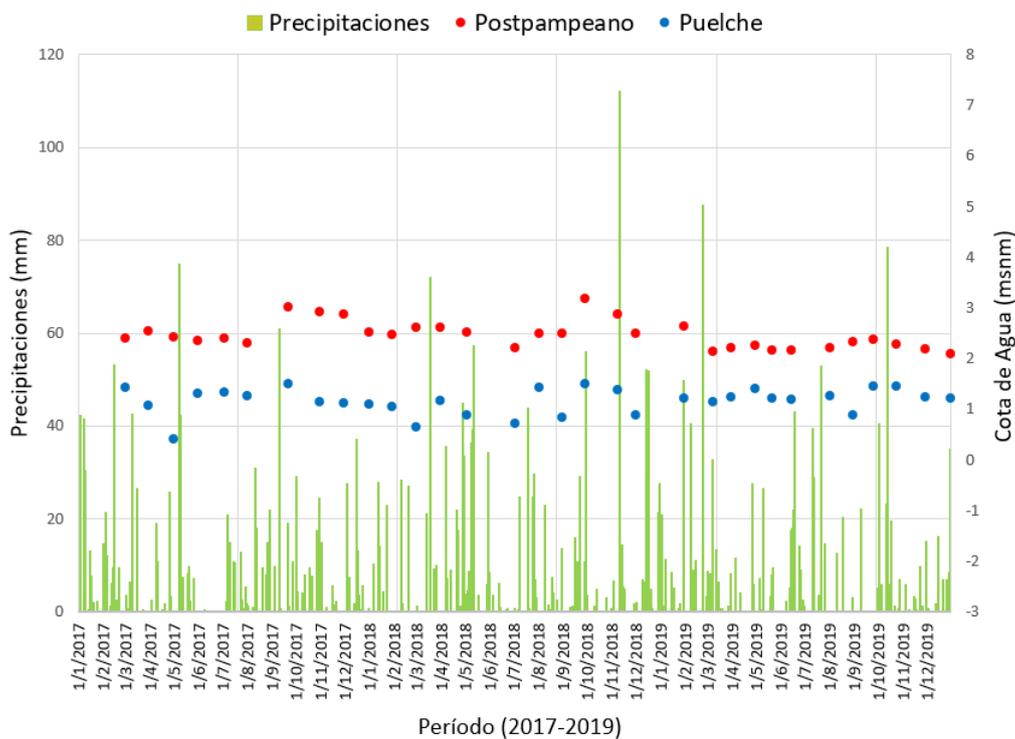


Figura 10.3. Gráfico de precipitaciones y cotas de agua para el grupo de pozos J3.

Los grupos de pozos del J4 al J6 cortan al Postpampeano, al Pampeano y al Puelche (Figuras 10.4, 10.5 y 10.6). Se encuentran ubicados en sentido paralelo a la dirección de descarga, lo

que queda evidenciado en las alturas hidráulicas de los grupos (entre 2 y 3 m en el grupo J6, entre 1 y 2 m en el grupo J5, y entre 0 y -1 m en el grupo J4).

En todos los casos se puede observar que los tres acuíferos presentan diferencias de carga hidráulica igual o menor a 1 m. Prácticamente se encuentran en el mismo nivel, lo que indicaría una importante relación hidráulica. El grupo J4 registra mayores diferencias de carga hidráulica promediando valores de 1 m, mientras que la diferencia de carga promedio para los grupos J5 y J6 es de aproximadamente 0,2 m.

En los grupos J4 y J5 las alturas hidráulicas del Postpampeano y Pampeano son siempre positivas respecto del Puelche. El grupo J6 presenta una mayor irregularidad en la relación de cargas hidráulicas.

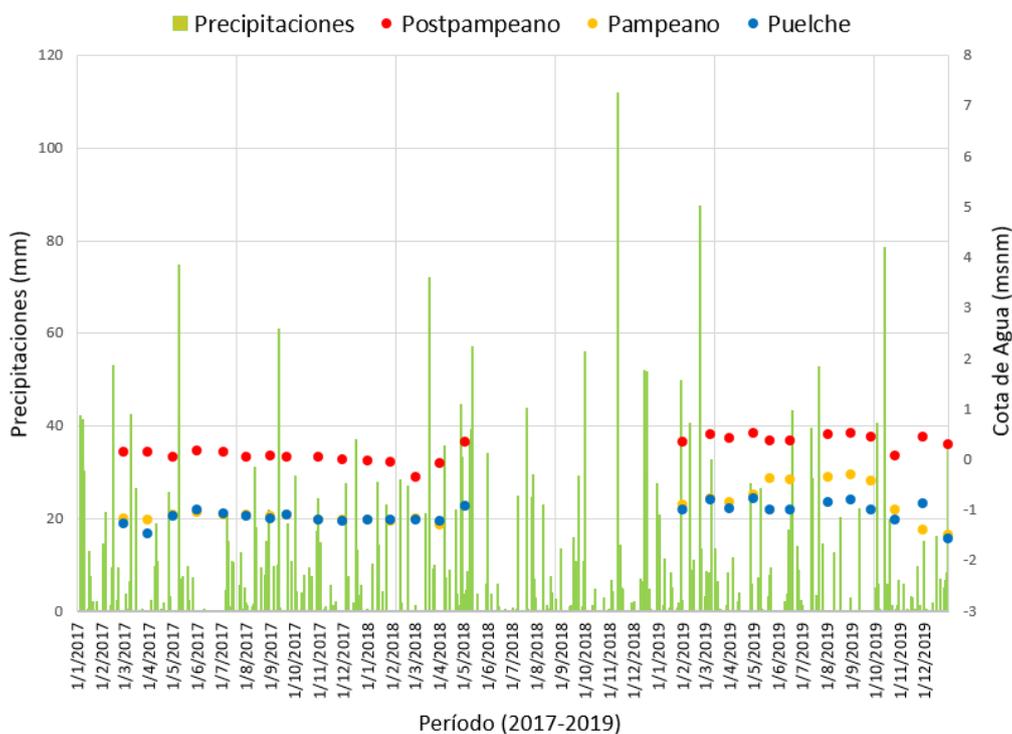


Figura 10.4. Gráfico de precipitaciones y cotas de agua para el grupo de pozos J4.

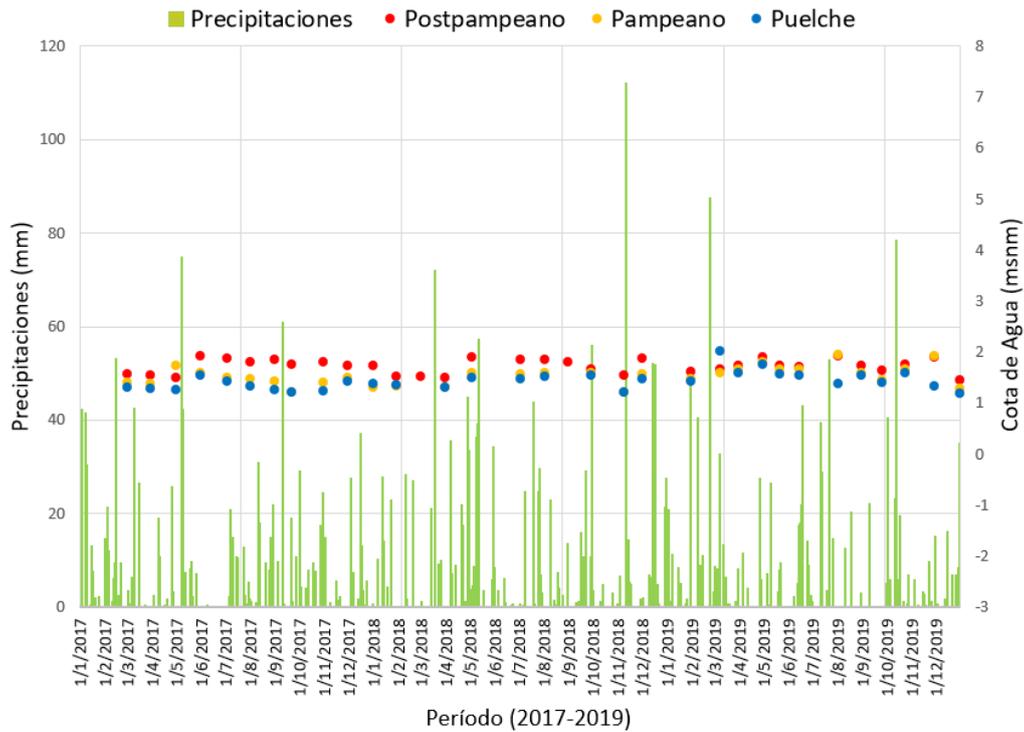


Figura 10.5. Gráfico de precipitaciones y cotas de agua para el grupo de pozos J5.

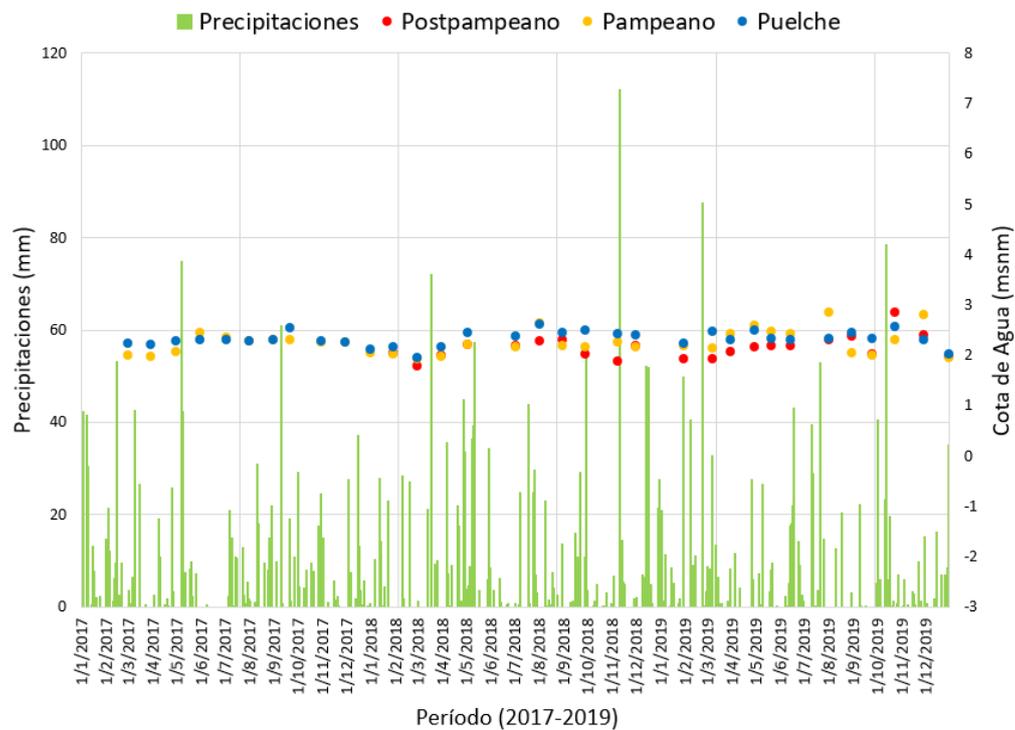


Figura 10.6. Gráfico de precipitaciones y cotas de agua para el grupo de pozos J6.

Los grupos de pozos del J7 al J9 interceptan los acuíferos Pampeano y Puelche (Figuras 10.7, 10.8 y 10.9). En los tres gráficos se observa claramente que la altura hidráulica del Pampeano es positiva respecto del Puelche.

La diferencia de carga hidráulica muestra variaciones significativas entre los distintos grupos de pozos. En el grupo J7, se observa una diferencia de aproximadamente 0,6 a 1 m, mientras que en el grupo J8, ubicado en la llanura interior, se registran los valores más altos de aproximadamente 2 m. En contraste, en el grupo J9 la diferencia de carga hidráulica es mínima, casi imperceptible.

En el caso del grupo de pozos J9, puede que la diferencia de carga hidráulica no sea tan grande como en los otros pozos debido a su ubicación. Este grupo de pozos al igual que el J3 se ubican dentro del Bañado de Maldonado.

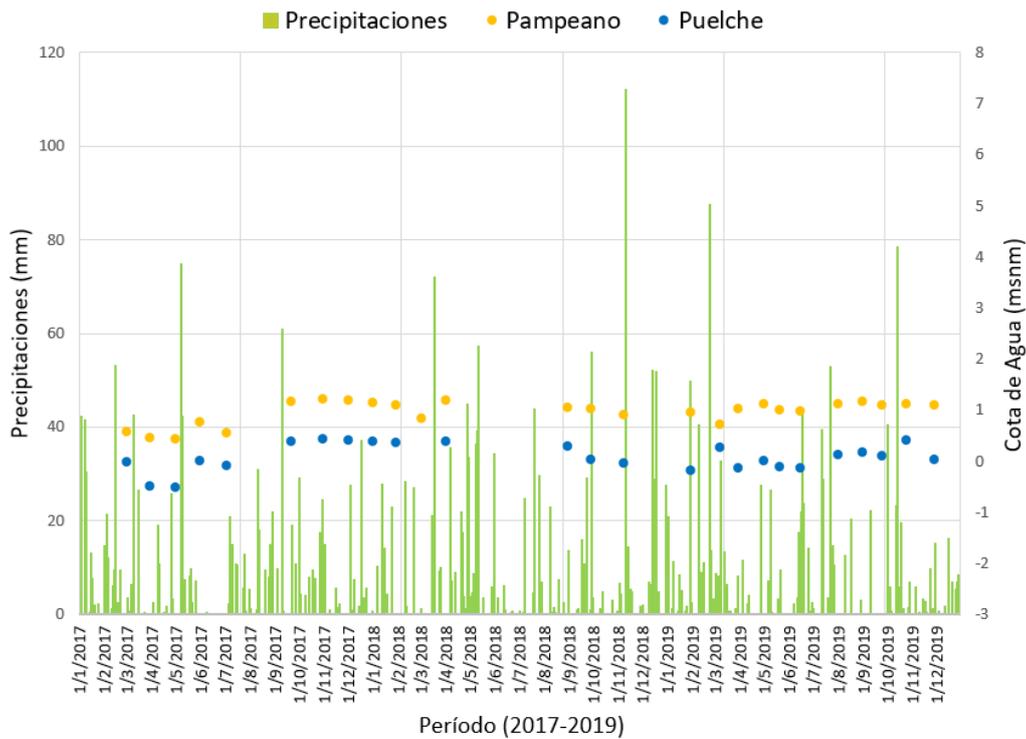


Figura 10.7. Gráfico de precipitaciones y cotas de agua para el grupo de pozos J7.

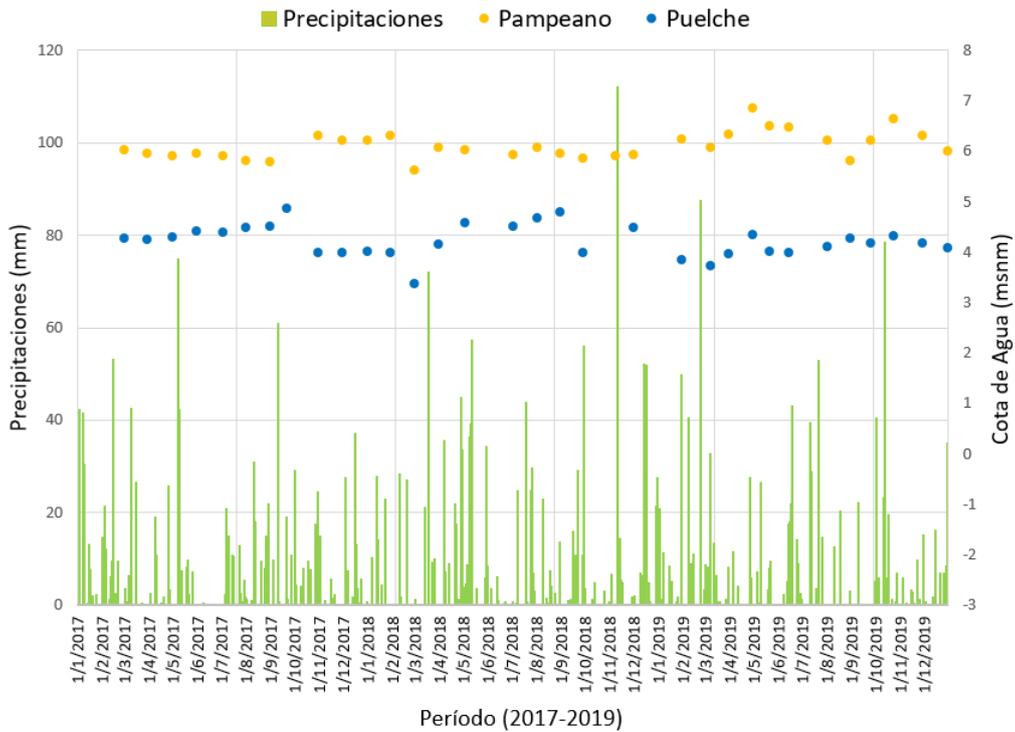


Figura 10.8. Gráfico de precipitaciones y cotas de agua para el grupo de pozos J8.

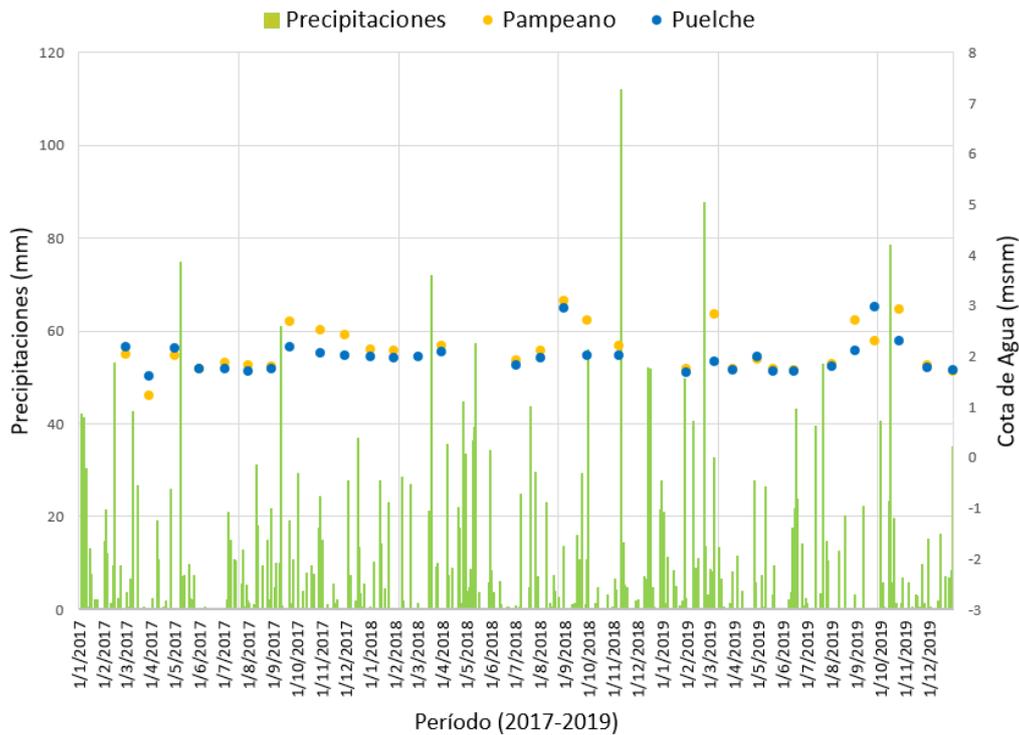


Figura 10.9. Gráfico de precipitaciones y cotas de agua para el grupo de pozos J9.

Con la finalidad de comprender la morfología potenciométrica, distribución espacial y la dirección del flujo de agua subterránea en la región, se emplearon los datos de cota de agua de

cada acuífero para realizar mapas equipotenciales. Inicialmente, se elaboraron tres mapas por acuífero, correspondientes a cada año del período de estudio. Sin embargo, debido a las similitudes entre ellos, se presentará un único mapa por acuífero, utilizando el mes de marzo del año 2019 como referencia (Figuras 11.1, 11.2 y 11.3).

Aunque la cantidad de datos disponibles varía para cada acuífero y los datos utilizados para el Postpampeano se restringen a un área más pequeña, la dirección predominante del flujo de agua subterránea de los tres acuíferos en la zona de estudio es hacia el noreste, en coincidencia con la pendiente regional. Adicionalmente, cabe mencionar que las curvas equipotenciales del pampeano y del puelche muestran una distribución espacial muy similar.

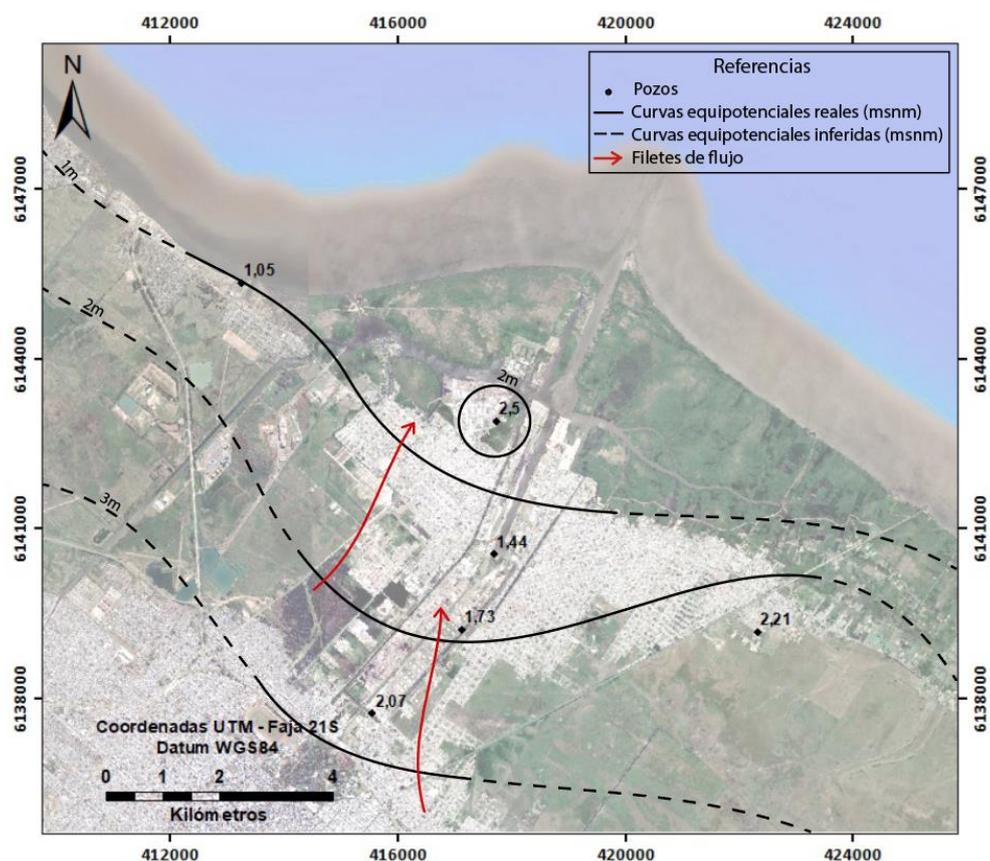


Figura 11.1. Mapa equipotencial del acuífero Postpampeano para el año 2019.

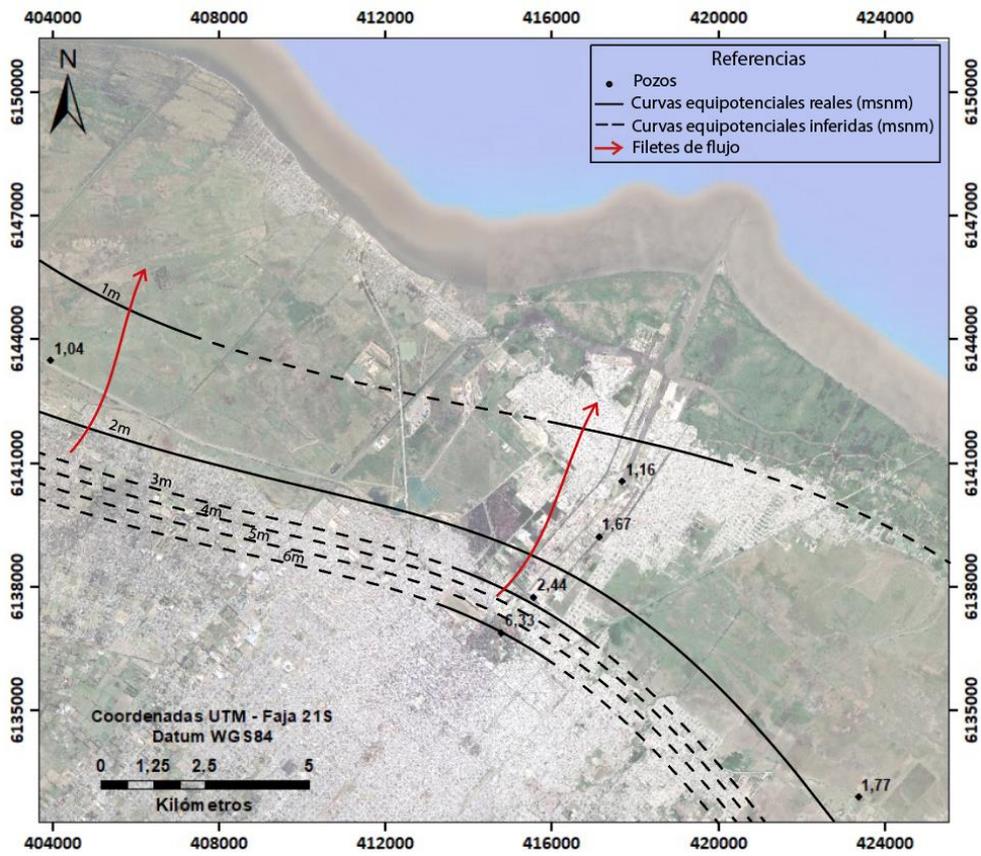


Figura 11.2. Mapa equipotencial del acuífero Pampeano para el año 2019.

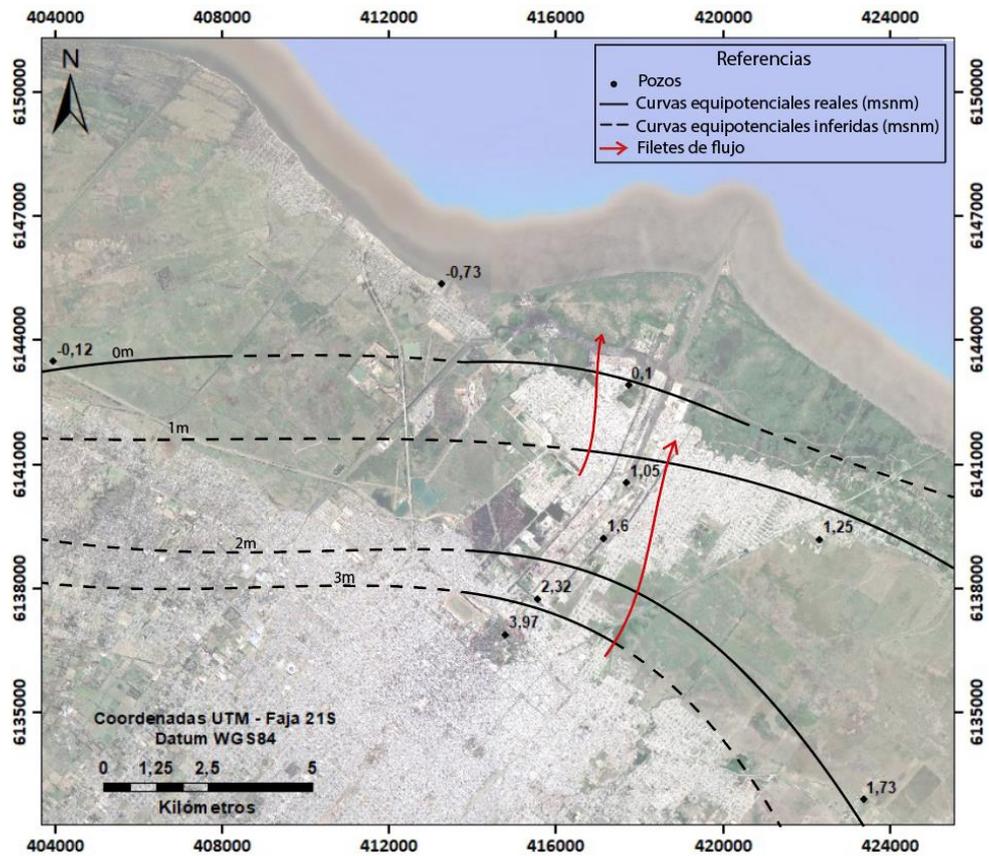


Figura 11.3. Mapa equipotencial del acuífero Puelche para el año 2019.

7.3. Hidroquímica

La química del agua subterránea es el resultado de la interacción compleja de múltiples factores y procesos, que van desde la interacción con los minerales hasta la influencia de los balances hídricos locales y la geomorfología. Comprender estos factores es esencial para una gestión adecuada y sostenible de los recursos hídricos subterráneos.

El objetivo de este apartado es analizar la hidroquímica del agua subterránea en el área de estudio haciendo especial énfasis en caracterizar composicionalmente cada uno de los acuíferos.

El diagrama de Piper, basado en los analitos registrados en los pozos de la planicie costera, indica que, en términos generales, el agua del acuífero Postpampeano y del Puelche se clasifica como clorurada y/o sulfatada sódica, mientras que el agua del acuífero Pampeano es bicarbonatada sódica (Figura 12).

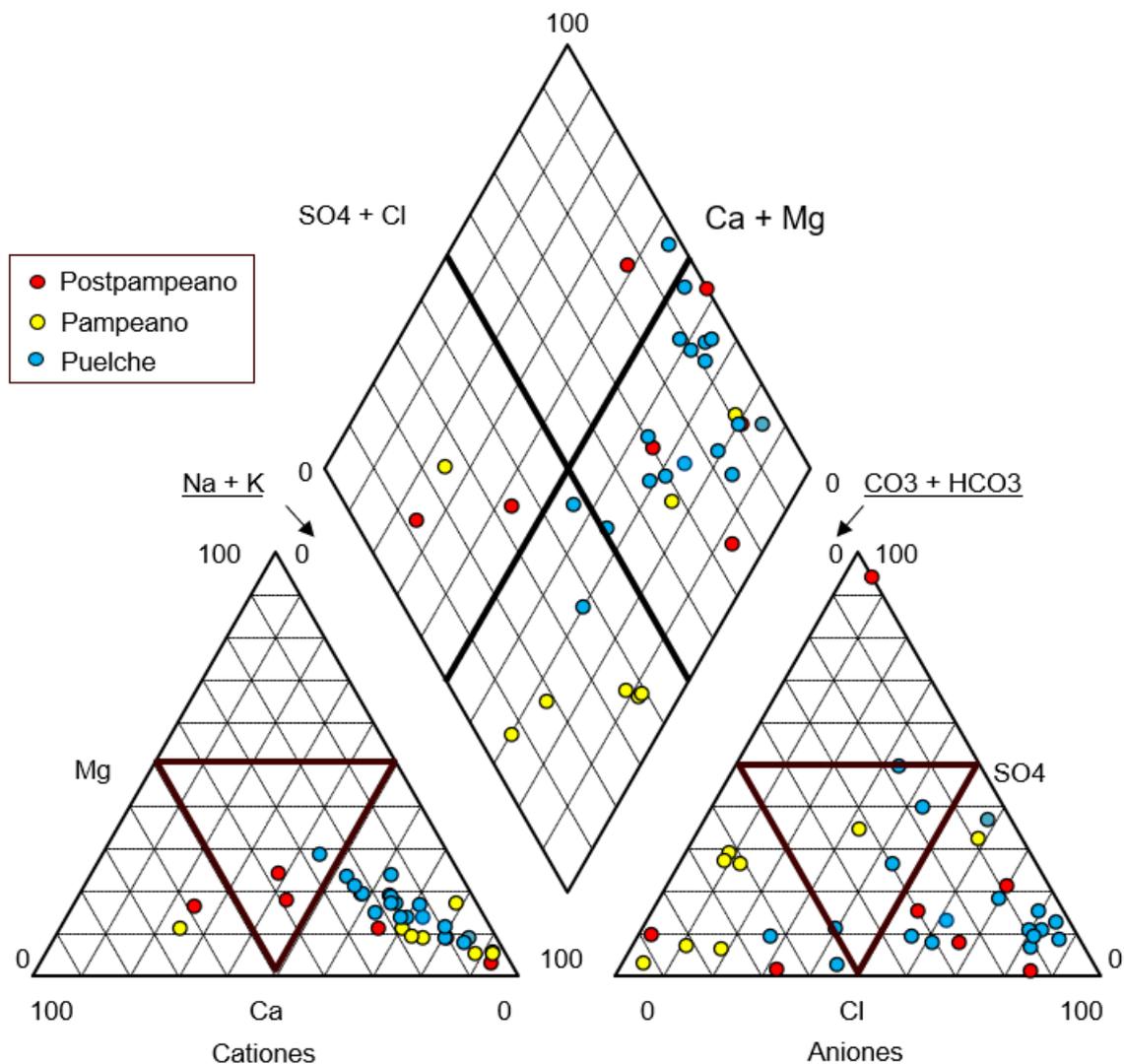


Figura 12. Diagrama de Piper con datos del Postpampeano, Pampeano y Puelche para el período 2017-2019.

Aparte de la clasificación de las aguas, es relevante resaltar que los análisis de los iones mayoritarios también evidencian variaciones en la conductividad eléctrica entre los distintos acuíferos. Además, se pueden identificar diversas facies de agua en cada uno de estos acuíferos, dependiendo de su ubicación en relación con la costa. En la Tabla 1 del Anexo B se encuentran detalladas las concentraciones de los iones y los principales parámetros de cada una de las muestras utilizadas para la caracterización geoquímica de las aguas.

La conductividad eléctrica promedio del Postpampeano es de 4.759 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sin embargo, al excluir los valores del grupo J1, ubicado cerca del río, la media disminuye a 2.314 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por otro lado, la conductividad del Pampeano es de 3.109 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y la del Puelche de 7.444 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Tanto en el Postpampeano como en el Puelche, los valores más elevados se registran en el grupo de pozos J1 y J2, situados cerca del litoral, así como en los grupos de pozos J4 y J5. Esta última tendencia también se ve reflejada en el Pampeano, donde los valores más elevados se registran en el sector del polo petroquímico.

La composición química predominante del Pampeano es bicarbonatada sódica, evolucionando a clorurada y/o sulfatada sódica en la zona de descarga regional. Además, se observa un aumento de la salinidad en el sentido del drenaje. En las proximidades de la llanura interior, los niveles de conductividad eléctrica oscilan alrededor de los 1.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que cerca del polo petroquímico varían en un rango de 3.500 a 13.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La composición iónica mayoritaria del Puelche se caracteriza por ser de tipo clorurada y/o sulfatada sódica en toda la planicie costera y por presentar un marcado gradiente de salinidad creciente desde la llanura interior hacia el litoral de la planicie costera, al igual que el Pampeano. Cerca de la llanura, los niveles de conductividad eléctrica rondan valores de 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mientras que en áreas cercanas al polo petroquímico y a las orillas del río varían en el rango de 4.000 a 17.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Este incremento de la salinidad está relacionado en gran medida con el aumento de las concentraciones de sodio y cloruro. En la transición entre la llanura interior y la planicie costera, los valores promedio de Na^+ y Cl^- se sitúan en 254 mg/L y 287 mg/L , respectivamente. Mientras que, en el sector costero próximo al Río de la Plata, los contenidos de Na^+ y Cl^- aumentan significativamente a 1.164 mg/L y 2.755 mg/L .

8. Conclusiones

- Los registros de precipitación anual y las medias móviles para el período 1909-2019 indican que el intervalo 2017-2019 corresponde a un período húmedo. Durante estos tres años, se registraron excesos con valores medios de aproximadamente 413 mm/año, concentrados principalmente entre los meses de abril y noviembre. Los años 2017 y 2018 registran los mayores excedentes, con valores de 411 mm y 541 mm.
- Los meses con déficit hídrico son escasos y corresponden al verano 2017-2018. En general a lo largo de todo el periodo, la evapotranspiración real compenso la evapotranspiración potencial.
- En los grupos de pozos J1-J3, localizados en las cercanías del litoral, el Postpampeano tiene una carga hidráulica superior al Puelche. De igual forma, en los grupos de pozos J7-J9, que se encuentran en el límite con la llanura interior, el Pampeano presenta una carga hidráulica más elevada que el Puelche. En ambos grupos de pozos, la altura hidráulica del Puelche es menor en comparación con los otros acuíferos.
- En los grupos de pozos cercanos al polo petroquímico (J4-J6), las alturas hidráulicas evidencian que se encuentran ubicados en sentido paralelo a la dirección de descarga regional. Los tres acuíferos prácticamente se encuentran en el mismo nivel, lo que indicaría una importante relación hidráulica.
- La dirección del flujo de agua subterránea para cada uno de los acuíferos tiene una predominancia en dirección noreste, en coincidencia con la pendiente topográfica. Además, es importante destacar que las curvas equipotenciales del acuífero pampeano y del puelche presentan una distribución espacial muy similar.
- El agua del acuífero Postpampeano y del Puelche se clasifica como clorurada y/o sulfatada sódica, mientras que el agua del acuífero Pampeano es de tipo bicarbonatada sódica.
- El Postpampeano y el Puelche presentan los mayores valores de conductividad eléctrica media. Sin embargo, en los tres acuíferos se aprecia un aumento considerable de esta variable en las proximidades del litoral y en la zona del polo petroquímico.
- Tanto el Pampeano como el Puelche muestran diversas facies de agua en función de su proximidad al litoral. En el caso del Pampeano, su composición química predominante es bicarbonatada sódica, la cual evoluciona hacia una composición clorurada-sulfatada sódica en la región de descarga. Por otro lado, el Puelche se caracteriza por su composición de tipo clorurada y/o sulfatada sódica en toda la extensión de la planicie

costera. Sin embargo, ambos acuíferos presentan un notorio aumento en la salinidad desde la llanura interior hasta la zona litoral de la planicie costera.

9. Bibliografía

Auge, M. P. (1990). Aptitud del agua subterránea en La Plata, Argentina. Seminario Latinoamericano sobre Medio Ambiente y Desarrollo. Actas, 1, 191-201.

Auge, M. P. (1996). Similitudes hidrogeológicas entre los acuíferos Pampeano y Puelche en La Plata, Argentina. II Seminario Hispano-Argentino sobre Temas Actuales de Hidrología Subterránea. Ser. Correlac. Geol. 11: 235-241. Universidad Nacional de Tucumán.

Auge, M., Hernández, M., & Hernández, L. (2002, March). Actualización del conocimiento del acuífero semiconfinado Puelche en la provincia de Buenos Aires, Argentina. In XXXII International Hydrogeology Congress (pp. 624-633).

Auge, M. P. (2005). Hidrogeología de La Plata, Provincia de Buenos Aires. In Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino (pp. 293-311). La Plata: Quick Press.

Braccini, O. I., & del Salado, C. (1972). Geología Regional Argentina, 1. Academia Nacional de Ciencias, Córdoba, 407-418.

Braccini, O. I. (1980). Cuenca del Salado. In Segundo Simposio de Geología Regional Argentina. Academia Nacional de Ciencias de Córdoba, II (pp. 879-918).

Cavallotto, J. L. (2002). Evolución holocena de la llanura costera del margen sur del Río de la Plata. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 57(4), 376-388.

Cavallotto, J. L., Violante, R. A., & Colombo, F. (2005). Evolución y cambios ambientales de la llanura costera de la cabecera del río de la Plata. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 60(2), 353-367.

Cavallotto, J. L., & Violante, R. A. (2005). Geología y Geomorfología del Río de la Plata. In Relatorio del XVI Congreso. Geológico Argentino. La Plata (pp. 237-253).

Cellone, F. A. (2019). Evaluación de los recursos hídricos en un sector de la planicie costera del Río de la Plata (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).

EASNE (1972). Contribución al estudio geohidrológico del Noreste de la Provincia de Buenos Aires. EASNE-CFI. Serie. Téc.24, Tomo I y II.

Fidalgo, F., & Martinez, O. (1983). Algunas características geomorfológicas dentro del partido de La Plata, Provincia de Buenos Aires. *Revista Asociación Geológica Argentina*, 38(2), 263-279.

Frenguelli, J. (1950). Rasgos generales de la morfología y la geología de la provincia de Buenos Aires. *LEMIT*, 2, 3-72.

García, J. M., & Zanandrea, J. F. (2017). Dinámica hídrica del Acuífero Puelche en la ciudad de La Plata y alrededores. In *IV Congreso Internacional Científico y Tecnológico de la provincia de Buenos Aires (CONCYT)* (Bernal, 1º de septiembre de 2017).

Groeber, P. (1945). Las aguas surgentes y semisurgentes del norte de la Provincia de Buenos Aires. *Revista La Ingeniería*, 49(6), 371-387.

Hernández, M. A., Fili, M., Auge, M. P., & Ceci, J. H. (1975). Geohidrología de los acuíferos profundos de la Provincia de Buenos Aires. In *VI Congreso Geológico Argentino. Actas* (Vol. 2, pp. 479-500).

Kruse, E., Varela, L. B., Laurencena, P. C., Deluchi, M., Rojo, A., & Carol, E. (2003). Modificaciones del ciclo hidrológico en un área del Noreste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. In *Simposio El Agua y la Ciudad Sostenible: Hidrogeología Urbana* (Barcelona, España).

Melo, M. (2019). Geohidrología de la planicie costera del Río de la Plata medio, partido de Magdalena (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).

Sala, J. M., & Auge, M. (1973). Presencia de capas filtrantes en el noreste de la Provincia de Buenos Aires. Su determinación. In *Actas V Congreso Geológico Argentino* (Vol. 5, pp. 185-194).

Santa Cruz, J. N., Silva Busso, A., Amato, S., Guarino, M., Villegas, D., & Cernadas, M. (1997). Explotación y Deterioro del Acuífero Puelches en la región metropolitana de la República Argentina. *Ingeniería Sanitaria y Ambiental*, 31, 34-44.

Santucci, L. (2020). Dinámica de la relación agua superficial-agua subterránea como condicionante de los procesos geoquímicos que regulan la calidad del agua (Doctoral dissertation, Universidad Nacional de La Plata).

Tavella, G. F., & Wright, C. G. (1996). Cuenca del Salado. *Geología y recursos naturales de la Plataforma Continental Argentina*, 6, 95-116.

Tavella, G. (2005). Cuenca del Salado. En: *Geología y Recursos Minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino*. De Barrio, R.E.; Etcheverry, R.O.; Caballé, M.F. y Llambías, E. (Eds). La Plata, 2005. Cap. XXXI. 459-472.

Usunoff, E., Varni, M., Weinzettel, P., & Rivas, R. (1999). Hidrogeología de grandes llanuras: La pampa húmeda argentina. *Boletín geológico y minero*, 110(4), 391-406.

Yrigoyen, M. R. (1975). Geología del subsuelo y plataforma continental. In *Relatorio VI Congreso Geológico Argentino* (pp. 139-168).

Yrigoyen, M.R. (1999). Los depósitos cretácicos y terciarios de las cuencas del Salado y del Colorado. En: *Caminos, R. (Ed.), Geología Argentina. Instituto de Geología y Recursos Minerales - SEGEMAR, Buenos Aires*, 645-650.

Zárate, M. A. (2005, September). El Cenozoico tardío continental de la provincia de Buenos Aires. In *Geología y Recursos Minerales de la provincia de Buenos Aires, Relatorio del XVI Congreso Geológico Argentino* (pp. 139-158).

10. Anexos

Anexo A

| Determinación | Técnica de Análisis | Método |
|----------------------------|---|------------------------------|
| pH | Electrometría (Método Potenciométrico) | SM-4500H ⁺ -B |
| Conductividad | Electrometría | SM-2510-B |
| Residuo Seco/STD | Gravimetría | SM-2540-B |
| Alcalinidad a Carbonatos | Titulación Volumétrica | SM-2320-B |
| Alcalinidad a Bicarbonatos | Titulación Volumétrica | SM-2320-B |
| Cloruros | Titulación Volumétrica (Argentometría) | SM-4500 Cl-B |
| Nitratos | Turbidimetría/Espectrofotometría | SM-4500-NO ₃ -E C |
| Sulfatos | Turbidimetría/Espectrofotometría | SM-4500-SO ₄ -E |
| Calcio | Titulación Volumétrica (con EDTA) | SM-3500-Ca-B |
| Magnesio | Método de Cálculo Espectroscopía de Absorción Atómica | SM-3500-Mg-B SM-3111-Mg-B |
| Sulfuros | Volumétrica | SM-4500-S-D |
| Potasio | Fotometría de emisión de llama Espectroscopía de Absorción Atómica | SM-3500-K-B SM-3111-K-B |
| Sodio | Fotometría de emisión de llama Espectroscopía de Absorción Atómica | SM-3500-Na-B SM-3111-Na-B |

Tabla 1. Tabla de técnicas analíticas y métodos utilizados para la determinación de los parámetros físico-químicos y las concentraciones de los analitos.

Anexo B

| Muestra | pH | CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$) | TSD (mg/L) | HCO_3^- (mg/L) | SO_4^{2-} (mg/L) | Cl^- (mg/L) | NO_3^- (mg/L) | Na^+ (mg/L) | K^+ (mg/L) | Ca^{+2} (mg/L) | Mg^{+2} (mg/L) |
|----------|-----|-----------------------------------|---------------------------------|--|--|---|---|---|--|--|--|
| PO_J1_17 | 6,3 | 9.680 | 6.780 | 646 | 1.200 | 2.991 | 0,5 | 2.090 | 112 | 229 | 117 |
| PO_J1_18 | 6,8 | 7.280 | 4.004 | 1.016 | 251 | 1.585 | 29 | 1.452 | 88 | 54 | 23 |
| PO_J1_19 | 6,9 | 7.100 | 3.763 | 580 | 34 | 2.142 | 5 | 575 | 65 | 480 | 190 |
| PO_J2_19 | 6,9 | 1.038 | 727 | 227 | 91 | 243 | 6 | 180 | 10 | 55 | 16 |
| PO_J3_19 | 7,4 | 630 | 384 | 256 | 5 | 74 | 4 | 65 | 11 | 50 | 14 |
| PO_J4_19 | 7,1 | 888 | 577 | 510 | 45 | 10 | 3 | 60 | 10 | 120 | 20 |
| PO_J5_17 | 3,2 | 6.700 | 4.610 | 0.5 | 3.059 | 146 | 0,5 | 841 | 83 | 282 | 148 |
| PA_J4_19 | 7,9 | 12.900 | 9.030 | 837 | 2.409 | 3.228 | 120 | 2.650 | 160 | 120 | 300 |
| PA_J5_17 | 8 | 3.870 | 2.780 | 1.679 | 618 | 146 | 1 | 970 | 31 | 20 | 30 |
| PA_J5_19 | 8,1 | 3.440 | 2.098 | 1.200 | 411 | 144 | 3 | 700 | 30 | 15 | 21 |
| PA_J6_18 | 7,9 | 1.817 | 800 | 533 | 177 | 44 | 8 | 267 | 65 | 16 | 8 |
| PA_J7_19 | 7,2 | 1.308 | 955 | 305 | 258 | 183 | 3 | 260 | 12 | 45 | 16 |
| PA_J8_19 | 7,3 | 572 | 338 | 266 | 17 | 39 | 9 | 35 | 8 | 78 | 8 |
| PA_J9_18 | 7,2 | 365 | 190 | 170 | 4 | 5 | 1 | 49 | 11 | 11 | 4 |
| PA_J9_19 | 7,7 | 604 | 320 | 250 | 17 | 20 | 5 | 90 | 10 | 18 | 6 |
| PU_J1_17 | 7,2 | 13.970 | 9.800 | 404 | 640 | 4.986 | 0,5 | 2.080 | 158 | 805 | 475 |
| PU_J1_18 | 7,5 | 5.040 | 2.772 | 326 | 160 | 1.462 | 3 | 585 | 198 | 115 | 119 |
| PU_J1_19 | 8,4 | 3.360 | 1.714 | 502 | 99 | 589 | 9 | 335 | 225 | 47 | 41 |
| PU_J2_17 | 7 | 12.090 | 9.010 | 283 | 1.003 | 5.037 | 4 | 1.650 | 270 | 850 | 545 |
| PU_J2_18 | 7,1 | 16.120 | 11.284 | 815 | 1.050 | 6.011 | 23 | 2.680 | 591 | 617 | 415 |
| PU_J3_17 | 7,6 | 4.440 | 3.110 | 212 | 184 | 1.043 | 3 | 554 | 152 | 62 | 32 |
| PU_J3_18 | 7,8 | 4.450 | 2.314 | 217 | 179 | 1.160 | 24 | 564 | 46 | 124 | 76 |
| PU_J3_19 | 7,5 | 5.930 | 4.032 | 190 | 446 | 1.754 | 241 | 870 | 95 | 195 | 130 |
| PU_J4_17 | 7,1 | 17.000 | 11.820 | 507 | 3.244 | 3.804 | 0,5 | 3.320 | 152 | 186 | 185 |
| PU_J4_19 | 8,3 | 16.620 | 8.642 | 2.314 | 1.612 | 1.990 | 22 | 1.890 | 420 | 574 | 231 |

| | | | | | | | | | | | |
|----------|-----|--------|-------|-------|-------|-------|-----|-------|----|-----|-----|
| PU_J5_17 | 7,3 | 12.570 | 8.890 | 1.522 | 2.831 | 2.288 | 0,5 | 2.900 | 72 | 210 | 141 |
| PU_J6_17 | 7,4 | 5.060 | 3.560 | 531 | 1.236 | 624 | 91 | 987 | 30 | 98 | 75 |
| PU_J6_18 | 7,5 | 4.000 | 2.200 | 535 | 217 | 769 | 63 | 614 | 38 | 91 | 59 |
| PU_J6_19 | 7,6 | 5.160 | 3.560 | 400 | 486 | 1.395 | 239 | 750 | 80 | 250 | 130 |
| PU_J7_19 | 7,4 | 4.100 | 2.091 | 1.150 | 42 | 564 | 3 | 450 | 60 | 160 | 90 |
| PU_J8_19 | 7,3 | 411 | 263 | 120 | 22 | 57 | 18 | 65 | 5 | 15 | 9 |
| PU_J9_17 | 7,6 | 1.460 | 803 | 484 | 56 | 123 | 0,5 | 201 | 22 | 40 | 21 |
| PU_J9_18 | 7,7 | 2.224 | 1.157 | 242 | 89 | 405 | 2 | 301,4 | 32 | 65 | 32 |

Tabla 1. Tabla de análisis fisicoquímicos de iones mayoritarios (mg/L) y principales parámetros para cada una de las muestras de agua subterránea de la planicie costera con error menor al 5% (33 datos). Respecto a las denominaciones de las muestras, es importante destacar que siguen un formato específico para brindar información relevante. El primer término de la denominación hace referencia al acuífero al que pertenece la muestra, donde "PO" corresponde al acuífero Postpampeano, "PA" al acuífero Pampeano y "PU" al acuífero Puelche. El segundo término indica el nombre o identificación del pozo del cual se obtuvo la muestra. Por último, el tercer término corresponde al año del período analizado en el cual se tomó la muestra. Es importante destacar que esta estructura en la denominación es exclusiva de este apartado, y su objetivo es permitir una identificación clara y concisa de la procedencia de cada muestra en relación a su acuífero, pozo y período temporal.