

DOI: 10.24850/j-tyca-2022-03-04

Artículos

## **Determinación de la geometría del basamento hidrogeológico en la Cuenca Interserrana mediante SEV**

### **Geometry determination of the hydrogeologic basement in the Interserrana Basin through VES**

Gaston Mendoza-Veirana<sup>1</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1030-8485>

Santiago Perdomo<sup>2</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0957-6068>

Jerónimo Ainchil<sup>3</sup>, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9075-4698>

<sup>1</sup>Ghent University, Faculty of Bioscience Engineering, Department of Environment, Ghent, Belgium/Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Buenos Aires, Argentina, [gaston.mendozaveirana@ugent.be](mailto:gaston.mendozaveirana@ugent.be)

<sup>2</sup>Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, Centro de Investigaciones y Transferencia del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires, Comisión Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Buenos Aires, Argentina, [sperdomo@comunidad.unnoba.edu.ar](mailto:sperdomo@comunidad.unnoba.edu.ar)

<sup>3</sup>Universidad Nacional de La Plata, Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Buenos Aires, Argentina, [jero@fcaglp.unlp.edu.ar](mailto:jero@fcaglp.unlp.edu.ar)

Autor para correspondencia: Gaston Matias Mendoza-Veirana,  
mendoveirana@gmail.com

## Resumen

El presente trabajo muestra una exploración geoelectrica del sector suroeste de la Cuenca Interserrana en la provincia de Buenos Aires, Argentina. Debido a la relativa escasez de estudios regionales llevados aquí, un entendimiento más detallado de sus estructuras geológicas y acuíferos conforma un importante aporte al abordar desafíos ambientales y productivos que tienen lugar en la zona. El objetivo propuesto es obtener una sección de la profundidad del basamento hidrogeológico resistivo. Para cumplir con el objetivo desarrollamos un modelo consistente en la inversión 1D de 49 SEV Schlumberger distribuidos uniformemente a lo largo de una ruta de 139 km. El proceso de inversión fue con un *software* específico que implementa el algoritmo de Zohdy (1989) para la solución del problema directo e inverso. El paso de los 49 perfiles unidimensionales de resistividad verdadera a la sección continua se llevó a cabo usando una técnica de interpolación de *machine learning*. También se muestra un análisis de incertidumbre que reveló una correlación lineal entre esta misma característica y la profundidad obtenida para el basamento resistivo. Esta tendencia nos permitió establecer un criterio de confianza en cada valor de profundidad verdadera de basamento. Finalmente ofrecemos una interpretación geológica de los resultados y su correspondencia con los trabajos antecedentes.

**Palabras clave:** hidrogeología, resistividad, acuífero, incertidumbre, interserrana, bosques aleatorios.

### **Abstract**

This paper shows a geoelectric exploration of the southwest sector of the Interserrana Basin, Province of Buenos Aires, Argentina. Due to the relative scarcity of regional studies carried out in the zone, a more detailed understanding of its geological structures and aquifers makes an important contribution to addressing environmental and productivity challenges. The objective is to obtain a depth section of the resistive hydrogeological basement. To meet our objective, we developed a model consisting of the 1D inversion of 49 Schlumberger VES, distributed uniformly along a 139 km route. The inversion process was performed with specific software which implements Zohdy's algorithm (Zohdy, 1989) for the solution of direct and inverse problems. The transition from the 49 one-dimensional inverted profiles to a continuous section was carried out using a machine learning interpolation technique. An uncertainty analysis is also presented, which revealed a correspondence between this feature and the depth obtained for the resistive basement. This trend allowed us to establish a reliability criterion at each true basement-depth value. Finally, we offer a geological interpretation of our results and their correspondence with previous geological research.

**Keywords:** Hydrogeology, resistivity, aquifer, uncertainty, Interserrana, random forest.

Recibido: 30/10/2020

Aceptado: 28/04/2021

## Introducción y objetivos

El flujo subterráneo en acuíferos poco profundos forma parte del ciclo hidrológico, y resulta afectado en su variabilidad por efecto de procesos de recarga e intervención humana (Poland, 1984). Los niveles subterráneos de numerosos acuíferos del mundo han experimentado una tendencia decreciente durante los últimos años y ello se debe por lo general al bombeo de agua subterránea a un mayor ritmo que la recarga (Barends, Brouwer, & Schröder, 1995).

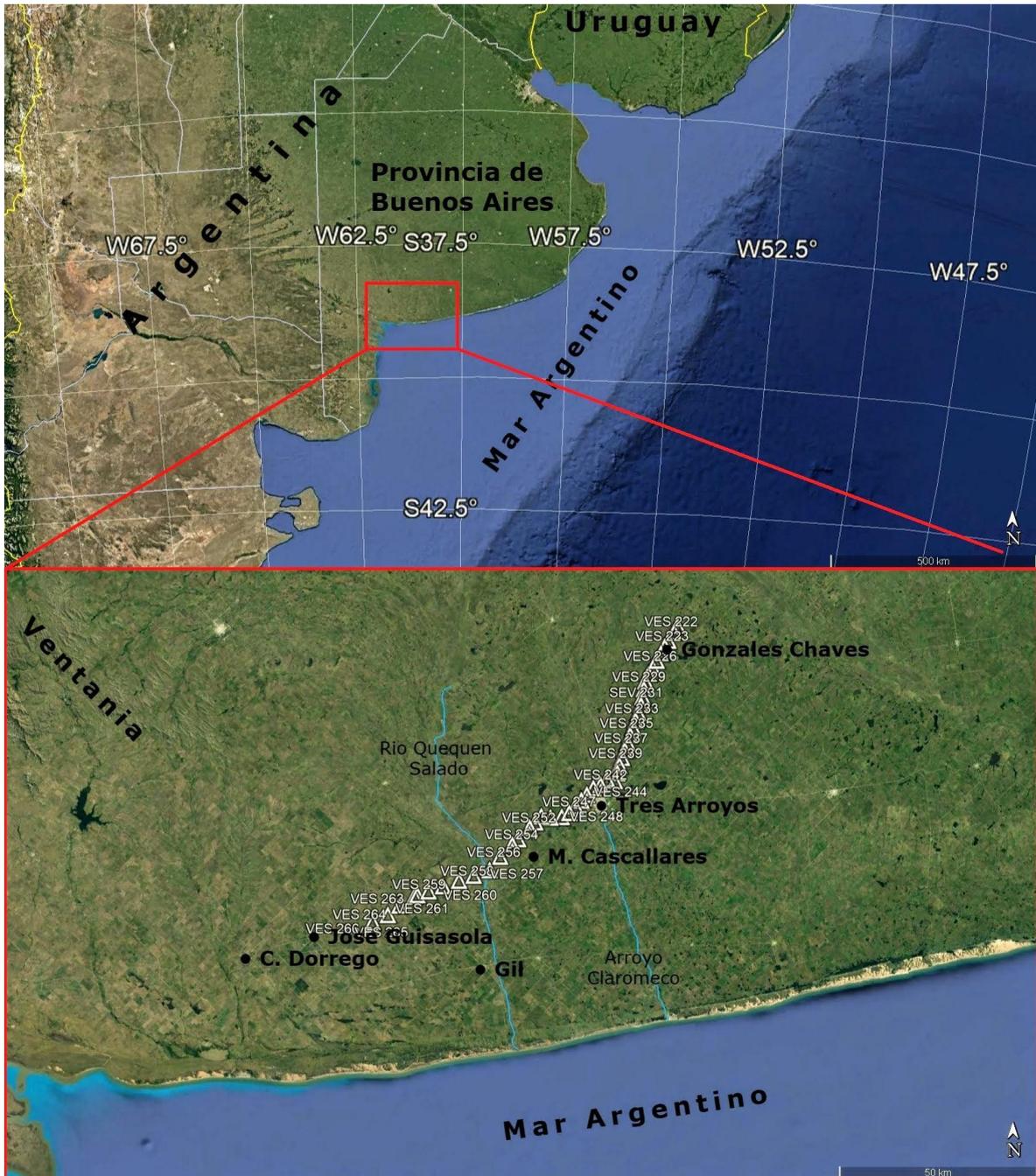
La Cuenca Interserrana (CI) es una cuenca geológica comprendida entre las sierras de Tandilia al noreste (NE) y Ventania al suroeste (SO), provincia de Buenos Aires, Argentina. Las características de suelo y clima en esta zona generan condiciones especiales para la producción agropecuaria, que es una de las más productivas del país. Esta actividad es altamente dependiente de la disponibilidad del recurso hídrico tanto superficial como subterráneo (Llambías & Prozi, 1975; Kruse, 1993; Kruse, Varela, Laurencena, & Deluchi, 1998; Campo-de-Ferreras & Piccolo, 2002; Quiroz-Londoño, Martínez, & Massone, 2012). A pesar de que existen estudios de

exploración geoelectrica en la zona (Weinzettel, Varni, & Usunoff, 2005; Quiroz-Londoño, Martínez, Massone, Bocanegra, & Ferrante, 2006; Varni, Weinzettel, & Usunoff, 2010; Giaconi, Amboni, & Giaconi, 2014; Sierra, Weinzettel, Dietrich, Bea, & Cacciabue, 2016) son más bien locales y los estudios regionales son escasos (Weinzettel & Varni, 2007), centrados principalmente en la cuenca de Claromecó, comprendida en la CI. Perforaciones profundas que alcancen el basamento son insuficientes para realizar una caracterización adecuada de la disponibilidad de reservas de agua subterránea. En este sentido, los estudios geofísicos resultan una herramienta fundamental para el estudio regional.

Para explorar las variaciones de profundidad del basamento hidrológico impermeable que limita los sistemas acuíferos se realizaron 49 sondeos eléctricos verticales (SEV) en modalidad Schlumberger. Resulta de vital interés la aplicación de esta técnica debido al contraste de resistividad que pudiera existir entre el basamento consolidado y formaciones sedimentarias. Además de conformar evidencia contrastable, reproducible y de conocida confiabilidad, el SEV es un método relativamente económico frente a la ejecución de perforaciones exploratorias. Los sondeos se hicieron a lo largo de una ruta de 139 km, e invertidos con el *software SEV's* (Nigro & Perdomo, 2017) para inferir la profundidad del basamento con una tolerancia del *root mean square error* (RMSE) menor o igual al 5 %, lo cual ha permitido obtener una sección geoelectrica interpolada mediante el algoritmo de *machine learning* llamado bosques aleatorios (Breiman, 2001).

## Zona de estudio e hidrogeología

La zona de estudio (Figura 1) corresponde a un perfil de 139 km de largo en la provincia de Buenos Aires, Argentina, sobre la cual se realizaron 49 SEV, con distancias entre dos y cuatro kilómetros de separación entre cada uno ( $37^{\circ} 59' - 38^{\circ} 38'$  sur y  $60^{\circ} 04' - 60^{\circ} 55'$  oeste). Dicho perfil está en la porción suroeste de la CI, comprendiendo las localidades de Gonzales Cháves al norte, Tres Arroyos al centro y cercanías de José Guíasola al suroeste.



**Figura 1.** Cada ícono blanco representa las coordenadas de un SEV realizado. Se incluyen las principales ciudades y referencias geográficas.

Desde el punto de vista hidrogeológico podemos distinguir cuatro grandes secciones: basamento impermeable paleozoico; sección Hipoparaniana (formación Olivos); sección Paranaiana (formación Paraná), y sección Epiparaniana (Sala, 1975; Hernández, Filí, Auge, & Ceci, 1979). En cuanto a la explotación de los acuíferos, el Epiparaniano constituye un acuífero multiunitario, cuyo horizonte superior productivo es freático. La capa freática o libre es la principal fuente de aprovechamiento tanto para uso agropecuario como para abastecimiento de la mayoría de los pequeños poblados; en las poblaciones más importantes se han hecho perforaciones a niveles productivos más profundos (algunos semiconfinados) (Sala & Cavalié, 1993); esto último también con el objetivo de reducir el riesgo de contaminación más común que se produce en las capas superficiales debido a la acción antrópica (Weinzettel *et al.*, 2005).

De acuerdo con García (1969), González (2005), Harrington (1970), Terraza y Deguillén (1973), Weinzettel y Varni (2007) el basamento aflora en sectores próximos a la localidad de Gonzales Cháves, y se identifica como una roca paleozoica de esquistos cuarzosos-arcillosos. Conforme nos acercamos a la costa marina, la profundidad del mismo crece tomando valores en la escala de cientos de metros.

La sección Hipoparaniana es muy acotada en espesor. Está integrada por intercalaciones de areniscas finas arcillosas y arcillas pardo-rojizas; se dispone sobre discordancia angular sobre las cuarcitas, siendo su superficie de erosión sobre la que se asienta la sección Paranaiana. Desde el punto de vista hidrogeológico se considera a esta sección como acuitarda con intercalaciones acuíferas, pero con

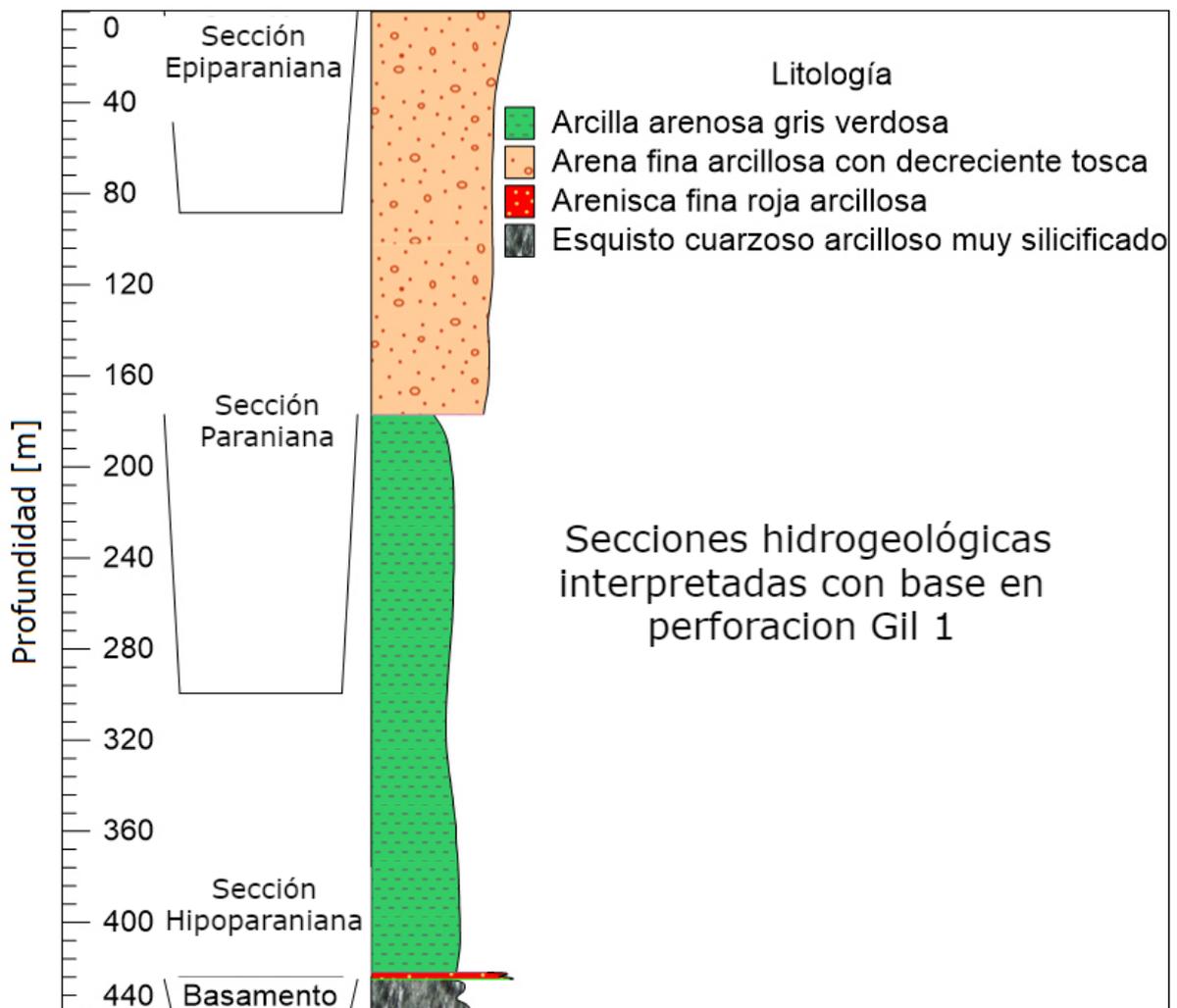
agua de alta salinidad (Hernández *et al.*, 1979; Sala & Cavalié, 1993).

La sección Paraniana incluye depósitos marinos, limitada verticalmente por superficies de discordancia erosiva. Son arcillas, areniscas arcillosas y arenas finas algo yesíferas, verde-grisáceas y azuladas, con fósiles marinos (Sala, 1975). En Gil hay 45 m de arenas finas sobre 247 m de arcillas compactas, vinculando a la sección directamente con la Epiparaniana (Sala & Cavalié, 1993).

La sección Epiparaniana está constituida por depósitos araucanos (areniscas arcillosas y finamente calcáreas), pampeanos (limos arenosos loessoides), postpampianos, médanos, aluvios y suelos; los dos primeros resultan de interés hidrológico (Hernández *et al.*, 1979).

En cuanto a perforaciones exploratorias, se ha identificado un solo pozo exploratorio en las cercanías de la zona de estudio, más precisamente en ciudad de Gil (Dirección Nacional de Geología y Minería, 1970), a partir del cual se ha construido una columna estratigráfica (Figura 2) donde se identifican las cuatro secciones hidrogeológicas ya mencionadas. El mismo registro de pozo muestra análisis químicos, entre los que destaca la salinidad de las distintas formaciones sedimentarias, revelando la mayor concentración de cloruro de sodio en la sección interpretada como Hipoparaniana. Finalmente, respecto al basamento objetivo, y a pesar de la escasez de información geoelectrica en la zona, se cuenta entonces con un único estudio geoelectrico regional conocido a la fecha (ver Figura 4 en Weinzettel & Varni, 2007), además del dato certero de la ubicación del basamento esquisto-cuarzoso a 426 m sobre la boca del pozo en la ciudad de Gil, y una descripción sobre la geología regional (Ramos,

1999; ver Figura 10) que muestra sedimentos terciarios depositados sobre depósitos neopaleozoicos con tendencia de profundización hacia el SO en su contexto estructural.



**Figura 2.** Interpretación de las secciones hidrogeológicas basado en perforación de pozo Gil 1 (Dirección Nacional de Geología y Minería, 1970). El basamento solo es alcanzado menos de un metro en el fondo de la perforación, aquí se muestra extendido.

## Metodología

Como es usual al modelar el subsuelo mediante SEV, se asume que las capas bajo el punto central del arreglo son discretas planas, homogéneas e isotrópicas, paralelas e infinitas lateralmente de resistividad constante. Los sondeos medidos se hicieron en la modalidad tetraelectrónica Schlumberger. Para cada SEV, la distancia máxima  $AB/2$  varía entre 100 y 500 m, dependiendo de los valores observados de la curva de resistividad aparente (CRAO) en campo. Se utilizó como criterio que cuando al menos tres valores de resistividad aparente alcancen la asíntota de 45 grados de inclinación se considera que el contraste observado es suficiente para inferir la presencia del basamento resistivo (objetivo) y por tanto la apertura  $AB/2$  es suficiente para interpretarlo (Orellana, 1982). El procesamiento de los datos se realizó con el *software SEV's* (Nigro & Perdomo, 2017), que implementa el algoritmo de Zohdy (1989) para la resolución del problema inverso. Este último utiliza el método de convolución y teoría de filtrado digital (Johansen, 1975), basado en la solución de Stefanescu, Schlumberger y Schlumberger (1930); se calcula la transformada de resistividad mediante el algoritmo de Sunde (1949). El número de capas verdaderas se redujo manualmente mediante el

método de Dar Zarrouk (Maillet, 1947), de forma que la diferencia entre la CRAO y la curva de resistividad aparente calculada (CRAC) tenga una tolerancia de  $RMSE = 5 \%$ . Debido a los antecedentes geológicos, observaciones de pozo y los contrastes de resistividades medidos para el basamento hidrogeológico, se fijó un valor de 100 Ohm.m. Este valor es un orden de magnitud superior a la resistividad aparente observada de los sedimentos por encima del basamento; esta hipótesis permite explicar el crecimiento asintótico a 45 grados para una CRAO cuando se alcanza un basamento resistivo (Orellana, 1982).

A pesar de existir métodos de inversión de SEV mediante redes neuronales artificiales que han mostrado su superior capacidad de ajuste en comparación con el algoritmo de Zohdy (1989) para soluciones automáticas (Maiti, Gupta, Erram, & Tiwari, 2011; Raj, Srinivas, Oliver, & Muthuraj, 2014), se ha optado por la última opción debido a que permite un ajuste manual de las capas mediante el método de Dar Zarrouk (Maillet, 1947); el objetivo del trabajo está centrado en la exploración e interpretación geológica de los resultados. Además, la no unicidad de la solución del problema inverso, sumado al hecho de que las diferencias en la curva de resistividad verdadera (CRV) ajustadas por el algoritmo de Zohdy (1989) o las redes neuronales artificiales son realmente mínimas en comparación con las restricciones que tienen nuestros modelos al haber introducido hipótesis geológicas.

## Interpolación

Al obtener una CRV para cada SEV se representa de forma unidimensional la distribución de resistividad bajo el centro del arreglo. Esta distribución en forma de perfil motiva a interpolar las profundidades obtenidas, de forma que nuestro modelo pase a ser una secuencia de 49 observaciones unidimensionales discretas a una sección continua. Con base en Prasad, Iverson y Liaw (2006); Li, Heap, Potter y Daniell (2011); Thessen (2016), y Nussbaum *et al.* (2018), el algoritmo más adecuado para realizar esta tarea es los bosques aleatorios (BA), perteneciente a la familia de métodos de ensamble del *machine learning*. Los bosques aleatorios en modo de regresión se basan en promediar las soluciones de una serie de árboles de decisión (Breiman, 2001; Louppe, 2014). Los procedimientos para entrenar, testear y elegir parámetros que minimizan los errores de predicción pueden verse en Hastie, Tibshirani y Friedman (2009); Domingos (2012); Mehta *et al.* (2019). El código implementado fue escrito en *Python*, implementando BA con la librería *Scikit Learn* (Pedregosa *et al.*, 2011) y sus módulos para la implementación de ensambles (<https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestRegressor.html>).

## **Incertidumbre**

Dado que las soluciones al problema inverso no son únicas dentro de la tolerancia propuesta, existen varias CRV que se pueden proponer como solución a cada SEV. La profundidad a la cual se modela el basamento con el menor RMSE se denomina profundidad óptima de basamento (POB). Entonces, dado un SEV particular y su POB, es posible aumentar o reducir la profundidad estimada del basamento hasta obtener  $RMSE = 5\%$ . Si se toma la mayor de estas dos distancias y se calcula su porcentaje respecto a la POB, se obtiene la incertidumbre máxima porcentual (IMP). La IMP es entonces una medida de cuánto es posible variar la profundidad verdadera del basamento relativa a la POB dentro de la tolerancia aceptada. Una baja IMP indica que hay mayor confiabilidad en la POB, mientras que el caso contrario indica mayor incertidumbre.

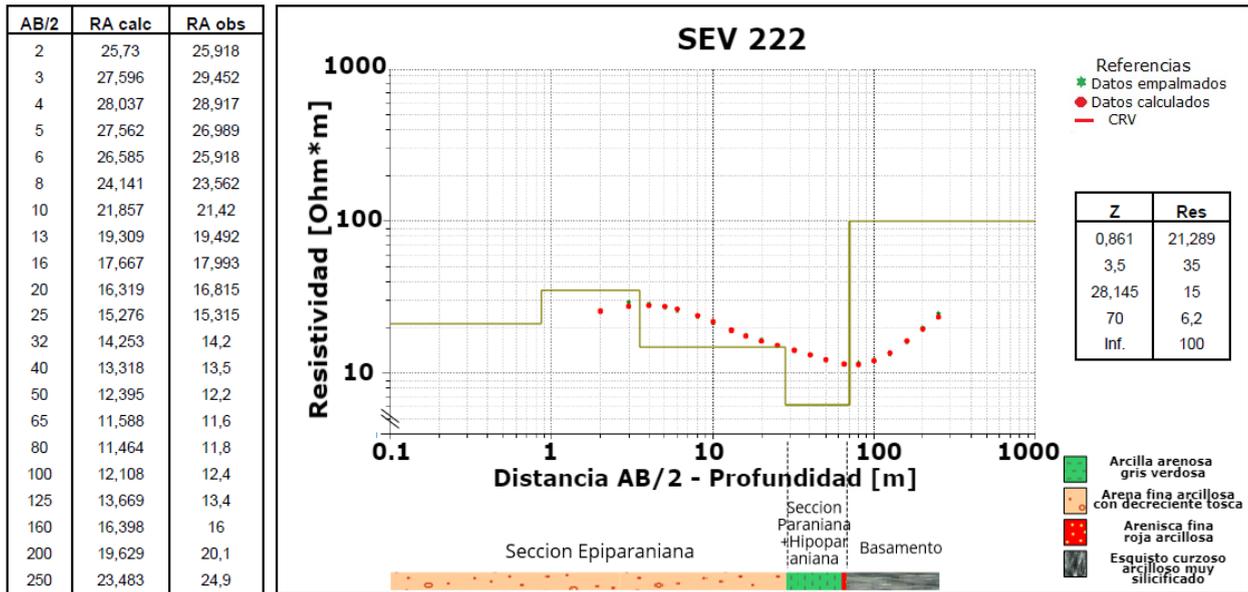
## Resultados

Bajo la metodología e hipótesis expuestas en la sección anterior, 46 de los 49 SEV se pudieron resolver dentro de la tolerancia propuesta ( $RMSE \leq 5\%$ ). Los SEV 263 y 264 poseen buen ajuste a altas

profundidades, pero en los primeros 50 metros presentan altas variaciones de resistividad debido presumiblemente a la presencia de tosca, lo cual no permitió un ajuste dentro de la tolerancia; pero debido a que el objetivo es más profundo (500 y 430 metros, respectivamente, tomado desde la superficie) se incluyen estos sondeos en los resultados. Por último, la curva de campo del SEV 229 presentó algunas variaciones en los primeros tramos de la curva que resultan en un ajuste levemente superior a la tolerancia prefijada.

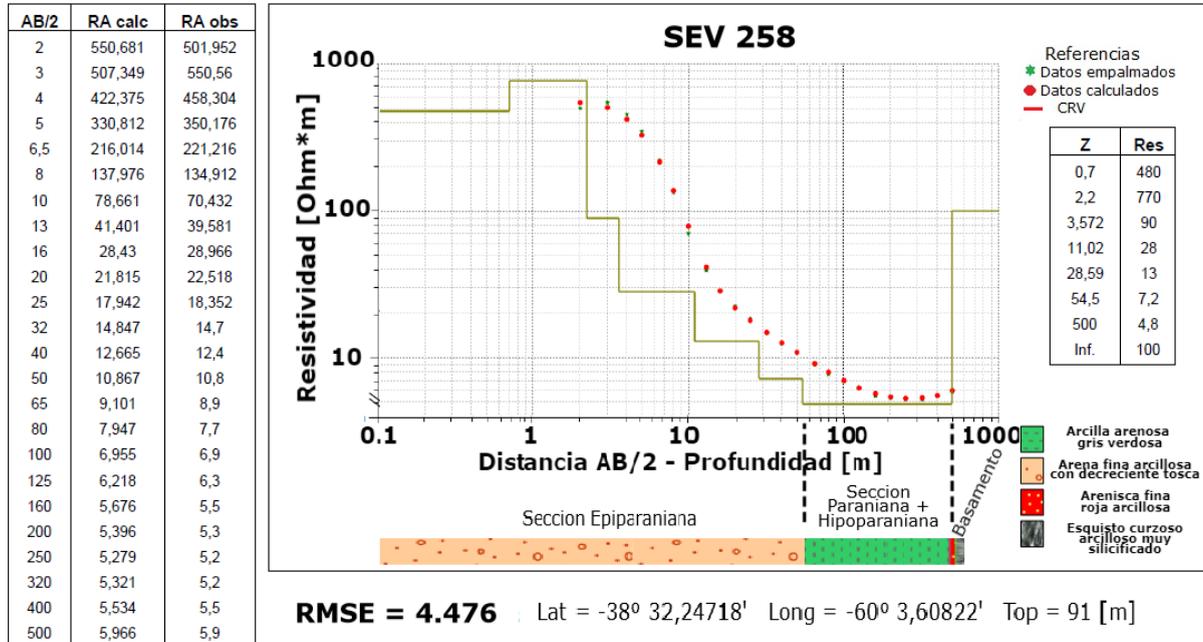
La Figura 3 muestra dos curvas características de la zona explorada junto a su interpretación hidrogeológica. Como se ha argumentado, con base en la homogeneidad de la zona geológica se ha respetado la resistividad de  $100 \text{ Ohm} \cdot \text{m}$  para el basamento resistivo en todos los casos. Este hecho nos lleva a modelar al basamento de forma más bien superficial en la medida que la CRAO tiende a los 45 grados, como es el caso de Figura 3A; y basamentos más profundos, incluso cercanos al  $AB/2$  máximo en zonas donde la CRAO crece levemente, como es el caso de la Figura 3B.

A)



RMSE = 2.673 Lat = -37° 58,575' Long = -60° 3,60822' Top = 202 [m]

B)



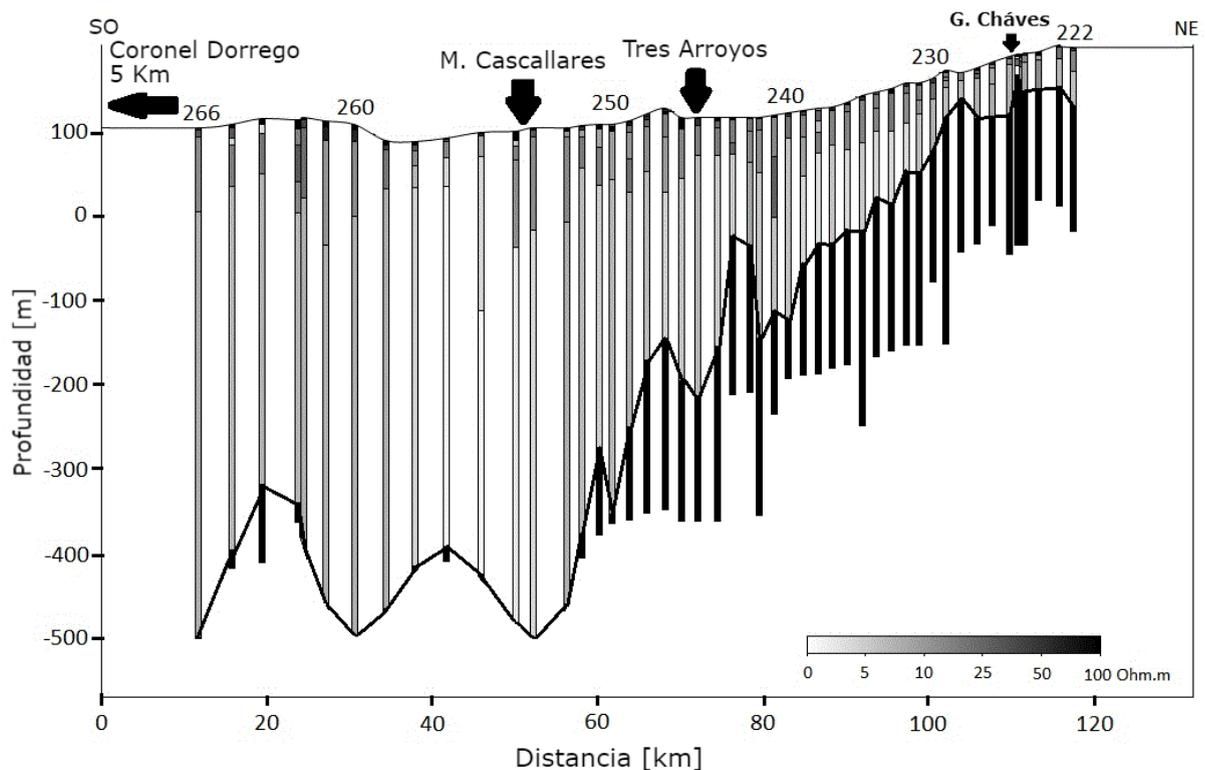
RMSE = 4.476 Lat = -38° 32,24718' Long = -60° 3,60822' Top = 91 [m]

Figura 3. Datos observados (CRAO), calculados (CRAC), CRV e interpretación hidrogeológica para los SEV 222 (A) y 258 (B)

característicos de la sección en el sector NE y SO, respectivamente.

Notar que la escala horizontal es logarítmica también para las secciones hidrogeológicas.

El promedio general de ajuste es de  $RMSE = 3.78\%$  sobre todos los SEV. Los resultados se visualizan en la Figura 4. En el sector noreste, el basamento se encuentra más próximo a la superficie, comienza en 170 msnm y continúa con una profundización irregular que alcanza los -480 msnm en el sector suroeste.

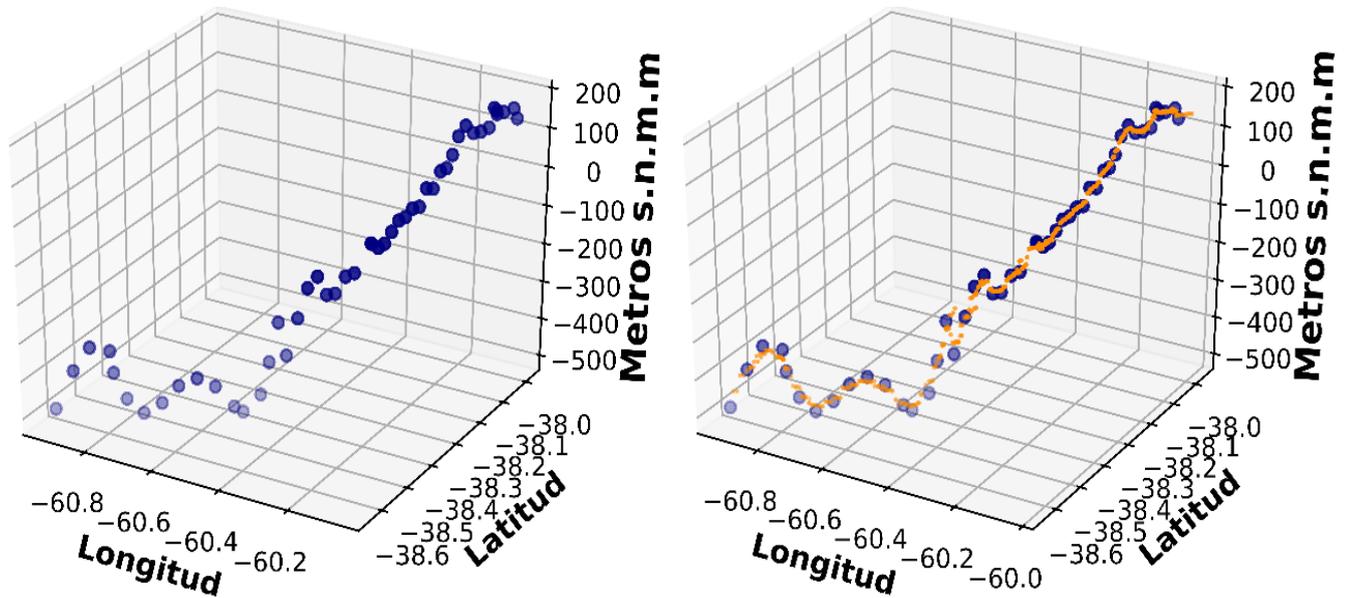


**Figura 4.** Resultados de los 49 SEV con sus referencias regionales, resistividad y profundidad. La curva negra representa la profundidad

modelada para el basamento resistivo.

## Sección continua

El ajuste del algoritmo BA ha sido muy bueno, los errores de entrenamiento y testeo rondan el 96 % (reducción de la varianza). Los parámetros elegidos son los que minimizan el error esperado de testeo, promediado sobre cien particiones aleatorias 80-20 de los datos originales. A continuación detallamos los parámetros óptimos que hemos hallado y utilizado en la aplicación del algoritmo: sólo latitud y longitud como variables de entrenamiento, profundidad de árboles sin poda, dos muestras mínimas y sólo una característica considerada por nodo. Como es usual por defecto en *Scikit Learn* (Pedregosa *et al.*, 2011), se han utilizado 500 árboles en el bosque. La Figura 5 muestra en naranja las interpolaciones de profundidad de basamento obtenidas mediante SEV.

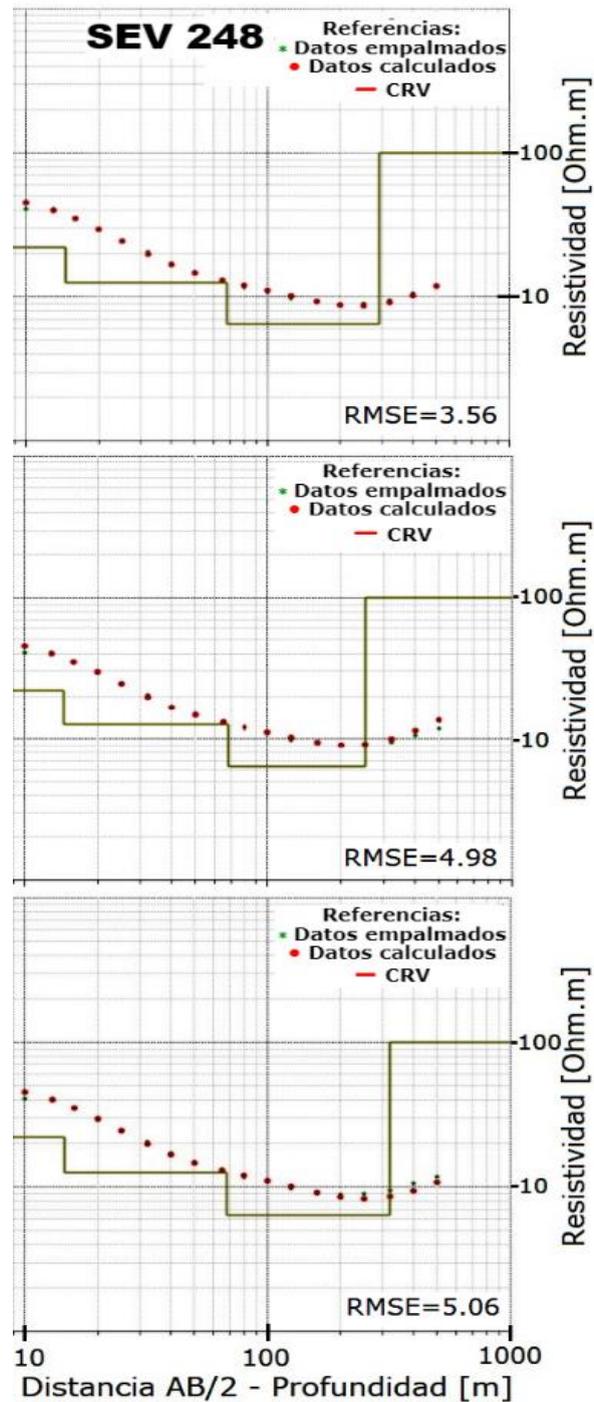


**Figura 5.** Representación tridimensional de las profundidades del basamento obtenidas por SEV. La imagen izquierda muestra en azul dichas alturas tomadas desde el elipsoide de referencia. La imagen derecha agrega en naranja los valores interpolados mediante la implementación óptima de BA.

## Análisis de incertidumbre

Tal como fuera descrito en la sección de incertidumbre, se procedió a calcular la IMP de cada SEV. A modo de ejemplo, en la Figura 6 se puede ver parte de la interfaz del *software SEV's*; se calculan las diferencias de profundidad respecto a la POB (270 m) del SEV 248. Si

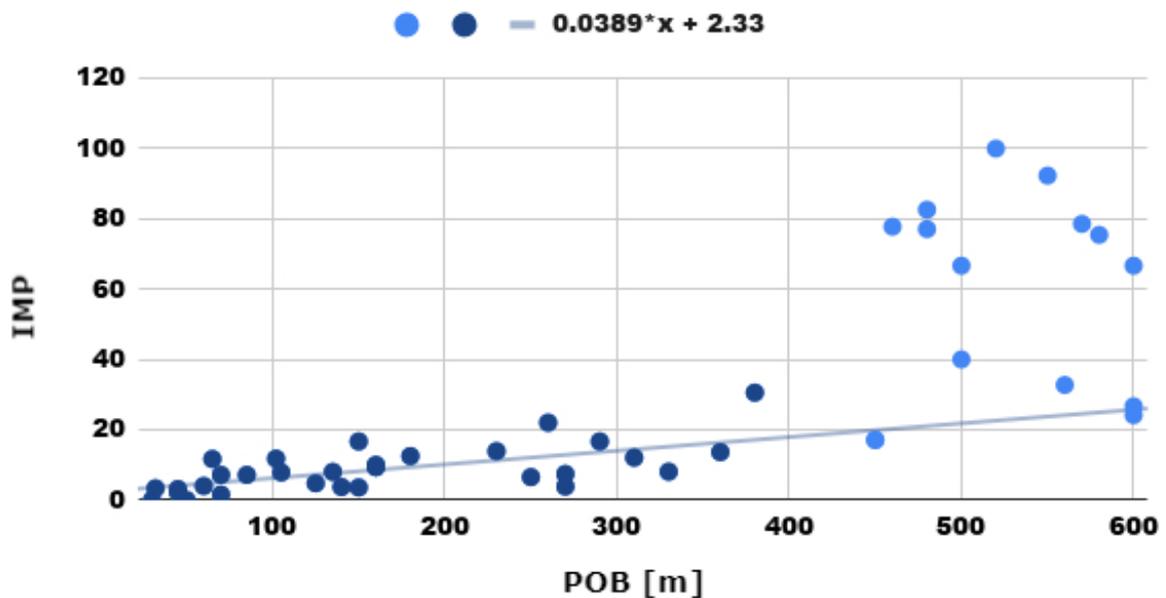
proponemos el basamento a 250 o 320 m alcanzamos la tolerancia propuesta. Tomamos la diferencia entre la POB y 320 m por ser la máxima, así obtenemos una IMP de 18 % (270 m  $\pm$  50 m).



**Figura 6.** El SEV 248 tiene su POB a los 270 metros, con un RMSE = 3.6 % (arriba). Reduciendo la profundidad verdadera del basamento,

a los 250 metros alcanzamos la tolerancia propuesta (centro),  
similaramente a los 320 metros si aumentamos la profundidad (abajo).

Una vez obtenida la IMP para cada SEV, como puede verse en la  
Figura 7, los graficamos en función de la POB. Hemos hallado una clara  
tendencia lineal entre ambas propiedades. La dispersión de los valores  
también crece con la POB. Se ajustó una recta de regresión lineal  
mediante mínimos cuadrados para modelar la tendencia, que parece  
desaparecer para POB mayores a 400 m.



**Figura 7.** El gráfico muestra la IMP en función de la POB para cada uno de los SEV. Se calcula una función lineal para valores menores a 400 m de POB (en azul oscuro), y extrapolada al resto del gráfico (en azul claro).

## Discusión e interpretación

En la Figura 4 podemos notar que por encima del basamento se distingue claramente una capa de resistividad baja que varía entre los 2.6 y 13.3 Ohm.m de resistividad, y de 10 a 500 m de espesor. Esta capa es la interpretada como sección Paraniana e Hipoparaniana en la Figura 3; la sección Hipoparaniana es de reducido espesor respecto a las demás secciones hidrogeológicas, como se vio en la sección de hidrogeología; la Paraniana presenta grandes espesores, sumado a bajas de su salinidad, y se ha asociado esta sección visible en la Figura 4 a la combinación de ambas secciones terciarias. Además, considerando el trabajo geoeléctrico antecedente de escala regional de Winzettel y Varni (2007) (ver Figura 4 del citado trabajo) podemos efectivamente correlacionar ambos resultados tanto para la profundidad del basamento como para el espesor de la sección Paraniana. Esta misma tendencia regional de profundización hacia el SO de roca paleozoica que subcribe sedimentos terciarios también la describe de modo genérico Ramos (1999) en su contexto estructural.

Con base en las POB halladas, la técnica de interpolación utilizada es la de mejor ajuste conocido, el modelo puede predecir valores para los cuales no fue entrenado con un puntaje esperado de 96 %, lo cual

nos permite obtener una distribución continua de nuestro objetivo. Sin embargo, debe ser advertido como una limitación el hecho de haber interpolado en longitud y latitud, no en coordenadas planas. Puesto que si la interpolación se realiza en el último caso, no podemos asegurar a priori que BA sea el método más indicado.

Como se ha visto en la sección anterior, existe una clara correlación entre la IMP y la POB, cuyo coeficiente de Pearson es de 0.8. Los SEV con IMP mayor a 40 % están claramente por fuera de la tendencia propuesta. Esto puede explicarse debido a las pocas observaciones profundas que poseen los SEV 254, 255, 256, 259, 260, 261, 262, 265 y 266. Esto es, en las observaciones hechas con distancias AB/2 de 500 m a pesar de poder notar la presencia del basamento son insuficientes para poder moldearlo dentro de la incertidumbre esperable; se necesitarían distancias AB/2 más largas para modelar el basamento con una menor incertidumbre.

## Conclusiones

Se ha podido cumplir ampliamente con el objetivo propuesto en la primera sección. El estudio realizado es de escala regional y presenta una densidad de observaciones de al menos el doble que los trabajos precedentes, lo cual constituye una importante contribución para el

conocimiento de la estructura acuífera de la Cuenca Interserrana.

Las hipótesis geológicas introducidas con base en los estudios antecedentes permitieron hallar efectivamente las POB de todos los SEV dentro de la tolerancia propuesta, salvo un solo caso. Además, estas observaciones discretas pudieron ser interpoladas bajo los mejores estándares actuales.

El basamento hidrogeológico posee bajas profundidades hacia el NE, en correspondencia con el afloramiento de Gonzales Chávez; continúa con una progresiva profundización hacia el SO, alcanzando valores máximos de 600 m cruzando el río Quequén Salado. También se pudieron identificar y correlacionar las secciones Hipoparaniana y Paraniense en los resultados mostrados en Figura 4. Los valores de resistividad superiores a 10 Ohm.m por encima del basamento podrían estar indicando la presencia de acuíferos de agua dulce, al igual que muestra el análisis químico del pozo Gil-1 para la salinidad, que en particular muestra un incremento con la profundidad de los sedimentos, hecho reflejado en las CRV en Figura 4.

Como limitaciones del presente estudio se puede mencionar lo discutido en la sección anterior acerca de la interpolación usando longitud y latitud; pero también el hecho de carecer de perforaciones profundas que sirvan de referencia y permitan ajustar los modelos geoelectricos. A pesar de esto, los modelos aquí presentados satisfacen todas las evidencias geológicas e hidrogeológicas publicadas en la zona, y cumplen con los estándares de procesamiento.

El análisis de incertidumbre realizado junto a la tendencia hallada para una tolerancia máxima del RMSE = 5 % y resistividad verdadera

fija para el basamento nos han permitido proponer recomendaciones a las tareas de campo, y así minimizar la incertidumbre de las POB halladas, obteniendo un modelo de basamento aún más confiable. Finalmente, debido a la gran utilidad de este análisis, es deseable que la tendencia lineal se confirme con más SEV, al igual que la POB con otra técnica geofísica o futuras perforaciones profundas.

### **Agradecimientos**

A la Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas de la Universidad Nacional de La Plata por brindar el apoyo instrumental y técnico necesario, sin el cual la presente investigación no hubiera sido posible. A Milagros Jerger, por sus importantes contribuciones a la traducción de este artículo.

### **Referencias**

- Barends, F. B., Brouwer, F. J., & Schröder, F. H. (eds.). (1995). *Land subsidence* (pp. XI-XIV). Rotterdam, The Netherlands: AA Balkema.
- Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1), 5-32.
- Campo-de-Ferreras, A. M., & Piccolo, M. C. (2002). Hidroquímica del arroyo Pescado Castigado. *Actas III Jornadas Nacionales de Geografía Física*, Santa Fe (p. 97).
- Dirección Nacional de Geología y Minería. (1970). *Perfiles de perforaciones periodo 1936-1945. Publicación 153, 146*. Argentina: Ministerio de Economía y Trabajo de la Nación.

- Domingos, P. (2012). A few useful things to know about machine learning. *Communications of the ACM*, 55(10), 78-87.
- García, J. (1969). El agua subterránea en la cuenca del Quequén. *Relatorio de la reunión sobre la geología del agua subterránea de la provincia de Buenos Aires. Comisión de Investigaciones Científicas* (pp. 91-97). La Plata, Argentina.
- Giaconi, L. M., Amboni, B. C., & Giaconi, M. N. (2014). Aspectos geológicos y geotécnicos preliminares de la fundación de la presa del Arroyo Blanco, Tandil. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, (32), 31-52.
- González, N. (2005). Los ambientes hidrogeológicos de la Provincia de Buenos Aires. *Relatorio del 16 Congreso Geológico Argentino* (pp. 359-374). La Plata, Argentina.
- Harrington, H. J. (1970). Las Sierras Australes de Buenos Aires, República Argentina: Cadena aulacogénica. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 25(2), 151-181.
- Hastie, T., Tibshirani, R., & Friedman, J. (2009). *The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction*. Springer Science & Business Media. Recuperado de <https://hastie.su.domains/Papers/ESLII.pdf>
- Hernández, M. A., Filí, M., Auge, M., & Ceci, J. H. (1979). Geohidrología de los acuíferos profundos de la Provincia de Buenos Aires. *VI Congreso Geológico Argentino (II)*, Buenos Aires (pp. 479-500).
- Johansen, H. K. (1975). An interactive computer/graphic- display-

terminal system for interpretation of resistivity soundings.

*Geophysical Prospecting*, 23(3), 449-458.

Kruse, E. (1993). El agua subterránea y los procesos fluviales en la región centro oriental de la provincia de Buenos Aires.

*Caracterización ambiental de la provincia de Buenos Aires. CIC La Plata*, 2, 15.

Kruse, E., Varela, L., Laurencena, P., & Deluchi, M. (1998). Efectos del agua subterránea en la configuración de los cauces de la llanura interserrana de la provincia de Buenos Aires (Groundwater effects on the stream network in the intermountain plain in the Province of Buenos Aires). In: *Actas del X Congreso Latinoamericano de Geología y VI Congreso Nacional de Geología Económica, Buenos Aires*, 1, 340-344.

Maillet, R. (1947). The fundamental equations of electrical prospecting. *Geophysics*, 12(4), 529-556.

Maiti, S., Gupta, G., Erram, V. C., & Tiwari, R. K. (2011). Inversion of Schlumberger resistivity sounding data from the critically dynamic Koyna region using the Hybrid Monte Carlo-based neural network approach. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 18, 179-192, 2011. Recuperado de <https://doi.org/10.5194/npg-18-179-2011>

Mehta, P., Bukov, M., Wang, C. H., Day, A. G., Richardson, C., Fisher, C. K., & Schwab, D. J. (2019). A high-bias, low-variance introduction to machine learning for physicists. *Physics Reports*, 810, 1-124.

Nigro, J., & Perdomo, S. (2017). Desarrollo de software de inversión

de datos 1D para sondeos eléctricos verticales Schlumberger.  
En: *XXVIII Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas (AAGG 2017) y Tercer Simposio sobre Inversión y Procesamiento de Señales en Exploración Sísmica (IPSES\17)*. La Plata, del 17 al 21 de abril de 2017.

- Nussbaum, M., Spiess, K., Baltensweiler, A., Grob, U., Keller, A., Greiner, L., ... & Papritz, A. J. (2018). Evaluation of digital soil mapping approaches with large sets of environmental covariates. *Soil*, 4(1), 1-22.
- Li, J., Heap, A. D., Potter, A., & Daniell, J. J. (2011). Application of machine learning methods to spatial interpolation of environmental variables. *Environmental Modelling & Software*, 26(12), 1647-1659.
- Llambías, E., & Prozzi, C. R. (1975). Ventania. *Geología de la Provincia de Buenos Aires. 6 Congreso Geológico Argentino, Relatorio. Buenos Aires*, 79-101.
- Loupe, G. (2014). Understanding random forests: From theory to practice. *arXiv*, preprint arXiv:1407.7502
- Orellana, S. E. (1982). *Prospección geoeléctrica en corriente continua. Vol. 1* (2a ed.). Madrid, España: Paraninfo.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O.,... & Vanderplas, J. (2011). Scikit-learn: Machine learning in Python. *The Journal of Machine Learning Research*, 12, 2825-2830.

- Poland, J. F. (1984). *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal*. Studies and reports in hydrology. Recuperado de <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000065167>
- Prasad, A. M., Iverson, L. R., & Liaw, A. (2006). Newer classification and regression tree techniques: Bagging and random forests for ecological prediction. *Ecosystems*, 9(2), 181-199.
- Quiroz-Londoño, O. M., Martínez, D. E., Massone, H. E., Bocanegra, E. M., & Ferrante, A. (2006). Hidrogeología del área Interserrana bonaerense: cuencas de los arroyos El Moro, Tamangueyu y Seco. *8 Congreso Latinoamericano de Hidrología Subterránea*, Asunción, Paraguay.
- Quiroz-Londoño, O. M., Martínez, D., & Massone, H. (2012). Estimación de recarga de acuíferos en ambientes de llanura con base en variaciones de nivel freático. *Tecnología y ciencias del agua*, 3(2), 123-130.
- Raj, A. S., Srinivas, Y., Oliver, D. H., & Muthuraj, D. (2014). A novel and generalized approach in the inversion of geoelectrical resistivity data using Artificial Neural Networks (ANN). *Journal of Earth System Science*, 123(2), 395-411.
- Ramos, V. A. (1999). Las provincias geológicas del territorio argentino. *Geología Argentina*, 29(3), 41-96.
- Sala, J. M. (1975). Recursos hídricos (especial mención de las aguas subterráneas). En: *Relatorio Geología de la Provincia de Buenos Aires. IV Congreso Geológico Argentino*. Buenos Aires, Argentina, (p. 169).

- Sala, J. M., & Cavalié, C. C. (1993). *Contribución al mapa geohidrológico de la provincia de Buenos Aires*. Capital Federal, República Argentina: Consejo Federal de Inversiones (CFI).
- Sierra, L., Weinzettel, P. A., Dietrich, S., Bea, S., & Cacciabue, L. (septiembre, 2016). Combinación de tomografía eléctrica y perfilaje de pozo para caracterizar variaciones laterales del acuífero pampeano. En: *IX Congreso Argentino de Hidrogeología y VII Seminario Hispano-Latinoamericano Sobre Temas Actuales de la Hidrología Subterránea*.
- Stefanescu, S., Schlumberger, C., & Schlumberger, M. (1930). Sur la distribution électrique potentielle autour d'une prise de terre ponctuelle dans un terrain à couches horizontales, homogènes et isotropes. *Journal de Physique et le Radium*, 1(4), 132-140.
- Sunde, E. D. (1949). *Earth conduction effects in transmission systems*. Dover, UK: Publications Inc.
- Terraza, J., & Deguillén, A. (1973). *Nuevos afloramientos paleozoicos de la provincia de Buenos Aires* (trabajo inédito). Bahía Blanca, Argentina: Universidad Nacional del Sur.
- Thessen, A. (2016). Adoption of machine learning techniques in ecology and earth science. *One Ecosystem*, 1, e8621.
- Varni, M., Weinzettel, P., & Usunoff, E. (2010). Caracterización hidrodinámica e hidroquímica de la cuenca del Arroyo Claromecó, provincia de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina: Consejo Hídrico Federal.
- Weinzettel, P., Varni, M., & Usunoff, E. (2005). Caracterización

hidrogeológica del área urbana y periurbana de la ciudad de Tres Arroyos, provincia de Buenos Aires. En: *Actas. IV Congreso Argentino de Hidrogeología. Río Cuarto, Córdoba* (vol. 25, pp. 171-180).

Weinzettel, P. A., & Varni, M. (2007). Aporte al conocimiento del subsuelo de la cuenca del arroyo Claromecó, provincia de Buenos Aires. *Taller de Geofísica Aplicada a la Hidrogeología*, 13-23.

Zohdy, A. A. (1989). A new method for the automatic interpretation of Schlumberger and Wenner sounding curves. *Geophysics*, 54(2), 245-253.