

INVESTIGACIÓN HIDROGEOLÓGICA EN UN VALLE SERRANO MEDIANTE LA APLICACIÓN DE MÉTODOS GEOELÉCTRICOS

HYDROGEOLOGICAL INVESTIGATION IN A VALLEY BY MEANS OF THE APPLICATION OF GEOELECTRICAL METHODS

Pablo Ariel Weinzettel¹, Sebastián Dietrich², Marcelo Varni³, Leonardo Sierra⁴

1 Instituto de Hidrología de Llanuras, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

2 Instituto de Hidrología de Llanuras, CONICET, Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires

3 Instituto de Hidrología de Llanuras, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Bs.As.

4 Instituto de Hidrología de Llanuras

E mail: paw@faa.unicen.edu.ar

RESUMEN

Se realizó una exploración geofísica mediante sondeos eléctricos verticales y tomografía de resistividad eléctrica en una zona ubicada al sudoeste de la ciudad de Tandil. El sector corresponde a un valle de pequeñas dimensiones en la cual se halla emplazada una cancha de golf y un barrio residencial. El objetivo del trabajo ha sido determinar los espesores del sector acuífero y evaluar las reservas de agua para aumentar la extracción y el abastecimiento a todo el complejo. La zona de estudio presenta la misma problemática que gran parte del área de Tandil, en la cual la roca del basamento se encuentra muy cercana a la superficie produciendo una situación muy compleja para la obtención de agua subterránea.

Mediante la exploración realizada se logró complementar los resultados obtenidos mediante sondeos eléctricos verticales y tomografía de resistividad eléctrica, con lo cual se pudo definir la geometría del acuífero y las zonas más adecuadas para nuevas perforaciones. Por otra parte, y a partir de los resultados de la exploración, se realizaron cálculos de la recarga y reservas de agua subterránea lo cual permitió evaluar los caudales diarios a extraer.

Palabras Clave: sondeos eléctricos verticales, tomografía eléctrica, hidrogeología, recarga.

ABSTRACT

A geophysical survey was performed in an area located to the southwest of Tandil city by applying vertical electrical soundings (VES) and electrical resistivity tomography (ERT). The study site lies within a small alluvial valley where a golf course and a gated community are located. The objectives of this work were to determine the thickness of the phreatic aquifer and to estimate groundwater reserves. Both aspects are required to increase the groundwater supply for the whole complex. The study zone has the same difficulties as most of the Tandil city, where hydrogeological basement lies very close to surface, which complicates groundwater extraction. By combining VES and ERT methodologies, the aquifer geometry and the more suitable zones for new pumping wells construction were defined. In addition, groundwater recharge and reserves were estimated, which allowed evaluating daily pumping rates.

Keywords: vertical electric sounding, electric resistivity tomography, hydrology, recharge

INTRODUCCIÓN

Los métodos geoelectrónicos son una herramienta fundamental para la exploración de diferentes ambientes hidrogeológicos. En particular, los sondeos eléctricos verticales (SEV) constituyen un método de exploración rápido, efectivo y económico para la caracterización de una zona. Por su parte, la tomografía de resistividad eléctrica (TRE) ha mostrado en los últimos años un incremento en su utilización ya que presenta la ventaja de obtener perfiles de resistividad continuos a partir del desarrollo de potentes programas de inversión (Ellis y Oldenburg, 1994; Loke et al., 2013). A partir de estos perfiles se puede ver claramente la presencia de discontinuidades como fallas o cambios litológicos abruptos especialmente en zonas con cierta complejidad estructural. Por otra parte permite caracterizar al acuífero a partir de las resistividades obtenidas relacionando estas con los parámetros hidráulicos y observar heterogeneidades y anisotropías del mismo (Slater et al., 2007; Niwas et al., 2011; Perdomo et al., 2014) permitiendo de esta forma mejorar la conceptualización del sistema acuífero y plantear de una manera más eficiente su explotación. También es utilizada para identificar zonas contaminadas o hacer un seguimiento de una pluma contaminante (Koestel et al., 2008; Garré et al., 2010) entre otras aplicaciones. Para el estudio de la zona no saturada también ha mostrado gran utilidad, pudiéndose determinar pasajes preferenciales de agua al acuífero (Dietrich et al., 2014).

Ambas técnicas, SEV y TRE, se complementan satisfactoriamente. En general, en una exploración hidrogeológica, resulta conveniente comenzar con sondeos eléctricos verticales para obtener mapas de resistividades, profundidades y otros parámetros, ya que si las aperturas de cables no son muy importantes, es una operación rápida que permite relevar áreas extensas en un tiempo razonable.

Cuando se quiere determinar las zonas más adecuadas para perforaciones en un acuífero con basamento hidrogeológico somero, lo conveniente es realizar una campaña de SEV y a partir de su interpretación, plantear una serie de tomografías de resistividad eléctrica en los lugares más apropiados según los resultados previos obtenidos. Esta forma de trabajo brinda mayor seguridad en la caracterización del acuífero y permite ubicar los lugares con mayores posibilidades de éxito para las perforaciones exploratorias.

El objetivo de este trabajo fue realizar una investigación hidrogeológica en el sitio denominado El Valle de Tandil. El mismo es un emprendimiento que comprende un campo de golf y un barrio residencial, ubicados en cercanías de la ciudad de Tandil en la provincia de Buenos Aires. La motivación para el desarrollo de la investigación ha sido las limitantes del sector para la extracción de agua subterránea ya que el mismo se encuentra emplazado en un pequeño valle que alberga un acuífero de poco espesor.

Descripción del sitio de estudio

La zona se encuentra enmarcada por cerros del basamento de las sierras de Tandil. Este sistema está compuesto por rocas ígneas y metamórficas correspondientes al basamento Paleoproterozoico denominado Complejo Buenos Aires (Cingolani, 2011). El valle se presenta flanqueado por sierras que se elevan entre 270 y 430 m sobre el nivel del mar, siendo la cota del centro del valle de 235 m.

Al lugar se accede transitando unos cinco kilómetros por la calle Don Bosco hacia el Sudeste de la ciudad de Tandil (Figura 1). La roca del basamento se encuentra aflorando en los flancos y se halla cubierta con sedimentos en la zona central del valle, sector donde se emplaza la cancha de golf. Actualmente, una veintena de casas residenciales se encuentran construidas sobre roca en las zonas más elevadas. La presencia de un relleno sedimentario permite centrar la exploración en el mismo ya que aunque los espesores no sean importantes siempre es más fácil y económica la perforación en los mismos. En contraposición, las exploraciones realizadas en zonas sin cubierta sedimentaria son más dificultosas. No obstante, los métodos geofísicos empleados también permiten aumentar las posibilidades de lograr los objetivos en ese tipo de ambiente (Weinzettel et al., 2011).

El sector del valle con sedimentos acuíferos presenta un área de 322.400 m², y tiene su eje prácticamente en dirección Este-Oeste. Por el mismo drena un arroyo que no tiene

denominación con un escaso caudal. En el emprendimiento se han realizado obras para retener el agua del mencionado arroyo construyendo diques que dan lugar a una serie de ocho pequeños lagos. El objetivo de los mismos, además de un efecto de enriquecimiento paisajístico, es el de almacenar agua en los momentos de la ocurrencia de precipitaciones y utilizar la misma para riego del campo de golf. En el sector del estudio el acuífero es muy limitado en cuanto a espesor. No obstante, aguas abajo a unos 300 m del límite del predio se riegan cultivos de papa con pozos de importante caudal, por lo que el acuífero tiene una clara profundización hacia ese sector.

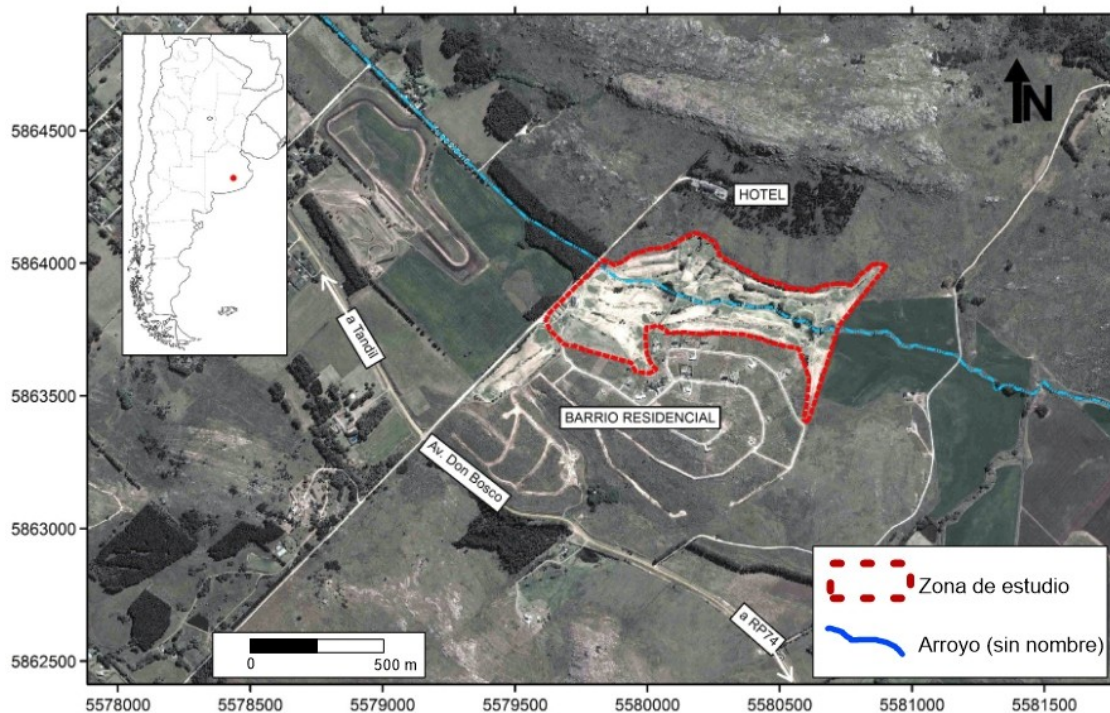


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.
Figure 1. Location of the study site.

METODOLOGÍA

El trabajo se realizó básicamente con el apoyo de las técnicas geofísicas de sondeos eléctricos verticales y de tomografías de resistividad eléctrica. También se efectuaron mediciones del nivel freático en los pozos y relevamiento de datos acerca del régimen de funcionamiento de los mismos.

Sondeos eléctricos verticales

Se ejecutaron 13 Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en la zona de interés, dos de ellos se ubicaron junto a pozos de explotación y otros en las posibles ubicaciones de las tomografías eléctricas. Los mismos se realizaron utilizando la configuración electródica de Schlumberger. La apertura máxima de alas fue de 65 m, debido a la escasa profundidad de la roca. Para su interpretación se utilizaron los programas Zohdy (1975) e IPI2Win (2001), a partir de los cuales se obtuvo un mapa de espesor sedimentario. En la Figura 2 puede observarse la posición de los SEV. También se ha incluido la ubicación de los 6 pozos existentes en el valle.

Tomografías de resistividad eléctrica

En base a la interpretación de los SEV, se posicionaron cinco Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE). El objetivo de las mismas fue conocer la disposición del basamento y detectar la roca alterada y la posible presencia de fracturas. Se utilizó un equipo AGI modelo SuperSting

R1/IP dotado de 56 electrodos con un espaciamiento de 5 m. La cantidad de electrodos utilizado permitió la obtención de secciones de 275 metros de longitud. Cada una de las tomografías ha sido nivelada en toda su extensión con nivel óptico, para lo cual se tomó un valor arbitrario de cota 100 m al comienzo de cada transecta. Las tomografías fueron interpretadas con el programa EarthImager 2D (AGI, 2005) que tiene en cuenta la variación de la topografía en el proceso de inversión.



Figura 2. Ubicación de sondeos eléctricos verticales y pozos.
Figure 2. Location of vertical electrical soundings and pumping wells.

Las tomografías se realizaron con dos configuraciones electrónicas: Schlumberger y dipolo-dipolo. Se decidió por estas ya que la primera presenta mayor sensibilidad a las variaciones de resistividad en profundidad, mientras que la configuración dipolo-dipolo detecta mejor las variaciones horizontales, como pueden ser fracturas o zonas alteradas (Zhou y Dahlin, 2003; Dahlin y Zhou, 2004; Samouëlian et al., 2005). En la Figura 3 se observa la ubicación elegida para las TRE.

Perforaciones actuales

Se encuentran operativos cuatro pozos. La mayor parte de los mismos se agrupa en el sector Este de la zona (pozos 4, 5 y 6), mostrando en cierta forma una mejor aptitud para la extracción de agua. No pudieron obtenerse perfiles de los pozos ni sus características constructivas. La comunicación del operadora portó información de las bombas instaladas y la cantidad de horas de bombeo de los mismos. Esta información permitió estimar los caudales y rendimientos.

Volumen del acuífero

Se estimó el volumen de sedimentos que rellenan el valle utilizando la información de los espesores obtenidos a través de los SEV y las TRE. Se realizó la interpolación de la información mediante Kriging. La malla utilizada fue de 57 filas por 100 columnas y la integración en profundidad se realizó mediante la regla de Simpson. Luego se calculó el volumen del acuífero suponiendo que el nivel freático se encontraba a 3 m de profundidad en todo el área de estudio.

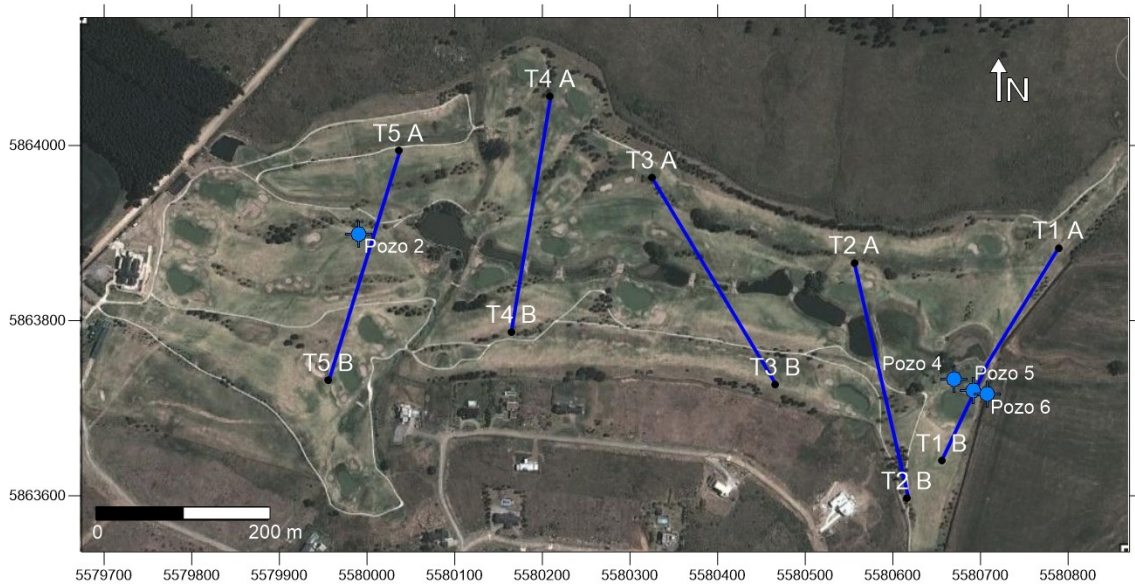


Figura 3. Ubicación de las tomografías de resistividad eléctrica. Las letras A y B indican el inicio y el final de cada tomografía.

Figure 3. Location of electrical resistivity tomographies. A and B indicate the beginning and the end of each tomography.

RESULTADOS

Sondeos eléctricos verticales

La interpretación de los SEV ha permitido definir la profundidad a la cual se encuentra el basamento hidrogeológico. La interpolación de los valores obtenidos mediante el método Kriging se presenta en la Figura 4. En la misma se ha delimitado la zona de mayor interés y se han dibujado las líneas de isoprofundidad del basamento. Como puede observarse se presenta una profundización de la roca hacia el sector Este. En la Tabla 1 se indican las profundidades obtenidas en cada uno de los SEV, de las cuales podría establecerse que la media para el sector es de 20 m. Las menores profundidades se presentan en cercanías ala entrada al complejo, en el sector Oeste, con unos 11 m y las mayores en las zona más alejada hacia el límite Este con 30 m de espesor sedimentario.

SEV	Prof. basamento (m)
1	12
2	15
3	21
4	20
5	22
6	26
7	27
8	18
9	12
10	17
11	30
12	26
13	12

Tabla 1. Profundidad al basamento según los SEV.
Table 1. Depth to basement according to VES results.

En cuanto a las resistividades obtenidas en cada SEV, las mismas presentan variaciones propias del ambiente. Se observan niveles con resistividades de 20 a 30 Ω m en los sectores acuíferos más someros y de unos 15 Ω m en los más profundos. En algunos SEV se observan niveles con resistividades algo más bajas de 9 Ω m (SEV 1 y 5).

En la Figura 4 puede verse claramente los sectores de mayor profundidad del basamento y los más propicios para la perforación de pozos. Dicha zona está ubicada donde se ejecutaron los SEV 6, 11 y 12, siendo este último lugar el que presenta mayores posibilidades de perforación. Por otra parte el otro sector de interés es el que se encuentra cercano al SEV 7 donde ya se hallan los pozos 4, 5 y 6.

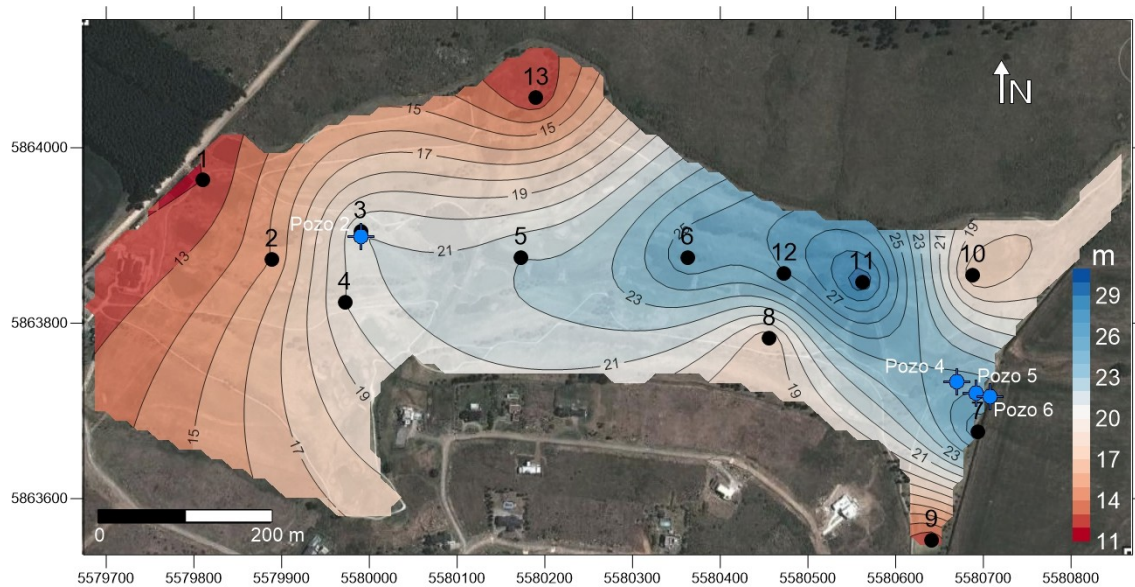


Figura 4. Mapa de isoprofundidad de la roca del basamento de acuerdo a los resultados de la exploración con sondeos eléctricos verticales.

Figure 4. Map showing the depth to basement according to electrical resistivity soundings results.

Tomografías de resistividad eléctrica

La utilización de esta metodología fue muy importante. A diferencia de los SEV, cuyas mediciones de resistividad son puntuales, con las tomografías se pudieron observar las variaciones laterales de las capas de interés en un perfil en dos dimensiones, lo cual aportó datos acerca de la presencia de roca alterada y de posibles fracturas. Las TRE, por otra parte, ajustan aceptablemente con el mapa confeccionado en base a los SEV. En las Figuras 5 a la 9 se presentan los resultados de la interpretación de cada TRE con las dos configuraciones electrónicas utilizadas. Para realizar una comparación se agrupan en cada figura el resultado obtenido con ambos dispositivos. Se hace notar que se utilizaron distintas escalas de resistividad para cada uno con el fin de obtener una mejor visualización de los contrastes. Otra diferencia es que el dispositivo dipolo-dipolo explora a mayor profundidad que el de Schlumberger, por lo que varía la escala vertical. En general se ha podido definir con buena precisión la posición tanto del basamento como del acuífero.

Para la ubicación de futuros pozos se tuvo en cuenta principalmente el resultado obtenido mediante el dispositivo de Schlumberger, mientras que con el dipolo-dipolo se pudieron conocer las discontinuidades que se producen en el basamento hidrogeológico.

Los sectores con mejores posibilidades son los correspondientes a algunas zonas de las tomografías 1 y 2 (Fig. 5 y 6). En el caso de la tomografía 1 el pozo propuesto se encuentra a unos 35 m del pozo 5 observándose claramente en la Figura 5a que en dicho sector se presenta la mayor profundidad a la roca basal, posiblemente cercana a los 30 m desde superficie. Dicho valor se encuentra apoyado en la interpretación del SEV 7, el cual arroja un valor de 27 m y se halla ligeramente desplazado del sector mencionado. La Figura 5b verifica lo observado, notándose mayor definición de la roca en profundidad. Respecto a esta última, el basamento se presenta muy cercano a superficie hacia el inicio de la tomografía, descendiendo

luego paulatinamente hacia los electrodos más alejados. El acuífero también sufre un aumento de su espesor con mayor desarrollo en la zona ubicada a partir de los 180 metros desde el inicio, coincidente con la zona de los pozos. Esto permite ver que el lugar elegido para las perforaciones actuales, realizadas en este sector, ha sido correcto.

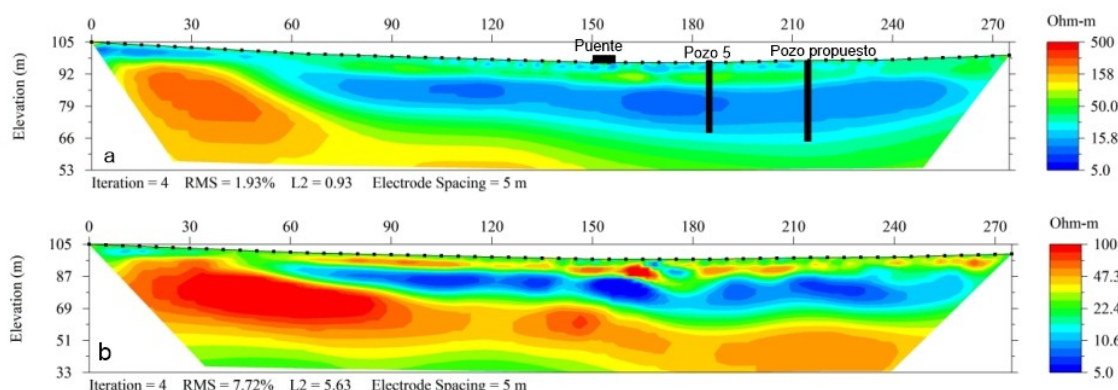


Figura 5. Tomografía 1, dispositivo a) Schlumberger b) dipolo-dipolo. Se indican el pozo 5 y un pozo propuesto cercano al SEV 7.

Figure 5. Tomography 1, with arrays a) Schlumberger and b) dipole-dipole. Pumping well n° 5 and a proposed well close to SEV 7 are indicated.

En la Figura 6 se observa una inclinación de la roca basal y del acuífero en forma inversa a lo planteado para la tomografía anterior. La Figura 6a muestra en la posición de 30 m, el mayor espesor para esta medición; al igual que en el sector anterior puede asumirse de unos 30 m desde la superficie hasta la roca, coincidente con la interpretación del SEV 11 ubicado en ese sector y que muestra el mayor espesor para los sondeos eléctricos realizados. Este resultado indica a esta zona como propicia para la realización de una perforación y es coherente con lo planteado en la interpretación de los SEV (Fig. 4). Se propone una perforación en la posición indicada en la Figura 6a. La interpretación del dispositivo dipolo-dipolo indica para la ubicación de los electrodos entre 90 y 120 metros la presencia de una posible falla en el basamento (Fig. 6b).

El sector de la tomografía 3 (Fig. 7a y 7b) muestra profundidades a la roca algo menores que en las tomografías anteriores con un espesor de unos 25 m en el sector del SEV 6 ubicado a 110 m desde el origen de la transecta. El dispositivo dipolo-dipolo indica una posible falla en la posición de 65 m desde el origen (Fig. 7b).

En la Figura 8a y 8b, se muestra el resultado de la tomografía 4 obtenidos con los dos dispositivos electrónicos. La posición del SEV realizado cercano al puente indica un espesor sedimentario de 22 m esta sería una posición interesante para una perforación de bajo caudal. La Figura 8b muestra una posible discontinuidad del basamento en la posición de 160 m producto de fallamiento.

La última TRE se muestra en la Figura 9 a y b. En la Figura 9a se indica la posición del pozo 2 actual y la del SEV 3 paramétrico con dicho pozo. El SEV mencionado indica una profundidad de 20 metros hasta la roca. No se conoce la profundidad del pozo mencionado, el mismo tiene instalada una bomba de baja potencia por lo que se presume que su caudal es bajo ya que bombea a una posición elevada como es el hotel ubicado en las inmediaciones al norte de la cancha de golf. El dispositivo dipolo-dipolo indica una posible falla en el basamento a los 95 m desde el inicio de la transecta, cercana al pozo 2 (Fig. 9b).

Pozos actuales

Se midió la profundidad de la superficie freática en los pozos 2, 4 y 5, obteniéndose un valor de 2,9 m para el pozo 2, 3,1 m para el pozo 4 y de 3 m para el pozo 5, todos corregidos al nivel del terreno. Según la información recabada los pozos tendrían una profundidad de entre 30 y 40 m, con un caudal no mayor a $10 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$.

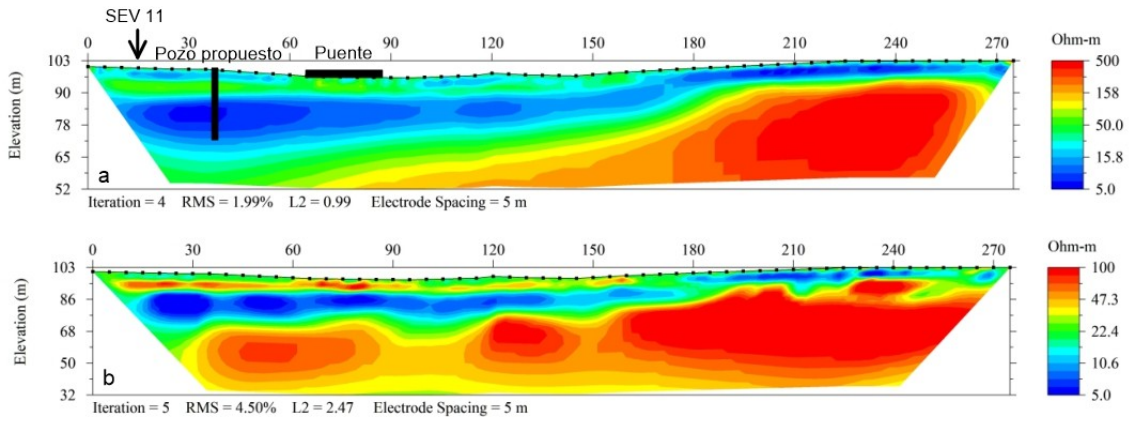


Figura 6. Tomografía 2, dispositivo a) Schlumberger b) dipolo-dipolo. Se observa la profundización del basamento en el inicio de la tomografía.
Figure 6. Tomography 2, with array a) Schlumberger and b) dipole-dipole. The deepening of basement is observed in the beginning of tomography.

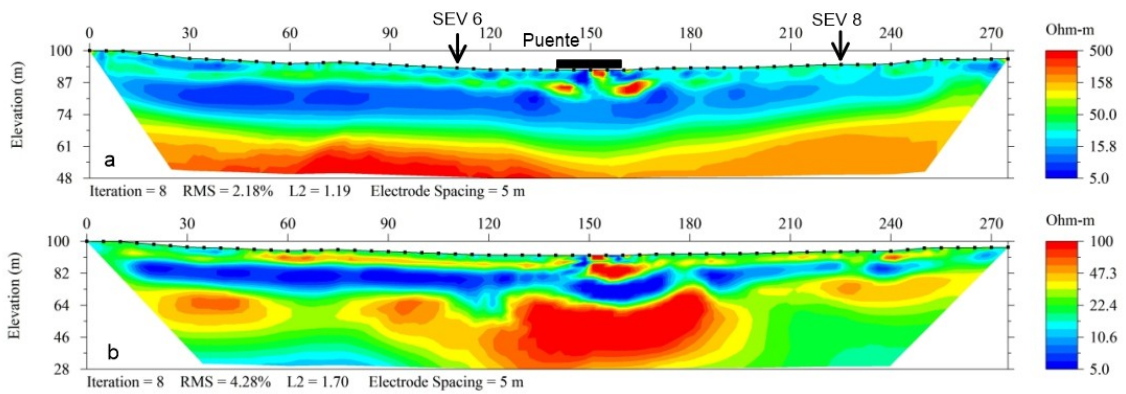


Figura 7. Tomografía 3, dispositivo a) Schlumberger b) dipolo-dipolo.
Figure 7. Tomography 3, with arrays a) Schlumberger and b) dipole-dipole.

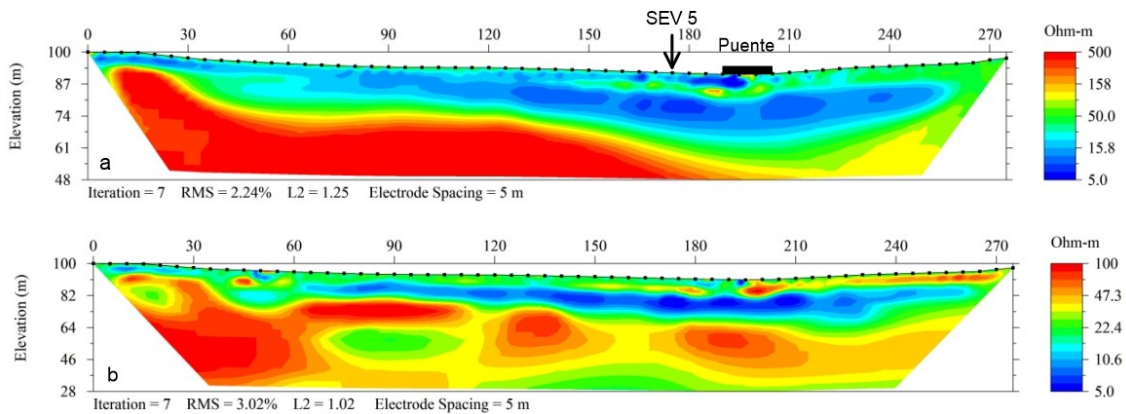


Figura 8. Tomografía 4, dispositivo a) Schlumberger b) dipolo-dipolo.
Figure 8. Tomography 4, with arrays a) Schlumberger and b) dipole-dipole.

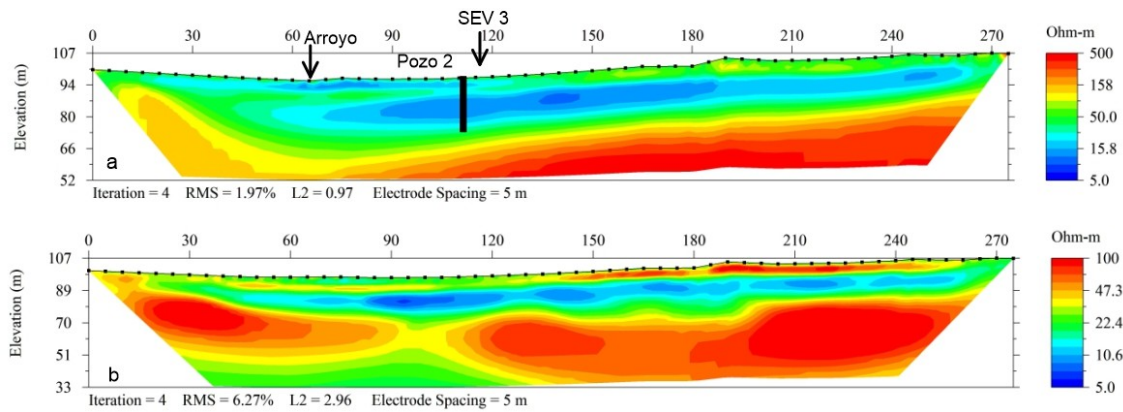


Figura 9. Tomografía 5, dispositivo a) Schlumberger b) dipolo-dipolo.
Figure 9. Tomography 5, with arrays a) Schlumberger and b) dipole-dipole.

Ubicaciones favorables para nuevos pozos

De lo observado en base a las dos metodologías utilizadas, se definen dos zonas con posibilidades de realizar perforaciones para reforzar la extracción actual. La primera zona corresponde al sector de la tomografía 1 y SEV 7. En dicha tomografía se observa un espesor algo mayor al que se encuentra en el pozo 5 ubicado en la misma línea de la tomografía.

Otro sector interesante para una perforación es la zona inicial de la tomografía 2 junto al SEV 11. Esta zona presenta el mayor espesor de todo el relevamiento realizado (Fig. 4). En la misma zona son interesantes también la posición del SEV 12, y con un poco menos de espesor la del SEV 6. En el resto de la zona relevada las profundidades a la roca no superan los 20 m. Puede suceder que algunos pozos no eroguen un caudal importante. No obstante, la distribución de pozos de bajo caudal que no concentren toda la extracción en determinadas zonas es una alternativa interesante en este tipo de sistemas. En este caso podría posicionarse un pozo en el SEV 5. Dichos pozos deberían ingresar al basamento algunos metros, considerando la posibilidad de extracción de agua de la roca, la cual en varias posiciones se observa fracturada.

Reservas de agua subterránea

En base al mapa de la Figura 4 se realizó un cálculo de las reservas de agua subterránea presente en los sedimentos acuíferos de la zona de estudio. Se entiende por reservas, en sentido amplio, a la totalidad del agua movilizable existente en un acuífero (Custodio y Llamas, 1976). La base para el cálculo de los espesores fue la roca del basamento, no teniéndose en cuenta el agua que se encuentra presente en la roca debido a que es difícil de mensurar y escapa a los alcances de este trabajo. Tampoco se tuvo en cuenta el flujo de agua subterránea que ingresa a la zona por el Oeste a través del escaso subálveo del arroyo que surca el sector. Se evidencia por los espesores observados que este aporte es muy exiguo.

En principio, el objetivo de este cálculo es conocer la posibilidad de extracción a partir de un acuífero de escaso espesor y alertar ante una posible sobreexplotación del recurso hídrico subterráneo.

Para el cálculo se supuso una porosidad eficaz de los sedimentos en un 8 %, aunque probablemente esta podría ser mayor por el tipo de ambiente geológico. Lamentablemente no se cuenta con información del tipo de sedimento atravesado en las perforaciones. Como no se pudo realizar un ensayo de bombeo por razones operativas de los pozos, se supuso esta porosidad basada en experiencias propias para sedimentos limo arenosos del pampeano (Weinzettel et al., 2005, Varni et al., 2013). La posición del nivel acuífero se fijó en 3 m contemplando un promedio entre las ubicaciones topográficas elevadas y las más cercanas al arroyo.

Los cálculos del espesor de la cubierta sedimentaria arrojaron un valor mínimo para el área de 11,8 m y un máximo de 29,5 m. El área de la zona es de 322.400 m² (Fig. 4). El cálculo del volumen arroja un valor de 5.533.775 m³. Considerando una porosidad eficaz de 8 % el

volumen de agua almacenado es de 442.702 m³ (Tabla 2). Este almacenamiento se drenaría con una extracción de 1.212 m³ d⁻¹ en un año si no hubiera recarga.

Área (m ²)	Volumen (m ³)	Por. eficaz (%)	Volumen almacenado (m ³)
322.399,9	5.533.775	8	442.702

Tabla 2. Cálculo del volumen de agua almacenado en el sector del valle.
Table 2. Calculated water stored in the aquifer located in the valley

Recarga

Para una zona cercana al sitio de estudio Galarreta y Varni (2010) indican una recarga al acuífero del 18 % con el método del balance del ion cloruro y de un 16 % con un balance de agua en el suelo. Considerando una precipitación media para el período 1900-2003 en la estación Tandil de 846 mm, la recarga al acuífero considerando el valor del 18 % es de 152,3 mm anuales.

Esta lámina para un área de 322.400 m² significa un volumen anual de 49.101,5 m³ (Tabla 3). Por lo tanto las reservas reguladoras que pueden ser utilizadas anualmente permiten una extracción de 134 m³ d⁻¹ lo que equivale a 5,6 m³ h⁻¹ bombeados en forma continua. Este último caudal es el que podría bombearse sin extraer agua de la reserva pasiva del acuífero. Ahora bien, si debido a las necesidades en determinadas épocas del año se debe recurrir a la extracción de un volumen mayor de agua, se ha calculado el volumen extra que se podría obtener haciendo descender a 6 m de profundidad el nivel freático. Este cálculo arroja un volumen extra de 82.346,16 m³ de agua que significaría una extracción de 225,6 m³ d⁻¹ en forma continua durante el año.

Área (m ²)	Precipitación anual (mm)	Recarga (%)	Volumen anual de recarga (m ³)
322.399,9	846	18	49.101,5

Tabla 3. Recarga al acuífero
Table 3. Recharge to aquifer

Se debe tener en cuenta que las reservas dependen en gran medida de los cambios climáticos y en un lapso prolongado ningún acuífero debería ser explotado a un ritmo superior a la recarga natural (Custodio y Llamas, 1976). El sistema en épocas de escasas precipitaciones puede sufrir importantes descensos debido a los bombeos, lo cual queda evidenciado por el secado de los pequeños embalses en la traza del arroyo.

El exceso de riego del campo de golf es otra fuente de recarga, esta puede ser difusa o puntual como la que ocurre a través de puntos de concentración de agua en los bunkers de la cancha (Figuras 10 y 11). Esta última no se ha tenido en cuenta en los cálculos presentados.

Otra fuente de recarga es producto de la infiltración en la zona de la sierra que flanquea al valle (límite de cuenca), la cual puede ser importante. En este caso, el agua es conducida por las fracturas y diaclasas de la roca y pueden llegar a alimentar los sedimentos acuíferos que se presentan en el fondo del valle.

Por lo comentado anteriormente, el valor calculado para la recarga es un valor mínimo y conservador que puede incrementarse de acuerdo a lo mencionado en los párrafos anteriores.

Balance de agua

Una gran parte del agua bombeada es aplicada al riego de la cancha de golf, utilizando el agua almacenada en uno de los lagos formados a partir del embalse del arroyo. Parte del agua del riego vuelve al acuífero a través de la infiltración y la mayor parte es evapotranspirada por la vegetación. El arroyo que surca el campo de golf actúa como un drenaje cuando se

producen excesos de agua por lluvias intensas pudiendo también drenar en parte al acuífero. También surcan la cancha algunos arroyos transitorios que se activan en caso de lluvias intensas, llevando sus aguas al arroyo principal ubicado en el centro de la cancha, el cual desagua hacia el Este de la zona. Debido al muy escaso a nulo caudal del arroyo principal se ha despreciado para el cálculo general del balance de agua. Se recuerda que el agua del arroyo es retenida por una serie de embalses. En las épocas de escasa precipitación dichos lagos artificiales se reducen notablemente.



Figura 10. Llenado de un bunker durante el riego.
Figure 10. Ponding of golf bunker during irrigation.



Figura 11. Vista del pozos 5 junto al bunker. Durante el riego esta depresión actúa como zona de recarga al pozo.

Figure 11. Pumping well 5, near golf bunker. During irrigation, this depression behaves as a recharge zone to the well.

Gallarreta y Varni (2010) calcularon la evapotranspiración aplicando la fórmula empírica de Thornthwaite-Mather (1955). Mediante el desarrollo del balance hídrico y partiendo de una capacidad de almacenaje del suelo de 150 mm, la evapotranspiración potencial arrojó un valor de 733 mm a^{-1} , mientras que la real corresponde a 713 mm a^{-1} , con un exceso de 133 mm a^{-1} que se produce de mayo a noviembre, mientras que el resto del año las necesidades de agua

son satisfechas con la precipitación, excepto diciembre, enero y febrero en los cuales se utiliza parte del agua de almacenamiento del suelo, con un déficit hídrico de 20 mm a⁻¹. En base a este balance de tipo modular el egreso por evapotranspiración representa el 84 % y la recarga el 16% del ingreso total, considerando escurrimiento despreciable, algo menor al 18% que arroja el balance de cloruro.

CONCLUSIONES

Los SEV y las TRE permitieron definir las dimensiones del acuífero sedimentario del valle y determinar los sectores con posibilidades para ubicar nuevas perforaciones. Las zonas con mayor profundidad a la roca se presentan en el sector Este y centro-Este, siendo los mayores espesores de unos 30 metros. En la perforación de nuevos pozos se deberá tener en cuenta los resultados obtenidos en las tomografías 1 y 2. El basamento presenta fracturación en ciertos sectores de acuerdo a lo observado en las tomografías con arreglo dipolo-dipolo, por esto, los pozos deberían ser perforados introduciéndose algunos metros en la roca.

El almacenamiento de agua del acuífero es de unos 442.702 m³, considerando una porosidad eficaz del 8 % y una profundidad del agua promedio para toda el área de 3 m bajo el terreno. La recarga anual es de aproximadamente 49.101 m³, con lo cual se podría extraer en forma continua un volumen de 130 m³ d⁻¹ al año sin afectar a las reservas dependiendo de la época del año.

La utilización combinada de SEV y TRE demostró su robustez para la investigación de este tipo de ambiente de geología compleja. La tomografía ha permitido observar las recargas por riego que se producen puntualmente en ciertos lugares como los bunkers de la cancha de golf.

Agradecimientos: La investigación ha podido realizarse por el aporte del Sr. Nicolás Parasuco, presidente de la empresa Vaestan S.A. propietaria de El valle de Tandil, Golf, Spa y Resort. Se agradece a Daniel Kokogian por su colaboración para el desarrollo de los trabajos y a los técnicos del IHLLA Matías Silicani, Enrique Queupán y Georgina Cazenave por el apoyo en las tareas de campo.

REFERENCIAS

- Advanced Geosciences, Inc. (2005). EarthImager 2D, resistivity and IP inversion software, version 2.2.8. Instruction manual. Austin Texas.
- Cingolani, C.A., (2011). The Tandilia System of Argentina as a southern extension of the Río de la Plata craton: an overview. *International Journal of Earth Sciences*, 100:221-242.
- Custodio E., M. Llamas, (1976). *Hidrología Subterránea*. Omega, Barcelona, España, pp. 2359.
- Dahlin, T., B. Zhou, (2004). A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrodearrays. *Geophysical Prospecting*, 52: 379-398.
- Dietrich, S., P. Weinzettel, M. Varni, (2014). Infiltration and drainage analysis in a heterogeneous soil by electrical resistivity tomography. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 78:1153-1167.
- Ellis, R.G., D.W. Oldenburg, (1994). Applied geophysical inversion. *Geophysics Journal International.*, 116: 5-11.
- Garré, S., J. Koestel, T. Gunther, M. Javaux, J. Vanderborght, H. Vereecken, (2010). Comparison of heterogeneous transport processes observed with electrical resistivity tomography in two soils. *Vadose Zone Journal*, 9: 336-349.
- IPI2Win, (2001). Moscow State University, Geological Faculty, Dept. of Geophysics. Geoscan-M Ltd. IPI2Win v 2.1. User's guide, pp. 25.
- Koestel, J., A. Kemna, M. Javaux, A. Binley, H. Vereecken, (2008). Quantitative imaging of solute transport in an unsaturated and undisturbed soil monolith with 3-D ERT and TDR. *Water Resources Research*, 44, W12411.
- Loke M.H., J.E. Chambers, D.F. Rucker, O. Kuras, P.B. Wilkinson, (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics*, 95: 135-156.
- Niwas, S., B. Tezkan, M. Israil, (2011). Aquifer hydraulic conductivity estimation from surface geoelectrical measurements for Krauthausen test site, Germany. *Hydrogeology Journal*, 19(2): 307-315.

- Perdomo, S., J.E. Ainchil, E.E. Kruse, (2014). Hydraulic parameters estimation from well logging resistivity and geoelectrical measurements. *Journal of Applied Geophysics*, 105: 50-58.
- Ruiz de Galarreta, A., M. Varni, (2010). Análisis de la recarga del acuífero freático en la cuenca superior del arroyo Tandileoufú. Partido de Tandil. En: *Estudios Ambientales II. Tandil y área de influencia*. Ana Ulberich (Coordinadora). Editorial: Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, pp. 81-90.
- Samouëlian, A., I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand, G. Richard, (2005). Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Tillage Resources*, 83: 173-193
- Slater, L., (2007). Near surface electrical characterization of hydraulic conductivity: from petrophysical properties to aquifer Geometries - A review. *Survey in Geophysics*, 28: 169-197.
- Thornthwaite, C.W., J.R. Mather, (1955). The water balance. *Publ. In Climatology*, 8(1): 5-85.
- Varni, M., R. Comas., P. Weinzettel, S. Dietrich, (2013). Application of water table fluctuation method to characterize the groundwater recharge and your relation with precipitation and base flow in the Pampa plain, Argentina. *Hydrological Sciences Journal*, 58: 1445-455.
- Weinzettel, P., E. Usunoff, L. Vives, (2005). Groundwater recharge estimations from studies of the unsaturated zone. *Groundwater and Human Development. Selected Papers on Hydrology*. A.A. Balkema Publishers. Great Britain. London. pp 133-144.
- Weinzettel, P., M. Varni, S. Dietrich, (2011). Exploración hidrogeológica mediante métodos de resistividad eléctrica en una zona de geología compleja. VII Congreso Argentino de Hidrogeología. *Hidrogeología regional y exploración hidrogeológica*. Salta, Argentina. pp 300-307.
- Zhou, B., T. Dahlin, (2003). Properties and effects of measurement errors on 2D resistivity imaging surveying. *Near Surface Geophysics*, 1: 105-117.
- Zohdy, A., (1975). Automatic interpretation of Schlumberger sounding curves using modified Dar Zarrouk functions: *U.S. Geol. Surv.Bull.* 1313-E. 39.

Recibido: Febrero, 2016

Aceptado: Julio, 2017