

NOTA

## EVALUACIÓN DE TRES DISPOSITIVOS DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA PARA LA IDENTIFICACIÓN DE HORIZONTES PETROCÁLCICOS EN EL SUELO

PABLO WEINZETTEL <sup>(\*\*)(\*)</sup>; MARCELO VARNI <sup>(\*)</sup>; SEBASTIÁN DIETRICH <sup>(\*\*\*)</sup> & EDUARDO USUNOFF <sup>(\*\*)(\*)</sup>

(\*\*) Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires; (\*) Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires; (\*\*\*) Becario CONICET; Instituto de Hidrología de Llanuras, Rep. de Italia 780, 7300 Azul (Buenos Aires)  
Telfax: +54 2281 434113. E-mail: paw@faa.unicen.edu.ar

Recibido: 23-08-08

Aceptado: 21-04-09

### RESUMEN

La tomografía eléctrica es una herramienta importante en la caracterización del suelo y procesos de infiltración y/o contaminación. Su desarrollo constante a través de la mejora de los equipos para la obtención de los datos, así como de los programas de inversión para la interpretación, hace que su utilización sea cada vez más frecuente en el estudio de suelos y acuíferos. La investigación de los dispositivos multielectrónicos que mejor se adaptan a cada caso de estudio en particular, es relevante para obtener determinaciones satisfactorias, por ello, en este caso se presentan los resultados de la aplicación de tomografía eléctrica con diferentes arreglos para estudiar un suelo con presencia de horizontes petrocálcicos. Se realizaron nueve tomografías eléctricas, las mismas fueron ejecutadas en tres transectas, aledañas a una parcela experimental. Se utilizó un resistivímetro de 56 electrodos, dispuestos con un espaciamiento de 30 centímetros, empleándose para cada una de las transectas tres dispositivos: Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo. Los resultados obtenidos para las configuraciones elegidas, fueron interpretados mediante un programa de inversión. La comparación entre los arreglos aplicados permitió definir las ventajas e inconvenientes de los mismos y establecer cuál de ellos es el que mejor se adapta para el estudio de este tipo de suelo. En base a la modelación de datos realizada se observa que las configuraciones Schlumberger y Wenner son las que mejor definen los niveles horizontales mientras que el método dipolo-dipolo consume más tiempo en la toma de datos y es muy susceptible al contacto entre los electrodos y el suelo. Por otra parte, este último presentó una ligera sobreestimación en la profundidad de dicho horizonte. En cambio, los otros dos métodos mostraron una gran precisión en la ubicación del horizonte petrocálcico, consistente con los controles realizados en el campo. Los errores en el proceso de inversión fueron de entre 12 y 20% para dipolo-dipolo e inferiores a 3,5% para los otros dos arreglos.

**Palabras clave.** Geofísica, propiedades físicas del suelo.

### EVALUATION OF ELECTRICAL TOMOGRAPHY ARRANGEMENTS TO IDENTIFY PETROCALCIC LAYERS IN SOILS

#### ABSTRACT

The electrical resistivity tomography (ERT) is an important tool in the characterization of the soil and in the infiltration and/or contamination processes. Its constant development through the improvement of equipment to obtain data as well as that of the inversion programs for interpretation makes its use more frequent in the study of soils and aquifers. The investigations of multielectrode devices that will be more suitable for each particular case is relevant to obtain satisfactory determinations, therefore in this case the results of the electrical tomography application are presented with different arrangements to study the soil with the presence of petrocálcico horizons. Nine ERT were carried out over a soil with shallow levels of petrocálcico layers. The tomographies were obtained by means of a resistivity meter with 56 electrodes 30-cm apart. Such an arrangement was laid out along three transects. At each transect, the multi-electrode arrangement Wenner, Schlumberger, and dipole-dipole were applied. The results were interpreted by means of an inversion computer program. Comparisons among the methods applied were able to assess their advantages and drawbacks and to define the method that better fits the study of soils with petrocálcico layers by means of electrical tomography. The conclusion is that the Schlumberger and Wenner methods discriminate the horizontal layers better, whereas the Dipole-Dipole method is much more time-consuming, and is very sensitive to the electrode contacts. On the other hand the latter presented a slight over estimation in the depth of such horizon. On the contrary the other two methods showed great precision in the location of the petrocálcico horizon, consistent with the controls made in the field. The errors in the process of inversion were between 12 and 20% for dipolo-dipolo and below 3.5% for the other two arrangements.

**Key words.** Geophysics, soil physical properties.

### INTRODUCCIÓN

El propósito de los dispositivos eléctricos es determinar la distribución de la resistividad del subsuelo haciendo mediciones en la superficie del terreno. Los métodos de resistividad emplean una fuente artificial de corriente,

la cual es introducida en la tierra a través de electrodos. La medición de la diferencia de potencial eléctrico en la vecindad del flujo de corriente así como también la corriente inyectada, hacen posible determinar la resistividad aparente del subsuelo (Telford *et al.*, 1990). La

resistividad eléctrica propia del terreno se relaciona con varios parámetros tales como la naturaleza y arreglo de los constituyentes sólidos del suelo, el contenido de agua y su composición y la temperatura (Loke, 2004; Samouëlian *et al.*, 2005) y puede ser considerada como una forma de acceder al conocimiento de la variabilidad de las propiedades físicas del mismo.

Uno de los trabajos precursores en esta línea de investigación ha sido el de Andrews *et al.* (1995), quienes aplicaron tomografía eléctrica en el estudio de la zona no saturada en el Reino Unido. Estos autores indicaron que el desarrollo de los equipos de campo y los efectivos programas de inversión de datos introducirían a esta técnica geofísica en una nueva era.

A nivel internacional se ha intensificado la investigación del suelo a través de técnicas tomográficas eléctricas (Corwin y Lesch, 2003; Besson *et al.*, 2004; Stummer *et al.*, 2004; Samouëlian *et al.*, 2005), a la vez que están siendo aplicadas en hidrogeología para conocer las características de la zona no saturada y del acuífero (Dahlin y Zhou, 2004; Abraham y Lucius, 2004), y caracterizar vías preferenciales de flujo (Cousin *et al.*, 2006). La combinación de la tomografía con otras técnicas geofísicas también ha arrojado muy buenos resultados (Garambois *et al.*, 2002).

Esta herramienta es más adecuada que el georadar para suelos con alto contenido de arcilla, ya que si bien con este último se obtienen imágenes con mucho detalle, pierde significativamente su poder de penetración (Loke, 2004), por lo cual no es aconsejable para el tipo de suelos que se pretende estudiar en este caso. Por otra parte es una técnica no invasiva que permite definir las características de los suelos pudiendo realizarse un mapeo de la estructura de los horizontes sin destruir el objeto de estudio (Tabbagh *et al.*, 2000).

El objetivo de este trabajo es comparar la capacidad de tres dispositivos multielectrónicos diferentes para distinguir, en el suelo estudiado, la presencia de horizontes petrocálcicos someros (tosca). Para ello, se utilizan los arreglos Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo. Los resultados obtenidos con cada dispositivo son contrastados con una serie de controles de campo. Simultáneamente, se busca contribuir al desarrollo de esta técnica geofísica en su aplicación al estudio del suelo y sus propiedades físicas.

### Sector de estudio

Las tomografías se realizaron en un suelo ubicado en cercanías de la ciudad de Azul, provincia de Buenos Aires, Argentina (36°46'S, 59°53'O, 140 msnm). En dicho sector se encuentra instrumentada una parcela experimental para el estudio de la hidrodinámica del suelo y de la zona no

saturada así como de la recarga al acuífero subyacente (Weinzettel *et al.*, 2005). El suelo en este sector se caracteriza por la presencia de un horizonte petrocálcico más o menos continuo a una profundidad promedio de un metro.

La descripción del perfil del suelo, realizado en una calicata próxima al lugar estudiado y de acuerdo a la U. S. Soil Taxonomy, es Paleudol petrocálcico (Soil Survey Staff, 1999). El horizonte A1 es franco con estructura granular moderada a fuerte hasta los 9 cm. El horizonte A2 se extiende hasta los 18 cm con textura franco arcillosa y estructura de bloques que rompen a granular. El horizonte Bt1 se extiende de 18 a 35 cm de profundidad, es arcilloso con columnas gruesas, fuertes y firmes con barnices arcillo húmicos abundantes. El horizonte Bt2 de 35 a 43 cm de profundidad es arcilloso con prismas medios fuertes, firme y barnices arcillo húmicos abundantes y continuos. El horizonte Bck se ubica entre los 43 y 66 cm, arcillo limoso, está formado por bloques subangulares medios a finos, moderados, y presenta concreciones de carbonato de calcio escasas. El horizonte Ck se presenta de 66 a 104 cm, franco limoso, masivo muy firme, con carbonato de calcio en canaliculos y/o poros de raíces. Finalmente se presenta un horizonte Ckm a partir de los 104 cm extremadamente firme compuesto por carbonato de calcio.

Las curvas de retención se desarrollan en un rango estrecho de valores de humedad con presiones de entrada de aire elevadas. Esto se traduce en un drenaje matricial lento, aún con el suelo en estado de saturación. Además, el drenaje se ve dificultado en parte por la baja conductividad hidráulica del horizonte Bt, así como por la presencia de los niveles de tosca.

El modelado de la tensión matricial del suelo, a partir de los datos provenientes de los tensiómetros instalados a distintas profundidades durante ensayos de drenaje interno efectuados en esta parcela (Weinzettel *et al.*, 2005), demuestran las bajas conductividades hidráulicas que caracterizan a este suelo.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Introducción teórica a los métodos eléctricos

La resistividad eléctrica del suelo es una medida de su capacidad para limitar el paso de la corriente eléctrica. Para un cuerpo cilíndrico se define la resistividad  $\rho$  como:

$$\rho = R \left( \frac{S}{L} \right) \quad [1]$$

donde  $R$  es la resistencia eléctrica expresada en Ohm ( $\Omega$ ),  $L$  es la longitud del cilindro en metros (m) y  $S$  su área transversal en metros cuadrados ( $m^2$ ). A su vez, la resistencia eléctrica  $R$  se calcula mediante la ley de Ohm:  $R = V/I$ , siendo  $V$  el voltaje medido e  $I$  la corriente inyectada en el suelo.

Como el terreno no es un cuerpo cilíndrico sino un semiespacio continuo donde las líneas de corriente se propagan en forma radial alejándose de la fuente, las superficies equipotenciales son semiesferas perpendiculares a ellas. Tal es así, que el potencial eléctrico a lo largo de cualquiera de estas superficies puede ser expresado como:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad [2]$$

Poder inyectar corriente en el terreno y medir la diferencia de potencial requiere de cuatro electrodos: dos electrodos por medio de los cuales se inyecta corriente en el terreno, denominados arbitrariamente A y B y dos de medición de diferencia de potencial, llamados M y N. Entonces, utilizando [2] y reordenando sus términos, se tiene que la resistividad  $r$  es:

$$\rho = \left[ \frac{2\pi}{(1/AM) - (1/BM) - (1/AN) + (1/BN)} \right] \frac{\Delta V}{I} = K \frac{\Delta V}{I} \quad [3]$$

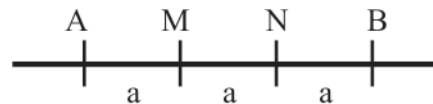
donde  $\Delta V$  es la diferencia de potencial eléctrico medido entre los electrodos M y N, mientras que AM, BM, AN y BN son distancias geométricas entre los electrodos mencionados. La constante K, también denominada factor geométrico, depende de cómo estén distribuidos los distintos electrodos. La manera en que éstos son acomodados recibe el nombre de configuración o dispositivo electródico (Orellana, 1982).

Una característica del método geoelectrico es que al aumentar la distancia interelectródica se incrementa también la capacidad de penetrar en el medio y así se obtiene información de los sectores más profundos. Ahora bien, si el semiespacio bajo estudio (terreno) fuera homogéneo en cuanto a su resistividad, el valor de esta propiedad física obtenida por este método sería constante e independientemente de la separación entre electrodos. Como esta situación no acontece en la naturaleza, dado que la resistividad varía en profundidad debido a los distintos materiales que se presentan en el subsuelo, lo que se adquiere en cada medición es una resistividad aparente  $\rho_A$ . Esta es una resistividad ficticia que se obtiene tras aplicar la ecuación para un medio homogéneo a uno que no lo es (Orellana, 1982), y que de algún modo integra las diferentes resistividades y espesores respectivos de las diferentes capas que son afectadas por el campo eléctrico generado para este fin. Para poder conocer el valor de la resistividad real de cada capa, el conjunto de las resistividades aparentes debe ser sometido a un modelado matemático.

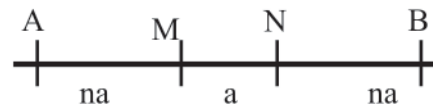
Existen numerosos dispositivos, cada uno con sus ventajas y desventajas dependiendo del objetivo del estudio. La Figura 1

representa de manera esquemática la disposición de los electrodos para tres de los dispositivos más comúnmente utilizados, Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo. Los dos primeros poseen una mayor sensibilidad a detectar los cambios verticales en la resistividad, siendo más apropiadas para estudiar estructuras horizontales. En cambio, dipolo-dipolo es más sensible a los cambios horizontales, permitiendo detectar con mayor facilidad la presencia de estructuras verticales (Dahlin y Zhou, 2004; Locke, 2004).

a) Wenner



b) S



c) D

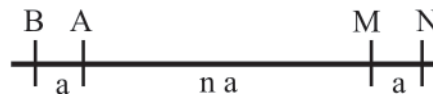


Figura 1. Configuraciones electródicas utilizadas.

Figure 1. Applied electrode arrays.

Como fue ya señalado, aumentar la separación entre electrodos produce un incremento en la profundidad de estudio. En Wenner, este incremento se realiza de manera que la distancia entre todos los electrodos sea siempre la misma ( $a$  en la Fig. 1a). En Schlumberger, en cambio, la distancia AM y NB aumenta con respecto a MN, pero manteniendo una relación de  $n$  veces la distancia  $a$ , donde  $n$  es un número entero (Fig. 1b). En dipolo-dipolo, la distancia entre los pares dipolares aumenta también con la relación  $na$  (Fig. 1c).

### Tomografía eléctrica

Lo explicado para mediciones eléctricas puntuales ha sido desarrollado para mediciones en un perfil del terreno con la colocación de numerosos electrodos conectados a un tomógrafo eléctrico.

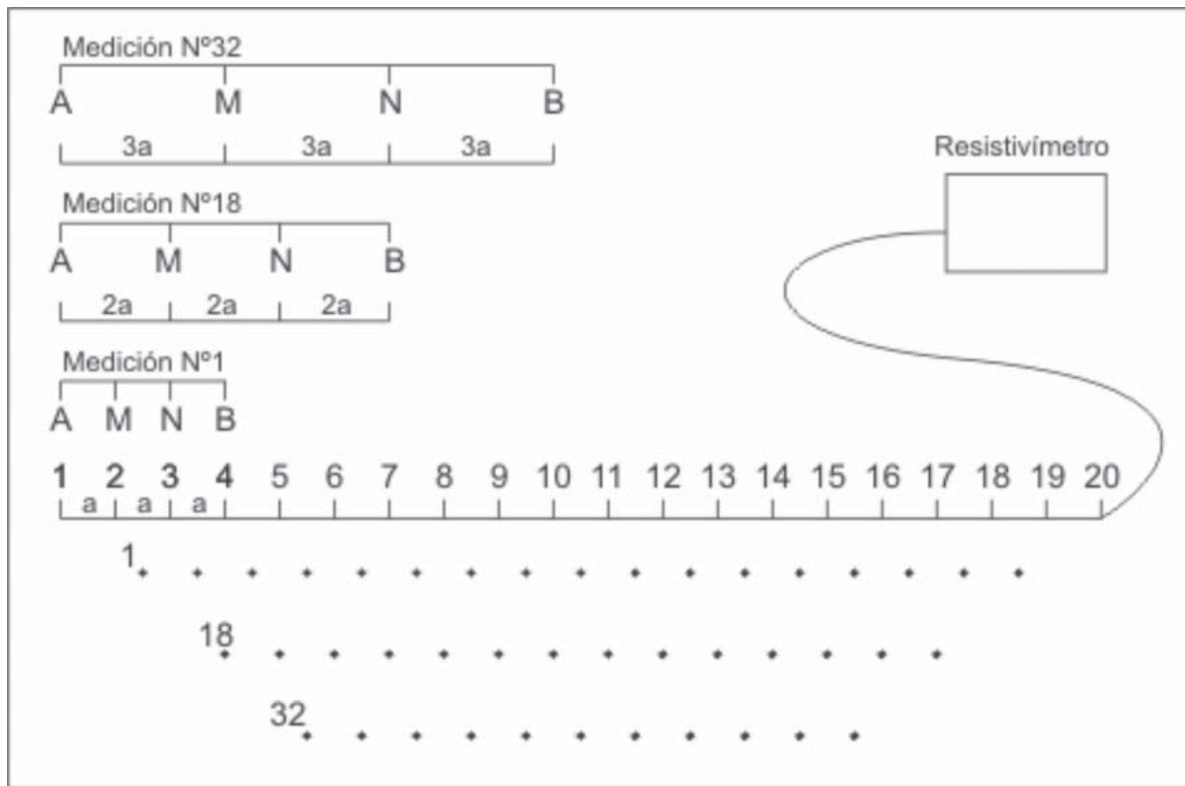


Figura 2. Secuencia de mediciones con un tomógrafo para el caso de un arreglo Wenner.

Figure 2. Sequence of measurements taken with a resistivimeter, for the case of Wenner array.

La ventaja de utilizar un tomógrafo radica en que brinda una imagen de resistividad en dos dimensiones, atendiendo a las heterogeneidades laterales del terreno. El relevamiento se realiza utilizando una gran cantidad de electrodos, normalmente más de 24, que son instalados en el suelo y conectados por medio de un cable. La función del tomógrafo consiste en seleccionar de manera automática cuatro del total de electrodos y utilizarlos para la inyección de corriente y medición del potencial eléctrico. Para la medida siguiente, escoge otro grupo de cuatro electrodos distinto al anterior. En la Figura 2 (Locke, 2004), se ilustra el relevamiento para un arreglo Wenner.

Luego del relevamiento, lo que se obtiene es un conjunto de resistividades aparentes que sólo posibilita una apreciación cualitativa de la distribución de resistividades del subsuelo. Una visualización cuantitativa requiere de un proceso de inversión que convierta dichas resistividades aparentes en reales, además de asignarle a cada una de ellas la profundidad correcta. En forma sencilla, el proceso comienza suponiendo un posible modelo de resistividades, el cual está conformado por una serie de celdas cada una con una resistividad real única. A partir de ellas, se calcula cuáles serían las resistividades aparentes para dicho modelo y las mismas son comparadas con las que se midieron en el campo. El criterio de calibración es la minimización de la raíz del error medio cuadrático (REMC) entre las resistividades aparentes medidas en campo y aquellas que generarían las resistividades reales que el

programa de calibración postula como una aproximación a las del terreno. Este error es reducido hasta un cierto valor estipulado por el usuario a través de un proceso iterativo (Samouëlian *et al.*, 2005; Kirch, 2006).

### Aplicación del método

Para relevar el área estudiada se utilizó un resistivímetro marca AGI modelo Supersting R1/IP con 56 electrodos, unidos por un cable multifilamento que permite una separación interelectródica máxima de 5 metros. Estos electrodos son del tipo pasivo, es decir, que carecen de componente electrónico alguno que permita la amplificación de la señal. En esta oportunidad, los electrodos fueron colocados cada 30 cm con lo cual se lograron transectas continuas de 16,5 m de longitud y entre 3 y 4 m de penetración. Esta profundidad es establecida por el programa de inversión tras el cálculo de la derivada de Frechet, una función matemática que, considerando un semiespacio homogéneo, establece la penetración de cada arreglo. Antes de la elección del espaciamiento de 30 cm, también se aplicaron espaciamientos de 15 y 50 cm. El espaciamiento de 15 cm cubre una longitud reducida y no supera los 2 m de profundidad. Por otro lado, las tomografías de 50 cm, carecen de la resolución necesaria, en especial a partir de un metro de profundidad. Por lo tanto, se decidió trabajar con el espaciamiento de 30 cm, el cual

brindó una adecuada relación entre la longitud del tendido y la resolución de los horizontes, particularmente el petrocálculo.

Los dispositivos utilizados fueron Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo. La programación previa de cada uno de ellos se realiza mediante un programa de administración de comandos en una computadora que luego es transferida al tomógrafo. Con esta información el equipo aplica la configuración elegida y utiliza para cada medida los electrodos indicados para la inyección de corriente y para la medición del potencial eléctrico. Los valores máximos tanto para  $a$  como  $n$  son introducidos por el usuario, en este caso

$a = 6$  y  $n = 8$ . Para ello se han tenido en cuenta las recomendaciones provistas por el fabricante (Advanced Geosciences, Inc. 2005b). En estas transectas, al estar situados los electrodos cada 30 cm, el  $a$  máximo es de 1,80 m, mientras que el  $na$  máximo, para los dispositivos Schlumberger y dipolo-dipolo, es de 14,4 m.

Con el espaciamiento elegido se realizaron tres tomografías con cada uno de los dispositivos mencionados, en los alrededores de una parcela experimental instrumentada para el estudio del suelo y de la zona no saturada. Dos de ellas se ubicaron en forma paralela y la tercera, transversal a las anteriores (Fig. 3).

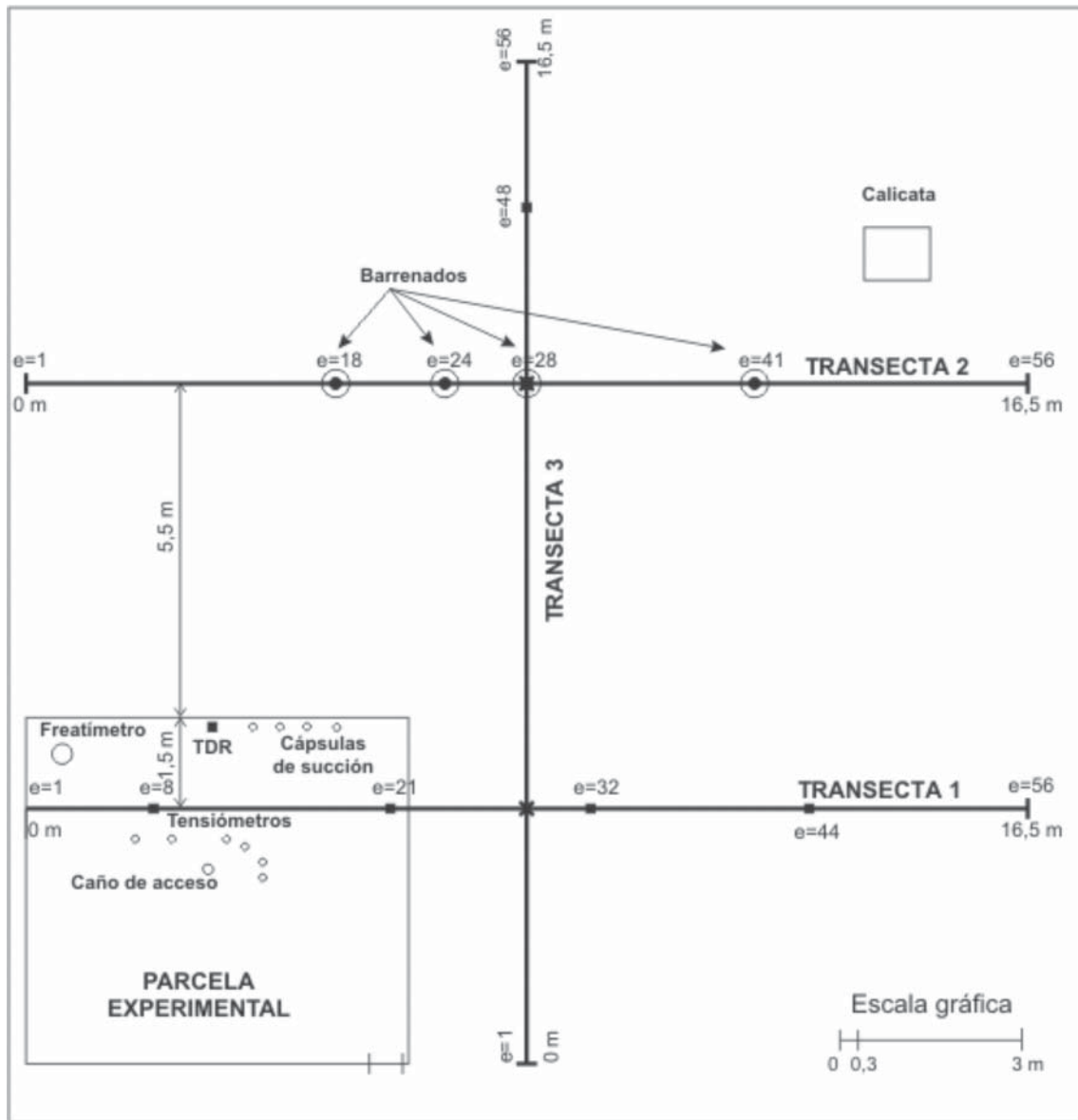


Figura 3. Esquema del sector de estudio. Con cuadrados negros se indican las mediciones con TDR, con su posición respecto a un electrodo.

Figure 3. Diagram of study site. Black squares point TDR measurements.

Para la interpretación se utilizó el programa EarthImager 2D (Advanced Geosciences, Inc., 2005b), con el cual se realiza la inversión matemática de los datos experimentales de resistividad aparente.

Previo al proceso de inversión, deben descartarse los datos «ruidosos», es decir, aquellos valores anómalos con respecto a los adyacentes que dificultarán el ajuste de los datos de campo con los del modelo, reduciendo la calidad del resultado final de la inversión. Diversas son las posibles fuentes de ruido, entre las que cabe mencionar el contacto defectuoso entre el electrodo y el suelo, polarización de los electrodos, el diseño propio del arreglo, fuentes electromagnéticas como cables de alta tensión en las cercanías, objetos metálicos enterrados, potenciales naturales y corrientes telúricas, entre otras.

Para poder evaluar la calidad de cada uno de los datos, el programa utiliza una serie de criterios que son personalizados por el usuario. El primero de ellos es el «voltaje mínimo», considerado como un indicador de la intensidad de la señal. Voltajes muy inferiores a 1 mV están normalmente por debajo del límite de detección de los equipos. No obstante, en esta oportunidad se utilizó 0,2 mV, valor por defecto del programa debido a que el equipo posee una notable sensibilidad. Otro criterio es el «mínimo valor absoluto  $V/I$ », es decir, el voltaje medido normalizado por la corriente inyectada. El valor utilizado fue de  $5 \cdot 10^{-4}$ . Los últimos dos criterios aquí considerados, son los valores mínimo y máximo de resistividad aparente, los cuales fueron de 1 ohm m y 10.000 ohm m, respectivamente.

Los resultados son presentados como cortes en dos dimensiones con una adecuada paleta de colores, en esta oportunidad escala de grises de 16 tonos. Dado que el valor mínimo y máximo para cada resultado no es el mismo, se decidió acotar el rango de resistividades entre 8 y 120 ohm m, de manera que las comparaciones de colores sean directas. Esto no implica que éstos sean los valores mínimos y máximos de cada tomografía.

El proceso de inversión se realizó con el total de los datos recogidos, lográndose una profundidad específica para cada arreglo que, según lo explicado anteriormente, se obtiene tras el cálculo de la derivada de Frechet. Sin embargo, sólo se muestran aquí los 2 m superiores de cada tomografía por ser la porción de interés y sobre la que se tiene control de campo.

Sin contar la duración del armado, la aplicación de los métodos en campo insumió un tiempo de medición de 76 minutos para

los dispositivos Wenner y Schlumberger y de 120 minutos para dipolo-dipolo. Esto está relacionado con el número de mediciones que el equipo realiza para cada uno de los arreglos, 488 datos de resistividad para el caso de Schlumberger, 495 para Wenner y 762 para dipolo-dipolo.

### Análisis de las propiedades físicas del suelo

Para comprobar los resultados de las tomografías, fueron llevados a cabo diferentes controles de campo. El primero de ellos fue el conocimiento previo de la posición de los horizontes del suelo y de los niveles de tosca mediante la observación de una calicata, de la cual surgió la descripción del suelo ya comentada. Otras muestras provinieron del material extraído durante los barrenados realizados para la instrumentación de la parcela experimental.

Una vez procesadas las tomografías se realizaron cuatro comprobaciones adicionales en la transecta 2 (Fig. 3) mediante perforaciones de 20 mm de diámetro con rotomartillo eléctrico hasta los 80 cm de profundidad, tendientes a evaluar la posición del horizonte petrocálcico y su tenacidad. Los resultados de este muestreo se encuentran en la Tabla 1. A su vez, permitieron conocer de forma cualitativa el estado de compactación y humedad de cada uno de los horizontes.

### Condiciones de humedad del suelo

La parcela experimental cuenta con cinco tensiómetros instalados a 15, 30, 60, 90 y 120 cm de profundidad con los cuales puede ser evaluada la tensión matricial del suelo (Tabla 2). También posee un caño de acceso para una sonda de capacitancia (Troxler, Sentry 200 AP) que se encuentra convenientemente calibrada para conocer la humedad del suelo cada 10 cm de profundidad (Weinzettel y Usunoff, 2003), cuyos datos para el momento de relevamiento de las tomografías se hallan consignados también en la Tabla 2. En forma adicional, la humedad superficial fue medida directamente en distintos puntos de las transectas 1 y 3 (Fig. 3) con un TDR (Imko, FM II), con electrodos de 15 cm de longitud (Tabla 3).

La posición del nivel freático es conocida a partir de su medición con sonda eléctrica en un freatómetro que ubica también en la parcela experimental (Fig. 3).

Tabla 1. Control de campo en Transecta 2.

Table 1. Field checking at transect 2.

Electrodo	Horizonte petrocálcico (cm)	Descripción
18	60-70	Horizonte Ck muy tenaz
18	70-80	Horizonte Ckm, muy cementado, de coloración blanquecina
24	63-82	Limo carbonático; moderadamente duro
28		No se detecta «tosca» hasta los 80 cm
41	70-80	Horizonte petrocálcico muy tenaz, muy cementado



Tabla 2. Humedad y potencial matricial en la parcela experimental aledaña a las transectas.

Table 2. Wetness and matric head at the field experimental plot, close to the transects.

Profundidad (cm)	Potencial matricial (kPa)	Humedad (%)
15	-89,5	20,4
20		18,4
30	-79,7	12,9
40		20,7
50		26,2
60	-79,4	27,4
70		13,2
80		10,5
90	-72,3	11,0
100		15,3
110		12,1
120	-72,1	9,1
130		13,2
140		14,5
150		13,4

Tabla 3. Humedad de los primeros 15 cm del suelo.

Table 3. Soil wetness for first 15 cm.

Transecta	Electrodo	Humedad (%)
1	8	17,6
1	21	16,0
1	32	15,4
1	44	17,6
3	6	19,5
3	28	18,4
3	48	17,8
Parcela		20,4

**RESULTADOS**

A partir de los modelos de resistividad producto de la inversión se han confeccionado las Figuras 4, 5 y 6, donde se muestra, para cada una de las transectas, los resultados obtenidos con las configuraciones aplicadas. Debajo de cada tomografía, está consignado la raíz del error medio cuadrático (RMS en las Figs. 4, 5 y 6, *root mean square*) que se obtuvo luego del proceso de inversión.

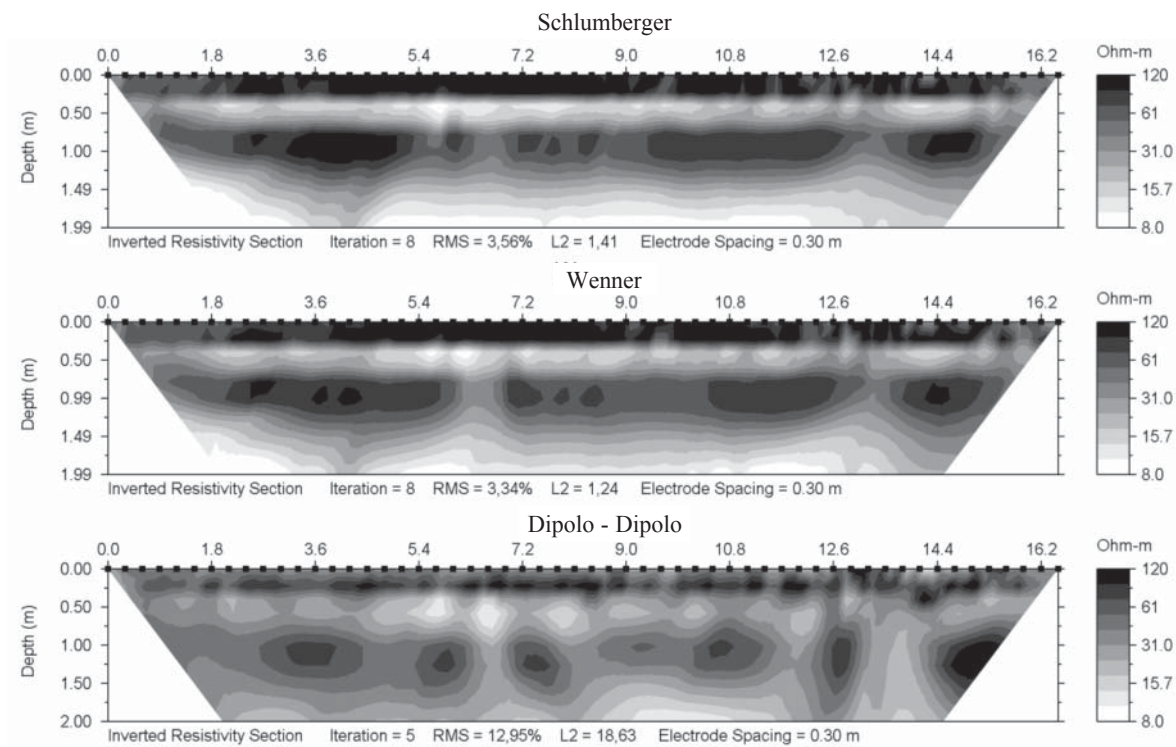


Figura 4. Comparación de configuraciones para la transecta 1.

Figure 4. Comparison among different arrays at transect 1.

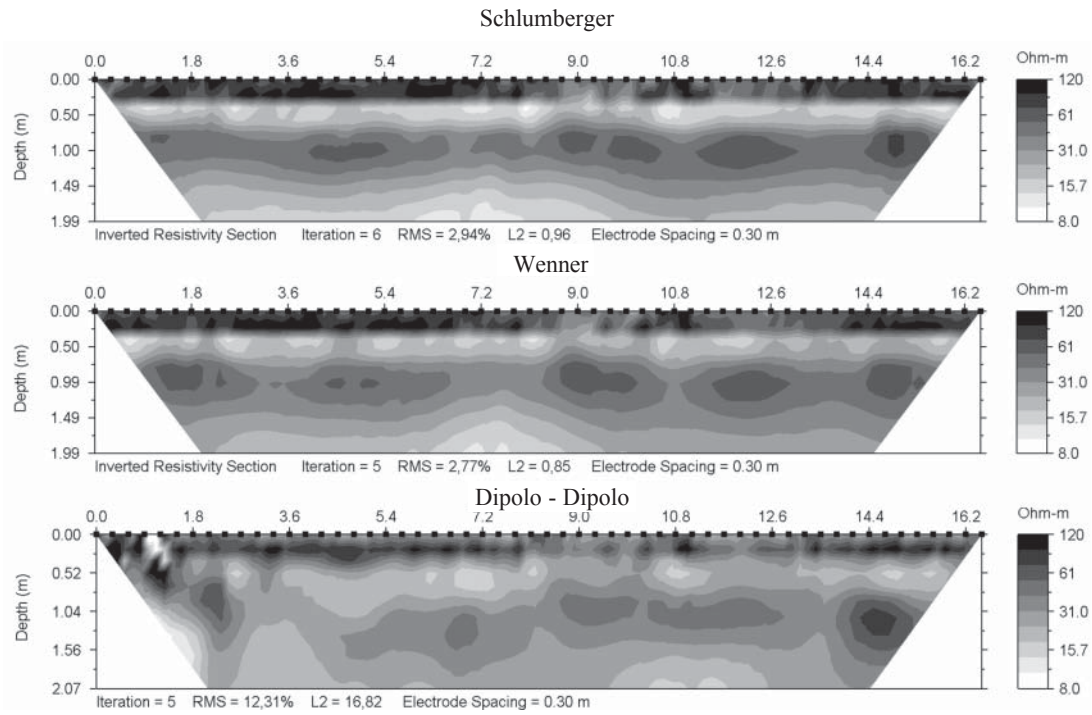


Figura 5. Comparación de configuraciones para la transecta 2.  
 Figure 5. Comparison among different arrangements at transect 2.

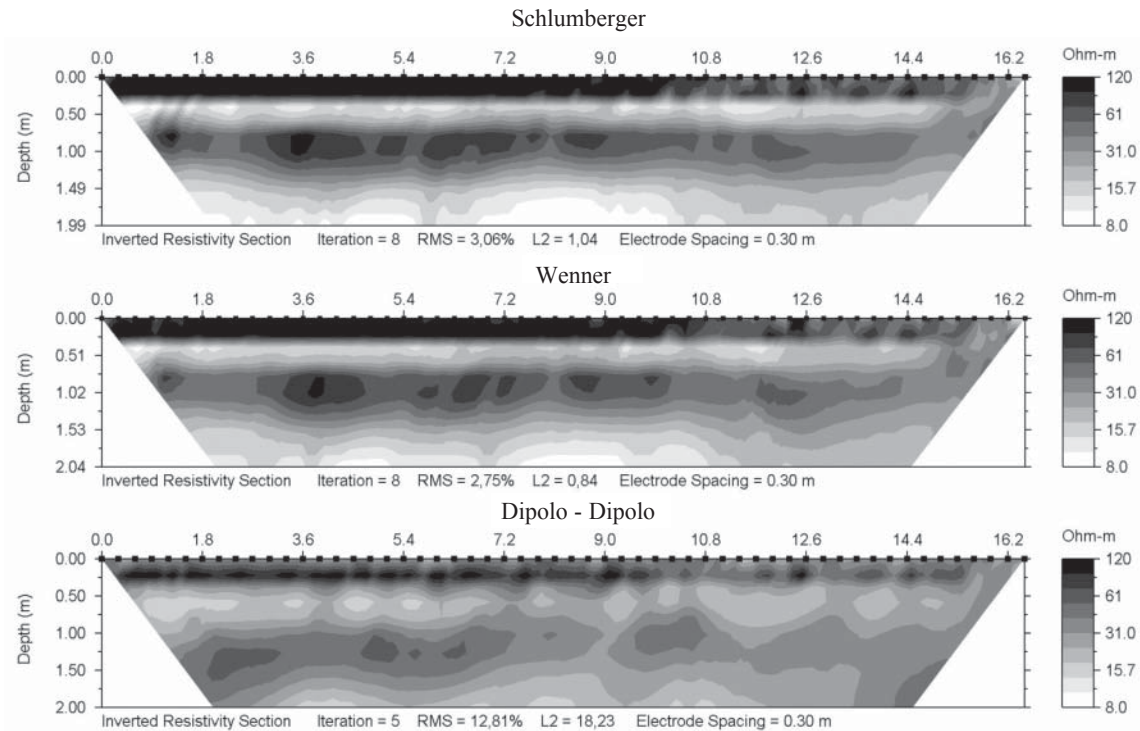


Figura 6. Comparación de configuraciones para la transecta 3.  
 Figure 6. Comparison among different arrangements at transect 3.



En todos los casos se pueden diferenciar los horizontes del suelo y los niveles petrocálcicos presentes en cada transecta. En general se ha tenido muy buena relación entre los controles de campo y el resultado de las tomografías.

Los barrenados y perforaciones con rotomartillo (Tabla 1) confirman un suelo seco, duro y compacto en los primeros 30 cm, en coincidencia con las mayores resistividades obtenidas en las tomografías para este sector, con valores de hasta 220 ohm m. Los tensiómetros de 15 y 30 cm acusan altos potenciales, en forma coherente con las bajas humedades medidas, que no superan el 20,4% (Tablas 2 y 3).

Subyace a este horizonte superficial un segundo nivel con resistividades bajas que producen un contraste muy marcado en los resultados de la inversión, con resistividades de 8 a 16 ohm m (tonalidades blancas y blancas grisáceas en las Figs. 4, 5 y 6). Este último corresponde a los horizontes Bt1 y Bt2, que tienen una marcada expresión en este suelo y se extienden hasta los 50 cm, aproximadamente. Los valores de humedad aportados por la sonda de capacitancia para los 40 y 50 cm de profundidad, oscilan entre 21 y 26% (Tabla 2). Subyaciendo al anterior se presenta hasta los 70 cm de profundidad un sector transicional con resistividades de 40 ohm m correspondiente al horizonte BCk, de textura arcillo limosa con concreciones de carbonato de calcio.

Finalmente, por debajo de los 70 cm se encuentra el horizonte Ck formado por limos con cementación carbonática o niveles petrocálcicos que están más definidos a una profundidad media de 1 m. Las resistividades para estos niveles oscilan entre 47 y 65 ohm m. Los valores más altos de este rango estarían relacionados con una mayor cementación con carbonato de calcio (tosca), lo cual reduciría notablemente el contenido de humedad aumentando su resistividad. Los niveles de «tosca» no son continuos como puede observarse en las tomografías presentadas en las Figuras 4, 5 y 6, y como también lo comprueban los muestreos realizados con barreno (Tabla 1).

La humedad promedio fue de 12,6% para las profundidades de 90 a 150 cm (Tabla 2), con un máximo de 15,3%.

En estrecha relación con estas bajas humedades, el potencial matricial obtenido de los tensiómetros reporta valores de -72,3 y -72,1 kPa para los 90 y 120 cm, respectivamente.

El nivel freático, medido diariamente en la parcela experimental, se encuentra a una profundidad de 4,54 m, el valor más bajo desde el comienzo de las mediciones en octubre de 1997. Se considera que la franja capilar no ha influido en las mediciones realizadas con el resistivímetro, manteniéndose el estado del suelo y la zona no saturada con tenores muy bajos de humedad.

En resumen, el perfil presenta un mínimo de humedad y sin afectación de la franja capilar. Esto garantiza que las mediciones se realizaron en condiciones homogéneas y de mínima humedad tanto del suelo como de la zona vadosa. Dicha situación es interesante para realizar comparaciones futuras, cuando se produzca la saturación del perfil a posteriori de precipitaciones importantes.

Respecto de los dispositivos utilizados, los tres adjudican a los diferentes horizontes resistividades semejantes. Sin embargo, Wenner y Schlumberger definen con mayor precisión la profundidad del horizonte petrocálcico, según lo indican los barrenados (Tabla 4). El arreglo dipolo-dipolo, en cambio, tiende a sobreestimar ligeramente estas profundidades. Por otro lado, éste último dispositivo exhibió datos con más «ruido» que los dos primeros. El hecho de partir de datos de menor calidad influye luego en el error final del proceso de inversión (Figs. 4, 5 y 6).

En la Figura 7, se presenta la correlación entre datos de resistividades medidas y calculadas para cada uno de los métodos aplicados en la transecta 1. Como puede observarse, las mejores correlaciones son las que corresponden a los dispositivos Schlumberger y Wenner, con un error inferior al 3,5% en ambos casos. No sucede lo mismo con dipolo-dipolo, que muestra ajustes de menor calidad.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos indican que los tres dispositivos utilizados, poseen en general, una interesante

Tabla 4. Errores en la determinación de la profundidad del horizonte petrocálcico hasta los 80 cm de profundidad.

Table 4. Errors in determining petrocaltic layer up to 80 cm depth.

Electrodo	Horizonte petrocálcico		Error (%)	Wenner (cm)	Error (%)	Dip-Dip (cm)	Error (%)
	(cm)	Sch (cm)					
18	70	70	0	72	2,9	—	—
41	70	72	2,9	70	0	80	14,3

No se detecta tosca en la posición de los electrodos 24 y 28 hasta los 80 cm.

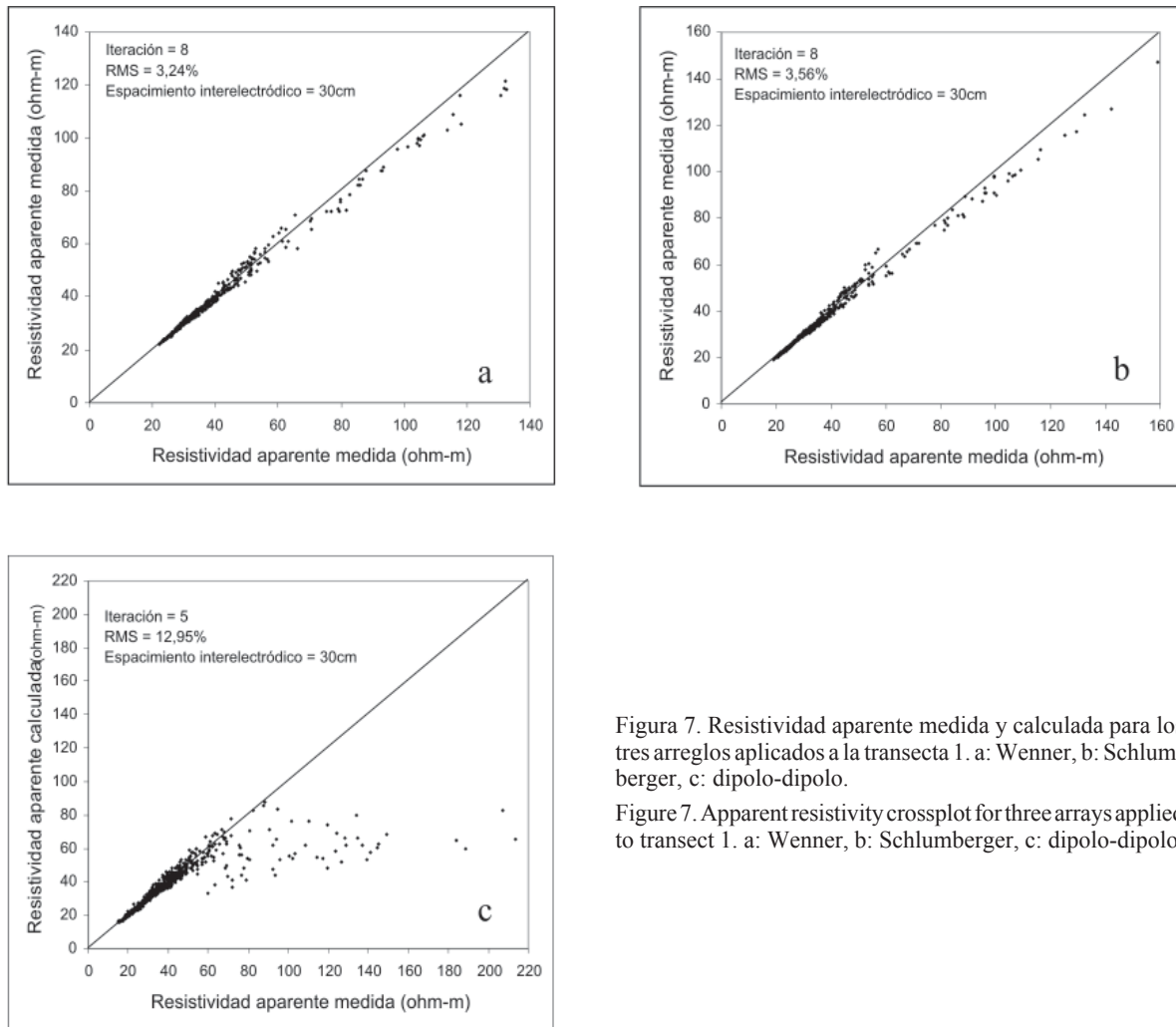


Figura 7. Resistividad aparente medida y calculada para los tres arreglos aplicados a la transecta 1. a: Wenner, b: Schlumberger, c: dipolo-dipolo.

Figure 7. Apparent resistivity crossplot for three arrays applied to transect 1. a: Wenner, b: Schlumberger, c: dipolo-dipolo.

capacidad para diferenciar los horizontes del suelo y sobre todo, los niveles petrocálcicos.

Los dispositivos Wenner y Schlumberger muestran similares resultados en lo que concierne a la resolución vertical de los horizontes del suelo. Los controles realizados en campo respecto de la ubicación de dichos horizontes y de los petrocálcicos en particular, señalan que ambos son aptos para ser utilizados. La mayor sensibilidad para detectar cambios verticales en la resistividad es propia de estos dos métodos y los hace más adecuados respecto a dipolo-dipolo, el cual los muestra algo más discontinuos, coincidente con lo expuesto por otros autores como Dahlin y Zhou (2004) y Loke (2004).

Como ejemplo se muestra en la Figura 8, la disposición tridimensional de los resultados obtenidos con la configuración de Schlumberger en las tres transectas, observándose un muy buen ajuste en las intersecciones

de los perfiles para las resistividades de los distintos horizontes.

Si bien las resistividades adjudicadas por los tres dispositivos a los diferentes horizontes son similares, no sucede lo mismo con la profundidad asignada al horizonte petrocálcico. Dipolo-dipolo presentó una ligera sobreestimación en la profundidad de dicho horizonte, característica propia de este método que puede alcanzar hasta un 30% (Loke, 2004). En cambio, los otros dos métodos mostraron una gran precisión en la ubicación del horizonte petrocálcico, consistente con los controles realizados en el campo.

Asegurar la calidad de los datos adquiridos es de suma importancia dado que va a influir en forma notable en el proceso de inversión. Schlumberger y Wenner poseen una tendencia a adquirir datos menos ruidosos que dipolo-dipolo, el cual requiere de un muy buen contacto entre los

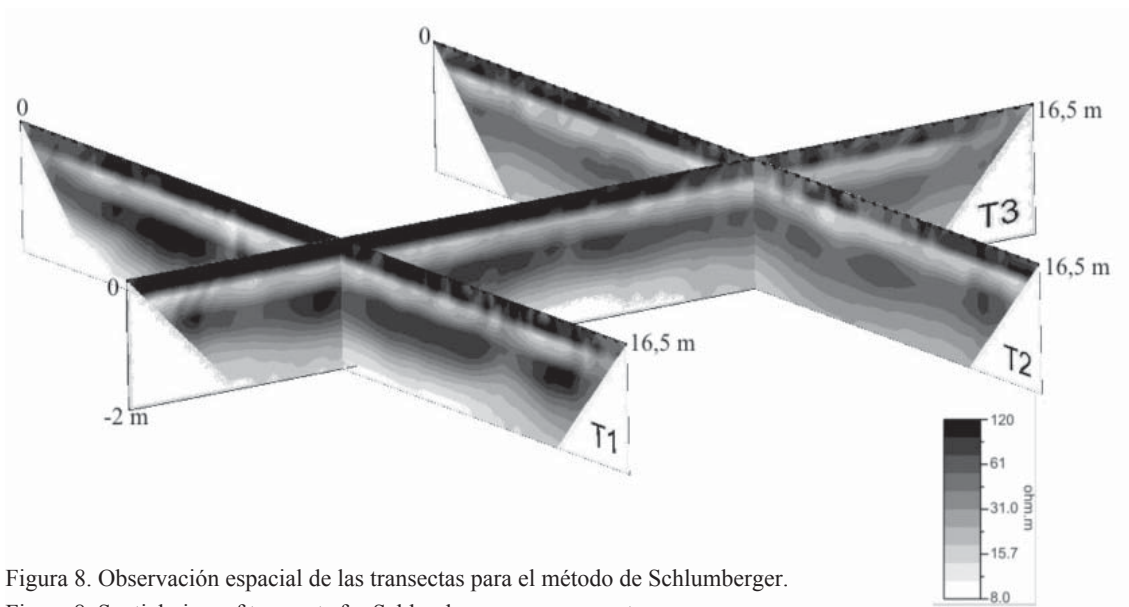


Figura 8. Observación espacial de las transectas para el método de Schlumberger.

Figure 8. Spatial view of transects for Schlumberger arrangement.

electrodos y el suelo. Esta condición se hace necesaria ya que la geometría propia de este arreglo produce señales más débiles que los anteriores, en especial cuando el factor  $na = 8$ , agravada en este caso por la escasa humedad del suelo. Los errores en el proceso de inversión dan cuenta de ello: entre 12 y 20% para dipolo-dipolo e inferiores a 3,5% para los otros dos arreglos.

## CONCLUSIONES

Con la técnica empleada se ha logrado obtener una convincente disposición de los materiales del suelo y zona no saturada aplicando distintos dispositivos multielectrónicos de tomografía eléctrica, para los suelos de textura arcillosa.

Los resultados obtenidos a partir de los dispositivos Schlumberger y Wenner fueron los que mejor se ajustaron a los controles de campo. Por otra parte, consumieron menos tiempo en el relevamiento mostrando bajos errores en la inversión.

El dispositivo dipolo-dipolo, por el contrario, muestra datos ruidosos que se traducen en elevados errores en la interpretación, además de consumir más tiempo en las tareas de campo.

La metodología aplicada permite obtener la posición de niveles petrocálcicos sin disturbar el suelo bajo estudio.

Estos niveles se caracterizan por una elevada resistividad que oscila entre los 47 y 65 ohm m, contrastante con los otros materiales presentes. También ha permitido definir los espesores y resistividades de los distintos horizontes del suelo en condiciones de escasa humedad.

El equipo utilizado, con una importante cantidad de electrodos, ha resultado ser una valiosa herramienta para la aplicación de esta metodología, con una amplia gama de posibilidades de investigación del subsuelo y la caracterización del mismo. El programa de inversión aplicado para la interpretación de los datos es un complemento adecuado para el equipo, ya que su uso permite interpretaciones muy ajustadas a las observaciones de campo y la salida de gráficos de resistividades en dos dimensiones de forma práctica y funcional.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias a la subvención otorgada por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica en el marco del programa de Modernización Tecnológica, Contrato préstamo BID 1728/OC-AR PICT 1988/06 y a la Comisión de Investigaciones Científicas de la provincia de Buenos Aires.

Sereconoce y agradece la participación del técnico E. Queupán, en las mediciones de campo.

Un especial agradecimiento a la Ing. S. Pazos por su colaboración en la descripción del suelo.

**BIBLIOGRAFÍA**

- Abraham, JD & JE Lucius. 2004. Direct current resistivity profiling to study distribution of water in unsaturated zone near the Amargosa desert research site, Nevada. U. S. Geological Survey, Reston, Virginia. Open File Report 2004-1319. 16 p.
- Advanced Geosciences, Inc., 2005a. The Super Sting Instruction manual, 87 p.
- Advanced Geosciences, Inc. 2005b. EarthImager, 2D resistivity and IP inversion software Version 1.9.8. Instruction manual. Austin Texas. 135 p.
- Andrews, R; R Barker & MHLoke. 1995. The application of electrical tomography in the study of the unsaturated zone in chalk at three sites in cambridgeshire, United Kingdom. *J Hidrol* 3(4): 17-31.
- Besson, A; I Cousin; G Richard & H Boizard. 2004. Structural heterogeneity characterization of the soil tilled layers by a 2D electrical resistivity prospecting. *Soil Till Res* 79: 239-249.
- Corwin, DL & SM Lesch. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agricultura: Theory, Principles and Guidelines. *Agron. J.* 95: 455-471.
- Cousin, I; A Bobachev; B Nicoullaud & H Robain. 2006. Visualisation of preferential water flows at shallow depth by electrical resistivity measurements with high spatial and temporal resolution. *Geophys Res Abstr* 8: 06176. European Geosciences Union.
- Dahlin, T & B Zhou. 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophys Prospect* 52: 379-398.
- Grambois, S; P Sénéchal & H Perroud. 2002. On the use of combined geophysical methods to asses water content and water conductivity of near-surface formations. *J Hydrol* 259: 32-48.
- Kirsch, R. 2006. Groundwater geophysics. Springer. 493 p.
- Loke, MH. 2004. Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys. 128 p.
- Orellana, E. 1982. Prospección geoeléctrica en corriente continua. Paraninfo. 578 p.
- Samouëlian, A; I Cousin; A Tabbagh; A Bruand & G Richard. 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Till Res* 83: 173-193.
- Soil Survey Staff. 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for making and Interpreting Soil Surveys. Agric. Handbook N° 436, 2nd. Edition. NRCS-USDA. US Govern. Printing Office Washington, D.C.
- Stummer, P; H Maurer & AG Green. 2004. Experimental design: Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. *Geophysics* 69: 120-139.
- Tabbagh, A; M Dabas; A Hesse & C Panissod. 2000. Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horization. *Geoderma* 97: 393-404.
- Telford, WM; LP Geldart & RE Sheriff. 1990. Applied geophysics. Cambridge University Press. 770 p.
- Weinzettel, P & E Usunoff. 2003. Calibración de una sonda de capacitancia en suelos argiudoles de la zona central de la provincia de Bs. As., Argentina. Pp. 165-170. *En: J Álvarez Benediti & P Marinero (eds.) Zona no Saturada del Suelo Vol. 6.* Instituto Tecnológico Agrario de Castilla y León, España. 416 p.
- Weinzettel, P; A Alcolea; L Vives; A Medina & E Usunoff. 2005. Metodología de modelación de la zona no saturada. Aplicación a un suelo argiudol en la cuenca del arroyo Azul. IV Congreso de Hidrogeología, Hidrología subterránea y Aspectos Ambientales, Río Cuarto, Córdoba, Tomo II, pp. 187-195.
- Weinzettel, P; E Usunoff & L Vives. 2005. Groundwater recharge estimations from studies of the unsaturated zone. Cap. 11, Pp. 133-143. *In: E Bocanegra; M Hernández & E Usunoff (eds.).* Groundwater and human development. Balkema Publishers, Londres, Inglaterra. 300 p.