

## UTILIZACIÓN DE TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA CON DISTINTAS CONFIGURACIONES Y ESPACIAMIENTOS ELECTRÓDICOS PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA NO SATURADA

Pablo A. Weinzettel<sup>1</sup>, Sebastián Dietrich<sup>2</sup> y Marcelo Varni<sup>3</sup>

1: CIC – UNCPBA  
Instituto de Hidrología de Llanuras (UNCPBA – CIC – Mun. de Azul)  
Rep de Italia 780 – CC 44 – 7300 Azul – Bs. As.- Argentina  
e-mail: paw@faa.unicen.edu.ar

2: CONICET – UNCPBA - Instituto de Hidrología de Llanuras (UNCPBA – CIC – Mun. de Azul)  
e-mail: sebadietrich@faa.unicen.edu.ar

3: UNCPBA –Instituto de Hidrología de Llanuras (UNCPBA – CIC – Mun. de Azul)  
e-mail: varni@faa.unicen.edu.ar

**Palabras clave:** Tomografía eléctrica, configuraciones electródicas, suelos argiudoles.

**RESUMEN.** *Se exponen los resultados obtenidos tras aplicar tomografía eléctrica con diferentes dispositivos y espaciamentos a un suelo argiudol, localizado en inmediaciones de la ciudad de Azul, Provincia de Buenos Aires, Argentina. El suelo en cuestión ha sido relevado en condiciones de muy escasa humedad, lo cual ha sido avalado por un conjunto de datos provenientes de una parcela experimental destinada al estudio de la hidrodinámica de la zona no saturada. Tres han sido los dispositivos electródicos utilizados: Wenner, Schlumberger y dipolo - dipolo, aplicados a una misma línea para lo cual se ha utilizado un tomógrafo con 56 electrodos pasivos, con espaciamentos de 30 y 50 centímetros entre electrodos. Este método geofísico ha brindado una convincente distribución de los materiales del subsuelo, sustentado en la descripción de una calicata próxima a dicho perfil y a los controles de campo realizados con barrenados. No obstante, diferencias conspicuas e interesantes, en cuanto a la distribución de resistividades, han sido detectadas entre los diferentes métodos cómo así también entre los diferentes espaciamentos interelectródicos.*

**ABSTRACT.** *Different arrays of electrical resistivity tomography (ERT), were applied to an Arguidoll with shallow levels of petrocalcic layers, located within Azul River basin, Buenos Aires Province, Argentina. At the moment the survey was carried out, soil water content was very low. The soil moisture and its corresponding potential were measured in an experimental plot, fitted out for that purpose and situated near the transect. Wenner, Schlumberger and dipole - dipole were the three electrodic configurations used, all of them applied with different distances between electrodes: 30 and 50 cm. This geophysical method was be able to precisely discriminate the horizons compounding this soil, based on a description of a neighboring trial pit and several soil samples collected over the transect. Nevertheless, some interesting differences arose after results were analyzed.*

### 1. INTRODUCCIÓN

La tomografía eléctrica aplicada al estudio del suelo ha tenido un importante auge en los últimos tiempos. En tal sentido se pueden citar los aportes de Corwin y Lesch (2003), Besson et al. (2004), Stummer et al. (2004), Samouëlian et al. (2005), Wendroth et al. (2006), Schwartz et al. (2008), entre otros. Una de sus principales ventajas radica en el hecho de que se trata de 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). Por otra parte, los actuales equipos utilizados para la obtención de los datos así como los modernos

códigos para la inversión matemática e interpretación, producen resultados altamente satisfactorios para la caracterización del suelo y de la zona no saturada.

Tanto los dispositivos a utilizar como los espaciamientos entre electrodos, merecen una adecuada evaluación previa para avanzar luego en el estudio específico de una zona en particular. La combinación arreglo - espaciamiento muestra diferentes detalles en la observación del perfil que pueden ser más o menos relevantes de acuerdo al objetivo del estudio y a las particularidades que se pretenden definir.

La aplicación de tomografía eléctrica se ha realizado en un suelo argiudol con horizonte petrocálcico a partir de una profundidad de 90 cm, aproximadamente. Dicho horizonte, llamado localmente tosca, tiene una amplia expresión en los suelos de alta producción agrícola del centro y sur de la provincia de Buenos Aires, Argentina, y por lo tanto es de interés su estudio en cuanto a su presencia y profundidad como a su comportamiento hidráulico en la infiltración del agua de lluvia o riego. De acuerdo a esto, el objetivo que se ha planteado es evaluar la capacidad de distintos métodos y espaciamientos para el estudio de este tipo de suelo, contrastando los resultados con los controles de campo realizados para tal efecto.

## **2. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Zona de estudio**

Las mediciones se realizaron sobre una línea en una zona ubicada en cercanías de la ciudad de Azul, Buenos Aires, Argentina (36°46'S, 59°53'O). El suelo bajo estudio, de acuerdo a la U. S. Soil Taxonomy, es un Paleudol petrocálcico (Soil Survey Staff, 1999). En base a la descripción que se realizara en una calicata aledaña a la zona bajo estudio, se sabe que está caracterizado por la presencia de un horizonte A1 franco con estructura granular moderada a fuerte hasta los 9 cm. Le sigue el horizonte A2, que se extiende hasta los 18 cm con textura franco arcillosa y estructura de bloques que rompen a granular. El horizonte Bt1 comprende desde los 18 a los 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, ubicado entre los 43 y 66 cm, es arcillo limoso y está formado por bloques subangulares medios a finos, moderados, y presenta concreciones de carbonato de calcio escasas. El horizonte Ck se presenta, desde los 66 a los 104 cm, franco limoso, masivo muy firme, con carbonato de calcio en canalículos y/o poros de raíces. Finalmente se presenta un horizonte Ckm, a partir de los 104 cm, extremadamente firme y compuesto por carbonato de calcio.

El suelo se encuentra sobre lo que se conoce como “loess pampeano”, compuesto por arenas limosas y limos arenosos de origen principalmente eólico, con presencia de carbonatos de calcio y de vidrio volcánico. Estos sedimentos son los que albergan al acuífero freático.

En cercanías de la línea estudiada, se encuentra instrumentada una parcela experimental para las mediciones de humedad mediante sonda de capacitancia, y tensión del suelo.

### **2.2. Metodología**

La tomografía eléctrica es una herramienta cuyo fin es determinar la distribución de la resistividad del subsuelo haciendo mediciones desde la superficie del terreno. La resistividad eléctrica es una propiedad que se relaciona con la composición y arreglo de los constituyentes sólidos del suelo, el contenido de agua 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.

La inyección de corriente y medición del potencial eléctrico resultante, se realiza a través de electrodos hincados en el suelo y la manera en que éstos son acomodados recibe el nombre de configuración o dispositivo electródico. Existen numerosos dispositivos, cada uno con sus ventajas y desventajas de acuerdo al objetivo del estudio, siendo Wenner, Schlumberger y dipolo-dipolo los mayormente utilizados. En Wenner y Schlumberger, los electrodos de inyección de corriente se sitúan por fuera de los electrodos de potencial y las distancias entre estos se incrementan para lograr mayor profundidad de penetración. En cambio, en dipolo-dipolo, los electrodos de corriente están contiguos formando un dipolo que se encuentra a una distancia determinada del dipolo de

potencial, constituido por los otros dos electrodos. Aquí también las distancias entre electrodos y entre dipolos se incrementan para lograr mayor profundidad. Los dos primeros arreglos 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; Weinzettel *et al.*, 2009).

Las mediciones se realizaron empleando un equipo AGI modelo SuperSting R1/IP, dotado de 56 electrodos. Al momento del estudio, y como lo señalan los datos de tensiometría y humedad provenientes de la parcela experimental, el suelo se encontraba en condiciones de muy escaso contenido de agua (Tabla 1). Se escogieron los arreglos Schlumberger, Wenner y dipolo – dipolo, utilizándose para cada uno de ellos, y a fin de evaluar el detalle alcanzado por la combinación arreglo-espaciamiento, diferentes distancias entre cada electrodo: 30 y 50 cm. La interpretación de los datos de resistividad aparente obtenidos en el campo se realizó por medio del código EarthImager 2D (Advanced Geosciences, Inc., 2005), el cual aplica un método de inversión que convierte las resistividades aparentes en reales. Los resultados son presentados como secciones de resistividades verdaderas en 2D en cuya porción inferior puede leerse el valor correspondiente a la raíz del error cuadrático medio. Estas secciones resultan de la interpolación de los valores que el código de inversión obtiene para puntos discretos del perfil.

Dado que la longitud y profundidad de cada una de las secciones así obtenidas difieren en uno y otro caso dependiendo del arreglo y del espaciamiento, se optó por seccionar algunas de ellas, de manera de poder establecer comparaciones directas. Las secciones correspondientes a los arreglos con 30 y 50 cm de espaciamiento, quedaron reducidas a un máximo de 16,5 m de extensión en superficie y 2 m de profundidad.

**Tabla 1.** Potencial matricial y humedad hasta los 120 cm.

Profundidad (cm)	Potencial matricial (kPa)	Humedad (%)
15	-89,5	20,4
30	-79,7	12,9
60	-79,4	27,4
90	-72,3	11,0
120	-72,1	9,1

Para poder resaltar semejanzas y diferencias, se realizaron operaciones de sustracción entre las tomografías. Como el total de puntos de resistividades reales de cada perfil difiere según el método y el espaciamiento, se recurrió a interpolar los valores de estos puntos para obtener una malla de resistividades normalizada, con 8,33 cm de separación vertical y 8,25 cm de separación horizontal (total: 5025 puntos). Estos valores se interpolaron mediante el método de kriging lineal. Las diferencias se valoraron numéricamente por medio de la raíz de la diferencia cuadrática media (RDCM), que se calcula como:

$$RDCM = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (a_i - b_i)^2 \right]^{1/2} \quad (1)$$

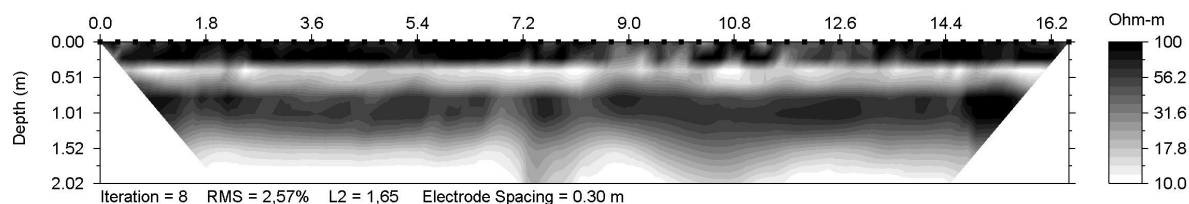
donde  $a_i$  y  $b_i$  son puntos de resistividad real de dos tomografías diferentes, para una misma ubicación en la malla.

Para observar las características del perfil estudiado, y así poder interpretar las secciones de resistividad, se contó con los datos provenientes de una calicata de un metro de profundidad a partir de la cual se elaboró la descripción del suelo ya comentada. A su vez, en distintos puntos de la línea (5,10, 6,90, 8,25 y 12 m desde el origen) se realizaron una serie de barrenados hasta 1,2 m de profundidad, que permitieron conocer la ubicación de los horizontes y, sobre todo, detectar la profundidad a la cual se halla el horizonte petrocálcico. Este último presenta la peculiaridad de tener cierta continuidad lateral, pero con heterogeneidades de tipo composicional y textural. Cabe mencionar a propósito de su dureza, que es sumamente variable en función de su cementación, pudiendo ser suficientemente tenaz en algunos sectores, como para impedir ser atravesada por el barreno manual.

### 3. RESULTADOS

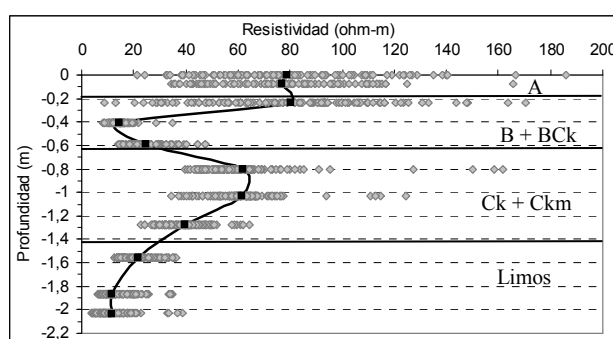
Se ha escogido la sección que corresponde al arreglo Schlumberger con un espaciamiento de 30 cm (Figura 1)

para realizar un análisis más detallado del resultado. La elección se debe a que esta combinación de arreglo y espaciamiento reproduce fehacientemente la ubicación de los horizontes que componen este suelo, con límites netos entre ellos.



**Figura 1.** Tomografía realizada con el arreglo Schlumberger, con 30 cm de distancia entre electrodos.

Para complementar este análisis, la totalidad de las resistividades reales de esta sección se graficaron en función de la profundidad (Figura 2), lo que permite visualizar más claramente la distribución dentro de cada horizonte.



**Figura 2.** Gráfico de resistividad (ohm-m) en función de la profundidad (m). La línea negra une la media de cada profundidad.

Finalmente, y basados en el conocimiento previo del suelo, se confeccionó la Tabla 2 en la que cada horizonte queda caracterizado por una resistividad media con su correspondiente rango de variación. Para realizar este cálculo se asumió que los límites son perfectamente horizontales. Cabe aclarar que la tercera línea de datos de la Figura 2, no se ha tenido en cuenta para los cálculos de la Tabla 2, debido a que estas resistividades no son representativas de un horizonte en especial por encontrarse en la zona límite entre el horizonte A2 y Bt1, pudiendo corresponder a uno u otro, dependiendo de la ubicación horizontal en el perfil.

**Tabla 2.** Rango de resistividades para cada horizonte y sus parámetros estadísticos. DS: desvío estándar. CV: coef. variación

Horizonte	Intervalo (cm)	$\rho$ media (ohm-m)	$\rho$ máxima (ohm-m)	$\rho$ mínima (ohm-m)	DS (ohm - m)	CV (%)
A	0-18	77,87	186,07	21,31	27,44	35
Bt + Bck	18-66	19,66	47,62	8,15	7,53	38
Ck y Ckm	66-141	54,37	161,84	22,68	18,29	34
Loess	141-200	15,83	38,61	3,81	7,75	49

Las mayores resistividades, con una media de 78 ohm-m, corresponden al horizonte A, resultado de su escaso contenido de agua, tal como lo confirman las mediciones de humedad y tensiometría llevadas a cabo en la parcela experimental (Tabla 1). El rango de resistividades es amplio, representado por el mayor valor de desvío estándar (Tabla 2). El horizonte Bt, incluyendo su transición al Ck, está caracterizado por un alto contenido en arcilla, presentando resistividades que promedian los 20 ohm-m. A pesar de que, al igual que en el caso anterior, los datos de humedad y tensiometría (Tabla 1) indican un bajo porcentaje de humedad, estas bajas resistividades obedecen también a la capacidad con que cuentan las arcillas de poder conducir la corriente eléctrica por medio de las cargas superficiales que presentan (Frohlich y Parke, 1989). El desvío estándar

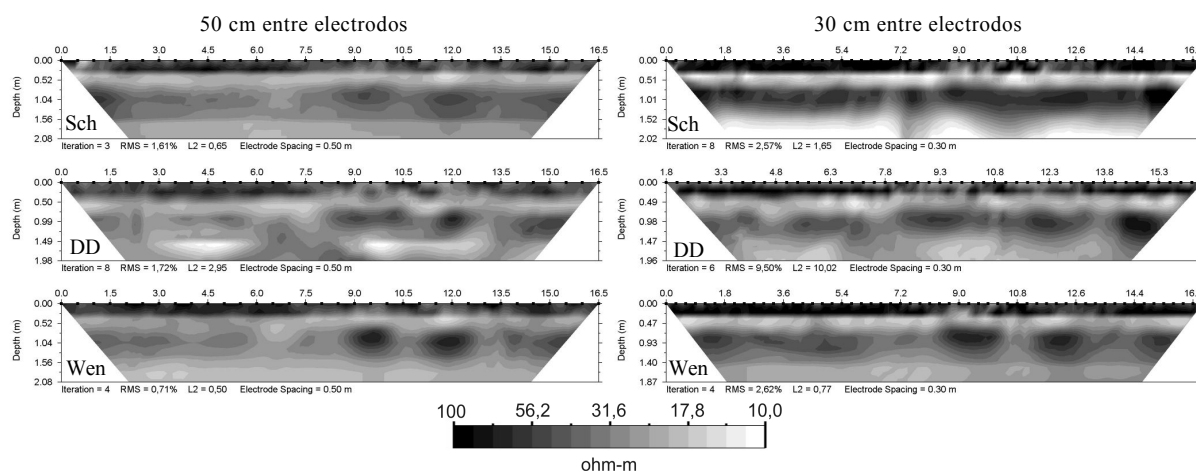
de las resistividades de este horizonte es menor. Por debajo, aparecen los horizontes Ck y Ckm que han sido agrupados debido a que este último pasa lateralmente a Ck dependiendo de la proporción de carbonato de calcio (Figura 1). En ellos siguen prevaleciendo las condiciones de escaso contenido de humedad y la resistividad media es de 54 ohm-m. La dispersión de los valores es importante, con un DS = 18,29 ohm - m. Es lógico suponer que tales variaciones responden a los diferentes contenidos de carbonato de calcio, principal material ligante de estos sedimentos y, en ocasiones, constituyente mayoritario. Un aumento en las proporciones del mismo, respecto del material clástico, resultará en la disminución de la porosidad y, en consecuencia, en la reducción de su capacidad de albergar agua en el espacio poroso, lo que conllevará a un aumento en la resistividad. A partir de los 141 cm, comienzan a aparecer los limos que componen el loess, los que presentan resistividades de 16 ohm-m en promedio. Los coeficientes de variación de los horizontes van de 34 a 38 % a excepción de este último cuyo valor es de 49 %.

Es oportuno destacar la precisión con la que el método ha resuelto la posición de cada uno de los horizontes. No menos importante, es la alta correlación entre dureza y resistividad encontrada para el horizonte petrocálcico tras los controles de campo llevados a cabo sobre la línea de estudio (Tabla 3).

**Tabla 3.** Control de campo mediante barrenado con la ubicación y descripción del horizonte petrocálcico.

Posición desde origen (m)	Horizonte petrocálcico (cm)	Descripción
5,10	60-70	Horizonte Ck muy tenaz
5,10	70-80	Horizonte Ckm muy cementado; color blanco
6,90	63-82	Limo carbonático, moderadamente duro
8,25	-----	Limo carbonático muy poco cementado, blando
12,00	70-80	Horizonte petrocálcico muy tenaz, muy cementado

Las secciones obtenidas con los diferentes arreglos y espaciamientos entre electrodos, se exponen en la Figura 3. Una primera observación permite señalar que existe gran similitud entre las configuraciones que poseen igual espaciamiento, y diferencias marcadas al comparar distintas distancias interelectródicas. En general, puede advertirse, y como es lógico suponer, que las tomografías de 50 cm poseen menor definición que las de 30 cm en cuanto a la discriminación de horizontes, con una marcada tendencia a la sobreestimación de sus espesores y profundidades. En cuanto a las resistividades asignadas a cada uno de ellos, son muy similares a las obtenidas más arriba para el caso de Schlumberger (Figura 1).



**Figura 3.** Resultados de las tomografías luego de haber aplicado diferentes espaciamientos y arreglos. Sch: Schlumberger; DD: dipolo - dipolo; Wen: Wenner.

A fin de realizar la comparación numérica entre las tomografías se calculó la raíz de la diferencia cuadrática media (RDCM) tomando como base la tomografía realizada con el arreglo Schlumberger y 30 cm de

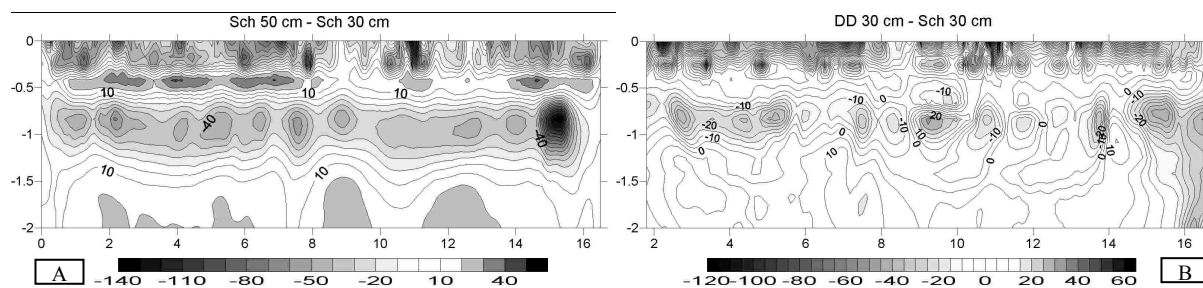
espaciamiento. La elección se debe a que esta combinación dispositivo-espaciamiento es la que mostró un mejor ajuste con los datos de campo (Weinzettel et al., 2009). De esta manera, se han obtenido cinco valores de la RDCM (Tabla 4) que resultan de la sustracción de dicha tomografía a las cinco restantes que aparecen en la Figura 3.

**Tabla 4.** Raíz de la diferencia cuadrática media para las cinco comparaciones (RDCM)

	Sch50-Sch30	DD50-Sch30	Wen50-Sch30	Wen30-Sch30	DD30-Sch30
RDCM (ohm-m)	27,8	29,0	26,8	15,3	16,7

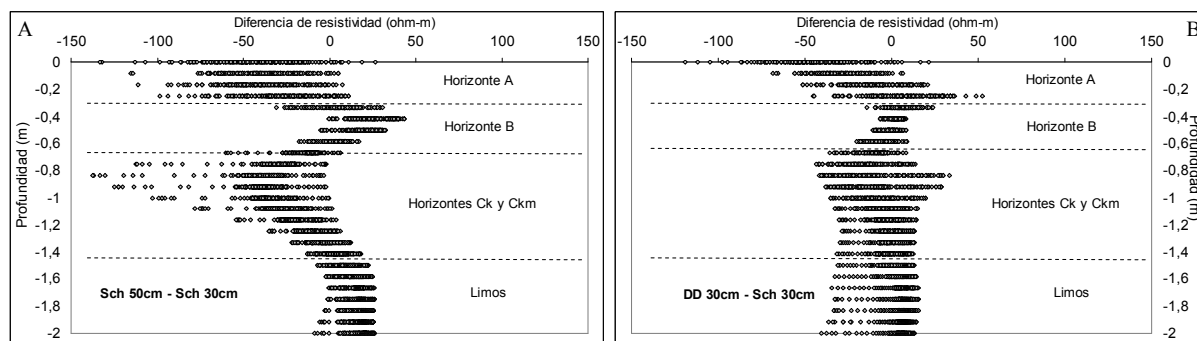
Como puede observarse, las mayores diferencias surgen al sustraer espaciamientos diferentes, incluso cuando el arreglo empleado es el mismo, como es el caso de Schlumberger. Nótese, además, que el RDCM encuentra el menor valor para la sustracción entre Wenner y Schlumberger con 30 cm, lo que denota una alta similitud en el resultado arrojado por estos métodos. Algo similar ocurre entre dipolo – dipolo y Schlumberger para el espaciamiento de 30 cm, con un valor de RDCM algo mayor.

Para ilustrar como se distribuyen en el espacio estas diferencias se han escogido dos de ellas. En la Figura 4a, y a fin de mostrar sólo los efectos que surgen tras utilizar diferentes espaciamientos, se exhibe el resultado de la sustracción correspondiente a Schlumberger. La Figura 4b, pretende mostrar los contrastes entre dos métodos, dipolo - dipolo y Schlumberger, para el espaciamiento de 30 cm.



**Figura 4.** Diferencia entre tomografías. A: sustracción de una tomografía realizada con el dispositivo Schlumberger y 30 cm de espaciamiento a otra de 50 cm. B: al arreglo dipolo - dipolo se le ha sustraído aquel obtenido con Schlumberger, ambos con 30 cm.

Complementariamente a estas secciones, en la Figura 5 se han graficado para ambos casos, las diferencias en la resistividad en función de la profundidad.



**Figura 5.** Diferencias de resistividad en función de la profundidad. A: Schlumberger de 30 cm sustraído a 50 cm del mismo método. B: dipolo - dipolo menos Schlumberger, ambos con 30 cm.

Como se observa en la Figura 4a, las diferencias son marcadas, con escaso predominio de tonalidades blancas, indicativas de diferencias menores a los 20 ohm-m. En general, el espaciamiento de 50 cm tiende a sobreestimar

en gran medida la profundidad a la que se encuentran los horizontes y, por consiguiente, a exagerar el espesor de los mismos. Al existir este defasaje en la profundidad que cada uno le asignó a los horizontes, las diferencias se incrementan. Esta es la razón más importante que permite explicar este hecho, y no así las resistividades asignadas a cada horizonte por los distintos métodos y separaciones, que producen valores similares. Para ejemplificar este hecho, nótese que entre los 40 y 50 cm existe una zona lateralmente continua, con una diferencia positiva de entre 20 y 30 ohm-m. Allí se desarrolla el horizonte Bt (Tabla 2) que ha sido detectado correctamente por el arreglo de 30 cm, con una resistividad promedio de 20 ohm-m. En cambio, según la tomografía con el espaciamiento de 50 cm, allí se encontraría aun el horizonte A, con resistividades mucho mayores (Tabla 2). Este defasaje puede observarse en la Figura 5a, con un neto predominio de los valores positivos. Lo contrario sucede para el horizonte petrocálcico, intervalo caracterizado por valores negativos y con una alta dispersión. Finalmente, resta señalar la tendencia negativa en el horizonte A.

En la comparación de los dispositivos dipolo - dipolo y Schlumberger para el espaciamiento de 30 cm, existen algunas diferencias en cuanto a la profundidad que le asignan a los distintos horizontes, que si bien son pequeñas, vale la pena comentar. En coincidencia con la teoría (Locke, 2004), dipolo - dipolo tiende a sobreestimar ligeramente la profundidad de los mismos. Es así que a los 25 cm aproximadamente, aparece una zona en que la diferencia es mayor a cero (Figuras 4b y 5b). Es decir, que a esa profundidad, comienza el horizonte Bt según Schlumberger mientras que para dipolo - dipolo continúa el horizonte A. Finalmente, cabe resaltar que la dispersión observada para el horizonte petrocálcico ha desaparecido, indicio de que ambos métodos fueron capaces de diferenciar las zonas con diferente resistividad.

#### 4. DISCUSIÓN

A la hora de analizar cuál arreglo es el más indicado para el estudio de un sitio dado, deben necesariamente, contemplarse una serie de aspectos. Para el caso particular de la zona que nos compete, uno de los aspectos a considerar, y sobre el cual se ha hecho hincapié en este trabajo, es la capacidad de diferenciar los horizontes y situarlos a la profundidad correcta. En este sentido, tanto los arreglos Schlumberger, dipolo - dipolo y Wenner, con espaciamiento de 30 cm, respondieron satisfactoriamente ante ambos requerimientos. El método dipolo - dipolo mostró una ligera sobrestimación en las profundidades, mientras que Schlumberger y Wenner no presentaron diferencias apreciables, similitud que quedó en evidencia al presentar el valor más bajo de RDCM. Por otro lado, dipolo - dipolo tiene la tendencia de brindar diseños algo más discontinuos ya que es más susceptible, dada su configuración, a detectar cambios en sentido horizontal y no tanto vertical, como es el caso de estudio. A pesar de ello, es una opción interesante y que no debe ser dejada de lado al momento de evaluar fenómenos de infiltración y recarga al acuífero, así como también posibles estructuras orientadas verticalmente.

Siguiendo con las tomografías de 30 cm de espaciamiento, en la comparación entre dipolo - dipolo y Schlumberger, se observó una alta dispersión de datos para el horizonte A, con un predominio de los valores negativos. En particular, el horizonte A presenta por sí solo una gran variación en la resistividad (Figura 2, Tabla 2), debido a la presencia de macroporosidad y agrietamiento que aparecen por contracción del suelo cuando el contenido de humedad es muy bajo, como aquí sucede. Las grietas están ocupadas por aire que actúa como un aislante, elevando de esta forma las resistividades. A su vez, la desviación hacia valores positivos surgió a raíz de las mayores resistividades asignadas por Schlumberger a este horizonte.

Respecto de las diferencias detectadas entre 50 y 30 cm de espaciamiento, se observa una marcada diferencia negativa para el horizonte A posiblemente debido a que el de 50 cm incluye, durante la medición, parte del horizonte argílico correspondiente al B y ello produce una disminución de las resistividades respecto de las obtenidas con el de 30 cm. Por otro lado, al comparar numéricamente distintos espaciamientos se han obtenido los valores más elevados de RDCM. Este hecho se debe principalmente al defasaje producido en la determinación de los horizontes, ya que las resistividades asignadas son muy similares (Figura 3).

Una consideración importante a tener en cuenta en la planificación del trabajo de campo es el tiempo que insume cada uno de los arreglos. En particular, el arreglo dipolo - dipolo consume más tiempo que Schlumberger y Wenner debido a que registra mayor cantidad de datos. Para cada una de estas tomografías el número de datos y tiempo empleado es: Schlumberger: 488, en 54 min; Wenner: 495, en 55 min; dipolo - dipolo: 762 en 85 min. En consecuencia, la obtención de buenos resultados con Schlumberger en un tiempo razonable, hace que en

principio sea considerado como el método más apropiado para relevar el área en cuestión. No obstante, se debe tener en cuenta que para determinados casos el método dipolo – dipolo es sumamente recomendable debido a que la gran cantidad de datos adquiridos produce una mayor discretización del medio. En contraposición, la experiencia de campo ha mostrado que de no contar con un excelente contacto entre el suelo y los electrodos pueden producirse errores en la toma de datos, que hagan en ciertas oportunidades descartar la tomografía.

## 5. CONCLUSIONES

La tomografía eléctrica ha mostrado ser una herramienta muy valiosa para poder conocer la distribución de los horizontes del suelo. No obstante, su aplicación siempre debe estar acompañada de un control de campo que permita relacionar las resistividades con los materiales presentes en cada sitio.

Schlumberger y Wenner resolvieron de forma similar la distribución en profundidad y lateral de los horizontes del suelo, con una buena discretización del horizonte petrocálcico, tan conspicuo en la zona de estudio. Estos dos arreglos mostraron mejor precisión que dipolo – dipolo en cuanto a la exactitud en la determinación de las profundidades de los niveles del suelo. Estas apreciaciones están avaladas por los resultados de las diferencias numéricas entre arreglos para un mismo espaciamiento.

De los dos espaciamientos aplicados, el de 30 cm, independientemente del arreglo, reproduce de mejor manera las condiciones reales respecto del de 50 cm, según indican los controles de campo. Asimismo, las diferencias entre distintos espaciamientos son más significativas que las obtenidas entre arreglos.

Si bien Schlumberger y Wenner caracterizan mejor las estructuras horizontales, también se debe considerar que el arreglo dipolo - dipolo es una opción apropiada ya que, en condiciones de buen contacto electrodos-suelo, resuelve muy bien la presencia de estructuras verticales como pueden ser discontinuidades en los horizontes petrocálcicos.

*Agradecimientos.* Este trabajo ha sido financiado por la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (ANPCYT) de Argentina PICT 1988, y subsidios de la Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CIC).

## REFERENCIAS

- Advanced Geosciences, Inc., 2005. *EarthImager 2D, resistivity and IP inversion software, version 2.2.8. Instruction manual*. Austin Texas.
- Besson A; I. Cousin; G. Richard y H. Boizard. 2004. Structural heterogeneity characterization of the soil tilled layers by a 2D electrical resistivity prospecting. *Soil Till Res* 79, 239-249.
- Corwin, D.L. y S.M. Lesch, 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agricultura: Theory, Principles and Guidelines. *Agron J* 95, 455-471.
- Dahlin, T. y B. Zhou, 2004. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophys Prospect* 52, 379-398.
- Frohlich, R.K. y C.D. Parke, 1989. The Electrical Resistivity of the Vadose Zone – Field Survey. *Ground Water* 27(4), 524-530.
- Locke, M.H., 2004. Tutorial 2D and 3D electrical imaging surveys.
- Samouëlian, A., I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand y G. Richard, 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Till Res* 83, 173-193.
- Schwartz, B.F., M.E. Schreiber y T. Yan, 2008. Quantifying field scale soil moisture using electrical resistivity imaging. *J. of Hydrology*, 362, 234-246
- Soil Survey Staff, 1999. Soil Taxonomy. A Basic System of Soil Classification for making and Interpreting Soil Surveys. Agric. Handbook No. 436, 2nd. Edition. NRCS-USDA. US Govern. Printing Office Washington, D.C.
- Stummer, P., H. Maurer y A.G. Green, 2004. Experimental design: Electrical resistivity data sets that provide optimum subsurface information. *Geophysics* 69, 120-139.
- Tabbagh, A.; M. Dabas, A. Hesse y C. Panissod, 2000. Soil resistivity: a non-invasive tool to map soil structure horizonation. *Geoderma* 97, 393-404.
- Telford...
- Weinzettel, P.; E. Usunoff y L. Vives, 2005. Groundwater recharge estimations from studies of the unsaturated zone. Cap. 11, Pp. 133-143 en: E. Bocanegra, M. Hernández y E. Usunoff (eds.). *Groundwater and human development*. Balkema Publishers, Londres, Inglaterra. 300 p.
- Weinzettel, P., M. Varni, S. Dietrich y E. Usunoff, 2009. Evaluación de tres dispositivos de tomografía eléctrica para la identificación de horizontes petrocálcicos en el suelo. *Ci. Suelo* 27(1), en prensa.
- Wendroth, O., Koszinski, S. y E. Pena-Yewtukhiv, E. 2006. Spatial association among soil hydraulic properties, soil texture, and geoelectrical resistivity. *Vadose Zone J.* 5, 341-355.