

## UTILIZACIÓN DE LA TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA RESISTIVA PARA ESTIMAR EL CONTENIDO DE AGUA EN EL SUELO EN VIÑA BAJO DIFERENTES SISTEMAS DE RIEGO

J. Dafonte, J.R. Raposo, M. Valcárcel, M. Fandiño, E.M. Martínez, B.J. Rey y J.J. Cancela

GI-1716. Proxectos e Planificación. Departamento de Enxeñaría Agroforestal. Escola Politécnica Superior. Universidade de Santiago de Compostela. Benigno Ledo s/n. 27002 Lugo. e-mail: [jorge.dafonte@usc.es](mailto:jorge.dafonte@usc.es), web: <http://www.proepla.es>

**RESUMEN.** Se evaluó la utilización de la tomografía eléctrica resistiva para la estimación del contenido de agua en el suelo en viñedo con tres sistemas: sin riego, riego por goteo aéreo y riego por goteo enterrado, en una parcela en Villafranca del Bierzo León (España). Se utilizó para la medida de la resistividad eléctrica de cada tipo de sistema 5 líneas de 10 m de longitud con una separación interelectrodos de 0,5 m en una única fecha de muestreo, utilizándose el programa RES3DINV para la inversión de los datos de resistividad eléctrica aparente, comparándose los datos de resistividad eléctrica tras la inversión con las medidas de humedad realizadas con TDR. Los datos obtenidos fueron ajustados a las ecuaciones de Archie y de Rhoades que relacionan humedad y resistividad eléctrica del suelo, observándose un mal ajuste de las medidas a las ecuaciones para los rangos medidos de humedad y resistividad eléctrica.

**ABSTRACT.** The use of resistive electrical tomography for estimating water content in the soil in vineyard with three systems: without irrigation, drip irrigation and drip irrigation air buried in a plot in Villafranca del Bierzo, León (Spain) was evaluated. The electrical resistivity of each type of system was measured with 5 lines of 10 m length and 0.5 m spacing between electrodes in a single sampling date, the software RES3DINV was used for the inversion of apparent soil electrical resistivity measurements, it was compared soil electrical resistivity data after inversion with soil moisture measurements made with TDR. The data were fitted to the equations of Archie and Rhoades that relates soil water content and electrical resistivity, showing a poor fit of the measures to equations for moisture and electrical resistivity ranges measured.

### 1.- Introducción

El contenido de agua en el suelo controla importantes procesos físicos, químicos y biológicos como el crecimiento vegetal, transporte de solutos, infiltración, escorrentía superficial, erosión y por último los procesos de edafogénesis (Western et al., 2003). Diferentes procesos afectan a la heterogeneidad en la distribución 3D de los contenidos de agua en el suelo, como pueden ser diferentes características hidrológicas del suelo, de la vegetación, de la precipitación y también del sistema de riego.

La ventaja de los métodos de no-contacto para la medida

de la humedad del suelo como el radar de penetración en el subsuelo (GPR), inducción electromagnética (IEM), y de la tomografía eléctrica resistiva (TER) es que suponen una escala intermedia entre las medidas de contenido de agua con teledetección y los métodos de medida locales (gravimetría, TDR, FDR,..). La teledetección tiene las desventajas de estar limitada a unos cuantos centímetros de profundidad, y no puede utilizarse en el caso de vegetación densa, y se ve influida por la rugosidad superficial del terreno y no puede conocerse la variabilidad de la humedad intrapixel (Minet, 2011). Los métodos de IEM tiene la desventaja de que la profundidad de exploración depende de la separación de las bobinas y del modo de dipolo, con lo que en una sola pasada no se puede tener una información detallada de la variabilidad espacial de la humedad. A su vez en el GPR la profundidad de exploración depende la constante dieléctrica del medio y de su conductividad eléctrica, además de ser difícil la interpretación de los radargramas (Weihermüller et al., 2007).

La TER está reconocida como un método no invasivo para el estudio de la variabilidad espacial y temporal del suelo, que ha sido utilizado ampliamente para estudios de agua subterránea, transporte de solutos, manejo del suelo identificación de áreas compactadas, espesor de los horizontes de suelo y profundidad al lecho de roca, y cuantificación de propiedades hidrológicas del suelo. Estos estudios dependiendo de las heterogeneidades del área pueden llevarse a cabo en dos o tres dimensiones, proporcionando información detallada de la variabilidad espacial de la resistividad eléctrica (RE), y además a diferentes escalas de resolución desde resolución centimétrica a escala regional.

La TER ha sido usada extensivamente para estimación del contenido del agua en el suelo (Brunet et al., 2010; Schwartz et al., 2008; Beff et al., 2013; Samouëlian et al., 2005). Según Friedman (2005) los factores que afectan al valor de RE son porosidad, contenido en agua, estructura, forma de las partículas y orientación, distribución de tamaño de las partículas, capacidad de intercambio catiónico, composición de cationes de la solución del suelo, temperatura,...

Entre los métodos indirectos de contacto utilizados para la estimación del contenido de agua en el suelo durante los últimos 30 años la Reflectometría de Dominio Temporal (TDR) ha sido muy utilizada. Entre las ventajas de su uso se destaca la alta resolución temporal, la rapidez de adquisición de los datos y la repetibilidad de las medidas. Además la relación entre la permitividad dieléctrica del

suelo y el contenido de agua en el suelo es constante para muchos tipos de suelos, por lo que no necesita una calibración específica para cada suelo. Por otro lado debido a su pequeño volumen de exploración (Robinson et al. 2005) en suelos pedregosos la inserción de las guías puede ser complicada debido a la dificultad de inserción y la posible creación de poros llenos de aire que pueden modificar la medida de la permitividad eléctrica relativa (Souto et al., 2008)

Fandiño et al. (2009) mostraron la importancia del sistema de riego empleado, en particular para sistemas de riego por goteo subsuperficial y superficial. Desde la derogación de la prohibición de regar en los viñedos con destino a vinos de mesa en el año 1996 (Ley 8/1996), se ha regulado el riego en el viñado en el Reglamento CE 1493/1999. La determinación de la demanda real de agua para el riego de viña, especialmente en zonas de escasez en determinadas épocas de año, se considera un factor primordial que incide de forma controlable en la calidad de la uva (Campos et al., 2009). No obstante, los viticultores no sólo demandan un conocimiento de aspectos de manejo como la frecuencia y duración del riego a aplicar (Raes et al., 2000), sino unos conocimientos técnicos complementarios sobre cuál es el sistema de riego más adecuado, a su caso particular, que garantice un óptimo y sustentable manejo.

En ocasiones se interpreta el uso del riego como una herramienta para incrementar la producción, no obstante, una mala gestión en la programación del riego puede conllevar graves pérdidas en cantidad y calidad del producto final. La correcta gestión del agua ante una situación de cambio climático es fundamental en cultivos de un alto valor añadido como el viñado (Jones, 2007).

Los objetivos de este trabajo fueron evaluar el potencial de la tomografía eléctrica resistiva para evaluar las diferencias en el contenido de agua en el suelo con dos sistemas de riego por goteo diferenciado y un tratamiento sin uso de riego en viñado en una parcela situada en la D.O. del Bierzo (León).

## 2.- Material y métodos

### 2.1.- Área de estudio

La parcela de estudio está situada Villafranca del Bierzo en León (España) en X 680910 Y 4719630 Huso 29 ETRS89, y se dedica al viñado usando la variedad Mencía con sistema de conducción en espaldera de guyot doble, existiendo tres tratamientos, el primero sin riego, el segundo y tercero con riego con goteros separados 1 m con caudales de 2 l/h, y riego diario de 6-7 h de la mañana, el segundo tratamiento es con riego por goteo aéreo y el tercer tratamiento riego por goteo subterráneo enterrado a una profundidad de 0,30-0,40 m. En esta experiencia se intenta ver la influencia de un riego por goteo aéreo y otro subterráneo con respecto a un tratamiento de sin riego, en la transpiración, producción y calidad de la uva. La localización puede observarse en la fig. 1.



Fig. 1. Parcela de estudio y localización de los tres tratamientos

Según el mapa geológico el material de partida es Terciario Indiferenciado: arenas, arcillas, limos y niveles de conglomerados (GEODE, 2013). El tipo de suelo en la zona es un Cambisol districo, según la clasificación FAO en el mapa de suelos de Castilla y León.

Los datos del análisis textural del suelo de la parcela se muestran en la tabla 1.

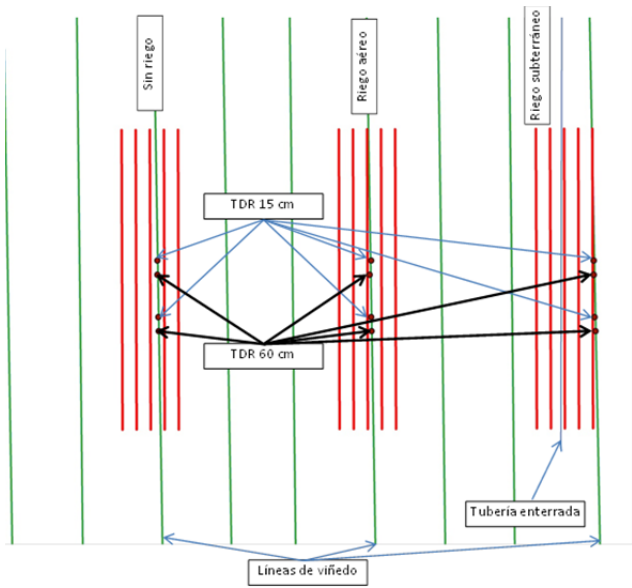
Tabla 2. Textura del suelo

Profundidad (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	Textura (USDA)
0-15	43,08	28,36	28,56	Franco arcilloso
15-45	39,44	32,36	28,20	Franco arcilloso

Las medidas de contenido de agua en el suelo y la tomografía eléctrica resistiva se realizaron en una sola fecha de muestreo 23/7/2012.

### 2.2.- Tomografía eléctrica resistiva

Para las medidas de TER se utilizó un equipo Terrameter SAS 1000 (ABEM), junto con un selector de electrodos ES 10-64, se realizaron cinco transectos con 0,5 m de separación entre líneas y una longitud de 10 m, con separación entre electrodos de 0,5 m (Fig. 2). Los datos de cada transecto 2D fueron unidos para invertir los datos medidos de resistividad aparente y convertirlos en datos de resistividades reales, produciendo un modelo 3D de resistividades usando el software RES3DINV (Loke 2011), el protocolo de medida utilizado fue el de Wenner, esta disposición posee una mayor sensibilidad a detectar los cambios verticales en la resistividad, siendo más apropiado para estudiar estructuras horizontales y tiene mayor fortaleza de la señal (Loke, 2011; Griffiths y Baker, 1993; Samouëlian et al., 2005).



**Fig. 2.** Localización de los perfiles de tomografía eléctrica y de las medidas contenido de agua en el suelo con TDR

**2.3.- Medida del contenido de agua en el suelo con TDR**

El contenido de agua en suelo se midió con un equipo TDR100 de Campbell Scientific, gestionado en campo mediante el software PCTDR, Para convertir los datos de permitividad dieléctrica relativa en datos de contenido en agua volumétrico se utilizó la ecuación de Topp et al. (1980), que ha sido utilizada exitosamente en suelos que no contienen cantidades importantes de agua adsorbida p.e. suelos arenosos y limosos (Robinson et al., 2003). Las guías de medida fueron conectadas al equipo TDR mediante un cabezal flexible (Souto et al., 2008), se situaron a una profundidad de 60 cm, coincidente con la extensión de la zona radicular, permitiendo el seguimiento de la humedad en el bulbo húmedo generado por los sistemas de riego. Las mediciones se completaron con varillas dispuestas a 15 cm de profundidad para realizar el seguimiento de la capa evaporativa del suelo (Fandiño et al., 2009). En cada fila de viñedo existen dos repeticiones con medidas de humedad (Fig. 2).

**2.4.- Relación resistividad eléctrica y contenido de agua en el suelo**

La resistividad eléctrica del medio subsuperficial está fuertemente influida por el contenido de agua en el subsuelo, que actúa como un electrolito, basado en el desplazamiento de iones en el agua de la porosidad del suelo y de ahí que sea menor la resistividad cuanto mayor sea la presencia de sales disueltas (Samouëlian et al, 2005)

Para suelos sin cantidades significativas de arcillas es válida la ley de Archie (1942), la cual asume que las características de la fase sólida no influyen en la capacidad de conducir electricidad del medio (Samouëlian et al, 2005), que se encuentra en la ec. 1.

$$\rho = \frac{a}{\phi^m S^n} \rho_w \tag{1}$$

Donde  $\rho$  es la resistividad eléctrica de la estructura,  $\rho_w$  es la resistividad eléctrica del agua de los poros,  $S$  es el grado de saturación,  $a$  y  $m$  son constantes relacionadas respectivamente al coeficiente de saturación y al factor de cementación,  $n$  es un parámetro relativo al grado de saturación.

Para suelos con textura fina, como el que tenemos en la parcela, la resistividad eléctrica de la matriz sólida no puede despreciarse. Entonces habría que usar un modelo como el propuesto por Rhoades et al. (1976) para estimar las propiedades eléctricas de materiales no saturados, que está expuesto en la ec. 2:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{1}{\rho_w} (a\theta^2 + b\theta) + \frac{1}{\rho_s} \tag{2}$$

Donde  $a$  y  $b$  son coeficientes que dependen de las características de la fase sólida del suelo relativas a la textura y a la mineralogía,  $\theta$  es el contenido volumétrico de agua y  $\rho_s$  es resistividad eléctrica de la matriz sólida.

No se tuvo en cuenta la influencia de la temperatura en los valores de resistividad debido a que todas las medidas se realizaron el mismo día, por lo que se consideró que la temperatura permaneció constante durante el tiempo de la medida.

**3.- Resultados y discusión**

Los resultados de los datos de resistividad eléctrica tras la inversión se encuentran en la tabla 1, se observa que los valores medios son superiores en el caso de no existencia de riego lo que es esperable debido a los menores valores de contenido de agua en el suelo, dentro de los tratamientos de riego por goteo, se observa un valor de la media un poco más reducido en el caso del riego aéreo subterráneo con menores valores máximos, lo cual también es esperable debido a que el gotero emite el agua directamente en el suelo.

**Tabla 1.** Valores de resistividad eléctrica tras la inversión de los datos de resistividad eléctrica aparente

Resistividad eléctrica ( $\Omega$ -m)	Sin riego	Riego goteo aéreo	Riego goteo subterráneo
Media	644	394	360
Mínimo	20	33	49
Máximo	14262	5003	2190

En la figura 3, se pueden observar varias secciones transversales en el eje XY. Se observa mayor heterogeneidad en la distribución de los valores de resistividad eléctrica sobre todo en la capa superior de 0-

0,25 m, también se aprecia una zona de alta resistividad que coincide con el lugar donde pasa la tubería de riego, que fue instalada en el invierno del año 2012 con un arado topo, en la figura 3c en la capa de 0,25-0,54 m, de lo que podría deducir la existencia de algún tipo de cavidad, que provoca altos valores de resistividad eléctrica.

En la figura 4 se identifican los bulbos húmedos de los goteros como zonas con menor resistividad eléctrica que corresponde con un mayor contenido en agua en el suelo.

Los resultados obtenidos muestran que es posible identificar las zonas de menor resistividad que se identifican con zonas con mayor contenido de agua. En general los menores valores de resistividad se obtienen en el caso del riego subterráneo y los mayores valores en el caso en que no existe riego. En los tres casos la mayor heterogeneidad se observa hasta los 0,87 m, lo cual implica que en principio la mayor demanda evapotranspirativa se produce en las capas superficiales del suelo. También se enfrentaron los valores de contenidos de agua volumétrica estimados a partir de la medida de la permitividad eléctrica obtenida del TDR frente a los valores de resistividad eléctrica obtenidos de la inversión de los datos obtenidos de la TER (Fig 5). Se observa que en el rango de humedades y resistividades del suelo medidas la gráfica tiene una baja pendiente, esto coincide con lo que describe Calamita et al. (2012), que muestra poca sensibilidad de los datos de humedad a las variaciones de resistividad eléctrica. Se han probado las ecuaciones de Archie y de Rhoades, el ajuste gráfico se puede observar en la fig. 4 y los valores de la bondad de ajuste se muestran en la tabla 2, estos valores muestran que cualquiera de las dos ecuaciones no predicen adecuadamente el contenido de agua del suelo en los rangos de humedad y conductividad eléctrica del suelo medidas, teniendo valores del coeficiente de Nash-Sutcliffe inferiores a cero. Un trabajo de Werban et al. (2008) describe el efecto que podrían tener las raíces de las plantas en la relación entre resistividad eléctrica y contenido de agua del suelo cuando se utiliza la ecuación de Archie. Schwartz et al. (2008) al comparar las medidas de la resistividad eléctrica obtenida tras la inversión con los datos de humedad obtenidos con TDR en una medida de un solo día, no encontraron relaciones claras entre los dos parámetros, que achacaron a la escala de medida de los métodos, a las variaciones del contenido de arcilla en las diferentes localizaciones y profundidades, y propusieron una modificación de la ecuación de Archie para tener en cuenta el contenido en arcilla del suelo.

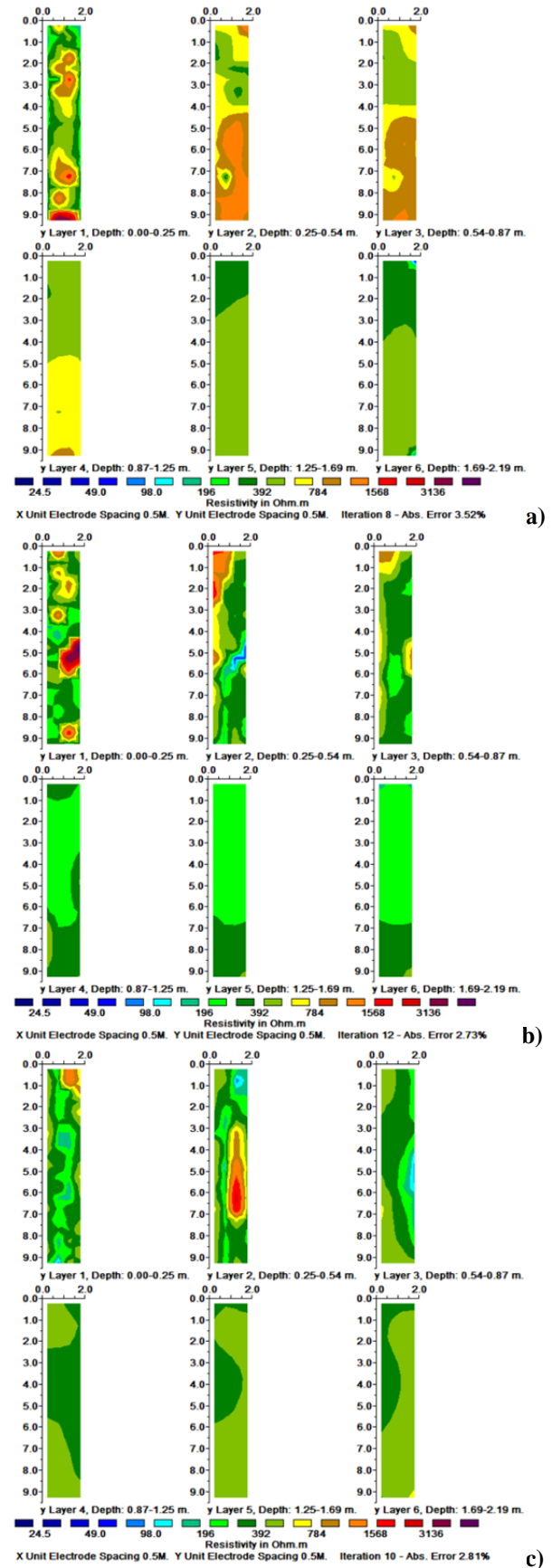


Fig. 3. Secciones transversales en el plano XY de los valores de resistividad eléctrica tras la inversión a) Sin riego b) Riego aéreo c) Riego subterráneo



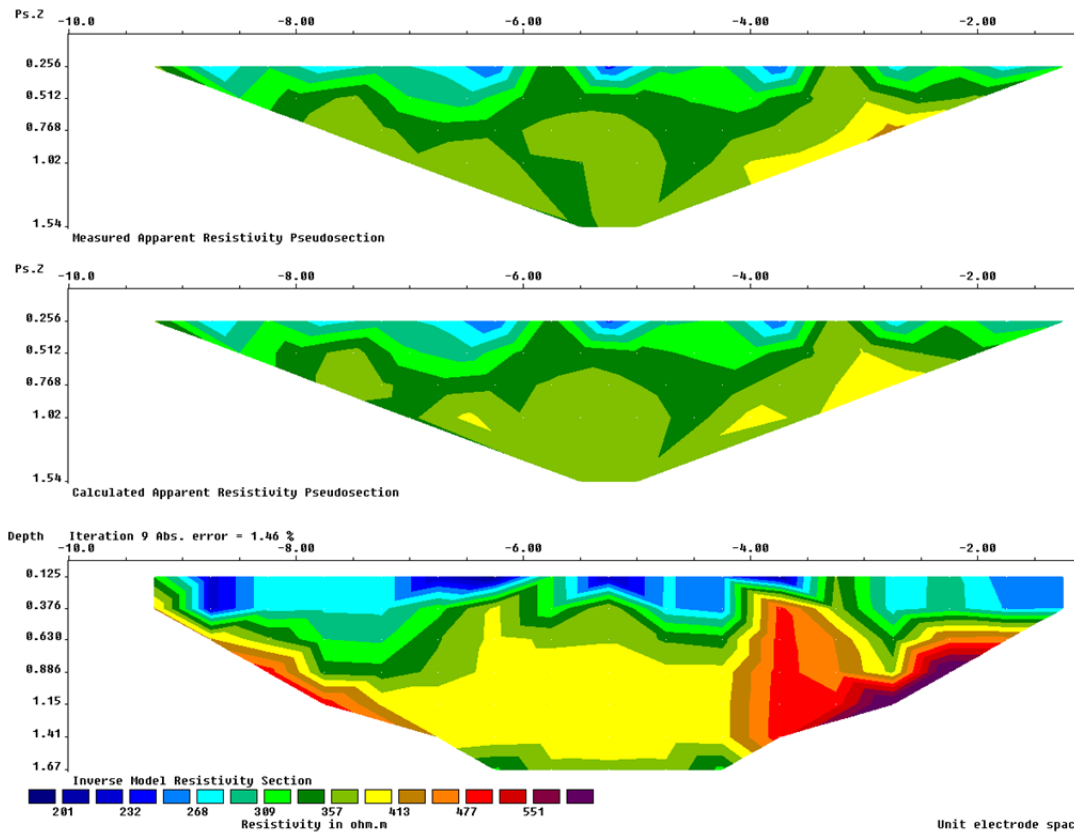


Fig. 4. Perfil de valores de la resistividad eléctrica aparente medida y calculada tras la inversión y del modelo inverso de resistividad eléctrica obtenidas con RES2DINV en el caso del riego subterráneo en la línea de goteros

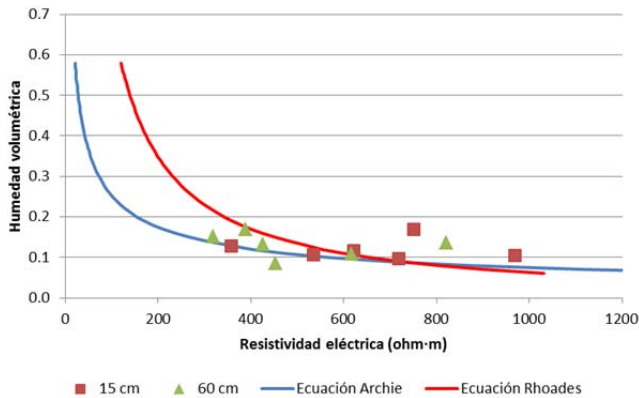


Fig. 5. Comparación de los datos medidos de contenido en agua volumétrico con TDR y de los datos de resistividad eléctrica del suelo obtenidos con la inversión. Ajuste a la ecuación de Archie y Rhoades

Tabla 2. Valores bondad de ajuste de la ecuación de Archie y de Rhoades et al.

Ecuación	Coefficiente de correlación	Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe
Archie	0,18	-1,06
Rhoades	0,21	-0,09

Otra fuente de incertidumbre es que los datos de

resistividad eléctrica del suelo proceden de la inversión de los datos de resistividad eléctrica aparente y según Marescot et al., (2003) los algoritmos de inversión producen incertidumbres que se incrementan con la profundidad. Según Brunet et al. (2010) estas incertidumbres son difíciles de cuantificar, y un análisis de sensibilidad debería llevarse a cabo usando simulaciones apropiadas, introduciendo modificaciones en las resistividades aparentes de las celdas superiores y midiendo su impacto en las celdas más profundas.

#### 4.- Conclusiones

La tomografía eléctrica resistiva parece describir adecuadamente desde un punto de vista cualitativo la distribución de agua en el suelo, permitiendo una visión tridimensional de la misma, pero como elemento de predicción del contenido de agua en el suelo la comparación de los datos de contenido de agua en el suelo y resistencia eléctrica del suelo muestra poca correlación, por lo que se necesita más datos para poder llegar a predicciones más precisas.

*Agradecimientos.* Este Trabajo fue financiado por el Ministerio de Ciencia e Innovación a través del proyecto (CGL2009-13700-C02). A la empresa NaandanJain Iberica por la cesión de materiales de riego y a la Bodega Luna Beberide por su colaboración en el desarrollo del ensayo. A la Xunta de Galicia por la convocatoria I. Barreto 2009.

## 5.- Bibliografía

- Archie, G.E., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans., Am. Inst. Mining metallurg. Eng.* 146, 54-62.
- Beff, L., T. Günther, B. Vandoorne, V. Couvreur, y M. Javaux, 2013. Three-dimensional monitoring of soil water content in a maize field using electrical resistivity tomography. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 17(2), 595-609.
- Brunet, P., R. Clément, y C. Bouvier, 2010. Tomography (ERT) – A case study in the Cevennes area, France. *J. Hydrol.* 380(1-2), 146–153.
- Calamita, G., L. Brocca, A. Perrone, S. Piscitelli, V. Lapenna, F. Melone, y T. Moramarco, 2012. Electrical resistivity and TDR methods for soil moisture estimation in central Italy test-sites. *J. Hydrol.* 454, 101-112.
- Campos I., A. Calera, E.A. Torres, C. Balbontin, J. González-Piqueras, M.L. López, y C.M.U. Neale, 2009. Evapotranspiración y estrés de la cubierta vegetal utilizando una secuencia multitemporal de imágenes de satélite. Caso de estudio: viña en regadío. En: *Teledetección: agua y desarrollo sostenible. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*. Calatayud.
- Fandiño, M., J.J. Cancela, y B.J. Rey, 2009. Evaluación de sistemas de riego por goteo sobre la producción en viñedo. En: *XXVII Congreso Nacional de Riegos*. Murcia, 109-110.
- Forteza Bonin, J.; A. García Rodríguez, A. y L.F. Lorenzo Martín, 1988. *Mapa de suelos de Castilla y León 1:400.000*. IRNASA. Salamanca [http://ftp.itacyl.es/cartografia/06\\_Edafologia/Mapa\\_Suelos\\_CyL\\_FAO\\_4\\_00000/](http://ftp.itacyl.es/cartografia/06_Edafologia/Mapa_Suelos_CyL_FAO_4_00000/) [consulta: 15 abril 2013].
- Friedman, S.P., 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: A review. *Comput. Electron. Agr.* 46, 45-70.
- GEODE, 2013. *Mapa Geológico Digital continuo de España [en línea]. Sistema de Información Geológica Continua: SIGECO*. IGME. Ed: J. Navas <http://cuarzo.igme.es/sigeco/default.htm> [consulta: 15 abril 2013].
- Griffiths, D.H. y R.D. Barker, 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modelling in areas of complex geology. *J. Appl. Geophys.* 29, 211–226.
- Jones G., 2007. Climate Change: Observations, Projections, and General Implications for Viticulture and Wine Production. En: *Congress Climate and Viticulture*. Zaragoza.
- Loke, M.H., 2011. Tutorial : 2-D and 3-D electrical imaging surveys. [www.geoelectrical.com](http://www.geoelectrical.com).
- Marescot, M.H., D. Loke, R. Chapellier, R. Delaloye, C. Lambiel, y E. Reynard, 2003. Assessing reliability of 2D resistivity imaging in mountain permafrost studies using the depth of investigation index method. *Near Surf. Geophys.* 1, 57–67.
- Minet, J. 2011. *High-resolution soil moisture mapping by a proximal ground penetrating radar: A numerical, laboratory and field evaluation*. PhD thesis, Faculte d'ingenierie biologique, agronomique et environnementale, Université catholique de Louvain, Louvain-la-Neuve (Belgium). <http://dial.academielouvain.be/handle/boreal:76830>
- Souto, F.J., J. Dafonte, y M. Escariz, 2008. Design and air-water calibration of a waveguide connector for TDR measurements of soil electric permittivity in stony soils. *Biosyst. Eng.* 101, 463-471.
- Raes, D., A. Sahli, J. Van Looij, N. Ben Mechlia, y E. Persoons, 2000. Charts for guiding irrigation in real time. *Irrig. Drainage Syst.*, 14, 343-352.
- Rhoades, J.D., P.A.C. Raats, y R.J. Prather, 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 40, 651- 655.
- Robinson, D., S. Jones, J. Wraith, D. Or, y S. Friedman, 2003. A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry. *Vadose Zone J.* 2, 444–475.
- Samouelian, A., I. Cousin, A. Tabbagh, A. Bruand, y G. Richard, 2005. Electrical resistivity survey in soil science: a review. *Soil Till Res.*, 173-193.
- Schwartz, B. F., M.E. Schreiber, y T. Yan, 2008. Quantifying field-scale soil moisture using electrical resistivity imaging. *J. Hydrol.* 362, 234–246.
- Weihermüller, L., J.A. Huisma, S. Lambot, M. Herbst, y H. Vereecken, 2007. Mapping the spatial variation of soil water content at the field scale with different ground penetrating radar techniques. *J. Hydrol.* 340, 205–216.
- Werban, U., S.A. al Hagre, y W. Rabbel, 2008. Monitoring of root-zone water content in the laboratory by 2D geoelectrical tomography. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 171, 927-935.
- Western, A. W., R.B. Grayson, G. Bloschl, y D.J. Wilson, 2003. Spatial variability of soil moisture and its implications for scaling. En: *Scaling methods in soil physics*, Pachepsky, Y., Radcliffe, D. E., y Selim, H. M., (Eds.) CRC Press, Florida, 119–142.