

Interpretación de la conductividad eléctrica aparente para la delimitación de zonas de manejo en el sudeste bonaerense

Nahuel R. Peralta^{1,3}, José L. Costa² y Franco M. Castro³

Introducción

La variabilidad espacial de los suelos es causada por interacciones entre procesos físicos, químicos y biológicos que actúan simultáneamente con diferente intensidad. El manejo uniforme de los lotes no es una estrategia de manejo eficiente ya que no tiene en cuenta la variabilidad existente (Moral et al., 2010). El manejo de cultivos sitio-específico (MCSE) es una forma de agricultura de precisión, ya que las decisiones sobre la aplicación de insumos y prácticas agronómicas se realizan considerando la variabilidad espacial de la fertilidad del suelo y los requerimientos de los cultivos. El MCSE supone que se puede clasificar a un lote en áreas homogéneas (referidas a zonas) en función de la medición de uno o más atributos del suelo que reflejen diferencias entre las zonas y, por lo tanto, en las propiedades del suelo (Moral et al., 2010). Sin embargo, es difícil determinar las zonas de manejo debido a las complejas interacciones de los factores edáficos que pueden afectar el rendimiento de los cultivos. Según Fraisse et al. (2001), la producción potencial de los cultivos está estrechamente relacionada con el agua disponible para los mismos, la cual depende a su vez, de la variabilidad espacial de las propiedades físicas del suelo.

La conductividad eléctrica aparente del suelo (CE_a) ha sido utilizada para delimitar zonas de MCSE, ya que está influenciada por una combinación de propiedades físicas del suelo que determinan su fertilidad y, por ende, el rendimiento de los cultivos (Sudduth et al., 1995; Corwin et al., 2005; Moral et al., 2010). El objetivo del presente trabajo fue analizar si la medición de la CE_a del suelo a escala de lote en el sudeste de Buenos Aires (Argentina), es un estimador potencial de la textura del suelo que permita delimitar zonas para el MCSE.

Materiales y métodos

Esta investigación fue conducida en dos lotes, ubicados en distintos partidos del sudeste bonaerense. El lote "Huesos", de 124 ha de superficie, ubicado en el partido de Azul y el lote "Fernández", de 150 ha de superficie, ubicado en el partido de Lobería. Cada lote está constituido principalmente por una serie de suelo (Tabla 1): Huesos por la serie Mar del Plata (fina, mixta, térmica, Argiudol típico) y Fernández por la serie Azul (fina, mixta, térmica, Paleudol petrocálcico).

En cada lote, la medición de la CE_a se realizó utilizando una rastra Veris 3100® (Geoprobe Systems, Salina, KS,

EE.UU.). El Veris es un dispositivo de contacto (los electrodos están en contacto con la superficie del suelo), que puede medir la CE_a a dos estratos: de 0-30 cm y 0-90 cm (Figura 1). Para la elaboración de los mapas de CE_a , en este trabajo solo se utilizó la CE_a 0-90 cm (CE_{0-90}), ya que esta medida es más representativa del suelo y presenta menor variación temporal que la CE_a de 0-30 cm (Sudduth et al., 2003). La unidad Veris fue remolcada por una camioneta y simultáneamente fue midiendo la CE_{0-90} y georreferenciando los puntos con un DGPS Trimble® (Trimble Navigation Limited, EE.UU.) con una precisión de medición submétrica y configurado para tomar posición satelital por segundo. Para describir la variabilidad espacial y elaborar los mapas de CE_{0-90} dentro de cada lote, se analizaron los semivariogramas de dicha variable, los cuales son una función básica de la variabilidad espacial de un fenómeno de interés (Vieira, 2000; Vieira et al., 2002). Se procedió a la interpolación de los datos de CE_{0-90} con el procedimiento Kriging ordinario porque el valor interpolado con este método, carece de sesgo (Vieira, 2000).

Con el mapa de CE_{0-90} se orientó el muestreo de suelo en los lotes por zonas (Figura 2), clasificando la CE_{0-90} en cuatro categorías (Cook y Stubbendieck, 1986). Los valores y amplitud de las clases de CE_{0-90} se clasificaron en cuantiles de áreas iguales usando el Geostatistical Analyst en ArcGIS v9.3.1 (ESRI, 2009) (Tabla 2).

En julio de 2008 se realizaron los mapeos de la CE_{0-90} y se tomaron las muestras de suelo. El muestreo se



Figura 1. Equipo Veris 3100 montado detrás de una camioneta y equipado con un GPS Trimble®.

¹ CONICET. C.C. 276. 7620-Balcarce. Buenos Aires, Argentina. Teléfonos: 54-2266-15449161. Correo electrónico: nperalta21@gmail.com

² INTA Balcarce.

³ UNMdP, Facultad de Ciencias Agrarias.

Tabla 1. Sitios experimentales (lote), número de muestras recolectadas, evaluadas hasta 90 cm de profundidad y clasificación de suelos.

Lote	Muestras (n, 0-90 cm)	Serie de suelo*	Clasificación de suelo
Huesos	31	Consociación MP17	Mar del Plata (100%) - Argiudol típico
		Consociación MP26	Mar del Plata (100%) - Argiudol típico
		Complejo TEs5	Tres Esquinas (40%) - Argiudol típico La Barrancosa (30%) - Argiudol típico Mar del Plata (30%) - Argiudol típico
Fernández	21	Complejo Az 26	Azul (60%) - Paleudol petrocálcico Semillero Buck (30%) - Paleudol petrocálcico Cinco Cerros (10%) - Argiudol lítico

* INTA Castelar (1979-1980). Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires (1:50000). Secretaría de Agricultura Ganadería y Pesca.

Tabla 2. Rango de las clases de conductividad eléctrica aparente (CE_{0-90}) para cada lote.

Clases de CE_{0-90}	Lote	
	Huesos	Fernández
	CE_{0-90} (mS m ⁻¹)	
Baja	8-14	7-23
Baja - Media	14-16	23-28
Media - Alta	16-19	28-34
Alta	19-35	34-63

Tabla 3. Composición textural (A_s , L_i , A_r) y contenido de humedad (θ_g) y del suelo en cada lote.

	Huesos		Fernández	
	Promedio	CV	Promedio	CV
	%			
A_s	23.36	11.0	34.40	12.9
L_i	35.03	11.1	32.62	12.8
A_r	41.61	25.2	32.98	21.8
θ_g	23.00	11.8	30.00	10.1

A_s : arcilla; L_i : limo; A_r : arena; θ_g : contenido de humedad del suelo; CV: coeficiente de variación.

realizó con un muestreador hidráulico Giddings® (Giddings Machine Co., EE.UU.) guiado a dichos puntos manualmente con un GPS Juno ST® (Trimble Navigation Limited, EE.UU.). Una vez ubicado el punto a muestrear, se extrajo la muestra de suelo con un cilindro de 5 cm de diámetro por 90 cm de profundidad. El contenido de humedad del suelo (θ_g) se determinó por el método gravimétrico (diferencia de peso húmedo y peso seco obtenido por secado de la muestra en estufa a 105 °C). Las muestras de suelo se secaron en estufa con circulación de aire forzada a una temperatura de 40 °C, se molieron y tamizaron hasta pasar por una malla de 0.5 mm para la determinación de la distribución del tamaño de partículas (textura) por medio del método

de la pipeta de Robinson (Soil Conservation Service, 1972).

El análisis estadístico se realizó con el paquete estadístico SAS (SAS Institute, 2002). Para evaluar si la medición georreferenciada de la CE_{0-90} permitió delimitar áreas homogéneas dentro de los lotes, se compararon las diferencias en los promedios de las propiedades del suelo en las diferentes clases de CE_{0-90} utilizando el ANOVA del procedimiento PROC MIXED. Se realizó la comparación de medias de las propiedades del suelo con un nivel de significancia de $p \leq 0.05$, utilizando el procedimiento de diferencia mínima significativa del procedimiento LSMEANS. Se calcularon estadísticos descriptivos para las propiedades del suelo por medio del procedimiento MEANS, correlaciones y regresiones simples entre las propiedades del suelo y CE_{0-90} utilizando el procedimiento CORR y REC, respectivamente (SAS Institute, 2002).

Resultados y discusión

El modelo de semivariograma que mejor describió la variabilidad espacial de la CE_{0-90} dentro de cada lote fue el esférico. Utilizando los parámetros ajustados de los semivariogramas esféricos y una grilla de interpolación de 10x10 m (Robert et al., 1998), se elaboraron los mapas de CE_{0-90} para cada lote usando cuatro categorías de clasificación (**Figura 2**).

El análisis estadístico descriptivo se realizó para conocer la variación de las propiedades del suelo medidas en cada lote (**Tabla 3**). Los suelos en Huesos tuvieron un contenido de arena mayor a 40% y menos de 24% de arcilla a través del perfil (0-90 cm) y fueron clasificados mayormente como franco a franco-arcillosos, mientras que los suelos en Fernández presentaron un contenido de arena y limo de 32.6 y 32.9%, respectivamente y más de 30% de arcilla, siendo clasificados como suelos franco-arcillosos a arcillosos (**Tabla 3**). El contenido de humedad fue mayor en Fernández (30%), que en Huesos (23%).

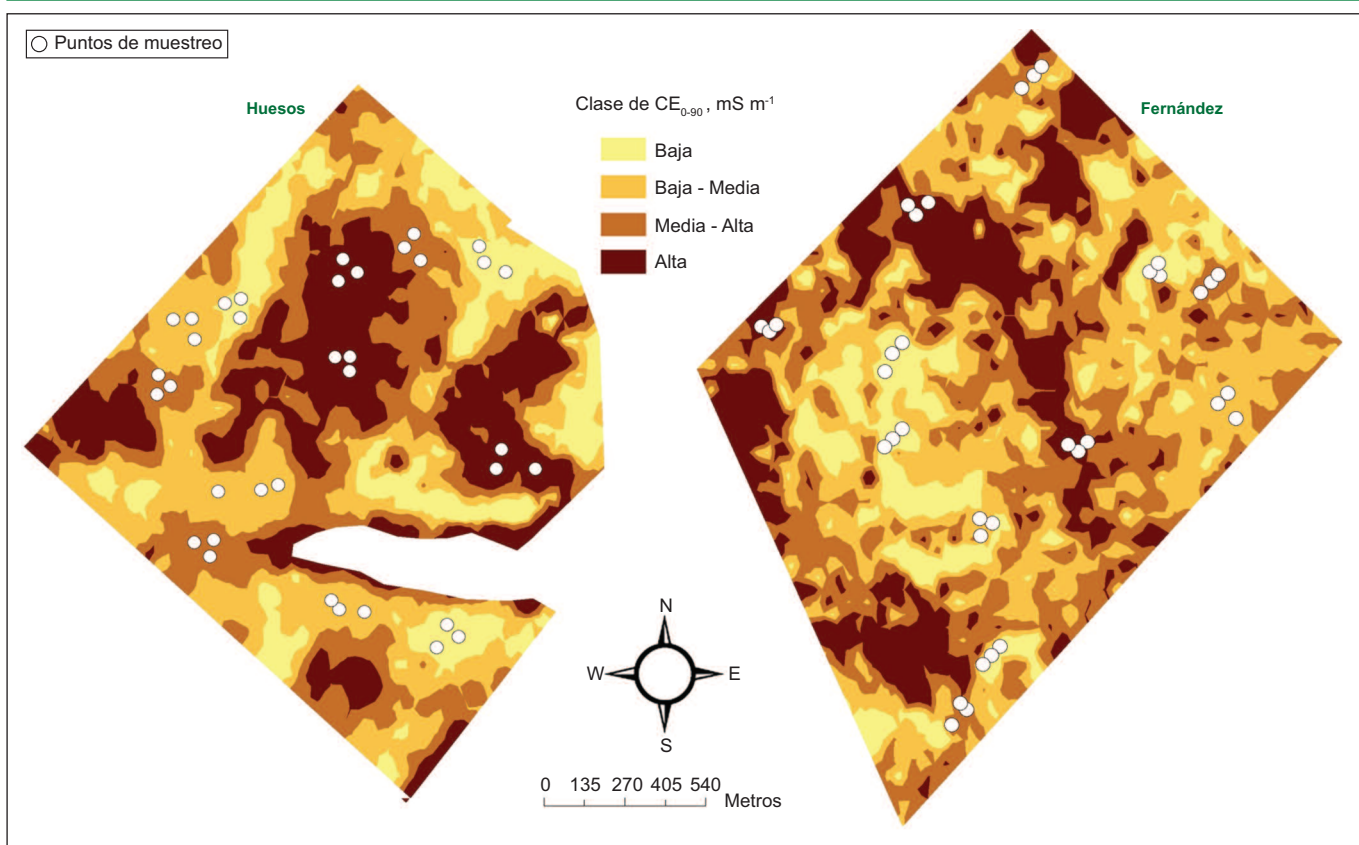


Figura 2. Mapa de conductividad eléctrica aparente (CE_{0-90}) para cada lote. Los círculos blancos indican los puntos de muestreo de suelo.

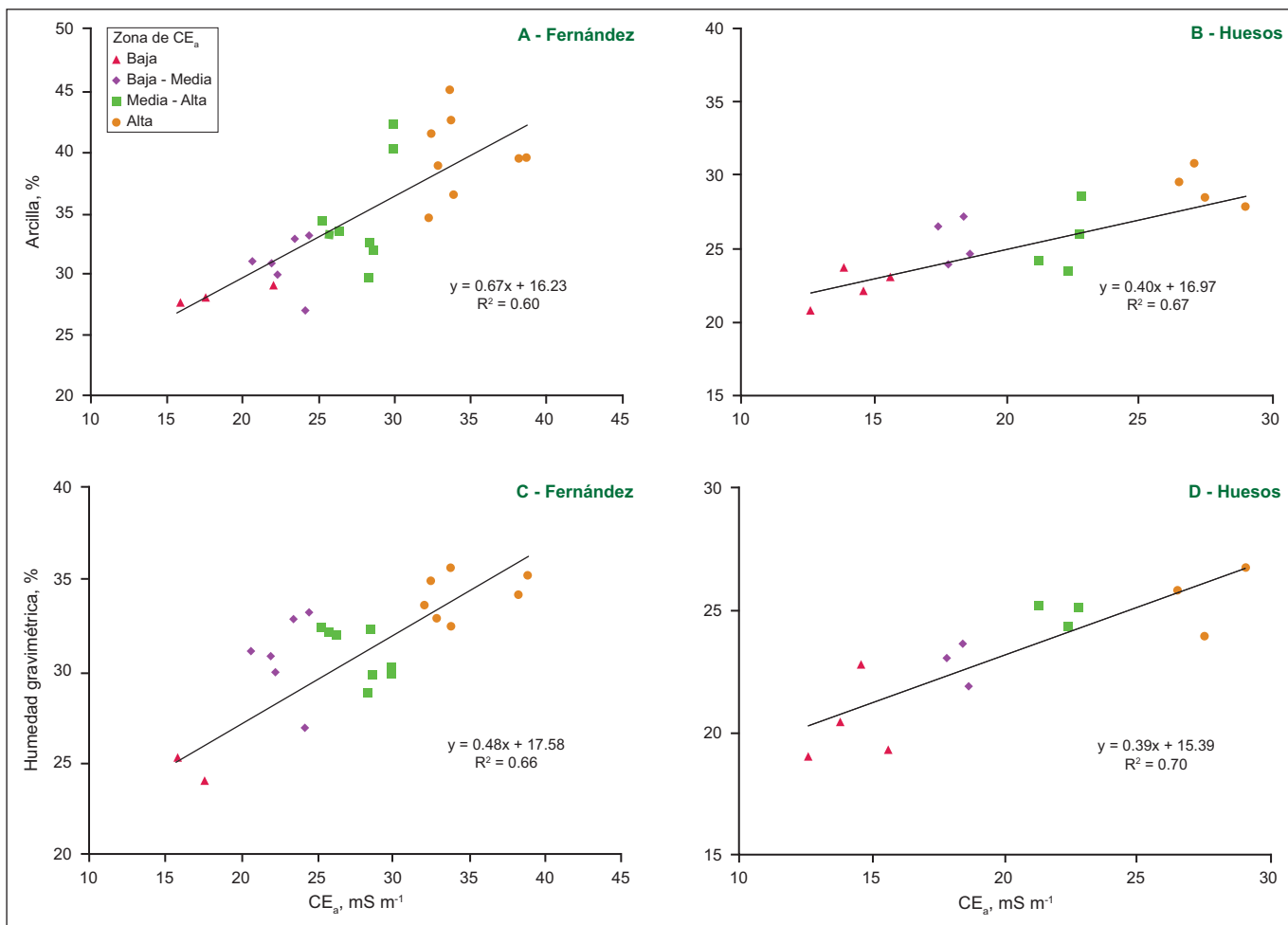


Figura 3. Relación entre el contenido de arcilla y humedad del suelo con la conductividad eléctrica aparente (CE_{0-90}) para ambos sitios analizados.

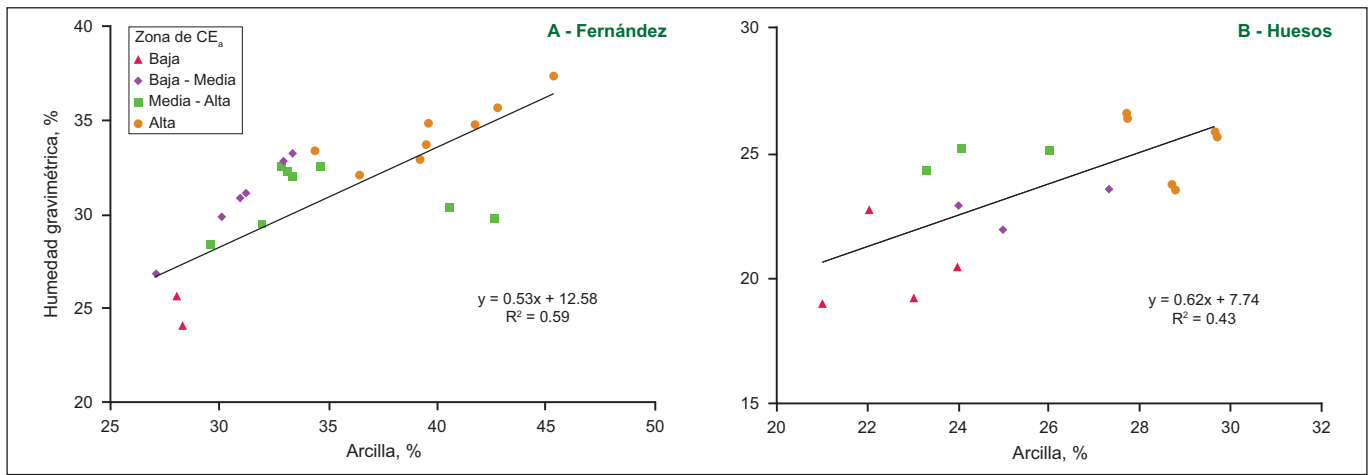


Figura 4. Relación entre la humedad de suelo y el contenido de arcilla para ambos sitios analizados.

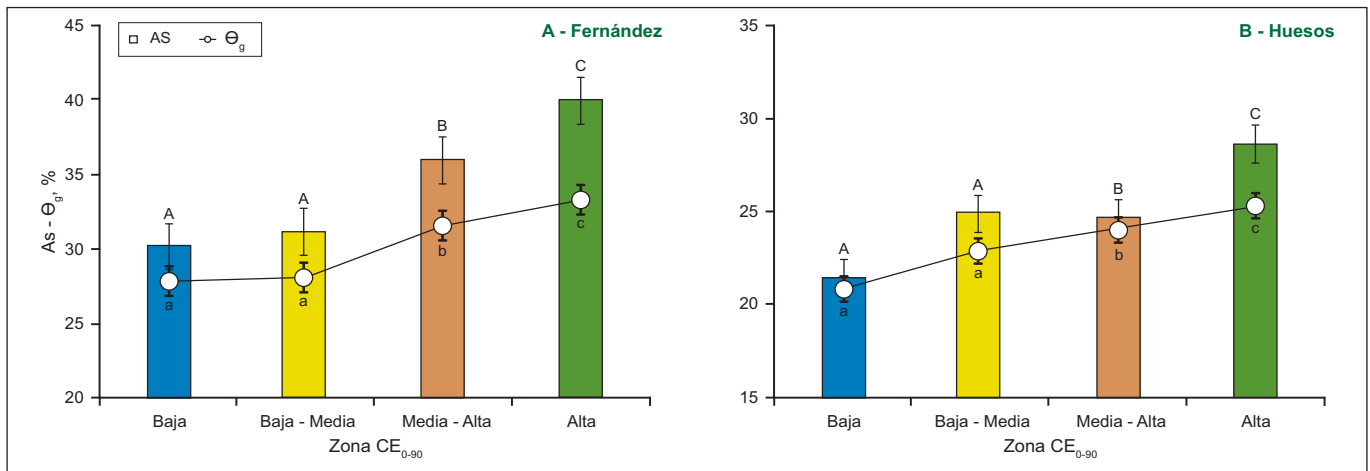


Figura 5. Valores promedio del contenido de arcillas (barras) y humedad (líneas de puntos) en las diferentes zonas de conductividad eléctrica aparente (CE_{0-90}). Letras iguales indican ausencia de diferencias significativas, mayúsculas para contenido de arcilla y minúsculas para humedad del suelo ($p \leq 0.05$). Barras verticales indican el error típico de la media para cada zona. A_s : arcilla; θ_g : contenido de humedad gravimétrica del suelo.

Relación entre las propiedades de suelo y la CE_a

El análisis de correlación entre la CE_{0-90} y el contenido de arcilla, limo y arena varió entre lotes (Tabla 4). La correlación entre porcentaje de limo y CE_{0-90} fue débilmente significativa en Huesos, y no significativa en Fernández, contrastando con otros estudios (Sudduth et al., 2003), posiblemente porque la variación del contenido de limo fue más estrecha en este estudio, presentando un bajo CV (menor de 12%, Tabla 3).

Los lotes presentaron asociaciones altamente significativas en el contenido de arcilla y humedad gravimétrica con la CE_{0-90} ($p < 0.05$, Tabla 4). Por consiguiente, se realizó un análisis de regresión entre estas propiedades de suelo y la CE_{0-90} (Figura 3).

El porcentaje de arcilla estuvo correlacionado positivamente con la CE_{0-90} (Figura 3), probablemente porque la arcilla presentó correlación significativa con la humedad del suelo (Figura 4). La relación positiva entre CE_{0-90} y contenido de arcilla es coherente con estudios previos (Sudduth et al., 2003). La diferencia en

el grado de asociación entre CE_{0-90} y arcilla en los diferentes lotes fue principalmente debida a los diferentes contenidos de arcilla. El contenido de humedad del suelo estuvo significativamente correlacionado con la CE_{0-90} (Tabla 4 y Figura 3), ya que en el suelo la corriente eléctrica es conducida por la fase líquida, la cual depende directamente del contenido de agua del suelo (Friedman, 2005). Las variaciones del contenido hídrico son debidas a la variación en la distribución del tamaño de partículas (McCutcheon et al., 2006).

Delimitación de zonas de manejo

El ANOVA para la delimitación de las zonas de MCSE se realizó solamente con las variables de suelo que mostraron valores de correlación mayores a $r = 0.70$ (Herber, 2011). Para ambos lotes, se seleccionaron el contenido de arcilla y la humedad del suelo (Tabla 4). Estas propiedades edáficas presentaron diferencias significativas en tres zonas de CE_{0-90} en los lotes de producción (Figura 5). En estos datos, se puede observar claramente que la estructura espacial del contenido de

humedad del suelo estuvo asociada al contenido de arcilla. En general, estos resultados concuerdan con previas investigaciones, las cuales reportaron que la CE_{0-90} es influenciada por el contenido de arcilla, lo que refleja la capacidad de retención de agua del suelo y por lo tanto la variación espacial del rendimiento de grano de los cultivos (Kitchen et al., 2003).

En el sudeste de Buenos Aires, la evapotranspiración potencial generalmente excede a las precipitaciones registradas durante la estación de crecimiento de los cultivos (Calviño et al., 2003), y la cantidad de agua almacenada en el suelo al momento de la siembra es un factor crítico en los cultivos de secano (Jordan, 1983). Por ende, en función de los resultados obtenidos en el presente trabajo y considerando el efecto del agua sobre el rendimiento de los cultivos, la medición de la CE_{0-90} posiblemente permita explicar buena parte de las variaciones en los rendimientos, logrando implementar zonas potenciales de manejo y aplicar prácticas agronómicas en función de cada zona.

Conclusión

El contenido de arcilla y humedad del suelo presentaron correlaciones altamente significativas con la medición georreferenciada de la CE_{0-90} y, en consecuencia, la CE_{0-90} sería un potencial estimador de la variabilidad espacial de estas propiedades del suelo. Considerando que el contenido de arcilla es relativamente estable en el tiempo (Shaner et al., 2008) y que estuvo correlacionado con el contenido de humedad del suelo, estos resultados sugieren que los mapas de CE_{0-90} a escala de lote en los suelos del sudeste bonaerense, tienen un potencial para delimitar zonas potenciales de manejo y brindar la posibilidad de aplicar MCSE.

Agradecimientos

Este trabajo fue financiado con fondos del proyecto de investigación de INTA AEA13722 y PNCER2341. Los autores expresan sus agradecimientos a los Ing. Agr. Tomas Gowland (CREA) y Hernán Moreno (CREA), por su ayuda en la recopilación de los datos que se ofrecen en los campos donde se realizó el estudio y a Maximiliano Dosanto por la colaboración en el laboratorio. El presente trabajo es parte del trabajo de tesis de Nahuel Peralta para el cumplimiento de los requisitos del Doctorado en Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional de Mar del Plata y del programa de becas de posgrado del Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Bibliografía

Calviño, P.A., F.H. Andrade, y V.O. Sadras. 2003. Maize Yield as Affected by Water Availability, Soil Depth, & Crop Management. *Agron. J.* 95:275–281.

- Cook, C.W., y J. Stubbendieck. 1986. *Range research: basic problems & techniques*. Society for Range Management, Denver, CO. 317 p.
- Corwin, D.L., y S.M. Lesch. 2005. Characterizing soil spatial variability with apparent soil electrical conductivity I. Survey protocols. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46:103-133.
- ESRI. 2009. ArcGis 9.3.1 (software). Environmental Systems Research Institute. 1999-2009. Redlands, CA, USA.
- Fraisse, C.W., K.A. Sudduth, y N.R. Kitchen. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Trans. ASAE* 44(1):155–166.
- Friedman, S.P. 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers & Electronics in Agriculture* 46:45-70.
- Jordan, W.R. 1983. Whole plant responses to water deficits: An overview, pp. 289-317. In Taylor H M, WR Jordan, TR Sinclair (Eds.). *Limitations to efficient water use in crop production*. ASA-CSSA-SSSA. Madison.
- Herber, L. 2011. Conductividad eléctrica aparente como herramienta para delimitar zonas de manejo sitio-especifico en maíz (*Zea mays*) en la Provincia de Corrientes. Tesis para el grado de Magister Scientiae. Universidad Nacional de Mar del Plata, Balcarce, Argentina.
- Kitchen, N.R., S.T. Drummond, E.D. Lund, K.A. Sudduth, y K.A. Buchleiter. 2003. Soil Electrical Conductivity & Topography Related to Yield for Three Contrasting Soil-Crop Systems. *Agron. J.* 95:483-495.
- McCutcheon, M.C., H.J. Farahani, J.D. Stednick, G.W. Buchleiter, y T.R. Green. 2006. Effect of Soil Water on Apparent Soil Electrical Conductivity & Texture Relationships in a Dry & Field. *Biosystems Engineering* 94:19–32.
- Moral, F.J., J.M. Terrón, y J.R. Marques da Silva. 2010. Delineation of management zones using mobile measurements of soil apparent electrical conductivity and multivariate geostatistical techniques. *Soil and Tillage Research* 106:335-343.
- Robert, P., R. Rust, y W. Larson. 1998. *Proceedings of the 4th International Conference on Precision Agriculture*, 1998, St. Paul, MN. ASA/CSSA/SSSA.
- SAS Institute Inc. 2002. *SAS/STAT Guide for personal computers*. Cary, NC: SAS Institute Inc.
- Shaner, D.L., M.K. Brodahl, y G.W. Buchleiter. 2008. How Well Does Zone Sampling Based on Soil Electrical Conductivity Maps Represent Soil Variability? *Agron. J.* 100:1472-1480.
- Soil Conservation Service. 1972. *Soil survey laboratory methods and procedures for collecting soil samples*. US Department of Agriculture, Washington, DC., USA.
- Sudduth, K.A., D.F. Hughes, y S.T. Drummond. 1995. Electromagnetic induction sensing as an indicator of productivity on claypan soils. pp. 671-681. In P.C. Robert et al. (ed.) *Proc. Int. Conf. on Site-Specific Management for Agricultural Systems*, 2nd, Minneapolis, MN. 27-30 March 1994. ASA, CSSA, & SSSA, Madison, WI.
- Sudduth, K.A., N.R. Kitchen, G.A. Bollero, D.G. Bullock, y W.J. Wiebold. 2003. Comparison of Electromagnetic Induction and Direct Sensing of Soil Electrical Conductivity. *Agron. J.*, 95:472-482.
- Veris Technologies. 2001. Frequently asked questions about soil electrical conductivity. <http://www.veristech.com>. Veris Technologies, Salina. KS. Accessed 25 november 2010.
- Vieira, S. R., J.A. Milleto, G.C. Topp, y W.D. Reynolds. 2002. Book for Geostatistical analysis of variability in soil & meteorological paramaters. In: *Tópicos em Ciência do Solo vol. 2*, Alvarez V., V. H (eds). Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, pp. 1-45.
- Vieira, S.R. 2000. Uso de geoestatística em estudos de variabilidade espacial de propriedades do solo. In: NOVAIS. R.F. (Ed.). *Tópicos em Ciência do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa. pp. 3-87. ★