

RELACIÓN ENTRE LA VARIABILIDAD ESPACIAL DE LA CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA Y EL CONTENIDO DE SODIO DEL SUELO

MATÍAS BOSCH MAYOL¹; JOSÉ LUÍS COSTA²; FABIÁN NÉSTOR CABRIA¹ & VIRGINIA CAROLINA APARICIO^{2*}

Recibido: 09-02-12

Recibido con revisiones: 27-08-12

Aceptado: 03-10-12

RESUMEN

La agricultura de precisión utiliza herramientas modernas capaces de facilitar la obtención y análisis de datos georreferenciados. La conductividad eléctrica aparente (EC_a) del suelo, se obtiene con sensores remotos y está correlacionada con algunas propiedades del suelo (capacidad de almacenamiento de agua, contenido de materia orgánica, salinidad y drenaje, topografía, manejos previos y texturas entre otras). El exceso de sales puede ser perjudicial para las plantas mientras que altos contenidos de sodio intercambiable pueden provocar daños físicos y químicos en el suelo, afectando el crecimiento de los cultivos. Se seleccionaron 3 lotes con una superficie promedio de 80 ha, regados con pivote central, en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. En cada lote se midió la EC_a georreferenciada con un sensor de medición directa. Con los datos obtenidos se confeccionaron mapas de EC_a utilizando técnicas de interpolación espacial (Kriging). Los campos fueron divididos en zonas de igual rango de EC_a para tomar muestras de suelo en las que se midió humedad gravimétrica (θ_g), EC del extracto de saturación (EC_e) y cationes solubles (Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2}). Se calculó la relación de adsorción de sodio (RAS). Los datos fueron analizados estadísticamente utilizando el procedimiento PROC MIXED de SAS. Se observó variabilidad espacial de la EC_a y se detectó una asociación entre la EC_a y el RAS. Existe una relación significativa entre la EC_a , la EC_e y el contenido de sodio del suelo, diferenciándose estadísticamente los contenidos de Na^+ entre las diferentes zonas de EC_a de cada lote. Los sensores de medición directa de EC_a son herramientas eficaces para la estimación espacial del contenido de sodio del suelo.

Palabras clave. Georreferenciación; Riego; Sensor; Agricultura de Precisión; Sodificación.

RELATIONSHIP BETWEEN SPATIAL VARIABILITY OF ELECTRICAL CONDUCTIVITY AND SOIL SODIUM CONTENT

ABSTRACT

Precision agriculture utilizes modern tools in order to obtain and analyze georeferenced data. Direct measuring sensors of soil apparent electrical conductivity (EC_a) are part of these modern tools and are widely used to quantify EC_a spatial variability. This variable is correlated with other soil properties (water holding capacity, organic matter content, salinity, drainage, topography, tillage managing and soil texture). Plants are negatively affected by elevated salts amount and elevated exchangeable sodium content, which causes physical and chemical damage of soils, affecting crop's grown and production. In order to determinate sodium spatial content and distribution, three fields about 80 Has average were selected. All fields are under central pivot irrigation system and are located in the southeast of Buenos Aires province, Argentina. In these fields EC_a was measured and georeferenced whit a direct measure sensor. Obtained data was used to create EC_a maps in every field using spatial interpolation methods (Kriging). All fields were divided into four different zones, based on its EC_a value, where soil samples were taken. Soil samples were laboratory processed in order to determinate gravimetric humidity (θ_g), electrical conductivity of soil saturation paste extract (EC_e) and soluble cations (Na^+ , Ca^{+2} and Mg^{+2}), and sodium adsorption ratio (SAR) was calculated. Experimental data was statistically analyzed using SAS PROC MIXED procedure. We observed EC_a spatial variability, and associations between EC_a and SAR. Significantly relationships between EC_a , EC_e and soil sodium content were found. Sodium content was statistically differenced between different EC_a zones in every field. The EC_a direct measuring sensors are accurately tools to estimate soil sodium spatial content.

Key words. Georeferencing, Irrigation, Sensor, Precision Agriculture, Sodicity.

¹ Facultad de Ciencias Agrárias UNMdP,

² EEA INTA Balcarce, CC 276, (7620) Balcarce, Argentina

*Autor de correspondencia vaparicio@balcarce.inta.gov.ar

INTRODUCCIÓN

La agricultura de precisión es la utilización de herramientas modernas capaces de facilitar la obtención y el análisis de datos georreferenciados. Así mismo, permite confeccionar mapas de rendimiento de cultivos, facilitando una visualización más clara de la variabilidad espacial que presentan. Sin embargo, estos mapas no indican cuáles son las probables fuentes de variación, ni la importancia relativa de cada una de ellas. Para resolver este problema se requiere estudiar el suelo y conocer la variabilidad espacial y temporal de sus propiedades físicas y químicas así como otras características del terreno (Ruffo *et al.*, 2006). Con ésta información se podría realizar un manejo sitio específico del recurso natural subdividiendo los lotes en áreas homogéneas, lo que permitiría aumentar la eficiencia en el uso de insumos, mejorar la sustentabilidad de la empresa, proteger el medio ambiente y beneficiar económicamente al productor (Dinnes *et al.*, 2002).

Relaciones complejas entre procesos geológicos y pedológicos determinan la variabilidad en las propiedades de los suelos, debiéndose añadir aquella que resulta de los procesos erosivos y el historial de manejo (Bouma & Finke, 1993; Mallarino, 1996; Young *et al.*, 1999). Según Bouma & Finke (1993), el manejo ha provocado múltiples diferencias en suelos de una misma Serie debido a la alteración de la profundidad, fertilidad y estructura natural. Esta variabilidad produce sesgos en las distribuciones de frecuencia de las variables físicas o químicas, impidiendo el uso de técnicas estadísticas que sean sensibles al supuesto de normalidad (Young *et al.*, 1999). Para solucionar éste inconveniente, puede recurrirse a la teoría de las variables regionalizadas, la cual establece que los valores de la mayoría de las propiedades del suelo están espacialmente correlacionadas, es decir, poseen dependencia espacial (Isaaks & Srivastava, 1989; Webster & Oliver, 1990; Timlin *et al.*, 1998).

El interés en el manejo de la variabilidad espacial se ha incrementado con la adopción de herramientas y tecnología de agricultura de precisión. Por este motivo, es necesario desarrollar métodos para una mejor caracterización del suelo.

La caracterización espacial incluye la toma de datos georreferenciados de variables tales como nutrientes del suelo, rendimiento, y estado de los cultivos. Con el uso de sensores remotos se pueden identificar diferencias en el verdor de la vegetación en tamaños de píxeles de 10 metros desde miles de kilómetros de distancia y los monitores de

rendimiento permiten tomar medidas de productividad cada un segundo. Mientras estas herramientas permiten aumentar la resolución espacial de la información, los análisis de suelo son medidos en una resolución relativamente baja comparada con las herramientas mencionadas. Una forma de obtener mas información del muestreo de suelos es tomar un número mayor de muestras, sin embargo esta opción suele estar limitada por su costo y trabajo. Otra opción es encontrar un método más económico y sencillo que pueda medir la variabilidad de un parámetro secundario del suelo que ayude a explicar la variabilidad del parámetro de interés (Tarr *et al.*, 2005).

La conductividad eléctrica (CE) del suelo es la capacidad de conducir la corriente eléctrica, la cual depende de la cantidad de iones positivos y negativos que se encuentran en la solución del suelo, por eso la CE de la solución de suelo es un indicador del contenido de sales. La CE comúnmente se mide en el laboratorio, en el extracto de pasta de saturación (Warrick & Nielsen, 1981). La conductividad eléctrica aparente (CE_a) de un suelo es aquella medida in situ y presenta correlaciones con algunas propiedades como la capacidad de almacenamiento de agua, la presencia de capas litológicas contrastantes, los tipos de suelos, el contenido de carbono orgánico, la salinidad y el drenaje, la topografía, los manejos previos y las texturas (Doolittle *et al.*, 1994). En consecuencia midiendo la CE_a podemos conocer de manera indirecta otras propiedades químicas y físicas del suelo en estudio (Rhoades *et al.*, 1976). Hay una variedad de métodos para caracterizar la variabilidad espacio-temporal del suelo, entre ellos están el radar de subsuelo (GPR-Ground Penetrating Radar), la fotografía aérea, la imagen multiespectral, y la CE_a ; ésta última ha sido la mas investigada (Corwin & Lesch, 2005).

En agricultura de precisión son importantes los métodos eficientes para medir la variabilidad del suelo dentro de los lotes (Bullock & Bullock, 2000). La CE_a se ha convertido en una de las medidas más confiables y frecuentes para caracterizar la variabilidad para su aplicación en agricultura de precisión, debido a la fiabilidad y facilidad de medición que presenta (Rhoades *et al.*, 1992a, 1992b; Corwin & Lesch, 2003). Para poder establecer una relación correcta entre las lecturas de la CE_a y una determinada variable, es necesaria la calibración estableciendo claramente la forma de realizarla y la intención en la colección de los datos (Sudduth *et al.*, 2001).

El exceso de sales puede ser perjudicial para las plantas mientras que altos contenidos de sodio intercambiable

pueden provocar daños físicos y químicos en el suelo, afectando el crecimiento de los cultivos. Los suelos alcalinos ($PSI > 15$) presentan niveles de pH entre 8,5 a 10 o más; en ésta situación se favorece la dispersión de los coloides del suelo, provocando ruptura de agregados con la consecuente pérdida de estructura y obstrucción de los poros, por lo que las propiedades hidráulicas se deterioran: disminuye la infiltración y la conductividad hidráulica saturada (Brady & Weil, 1999).

La salinidad puede ser inducida por el riego. Si el agua de riego tiene una cantidad importante de Na^+ comparada con el Ca^{+2} y Mg^{+2} , y especialmente si hay bicarbonato presente, el complejo coloidal puede saturarse con sodio y se genera un suelo sódico improductivo (Brady & Weil, 1999).

La fuente más común de agua para riego en el sudeste de la provincia de Buenos Aires es de origen subterráneo, y la mayoría de estas aguas tienen alto contenido de bicarbonato de sodio. El uso de este agua provoca incrementos en el contenido de sodio del suelo, medido a través de la relación de adsorción de sodio (RAS) y el porcentaje de sodio intercambiable (PSI) (Costa, 1995).

La CE del suelo es una medida afectada por la combinación de contenido de agua del suelo, contenido de sales disueltas, contenido de arcillas, mineralogía y temperatura del suelo (Tarr *et al.*, 2005).

El método tradicional para medir la CE de la solución de suelo es en el extracto de pasta de saturación, cuando se requiere estimar la CE una alternativa es medir la CE_a (Friedman, 2005), lo cual es posible realizarlo en el campo mediante sensores de medición directa por electrodos (SMD). Estos sensores pueden coleccionar gran cantidad de datos georreferenciados, mostrando ventajas importantes sobre los métodos tradicionales. Entre ellas se incluye el bajo costo, el aumento de la eficiencia, como así también la obtención de resultados inmediatos. Además, permiten realizar la medición de la CE_a del suelo en el período de barbecho, sin necesidad de información precedente (Sudduth *et al.*, 2001).

La escasa información existente en el sudeste bonaerense sobre la utilización de los sensores automáticos georreferenciados que miden la CE_a del suelo y permiten su caracterización, hace necesario que se realicen los estudios de esta medida y su relación con otras propiedades del suelo. Además, es necesario enfocar el monitoreo en zonas de leve a moderada afectación por sales, donde los

suelos están en riesgo potencial de salinizarse (Farifteh, 2006).

La incorporación del manejo agronómico del sodio dentro de las prácticas de agricultura de precisión es una herramienta que podría permitir un uso más cuidadoso del riego, a fin de evitar el deterioro del suelo. Para poder hacer un manejo espacial del sodio, primero debemos obtener un método eficaz para poder estimarlo con el nivel de detalle necesario para su inclusión en el planteo de agricultura de precisión.

Los objetivos de la presente investigación fueron: i) Cuantificar la variabilidad espacial de la CE_a del suelo en los lotes seleccionados del Sudeste Bonaerense; ii) Identificar y cuantificar las posibles relaciones entre la CE_a y las variables analizadas mediante muestreo de suelos: Na^+ soluble, Ca^{+2} soluble, Mg^{+2} soluble, RAS, conductividad eléctrica en el extracto de saturación (CE_e) y θ_g .

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación de los lotes

Para este trabajo se seleccionaron 3 lotes ubicados en campos de productores. Dos de ellos están ubicados próximos a la localidad de Pieres: denominados P1 (110 ha), $38^{\circ}23'3.78''S$, $58^{\circ}37'19.33''O$, y P2 (64 ha), $38^{\circ}20'45.00''S$, $58^{\circ}39'11.28''O$. El tercer lote está ubicado próximo a la localidad de Tamangueyú, se denomina T1 (70 ha), en $38^{\circ}17'48.85''S$, $58^{\circ}50'3.57''O$.

Historia de los lotes

Los tres lotes poseen una historia de cultivos agrícolas extensivos en rotaciones Trigo - Girasol o Soja - Maíz, que al momento de los muestreos se encontraban en período de barbecho. Todos los lotes se manejan con riego por aspersión mediante el sistema de pivote central electromecánico con bomba de agua subterránea, y desde hace más de cinco años que se riegan con agua de calidad dudosa respecto del RAS, con valores entre 16 y 18, y de calidad segura con respecto a la CE, con valores de $1,7 \text{ dS m}^{-1}$. Generalmente los riegos son complementarios a las precipitaciones y durante la época estival, y tienen el objetivo de cubrir las demandas de los cultivos en los períodos que las lluvias son insuficientes para su crecimiento. La cantidad de riego aplicada varía según el año y el cultivo, regándose no más de 160-180 mm por año.

Los tipos de suelos hallados en los lotes analizados integran un mosaico de argiudoles típicos (series Semillero Buck, fino lítico y térmico; paisaje suavemente ondulado y relieve

normal) paleudoles petrocálcicos (serie La Alianza, limoso fino, mixto, somero térmico, paisaje de lomas y pendientes, relieve ondulado) y argiacuol vertico (Serie Chocorí, fino, ilitico, térmico, paisaje plano, relieve subnormal a cóncavo) (Carta de suelo de la República Argentina).

Fecha de muestreos

Las determinaciones de CE_a y los muestreos de suelos fueron realizados durante el año 2008, en el mes de junio en P1; en julio en T1 y en octubre en P2. Cada oportunidad de determinación CE_a y muestreo de suelos fue seleccionada en base a condiciones de suelo y clima fundamentalmente. Al momento de las mediciones de CE_a , el suelo tenía entre 0,25 y 0,28 $m^3 m^{-3}$ de θ_g , lo que indica que estaba suficientemente húmedo para efectuar la medición ya que el fabricante del SMD indica un mínimo de 0,10 $m^3 m^{-3}$ para medir CE_a .

Medición de la CE_a

La CE_a fue medida mediante con el Veris 3100 (Veris 3100, Division of Geoprobe Systems, Salina, KS). Se trata de un SMD, ya que los electrodos entran en contacto con el suelo al momento de efectuar la medición. Este equipo mide la CE_a del suelo sin necesidad de calibración alguna, ya que viene calibrado de fábrica con software incorporado y reúne los datos en su memoria. El SMD utilizado consta de 6 electrodos de metal en forma de discos que penetran aproximadamente 6 cm en el suelo. Los dos discos intermedios emiten una corriente eléctrica y simultáneamente los otros dos pares de electrodos miden el cambio de voltaje, y de esta manera estima la CE_a . Los dos discos centrales miden de 0 a 30 cm mientras que los dos discos extremos miden de 0 a 90 cm de profundidad respectivamente. La profundidad de la medición está dada por la distancia que separa los discos emisores de los receptores, que están montados sobre un bastidor con ruedas y levante hidráulico, el cual puede ser arrastrado por el terreno con un vehículo. El implemento cuenta además con un GPS que posibilita la confección de un mapa georreferenciado de las mediciones de CE_a efectuadas en el campo. Las pasadas del SMD fueron hechas en paralelo a una velocidad promedio de 15 km h^{-1} y una distancia entre pasadas de 20 metros, obteniéndose 120 datos por hectárea aproximadamente.

La medición de CE_a fue georreferenciada mediante el acople de un sistema de posicionamiento global (GPS) Trimble Geoplotter 2005 al data-logger del SMD, de manera que en el mismo quedan almacenados los datos de CE_a a ambas profundidades y la posición exacta (latitud y longitud) al momento de la medición.

Para esta investigación sólo se consideraron los datos de CE_a superficial (0-30 cm) ya que en suelos bajo riego suplementario, el efecto de las sales y el sodio se observa en los primeros centímetros de suelo (Costa, JL, 1999)

Mapas de CE_a

Con los datos obtenidos en cada lote se confeccionaron los mapas de CE_a correspondientes mediante el software Surfer (Surfer version 8, Surface Mapping System, Golden Software Inc., Golden, Colorado). Este programa confecciona un semivariograma experimental con los datos ingresados.

Los semivariogramas expresan la varianza en los incrementos de la CE_a a medida que aumenta la distancia entre los puntos, que es una forma de caracterizar la continuidad espacial de los datos en estadística espacial descriptiva. Con la estadística descriptiva tradicional no es posible describir este tipo de variabilidad ya que no se considera la ubicación espacial de los datos (Isaaks & Srivastava, 1989). Luego, al semivariograma experimental calculado se le ajustó un modelo matemático. El modelo fue elegido entre una serie de funciones matemáticas que describen relaciones espaciales, haciendo coincidir la curva del semivariograma experimental con la curva de la función matemática. Finalmente se realizó una validación cruzada de cada modelo seleccionado y ajustado, el ajuste se hizo en todas direcciones.

La definición matemática del semivariograma se presenta en la siguiente ecuación [1]:

$$\lambda(\Delta x, \Delta y) = \frac{1}{2} \varepsilon \left[\{Z(x + \Delta x, y + \Delta y) - Z(x, y)\}^2 \right] \quad [\text{Ec } 1]$$

donde $Z(x,y)$ es el valor de la variable de interés en la ubicación (x, y) , y ε es el valor estadístico esperado. Note que el semivariograma $\lambda(\Delta x, \Delta y)$ es función de la separación entre puntos $(x + \Delta x, y + \Delta y)$ y no función de la ubicación específica (x, y) . En base al modelo matemático seleccionado se confeccionó el mapa correspondiente mediante interpolación espacial (Kriging).

Los mapas obtenidos fueron procesados, dividiéndolos en 4 rangos de CE_a ya que investigaciones previas en diferentes suelos recomendaban la división en tres a cuatro zonas (Fleming *et al.*, 2000; McMillan *et al.*, 1998), dado que un número mayor de zonas tenía pocas ventajas adicionales (Fraisie *et al.*, 2001). Los valores y amplitud de los rangos de CE_a para cada lote se determinaron en función de la distribución observada en los histogramas generados.

En cada lote se definieron los puntos de muestreo de suelos considerando que se muestrearían los 4 rangos de CE_a por separado, en 4 diferentes lugares dentro de cada rango (4 repeticiones) y se tomarían 3 submuestras para cada repetición en una distancia que no excediere la zona delimitada por el rango de CE_a . Esta forma de determinar el muestreo tiene como objetivo obtener datos del análisis de suelo que abarquen toda la amplitud de la variabilidad espacial de la CE_a , a fin de obtener fiables correlaciones entre variables.

Muestreo de suelos

El muestreo se realizó con un muestreador hidráulico y un GPS. Una vez ubicado el muestreador sobre el punto a muestrear se extrajo un cilindro de suelo de 5 cm de diámetro por 30 cm de profundidad, en coincidencia con la medición superficial de CE_a del SMD.

Análisis de laboratorio

Cada muestra de suelo fue cuarteada, en una fracción se determinó humedad por el método gravimétrico (por diferencia de peso húmedo y peso seco obtenido por secado de la muestra en estufa a 105 °C) y la otra fracción se secó en estufa a 30 °C y se molió hasta pasar por tamiz de 2 mm. Una vez en laboratorio se procedió a obtener el extracto de suelo. En dicho extracto se determinó la conductividad eléctrica (CE_e) y el contenido de Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} solubles (Rhoades, 1982).

La determinación de CE_e se realizó con electrodo (Thermo Orion modelo 150 Aplus). La determinación de Na^+ soluble se realizó por lectura directa en el extracto de saturación con fotómetro de llama Corning Photometer 410 y Ca^{+2} y Mg^{+2} solubles se realizaron directamente en el extracto de saturación mediante un espectrofotómetro de absorción atómica Shimadzu AA – 6200.

Con los datos de Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} solubles se calculó la relación de adsorción de sodio (RAS) de cada muestra, como se describe en la ecuación [2]:

$$RAS = \frac{Na^+}{\sqrt{\left(\frac{Ca^{+2} + Mg^{+2}}{2}\right)}} \quad [Ec 2]$$

donde Na^+ , Ca^{+2} y Mg^{+2} son las concentraciones de estos cationes en el extracto de saturación.

Análisis de la información

Se hicieron análisis de varianza de los datos obtenidos utilizando el procedimiento PROC MIXED (SAS Institute, 2002), la comparación de medias se realizó con el método de LSMeans (Diferencias de Mínimos Cuadrados Medios).

Figura 1. Semivariograma experimental (calculado con los datos medidos, línea y puntos negros) y ajuste de modelo teórico exponencial lineal (línea azul) para la variable conductividad eléctrica aparente en el lote P1.

Figure 1. Experimental semivariogram (calculated with the measured data, line and black dots) and theoretical fit linear exponential model (blue line) for variable apparent electrical conductivity in lot P1.

Cada lote fue considerado como una localidad diferente y los rangos de CE_a de cada lote fueron considerados como tratamientos para el análisis. Los tres lotes fueron analizados como un único grupo de datos.

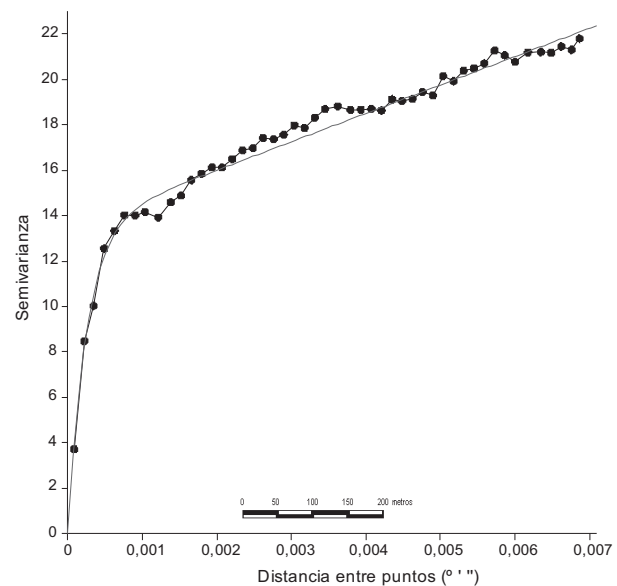
Para la organización, manipulación y visualización gráfica de los resultados, se utilizaron sistemas de información geográficas (ArcGIS, 2001 y Arc view, 1996) y Google Earth. Se realizaron mapas de contorno (Surfer versión 8) para cada una de las propiedades de suelo evaluadas.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Variabilidad espacial

En función de los semivariogramas experimentales obtenidos para cada lote, se ajustaron modelos matemáticos combinados exponenciales y lineales. En las Figuras 1, 2 y 3 se presentan los semivariogramas con sus respectivos modelos y el ajuste de las curvas. En los tres casos fue una combinación entre los modelos exponenciales y lineales la que permitió obtener el mejor ajuste. Esta información es fundamental a la hora de generar los mapas de CE_a , ya que a mayor precisión en el ajuste mejor estimación de la CE_a .

Al representar las medidas de CE_a obtenidas e interpoladas a zonas no muestreadas con los semivariogramas ajustados, se obtuvieron los mapas de contornos (Fig. 4, 5 y 6). En éstos mapas se observó una distribución hete-



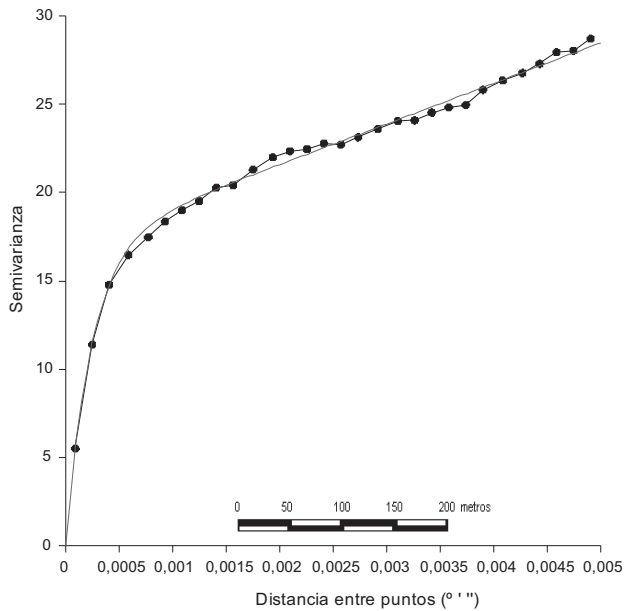


Figura 2. Semivariograma experimental (calculado con los datos medidos, línea y puntos negros) y ajuste de modelo teórico exponencial lineal (línea azul) para la variable conductividad eléctrica aparente en el lote T1.

Figure 2. Experimental semivariogram (calculated with the measured data, line and black dots) and theoretical fit linear exponential model (blue line) for variable apparent electrical conductivity in lot T1.

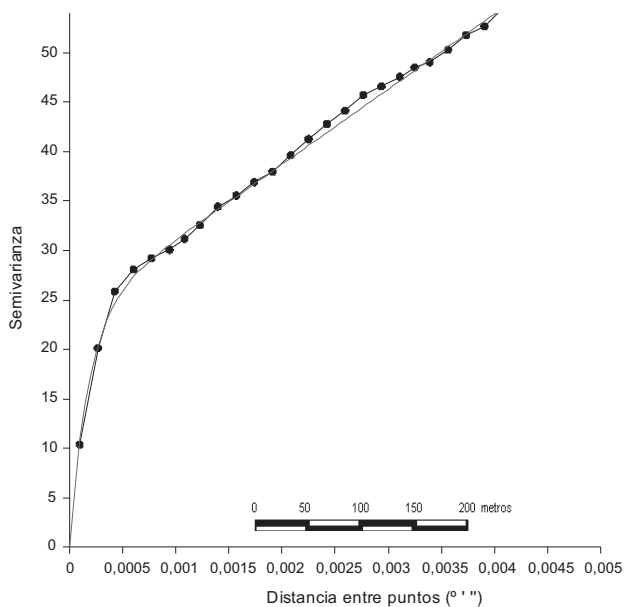


Figura 3. Semivariograma experimental (calculado con los datos medidos, línea y puntos negros) y ajuste de modelo teórico exponencial lineal (línea azul) para la variable conductividad eléctrica aparente en el lote P2.

Figure 3. Experimental semivariogram (calculated with the measured data, line and black dots) and theoretical fit linear exponential model (blue line) for variable apparent electrical conductivity in lot P2.

rogénea y sesgada, que es espacialmente dependiente. Así, se confirmó la utilidad de la CE_a para detectar variabilidad, como ya ha sido comprobada ampliamente (Corwin & Lesch, 2005; Dinnes *et al.*, 2002; Peralta *et al.*, 2012; Herber, 2012; Castro Franco *et al.*, 2012). La posibilidad de clasificar el suelo utilizando CE_a provee una base efectiva para delinear atributos del suelo interrelacionados, también ofrece un marco de trabajo muy útil

para muestreo de suelos, reflejando la heterogeneidad espacial (Johnson *et al.*, 2001).

En los mapas de CE_a de los tres lotes analizados (Figs. 4, 5 y 6), se observó una distribución de la CE_a con rangos más elevados en el centro, lo cual coincide con el área regada en cada lote. En estas zonas que quedan bajo los pivotes centrales de riego, se concentran mayormente los dos rangos superiores de CE_a .

Tabla 1. Rangos de Conductividad eléctrica aparente en los lotes estudiados, definidos mediante intervalos iguales.

Table 1. Apparent electrical conductivity ranges in lots studied, defined by two equal intervals.

Lote	Rango	mS m^{-1}
P1	Bajo	15 – 20
P1	Medio Bajo	20 – 25
P1	Medio Alto	25 – 30
P1	Alto	30 – 35
T1	Bajo	10 – 15
T1	Medio Bajo	15 – 20
T1	Medio Alto	20 – 25
T1	Alto	25 – 35
P2	Bajo	12 – 17
P2	Medio Bajo	17 – 22
P2	Medio Alto	22 – 27
P2	Alto	27 – 32

Relación entre CE_a y concentración de Na^+ soluble

Se dividió cada lote en 4 zonas utilizando los valores de CE_a , cada uno con una amplitud de 5 mS m^{-1} pero con diferente valor inicial y final dado que en cada lote la distribución tuvo la misma amplitud ($20 \text{ mS m}^{-1}/4\text{rangos} = 5 \text{ mS m}^{-1} \text{ c/u}$) (Tabla 1). Los rangos indicados fueron los mismos utilizados para delinear los mapas de CE_a (Figs. 4, 5 y 6).

Se empleó el test AIC (Akaike, 1973) para evaluar los diferentes modelos y los valores obtenidos para cada uno de ellos fue: i.- Simetría Compuesta (AIC = 377,7), ii.- Auto-regresivo (AIC= 377,3) y iii.- Simple (AIC = 375,7), siendo el modelo simple el que mejor ajustó tanto Na^+ soluble como para el resto de las variables analizadas.

Hubo diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) en la CE_a y los contenidos de Na^+ soluble entre los diferentes rangos de CE_a para todos los lotes estudiados y no se detectó interacción entre CE_a y lotes (Tabla 2).

Los contenidos de Na^+ soluble presentaron una correlación positiva ($r=0,61$) con la CE_a en los lotes analizados. Además hubo diferencias estadísticamente significativas entre todos los rangos de CE_a excepto entre los rangos medios (medio bajo y medio alto) (Tabla 2). Este tipo de observación ha llevado a diversos autores a efectuar clasificaciones en sólo tres rangos (Fraisie *et al.*, 2001), otro procedimiento para definir la cantidad de rangos, no utilizado en este trabajo, es el análisis cluster que realiza el programa MZA (Kitchen *et al.*, 2005). En nuestro trabajo, quedó estadísticamente probado que, tanto en el análisis de los tres lotes en conjunto como en cada lote por separado (datos no mostrados) con tres rangos es suficiente para clasificar las áreas con diferente CE_a . Además del significado estadístico, la clasificación en tres rangos, posee signifi-

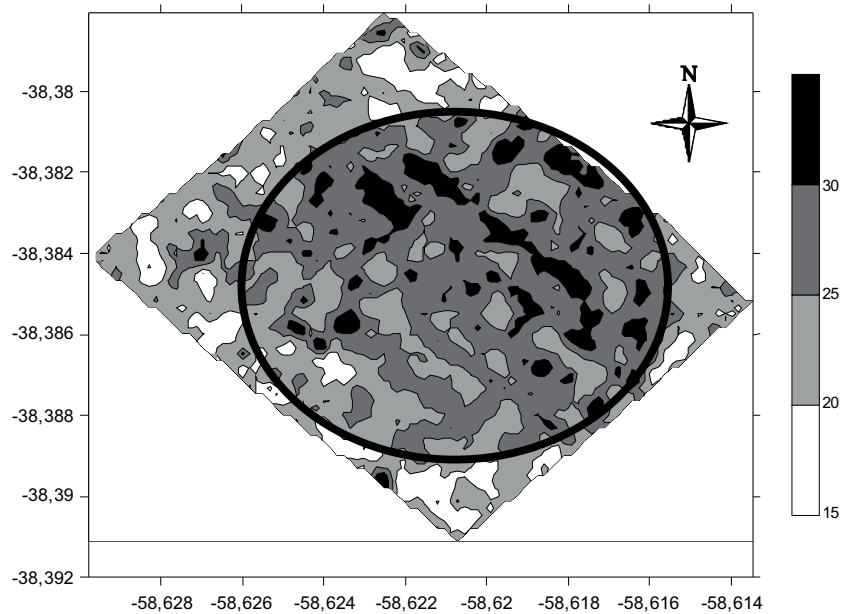


Figura 4 Mapa de distribución espacial de la CE_a (mS m^{-1}) en el lote P1. El círculo representa el área irrigada por el pivote central.

Figure 4. Map of spatial distribution of CE_a (mS m^{-1}) in the batch P1. The circle represents the area irrigated by the center pivot.

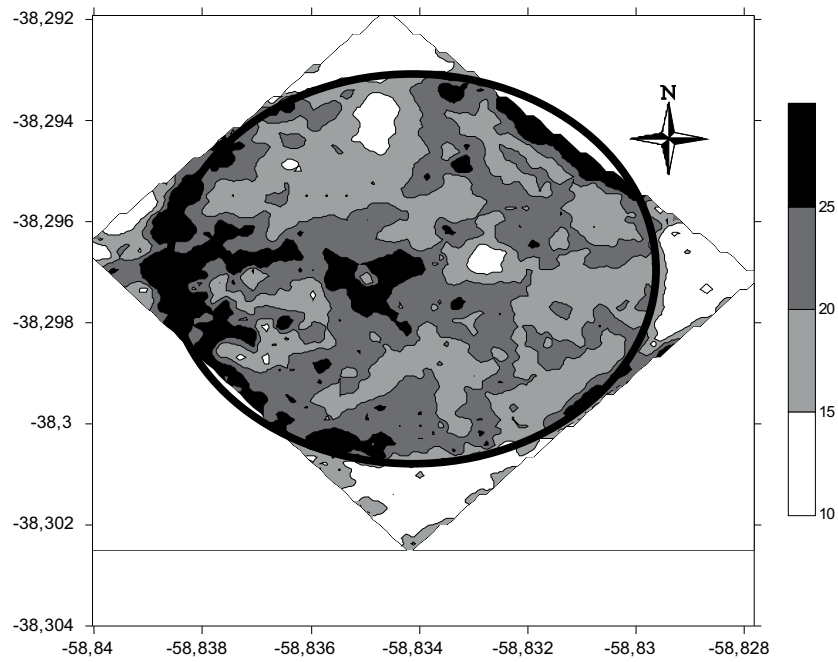


Figura 5. Mapa de distribución espacial de la CE_a ($mS\ m^{-1}$) en el lote T1. El círculo representa el área irrigada por el pivote central.
 Figure 5. Map of spatial distribution of EC_a ($mS\ m^{-1}$) in the batch T1. The circle represents the area irrigated by the center pivot.

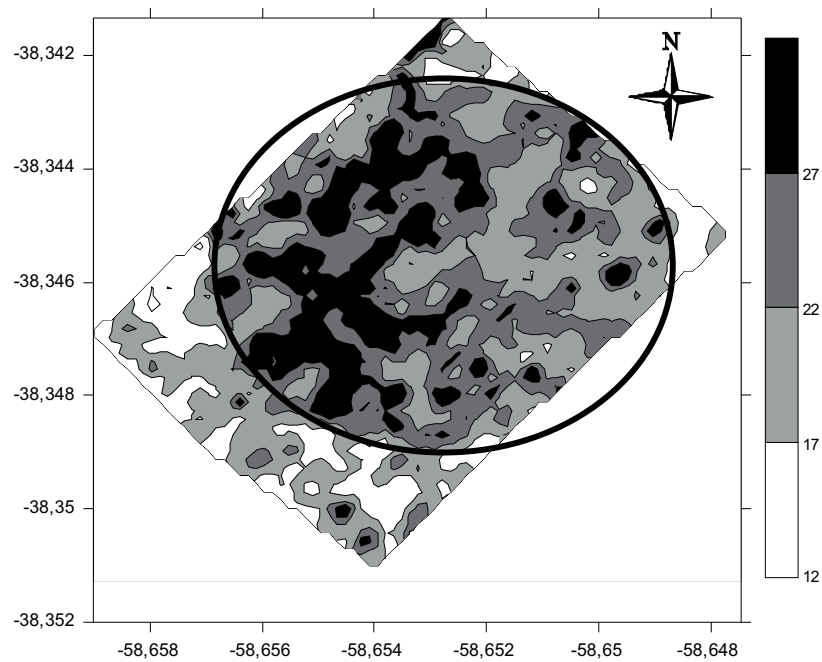


Figura 6. Mapa de distribución espacial de la CE_a ($mS\ m^{-1}$) en el lote P2. El círculo representa el área irrigada por el pivote central.
 Figure 6. Map of spatial distribution of EC_a ($mS\ m^{-1}$) in the batch P2. The circle represents the area irrigated by the center pivot.

Tabla 2. Comparación de medias entre conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE_e), Na^+ , Ca^{++} y Mg^{++} solubles para cada uno de los rangos de conductividad eléctrica aparente (CE_a)[†]. Letras diferentes indican diferencia significativa ($p > 0,05$).
 Table 2. Mean comparison between electrical conductivity of the saturation extract (CE_e), Na^+ , Ca^{++} and Mg^{++} soluble for each range of apparent electrical conductivity (CE_a)

Rango de CE_a	CE_e		Na^+			Ca^{++}		Mg^{++}	
	dS m^{-1}		mmol _(c) l^{-1}						
Bajo	0,32	a [†]	1,02	a	0,39	a	0,14	a	
Medio Bajo	0,49	bc	2,43	b	0,37	a	0,18	a	
Medio Alto	0,52	c	2,75	b	0,30	a	0,12	a	
Alto	0,64	d	3,60	c	0,44	a	0,15	a	

ficado físico y las zonas diferentes cubren una proporción mayor del terreno, evitándose el innecesario muestreo por separado de dos zonas semejantes (los 2 rangos medios). La reducción del número de zonas también reduce el costo de muestreo y el tiempo de trabajo, lo cual representa ventajas valiosas para quienes deseen cuantificar espacialmente el suelo.

La utilización de los mapas de CE_a permitió identificar la amplitud de la variabilidad espacial de los lotes y guió el muestreo de suelo abarcando un amplio rango de variabilidad y cuantificando el contenido de sodio con mayor certeza que en un muestreo tipo grilla tradicional. Si, por el incremento del Na^+ en el complejo de intercambio, es necesario aplicar una enmienda por ejemplo yeso, al conocer la concentración de Na^+ y su distribución espacial podemos, con maquinarias apropiadas, aplicar las dosis de yeso adecuadas al contenido de Na^+ que tenga el suelo.

Relación entre CE_a y θ_g

El contenido de humedad del suelo es uno de los factores principales que influyen en la CE_a , dado que la con-

ducción de la electricidad se realiza en la fase líquida presente en el suelo (Friedman, 2005).

Al encontrar interacción significativa ($p < 0,05$) entre rangos y lotes para el contenido de θ_g (Tabla 3), se analizaron los lotes respecto a θ_g por separado. Al igual que el caso del sodio, la CE_a mantiene sólo una correlación directa y significativa con la θ_g para P1 y T1. En el ANOVA no encontramos diferencias entre medias en P2 y si en P1 y T1 (Tabla 3). Sin embargo los resultados hallados indicaron que el efecto de la θ_g de suelo es menor que el efecto producido por el Na^+ ya que las diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos halladas para el sodio no fueron halladas para θ_g (Tabla 3). De esta manera se demostró que el incremento en la CE_a , sobre todo para el rango alto se debe al sodio y no al contenido de θ_g de suelo.

Relación entre CE_a y CE_e

Hubo diferencias estadísticamente significativas entre rangos de CE_a para la CE_e . Las diferencias entre rangos de CE_a fueron significativas excepto entre los dos tratamientos medios (medio bajo y medio alto) (Tabla 3).

Tabla 3. Comparación de medias de la relación de adsorción de sodio (RAS) y humedad gravimétrica (θ_g) para cada uno de los rangos de conductividad eléctrica aparente (CE_a) y lotes. [†] letras diferentes indican diferencia significativa ($p > 0,05$).

Table 3. Mean comparison of sodium adsorption ratio (RAS) and gravimetric moisture (θ_g) for each range of apparent conductivity (CE_a) and batches.

Rango de CE_a	RAS						θ_g					
	mmol _(c) $l^{-1}/(mmol_{(c)} l^{-1})^2$						m m^{-1}					
	P2		P1		T1		P2		P1		T1	
Bajo	7,4	a [†]	0,8	a	6,7	a	25,7	a	28,7	a	22,1	a
Medio Bajo	15,2	b	2,0	a	20,9	b	25,5	a	29,3	a	25,9	b
Medio Alto	16,8	b	3,3	a	20,9	b	26,4	a	29,9	ab	24,4	c
Alto	16,3	b	3,6	a	22,5	b	27,0	a	31,3	b	25,0	c

El comportamiento similar en la comparación de tratamiento de Na^+ soluble y CE_a entre rangos de CE_a fue un resultado esperable ya que la conductividad eléctrica depende directamente de la concentración de sales en solución.

Relación entre CE_a y Mg^{+2} , Ca^{+2} y RAS

No hubo diferencias estadísticamente significativas en los contenidos de Ca^{+2} y Mg^{+2} solubles entre rangos de CE_a (Tabla 2). Estos resultados coinciden con los reportados por Corwin y Lesch (2005) quienes hallaron que el Ca^+ y Mg^{+2} en extracto de saturación no se correlacionó bien con las mediciones de CE_a .

En RAS hubo interacción entre CE_a y lotes por lo cual el análisis se realizó desde la interacción (Tabla 3). En la Tabla 3 se presentan las medias de los valores de la RAS para los diferentes rangos y lotes.

En oposición a lo que ocurre en el caso del Na^+ soluble, las diferencias estadísticamente significativas en RAS sólo se observaron entre el rango bajo y el resto de los rangos de CE_a (Tabla 3) y no hubo diferencias significativas para el lote de P1. Este comportamiento del RAS puede explicarse si se analiza la distribución de los cationes que le dan origen. Si recordamos la ecuación de cálculo de RAS (Ecuación [2]), el efecto del Na^+ es mayor que el de Ca^{+2} y Mg^{+2} por estar éstos bajo la raíz cuadrada. Justamente, coincide que entre los rangos de CE_a bajo y medio bajo existe la mayor diferencia comparativa con respecto a los otros rangos continuados y al no encontrarse diferencias en Ca^{+2} y Mg^{+2} solubles entre rangos, la variación en el contenido de Na^+ soluble estaría explicando parte de lo observado en la RAS.

Tanto en el caso del Na^+ como en el del RAS los valores más bajos, correspondientes al rango de baja CE_a , se ubican casi totalmente en las áreas que quedan fuera del alcance del pivó central de riego (Figs. 4, 5 y 6). El hecho que se presente este tipo de distribución prueba el efecto asociado a la calidad del agua de riego. En análisis previos se determinó que el agua de riego utilizada en estos lotes era de calidad dudosa para riego. El efecto que ha producido esta agua sobre cada lote es claro: un incremento generalizado del RAS del suelo. Este es un dato importante a tener en cuenta a la hora de utilizar el riego complementario, a fin de no deteriorar la calidad de suelo (Costa, 1995). En el caso particular de los lotes analizados, los valores de RAS encontrados en los rangos medio bajo, medio alto y alto de CE_a fueron elevados en T1 y P2 donde mas años

de riego se acumulan en cambio son menores para P1. El proceso de sodificación en estos lotes está en marcha y se debe seguir con atención, especialmente hay que determinar si se llegó a valores constantes de RAS o si aún el proceso de sodificación continúa. En cambio, los valores de CE_a fueron bajos, indicando un bajo potencial de salinización.

CONCLUSIONES

Los suelos de todos los lotes analizados presentaron variabilidad espacial de la CE_a cuantificable mediante SMD por electrodos. Los sensores que miden la CE_a del suelo permiten estimar la variabilidad espacial del contenido de sodio en los lotes de producción bajo riego estudiados.

Existió una relación entre la CE_a medida con SMD y los contenidos de sodio soluble en los lotes de producción extensiva de cultivos bajo riego complementario estudiados. Sin embargo, no se evidenció una relación entre los contenidos de Ca^{+2} y Mg^{+2} con la CE_a .

Los valores de RAS encontrados evidenciaron que las áreas que están bajo riego se encuentran en proceso de sodificación debe hacerse un uso cuidadoso del riego ya que se encuentran en los valores límites de tolerancia.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo agradecemos a los productores agropecuarios que han facilitado sus instalaciones para la realización de esta investigación así como a INTA por brindar el presupuesto necesario para realizar las actividades de campo y de laboratorio correspondientes.

Deseamos, además, agradecer al Sr. Luis Alonso por su colaboración en la parte experimental.

BIBLIOGRAFÍA

- Akaike, H. 1973. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. *In: BN Petrov & F Csaki (eds.)*, Second international symposium on information theory, 267-281. Budapest Academiai Kiado.
- ARCGIS 2001. Arc GIS user's guide, 2001, version 3.2. Environmental System Research Institute Inc. pp. 12-33.
- ARCVIEW 1996. Arc View user's guide, 1996, version 9.2. Environmental System Research Institute Inc. pp 140-176.
- Bouma, J & PA Finke. 1993. Origin and nature of soil resource variability. *In: Robert, PC, RH Rust, and WE Larson (eds.)*. Proceedings of First Workshop Soil Specific Crop Management. April 14-16. 1992. ASA, CSSA, SSSA. Minneapolis, Minnesota, USA. pp. 3-13.

- Brady, NC & RC Weil. 1999. Soils of dry regions: alkalinity, salinity and sodicity. En su: *The Nature and Properties of Soils*. Prentice Hall, New York, USA. pp 378- 403.
- Bullock, DS & DG Bullock. 2000. Economic optimality of input application rates in precision farming. *Precis. Agric. 2*: 71-101.
- Castro Franco, M; NR Peralta; M Domenech, & JL Costa. 2012. Componentes principales de propiedades de sitio y su relación espacial con rendimiento en soja. Presentado en: XIX Congreso Latinoamericano y XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata - Argentina.
- Corwin, DL & SM Lesch. 2003. Application of soil electrical conductivity to precision agriculture: Theory, principles, and guidelines. *Agron. J.* 95: 455- 471.
- Corwin, DL & SM Lesch. 2005. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Comp. Electron. Agric.* 46: 11- 43.
- Costa, JL. 1995. Calidad de agua. En: Cetrángolo, H *et al.*, ed. Manual de riego del productor pampeano. SAPyA. Bs As. pp. 21- 40.
- Costa, JL. 1999. Effect of irrigation water quality under supplementary irrigation on soil chemical and physical properties in the «southern humid pampas» of Argentina. *Journal of Crop Production 2*: 85-99
- Dinnes, DL; DL Karlen; DB Jaynes; TC Kaspar; JL Hatfield; TS Colvin & CA Cambarella. 2002 Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained Midwestern soils. *Agron J* 94: 153-171
- Doolittle, JA.; KA Sudduth; NR Kitchen & SJ Indorante. 1994. Estimating depths to claypans using electromagnetic induction methods. *J. Soil Water Conserv.* 49(6): 572-575.
- Farifteh, J; TA Farshad & RJ George. 2006. Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modeling, and geophysics. *Geoderma* 130: 191-206
- Fleming, KL; DG Westfall.; DW Wiens, & MC Brodah. 2000. Evaluating farmer developed management zone maps for variable rate fertilizer application. *Precision Agric. 2*: 201-215.
- Fraisse, CW; K.A Sudduth & NR Kitchen. 2001. Delineation of site-specific management zones by unsupervised classification of topographic attributes and soil electrical conductivity. *Trans. ASAE* 44: 155-166.
- Friedman, SP. 2005. Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* 46: 45-70.
- Herber, LG. 2012. Conductividad Eléctrica aparente como herramienta para delimitar Zonas de Manejo Sitio Especifico en Maíz (*Zea mays*) en la Provincia de Corrientes. Tesis para acceder al grado de Magíster Scientiae en Mecanización Agraria.
- Isaaks, EH & RM Srivastava. 1989. Applied geostatistics: an introduction. Oxford University Press. Oxford. 561 p.
- Johnson, CK; JW Doran; HR Duke; BJ Wienhold; KM Eskridge & JF Shanahan, 2001. Field-Scale Electrical Conductivity Mapping for Delineating Soil Condition. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1829-1837.
- Kitchen NR; K.A Sudduth; DB Myersb; ST Drummonda & SY Hongc. Delineating productivity zones on claypan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computer and Electronics in Agriculture.* 2005; 46(1-3): 285-308.
- Mallarino, AP. 1996. Spatial variability patterns of phosphorus and potassium in no-tilled soils for two sampling scales. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 1473-1481.
- McMillan, RA; WW Pettapiece; LD Watson & TW Goddard. 1998. A landform segmentation model for precision farming. In: Robert, PC; Rust, RH; Larson, WE (eds.). 1998. Proceedings of the Fourth International Conference on Precision.
- Agriculture. St. Paul, MN, 19-22 July 1998. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, pp. 1335-1346.
- Peralta, NR; JL Costa; M Balzarini & M Castro Franco. 2012. Delimitación de zonas de manejo con modelos de elevación digital y profundidad de suelo. Interciencia. (En revisión).
- Rhoades, JD; PA Raats & RJ Prather. 1976. Effects of liquidphase electrical conductivity, water content, and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 651-655.
- Rhoades, JD. 1982. Soluble salts. In: Page AL *et al.*, ed. Methods of soil analysis, Part 2. 2nd ed. Agron. Monogr. 9. ASA and SSSA, Madison, WI. pp.167-179.
- Rhoades, JD. 1992a. Instrumental field methods of salinity appraisal. In: Topp, GC; Reynolds, WD & RE Green ed. Advances in measurement of soil physical properties: theory into practice. SSSA, Madison, WI. SSSA Spec. Publ. 30. pp. 231-248.
- Rhoades, JD. 1992b. Recent advances in the methodology for measuring and mapping soil salinity. Proc. Intl. Symp. Strategies for Utilizing Salt-Affected Lands, ISSS Meet, Bangkok, Thailand. 17-25 Feb. ISSS, Vienna, Austria.
- Ruffo, M; G Bollero; DS Bullock & DG Bullock. 2006. Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Precision Agric 7*: 327-342.
- SAS Institute. SAS User's Guide, 2002. Statistical Analysis System Institute Inc. Cary, NC.
- Sudduth, KA; ST Drummond & NR Kitchen. 2001. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Comput. Electron. Agric.* 31: 239-264.
- Tarr, AB; KJ Moore; CL Burras; DG Bullock & PM Dixon. 2005. Improving Map Accuracy of Soil Variables Using Soil Electrical Conductivity as a Covariate. *Precision Agriculture*, 6: 255-270.
- Timlin, DJ; Y Pachepsky; VA Snyder & RB Bryant. 1998. Spatial and temporal variability of corn grain yield on a hillslope. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62: 764-773.
- Warrick, A & DR Nielsen. 1981. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel D. Practical Applications of Soil Physics: pp. 319-344.
- Webster, R & MA Oliver. 1990. Statistical Methods in Soil and Land Resource Survey. Oxford University Press, Oxford UK, 316p.
- Young, FJ; RD Hammer & D Larsen. 1999. Frequency distributions of soil properties on loess-mantled Missouri watershed. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 63: 178-185.