

# ATRIBUTOS DEL SUELO Y PAISAJE ASOCIADOS A LA VARIABILIDAD DE RENDIMIENTOS DE MAÍZ EN LA PAMPA ARENOSA

SUSANA URRICARIET<sup>1\*</sup>; MAURICIO NIBORSKI<sup>2</sup> & CLAUDIO MIGUEL KVOLEK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Cátedra de Fertilidad y Fertilizantes, <sup>2</sup> Cátedra de Manejo y conservación de suelos. Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Av. San Martín 4453, (C1417DSE) Buenos Aires, Argentina.

\* Autor para correspondencia: urricari@agro.uba.ar

Recibido: 09-02-10

Aceptado: 02-03-11

## RESUMEN

La variabilidad espacial de las propiedades de los suelos y su asociación con la posición en el paisaje es requerida en la aplicación de tecnología manejo sitio-específico. Los rendimientos de los cultivos son altamente variables dentro de un lote como resultado de complejas interacciones entre topografía, atributos del suelo y prácticas de manejo. Los objetivos del trabajo fueron: caracterizar la distribución espacial de la capacidad de agua disponible utilizando funciones de edafotransferencia e identificar los atributos de suelo asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz a escala de lote en suelos de la Pampa Arenosa. En dos lotes de producción de maíz, se delimitaron parcelas de 8 ha y 10 ha obteniéndose a cosecha el mapa de rendimiento. Previo a la siembra del cultivo, se realizó un muestreo de suelos georreferenciado con un diseño en grilla. Se tomaron 32 muestras en el Sitio 1 (8 ha) y 42 muestras en el Sitio 2 (10 ha) y se determinó CO y composición granulométrica. Mediante funciones de edafotransferencia se estimó la capacidad de agua disponible (CAD). En tres perfiles representativos de los suelos presentes (Hapludol Típico, Hapludol Éntico y Hapludol Éntico, fase convexa) se determinó el agua retenida a -33 kPa y -1.500 kPa, composición granulométrica y CO para seleccionar la función de edafotransferencia de mayor ajuste. Se utilizaron procedimientos geoestadísticos para el análisis de los resultados. La CAD del perfil hasta un metro de profundidad fue de 121 mm para el Hapludol Típico y 78-79 mm para ambos Hapludoles Énticos. El Sitio 1 presentó mayor variabilidad entre posiciones topográficas en el contenido de arena (40 a 81%) que el Sitio 2 (43 a 73%) mostrando moderada asociación espacial de los resultados. La CAD presentó asociación espacial moderada en el Sitio 1 mientras que en el Sitio 2 no se observó comportamiento espacial. En el Sitio 1 los rendimientos presentaron fuerte dependencia espacial mientras que en el Sitio 2 fue moderada, con valores extremos entre 5,4-14,5 t ha<sup>-1</sup> y 5,5-13,3 t ha<sup>-1</sup> para ambos sitios, respectivamente. Nuestros resultados indican que la variabilidad espacial en el contenido de arena del horizonte superficial se asoció estrechamente a los rendimientos de maíz (Y) y explicó el 64% de la variabilidad Y (t ha<sup>-1</sup>) = 21,5 - 0,189 Arena (%) (P < 0,001) n=74. No obstante, la asociación encontrada entre CAD y rendimiento de maíz, el elevado costo de su determinación y la información requerida para la utilización de funciones de edafotransferencia restringe la posibilidad de su empleo en la determinación del potencial de producción. En un año de bajas precipitaciones (Sitio 1), para niveles similares de CAD, en los ambientes con predominio de Hapludoles Énticos situados en posiciones topográficas de media loma y pie de loma, los rendimientos fueron un 37% superiores a los de posiciones de loma convexa. Estos resultados solo pueden atribuirse al aporte de agua por ascenso freático.

**Palabras clave.** Función de edafotransferencia, variabilidad de rendimientos, agua disponible, arena, heterogeneidad espacial.

## SOIL ATTRIBUTES ASSOCIATED TO CORN YIELD VARIABILITY IN THE SANDY PAMPAS

### ABSTRACT

Spatial variability of soil properties and their association with the landscape position are needed in the application of site specific-management practices. Crop yields are highly variable across a field as a result of complex interactions among different factors such as topography, soil attributes and management practices. The objectives of this study were to determine the spatial distribution of the available water storage capacity using pedotransfer functions and to identify soil attributes associated to the variability of corn yields in a field scale in the Sandy Pampas. In two corn fields, 8 ha and 10 ha- plots were marked and yield maps were obtained at harvest. Before corn planting, a geo-referenced sampling following a grid design was carried out. Thirty-two cores were collected from 0-30 cm-depths in Site 1 (8 ha) and forty-two cores in Site 2 (10 ha), and CO and texture were determined. Available water storage capacity (CAD) was estimated using pedotransfer functions. In three representative soil profiles (Typic Hapludoll, Entic Hapludoll and Entic Hapludoll, convex phase) water retention at -33 kPa and -1,500 kPa, texture and CO was determined in order to determine the pedotransfer function with the best fit. The results of both sampling grids were analyzed through geostatistical procedures. CAD in the upper meter of the soil profiles was 121 mm in the Typic Hapludoll and 78-79 mm in both Entic Hapludolls. Sand content variability between topographic positions was greater in Site 1 (40-81%) than in Site 2 (43- 73%) showing a moderate spatial structure. CAD had a moderate spatial structure in Site 1 but not in Site 2. Corn yields showed a strong spatial dependence in Site 1 but only a moderate spatial dependence in Site 2, fluctuating between 5,4-14,5 t ha<sup>-1</sup> and 5,5-13,3 t ha<sup>-1</sup> in both sites, respectively. Our results show that the sand spatial variability is closely related to corn yields, explaining 64% of corn yield (Y) variability: Y (t ha<sup>-1</sup>) = 21,5 - 0,189 Sand (%) (P < 0,001) n=74. In spite of the high association between CAD and corn yields, the high cost of determination of the former and the data required to use pedotransfer functions could limit the possibilities of its use to determine the potential production of corn. In a dry year (Site 1) with similar CAD levels, corn yields were 37% higher in foot and mid-slopes dominated by Entic Hapludolls compared to those at the hilltops. These results could be attributed to the water table rise in the former soils.

**Keys words.** Pedotransfer function, yield variability, water availability, sand, spatial variability.

## INTRODUCCIÓN

La existencia de variabilidad espacial de las propiedades físicas y químicas de los suelos a escala de lote fue reconocida en trabajos previos realizados en la Región Pampeana (Di Pietro *et al.*, 1986; Giuffré *et al.*, 1994). La caracterización de los patrones espaciales de variabilidad es de creciente interés para determinar los niveles de precisión con los cuales pueden predecirse los atributos de suelo a diferentes escalas. La asociación espacial entre estos atributos y rendimiento de cultivos es necesaria en la aplicación de insumos en forma variable o tecnología manejo sitio-específico (MSE). Esta tecnología se fundamenta en la capacidad de reconocer la heterogeneidad dentro del lote de producción y adecuar el uso de insumos para cada unidad reconocida (Khosla *et al.*, 2002; Ruffo *et al.*, 2006; Urricariet & Zubillaga, 2007).

En la tecnología MSE es imprescindible delimitar áreas homogéneas de manejo dentro del lote y se requieren mapas a escalas de elevado detalle (*e.g.* 1:1200 a 1:8000) (Moore *et al.*, 1993; Sadler *et al.*, 1998). El uso de metodologías de relevamiento tradicionales sería muy costoso para adecuar los mapas de suelos disponibles. La utilización de otras fuentes de información, tales como mapas de rendimiento e imágenes satelitales de varios años son valiosos para delimitar con mayor precisión las unidades cartográficas (Niborski *et al.*, 2004). El valor de la información recolectada por los monitores de rendimiento radica en su elevado nivel de detalle (Timlin *et al.*, 2001). Sin embargo, la utilización de los mapas de rendimiento como única herramienta para delimitar áreas homogéneas de manejo puede ser poco consistente cuando se desconocen las fuentes de variabilidad de los mismos entre años (Godwin *et al.*, 2003; Urricariet & Zubillaga, 2007).

En suelos de texturas arenosas, cuando el rendimiento es limitado por la oferta hídrica, la variabilidad topográfica es útil para interpretar los mapas de rendimientos. La posición en el paisaje influye en la redistribución (*i.e.* erosión y deposición) de partículas de suelo, en el contenido de materia orgánica (MO) y disponibilidad de nutrientes (Pennock & De Jong, 1990). Como consecuencia se observa variabilidad a escala de lote en las propiedades físicas y químicas asociadas a la posición topográfica (Kravchenko & Bullock, 2000). En suelos de textura arenosa se observó una estrecha asociación entre atributos topográficos y el agua retenida entre -10 kPa y -30 kPa (Pachepsky *et al.*, 2001).

Entre los atributos del suelo asociados al rendimiento se considera la disponibilidad de agua como la de mayor significancia en agricultura de secano. La capacidad de retención hídrica según la posición en el paisaje se ha utilizado para predecir rendimientos de maíz por zonas de manejo (Wright *et al.*, 1990; Gregoret *et al.*, 2006). El

principal factor que controla la disponibilidad de agua es la textura. Sin embargo, en regiones semiáridas, la topografía, la vegetación y el uso del suelo pueden también ser significativos (Grayson & Western, 1998).

La determinación de la capacidad de almacenamiento de agua a escala de lote es costosa y requiere de muestreos intensivos. Con información de cartografía de suelos y funciones de edafotransferencia, Damiano & Taboada (2000) caracterizaron la distribución geográfica de la capacidad de agua disponible en la Región Pampeana. Estas funciones se basan en ecuaciones que tienen como argumento básico, atributos que describen el suelo (*i.e.* distribución del tamaño de partículas, densidad aparente y contenido de carbono orgánico). Con estos modelos se puede estimar el contenido y la energía con que el agua es retenida por la matriz del suelo y su disponibilidad para la planta (Damiano, 2008). Sin embargo, esta información regional es insuficiente a la escala requerida en tecnología MSE.

La variabilidad espacial de atributos de suelo y cultivo puede evaluarse mediante técnicas geoestadísticas basadas en la teoría de variables regionalizadas (Isaaks & Srivastava, 1989). Los métodos de interpolación geoestadísticos permiten estimar valores de una variable en sitios no muestreados a partir del análisis de la continuidad espacial a través del cálculo de semivariogramas (Zubillaga & Urricariet, 2007). Los modelos utilizados en geoestadística que más se aplican al semivariograma empírico son esférico, exponencial y lineal-plateau. De tal modo, se puede representar en mapas detallados la distribución espacial de propiedades del suelo como base para delimitar áreas homogéneas de manejo diferencial. En tal sentido, las técnicas de interpolación utilizadas determinan en muchos casos la calidad de los mapas obtenidos (Kravchenko & Bullock, 1999).

Se plantea como hipótesis que el patrón de distribución espacial de rendimientos de maíz se asocia a la variabilidad en la retención hídrica entre Hapludoles Énticos y Hapludoles Típicos de la Pampa Arenosa. Los objetivos del presente trabajo fueron: (i) caracterizar la distribución espacial de la capacidad de agua disponible utilizando funciones de edafotransferencia, y (ii) identificar los atributos de suelo y paisaje asociados a la variabilidad de rendimientos de maíz a escala de lote en suelos de la Pampa Arenosa.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Condiciones experimentales

Los experimentos fueron realizados próximos a la localidad de Vedia (Pcia. de Buenos Aires).

Los suelos predominantes a escala de lote son Hapludoles Típicos en las posiciones bajas de la toposecuencia y Hapludoles Énticos en las lomas y pie de lomas característicos del Dominio 19 del Mapa de suelos de la provincia de Buenos Aires (INTA, 1989), al que pertenecen.

En dos lotes manejados bajo siembra directa en los últimos 5-8 años se delimitó una parcela de 8,0 ha (Sitio 1, 34°22'34" S, 61°35'35" W) y otra de 9,9 ha (Sitio 2, 34°24'33" S, 61°32'43" W). En ambos sitios se sembró el híbrido de maíz AW 190 MG bajo siembra directa y distancia entre hileras de 0,525 m. El Sitio 1 se sembró el 27/08/03 con una densidad de siembra de 76.000 semillas ha<sup>-1</sup> y el Sitio 2 el 9/09/04 con 75.000 semillas ha<sup>-1</sup>. El cultivo antecesor fue soja de segunda y se fertilizó a la siembra del maíz en ambos lotes con 110 kg de fosfato diamónico ha<sup>-1</sup>. A madurez comercial del cultivo, se calibró el monitor de rendimiento (Greenstar 1, John Deere) y en varios sectores de las parcelas se recolectaron espigas en 10 m<sup>2</sup> de cultivo para estimar rendimiento y correlacionar con los datos obtenidos con el monitor de rendimiento.

Utilizando un mapa de suelos preexistente a escala 1:20.000 (Tecnisuelo, 1991) y mapas de rendimiento relativo interpolados (IDW) de los tres cultivos previos (trigo, soja y maíz) se ajustaron los límites de las unidades cartográficas (Fig. 1). El empleo de los mapas de rendimiento permitió la segregación cartográfica de situaciones topográficas intermedias (media loma) y una mayor precisión en la ubicación de las delineaciones respecto al mapa de suelos preexistente (Niborski *et al.*, 2004). Las unidades cartográficas resultantes fueron constatadas mediante calicatas para obtener un mapa a escala requerida por la tecnología MSE (Moore *et al.*, 1993).

Se estudiaron los perfiles de suelo representativos de cada ambiente identificado en las parcelas a partir de la apertura de calicatas de hasta 1,20 m de profundidad, y se extrajeron tres submuestras disturbadas por horizonte. Se determinó el agua retenida a -33 kPa y -1.500 kPa utilizando membrana de Richards (Klute, 1986). Se determinó la composición granulométrica por el método del hidrómetro (Gee & Bauder, 1986). El contenido de carbono orgánico (CO) fue determinado por Walkley & Black y el nitrógeno total (NT) por Kjeldahl con las metodologías de Page *et al.* (1982).

Previo a la siembra del cultivo se realizó un muestreo sistemático georreferenciado siguiendo un diseño en grilla de 50 m x 50 m en el Sitio 1 (32 puntos) y 40 m x 60 m en el Sitio 2 (42 puntos). La profundidad de muestreo fue de 0,30 m y en cada punto de intercepción de la grilla se tomaron cinco submuestras disturbadas (una en el punto de intercepción de la grilla y las restantes en un radio de 2 m) para conformar la muestra compuesta. En dichas muestras se determinó CO, NT y composición granulométrica.

En todas las muestras de suelo recolectadas se estimó el agua volumétrica retenida a -33 kPa y -1.500 kPa mediante funciones de pedotransferencia (Tabla 1) propuestas por Gupta & Larson (1979), Rawls *et al.* (1982) y Rawls & Brakensiek (1989). La densidad aparente fue estimada por el algoritmo propuesto por Rawls (1983). La capacidad de agua disponible (CAD) se estimó como la diferencia entre el agua retenida a los potenciales -33 kPa y -1.500 kPa. Los resultados de CAD fueron expresados como lámina para los primeros 0,30 m del perfil y como CAD del perfil de suelo hasta 1 m de profundidad (CADP).

Los datos de cota relativa fueron extraídos de los modelos digitales de elevación obtenidos en el Sitio 1 por Presutti *et al.* (2004) y en el Sitio 2 por Rosatto *et al.* (2005).

**Análisis estadístico**

Se utilizaron las muestras extraídas en las calicatas para determinar la función de edafotransferencia de mayor ajuste. Como indicadores de la bondad de ajuste de las funciones de edafotransferencia utilizadas se estimó el error medio (EM) (Ecuación 1), la raíz cuadrada del error cuadrático medio in-sesgado (URMSE) (Ecuación 2) y el coeficiente de determinación (r<sup>2</sup>) de la regresión lineal entre contenidos de agua gravimétrico (Θ) medidos y estimados por los modelos.

$$EM = \sum_{i=1}^n \frac{e_i}{n} \tag{Ecuación 1}$$

$$URMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (e_i - EM)^2}{n}} \tag{Ecuación 2}$$

Donde  $e_i$  es la diferencia entre Θ medido y Θ estimado (Tietje & Hennigs, 1996).

Los atributos de suelo y cultivo estimados en ambas grillas fueron analizados mediante procedimientos geoestadísticos. La geoestadística toma en cuenta la dependencia espacial entre observaciones separadas por una determinada distancia. Para estimar la dependencia espacial entre observaciones vecinas se estimó la semivarianza estadística y la descripción matemática de la semivarianza (Ecuación 3) entre pares de observaciones  $g$  ( $h$ ) y la distancia que separa a esos puntos ( $h$ ), se define como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)]^2 \tag{Ecuación 3}$$

siendo  $z(x_i)$  el valor de una variable en una localización muestreada ( $x_i$ ) y  $z(x_{i+h})$  el valor de la misma variable en un punto distante ( $h$ ) y  $N(h)$  es el número de pares separados por una distancia  $h$ .

Los modelos teóricos de semivarianza se caracterizan por los siguientes parámetros: la discontinuidad en el origen (efecto nugget o pepita), el valor máximo de semivarianza (meseta), y la distancia de autocorrelación (Rango). La varianza distinta de cero en el origen (nugget) representa la variabilidad de la propiedad que no puede ser detectada a la escala de muestreo realizado y/o errores de medición. La varianza estructural es la contribución a la varianza total debido a la correlación espacial exclusivamente.

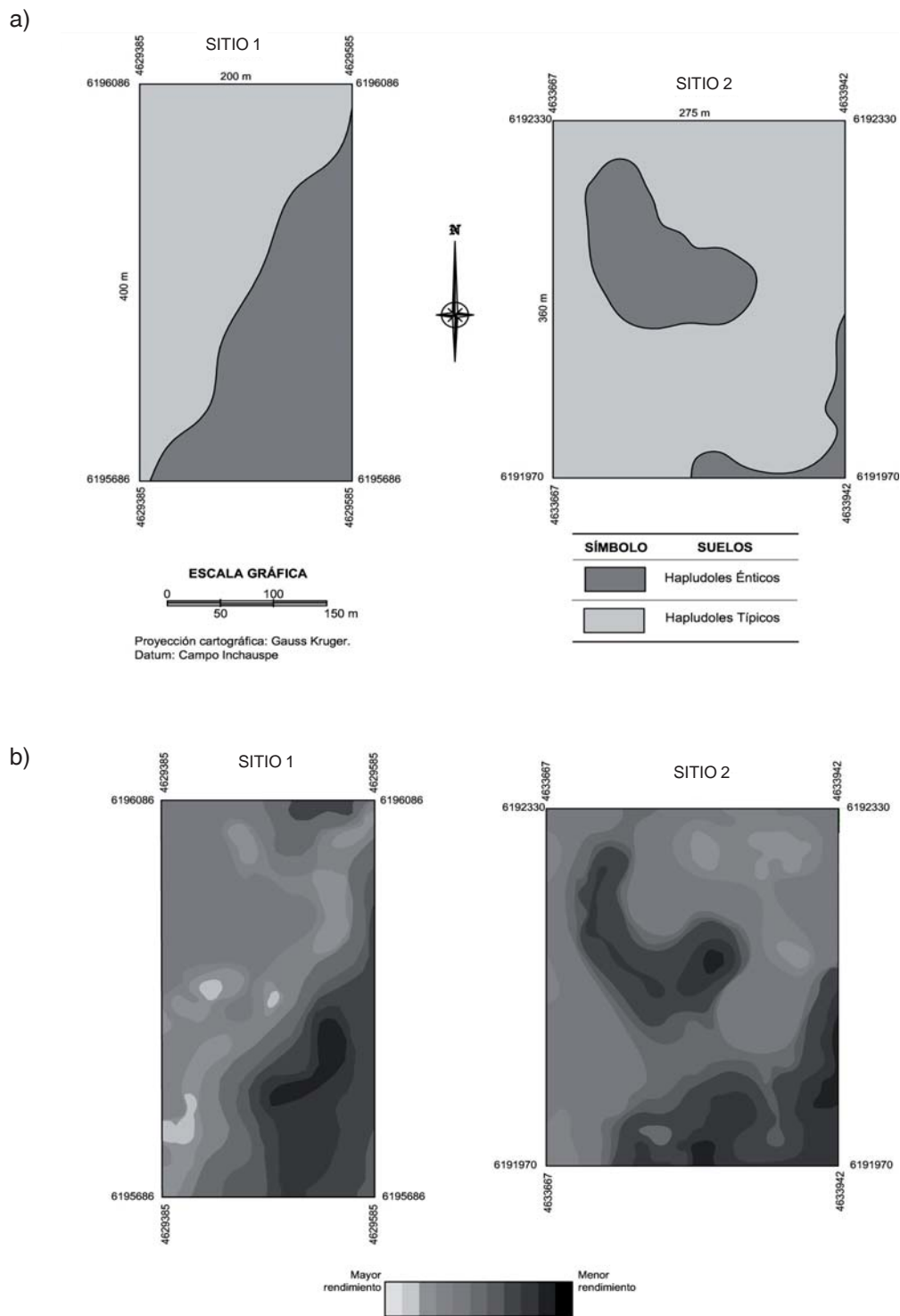


Figura 1. a) Mapa de suelos escala 1:20.000 para ambos sitios 1 y 2 y b) mapa de rendimiento relativo de los cultivos de los últimos tres años.  
Figure 1. Soil map at a 1:20.000 scale for both sites and b) corn yield map of the relative yields of the last three years.

Tabla 1. Funciones de edafotransferencia utilizadas para estimar el contenido de agua del suelo a capacidad de campo (-33 kPa) y punto de marchitez permanente (-1.500 kPa) a partir del contenido de: arena (A), limo (L), arcilla (C), materia orgánica (MO) y densidad aparente (DA).  
 Table 1. Pedotransfer functions used to estimate soil water retention in field capacity (-33 kPa) and permanent wilting point (-1,500 kPa) obtained with contents of sand (A), silt (L), clay (C), organic matter (MO) and bulk density (DA).

Referencia	Potencial mátrico (kPa)	Ecuaciones de regresión
Rawls <i>et al.</i> (1982)	-33	$\Theta = 0,2576 - 0,002 A + 0,0036 C + 0,0299 MO$
	-1.500	$\Theta = 0,026 + 0,005 C + 0,0158 MO$
Rawls & Brakensiek (1989)	-33	$\Theta = 0,3486 - 0,0018 A + 0,0039 C + 0,0228 MO - 0,0738 DA$
	-1.500	$\Theta = 0,0854 - 0,0004 A + 0,0044 C + 0,0122 MO - 0,0182 DA$
Gupta & Larson (1979)	-33	$\Theta = 0,003075 A + 0,005886 L + 0,008039 C + 0,002208 MO - 0,14340 DA$
	-1.500	$\Theta = -0,000059 A + 0,001142 L + 0,005766 C + 0,002228 MO + 0,02671 DA$

Los resultados de ambas grillas de muestreo se analizaron mediante procedimientos geoestadísticos y se realizó con el software SURFER 7.0 (Golden Software, 1999). Se analizaron los patrones de variabilidad (rango, meseta y efecto nugget) y se aplicaron los modelos teóricos esférico y cuadrático en función del ajuste a los resultados experimentales.

Se analizó la relación entre atributos de suelo-paisaje con el rendimiento de maíz mediante análisis de regresión lineal simple.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### Características de los sitios experimentales

Los suelos de la Pampa Arenosa se caracterizan por una gran variabilidad a escala de lote que se refleja aún en pequeñas superficies como las estudiadas (Fig. 2). Las unidades cartográficas de suelos reconocidas son las resultantes del ajuste del mapa de suelo detallado preexistente (escala 1: 20.000) con mapas de rendimiento de varias campañas previas con distintos cultivos (Fig. 1). Esto permitió obtener mayor precisión en los límites entre las unidades cartográficas y la segregación de situaciones intermedias no identificables con las herramientas tradicionales de cartografía de suelos.

Los Hapludoles Énticos correspondientes a la fase convexa representan el 36% de la superficie total del Sitio 1 y el 31% del Sitio 2 y se asocian a los sectores de menor productividad y mayor cota. Los sectores de lomas bajas y pies de loma conforman el 10% del área del Sitio 1 y el 16% del Sitio 2, con productividad intermedia y amplio dominio de Hapludoles Énticos. En proporciones superiores al 50%, se distribuyen Hapludoles Típicos, en concordancia con los sectores de relieve suavemente ondulado, menor cota y mayor rendimiento. Esta distribución espacial es semejante a lo que ocurre a escala de lote para este sector de la Pampa Arenosa.

Tanto las posiciones de loma convexa como de media loma presentan gran similitud en el contenido de arena, CO, NT y principales características morfológicas (Tabla 2). Las diferencias de rendimiento entre estas dos posiciones topográficas podrían atribuirse al aporte de agua por ascenso freático (Nosetto *et al.*, 2009; Viglizzo *et al.*, 2009). En amplios sectores de la Pampa Arenosa, la freática se encuentra a poca profundidad. En suelos sin impedancias subsuperficiales y agua de la freática de baja salinidad pueden ofrecer en años secos un aporte de agua adicional a los cultivos de raíces profundas (Nosetto *et al.*, 2009).

Los contenidos de CO y NT del Hapludol Típico fueron mayores a los determinados en los Hapludoles Énticos. En cambio, éstos últimos se caracterizan por altos contenidos de arena (Tabla 2). El contenido de arcilla del perfil de suelo del Hapludol Típico fue mayor al de ambos Hapludoles Énticos. La variabilidad de estos atributos del suelo se refleja, entre otras propiedades, en la tasa de mineralización de nitrógeno. Resultados obtenidos por Zubillaga *et al.* (2005) en la parcela del Sitio 1 mostraron que el nitrógeno mineralizado durante la estación de crecimiento del cultivo de maíz fue de 60-80 kg N-NO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup> en el Hapludol Éntico, fase convexa y de 160-180 kg N-NO<sub>3</sub> ha<sup>-1</sup> en el Hapludol Típico.

El Hapludol Típico seleccionado como representativo de los suelos reconocidos en este estudio posee una CADP hasta 1 m de profundidad de 121 mm, mientras que para los Hapludoles Énticos, este valor es sensiblemente inferior, alcanzando 78 y 79 mm tanto para la fase convexa como para las situaciones intermedias (Tabla 2). En todos los casos la contribución de la CAD del horizonte superficial oscila entre el 36 y 42% de la CADP. Estos resultados se ajustan a la tendencia decreciente del aporte del horizonte A respecto de la CADP en dirección SO-NE en la provincia de Buenos Aires (Damiano, 2008). Considerando el peso relativo del horizonte A en la



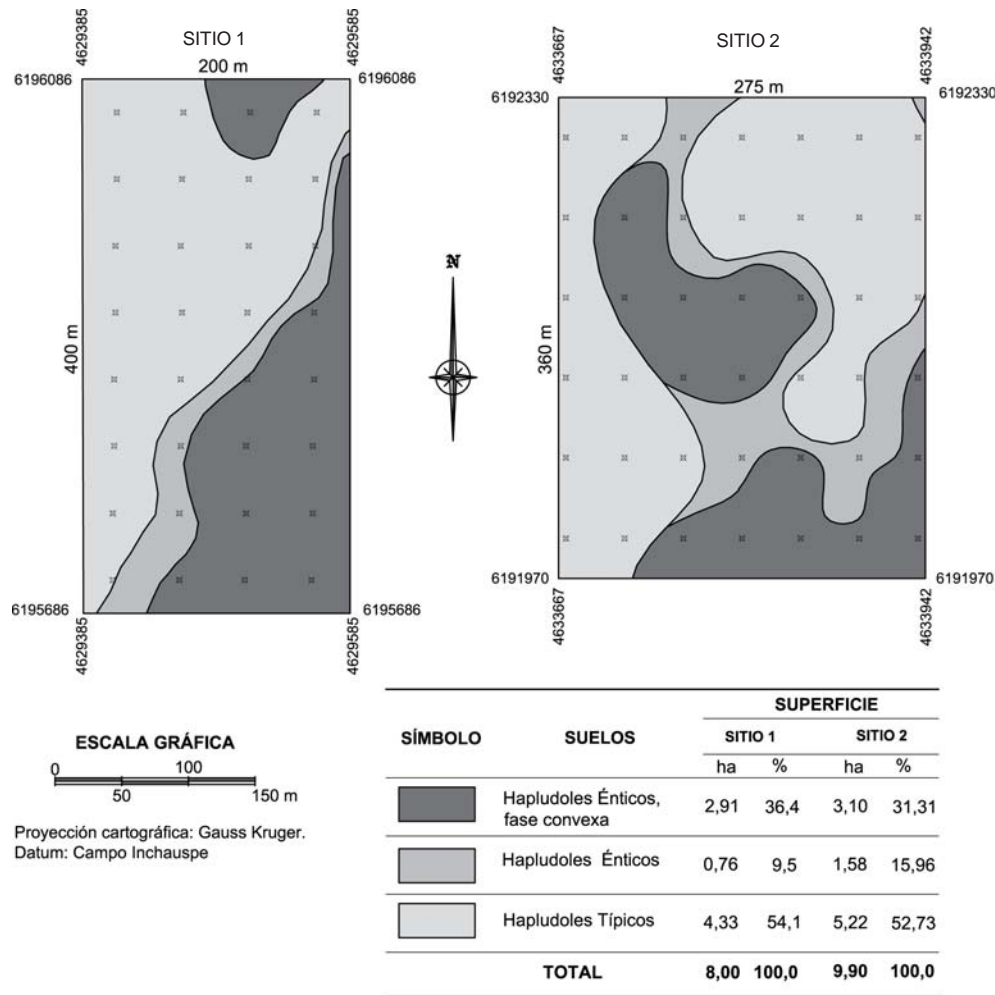


Figura 2. Mapas de suelo de los Sitio 1 y Sitio 2 ajustados con el mapa de rendimiento relativo de los cultivos de los últimos tres años, superficies absolutas y relativas de cada unidad cartográfica y grilla de muestreo (simbolizada por  $\oplus$ ).

Figure 2. Soil maps of Site 1 and 2, adjusted with the last three years relative yield crop map, absolute and relative areas of each cartographic unit and sampling grid (symbolized by  $\oplus$ ).

CADP, se utilizó únicamente dicho horizonte para la caracterización de la distribución espacial de la CAD en las parcelas evaluadas en este trabajo.

#### Capacidad de agua disponible de los suelos

La CAD determinada en los perfiles de suelo representativos permitió seleccionar la función de edafotransferencia de mayor ajuste entre valores observados y predichos (Tabla 3). Las tres funciones utilizadas estimaron en forma adecuada el agua retenida a -33 kPa ( $r = 0,98$ ,  $P < 0,001$ ) mientras que la propuesta por Rawls *et al.* (1982) se ajustó mejor para el potencial de -1.500 kPa ( $r = 0,95$ ,  $P < 0,001$ ). Además, el modelo propuesto por Rawls *et al.* (1982) requiere información sólo de CO y compo-

sición granulométrica. En cambio, para los otros modelos evaluados fue necesario estimar la densidad aparente (Rawls, 1983) de cada horizonte. La determinación de densidad aparente no ofrece mayores dificultades analíticas pero requiere un muestreo intensivo para obtener resultados confiables.

La precisión en la estimación de la CAD de los modelos (URMSE) es aceptable en todos los casos y menor a  $\pm 0,03 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (Damiano, 2008) excepto para el modelo de Gupta & Larson (1979). En razón de que el algoritmo propuesto por Rawls *et al.* (1982) presentó mejor ajuste, se utilizó éste en el presente trabajo. Estos resultados son coincidentes con el modelo propuesto por Damiano (2008) para suelos de textura franco arenosa a arena fran-

Tabla 2. Composición granulométrica, capacidad de agua disponible (CAD), carbono orgánico (CO) y nitrógeno total (NT) de tres perfiles representativos correspondientes a las unidades cartográficas segregadas.

Table 2. Granulometric composition, available water storage capacity (CAD), organic carbon (CO) and total nitrogen (NT) of three representative soil profiles belonging to a particular cartographic unit.

Suelos y horizontes	Profundidad (cm)	Arena (%)	Limo (%)	Arcilla (%)	CAD (mm)	CO (g kg <sup>-1</sup> )	NT (g kg <sup>-1</sup> )
<b>Hapludol Éntico, fase convexa (Posición Loma)</b>							
A	0-31	72,0	16,8	11,3	28,1	10,5	1,0
AC <sub>1</sub>	31-58	76,5	9,8	13,8	21,9		
AC <sub>2</sub>	58-76	77,8	10,9	11,3	11,8		
C	76-100 +	79,5	10,5	10,0	16,2		
<b>Hapludol Éntico (Posición Media Loma)</b>							
A	0-30	70,2	18,6	11,3	32,1	11,6	1,2
AC <sub>1</sub>	30-48	73,9	14,9	11,3	13,7		
AC <sub>2</sub>	48-70	76,8	11,9	11,3	15,8		
C	70-100 +	80,4	10,8	8,8	17,2		
<b>Hapludol Típico (Posición Bajo)</b>							
A	0-32	52,6	29,9	17,5	50,3	14,3	1,4
B <sub>w</sub>	32-50	53,4	20,8	15,8	20,8		
BC	50-68	66,3	16,7	15,0	18,3		
C	68-100 +	70,3	18,5	11,3	31,7		

Tabla 3. Coeficientes de determinación (r<sup>2</sup>), ordenada al origen (a) y pendiente (b) de las ecuaciones de regresión y URSME entre valores medidos y estimados por las de tres modelos de retención de agua del suelo para potenciales mátricos de -33 y -1.500 kPa (n = 12).

Table 3. Coefficients of determination (r<sup>2</sup>), intercept (a) and slope (b) of regressions and URSME between observed and estimated values for three soil water retention models for matric potentials of -33 and -1,500 kPa (n = 12).

Modelo	-33 kPa				-1.500 kPa			
	r <sup>2</sup>	A	b	URMSE	r <sup>2</sup>	A	b	URMSE
Rawls <i>et al.</i> (1982)	0,98	-0,09	1,08	0,0007	0,91	-0,03	0,88	0,0011
Brakensiek & Rawls (2003)	0,96	-0,06	1,28	0,0046	0,83	-0,77	0,99	0,0057
Gupta & Larson (1979)	0,97	-0,09	1,094	0,0070	0,89	-0,04	0,79	0,0802

ca. En concordancia a los resultados de Kern (1995), los modelos de Gupta & Larson (1979) y Rawls *et al.* (1982) sobreestimaron el contenido de humedad retenida tanto a -33 kPa como -1500 kPa en los tres perfiles representativos evaluados en este trabajo.

En una amplia población de muestras de suelo distribuidas en EE.UU., que comprendieron a las 12 clases texturales, el algoritmo de Rawls *et al.* (1982) fue el más consistente para estimar el efecto de la MO en la capacidad de retención hídrica (Kern, 1995). En suelos arenosos, Rawls *et al.* (2003) determinaron que incrementos en el contenido de MO condujeron a un aumento en la retención de humedad en mayor medida que en suelos de texturas finas. En suelos arenosos del O de la Región Pampeana el contenido de CO tiene mucha influencia en la capacidad de retención hídrica (Quiroga *et al.*, 2005). Otro estudio de

la misma región mostró la influencia que posee la textura sobre la distribución del contenido de MO y su incidencia en la capacidad de retención hídrica en suelos con diferente aporte de cobertura vegetal (Buschiazzi *et al.*, 2004).

La productividad de los cultivos de la Región Semi-árida está limitada en gran medida por la disponibilidad de agua, asociándose estrechamente con el contenido de MO. En años de bajas precipitaciones la variabilidad de rendimientos de trigo fue explicada por la capacidad de retención hídrica y contenido de CO, mientras que en un año húmedo la disponibilidad de nutrientes fue el factor limitante de la producción (Díaz Zorita *et al.*, 1999). Otros resultados obtenidos en un Haplustol de Córdoba mostraron la importancia de incluir el agua disponible a la siembra del cultivo de maíz como variable predictora de la respuesta a la fertilización nitrogenada por áreas homogéneas de manejo en tecnología MSE (Gregoret *et al.*, 2006).

### Variabilidad de atributos de suelo, paisaje y rendimiento de maíz

La amplitud entre rendimientos máximos y mínimos fue de 9,1 t ha<sup>-1</sup> en el Sitio 1 y 7,8 t ha<sup>-1</sup> en el Sitio 2 (Tabla 4). En el Sitio 1 se ajustó un modelo esférico con un rango de dependencia espacial de 120 m. Utilizando el criterio propuesto por Cambardella *et al.* (1994) para asignar categorías de dependencia espacial se asumió que ésta es fuerte cuando la relación nugget/meseta es menor o igual a 0,25, moderada para valores entre 0,25 y 0,75 y débil para valores superiores a 0,75. Por lo tanto, en el Sitio 1 los rendimientos presentaron fuerte estructura espacial mientras que en el Sitio 2 fue moderada con un rango de dependencia espacial de 113 m y se ajustó a un modelo cuadrático.

La cota presentó fuerte estructura espacial en el Sitio 1 ajustándose un modelo cuadrático y la amplitud entre valores máximos y mínimos fue de 4,9 m (Tabla 4). En cambio, en el Sitio 2, los valores extremos de la cota difirieron en 2,3 m y la dependencia espacial fue moderada según el criterio utilizado (Cambardella *et al.*, 1994). La cota explicó el 56% (P < 0,001) de la variabilidad en la CAD en el Sitio 1 y el 41% del Sitio 2 (P < 0,001).

La amplitud entre valores máximos y mínimos del contenido de arena fue de 40,6% en el Sitio 1 y 30,2% en el Sitio 2. En ambos sitios se observó moderada estructura espacial de estos resultados y se ajustó un modelo esférico en el Sitio 1 y cuadrático en el Sitio 2. Sin embargo, la cota permitió explicar el 56% de la variabilidad en el contenido de arena en el Sitio 1 y en el Sitio 2 solo el 38%. El contenido de arena explicó el 68% de la variabilidad de rendimientos en el Sitio 1 y el 70% en el Sitio 2.

El CO presentó débil a nula dependencia espacial a la escala analizada en este estudio y explicó el 48 y 51% (P < 0,001) de la variabilidad de rendimientos para los Sitios 1 y 2, respectivamente.

La CAD presentó estructura espacial moderada en el Sitio 1 y en el Sitio 2 se observó efecto nugget puro.

La variabilidad de rendimientos a escala de lote es el resultado de complejas interacciones entre topografía, atributos del suelo y prácticas de manejo. En estudios realizados en EE.UU. la topografía fue la mayor fuente de variabilidad asociada a rendimientos de maíz (Timlin *et al.*, 2001; Kravchenko & Bullock, 2000). Los datos topográficos obtenidos a partir de mediciones con equipos GPS de precisión son de fácil determinación en relación a otros atributos de suelo resultando de interés en la tecnología MSE. Sin embargo, la relación entre topografía y rendimiento es dependiente del año y variabilidad del lote debido a la interacción con las condiciones ambientales durante la estación de crecimiento del cultivo (Kravchenko & Bullock, 2000).

### Asociación entre atributos de suelo-paisaje y rendimientos de maíz

La CAD presentó asociación con los rendimientos de maíz y permitió explicar el 62% (P < 0,001) de la variabilidad de los mismos en el Sitio 1 y el 69% (P < 0,001) en el Sitio 2 (Fig. 3). En el Sitio 1 las precipitaciones de siembra a madurez fisiológica del cultivo fueron de 443 mm y en el período comprendido entre los 15 días previos y posteriores a la floración fueron de 43 mm. La Figura 3 reflejaría el efecto del aporte de agua por ascenso freático en los rendimientos de los Hapludoles Énticos en un año de mar-

Tabla 4. Valores promedio, mínimo y máximo, y parámetros del semivariograma compuesto por efecto nugget), meseta, relación nugget/meseta y modelo ajustado para los atributos de suelo-paisaje, y rendimiento del cultivo.

Table 4. Mean, minimum and maximum values and semivariogram model including nugget, sill, nugget/sill ratio and model of soil and landscape attributes and grain yield.

Rendimiento maíz, atributos de suelo y paisaje	Media y desvío	Valor mínimo	Valor máximo	Rango (m)	Nugget	Meseta	Nugget/meseta	Modelo
<b>Sitio 1</b>								
Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	9,9 ± 2,8	5,4	14,5	120	0,3	6,2	0,1	Esférico
Cota (m)	92,9 ± 1,4	91,4	96,4	225	0,01	1,6	0,01	Cuadrático
Arena (%)	64,0 ± 10,7	40,4	80,9	135	40,9	116,0	0,4	Esférico
CO (g kg <sup>-1</sup> )	16,1 ± 6,9	5,6	29,4	208	0,4	0,5	0,8	Cuadrático
CAD (mm)	32,3 ± 11,8	23,4	57,1	160	40,5	125	0,3	Esférico
<b>Sitio 2</b>								
Rendimiento (t ha <sup>-1</sup> )	10,0 ± 1,9	5,5	13,3	113	3,5	5,3	0,7	Cuadrático
Cota (m)	88,2 ± 0,5	87,5	89,8	158	0,1	0,2	0,3	Cuadrática
Arena (%)	58,5 ± 8,4	42,8	73,0	141	49,9	71,8	0,7	Cuadrático
CO (g kg <sup>-1</sup> )	16,3 ± 5,1	5,3	27,6					Nugget
CAD (mm)	41,5 ± 7,7	26,2	58,6					Nugget



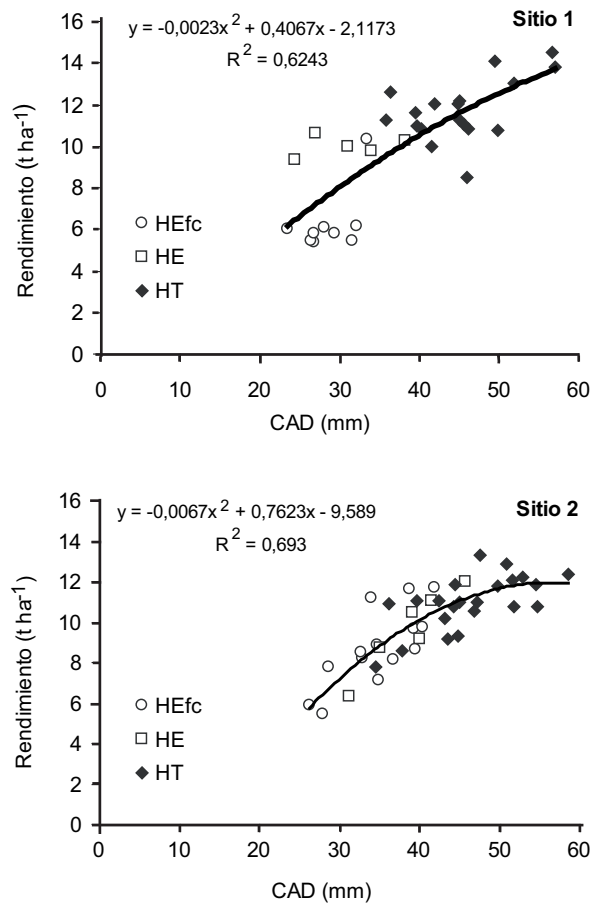


Figura 3. Relación entre rendimientos y CAD en los primeros 0,30 m de suelo para el Sitio 1 y el Sitio 2. HEfc: Hapludoles Énticos, fase convexa; HE: Hapludoles Énticos y HT: Hapludoles Típicos.

Figure 3. Relationship between yields and CAD in the upper 0,30 m of the soil for Site 1 and Site 2. HEfc: Entic Hapludolls, convex phase, HE: Entic Hapludolls and HT: Typic Hapludolls.

cado déficit hídrico. En suelos de la Pampa arenosa la recarga de agua proveniente de la freática es de gran importancia para maíz fundamentalmente en años secos (Nosetto *et al.*, 2009). Los resultados obtenidos por estos autores mostraron mayor número de espigas m<sup>-2</sup> y rendimiento de maíz en las posiciones de media loma con profundidad de la freática entre 1,6-1,8 m. En nuestros experimentos, para niveles similares de CAD, en los ambientes con predominio del Hapludol Éntico situados en la media loma y pie de loma (HE) los rendimientos fueron un 37% superiores a los de posiciones de loma convexa (HEfc).

En el segundo año de experimentación (Sitio 2) la oferta hídrica para el cultivo fue semejante a los valores medios históricos. Durante la estación de crecimiento 2004-05 las precipitaciones fueron de 805 mm corres-

pondiendo 167 mm para el período crítico de definición del rendimiento del maíz. Estas condiciones ambientales provocaron un incremento en los rendimientos de los Hapludoles Énticos, fase convexa impidiendo una diferenciación clara con los ubicados en posiciones de media loma y pie de loma (Fig.3). Esta condición de humedad, probablemente, haya limitado los rendimientos en los sectores de menor cota (Hapludoles Típicos).

A la variabilidad interanual de las precipitaciones se suma una mayor dispersión de los atributos del suelo en el Sitio 1 que en el Sitio 2 y se reflejan en los rendimientos promedio alcanzados para las tres unidades cartográficas segregadas en el mapa de suelos. El modelo de regresión lineal ajustado para ambos sitios permitió explicar el 64% de la variabilidad de rendimiento de maíz (Y) con el contenido de arena (A):

$$Y \text{ (t ha}^{-1}\text{)} = 21,5 - 0,189 A \text{ (\%)}$$

Ecuación 4

$$r^2 = 0,639 \text{ (} P < 0,001 \text{) } n=74$$

El ajuste entre valores de rendimiento observados y predichos por el modelo para ambos sitios no se apartó en gran medida de la recta 1:1 con  $r^2=0,64$  ( $P < 0,001$ ). Por lo tanto, una importante proporción de la variabilidad en los mapas de rendimiento de maíz se explicó mediante uno de los atributos de suelo estrechamente asociado a la disponibilidad de agua para los cultivos. Esta última depende de la variabilidad espacial de la capacidad de almacenamiento de agua y la interacción de efectos temporales de estrés que difieren entre crecimiento y desarrollo de los cultivos. En futuras investigaciones con un mayor número de lotes, la inclusión de las precipitaciones en modelos multivariados permitiría predecir con mayor exactitud la expectativa de rendimientos por ambientes (Kravchenko *et al.*, 2005).

## CONCLUSIONES

La implementación de la tecnología MSE depende en gran medida de la estrategia utilizada para discriminar ambientes con bajo costo. La variabilidad espacial en el contenido de arena del horizonte superficial se asoció estrechamente a los rendimientos del cultivo de maíz en los dos sitios evaluados. El mapa de suelos detallado y ajustado a partir de la información proveniente de monitores de rendimientos de varias campañas es una herramienta promisoría en la implementación de la tecnología MSE. En los suelos evaluados, el contenido de arena se asoció a la posición topográfica. Los relevamientos planialtimétricos utilizados como única herramienta son insuficientes para discriminar ambientes en tecnología MSE al no contemplar la variabilidad climática interanual y del aporte de agua proveniente de la capa freática. En este sentido la información generada por los mapas de rendimiento promedio de varias campañas sintetizan estas fuentes de variabilidad. La instalación de una red freaticométrica ayudaría a comprender la variabilidad de rendimientos debida al aporte de agua por ascenso capilar.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los Ing. Agr. Guillermo Mangas y Enrique Angellotti y a LIAG Argentina S.A. por brindar todo su colaboración en la realización de los experimentos. El presente trabajo fue financiado por el UBACyT G103.

## BIBLIOGRAFÍA

- Buschiazzo, DE; HD Estelrich; SB Aimar; E Viglizzo & J Babirec. 2004. Soil texture and tree coverage influence on organic matter. *J. Range Manage.* 57: 511-516.
- Cambardella, CA; TB Moorman; JM Novak; TB Parkin; DL Karlen; RL Turco & AE Kanopka. 1994. Field scale variability in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 1501-1511.
- Damiano, F. 2008. Predicción del agua disponible en suelos pampeanos a través de funciones de pedotransferencia. Pp. 181-198. *En: MA Taboada & CA Álvarez (eds.). Fertilidad física de los suelos.* EFA. UBA. Buenos Aires, Argentina.
- Damiano, F & MA Taboada. 2000. Predicción del agua disponible usando funciones de edafotransferencia en suelos de la Región Pampeana. *Ciencia del Suelo* 18: 77-88.
- Díaz-Zorita, M; DE Buschiazzo & N Peineman. 1999. Soil organic matter and wheat productivity in the Semiarid Argentine Pampas. *Agron. J.* 91: 276-279.
- Di Pietro, L; L Marbán & V Richter. 1986. Variabilidad especial de parámetros físicos y químicos de un suelo de Pergamino. *Ciencia del Suelo* 4: 99-106.
- Gee, GW & JW Bauder. 1986. Particle-size analysis. Pp 383-411. *In: Black, CA et al. (eds.). Methods of Soil Analysis. Part 1.* Agron. ASA and SSSA, Madison WI.
- Giuffré, L; J Sierra; C Fumagalli & S Ratto. 1994. Variabilidad especial de fósforo en suelo y planta en un Argiudol típico bajo cultivo de maíz. *Rev. Facultad de Agronomía* 14: 1-8.
- Godwin, RJ; GA Wood; JC Taylor & SM Knight. 2003. Precision farming of cereal crops; a review of a six year experiment to develop management guidelines. *Biosystems Engineering* 84: 375-391.
- Grayson, RB & AW Western. 1998. Towards areal estimation of soil water content from point measurements: time and space stability of mean response. *Journal of Hydrology* 207: 68-82.
- Gregoret, MC; J Dardanelli; R Bongiovanni & M Díaz-Zorita. 2006. Modelo de respuesta sitio-específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un Haplustol. *Ciencia del Suelo* 24: 147-159.
- Gupta, SC & WE Larson. 1979. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter content, and bulk density. *Water Resour. Res.* 15: 1633-1635.
- INTA. 1989. Mapa de suelos de la Provincia de Buenos Aires. Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca. INTA. 525 pp.
- Isaaks, EH & RM Srivastava. 1989. An introduction to applied geostatistics. Oxford Univ. Press New York 561 pp.
- Kern, JS. 1995. Evaluation of soil water retention models based on basic soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59: 1134-1141.
- Khosla, R; K Fleming; JA Delgado; TM Shaver & DG Westfall. 2002. Use of site-specific management zones to improve nitrogen management for precision agriculture. *J. Soil Water Conserv.* 57: 513-518.
- Klute, A. 1986. Water retention: laboratory methods. Pp 635-662. *In: Klute, A (ed.). Methods of Soil Analysis, Part 1 Agron.* ASA and SSSA, Madison, WI.
- Kravchenko, A & DG Bullock. 1999. A comparative study of interpolation methods for mapping soil properties. *Agronomy J.* 91: 393-400.

- Kravchenko, A & DG Bullock. 2000. Correlation of corn and soybean grain yield with topography and soil properties. *Agronomy J.* 92: 75-83.
- Kravchenko, AN; GP Robertson; KD Thelen & RR Harwood. 2005. Management, topographical and weather effects on spatial variability of crop grain yields. *Agronomy J.* 97: 514-523.
- Moore, ID; PE Gessler; GA Nielsen & GA Peterson. 1993. Soil attribute prediction using terrain analysis. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57: 443-452.
- Niborski, M; S Urricariet; G Sznajder; M Amado & H Rosatto. 2004. Variabilidad de la humedad del suelo, contenidos de arena, y materia orgánica y su asociación con rendimiento de cultivos. Pp 117-124. En: Navone, S; HG Rosatto & F Vilella F (eds.) Teledetección aplicada a la problemática ambiental. CIATE-FAUBA. EFA, Buenos Aires.
- Nosetto, MD; EG Jobbágy, RB Jackson and GA Sznajder. 2009. Reciprocal influence of crops and shallow ground water in sandy landscapes of the Inland Pampas. *Field Crops Research* 113: 138-148.
- Pachepsky, YA; DJ Timlin & WJ Rawls. 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1787-1795.
- Page, AL; RH Miller & DR Keeney. 1982. Methods of Soil Analysis. Soil Sci. Soc. Amer. Madison, WI, USA. 1159 pp.
- Pachepsky, YA; DJ Timlin & WJ Rawls. 2001. Soil water retention as related to topographic variables. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 65: 1787-1795.
- Presutti, M; H Rosatto; M Amado; G Botta & S Urricariet. 2004. Evaluación de la calidad de un Modelo Digital de Elevación (DEM) a partir del error cuadrático medio de su componente altitudinal en parcelas pequeñas. CD-R XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Paraná, Entre Ríos.
- Pennock DJ & E de Jong. 1990. Spatial pattern of soil redistribution in boroll landscapes, Saskatchewan, Canadá. *Soil Sci.* 150: 867-873.
- Quiroga, A; B Lajarraga; R Fernández & D Funaro. 2005. Aspectos del manejo del agua en sistemas mixtos de la región semiárida y subhúmeda pampeana. INTA E.E.A. Gral. Villegas. Indicadores de calidad física de suelos. Boletín Técnico 4: 19-26.
- Rawls, WJ. 1983. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. *Soil Science* 135: 123-125.
- Rawls, WJ; DL Brakensiek & KE Saxton. 1982. Estimation of soil water properties. *Trans. ASAE* 108: 1316-1320.
- Rawls, WJ & Brakensiek. 1989. Estimation in soil water retention and hydraulic properties. Pp 275-300. In: Morel, D (ed.) Unsaturated flow in hydrologic flow in hydrologic modeling. Theory and practice. Kluwer.
- Rawls, WJ; YA Pachepsky; JC Ritchie; TM Sobecki & H Bloodworth. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma* 116: 61-76.
- Rosatto, H; S Urricariet; M Presutti; M Amado; G Botta; M Tourn & M Niborski. 2005. Validación altimétrica de un DEM generado a partir de la captura directa de datos fuente (386-391 pp). Barbosa, OA (eds.). Avances en Ingeniería Agrícola 2003-2005. Universidad Nacional de San Luis.
- Ruffo, ML; GA Bollero; DS Bullock & DG Bullock. 2006. Site-specific production functions for variable rate corn nitrogen fertilization. *Prec. Agric.* 7: 327-342.
- Sadler, EJ; WJ Busscher; PJ Bauer & DKarlen. 1998. Spatial scale requirements for precision farming: a case study in the southeastern USA. *Agron. J.* 90: 191-197.
- Surface Mapping System. 1999. Surfer v.7.0. Golden Software, Inc. Golden, Colorado.
- Tecnisuelo S.R.L. 1991. Reconocimiento de suelos y aptitud de las tierras del establecimiento Las Balas. Bases para la planificación de su uso y manejo. Leandro N. Alem. Provincia de Buenos Aires. Liag Argentina S.A. Informe técnico 60 pp.
- Tietje, O & V Hennings. 1996. Accuracy of saturated hydraulic conductivity prediction by pedo-transfer functions compared to the variability within FAO textural classes. *Geoderma* 69: 71-84.
- Timlin, D; Y Pachepsky; C Walthall & S Loechel. 2001. The use of water budget model and yield maps to characterize water availability in a landscape. *Soil & Tillage Research* 58: 219-231.
- Urricariet, S & MM Zubillaga. 2007. Alcances y perspectivas el manejo sitio-específico de la fertilización. Pp 161-181. En: Prystupa, P (ed.). Tecnología de la fertilización de cultivos extensivos en la Región Pampeana. EFA. FAUBA. Buenos Aires, Argentina.
- Viglizzo, EF; EG Jobbágy; L Carreño; FC Frank; R Aragón; L De Oro & V Salvador. 2009. The dynamics of cultivation and floods in arable land of Central Argentina. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 13: 491-502.
- Wright, RJ; DG Boyer; MM Winant & HD Perry. 1990. The influence of soil factors on yield differences among landscape position in an Appalachian cornfield. *Soil Sci.* 149: 375-382
- Zubillaga, MM; J Barros; P Cipriotti & J Pastori. 2005. Variación espacial del N mineralizado a nivel lote en Vedia. Actas VIII Congreso Nacional de Maíz. Rosario (Argentina). 150-153.
- Zubillaga, MM & S Urricariet. 2007. Caracterización de la variabilidad en la fertilidad de los suelos según la tecnología de fertilización. Pp 119-133. En: Prystupa, P (ed.). Tecnología de la fertilización de cultivos extensivos en la Región Pampeana. EFA. FAUBA. Buenos Aires, Argentina.