

VARIABILIDAD ESPACIAL DE PROPIEDADES DEL SUELO: EFECTO DEL USO Y TIPO

ESTEBAN ARIEL CIARLO^{1,*}, MARÍA DEL PILAR MUSCHIETTI¹, NAHUEL PERALTA²,
MATÍAS COMPARÍN, FERNANDO GREGORINI¹, PABLO ARIEL CIPRIOTTI¹, LIDIA GIUFFRÉ¹

Recibido: 12/8/2020

Recibido con revisiones: 8/9/2020

Aceptado: 9/9/2020

RESUMEN

La variabilidad espacial del suelo puede ser alterada por prácticas agrícolas. La comprensión de la estructura espacial y la variabilidad de las propiedades del suelo es vital para implementar prácticas agrícolas sostenibles. El objetivo de este trabajo fue evaluar la variabilidad espacial de propiedades relevantes del suelo a escala de campo, bajo diferentes usos del suelo (pastizales frente a cultivos), en tipos de suelos contrastantes ubicados en la región pampeana de Argentina. En cada sitio se ubicaron dos lotes adyacentes con suelos bajo uso diferente. En cada lote, se recogieron muestras de suelo superficial (0-20 cm) de una cuadrícula regular con 100 puntos. Se realizaron análisis descriptivos, multivariados y geoestadísticos de algunas propiedades del suelo. El pH tuvo una baja variabilidad espacial a cortas distancias, mientras que el P extraíble del suelo tuvo la mayor variabilidad (CV = 47-84%). El contenido de carbono orgánico en el suelo (COS) y la distribución del tamaño de las partículas mostraron un coeficiente de variación constante, independientemente del tipo de suelo o el uso de la tierra. El cultivo continuo tendió a aumentar la variabilidad del P extraíble del suelo y de la resistencia a la penetración. El contenido de COS mostró autocorrelación espacial significativa en la mayoría de los sitios. Se propone una distancia promedio de 70 m cuando el propósito del muestreo es obtener submuestras de suelo independientes. Estos resultados tienen implicaciones para el manejo del cultivo específico del sitio, ya que pueden ayudar en la optimización del muestreo del suelo.

Palabras clave: autocorrelación, molisoles, geoestadística, muestreo

SPATIAL VARIABILITY OF SOIL PROPERTIES: EFFECT OF LAND USE AND TYPE

ABSTRACT

Soil spatial variability can be altered by agricultural practices. The understanding of the spatial structure and variability of soil properties is vital for implementing sustainable agricultural practices. This work aimed to assess the spatial variability of relevant soil properties at field scale under different land use (grassland vs. cropping) in contrasting soil types located in the Pampas region of Argentina. Two adjacent fields with different land use were located in two different soils. In each field, surface soil samples (0-20 cm) were collected from a regular grid with 100 points. Descriptive, multivariate and geostatistical analyses were performed on soil descriptors. pH showed a low short-range (0-17 m) spatial variability, while soil extractable P had the greatest variability (CV= 47-84%). Soil organic carbon (SOC) content and particle size distribution showed a steady coefficient of variation, regardless the soil type or land use. Continuous cropping tended to increase the variability of soil extractable P and penetration resistance. SOC showed a significant spatial autocorrelation in most sites. An average distance of 70 m is proposed when the sampling purpose is to obtain independent soil sub-samples. These results have implications for site-specific crop management, since they can assist in soil sampling optimization.

Key words: Autocorrelation, mollisols, geostatistics, sampling

1 Facultad de Agronomía. UBA

2 Monsanto Argentina

* Autor de contacto: ciarlo@agro.uba.ar

INTRODUCCIÓN

Una gran proporción de la variabilidad del rendimiento de los cultivos puede explicarse por la variabilidad espacial en las propiedades del suelo (Bramley, 2009). Su variabilidad depende de la escala de análisis, ya que está impulsada por la acción de los factores de formación en un continuo de escalas espaciales y temporales, lo que da como resultado estructuras de variación anidadas (Trangmar *et al.*, 1985). La variabilidad espacial del suelo puede ser alterada por perturbaciones naturales y antropogénicas, especialmente por prácticas agrícolas (Fraterrigo & Rusak, 2008). Algunas variables como los contenidos de nitrógeno (N) y fósforo (P) disponibles a menudo muestran un alto grado de variabilidad, mientras que otras propiedades más relacionadas con factores de formación más uniformes, como el pH, generalmente muestran una dispersión espacial más estrecha (Fu *et al.*, 2013; Bogunovic *et al.*, 2014; Reza *et al.*, 2017). El material parental y el uso del suelo tienden a ser factores constantes a escala de campo, mientras que las propiedades del suelo afectadas por procesos continuos suelen ser más variables a escala de campo y están básicamente afectadas por la erosión del agua (Van den Bygaart *et al.*, 2012), o por diferencias en la humedad del suelo asociada con la topografía (Peralta *et al.*, 2013).

Con frecuencia, se suele usar información a escala intermedia, obtenida a distancias entre 100 y 10000 m, en ciencias del suelo y ambientales para respaldar la toma de decisiones de políticas importantes con respecto al diagnóstico, monitoreo y predicciones ambientales a escalas mucho menores (Pachepsky & Hill, 2017). No obstante, la variación a escala mayor (<100 m) de las propiedades del suelo es compleja y difícil de abordar debido a la gran cantidad de procesos generadores de heterogeneidad que están involucrados. La variabilidad espacial de propiedades físicas y químicas del suelo a escala de campo ha sido caracterizada en investigaciones anteriores (Bogunovic *et al.*, 2014; Reza *et al.*, 2017). Sin embargo, solo unos pocos estudios han evaluado el patrón de dicha distribución espacial en diferentes propiedades del suelo, específicamente en suelos templados derivados de loess (Bravo

et al., 2004; Zubillaga *et al.*, 2006; Alesso *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2013).

La variación espacial de las propiedades clave del suelo, como el contenido del carbono orgánico (COS), contenido de P extraíble, pH y conductividad eléctrica (CE) a escala de campo, está fuertemente influenciada por las diferencias en el uso del suelo, sistema de labranza y otras prácticas agrícolas como la aplicación de fertilizantes o enmiendas orgánicas (Hu *et al.*, 2014). El modelado de la distribución espacial de una propiedad del suelo dada permite estimar la distancia a la cual las muestras de suelo son independientes; esta información se puede utilizar para mejorar el muestreo de suelo para la agricultura convencional o de precisión. Sin embargo, solo unos pocos estudios han evaluado el efecto del uso del suelo en la distribución espacial de las propiedades físicas y químicas en diferentes tipos de suelo (Peralta & Costa, 2013; Peralta *et al.*, 2015a). Las prácticas agrícolas no solo afectan qué propiedades del suelo están correlacionadas espacialmente y el grado de esta correlación, sino también el rango en el que se encuentra dicha correlación espacial (Peuckert *et al.*, 2016). Sin embargo, todavía faltan estudios de investigación que consideren la variabilidad espacial de los suelos bajo diferentes usos, especialmente a largo plazo, y que permitan lidiar con la variabilidad espacial del suelo para mejorar los rendimientos de los cultivos a escala de campo en Argentina (Peralta *et al.*, 2015 a, b).

El objetivo de este trabajo fue evaluar la variabilidad espacial de propiedades químicas y físicas del suelo relevantes a escala de campo bajo diferentes usos de la tierra (pastizales, PA vs. cultivos continuos, CC) en diferentes tipos de suelos de la región pampeana (Argiudoles vs. Hapludoles) (Soil Survey Staff, 2014), hipotetizándose que la variabilidad espacial general de propiedades del suelo se ve afectada por el uso del mismo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización de los sitios

Este estudio se realizó en dos sitios. El primero de ellos está ubicado en la localidad de Chivilcoy, en la subregión de la Pampa Ondulada (35° 02' 13,1'' S, 59° 54' 48,9'' O), y el segundo

en la localidad de Junín, en la subregión de la Pampa arenosa interior ($34^{\circ} 30' 14,7''$ S, $60^{\circ} 45' 10,3''$ O) (Figura 1). El suelo en Chivilcoy es un Argiudol típico mientras que el de Junín fue clasificado como Hapludol típico (Soil Survey Staff, 2014). Los sitios se encuentran a 130 km de distancia, con condiciones climáticas similares, bajo las mismas líneas isopluviales. El clima se caracteriza por ser templado húmedo, con una temperatura media anual de $16,8^{\circ}$ C y una precipitación media anual de 1000 mm.

En cada sitio, se ubicaron dos lotes adyacentes con el mismo tipo de suelo y la misma posición topográfica, pero bajo un uso de suelo diferente: cultivo continuo (CC) y pastizal (PA). Los campos bajo uso de CC y PA comprendieron un área de 10

y 13 ha en Chivilcoy, y de 20 y 35 ha en Junín, respectivamente. Los suelos se caracterizaron por la composición del tamaño de partículas primarias (Bouyoucos, 1962). En cada sitio, los lotes con diferentes usos presentaron una composición textural similar, lo que sugiere que las diferencias entre los lotes se pueden atribuir al uso del suelo (Eclesia *et al.* 2012). Esta selección también fue apoyada por la interpretación del mapa de suelos (escala 1: 50.000) a nivel de campo (GeoINTA, 2014).

Diseño de muestreo y uso agrícola

El diseño de muestreo en cada lote consistió en una cuadrícula regular georreferenciada con un total de 100 puntos ubicados en una equidistancia de 17 x 17 m. La distancia de mues-

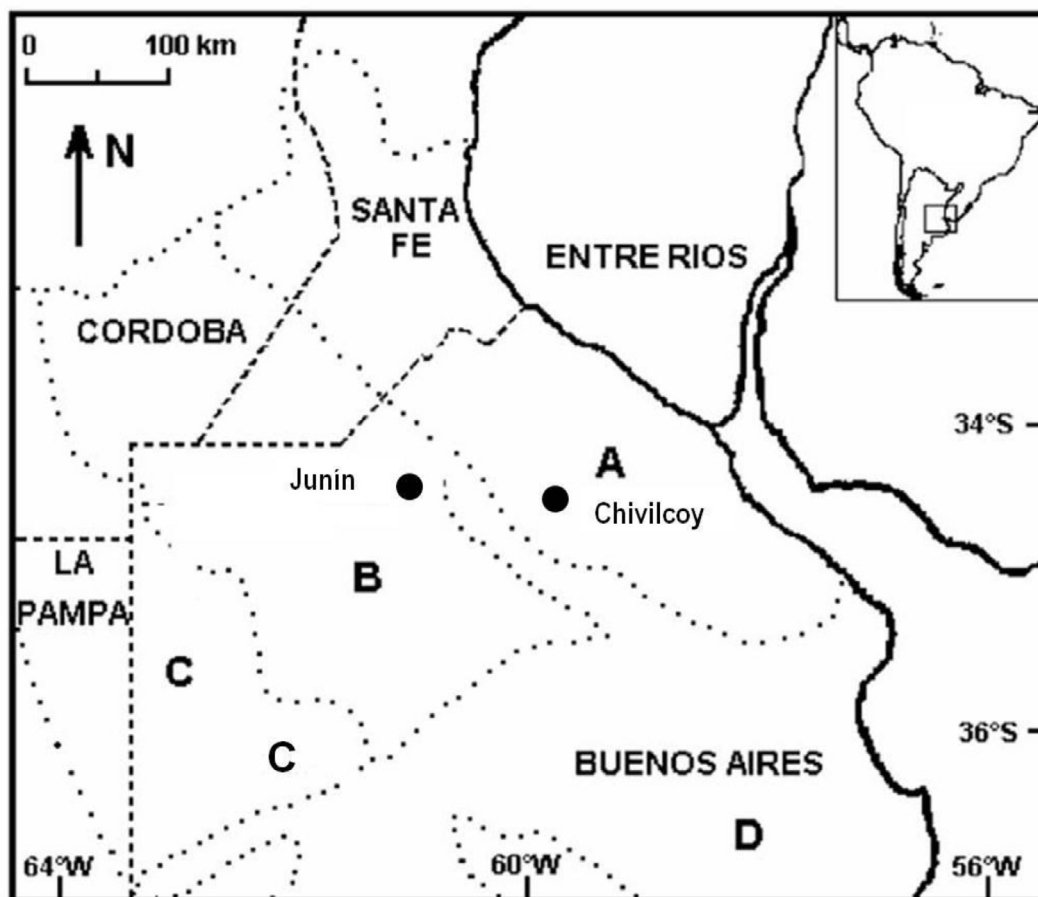


Figura 1. Ubicación de los dos sitios de la Región Pampeana. Las líneas punteadas (•••) indican límites entre las áreas de la Región Pampeana. A: Pampa ondulada; B: Pampa arenosa interior; C: Pampa interior occidental; D: Pampa Deprimida. Las líneas discontinuas (---) indican límites provinciales (Adaptado de León, 1992).

Figure 1. Location of the two sites in the Pampas Region. Dotted lines (•••) indicate limits between Pampas Region areas. A: Rolling Pampas; B: Inland sandy Pampas; C: Inland Western Pampas; D: Flooding Pampas. Dashed lines (---) indicate provincial limits (Adapted from León, 1992).

treo se basó en un estudio previo que encontró una baja correlación espacial de varios atributos físicos y químicos en una equidistancia de 25 x 25 m (Alesso *et al.*, 2012). En ambos sitios, los suelos bajo uso de PA no tenían antecedentes de manejo agrícola, durante, al menos, los últimos veinte años. Los suelos bajo uso de PA estaban dominados por especies herbáceas nativas y naturalizadas. Los suelos bajo CC en ambos sitios presentaron más de 10 años bajo el sistema de siembra directa. En todos los sitios bajo CC, la soja (*Glycine max* L.) fue el cultivo previo al muestreo del suelo. Al momento del muestreo, los suelos bajo uso de PA presentaron una cobertura vegetal del 75% en Chivilcoy y del 85% en el sitio de Junín.

Mediciones en suelo

El muestreo de los suelos se realizó durante el período de barbecho de los lotes agrícolas, en un promedio de 30 días después de la cosecha de soja. Se extrajeron cien muestras compuestas de suelo en cada lote, a una profundidad de 0-20 cm, utilizando un barreno helicoidal, en cada punto de intercepción de la grilla. Todas las muestras de suelo se homogeneizaron, se tamizaron y se secaron al aire antes del análisis en el laboratorio. Los analitos determinados fueron carbono orgánico (COS) por el método de Walkley-Black modificado (Nelson & Sommers, 1996); fósforo extraíble por Bray & Kurtz 1 (P ext) (Kuo, 1996); pH en relación suelo: agua 1: 2,5 (Thomas, 1996); conductividad eléctrica (CE) (Rhoades, 1996). La resistencia a la penetración (RP) se midió utilizando un penetrómetro de impacto: el cono tiene un radio de 1,25 cm, una longitud de 5,1 cm y pesa 2 kg.

Análisis descriptivos y multivariados

Se realizó estadística descriptiva para todas las variables de suelo medidas. La variabilidad de las propiedades del suelo se clasificó según el coeficiente de variación (CV). Se realizó un análisis de varianza multivariado (MANOVA) para determinar el efecto del uso de la tierra en las propiedades del suelo. Se usó el conjunto de datos completo como variables explicativas utilizan-

do los criterios de Wilks, Lowley-Hotelling, Roy y Pillai-Bartlett (Sheehan-Holt, 1998). Se realizó un análisis discriminante lineal para detectar las variables que mejor discriminan las diferencias en las propiedades del suelo atribuidas al uso.

Análisis geoestadístico

El índice de Moran (IM), o coeficiente de auto correlación espacial, es una estadística global que considera los valores de todas las observaciones, sugiriendo la existencia de agrupaciones espaciales (Córdoba *et al.*, 2013), por lo cual es un índice útil para estudiar la variabilidad espacial del suelo a diferentes escalas (Fu *et al.*, 2016). Se calcularon los IM para cada variable en cada sitio y uso de suelo. Los valores de IM varían de -1 a 1; un valor cercano a 1 indica una auto correlación positiva alta, mientras que los valores cercanos a -1 indican auto correlación negativa alta, mientras que un valor de cero significa que no hay un patrón espacial o que las observaciones se distribuyen aleatoriamente en el espacio.

El análisis de la auto correlación espacial a través del IM se complementó con la exploración de semivariogramas experimentales. El semivariograma se obtuvo del cálculo de la semivarianza en función de la distancia (Webster & Oliver, 2007). Como regla general, en presencia de una estructura espacial, la semivarianza aumenta con la distancia a un valor denominado "umbral" (C1). La distancia en la cual la diferencia entre el variograma y el umbral se vuelve insignificante se conoce como "rango" (a) y denota la distancia entre las observaciones a las cuales existe la dependencia espacial. La semivarianza en el origen, que no se explica por el modelo o no se puede detectar en una escala de muestreo dada, se conoce como "efecto nugget" (C0) (Webster & Oliver, 2007). Para el presente estudio, las variaciones de primer orden se descartaron mediante el análisis y la eliminación de tendencias. Los semivariogramas se exploraron en una distancia activa correspondiente al 70-90% de la distancia de muestreo máxima. Los semivariogramas empíricos se estimaron como isotrópicos, ya que el número de puntos para explorar adecuadamente la anisotropía fue limitante. Se ex-

ploraron varias funciones de semivariogramas para seleccionar el modelo a través del método de mínimos cuadrados utilizando el software Variowin. La relación nugget: umbral ($C0 / (C0 + C1)$) se usa para clasificar el grado de dependencia espacial de las propiedades del suelo; relación nugget:umbral $< 0,25$ denota una fuerte dependencia espacial; entre $0,25$ y $0,75$ indica dependencia espacial moderada; y $> 0,75$ indica una débil dependencia espacial (Cambardella *et al.*, 1994).

Método predictivo (kriging)

Cuando se detectó correlación espacial, se ajustó un modelo de semivariograma teórico para obtener una función que caracterice la continuidad espacial de la variable regionalizada y, por lo tanto, para predecir los valores de la variable en sitios no muestreados mediante una técnica de interpolación apropiada. El semivariograma ajustado se incorporó en el modelo estadístico global para mejorar el poder predictivo del modelo. La tendencia del modelo y los parámetros de auto correlación se volvieron a estimar mediante el método de máxima verosimilitud restringida (REML) (Zuur *et al.*, 2009).

RESULTADOS

Variabilidad de Suelos

El contenido medio de las fracciones de tamaño de partícula difirió entre los sitios, mientras que su CV fue de bajo a moderado y similar entre sitios (**Tabla 1**). Se encontró que el porcentaje de arcilla del suelo fue la propiedad con más variabilidad dentro de las fracciones consideradas, independientemente del uso y/o del tipo de suelo (**Tabla 1**).

Los suelos de pastizal mostraron valores de pH y CE más altos que los suelos bajo CC en Junín (**Figura 2a y b**), mientras que el uso de CC disminuyó el contenido de P extraíble en Chivilcoy (**Figura 2c**). Además, el CC redujo el COS (**Figura d**) y la RP a 0-5 (**Figura 2e**) y 5-10 cm de profundidad (**Figura 2f**) en ambos sitios.

La variabilidad del suelo fue baja para el pH ($CV < 6\%$) y moderada para el COS ($CV 25-29\%$) independientemente del uso o del tipo de suelo (**Figura 3**). El P extraíble presentó alta variabilidad ($CV > 47\%$), especialmente bajo CC. La CE mostró una variabilidad moderada en la mayoría de los casos analizados, excepto en los suelos de Chivilcoy de pastizal, donde presentaron una alta variabilidad. La variabilidad de la RP del sue-

Tabla 1. Estadísticas descriptivas para la composición del tamaño de partícula en suelos de Chivilcoy y Junín bajo diferentes usos. CC: cultivo continuo; PA: pastizal; SD: desviación estándar; CV = coeficiente de variación.

Table 1. Descriptive statistics for particle size composition at Chivilcoy and Junín soils under different land uses. CC: continuous cropping; PA: grassland; SD: standard deviation; CV = coefficient of variation.

Fración	Sitio	Uso	n	Media \pm SD	CV (%)
Arena (%)	Chivilcoy	CC	99	30,6 \pm 4,5	14,6
	Chivilcoy	PA	100	31,5 \pm 5,1	16,1
	Junín	CC	93	42,9 \pm 5,3	12,3
	Junín	PA	99	44,7 \pm 6,21	13,9
Limo (%)	Chivilcoy	CC	99	47,7 \pm 4,6	9,7
	Chivilcoy	PA	100	49,3 \pm 4,2	8,3
	Junín	CC	93	41,1 \pm 4,2	10,2
	Junín	PA	99	39,4 \pm 4,53	11,5
Arcilla (%)	Chivilcoy	CC	99	21,6 \pm 3,5	16,2
	Chivilcoy	PA	100	19,2 \pm 3,4	19,8
	Junín	CC	93	16 \pm 3,2	19,9
	Junín	PA	99	15,9 \pm 3,31	20,8

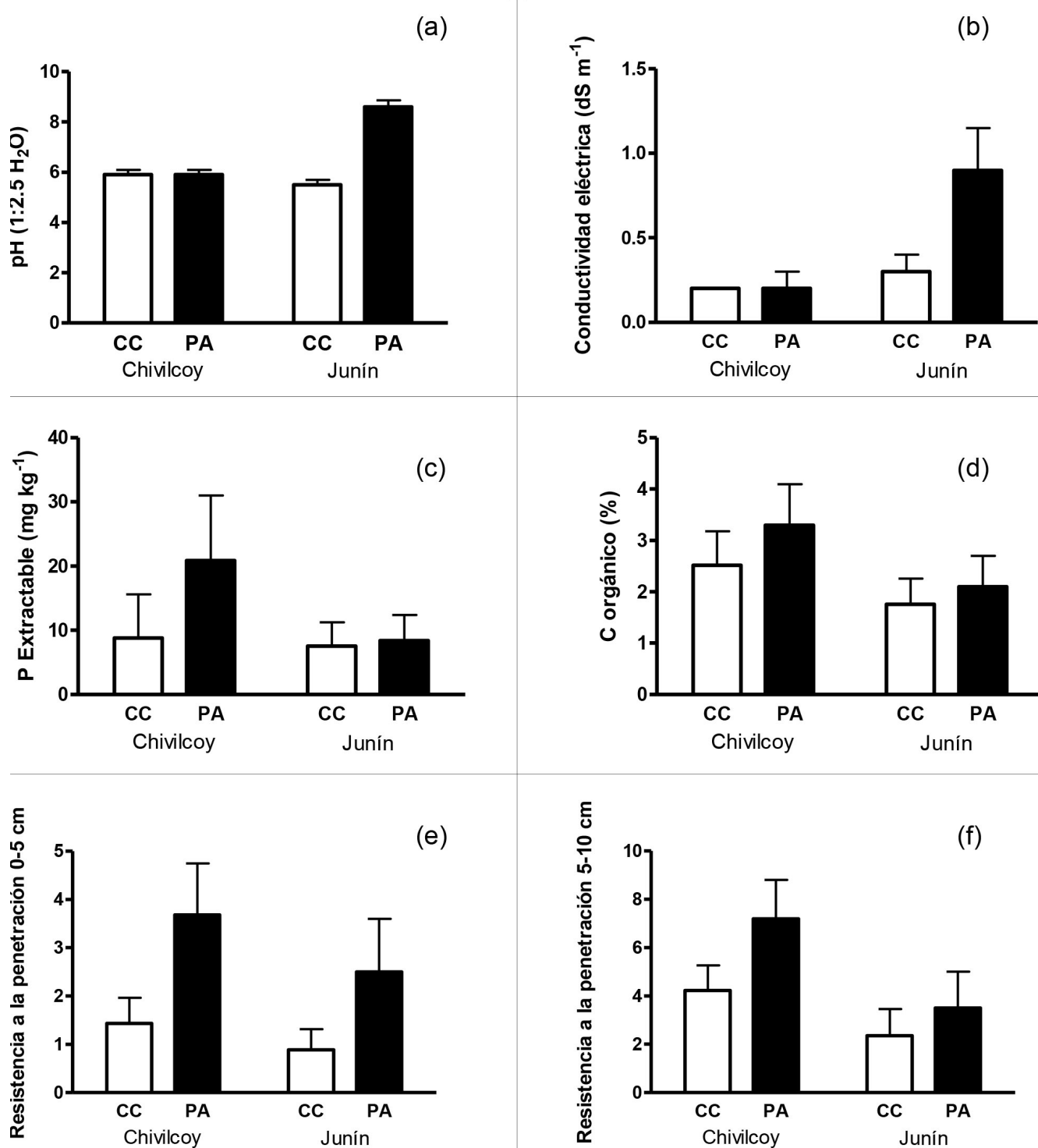


Figura 2. Propiedades del suelo en Chivilcoy y Junín bajo cultivo continuo (CC) y pastizal (PA). pH del suelo (a), CE=conductividad eléctrica (b), P extraíble (c), C orgánico COS (d), RP = resistencia a la penetración a 0-5 cm de profundidad (e) y RP a 5-10 cm de profundidad (f). Las barras de error representan la desviación estándar de la media.

Figure 2. Soil properties in Chivilcoy and Junín under continuous cropping (CC) and grassland (PA) use. Soil pH (a), CE=electrical conductivity (b), extractable P (c), organic C (d), RP= penetration resistance at 0-5 cm depth (e) and RP at 5-10 cm depth (f). Error bars represent the standard deviation of the mean.

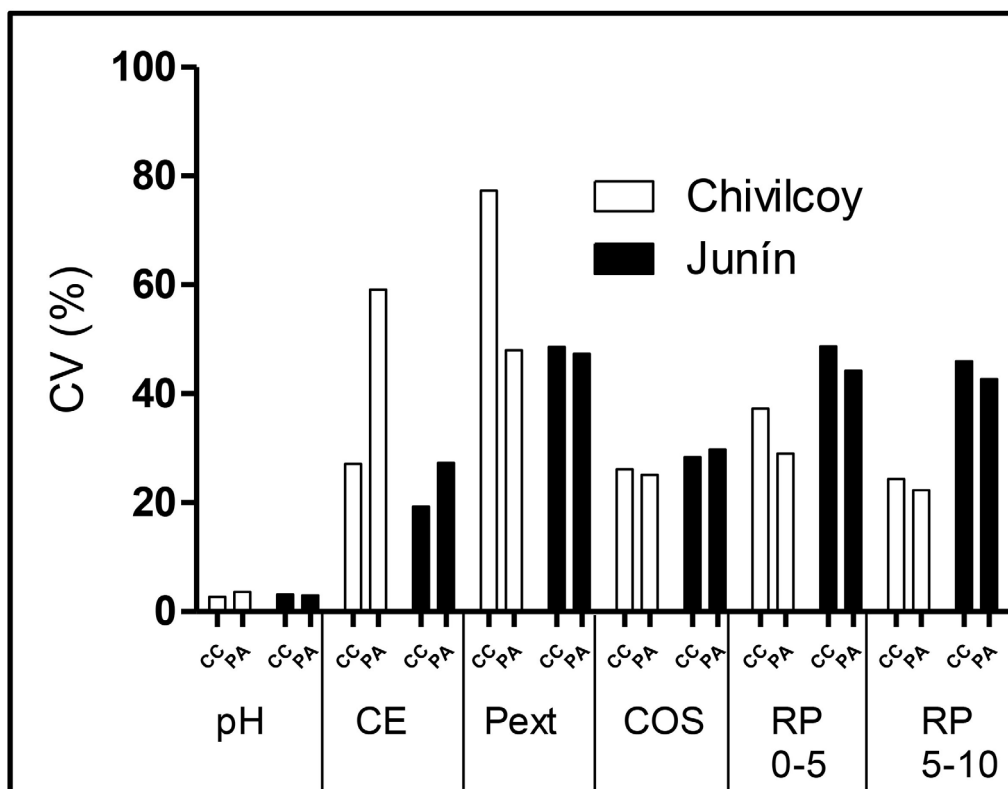


Figura 3. Coeficiente de variación (CV%) de las propiedades del suelo en los suelos de Chivilcoy y Junín bajo diferentes usos del suelo. CC: cultivo continuo; PA: pastizales; CE: conductividad eléctrica; P Ext: P extraíble; COS: C orgánico; RP 0-5 y RP 5-10: resistencia a la penetración a 0-5 cm y 5-10 cm de profundidad, respectivamente.

Figure 3. Coefficient of variation (CV %) of soil properties at Chivilcoy and Junín soils under different land use. CC: Continuous cropping; PA: grassland; CE: electrical conductivity; P Ext: extractable P; COS: organic C; RP 0-5 and RP 5-10: penetration resistance at 0-5 cm and 5-10 cm depth, respectively.

lo varió dependiendo del uso y/o del tipo de suelo. Sólo se observó para la RP 0-5 cm una variabilidad moderada en los suelos de PA en Chivilcoy. En el suelo de Chivilcoy, la variabilidad en RP 5-10 cm fue baja y moderada para los suelos con PA y CC, respectivamente (**Figura 3**).

Análisis Multivariado

Las propiedades del suelo en CC difirieron significativamente de las que estaban bajo uso de PA ($p < 0,0001$), independientemente del tipo de suelo y/o del criterio MANOVA probado (**Tabla 2**). La RP del suelo superficial (0-5

Tabla 2. Funciones canónicas y estandarizadas del análisis lineal discriminante.

Table 2. Canonic and stardadized functions of lineal discriminant analysis

Propiedad	Chivilcoy		Junín	
	Función Canónica	Función Estandarizada	Función Canónica	Función Estandarizada
pH	0,06	0,01	4,33	0,98
CE (dS m ⁻¹)	3,13	0,33	0,63	0,12
P ext (mg kg ⁻¹)	0,03	0,29	0,01	0,03
COS (%)	0,20	0,15	0,28	0,16
RP 0-5 cm (Mpa)	0,77	0,65	0,22	0,19
RP 5-10 cm (Mpa)	0,20	0,28	0,30	0,18

cm) fue la mejor propiedad discriminante con respecto al uso del suelo en Chivilcoy, mientras que en Junín, se encontró que el pH fue la propiedad que mejor discriminó los suelos bajo usos diferentes.

Índice de Moran

Las propiedades del suelo que mostraron correlación espacial a escala de lote fueron la CE, contenido de arcilla, COS, RP 5-10 cm, y P ex-

traíble, mientras que las propiedades restantes no mostraron autocorrelación espacial (**Tabla 3**).

Análisis de semivariogramas

Los semivariogramas fueron ajustados para aquellas propiedades del suelo que tenían estructura espacial de acuerdo con el cálculo del índice de Moran. Estos semivariogramas mostraron un efecto transitivo, lo que indica que la semivariancia aumentó con la distancia hasta que se es-

Tabla 3. Autocorrelación espacial en las propiedades del suelo usando el índice de Moran (MI). CE = conductividad eléctrica; P ext= fósforo extraíble; COS = carbono orgánico del suelo; RP = resistencia a la penetración; CC = cultivo continuo; PA = pastizales. Los valores en negrita son significativamente diferentes en $p < 0,05$, los valores en cursiva son significativamente diferentes en $p < 0,1$.

Table 3. Spatial autocorrelation in soil properties using Moran Index (MI). CE=electrical conductivity; P ext= extractable phosphorus; COS=organic carbon; RP= penetration resistance; CC=continuous cropping; PA=grassland. The bold values are significantly different in $p < 0,05$, italic values are significantly different in $p < 0,1$.

Propiedad	Tipo de suelo – Uso del Suelo							
	Chivilcoy-CC		Chivilcoy-PA		Junín-CC		Junín-PA	
	IM	p-value	IM	p-value	IM	p-value	IM	p-value
pH	<i>0,16</i>	0,09	-0,04	0,45	0,07	0,21	0,021	0,32
CE (dS m ⁻¹)	0,00	0,42	0,01	0,24	0,03	0,32	0,34	0,00
P Ext (mg kg ⁻¹)	0,25	0,01	0,3	0,00	0,12	0,47	0,09	0,13
Arena (%)	-0,07	0,27	0,01	0,42	0,00	0,47	0,09	0,13
Limo (%)	-0,12	0,13	-0,05	0,27	0,04	0,22	0,02	0,31
Arcilla (%)	-0,07	0,28	0,09	0,25	0,27	0,00	0,14	0,03
COS (%)	0,17	0,02	-0,03	0,35	0,25	0,00	0,15	0,03
RP 0-5cm (Mpa)	0,13	0,13	0,06	0,14	0,05	0,21	0,05	0,34
RP 5-10cm (Mpa)	0,12	0,12	0,08	0,11	0,13	0,00	0,00	0,49

Tabla 4. Parámetros de los modelos geoestadísticos para las propiedades del suelo en los suelos de Chivilcoy y Junín bajo pastizales (PA) y cultivo continuo (CC). CE = conductividad eléctrica; P Ext= fósforo extraíble; COS = carbono orgánico; RP = resistencia a la penetración; C0= varianza no estructurada; C1= varianza estructurada.

Table 4. Parameters of the geostatistical models for soil properties at Chivilcoy and Junin soils under grassland (PA) and continuous cropping (CC). CE=electrical conductivity; P ext= extractable phosphorus; COS=organic carbon; RP= penetration resistance; C0=unstructured variance; C1= structured variance.

Propiedad	Sitio	Uso	Rango (m)	Nugget (C ₀)	Umbral (C ₀ +C ₁)	Nugget:umbral (C ₀ /(C ₀ +C ₁))*100	Dependencia Espacial
P Ext (mg kg ⁻¹)	Chivilcoy	PA	32,5	20,00	90,00	22,20	Fuerte
COS (%)	Junín	PA	62,7	0,18	0,40	45,00	Moderada
CE (dS m ⁻¹)	Junín	PA	39	0,016	0,05	34,80	Moderada
Arcilla (%)	Junín	PA	50,5	10,00	44,00	22,70	Fuerte
COS (%)	Chivilcoy	CC	28,8	0,2	0,45	44,4	Moderada
P Extraíble (mg kg ⁻¹)	Chivilcoy	CC	40	20	38	52,6	Moderada
COS (%)	Junín	CC	69,6	0,07	0,29	24,13	Fuerte
RP 5-10cm (Mpa)	Junín	CC	35	0,06	0,22	27,30	Moderada

tabilizó. En todos los casos, el modelo teórico que mejor se ajustó a los datos fue el esférico, que se usa comúnmente para modelar las propiedades del suelo (Peukert *et al.*, 2016). La relación nugget:umbral (**Tabla 4**) indicó una fuerte dependencia espacial para el contenido de arcilla del suelo, y moderada para el contenido de CE y COS bajo el uso de PA. Bajo el uso de CC, el contenido de COS del suelo tuvo una dependencia espacial moderada en Chivilcoy y fuerte en Junín, mientras que la RP del suelo a 0-5 cm de profundidad en Junín mostró una dependencia espacial moderada (**Tabla 4**). El contenido de P extraíble mostró estructura espacial en Chivilcoy, y la magnitud de la variabilidad espacial se relacionó con el uso del suelo. En cuanto a los valores de rango hallados, variaron entre 30 y 70 m (**Tabla 4**).

DISCUSIÓN

El uso del suelo pareció conducir a cambios significativos en propiedades relevantes del suelo relacionadas con la salud y la productividad (**Figura 2**). Sorprendentemente, el COS del suelo no fue la propiedad que mejor discriminó los suelos con diferentes usos. Esto significa que otras propiedades químicas o físicas pueden reflejar con mayor precisión el estado general del suelo y no deben descartarse como indicadores de la calidad del suelo.

La variabilidad de las propiedades en ambos tipos de suelo indicó que el pH, una propiedad que se ve fuertemente afectada por el material parental del suelo y las condiciones climáticas, presentó una baja variabilidad espacial a cortas distancias, mientras que el P extraíble del suelo mostró la mayor variabilidad (CV = 47-84%) independientemente del tipo de suelo y / o uso. Estos resultados están de acuerdo con otros estudios realizados en suelos de la Pampa Ondulada (Álvarez *et al.*, 2006; Alesso *et al.*, 2012). Otros estudios realizados en diferentes tipos y usos del suelo también identificaron una baja variabilidad en las propiedades del suelo como el pH y el COS, pero una mayor variabilidad para el N total y el P extraíble (CV > 35%) (Bogunovic *et al.*, 2014; Reza *et al.*, 2017).

El CC tendió a disminuir los contenidos de COS, con un efecto más marcado en el suelo de Chivilcoy, pero la variabilidad de COS se mantuvo similar entre ambos usos e incluso entre los tipos de suelo (CV = 25-30%, **Tabla 2**). Por su parte, el uso afectó el contenido de P extraíble en el suelo de Chivilcoy, mientras que no tuvo efecto en Junín, lo que refleja diferencias en la productividad vegetal y el historial de fertilización. Sin embargo, el CC aumentó la variabilidad de P extraíble del suelo en ambos sitios, probablemente como resultado de la fertilización localizada (en bandas), una mezcla limitada de fertilizantes en suelos bajo siembra directa (Mallarino *et al.*, 2007), y de la baja movilidad del P en la solución del suelo. El CC presentó valores medios y niveles de variabilidad más bajos de CE del suelo, con respecto al uso de PA en ambos sitios; esto se encuentra en línea con otros resultados obtenidos en ambientes de la Pampa Deprimida (González Arata, 2014; Abuamscha, 2015). Con respecto a la condición física del suelo, el uso de PA presentó la mayor RP en las capas de suelo de 0-5 cm y 5-10 cm, pero el uso de CC tuvo la mayor variación en RP en ambos tipos de suelo, especialmente en la capa de suelo más superficial. La creciente variabilidad de las condiciones físicas del suelo por el uso agrícola del suelo podría estar relacionada con el impacto de la maquinaria pesada comúnmente utilizada en los sistemas de siembra directa. En general, los suelos agrícolas presentan variabilidad en las propiedades físicas del suelo que reflejan un patrón repetitivo de huellas en el campo como resultado del tráfico de máquinas y las operaciones de labranza del suelo (Mallarino & Vitry, 2004).

El suelo en Junín presentó el mayor número de variables espacialmente autocorrelacionadas. El COS fue la propiedad que mostró una autocorrelación espacial positiva significativa en 3 de 4 de los lotes analizados. A pesar de mostrar la mayor variabilidad, el contenido de P extraíble presentó dependencia espacial en el suelo de Chivilcoy bajo ambos usos de la tierra (**Tablas 3 y 4**). En suelos de Junín, la correlación espacial para el COS fue moderada bajo el uso de PA pero fuerte bajo CC. Esto está en línea con los resultados de Gilliam y Dick (2010) en Hapludafes típicos

de West Virginia, EE. UU., quienes encontraron una mayor autocorrelación espacial en el contenido de MO, íntimamente ligada al COS, del suelo bajo CC que bajo suelos de PA, a pesar de que el lote de PA había estado bajo uso agrícola hace 20 años y luego abandonado en su uso. En los suelos de Chivilcoy, el CC mostró una dependencia espacial moderada para el contenido de COS que está de acuerdo con los resultados de Li *et al.* (2013) en experimentos realizados en suelos derivados de loess, en China. Las diferencias en la magnitud de la correlación espacial de COS entre los usos del suelo en ambos tipos de suelo podrían estar relacionadas con diferente historia agrícola, la cual puede ser el factor principal que afecta la variabilidad de la MO a nivel de lote (Yemefack *et al.*, 2005). Los grados más altos de autocorrelación espacial en COS bajo el uso de CC en ambos suelos pueden deberse al hecho de que la vegetación natural en el uso de PA, generalmente siguiendo un patrón irregular, genera variabilidad a escala muy fina (<2m), dependiendo de la estructura de la comunidad vegetal y composición (Xiong *et al.* 2016); el pastoreo directo en el pasado también puede reducir la correlación espacial de las variables del suelo, observado para el P extraíble (Fu *et al.*, 2013).

La dependencia espacial del P extraíble del suelo sólo se detectó con el uso de PA en el suelo de Chivilcoy. Este hecho probablemente esté relacionado con la distancia de muestreo utilizada en nuestro estudio (Mallarino & Vittry, 2004). La aplicación de fertilizantes fosforados en banda con máquinas de siembra puede haber resultado en una fuerte dependencia espacial en el rango de unos pocos metros, a una distancia menor que la utilizada entre las muestras de suelo y, por lo tanto, podría haber aumentado la variación llamada nugget, absorbida por la distancia de muestreo utilizada.

Identificar el rango en el que las propiedades del suelo exhiben autocorrelación espacial en una escala dada es esencial para definir la distancia de muestreo en futuros estudios en relación con el propósito del muestreo (Roel & Terra, 2006). En nuestro estudio, el rango de propiedades del suelo que mostró autocorrelación espacial varió entre 30 y 70 m. Por ello, se debería utilizar una

distancia promedio mayor de 70 m para asegurar submuestras de suelo independientes, como se requiere comúnmente para el muestreo compuesto para el diagnóstico de fertilidad del suelo. Investigaciones previas sobre la variabilidad espacial de propiedades del suelo en la Región Pampeana, informaron un rango óptimo de distancia de muestreo cercana a 50 m, para los niveles de P extraíble del suelo y potasio intercambiable (Alesso & Pilatti, 2008; Cruzate & Rivero, 2010) y para el N-nitrato residual del suelo después de una cosecha de maíz (Kirton, 2015). Según Kerry & Oliver (2004), una estimación para seleccionar la distancia futura para los muestreos de manejo sitio-específico es usar menos de la mitad del rango hallado en el semivariograma. Esto significaría una distancia de muestreo de 16-20 m en nuestro estudio para el P extraíble del suelo en el suelo Chivilcoy, que está cerca de la distancia de muestreo utilizada, de 17 m.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por fondos UBACyT (Proyecto ID 20020130100164BA) proporcionados por la Universidad de Buenos Aires.

BIBLIOGRAFÍA

- Abuamscha, MR. 2015. Variabilidad espacial de propiedades edáficas de relevancia en la producción agropecuaria: caracterización por uso en la Pampa Deprimida. Trabajo final de Intensificación para optar por el título de Ing. Agr. de la Facultad de Agronomía de la UBA. Buenos Aires, Argentina.
- Alesso, A & MA Pilatti. 2008. Variabilidad espacial de la densidad del suelo, fósforo extractable y potasio intercambiable. En Actas del XXI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Potrero de los Funes, San Luis.
- Alesso, CA; MA Pilatti; SC Imhoff, & M Grilli. 2012. Variabilidad espacial de atributos químicos y físicos en un suelo de la Pampa Llana Santafesina. Ciencia del Suelo 30: 85-93. Álvarez, R; H Steinbach; B Bauschen & JN Ejalbert. 2006. Variabilidad espacial de propiedades de los suelos de la pampa ondulada: efecto sobre el número de submuestras a tomar para el diagnóstico de la fertilidad. En Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Salta, Salta.
- Bogunovic, I; M Mesic; Z Zgorelec; J Aurisic & D. Bilandzija. 2014. Spatial variation of soil nutrients on sandy-loam soil. Soil Till Res 144: 174-183.

- Bouyoucos, GJ 1962. Hydrometer method improved for making particle size analysis of soils. *Agr J* 54: 464-465.
- Bramley, RGV. 2009. Lessons from nearly 20 years of Precision Agriculture research, development, and adoption as a guide to its appropriate application. *Crop Past Sci* 60: 197-217.
- Bravo, O; N Amiotti; JP Rohllauser & P Zalba. 2004. Variabilidad de suelos y su influencia en el rendimiento de trigo a nivel predio. En *Actas del XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Paraná, Entre Ríos.
- Cambardella, CA; TB Moorman; TB Parkin; DL Karlen; JM Novak; RF Turco & AE Konopka. 1994. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. *Soil Sci Soc Am J* 58: 1501-1511.
- Córdoba, M; C Bruno; JL Costa & M Balzarini. 2013. Sub-field management class delineation using cluster analysis from spatial principal components of soil variables. *Comput Electron Agr* 97: 6-14.
- Cruzate, G & E Rivero. 2010. Variabilidad espacial y temporal de P y Zn en siembra directa y la relación con algunas propiedades de un suelo en Paraná. En *Actas del XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Rosario, Santa Fe.
- Eclesia, RP; EG Jobbagy; RB Jackson; F Biganzoli & G Piñeiro. 2012. Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America. *Global Change Biol* 18: 3237-3251.
- Fraterrigo, JM & JA Rusak. 2008. Disturbance-driven changes in the variability of ecological patterns and processes. *Ecol Lett* 11: 756-770.
- Fu, W; K Zhao; P Jiang; Z Ye; H Tunney & C Zhang. 2013. Field-scale variability of soil test phosphorus and other nutrients in grasslands under long-term agricultural managements. *Soil Res* 51: 503-512.
- Fu, W; K Zhao; C Zhang; J Wu & H Tunney. 2016. Outlier identification of soil phosphorus and its implication for spatial structure modeling. *Precis Agric* 17: 121-135.
- GeoINTA. 2014. <http://geointa.inta.gov.ar/visor/> Último acceso: 7 agosto 2020
- Gilliam, FS & DA Dick. 2010. Spatial heterogeneity of soil nutrients and plant species in herb-dominated communities of contrasting land use. *Plant Ecol* 209: 83-94.
- González Arata, MP 2014. Variabilidad espacial de propiedades edáficas de relevancia en la producción agropecuaria. Caracterización por uso en la Pampa Deprimida. Trabajo final de Intensificación para optar por el título de Ing. Agr. de la Facultad de Agronomía de la UBA. Buenos Aires, Argentina.
- Hu, K; S Wang; H Li; F Huang & B Li. 2014. Spatial scaling effects on variability of soil organic matter and total nitrogen in suburban Beijing. *Geoderma* 226/227: 54-63.
- Kerry, R & MA Oliver. 2004. Average variograms to guide soil sampling. *Int J Appl Earth Obs* 5(4): 307-325.
- Kirton, T. 2015. Variabilidad especial del maíz y pérdidas potenciales debido a la lixiviación asociada con fertilizaciones nitrogenadas uniformes y sitio-específicas. Trabajo final de Intensificación para optar por el título de Ing Agr de la Facultad de Agronomía de la UBA. Buenos Aires, Argentina.
- Kuo, S. 1996. Phosphorus In: DL Sparks (Ed). *Methods of soil analysis. Part 3 Chemical methods*. SSSA and ASA. Madison, WI, USA, pp. 869-920.
- León, RJC. 1992. Geographic limits of the region, Geomorphology and geology, Regional subdivisions, Floristic aspects, Description of the vegetation. In: RT Coupland (Ed.). *Natural Grasslands: Introduction and Western Hemisphere* Elsevier, Amsterdam, pp.369-387.
- Li, M; X Zhang; Q Zhen & F Han. 2013. Spatial Analysis of Soil Organic Carbon in Zhifanggou Catchment of the Loess Plateau. *PLoS ONE* 9(1) 10.1371/annotation/c81daa7c-5375-4349-970b-c63d288947eb.
- Mallarino, AP & DJ Wittry. 2004. Efficacy of grid and zone soil sampling approaches for site specific assessment of phosphorus, potassium and organic matter. *Precis Agric* 5: 131-144.
- Mallarino, AP; DB Beegle & BC Joern. 2007. Soil sampling methods for phosphorus—Spatial concerns. A SERA-17 Position Paper. SERA-17— Organization to Minimize Phosphorus Losses in Agriculture.
- Nelson, DW & LE Sommers. 1982. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: AL Page (Ed). *Methods of Soil Analysis. Part 2*. American Society of Agronomy, Agronomy 9. Madison, WI, USA, pp. 539-579.
- Pachepsky, Y & R Hill. 2017. Scale and scaling in soils. *Geoderma* 287: 4-30.
- Peralta, NR & JL Costa. 2013. Delineation of management zones with soil apparent electrical conductivity to improve nutrient management. *Comput Electron Agr* 99: 218-226.
- Peralta, NR; P Barbieri; T Gowland; V Aparicio & JL Costa. 2015a. Precision agriculture: variable rate nitrogen in malting barley. *Ciencia del suelo* 33: 131-137.
- Peralta, NR; JL Costa; M Balzarini; M Castro Franco; M Córdoba & D Bullock. 2015b. Delineation of management zones to improve nitrogen management of wheat. *Comput Electron Agr* 110: 103-113.
- Peuckert, S; BA Griffith; PJ Murray; CJA Macleod & RA Brazier. 2016. Spatial variation in soil properties and diffuse losses between and within grassland fields with similar short-term management. *Eur J Soil Sci* 67: 386-396.
- Reza, SK; DC Nayak; S Mukhopadhyay; T Chattopadhyay & SK Singh. 2017. Characterizing spatial variability of soil properties in alluvial soils of India using geostatistics and

- geographical information system. *Arch Agron Soil Sci* 63(11): 1489-1498.
- Rhoades, JD. 1996. Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. In: DL Sparks (Eds), *Methods of Soil Analysis Part 3*, Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, 417-435.
- Roel, A & J Terra. 2006. Muestreo de suelos y factores limitantes del rendimiento. En: R Bongiovanni *et al.* (Eds). *Agricultura de Precisión: Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. Ed. Procisur/IICA. Montevideo, Uruguay, pp. 65-80.
- Sheehan-Holt, JK. 1998. MANOVA Simultaneous Test Procedures: The Power and Robustness of Restricted Multivariate Contrasts. *Educ Psychol Meas* 58: 861-881.
- Soil Survey Staff. 2014. *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.
- Thomas, GW. 1996. Soil pH and Soil Acidity. In: DL Sparks (Ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3*. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp: 475-490.
- Trangmar, BB; RS Yost & G Uehara. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv Agron* 38: 45-94.
- Van den Bygaart, A; E Gregorich & D Angers. 2003. Influence of agricultural management on soil organic carbon: a compendium and assessment of Canadian studies. *Can J Soil Sci* 83: 363-380.
- Webster, R & MA Oliver. 2007. *Geostatistics for environmental scientists*. Wiley. 2ed. 333 pp.
- Xiong, X; S Grunwald; R Corstanje; C Yuc & N Bliznyuk. 2016. Scale-dependent variability of soil organic carbon coupled to land use and land cover. *Soil Till Res* 160: 101-109.
- Yemefack, M; DG Rossiter & R Njomgang. 2005. Multi-scale characterization of soil variability within an agricultural landscape mosaic system in southern Cameroon. *Geoderma* 125: 117-143.
- Zubillaga, MM; M Carmona; A Latorre; M Falcon & MJ Barros. 2006. Estructura espacial de variables edáficas a nivel de lote en Vedia Provincia de Buenos Aires. En *Actas del XX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*. Salta, Salta.
- Zuur, AF; EN Ieno; N Walker; A Saveliev & GM Smith. 2009. *Mixed effects models and extensions in ecology with R*. Springer-Verlag New York; 574 pp. ISBN 978-0-387-87458-6.

