

Variabilidad espacial de la profundidad del suelo. Métodos de interpolación para el sudoeste bonaerense

FROLLA, F.D.; ZILIO, J.P.¹; KRUGER, H.¹

RESUMEN

La presencia de tosca es una de las principales limitantes de la producción agropecuaria del sudoeste bonaerense. La elaboración de mapas de profundidad de suelo resulta un paso previo a su manejo por ambientes. Se realizaron 199 observaciones, con sonda mecánica y en forma de malla semirígida, en un lote de 60 ha cercano a la localidad de San Germán (partido de Puán, provincia de Bs. As.). Los objetivos fueron: comparar la habilidad predictiva de dos métodos usuales de interpolación (Kriging ordinario y Ponderación de Distancia Inversa o IDW) y determinar la densidad mínima de observaciones requerida para delimitar unidades de manejo de suelos y cultivos. Los datos fueron desglosados en 5 densidades de puntos (0.5-0.75-1-1.5-2 observaciones.ha⁻¹). Los mapas obtenidos fueron contrastados con un set de observaciones reservadas específicamente con el fin de comparar la capacidad de predicción de estos. Se utilizaron estadísticos como el Promedio Cuadrado del Error (PCE), el Estimador de predicción (E) y el coeficiente de determinación para regresiones lineales y polinómicas. Se realizaron mapas de error para identificar la variabilidad de la predicción. Los interpoladores no presentaron diferencias marcadas en su exactitud, pero sí lo hizo la densidad de observaciones. Por su simplicidad relativa y una ligera tendencia a lograr mejores valores en los estadísticos utilizados, se sugiere el uso de IDW. Para la delimitación de unidades homogéneas de manejo en función de la profundidad de suelo se adoptó un mínimo de 1 observación ha⁻¹, recomendándose analizar la conveniencia de utilizar una densidad mayor de observaciones (1,5-2 ha⁻¹) en sectores complejos, de pobre estimación, que coincidieron con suelos de escasa profundidad.

Palabras clave: profundidad suelos, métodos de interpolación, densidad de observaciones, kriging

ABSTRACT

Petrocalcic horizons are among the main soil constraints to agricultural production in the south-west of Buenos Aires province. They decrease effective soil depth and water holding capacity. This paper deals with the mapping of soil depth. The objectives were: to compare predictive ability of two interpolation methods (ordinary Kriging and Inverse Distance Weighted, IDW), and establish the minimum observation density requirements to define management units. In a 60-ha production farm located near San Germán town (Puán district, Bs. As. province), 199 soil depth observations were performed using a mechanical probe. Data were grouped into 5 observation densities (0.5-0.75-1-1.5-2 observation ha⁻¹). Resulting maps were checked against a set of data reserved for this purpose. Statistics like Mean Square Error (PCE), goodness of Prediction estimator

¹Ilwis es un software elaborado bajo código abierto de libre copia y distribución desde fines del 2006 (Licencia GNU GPL). Más información en: <http://www.ilwis.org/>; <http://52north.org/communities/ilwis/>

(E), and coefficient of determination (R^2), for linear and quadratic regressions were used to estimate their precision. Maps representing the Interpolation Error (EI) were made to identify prediction variability. Interpolation methods showed no great differences in precision, but the increase in observation density improved mapping precision. Based on its relative simplicity and a slight trend to better statistics values, IDW is proposed as a possible standard method, with a minimum density of 1 observation ha^{-1} for this specific soil management maps. A higher observation densities ($1.5 - 2 ha^{-1}$), can be used to increase accuracy in more complex areas of this field related to shallow soils.

Keywords: soil depth, interpolation methods, observation density, kriging.

INTRODUCCIÓN

En la zona semiárida del sudoeste bonaerense la capacidad de retención de agua de los suelos, combinada con la variabilidad en las precipitaciones, condiciona la productividad de verdeos y cultivos de cosecha. Esta capacidad está definida principalmente por la porosidad, función de la composición granulométrica y la estructura del suelo y por la presencia de un horizonte petrocálcico (“tosca”) que limita la exploración por las raíces.

El efecto del horizonte petrocálcico sobre los rendimientos ha sido mencionado para la zona semiárida y, en menor medida, para la subhúmeda (Calviño y Sadras, 1999; Ross, 2012; Puricelli *et al.*, 1997).

Ross (2012) estudió la influencia del horizonte petrocálcico sobre cultivos del sudeste bonaerense. Determinó que la profundidad del suelo resultó una variable de considerable importancia para analizar la variación espacial del rendimiento y encontró correlación entre profundidad efectiva y rendimiento en función de la densidad de muestreo, año y cultivo. Bragachini *et al.* (2010) observaron que la delimitación de ambientes sobre la base de la profundidad de la tosca permitió un mejor ajuste de la fertilización de cebada respecto del logrado a partir del uso de mapas de rendimiento-proteína.

Dada la influencia de la variable estudiada sobre la producción de cultivos, la determinación de áreas homogéneas por profundidad de suelos permite la aplicación de tratamientos agronómicos específicos (longitud de barbecho, densidad de siembra, nivel de fertilización), adecuados al potencial productivo de cada suelo. Esto representa una tecnología de procesos importante que optimiza el uso de insumos en un ambiente marginal de alto riesgo climático.

El método más simple, accesible y directo para establecer la profundidad es la sonda mecánica. Se trata de una varilla de acero de aproximadamente 1 cm de diámetro y 100 cm de largo, rematada por una punta triangular en su extremo inferior y un mango en forma de “T” en el superior. En condiciones favorables de humedad es relativamente sencilla su introducción en el suelo hasta tocar la superficie coherente del horizonte petrocálcico. Las observaciones así obtenidas pueden ser referenciadas geográficamente

con GPS (Sistema de Posicionamiento Global por sus siglas en inglés). Existen dispositivos más sofisticados como los sensores de conductividad eléctrica Veris y EM-38 (Peralta *et al.*, 2012), o los basados en la reflexión de ondas electromagnéticas como el Georadar (Bragachini *et al.*, 2010). Estos permiten realizar mapas de profundidad de suelos en forma rápida y, posiblemente, más precisa. Sin embargo se trata de equipamientos costosos, habitualmente no disponibles en la región.

La representación gráfica de la información obtenida puede realizarse sobre programas de uso libre como Google Earth, o bien utilizando programas más complejos que permitan la interpolación de los datos y el desarrollo de mapas a partir de observaciones puntuales (QGIS, R, ILWIS, SAGA).

Existen diversos métodos de interpolación: Ponderación de la distancia inversa (Inverse Distance Weighted), Vecino más cercano (Nearest-neighbor interpolation), y Kriging con sus variantes (Co-Kriging, universal, simple y ordinario). Los más utilizados en estudios de este tipo son Kriging y Ponderación de la Distancia Inversa. Algunos trabajos destacan mejores estimaciones para Kriging (Creutin *et al.*, 1982; Tabios y Salas, 1985; Warrick *et al.*, 1988; Laslett *et al.*, 1987; Leenaers *et al.*, 1990), mientras que otros autores lo hacen para IDW (Weber y Englund, 1992; Wollenhaupt *et al.*, 1994; Gotway *et al.*, 1996).

Los interpoladores se basan en la premisa que puntos cercanos están más relacionados entre sí que aquellos que se encuentran más lejanos. IDW y Kriging establecen un peso para cada punto utilizado en la interpolación. En la Ec.1 se muestra la fórmula del cálculo. Ambos métodos se diferencian en el modo de establecer el valor de W_i para cada punto.

$$Z^* = \sum_{i=1}^n W_i Z_i$$

Ec.1. Estimación de valores interpolados.

Referencias: Z^* : valor estimado o interpolado, Z_i : valores reales utilizados en el cálculo, W_i : peso o factor de ponderación.

Fuente: Modificado de Villatoro *et al.* (2008)

IDW establece pesos relativos en función de la distancia entre Z^* y los Z_i vecinos. A mayor distancia menor peso. El W_i es afectado en su cálculo por un exponente que se relaciona con la variabilidad de los datos. Se utilizan exponentes de grado 1 para datos con una buena distribución normal y hasta grado 4 para alta variabilidad entre datos.

Kriging utiliza la técnica del semivariograma. Este representa la varianza entre valores de puntos observados a distancias predeterminadas y permite estimar la distancia máxima dentro de la cual los puntos presentan dependencia espacial. Dentro de este rango, se estima el W_i mediante la Ec.2.

$$W=C^{-1} \cdot d$$

Ec.2. Cálculo del W_i en Kriging.

Referencias: C^{-1} : inversa de la semivarianza para un punto conocido, d : semivarianza de la distancia del punto desconocido al punto conocido.

Fuente: Elaboración propia para el presente trabajo.

La información sobre densidad de observaciones y confiabilidad de mapas en estos ambientes es escasa. Seasevalle (2013) comparó mapas de profundidad de suelos con observaciones espaciadas 20 y 60 m. Observó mayor precisión con la densidad mayor en suelos profundos (0,8 a 1 m), pero ambas densidades identificaron de forma similar los suelos con profundidad menor a 0,4 m. Según Krüger y Venanzi (2009), la determinación de la profundidad del suelo resulta dificultosa a causa de la variabilidad espacial de este parámetro. En relieves suavemente ondulados las menores profundidades se encuentran en la medialoma alta (menos de 50 cm) y las mayores en los bajos (70-100 cm.). Sin embargo esta asociación no siempre se verifica. Además en relieves planos se requiere un alto número de observaciones para obtener información confiable.

El número de observaciones requerido para la elaboración del mapa guarda relación con la precisión esperada y el objetivo de este. En el caso estudiado, el mapa de profundidades está destinado a delimitar grandes unidades de manejo de suelos, hecho que le confiere características especiales al balance entre precisión y trabajo de campo.

Los objetivos de este trabajo fueron: a) comparar la capacidad predictiva de ambos métodos de interpolación para el mapeo de la profundidad útil del suelo a nivel de predio en el sudoeste bonaerense y b) establecer valores mínimos de la densidad de observaciones requerida para la elaboración de unidades homogéneas de manejo de suelos y cultivos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se trabajó en un lote de 60 ha cercano a la localidad de San Germán, partido de Puán, provincia de Buenos Aires. En él se realizaron 199 determinaciones de profundidad del

suelo hasta la capa de tosca mediante una varilla metálica graduada. Este número permitió desdoblarse el set de datos en grupos de observaciones que, distribuidas homogéneamente en el lote, determinaron densidades de 0.5-0.75-1-1.5-1.75 y 2 observaciones ha^{-1} . No se consideró viable la realización de más de 2 obs. ha^{-1} si la técnica está orientada al mapeo expeditivo por productores o asesores. Se reservaron los 79 puntos restantes para control de las interpolaciones. Este número representa un 60% de las observaciones en las densidades mayores, proporción que se estimó suficiente para tal fin. Se utilizó un diseño en malla semirígida, determinado por 10 transectas paralelas con observaciones a intervalos regulares de aproximadamente 60 m, las que fueron georreferenciadas con un GPS de mano (Garmin 12[®]).

Se obtuvo estadística descriptiva de los datos y se utilizó el test de Kolmogorov para analizar su normalidad. Se confeccionaron mapas de profundidad de suelos para cada grupo de observaciones utilizando el Software Ilwis 3.7.2. Los antecedentes locales sobre el uso de estas técnicas son escasos, por lo que se tomaron en cuenta los dos interpoladores más mencionados en estudios de carácter agronómico-edafológico: 1) IDW, con dos exponentes de ponderación (primero y segundo grado), con distancias de interpolación entre 100-180 m según la densidad de puntos y, 2) Kriging Ordinario. Se consideró que este tipo de Kriging ajusta mejor a la dinámica de los datos, con medias locales no necesariamente próximas a la media de la población, y limitando el dominio de estacionaridad de la media a la vecindad local media desconocida (Gallardo y Maestre, 2010). Se realizaron semivariogramas direccionales, calculando la distancia entre puntos que verifica la relación espacial, y comprobando la inexistencia de tendencias anisotrópicas en los datos que pudieran determinar variaciones en la aplicación del método.

Sobre los mapas logrados se colocaron los puntos de control contrastando el valor observado con el valor interpolado; esto permitió estimar el error de interpolación (EI), calculado como el cuadrado de las diferencias entre valores observados y esperados, así como representar su variación espacial en un mapa. Para comparar la exactitud de las interpolaciones se utilizaron además otros estadísticos. Promedio Cuadrado del Error (PCE): tal como fuera definido por Villatoro *et al.* (2008), es el promedio del residuo entre el valor estimado y el valor observado para un punto dado, elevado al cuadrado. Mientras más pequeño es este valor más exacta es la predicción. (Ec.3). Este estadístico difiere del denominado Error Cuadrático Medio en que no utiliza la raíz cuadrada del residuo.

El Estimador de predicción (E): compara el promedio general de los datos con los valores estimados. Cuando el valor de $E=100$ la predicción es perfecta, valores negativos indican la conveniencia de usar el promedio general del lote (Kravchenko, 2003). (Ec.4). R^2 : coeficiente de determinación para distintos tipos de regresiones (lineal, polinómica, exponencial), entre valores observados y predichos.

$$PCE=1/n \sum_{i=1}^n [Z(x_i)-Z'(X_i)]^2$$

$$E=(1- \{ \sum_{i=1}^n [Z(x_i)-Z'(X_i)]^2 / \sum_{i=1}^n [Z(x_i)-\bar{X}]^2 \})100$$

Ec.3-4. Superior: fórmula para el cálculo de PCE (Ec.3), donde $Z(X_i)$ es el valor observado; $Z'(X_i)$, el valor estimado o predicho y n , el número de puntos utilizado. Inferior fórmula utilizada en la elaboración del estadístico E (Ec.4), donde $Z(X_i)$ es el valor observado; $Z'(X_i)$, el valor estimado o predicho y \bar{X} , el promedio de la muestra.

Fuente: Ecuaciones modificadas de Villatoro *et al.* (2008).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La fig.1 muestra el histograma y estadística descriptiva de los datos obtenidos. La bibliografía asume distribución normal para coeficientes de asimetría entre 0-0.5 y coeficientes de variación menores al 100%. Por otra parte, la prueba de Kolmogorov arrojó un valor $p=0.4016$ aceptándose la hipótesis de una distribución normal.

Para el método Kriging no se encontró una tendencia clara de anisotropía. Aunque se determinó anisotropía zonal, Gallardo y Maestre (2006) indican que esto no resulta un argumento suficiente para confirmar el supuesto de anisotropía. Por este motivo se confeccionaron semivariogramas isotrópicos (omnidireccionales) para todos los casos, con un alcance de 500 m.

En la tabla 1 se muestra un resumen de los estadísticos obtenidos para los interpoladores estudiados.

El estimador E siempre fue mayor que cero, indicando que el uso de la interpolación es más útil que el valor promedio del lote. Los R^2 de la tabla surgieron de regresiones polinómicas de segundo grado, las cuales mostraron el mejor ajuste.

En general los estadísticos señalan a IDW grado 2 (IDW-2), como el interpolador más preciso. Las diferencias fueron reducidas, indicando que los métodos probados no difieren mayormente en su capacidad de predicción para este sitio y variable.

La densidad de observaciones mostró mayor influencia sobre los estadísticos que el método de interpolación. La mayor diferencia entre IDW-2 y Kriging se obtuvo con la menor densidad de observaciones (0.5 obs.ha⁻¹) donde la cantidad de puntos fue escasa para la construcción del semivariograma y perjudicó la estimación. Ashraf y Abbaspour (2011) no obtuvieron diferencias comparando Kriging e IDW para evaluar la variabilidad de Ca, CaCO₃ y pH del suelo. Mallarino (2001) considera que, si hay suficientes puntos en un lote, el método de interpolación utilizado no es un factor de mucha importancia. Por otra parte Sainz Rozas *et al.* (2011) determinaron que tanto Kriging como IDW pueden ser utilizados para confeccionar mapas de CO y pH en una zona cercana a la de estudio.

El hecho de que Kriging no realice mejores predicciones puede deberse a la falta de estacionaridad de los datos. Esto implica que la media y la varianza dependan solo de la distancia que los separa y no de la posición espacial en el lote (Gutiérrez-López *et al.*, 2011). Se ha destacado que pequeñas variaciones en el relieve, atribuibles a cambios en las geoformas, suelen tener relación con la profundidad del horizonte petrocálcico, hecho no detectado por el interpolador debido a la mencionada falta de estacionaridad.

En forma general la precisión indicada por los valores de los estadísticos aumentó con la densidad de observaciones obteniéndose, como cabía esperar, el máximo con la mayor densidad. E y R^2 , intuitivamente más fáciles de interpretar,

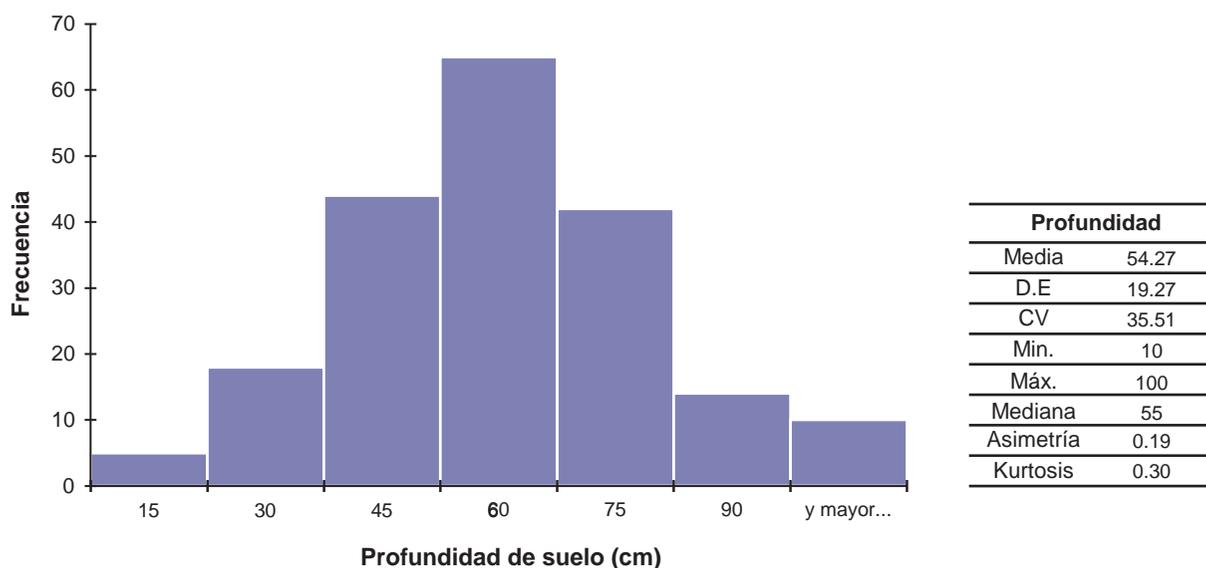


Figura 1. Histograma y análisis estadístico descriptivo de los datos obtenidos.

Fuente: Elaboración propia para el presente trabajo.

| Interpolación | Indicador | Densidad observaciones (Obs./ha) | | | | | |
|---------------|----------------|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 0,5 | 0,75 | 1 | 1,5 | 1,75 | 2 |
| IDW-1 | E | 17,20 | 9,78 | 29,34 | 34,91 | 37,73 | 46,27 |
| | PCE | 357,68 | 389,73 | 305,25 | 281,19 | 269,01 | 232,08 |
| | R ² | 0,19 | 0,23 | 0,35 | 0,33 | 0,35 | 0,44 |
| IDW-2 | E | 16,32 | 9,93 | 31,07 | 36,11 | 39,07 | 47,37 |
| | PCE | 361,07 | 388,67 | 297,44 | 275,68 | 262,93 | 227,10 |
| | R ² | 0,31 | 0,27 | 0,38 | 0,38 | 0,40 | 0,49 |
| Kriging | E | 14,40 | 4,98 | 26,01 | 27,54 | 36,02 | 45,97 |
| | PCE | 369,03 | 409,64 | 318,99 | 312,39 | 275,81 | 232,93 |
| | R ² | 0,21 | 0,24 | 0,32 | 0,29 | 0,37 | 0,49 |

Tabla 1. Resumen de los indicadores de exactitud evaluados.

E = Estimador de predicción, PCE = Promedio Cuadrado del Error, y R²= coeficiente de determinación para la regresión cuadrática entre valores observados y predichos.

Fuente: Elaboración propia para el presente trabajo.

muestran niveles de precisión entre 40 y 50%. De la misma forma, la variación de los estadísticos señala como poco precisas las dos densidades menores (0,5 y 0,75 obs. ha⁻¹), donde el nivel de precisión sería menor al 20%. Resulta llamativa la caída de los estadísticos en 0,75 obs.ha⁻¹, difícil de interpretar como no sea por una distribución de puntos menos homogénea que en los restantes grupos (fig.2).

En las densidades intermedias (1 a 1,75 obs.ha⁻¹), los valores tienden a estabilizarse. En función de esta carac-

terística y considerando aspectos operativos (trabajo de campo, tiempos, costos), se justifica optar por la menor densidad dentro de este rango (1 obs.ha⁻¹).

La fig.3 muestra los mapas de profundidad del suelo resultantes de la interpolación con Kriging ordinario e IDW-2 en tres densidades: 0,5-1 y 2 obs.ha⁻¹. Se observa que el detalle del patrón de distribución de profundidades aumenta con la densidad de observaciones sin presentar diferencias sustanciales entre interpoladores.

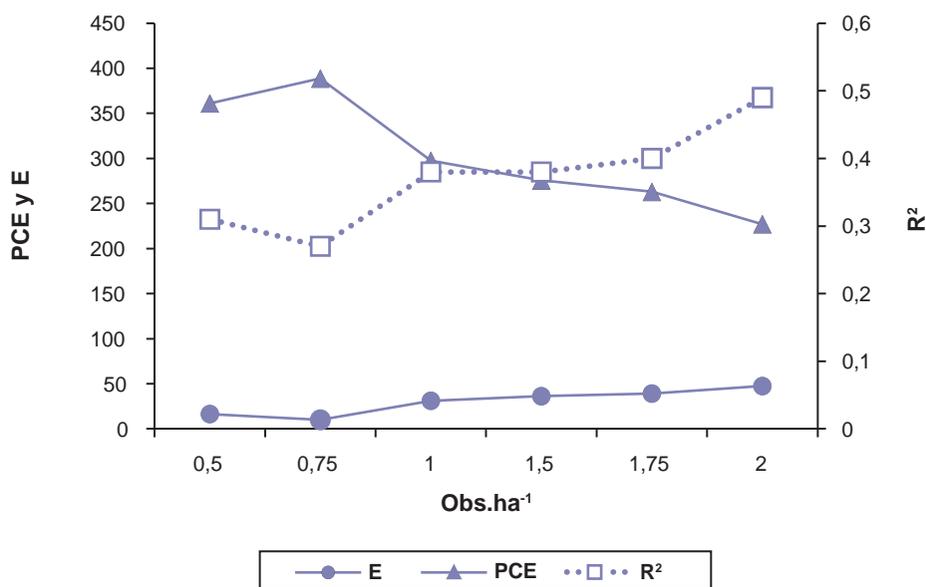


Figura 2. Variación de los estadísticos E, PCE y R² en función de la densidad de observaciones para el interpolador IDW-2.

Fuente: Elaboración propia para el presente trabajo.

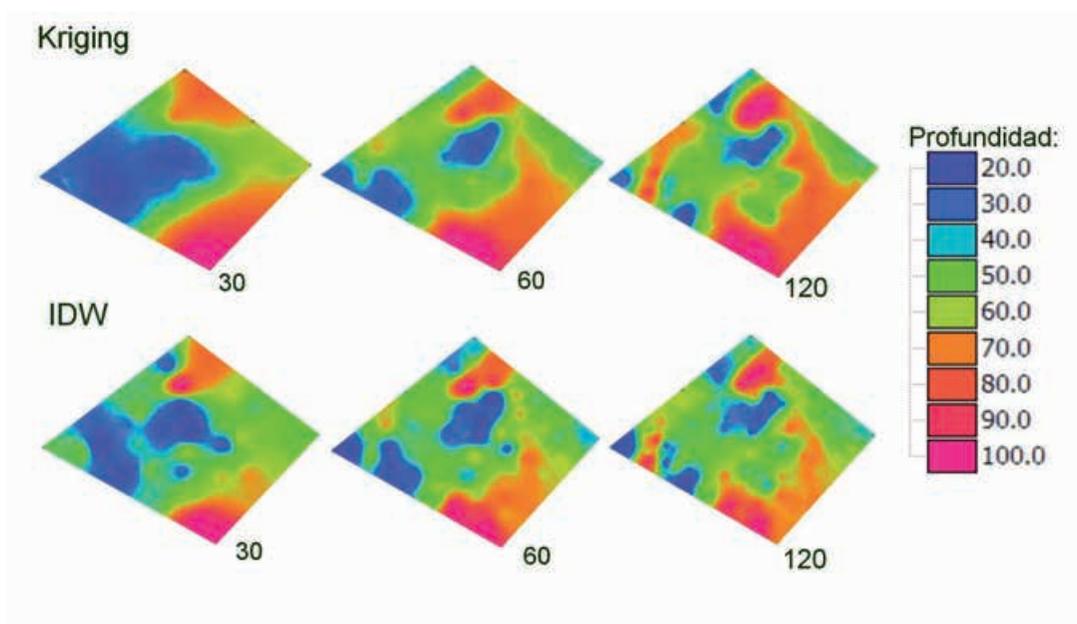


Figura 3. Mapas de profundidad de suelos elaborados con Kriging e IDW-2 (profundidades en cm). El valor en la base de cada mapa indica el número de puntos utilizados para su elaboración y corresponde a densidades de 0,5-1 y 2 obs. ha⁻¹ respectivamente.

Fuente: Elaboración propia para el presente trabajo.

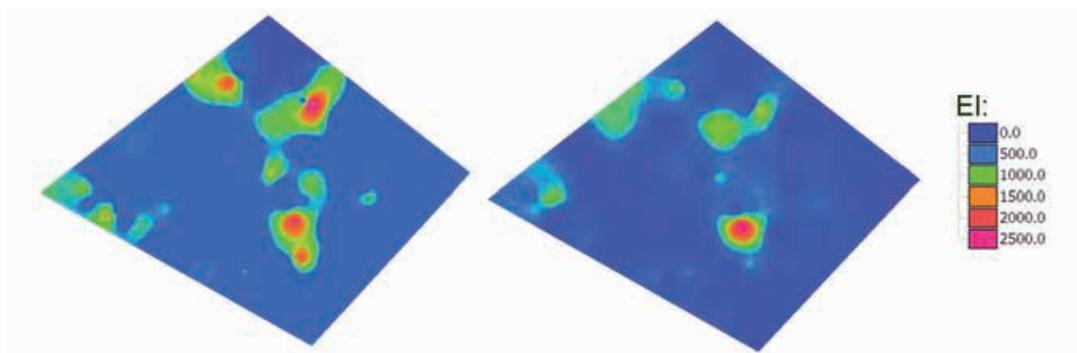


Figura 4. Variación espacial del error de interpolación (EI) para 0.5 (izq.), y 2 obs. ha⁻¹ (der.).

Fuente: Elaboración propia para el presente trabajo.

La finalidad con que se utiliza el mapa de profundidad de suelos incide sobre sus requerimientos de precisión. La maquinaria agrícola de última generación tiene capacidad para variar niveles de insumos en el orden de metros y demanda una alta precisión del mapa. El uso de maquinaria convencional requiere, en cambio, unidades de manejo de mayor tamaño relativo y forma geométrica regular. Esto implica la combinación de unidades cartográficas del mapa de profundidad y puede justificar una menor precisión relativa en función de aspectos operativos.

En la práctica, el lote de producción que aparece en la fig.3 fue dividido en dos unidades de manejo aproximadamente iguales: una mitad (superior izquierda), donde dominan valores de profundidad menores a 50 cm, y otra (inferior derecha)

con valores superiores. En función de las características climáticas y edafológicas de la región, en la primera se discute la conveniencia de realizar agricultura, mientras que en la segunda se recomienda la fertilización nitrogenada del trigo. Para esta delimitación cualquiera de las tres densidades de observaciones representadas en la figura hubiese resultado aceptable. Sin embargo, teniendo en cuenta la variación de los estadísticos representados en la fig.1, se entiende que 1 obs. ha⁻¹ resulta un compromiso aceptable entre costo (intensidad del trabajo de muestreo) y beneficio (precisión del mapa).

La fig.4 muestra la variación espacial del error de interpolación (EI), obtenido con densidades de 0,5 y 2 obs. ha⁻¹. El valor de EI aumenta a medida que el dato interpolado difiere del observado. De la comparación con la fig.3 sur-

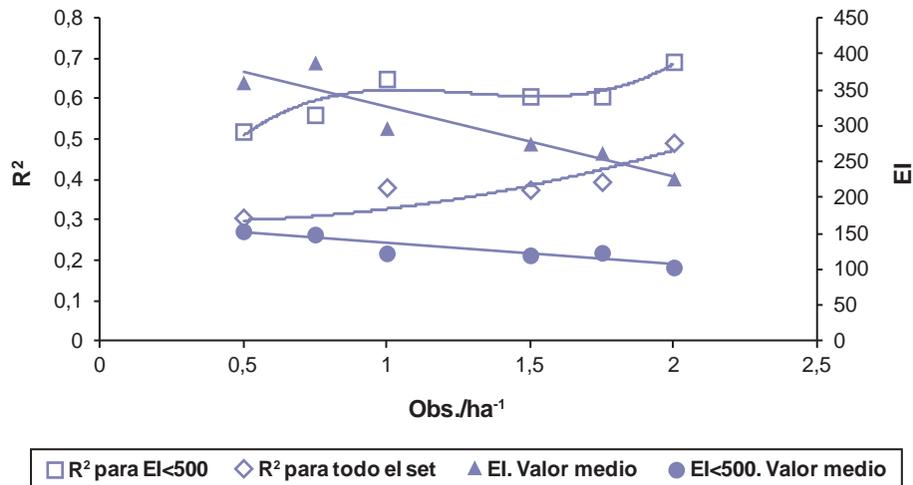


Figura 5. Densidad de observaciones y variación del valor medio de EI, y del R² de la relación valor interpolado vs. valor real. Se consideran el set de datos completo y un set reducido con EI < 500. Eje vertical izquierdo valores de R², eje vertical derecho valores para el EI.

ge que las áreas con mayores valores del EI se asocian con suelos de baja profundidad y con su transición hacia suelos más profundos. Al no coincidir exactamente la superficie topográfica con la superficie del horizonte petrocálcico, la transición entre suelos someros y profundos suele ser abrupta. El incremento del EI en estos casos se explica porque el valor interpolado, sobre la base de la profundidad de los puntos próximos, resulta muy diferente del real.

Una alternativa para mejorar la precisión del mapa sin incrementar sensiblemente la densidad de observaciones sería la detección de estos sectores complejos mediante un muestreo inicial de baja intensidad y su posterior incremento en ellos a fin de disminuir el EI. Al respecto Ross (2012) destaca en su trabajo la presencia de microambientes con mayor variabilidad en la profundidad a la tosca, donde recomienda mayor número de observaciones.

La fig.5 analiza el incremento esperado del EI a través de la correlación entre los valores interpolados y los reales para distintas densidades de observaciones. Para ello se comparó, en cada densidad de muestreo, el set total de datos con un set reducido formado por todos aquellos puntos con EI < 500, logrado a través de la exclusión de sectores conflictivos por cambios abruptos en la profundidad del suelo. Esta eliminación afectó aproximadamente un 20% de los datos estudiados. Se observa un aumento medio de 0,2 puntos en el R² y una sensible disminución del EI. Estos datos indican la conveniencia de realizar nuevas experiencias a fin de chequear esta hipótesis.

CONCLUSIONES

En zonas como la estudiada fue posible la realización de mapas de profundidad de suelos con fines de manejo por ambientes. Los métodos disponibles, aunque laborio-

sos desde el punto de vista del trabajo de campo, fueron relativamente simples y accesibles.

Los interpoladores estudiados no mostraron diferencias importantes en su capacidad de predicción. Por su mayor facilidad de cálculo y una ligera tendencia a lograr mejores valores en los estadísticos utilizados se sugiere el uso de la Ponderación de Distancia Inversa (IDW), grado 2.

La precisión de los mapas aumentó con la densidad de observaciones en el rango 0,5-2 obs./ha⁻¹. Para el caso especial de la delimitación de unidades de manejo por ambientes con maquinaria convencional, una densidad de 1 obs./ha⁻¹ produjo valores de precisión aceptables.

Se detectó un mayor error de interpolación en áreas de suelos someros y su transición hacia suelos más profundos. Se requiere mayor información acerca del posible efecto de la aplicación de densidades de muestreo variables sobre la precisión del mapa resultante.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Sra. Ana María Del Elce y a la Ing. Agr. Magalí Gutiérrez la posibilidad de realizar este estudio en su establecimiento y a los ayudantes de campo Sres. Rubén Elorriaga y Rubén Giménez por su colaboración en tareas de campo.

BIBLIOGRAFÍA

ASHRAF, S.; ABBASPOUR, H. 2011. Study Of Soil Properties, Using Kriging and In Inverse Distance Weighting Methods. *Advances in Environmental Biology*. Vol. 5(9), 2870-2875.

BRAGACHINI, M.; MÉNDEZ, A.; SCARAMUZZA, F.; VÉLEZ, J.; VILLARROEL, D.; MASSIGOGUE, J. 2010. Análisis del rendimiento y la calidad de la cebada cervecera en función de la profundidad de

- tosca en el perfil del suelo. INTA EEA Manfredi, Chacra Experimental Integrada Barrow del INTA. (<http://www.agriculturadeprecision.org/articulos/monitores-rendimiento/Analisis-Rendimiento-YCabilidad-Cebada-Cervecera.asp>, verificado: 10 de enero de 2013).
- CALVIÑO, P.A.; SADRAS, V.O. 1999. Interannual variation in soybean yield: interaction among rainfall, soil depth and crop management. *Field Crops Research* 63, 237-246.
- CREUTIN, L.; OBLED, C. 1982. Objective analyses and mapping techniques for rainfall fields: An objective comparison. *Water Resour. Res.* Vol.18, 413-431.
- GALLARDO, A.; MAESTRE, F.T. 2006. Geo-estadística. Asociación Española de Ecología Terrestre. *Revista Ecosistemas*. Vol.15(3), 48-58.
- GALLARDO, A.; MAESTRE, F.T. 2010. Métodos geo-estadísticos para el análisis de datos ecológicos espacialmente explícitos. Universidad Rey Juan Carlos. (http://www.escet.urjc.es/biodiversos/espainvestigacion/intercambio/doc/publicaciones/Ecologia_espacial_book_Cap6.pdf, verificado: 12 de enero de 2013).
- GOTWAY, C.A.; FERGURSON, R.B.; HERGERT, G.W.; PETERSON, T.A. 1996. Comparison of kriging and inverse-distance methods for mapping soil parameters. *Soil Sci. Soc. Am. J.* Vol 60, 1237-1247.
- GUTIÉRREZ-LÓPEZ, A.; RAMÍREZ, A.; LEBEL, T.; SANTILLÁN, O.; FUENTES, C. 2011. El variograma y el correlograma, dos estimadores de la variabilidad de mediciones hidrológicas. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. Vol. 59, 193-202.
- KRAVCHENKO, A. 2003. Influence of spatial structure on accuracy of interpolation methods. *Soil Sci. Soc. of Am. Journal* 67:1564-1571.
- KRÜGER, H.; VENANZI, S. 2009. El agua y el rendimiento del trigo. Algunos cálculos. INTA Estación Experimental. Agropecuaria Bordenave. (<http://inta.gob.ar/documentos/el-agua-y-el-rendimiento-del-trigo.-algunos-calculos/>, verificado: 27 de enero de 2013).
- LASLETT, G.M.; MCBRATNEY, A.B.; PAHL, P.J.; HUTCHINSON M.F. 1987. Comparison of several spatial prediction methods for soil pH. *Journal of Soil Science*. Vol 38, 325-341.
- LEENAERS, H.; OKX J.P.; BURROUGH, P.A. 1990. Comparison of spatial prediction methods for mapping floodplain soil pollution. *Catena*. Vol 17, 535-550.
- MALLARINO, P. 2001. Manejo de Nutrientes Sitio-Específico con Énfasis en el Muestreo de Suelos y la Fertilización Variable con Fósforo y Potasio. Department of Agronomy Iowa State University. ([http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/\\$webindex/43B08D9778E9A8020325700D005F3E1D](http://www.ipni.net/ppiweb/ltams.nsf/$webindex/43B08D9778E9A8020325700D005F3E1D), verificado: 30 de enero de 2013).
- PERALTA, N.; PAGGI, M.; CALANDRONI M.; COSTA, J. 2012. Relación entre la conductividad eléctrica aparente y la profundidad del suelo en la diferenciación de suelos. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina.
- PURICELLI, C.A.; PURICELLI, M.M.; KRUGER H.R. 1997. Profundidad útil del suelo y rendimiento del trigo. EEA INTA Bordenave. *Boletín Técnico* N.º 14, Septiembre 1997.
- ROSS, F. 2012. Determinación espacial de la profundidad de suelo (tosca) y su relación con el rendimiento del cultivo. Chacra Experimental Integrada de Barrow. (<http://inta.gob.ar/documentos/determinacion-espacial-de-la-productividad-de-suelo-tosca-y-surelacion-con-el-rendimiento-de-cultivo/>, verificado: 20 de enero de 2013).
- SAINZ ROZAS, H. R.; ECHEVERRÍA, H.E.; ANGELINI, H.P. 2011. Niveles de carbono orgánico y pH en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana argentina. *Cienc. suelo*. Vol.29(1), 29-37. (http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-20672011000100004&ing=es&nrm=iso, verificado: 18 de enero de 2013).
- TABIOS, G.Q.; SALAS J.D. 1985. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Resour. Bull.* Vol. 21, 365-380.
- VILLATORO, M.; HENRÍQUEZ, C.; SANCHO, F. 2008. Comparación de los interpoladores IDW y Kriging en la variación espacial de Ph, Ca, Cice y P del suelo. Universidad de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, Vol. 32(1). 95-105. San José, Costa Rica.
- WARRICK, A.W.; ZHANG, R.; EL-HARRIS, M.K.; MYERS, D.E. 1988. Direct comparisons between Kriging and other interpolators. En WIERENGA, P.J. and BACHELET, D. (ed.): *Proc. Validation of flow and transport models for the unsaturated zone*. New Mexico State University. Las Cruces, México.
- WEBER, D.; ENGLUND, E. 1992. Evaluation and comparison of spatial interpolators II. *Math. Geol.* Vol 24, 381-391.
- WOLLENHAUPT, N.C.; WOLKOWSKI, R.P.; CLAYTON, M.K. 1994. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. *J. Prod. Agric.* Vol 7, 441-448.