

UTILIZACIÓN DE HERRAMIENTAS ESTADÍSTICAS Y GEOESTADÍSTICAS PARA OPTIMIZACIÓN DEL MUESTREO DE PROPIEDADES FÍSICAS DEL SUELO

G. M. Siqueira^{1,2}, S.R. Vieira³, Z.M. Souza⁴, J. Dafonte¹, A. Paz⁵

¹ Escuela Politécnica Superior, Universidad de Santiago de Compostela (USC), Campus Universitario, 27002 - Lugo; glecio.machado@rai.usc.es y jdafonte@usc.es.

² Becario MAEC-AECI.

³ Centro de Solos e Recursos Ambientais, Instituto Agronômico (IAC), Campinas-SP, Brasil. sidney@iac.sp.gov.br.

⁴ Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas-SP, Brasil. zigomarms@agr.unicamp.br.

⁵ Facultad de Ciencias, Universidad de A Coruña (UDC), Campus da Zapateira, 15071 - A Coruña. tucho@udc.es.

RESUMEN. El objetivo de este trabajo es comparar la optimización del muestreo de propiedades físicas del suelo utilizando herramientas estadísticas y geoestadísticas. Este experimento fue realizado en una área de 3,42 ha, en un Ferralsol en Campinas (SP, Brasil) en 2005. El área se ha manejado desde 1985 con siembra sin laboreo, sembrada con *Ricinus communis* L.. El área fue dividida en una red regular de 10 x 10 m, totalizando 302 puntos de muestreo en la capa superficial del suelo hasta 0-0,10 m de profundidad. Fueron analizados en este trabajo: densidad aparente, porosidad total, macroporosidad, microporosidad y la humedad volumétrica del suelo. La optimización del muestreo fue realizada por medio de la fórmula de Cline (parámetros estadísticos) y por medio del programa SANOS 0.1 (Spatial Simulated Annealing - SSA). Los resultados mostraron que el número de muestras optimizadas puede ser disminuido para ambas metodologías. El muestreo optimizado por medio de la fórmula de Cline presenta un menor número de muestras en comparación al muestreo optimizado por medio del programa SANOS 0.1. Pero en el caso de la fórmula de Cline la posición geográfica de las muestras no es considerada para la determinación del número de muestras. Así el muestreo optimizado por medio del programa SANOS 0.1 además del número de muestras, nos suministra la posición espacial de los puntos de muestreo, para obtener una mayor representabilidad para las propiedades físicas del suelo muestreadas en el área de estudio.

ABSTRACT. The objective of this work is to compare the optimization of the sampling of soil physical properties using statistical and geostatistical tools. This experiment was conducted in an area of 3.42 has, in a Ferralsol at Campinas (SP, Brazil) in 2005. The area has been managed since 1985 with direct drilling, the crop being *Ricinus communis* L. The area was divided into a regular grid of 10 x 10 m, with 302 sampling points at 0-0.10 m depth. The properties studied in this work were: bulk density, total porosity, macroporosity, microporosity and soil water content. Optimization of the sampling was made using Cline's formula (statistical parameters) and the software SANOS 0.1 (Spatial Simulated Annealing -

SSA). Results showed that the number of optimized samples can be diminished for both methodologies with respect to the initial number of samples. Using Cline's formula a smaller number of samples as compared to the sampling design obtained by using the software SANOS 0.1. With Cline's formula the spatial location of the samples is not considered in the determination of the number of samples. Therefore the sampling optimized using the software SANOS 0,1 gives the number and spatial location of the optimized sampling points, to obtain a good description of the spatial variability for the sampled soil physical properties in the study area.

1.- Introducción

La agricultura moderna busca la maximización del uso del suelo, insumos y de los cultivos. Por esto motivo, cada vez más herramientas computacionales son incorporadas al proceso de producción agropecuario, buscando la disminución de los costos de producción y la mejora de la calidad ambiental, por medio de la utilización racional del suelo y de la aplicación de insumos en cantidades adecuadas para el pleno desarrollo de los cultivos. Así que, los agricultores dejarían de practicar una agricultura productivista y pasan a practicar una agricultura sostenible, denominada de agricultura de precisión.

Para Schueller (2000) la agricultura de precisión es dividida en tres subsistemas: uno de monitorización (recogida y almacenamiento de datos); uno de manejo (toma de decisión); y otro de control (gestión y manipulación de la información). En principio todos son muy importantes, pero la monitorización es lo que más influye sobre los resultados, pues todas las informaciones adquiridas en esta fase favorecen la utilización de tecnologías geoespaciales para determinación de la variabilidad espacial y posterior determinación de las llamadas "zonas de manejo" y de las estrategias de gestión.

Las propiedades del suelo varían conforme ocurren los cambios del paisaje y del relieve, y por este motivo un muestreo del suelo eficaz es aquel capaz de detectar tales variaciones de las propiedades del suelo de interés agrícola, desarrollando herramientas de análisis capaces de favorecer el

estudio de tales variaciones. La aplicación de las herramientas de la estadística de Fisher (1956) en la experimentación agrícola está vinculada a la premisa básica del análisis de varianza (independencia entre observaciones, independencia y homogeneidad entre los errores de las observaciones, aditividad de los efectos y normalidad de los residuos). Pero, estas observaciones no se corroboran con las realidades encontradas en campo, donde las propiedades de los suelos varían continuamente, necesitando la utilización de herramientas geoestadísticas para una adecuada caracterización de la variabilidad espacial de las más diversas propiedades del suelo y de los cultivos. Por este motivo, actualmente la utilización conjunta de herramientas estadísticas y geoestadísticas ha favorecido el conocimiento de muchos factores de producción agrícola hasta entonces ignorados.

Así, es cada vez más necesario la utilización conjunta de técnicas de análisis que sean capaces de determinar los patrones de variabilidad espacial de las propiedades del suelo y de los cultivos, requiriendo el menor número posible de muestras. En esto sentido, Webster y Oliver (1990) destacan la importancia de técnicas de muestreo que tengan como objetivo optimizar el esquema de muestreo para abaratar los costos de producción. Una de las grandes dificultades encontradas en los estudios de variabilidad espacial del suelo ha sido la determinación del espaciamiento ideal de muestreo, y que en algunas situaciones puede interferir en la aplicación de técnicas de agricultura de precisión.

Souza et al. (2006), destacan que el valor del intervalo de muestreo es dependiente de la escala, de la intensidad de recogida de las muestras y del manejo del área de estudio. Por lo tanto, es preciso que los estudios de agricultura de precisión sean evaluados también en el tiempo, posibilitando comprender como las propiedades de los suelos se comportan a lo largo del tiempo.

Van Groenigen et al. (1999) describen las técnicas de simulación de resultados basadas en un algoritmo de simulación espacial, que pueden ayudar en el proceso de definición del número y posición espacial de las muestras, favoreciendo la optimización del muestreo de las más diversas propiedades del suelo. Así, este trabajo tiene como objetivo comparar la optimización del muestreo de propiedades físicas del suelo utilizando herramientas estadísticas y geoestadísticas.

2.- Material y Métodos

El área de estudio está localizada en el Centro Experimental del Instituto Agronômico (IAC) en Campinas (SP), Brasil. Las coordenadas geográficas son: latitud 22° 23' Sur y longitud 47 ° 04' Oeste y altitud media de 600 m y pendiente media de 6.5 %. El clima de la región, según la clasificación de Köppen, es del tipo mesotérmico con invierno seco (Cwa), con precipitación media de 1382 mm.

El área experimental está siendo cultivada con leguminosas como cultivo de verano y gramíneas como

cultivo de invierno desde 1985, con no laboreo. El suelo del área fue clasificado como Ferralsol (FAO, 1994). El muestreo fue realizado en enero y mayo de 2005, cuando el área estaba cultivada con mamona (*Ricinus cummunis* L.), cultivar IAC-GUARANI. El muestreo en el área fue realizado en una red regular de 10 x 10 m, totalizando 302 puntos de muestreo en la capa superficial del suelo hasta 0.1 m de profundidad.

Las propiedades físicas analizadas en este estudio fueron analizadas de acuerdo con la metodología propuesta por Camargo et al. (1986). En enero de 2005 fue realizado el muestreo de la densidad aparente, porosidad total, macroporosidad y microporosidad del suelo. La densidad aparente del suelo (D_a , kg dm^{-3}) fue determinada utilizando anillos de 100 cm^3 . La porosidad total (PT, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) fue determinada saturando los anillos con el volumen de suelo durante 24 horas y posteriormente fue determinado el peso saturado de las muestras, entonces las muestras fueron secadas en estufa durante 24 horas a 105 °C; la microporosidad (Micro, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) fue determinada en mesa de tensión con una succión correspondiente a 0,6 m de columna de agua (6 kPa) durante 24 horas asegurando así el drenaje del agua de los macroporos (poros con diámetro $\geq 0,05$ mm); la macroporosidad (Macro, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) del suelo fue determinada por la diferencia entre la porosidad total y la microporosidad del suelo.

En mayo de 2005 fue realizado un muestreo de la humedad volumétrica del suelo (θ -TLO, $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) por medio de la técnica de TLO (Transmisión line oscillator) que es similar a la técnica TDR, donde una señal electromagnética es emitida por medio de una sonda en el suelo y es contabilizado el número de veces que retorna esta señal en un período de tiempo determinado (Modelo Hydrosense® - Campbell Scientific Austrália Pty. Ltd.), así es posible determinar el contenido del agua en el suelo, por medio de una ecuación que relaciona la frecuencia con el contenido volumétrico de agua en el suelo.

Una vez las muestras de suelo fueron analizadas en laboratorio, los resultados fueron analizados con la estadística clásica por medio de programa BIOESTAT 3.0 (Ayres et al., 2003), que suministra los principales momentos estadísticos (Media; Mediana; CV-Coeficiente de variación; Máx.-Valor máximo; Min.-Valor mínimo; Asis.-Asimetría; Curt.-Curtosis; d-Desvío máximo en relación a la distribución normal por medio del prueba de Kolmogorov-Smirnov con probabilidad de error de 5%). Se determinaron también el número de submuestras necesarias para componer una muestra, y estimar el valor medio de las variables usando la Fórmula de Cline (1944) (Ec. 1):

$$n = \left(\frac{t_{\alpha} \cdot CV}{D} \right)^2 \quad (1)$$

en que: n es el número mínimo de muestras; t_{α} es el valor del prueba t de Student para el nivel de probabilidad de 95%; CV es el coeficiente de variación; D es el porcentaje de variación en torno de la media (5 %).

Posteriormente, fue realizado un análisis de la variabilidad espacial de cada una de las propiedades físicas, utilizando herramientas geoestadísticas para definición y ajuste de

semivariograma de acuerdo con Vieira (2000) (Ec. 2):

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (2)$$

en que: $\gamma^*(h)$ es la semivarianza estimada; $N(h)$ representa el número de pares de valores medidos $Z(x_i)$, $Z(x_i+h)$ separados por un vector (h) . De esta manera es posible realizar el ajuste de un modelo matemático que represente la variabilidad espacial de las propiedades del suelo. Los parámetros de ajuste son: C_0 - Efecto pepita; C_1 - Varianza estructural y a - Alcance. El efecto pepita (C_0) indica la variabilidad no detectada en el muestreo. La varianza estructural (C_1) indica hasta que punto la variabilidad de los datos crece hasta que no hay más semejanza entre la variabilidad de las muestras y el alcance (a) indica hasta que distancia las muestras tienen dependencia espacial. El ajuste del semivariograma fue realizado por el método descrito por Vieira (2000), basado en la validación cruzada. Los datos de todas las propiedades físicas estudiadas se ajustaron al modelo matemático esférico (ESF) (Ec. 3):

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \quad 0 < h < a \quad (3)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \quad h > a$$

Las variables fueron estimadas por medio de krigado ordinario utilizando el programa SURFER (1999). El grado de dependencia (GD) espacial entre muestras de cada una de las propiedades fue realizado de acuerdo con Zimback (2001) donde el grado de dependencia entre muestras es clasificado como: $\leq 25\%$ bajo, entre 25% y 75% medio y de $\geq 75\%$ alto. En las figuras los parámetros de ajuste del semivariograma están presentados como: ESF (C_0 ; C_1 ; a ; GD).

Para la optimización del esquema de muestreo se utiliza un algoritmo de "templado simulado espacial" (Spatial Simulated Annealing - SSA) (Van Groenigen et al., 1999) para localizar los lugares de muestreo, que son seleccionados para cumplir los criterios requeridos en este caso minimizar la varianza media del krigado ordinario en el área de estudio. SSA empieza con un conjunto de localizaciones aleatorias y comienza un bucle a través de los puntos, cambiando uno en cada ciclo. En cada paso el criterio óptimo se calcula. Si la nueva configuración resultante del cambio es mejor que el esquema óptimo previo, se guarda como la nueva configuración óptima. Si es peor, queda almacenada pero con una probabilidad que decrece con el número de ciclos. El concepto que se encuentra detrás de la configuración subóptima es sacar la iteración de un óptimo local. Permitiendo que la probabilidad de la (temporalmente) aceptada configuración subóptima decrezca, lo cual ayuda a asegurarse de la eventual convergencia al óptimo global. El algoritmo SSA fue implementado utilizando el programa SANOS 0.1 (Van Groenigen, 2000).

En este momento los valores del alcance estimados por

medio del semivariograma fueron utilizados para definir el número de submuestras necesarias para representar el mismo fenómeno espacial de cada una de las propiedades, pero con un número menor de muestras. Para se garantizar la dependencia espacial entre las muestras de suelo fue utilizado una distancia equivalente a la mitad del valor de alcance para definir el número de submuestras para cada una de las propiedades, conforme propuesto por Souza et al. (2006).

3.- Resultados y Discusión

El análisis estadístico de los datos (Tabla 1) indica que no existe gran variación entre las muestras para las diferentes propiedades estudiadas, conforme demostrado por los valores relativamente bajos de CV . Los resultados referentes al teste de Kolmogorov-Smirnov con probabilidad de error de 5% indican normalidad de los datos para Da, PT y Macro. La microporosidad (Micro) y la humedad (θ -TLO) presentan distribución de frecuencia no normal. Los valores de la media e mediana, para todas las propiedades, son próximos, indicando distribuciones simétricas como puede ser confirmado por medio de los valores del coeficiente de asimetría próximos a cero. Isaaks y Srivastava (1989) describen que el coeficiente de asimetría es más sensible a los valores extremos, comparado a la media, mediana y desviación estándar, en este caso un único valor puede influenciar fuertemente del coeficiente de asimetría, pues los desvíos entre cada valor y la media son elevados a la tercera potencia. El valor medio de Da (1.12 kg dm^{-3}) está por debajo del valor descrito por Grego y Vieira (2005) trabajando con el mismo tipo de suelo con laboreo tradicional, que encontraron valores de Da de 1.33 kg dm^{-3} . Los valores medios de PT, Macro y Micro presentan valores semejantes a los encontrados por Costa et al. (2003) trabajando también en un Ferralsol en Guarapuava (PR, Brasil) (61% , 15% y 45% respectivamente).

Los semivariogramas con sus respectivos parámetros geoestadísticos (Fig.1) describen que para Da, PT y Macro ocurre una grande dependencia espacial entre las muestras de suelo conforme a la clasificación del grado de dependencia entre muestras (GD) descrito por Zimback (2001). Pero, Micro y θ -TLO presentan grado de dependencia medio entre las muestras de suelo. Por medio de los valores de efecto pepita (C_0) se puede verificar que PT, Macro, Micro y θ -TLO presentan una gran variabilidad, que el proceso de muestreo no fue capaz de detectar. Todavía, los valores de alcance (a) indican que el tamaño de las zonas de variabilidad dentro del área de estudio para todas las propiedades fue mayor que el tamaño medio de estas zonas de variabilidad, indicando que el espaciamiento entre muestras puede ser aumentado sin problemas de representatividad. Todas las propiedades físicas del suelo se adecuan al modelo matemático esférico, ya descrito por diversos autores como el más común para representar la variabilidad espacial de los atributos del suelo (Bertolani y Vieira, 2001; Souza et al., 2004).

Tabla 1. Parámetros estadísticos para las propiedades físicas estudiadas.

	Media	Mediana	CV	Máx.	Min.	Asis.	Curt.	d
Da	1.12	1.12	7.13	1.36	0.85	0.07	0.33	0.04n
PT	59.60	59.58	7.18	75.77	42.37	-	1.74	0.04n
						0.18		
Macro	19.60	19.23	23.49	34.94	10.40	0.29	0.03	0.04n
Micro	40.08	40.21	10.00	56.05	23.46	0.01	3.68	0.09Ln
θ-TLO	11.45	11.00	20.86	20.00	7.00	0.90	1.27	0.15Ln

CV-coeficiente de variación; Máx- máximo; Min- mínimo; Asis. – coeficiente de asimetría; Curt.-curtosis; d – Desviación máxima en relación a la distribución normal por medio del prueba de Kolmogorov-Smirnov; n – datos con distribución normal; Ln – datos con distribución lognormal.

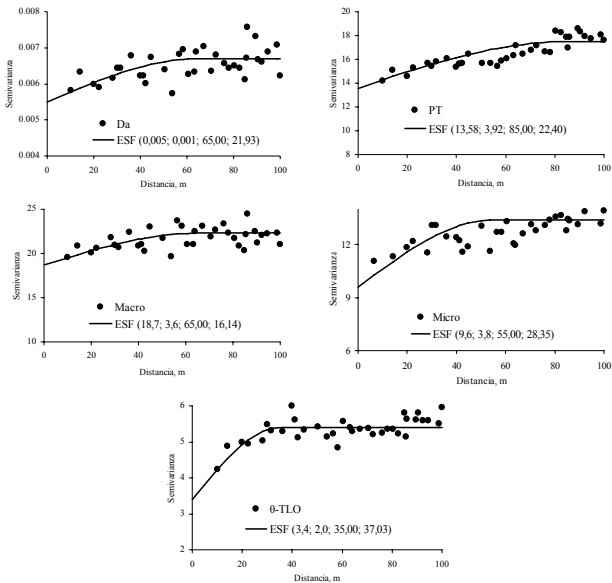


Fig.1. Semivariogramas ajustados al modelo esférico (ESF) con sus respectivos parámetros (C0; C1; a; GD).

Los mapas de variabilidad espacial de las propiedades físicas en estudio muestreadas en red regular de 10 x 10 m están presentados en la Fig. 2. Los mapas en general presentan las líneas de contorno bien definidas y distribuidas sin apreciarse anisotropía. Por medio de estos mapas es posible visualizar que en las zonas donde hay mayor densidad del suelo, hay menor porosidad total, lo cual es esperable al ser inversamente proporcionales estas dos variables. Los mapas de macroporosidad y de microporosidad presentan comportamiento similar. El mapa de humedad del suelo tiene visualmente un aspecto similar con el mapa de densidad del suelo, pero en este caso es difícil cuantificar esta relación pues como la humedad del suelo fue medida en la capa superficial hay otros factores (principalmente relacionados al clima y la demanda de agua por las plantas) que se relacionan con el contenido de humedad en suelo (Ramírez y López, 1993).

Los valores del coeficiente de variación (CV) fueron utilizados para determinar el número de submuestras por medio de la Fórmula de Cline (1944) (Tabla 2). Los valores de CV son clasificados por Gomes (1976) como bajo (< 10 %), medio (10 e 20 %), alto (20 e 30 %) y muy alto (> 30 %). Así para los datos de este experimento los

valores de CV presentan una tendencia mediana. La presencia de valores de CV medianos favorece la utilización de herramientas geoestadísticas pues es un indicador de que durante el proceso de estimación espacial los valores de efecto pepita serán pequeños para aquellas propiedades que tienen valores bajos de CV. Por otro lado, Isaaks y Srivastava (1989), describen que lo más importante es que los datos tengan mesetas bien definidas y que la distribución de frecuencia no tenga colas muy largas.

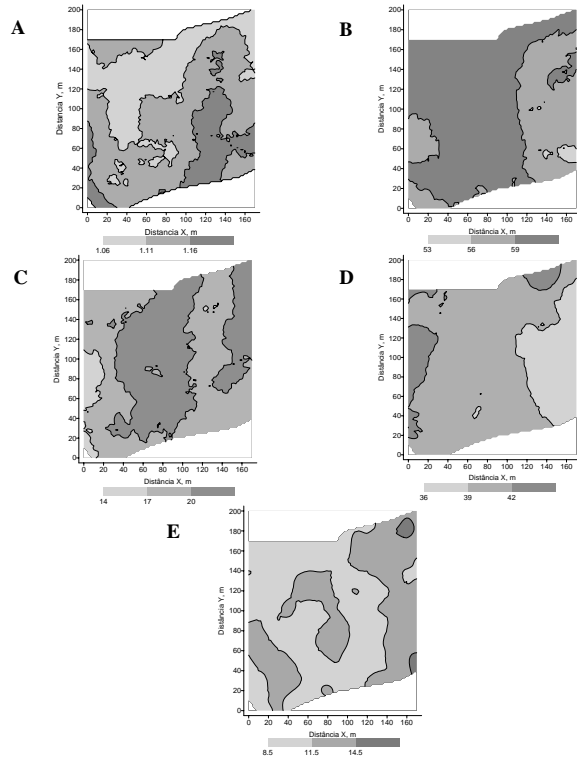


Fig. 2. Mapas de variabilidad espacial para las propiedades físicas estudiadas (A: Da; B: PT; C: Macro; D: Micro y E: θ-TLO).

La optimización del muestreo (Tabla 2) usando el programa SANOS (Van Groenigen, 2000), que utiliza el criterio de minimización de la varianza de krigeado medida, utilizando los parámetros de los semivariogramas ajustados de las diferentes variables estudiadas, sugiere que el espaciamiento entre muestras puede ser disminuido considerablemente. Así, disminuyendo los costos de producción y facilitando la difusión de la agricultura de precisión. La optimización del proceso de muestreo del suelo es importante pues durante su desarrollo las muestras son consideradas como pertenecientes a la misma población, y de esta manera se está corroborando los principios de la estacionaridad entre muestras conforme a lo descrito por Webster (2000).

En la Tabla 2 se puede notar que el número de muestras optimizadas por medio de la fórmula de Cline es siempre menor cuando se compara con el número de muestras determinados por medio del templado simulado espacial (SSA). Por ello es importante resaltar que el número de muestras calculado por medio de la Fórmula Cline resulta en un número más pequeño de observaciones porque no tiene en

cuenta la correlación espacial. Mulla y McBratney (2002) describen que, se las observaciones están correlacionadas espacialmente, la información contenida en cada una de ellas disminuye y se requiere un mayor número de observaciones para se estimar con la misma fiabilidad. El valor de alcance es una buena medida para determinación del número de muestras de suelo, pues, indica el radio de actuación donde los valores de las muestras son tan semejantes que pueden estar correlacionadas (Vieira et al., 1983). McBratney y Webster (1983) y Souza et al. (2006) también describen el alcance como una herramienta para el planeamiento y evaluación experimental, por favorecer la toma de decisiones en el proceso de muestreo del suelo.

Tabla 2. Número mínimo de submuestras necesarias para estimar los valores de las propiedades físicas de suelo estudiadas, determinadas por la fórmula de Cline y el método de Van Groenigen.

Propiedad	Fórmula de Cline		Método de Van Groenigen	
	CV (%)	Nº. de muestras	Alcance	Nº. de muestras
Da	7.13	5	65	25
PT	7.18	5	85	16
Macro	23.49	22	65	25
Micro	10.00	6	55	36
θ -TLO	20.86	18	35	100

Webster y Oliver (1990) destacan que el muestreo del suelo debe ser capaz de detectar la continuidad espacial de un atributo cualquiera. Un aspecto importante que debe ser considerado durante el proceso de optimización del muestreo por medio del programa SANOS 0.1 es que en el mapa de los puntos de muestreo optimizados es realizado considerando las coordenadas geográficas (Van Groenigen et al., 1999). Así, el número ideal de muestras para representar una población es aquel capaz de incluir los más diversos factores que interfieren en el proceso de manifestación de la variabilidad espacial de los suelos. De acuerdo con Bouma et al. (1999) y Souza et al. (2005) resaltan que las prácticas de manejo del suelo causan modificaciones en la variabilidad natural del suelo, pero también es preciso considerar las modificaciones en el relieve.

Los mapas de optimización del muestreo del suelo son importantes al favorecer una mejor comprensión del patrón de distribución espacial, permitiendo la definición de zonas de manejo homogéneas (Montanari et al., 2005) (Fig. 3). Por otro lado, las informaciones aportadas por la optimización del muestreo del suelo pueden ser extrapoladas para otras áreas de características similares, una vez que se espera que el patrón de variabilidad espacial sea el mismo.

En general para el área de estudio el número de muestras optimizadas por medio del método de Van Groenigen (Tabla 2 y Fig. 3) no es grande (media de 25 muestras para todas las propiedades). Pero, θ -TLO presentó un número de puntos muy superior a las demás propiedades físicas del suelo estudiadas. Este elevado número de puntos cuando se compara con las demás

propiedades estudiadas indica la gran variabilidad de los datos de humedad del suelo. Esta alta variabilidad ya fue resaltada también por otros autores (Nielsen et al., 1993; Grego y Vieira, 2005). Todavía, es preciso comprender mejor los fenómenos que están relacionados con el contenido de agua en el suelo, pues el contenido de agua en el suelo es el principal factor para el desarrollo de los cultivos. Percebe-se también que hay un crecimiento del número de muestras optimizadas por medio del SSA para las propiedades relacionadas con la porosidad del suelo. Este hecho puede estar relacionado con la propia naturaleza estructural de estas propiedades en el suelo, pues estas propiedades son muy dependientes del estado de compactación del suelo presentado por medio de los valores de *Da* y conforme ya discutido anteriormente son propiedades inversamente proporcionales y cualquiera mudanza en el valor de *Da* ocasionadas por lo manejo inadecuado del suelo, por su vez también alteran la variabilidad espacial de la porosidad del suelo, justificando el estudio de estas propiedades en este trabajo.

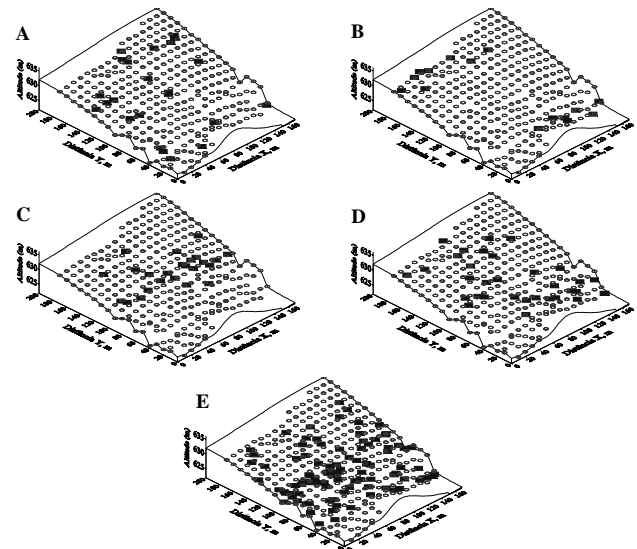


Fig. 3. Esquema de muestreo en una malla 10 x 10 m (círculos) y esquema de muestreo optimizado (cuadrados), (A: Da; B: PT; C: Macro; D: Micro y E: θ -TLO).

El muestreo optimizado por medio del programa SANOS 0.1 demostró que para todas las propiedades en estudio no se obtiene el mismo esquema de muestreo, indicando diferentes puntos de muestreo para cada una de las propiedades. No obstante, son necesarios más estudios para la determinación de la correlación entre las diferentes propiedades físicas del suelo favoreciendo el muestreo optimizado del suelo de manera conjunta. Por lo tanto, el muestreo determinado por medio del templado simulado espacial (SSA) indica diferentes localizaciones de muestreo para cada una de las propiedades físicas del suelo, dificultando el proceso de muestreo en campo, pues distintos muestreos deben ser realizados para determinar cada una de las propiedades de interés agrícola. Pues bien, este es un nuevo campo para la agricultura de precisión: integrar y correlacionar el número ideal de muestras y los puntos de muestreo para las

propiedades del suelo. Por otro lado, también es preciso comprender porque cada una de las distintas propiedades del suelo presenta un número distinto de muestras optimizadas por medio del programa SANOS 0.1.

Paralelamente, el programa SANOS 0.1 utiliza la varianza del krigeado ordinario para optimizar el diseño del muestreo. En este punto existe gran controversia entorno del uso de la varianza del krigeado como medida para incertidumbre local. Goovaerts, (1997) describe que la varianza del krigeado depende de la configuración espacial de los datos y no de su valor. Como consecuencia, para un semivariograma dado se obtiene la misma varianza de krigeado para dos idénticas configuraciones espaciales de los puntos de observación, independientemente de los valores observados en cada punto. De esta manera, la optimización del muestreo por medio del programa SANOS 0.1 puede indicar locales ideáis para la colecta de muestras, pero estas muestras pueden no representar la variabilidad espacial con la fiabilidad obtenida en el muestreo original con 302 puntos de muestreo.

4.- Conclusiones

La optimización del muestreo de propiedades físicas del suelo por medio de la utilización de herramientas estadísticas y geoestadísticas demostró que el número de muestras puede ser disminuido en ambas las metodologías utilizadas en este estudio, respecto al número de muestras tomadas inicialmente. El muestreo optimizado por medio de la Fórmula de Cline presenta un menor número de muestras cuando se compara al muestreo optimizado por medio del programa SANOS 0.1, pero en este caso el número de muestras es determinado utilizando solamente parámetros estadísticos y no considera la correlación entre las muestras en el área de estudio. El muestreo de las propiedades físicas del suelo por medio del algoritmo de análisis de simulación espacial realizada por medio del programa SANOS 0.1 se presentó como una buena herramienta para la determinación del número de puntos de muestreo optimizados para el área de estudio por considerar las coordenadas geográficas de las muestras con el criterio de minimizar la varianza media del krigeado ordinario en el área de estudio. La optimización del muestreo realizada por medio del programa SANOS 0.1 no optimiza los puntos de muestreo para el análisis de varias propiedades conjuntamente, provocando la utilización de un esquema de muestreo diferente para cada propiedad del suelo, dificultando el proceso de muestreo del suelo, al no favorecer que las muestras sean recogidas en los mismos puntos.

Bibliografía

Ayres, M.; Ayres Junior, M.; Ayres, D.L.; Santos, A.S. 2003. *BioEstat 3.0: aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e*

- médicas*. Sociedade Civil Mamirauá; CNPq. Brasília, 290p.
- Bertolani, F.C.; Vieira, S.R. 2001. Variabilidade especial da taxa de infiltração de água e da espessura do horizonte A, em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes usos. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:987-995.
- Bouma, J.; Stoorvogel, J.; Alphen, van B.J.; Booltink, H.W.G. 1999. Pedology, precision agriculture, and the changing paradigm of agricultural research. *Soil Sc. Soc. Am. J.*, 63 (6):1763-1768.
- Camargo, O.A., Moniz, A.C; Jorge, J.A.; Valadares, J.M.A.S. 1986. *Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas*. Instituto Agronômico. Campinas. 94p. (Boletim Técnico nº 106).
- Cline, M.G. 1944. Principles of soil sampling. *Soil Sci.*, 58 (2):275-288.
- Costa, F.S.; Albuquerque, J.A.; Bayer, C.; Fontoura, S.M.V.; Wobeto, C. 2003. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. *R. Bras. Ci. Solo*, 27(3):527-535.
- FAO. 1994. *Soil map of the World*. Revised Legend. FAO. Rome.
- Fisher, R.A. 1990. *Statistical methods and scientific inference* (1956). Oxford. University Press. Oxford.
- Gomes, F.P. 1990. *Curso de estatística experimental*. 13.ed. Nobel. Piracicaba. 430p.
- Goovaerts, P. 1997. *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press. New York.
- Grego, C.R.; Vieira, S.R. 2005. Variabilidade especial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:169-177.
- Isaaks, E.H.; Srivastava, R.M. 1989. *An introduction to applied geostatistics*. Oxford University Press. New York. 561p.
- McBratney, A.B.; Webster, R. 1983. How many observations are needed for regional estimation of soil properties? *Soil Sci.*, 135(3):177-183.
- Montanari, R.; Marques Junior, J.; Pereira, G.T.; Souza, Z.M. de. 2005. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Pesq. Agropec. Bras.*, 40(1):69-77.
- Mulla, D.J. y McBratney, A.B. 2002. Soil spatial variability. 343-373 pp. En: A.W. Warrick. *Soil physics companion* (ed.). CRC Press.
- Nielsen, D.R.; Tollotson, P.M.; Vieira, S.R. 1983. Analysing field-measured soil-water properties. *Agric Water Manage.*, 6:93-109.
- Ramírez, A.A.; López, R.G. 1993. *El agua em el Suelo*. In: Mañas, F.M.S.O.; Valero, J.A. *Agronomia del riego*. Mundi-Prensa. Madrid. p.19-69.
- Schueller, J.K. 2000. A Agricultura de precisão: visão externa. O estado-da-arte da agricultura de Precisão nos Estados Unidos. In: Balastreire, L. A. *O estudo da arte da agricultura de precisão no Brasil*. ESAQ-USP. Piracicaba, p. 8-16.
- Souza, Z.M. de., Marques Junior, J.; Pereira, G.T.; Montanari, R. 2006. Otimização amostral de atributos de latossolos considerando aspectos solo-relevos. *Ciênc. Rural*, 36 (3):829-836.
- Souza, Z.M.; Marques Júnior, J.; Pereira, G.T. 2004. Variabilidade espacial de atributos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:937-944.
- Souza, Z.M.; Martins Filho, M.V.; Marques Júnior, J. Pereira, G.T. 2005. Variabilidade espacial de fatores de erosão em Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. *Eng. Agri.*, 25 (1):105-114.
- SURFER for windows. 1999. *Realese 7.0. Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers. User's guide*. Golden Software. New York. 619p.
- Van Groenigen, J.W. 2000. Sanos 0.1 for Windows 95.
- Van Groenigen, J.W.; Siderius, W.; Stein, A. 1999. Constrained optimisation of soil sampling for minimization of the kriging variance. *Geoderma*, 87:239-259.
- Vieira, S. R.; Hatfield, J. L.; Nielsen, D. R.; Biggar, J. W. 1983. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. *Hilgardia*, 51 (3):1-75.
- Vieira, S.R. 2000. *Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo*. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V.H., SCHAEFER, G.R. (ed.) *Tópicos em Ciência do solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa. p. 1-54.
- Webster, R. 2000. Is soil variation random? *Geoderma*, 97:149-163.
- Webster, R.; Oliver, M.A. 1990. *Statistical methods in soil and land resource survey*. Oxford University Press. Oxford. 316p.
- Zimback, C.R.L. 2001. Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo. Tese de Livre Docência, UNESP, Botucatu.