

LA GEOSTADÍSTICA EN EL ESTUDIO DE LA VARIACIÓN ESPACIAL DE LA FERTILIDAD DEL SUELO MEDIANTE EL USO DEL INTERPOLADOR KRIGING^{1/}

Carlos Henríquez^{2/}, Randy Killorn^{**}, Floria Bertsch*, Freddy Sancho**

Palabras clave: Geoestadística, Kriging, SIG, interpolador, uso del suelo, manejo agronómico, distribución espacial, georeferenciación.

Keywords: Geostatistics, Kriging, GIS, interpolator, soil use, agronomic management, spatial distribution, geo referencing.

Recibido: 09/03/05

Aceptado: 19/05/05

RESUMEN

Con el objetivo de evaluar el impacto que tiene el uso del suelo sobre algunas propiedades de fertilidad del suelo y la forma como estas se distribuyen espacialmente, se realizó el presente trabajo, en un suelo Typic Hapludands, en 3 lotes dedicados a caña de azúcar, café y bosque secundario. Se llevó a cabo un muestreo de suelos en un diseño de cuadrícula, con puntos georeferenciados cada 40 m, para un total de 38 muestras. Los resultados del análisis químico de los suelos fueron interpolados usando el análisis geoestadístico Kriging; los datos también fueron analizados a través de la estadística tradicional, en forma total y por áreas de manejo. Con los datos interpolados se generaron mapas, los cuales presentaron una alta correspondencia entre las áreas de uso de suelo y el grado de variación de las propiedades evaluadas. La caña de azúcar mostró valores bajos de Ca, Mg, K y P, lo cual estuvo ligado a la alta extracción y baja recuperación de estos elementos al suelo. El cultivo del café mostró valores mayores de Ca, Mg, K y P, producto de una fertilización intensa, así como una tendencia a valores mayores de acidez intercambiable, producidos por la intensa fertilización nitrogenada. El área con bosque mostró valores entre la caña de azúcar y el café. La estadística

ABSTRACT

Geostatistics applied to the study of the spatial variation of soil fertility using Kriging.

The objective of this work was to evaluate the impact of soil management on some soil fertility properties and their spatial distribution. The study was conducted on 3 lots of a Typic Hapludands soil, dedicated to forest, sugar cane and coffee. Soil sampling was carried out using a regular grid with 38 geo-referenced points 40 m from each other. Data were interpolated using Kriging and analyzed by traditional statistics as well. Maps made from interpolated data showed correspondence between the type of management and the variation of evaluated chemical properties on space. Sugar cane soil had the lowest values on Ca, Mg and K, which was related to a highest absorption and low recuperation by fertilization of those nutrients to the soil. Coffee soil had the highest values of P, Ca, Mg and K due to the intensive fertilization practice, as well as a tendency to higher exchangeable soil acidity due to heavy N fertilization. The forest area had values between sugar cane and coffee. The traditional statistics analysis detected these general differences, but lacked the capacity for showing the changes on the spatial level and the gradient in concentration of the elements as

1/ Parte de la tesis de Ph.D. del primer autor presentada en Iowa State University. Investigación financiada con fondos del INPOFOS.

2/ Autor para correspondencia. Correo electrónico: carlosh@cariari.ucr.ac.cr

* Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

** Iowa State University, USA.

tradicional detectó estas diferencias generales por lotes, aunque no tuvo la capacidad de mostrar los cambios en el espacio y las gradientes de concentración existentes. Se concluye que la distribución espacial de las características químicas, ligadas a la fertilidad del suelo, estuvo fuertemente ligada al manejo agronómico y que el interpolador demostró ser útil para predecir la distribución de las propiedades de fertilidad en el paisaje.

INTRODUCCIÓN

La utilización de los sistemas de información geográfica (SIG) en diversos campos del quehacer humano, se ha incrementado en los últimos años demostrando ser una herramienta muy útil en la toma de decisiones (Burrough y McDonnell 1998). En la agricultura se ha aplicado en áreas como el control de enfermedades, contaminación de suelos, entomología, nematología y fertilidad de suelos, entre otras (Petersen *et al.* 1995). Uno de los aspectos de mayor utilidad ha sido el estudio de la variabilidad espacial de suelos y la predicción de valores en puntos no muestreados a través del uso de las interpolaciones, herramienta SIG muy utilizada en conjunto con las metodologías de muestreo. En particular, la interpolación con análisis geoestadístico se basa en la teoría de las variables regionalizadas y en su dependencia y autocorrelación, bajo un marco de variabilidad espacial (Trangmar *et al.* 1985). Burrough y McDonnell (1998), mencionan que la variación de las características del suelo a través del espacio físico o paisaje, es causada por muchos factores tanto propios del suelo como externos al mismo. Los más estudiados han sido las variaciones internas del suelo causadas por el material parental, como es el caso de cambios litológicos a través de un área determinada. La otra fuente de variación es la provocada por cambios que ocurren en el tiempo y que son provocados en gran medida por el manejo debido al tipo de uso del suelo (Bertsch *et al.* 2002). Lo anterior ha permitido la implementación del concepto de manejo por sitio específico, apoyado en el uso de mapas

well. It was concluded that spatial distribution of the soil fertility properties was strongly related to that the agronomic management and that the interpolation analysis was reliable and useful for predicting this landscape distribution.

cloropléticos, los cuales modelan dicha variación en forma de un conjunto de cuerpos geográficos discretos que se separan entre sí por discontinuidades o límites (Jenkins *et al.* 2000, Schepers *et al.* 2000). Tradicionalmente, esta variación entre unidades de muestreo ha sido detectada a través de muestreos, con la consecuente identificación de los límites estimados de esas unidades en el espacio. Para ello se ha utilizado muestras compuestas por lotes, en algunos casos se ha realizado en forma de puntos aleatorios y en otros en forma de puntos de monitoreo (Henríquez y Cabalceta 1999). Esta técnica tiene el defecto de subestimar o sobreestimar los resultados de los análisis a un valor único o promedio, sin tomar en cuenta su variación en el espacio real. En los últimos años y debido a la facilidad de muestreo y análisis, se ha intensificado el uso de diferentes tipos de interpolaciones, como una herramienta para la caracterización real de la variación espacial. A diferencia de los modelos de interpolación matemática como el IDW (inverse distance weighting) o el SPLINE, el Kriging (en mención a su creador) es un método geoestadístico, el cual se fundamenta en las variables regionalizadas y autocorrelacionadas (Demmers 1999, Mueller *et al.* 2004). Por medio de los interpoladores es posible representar diversas propiedades del suelo en forma continua y cuantificar la importancia de esta variación sobre el consecuente manejo a aplicar (Cerri *et al.* 2004). Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el impacto que tiene el manejo agronómico sobre algunas propiedades de fertilidad del suelo y la forma en que estas propiedades se distribuyen espacialmente en correspondencia a este manejo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se llevó a cabo en la Hacienda Juan Viñas (9°55'N y 83°44'W), cantón Jiménez, provincia de Cartago en un Typic Hapludands. El área total fue de 8,4 ha subdividida en 3 lotes dedicados por más de 20 años a los cultivos de caña de azúcar, café y un área de bosque secundario. En dicha área se llevó a cabo un muestreo en diseño de cuadrícula regular (5x8) con puntos georeferenciados cada 40 m para un total de 38 muestras. En la figura 1 se muestra 2 puntos perdidos que no se pudieron muestrear.

Las muestras fueron analizadas con base en la metodología de Díaz-Romeu y Hunter (1978). Las variables químicas Ca, Mg y acidez intercambiable fueron extraídas con la solución KCl 1M en tanto que para P y K se utilizó Olsen Modificado 1M (pH 8,5) en una relación suelo solución 1:10. El pH fue determinado en agua (relación 1:2,5) y la materia orgánica (MO) a través de la oxidación con dicromato de potasio

(Henríquez y Cabalceta 1999). Los resultados del análisis químico fueron analizados a través de la estadística tradicional en forma de lote completo y también por áreas de manejo. Los datos de los análisis de cada muestra georeferenciada, fueron también interpolados usando Kriging. El análisis geoestadístico se fundamenta en lo siguiente:

$$Z(x) = m(x) + \varepsilon'(x) + \varepsilon''$$

donde $Z(x)$ corresponde a la variación espacial encontrada, $m(x)$ es el componente estructural o función determinística, $\varepsilon'(x)$ es la variable regionalizada o semivarianza y ε'' es el error no correlacionado espacialmente. Es importante recalcar que el análisis de interpolación se basa en la teoría de las variables regionalizadas y autocorrelacionadas en el espacio. Esta autocorrelación se determina a partir de la elaboración de semivariogramas con los cuales se logra definir el modelo de mejor ajuste para proceder luego a

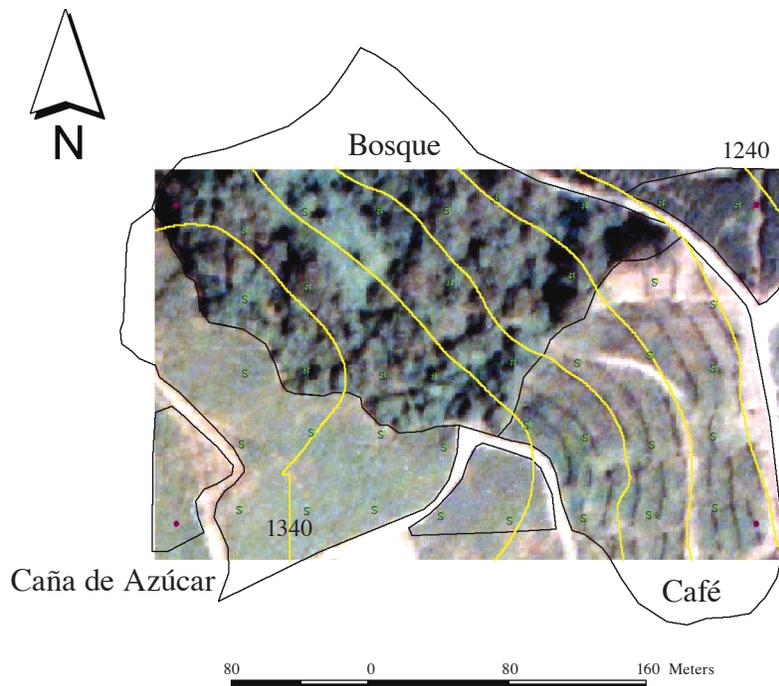


Fig. 1. Fotografía aérea con la ubicación de los puntos de muestreo en el área de estudio en Juan Viñas, Costa Rica.

la interpolación y en el cual se define la distancia máxima o “rango” en donde finaliza la autocorrelación (Demmers 1999). Una vez obtenidos los resultados de la interpolación, se elaboraron los mapas correspondientes para visualizar la variación espacial de las variables estudiadas.

También se analizó la variación en el paisaje modelando un recorrido lineal. Este se elaboró tomando los resultados de los análisis químicos y representándolos en un gráfico unidimensional que atravesara el campo y por ende las diferentes áreas de manejo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La estadística preliminar de los resultados de las variables de fertilidad de suelo, en las 8,4 ha del ensayo, se presenta en el cuadro 1. Al analizar las variables de fertilidad del suelo de las muestras del área total, se encontró un alto porcentaje de variación, lo que sugirió que existía una alta variabilidad intrazonal. Estos resultados son respaldados por de la existencia de 3 sub-áreas de diferente manejo agronómico, café, caña de azúcar y bosque, las cuales habían estado con ese uso por más de 20 años y que podrían provocar este alto coeficiente de variación.

Con base en los resultados en el cuadro 1, se procedió a analizar los datos separados por lotes correspondientes al tipo de uso, con el fin de estudiar el efecto que tenía el manejo agrícola

sobre la dispersión de las variables evaluadas. Los resultados del análisis químico obtenido, junto con los niveles definidos como críticos se presentan en el cuadro 2. Se encontró diferencias significativas entre los 3 diferentes lotes para las variables analizadas. Dichos resultados demostraron que partiendo de la premisa que la génesis del suelo del área de estudio es la misma, las diferencias encontradas entre las áreas fueron principalmente debidas al manejo agronómico sostenido por más de 20 años y en forma diferenciada en cada uno de los lotes, lo cual concuerda con lo propuesto por Trangmar *et al.* (1985) y Van Groenigen (2000).

En el área dedicada al cultivo de la caña de azúcar se encontró una fertilidad de suelo baja, con contenidos de bases por debajo de los límites considerados como críticos según los valores establecidos (Cuadro 2). Esto se explica por qué la caña es un cultivo altamente extractor, que aunado al sistema actual de producción bianual, que recibe una reposición de nutrientes moderada, ha ocasionado descensos importantes en los contenidos de Ca, Mg, K y P. El lote utilizado para el cultivo del café, mostró valores de fertilidad mas favorables aunque con mayor acidez debido a una fertilización mayor (Bertsch *et al.* 2002). El suelo dedicado al bosque mostró valores intermedios entre la caña y el café (Cuadro 2).

En todas las variables químicas del suelo, excepto para el pH, se encontró diferencias entre los lotes de manejo. Con relación a esto último se

Cuadro 1. Estadística general de las variables de fertilidad evaluadas en toda el área de estudio (n=38).

Variable	Media	Mínimo	Máximo	Desv. Std.	Varianza	% Variación
P	5,28	1,50	19,77	4,21	17,73	80
pH	5,36	4,29	5,98	0,38	0,14	7
Ca	4,82	0,72	14,40	4,20	17,66	87
Mg	1,39	0,14	5,39	1,40	1,96	100
K	0,24	0,03	0,97	0,21	0,04	83
Acidez	1,42	0,25	5,38	1,26	1,59	89
M.O.	6,74	1,19	20,21	4,38	19,20	65

n=38

Cuadro 2. Propiedades químicas evaluadas (0-20 cm) y niveles críticos en los 3 sistemas de manejo en un Typic Hapludand. Juan Viñas, Costa Rica.

Áreas	P	pH H ₂ O	Ca	Mg	K	Acidez	M.O.
	mg kg ⁻¹						
Caña azúcar (n=11)	5,2 b	5,5	1,7 b	0,42 c	0,15 c	0,7 b	11,72 a
Café (n=14)	11,6 a	5,4	7,2 a	1,49 b	0,46 a	1,7 a	6,96 b
Bosque (n=13)	3,9 b	5,4	8,4 a	3,04 a	0,27 b	1,1 a	7,40 b
significancia	**	ns	**	**	**	*	**
Nivel crítico ^{1/}	>10	>5,5	>4	>1	>0,2	<0,3	no aplica

ns no significativo

* $P \leq 0,05$

** $P \leq 0,01$

^{1/} Según Bertsch (1995), los tratamientos con la misma letra son similares de acuerdo a la prueba DMS a $p < 0,05$.

confirma, el alto potencial buffer en pH que tienen estos suelos de origen volcánico ricos en Alofana, arcilla aluminosilicática de característica amorfa que impide cambios abruptos en esta variable en el suelo (Henríquez y Cabalceta 1999).

Hasta este punto se confirma la eficiencia de las metodologías tradicionales de muestreo y que la aplicación de la estadística tradicional fue capaz de separar los lotes con base en el manejo o tipo de cultivo, lo cual ocurre aplicando los criterios tradicionales de unidades de muestreo (Henríquez y Cabalceta 1999). Pese a lo anterior, el muestreo tradicional no es capaz de ofrecer una visión espacial de esta variación, presuponiendo que toda el área muestreada

posee el mismo valor promedio para las variables de interés, lo cual no es del todo cierto. Al llevar a cabo el análisis geostadístico se encontró que las variables de fertilidad evaluadas para este suelo están autocorrelacionadas y que en realidad en el espacio se establecen gradientes de los valores para estas variables. Para efectos representativos, se muestra en la figura 2 el semivariograma obtenido para el contenido de Mg intercambiable. En dicha figura se define claramente una variación natural (o “nugget”) y un “rango” de aproximadamente 230 m hasta donde esta variable está autocorrelacionada.

En el cuadro 3 se resumen los resultados del análisis geostadístico y el tipo de modelo

Cuadro 3. Parámetros de los semivariogramas para algunas variables de fertilidad seleccionadas utilizando el modelo Kriging y co-Kriging (este último entre la variable y el tipo de uso del suelo).

Variable	Modelo	Nugget Co	Sill Co+C	Rango Ao	r ²
Ca *	Circular	0,010	3,29	228,70	0,87
Mg *	Circular	0,0010	1,23	208,30	0,90
K *	Circular	0,00010	1,21	610,90	0,96
Acidez *	Circular	0,0010	1,054	206,50	0,89
P	Gausiano	14,30	69,60	240,80	0,98
M.O.	Gausiano	10,53	27,24	134,00	0,96

Nugget: varianza de discontinuidad espacial debida al error de medición o microvariabilidad.

Sill: umbral máximo de la semivarianza.

Rango Ao: rango de dependencia espacial donde se alcanza el sill.

* se realizó co-kriging con respecto a la variable área de manejo.

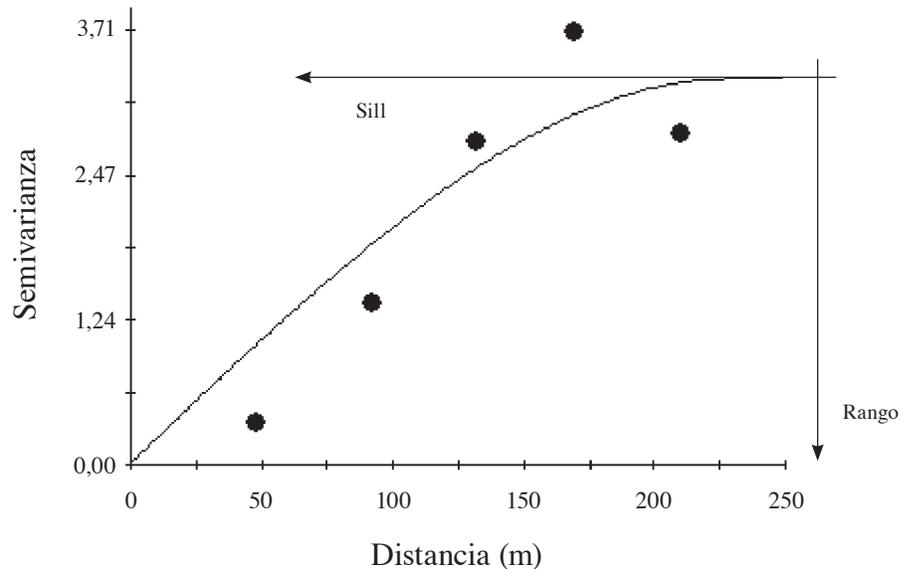


Fig. 2. Semivariograma para la variable Mg en el suelo a partir de toda el área de estudio (Parámetros de la ecuación se presentan en el Cuadro 3).

utilizado para la interpolación (utilizado para el semivariograma) para cada unidad con relación a las variables de fertilidad estudiadas. Se puede observar que en todos los casos el rango (Ao en m) sobrepasó la distancia mínima de muestreo utilizada en este estudio la cual fue de 40 m sugiriendo una adecuada distancia de muestreo (Van Groenigen *et al.* 2000). En todos los casos fue posible encontrar el valor crítico del “rango” con el que se obtiene el punto de máximo valor en la covarianza o “sill”, condición obligatoria para obtener un adecuado semivariograma (Demmers 1999).

Los datos de r^2 de los análisis de regresión realizados para las variables de fertilidad presentadas en el cuadro 3 mostraron valores mayores a 0,8, lo cual fue tomado como una referencia aceptable para representar en el semivariograma el comportamiento de los datos con base en el modelo. En la figura 3 se presenta los mapas interpolados para las variables de fertilidad evaluadas luego de realizar el análisis de Co-Kriging.

Los mapas de la figura 3, representan espacial y visualmente resultados similares a los observados en el cuadro 1, con la diferencia de poder detectar en cada una de las áreas de manejo, no un valor único sino gradientes de concentración que representarían el comportamiento que ocurriría normalmente en la naturaleza. En este caso es necesario coincidir en forma aproximada los límites de las áreas de manejo presentadas en la figura 1 con el área total representada en el la figura 3.

De esta forma, las tendencias encontradas y discutidas anteriormente con referencia a los lotes de caña de azúcar, café y bosque se logran representar en los mapas interpolados. Lo anterior sugiere un manejo a nivel de sitio específico aún a nivel de áreas por cultivo y dentro de cada lote, identificando zonas dentro de cada lote con limitaciones importantes que afecten el rendimiento (Bertsch *et al.* 2002).

Adicionalmente, con los datos obtenidos se realizó una simulación de recorrido lineal sobre

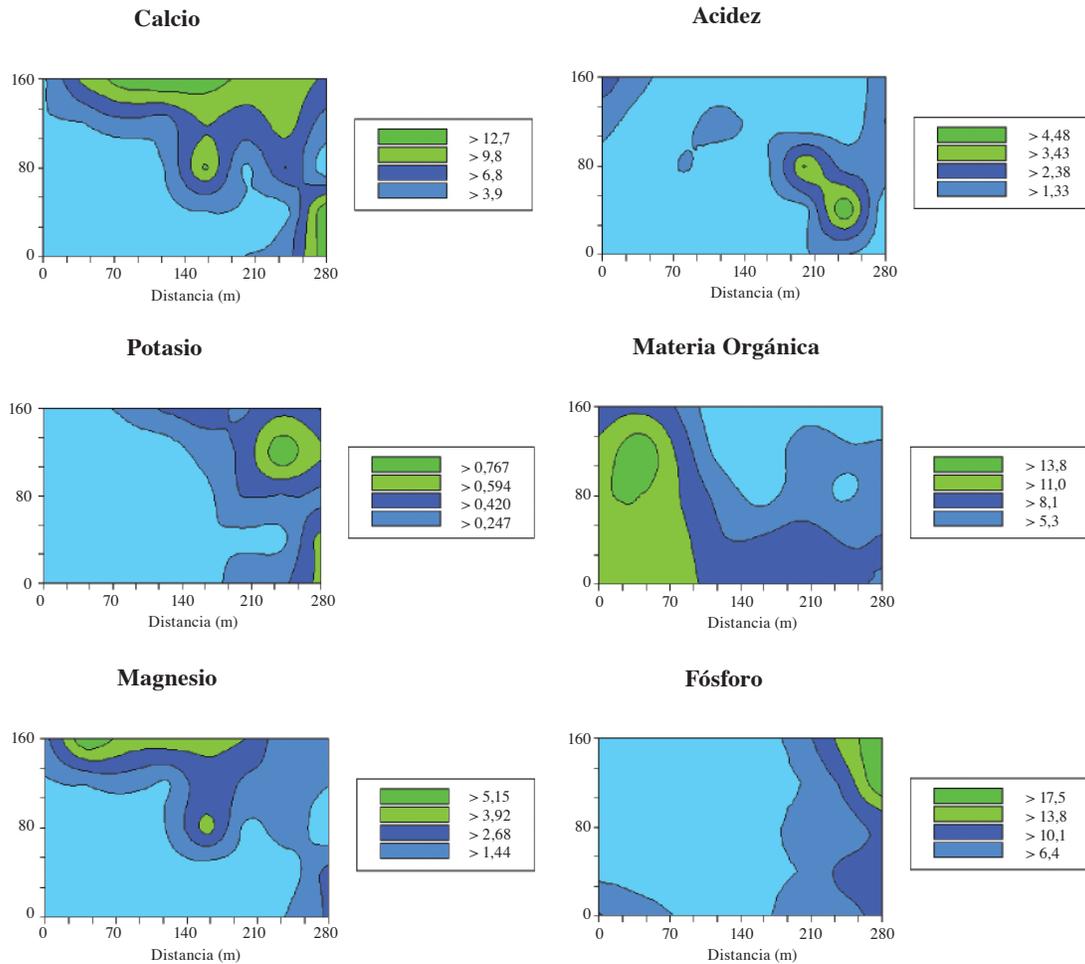


Fig. 3. Mapas interpolados con Co-Kriging para las variables de fertilidad en un Andisol de Costa Rica.

el campo, con el fin de medir la distribución en el espacio de algunas características en forma lineal. El análisis de este recorrido a través de las 3 áreas de manejo mostró un patrón similar al representado por los mapas interpolados. El café mostró los valores mayores en las variables de fertilidad Ca, Mg y K (Figura 4). Todo lo anterior apoya la teoría de la geoestadística o de variables regionalizadas, sobre su dependencia o autocorrelación en el espacio con otras variables como cultivo y tipo de suelo (Burrough y McDonnell 1998, Demmers 1999).

En resumen, tanto la utilización del muestreo al azar como del muestreo sistemático en cuadrícula, demostró ser útil para medir el impacto de las prácticas agronómicas de manejo en las propiedades químicas del suelo. Estas prácticas referidas a la fertilización y enalado, no solo en su cantidad sino en su frecuencia, modificaron en forma selectiva las áreas de cultivo estudiadas.

Como comentario final, se puede decir que a pesar de la valiosa información adicional que proporciona el uso de las interpolaciones para el

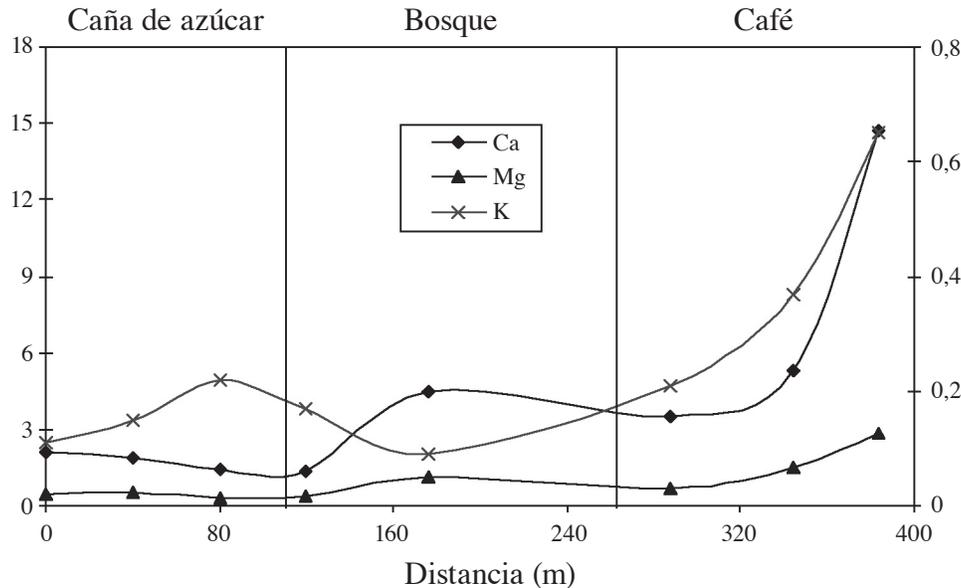


Fig. 4. Recorrido lineal para las variables Ca, Mg y K en un Andisol, Juan Viñas, Costa Rica.

mejor entendimiento del estado de las variables naturales en los sistemas, el principal limitante sigue siendo el alto número de muestras requeridas para llevar a cabo el análisis geoestadístico y el software necesario para generar los mapas. Pese a ello y con base en información obtenida en otros países es posible sugerir el muestreo como una inversión futura que permitirá optimizar el uso de los recursos en los sistemas productivos (Petersen *et al.* 1995, Demmers 1999). Se concluye que la distribución espacial de las características químicas asociadas a la fertilidad del suelo, estuvo fuertemente ligada al manejo agronómico y que la herramienta de interpolaciones demostró ser útil para predecir esta distribución en el paisaje.

LITERATURA CITADA

BERTSCH F., HENRÍQUEZ C., RAMIREZ F., SANCHO F. 2002. Site-specific nutrient management in the highlands of Cartago province. *Better Crops International* 16(1): 16-19.

BERTSCH F. 1995. La fertilidad de suelos y su manejo. ACCS. San José, Costa Rica. 157 p.

BURROUGH P.A., MCDONNELL R.A. 1998. Principles of geographical information systems. Oxford University. 333 p.

CERRI C.E., BERNOUX M., CHAPLOT V., VOLKOFF B., VICTORIA R.L., MELILLO J. M., PAUSTIAN K., CERRI C.C. 2004. Assessment of soil property spatial variation in an Amazon pasture: basis for selecting an agronomic experimental area. *Geoderma* 123(1/2): 51-68.

DEMMERS M.N. 1999. Fundamentals of geographic information systems. 2 ed. Wiley. 498 p.

DÍAZ ROMEU R., HUNTER A. 1978. Metodología de muestreo de suelos. Análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigaciones en invernadero. CATIE. Turrialba, Costa Rica, Boletín.

HENRÍQUEZ C., CABALCETA G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. San José, Costa Rica. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, UCR/CIA-ACCS. 60 p.

JENKINS J.R., CROUSE D.A., MIKKELSEN R.L., HEINIGER R.W. 2000. Spatial variability of

- phosphorus retention capacities for various fields. *In*: Proceedings of the fifth international conference on precision agriculture. P.C. Robert, R.H. Rust and W.E. Larson (eds). ASA-CSSA-SSSA, Madison, WI.
- MUELLER T.G., PUSULURI N.B., MATHIAS K.K., CORNELIUS P.L., BARNHISEL R.I., SHEARER S.A. 2004. Map quality for ordinary kriging and inverse distance weighted interpolation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68:2042-2047.
- PETERSEN G.W., BELL J.C., MCSWEENEY K., NIELSEN G.A., ROBERT P.C. 1995. Geographic information systems in agronomy. *Advances in Agronomy* 55: 67-105.
- SCHEPERS J.S., SCHLEMMER M.R., FERGUSON R.B. 2000. Site specific considerations for managing phosphorus. *J. Environ. Qual.* 29: 125-130.
- TRANGMAR B.B., POST R.S., UEHARA G. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Advances in Agronomy* 38:45-94.
- VAN GROENIGEN, GANDAH M., BOUMA J. 2000. Soil sampling strategies for precision agriculture research under Sahelian conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 1674-1680.