



GEOESTADÍSTICA EN LA PRODUCCIÓN INTEGRADA DE FRUTAS EN EL NORDESTE DE BRASIL

GEOSTATISTIC IN THE INTEGRATED PRODUCTION OF FRUITS IN THE NORTHEAST OF BRAZIL

Fecha de recepción: 14 de diciembre de 2009 / Fecha de aprobación: 30 de agosto de 2010

Édson Luis Bolfe, João Bosco Vasconcellos Gomes, Humberto Rollemberg Fontes

Resumen

El objetivo de este estudio es mapear las variaciones espaciales del suelo de área con producción integrada de frutas en el nordeste de Brasil por medio de técnicas geoestadísticas. El área de estudio posee 35,98 ha con cocotero irrigado por microaspersión. Se realizó la recolección de datos por medio de atributos físico-químicos del suelo (tenor de arcilla, granulometría, C orgánico, pH agua, P, Ca+Mg, K, Na, Al, SB y CTC) en 93 puntos muestrales. Los datos fueron asociados a las coordenadas geográficas locales por GPS. Después se efectuó el ajuste matemático por semivariogramas en el aplicativo *Surfer 8.0*, se definieron los parámetros: efecto pepita (C_0); alcance de la dependencia espacial (A_0); nivel (C_0+C_1) y el grado de dependencia espacial ($C_0/(C_0+C_1)$). Del mismo modo, se elaboraron mapas de isóneas de atributos a partir del interpolador geoestadístico de *kriging*. Los resultados obtenidos indican el predominio de atributos con elevado grado de heterogeneidad. El análisis de la relación $C_0/(C_0 + C_1)$ reveló grado de dependencia espacial de moderado a fuerte en los atributos analizados. De esa forma, se establecieron dos unidades de manejo para el área, las cuales exigen prácticas de irrigación y de abono diferenciadas.

Palabras claves: modelaje geoespacial, suelo, sostenibilidad, recursos naturales, SIG.

Abstract

The objective of this work was initially to assess spatial variations of soils integrated production fruits in the northeast of Brazil in geostatistics techniques. The study area owns 35.98 ha with coconut palm irrigated by micro-aspersion. The collection of data of physical and chemical attributes of the soil was realized (clay of soils, particle-size-distribution, organic C, pH water, P, Ca+Mg, K, Na, To, SB and CTC) in 93 points samples. The obtained datas were associated to the geographical coordinates by GPS. After the mathematical adjustment for the semi-variogram models in software *Surfer 8.0*, defining the parameters: effect nugget (C_0); reach of the spatial dependence (A_0); platform (C_0+C_1) and the spatial dependence degree ($C_0/(C_0+C_1)$). Finally, the elaboration of contouring maps was performed by the kriging interpolator geoestatistic method. The results indicate the attributes with high degree of heterogeneity predominate. The ratio $C_0/(C_0+C_1)$ analysis revealed a moderate to strong degree of spatial dependency. Two management units were established for the study area, which require differentiated water and soil management practices.

Key Words: spatial modeling, soil, sustainable, natural resources, GIS.



1. Introducción

La necesidad de competitividad de los productos agrícolas dentro de una economía globalizada y la sostenibilidad ambiental direccionan el sector agrícola mundial, en especial el de la fruticultura, en la búsqueda de alternativas tecnológicas que visan un mayor control de las informaciones de producción, proporcionando mayor eficiencia en la utilización de insumos, servicios y, principalmente, de los recursos naturales como el agua y el suelo. El Ministerio de la Agricultura, Pecuaria y Abastecimiento vienen intensificando acciones en la construcción de una filosofía de producción de fructíferas en la que se considere calidad del producto y sostenibilidad de la producción. Para Andrigueto & Kososki [1], esa filosofía se denomina producción integrada (PI) de frutas y encuentra en la producción de la manzana su ejemplo más avanzado en el país. En el nordeste están siendo desarrolladas diferentes acciones en PI, en el estado de Sergipe se destacan actividades de la PI del coco (*Cocos nucifera* L.), concentradas, de forma experimental, en parcelas empresariales del perímetro irrigado del Platô de Neópolis.

En esas parcelas existe la necesidad del conocimiento detallado sobre los suelos en su ambiente, posibilitando el paulatino desarrollo de técnicas de manejo (de convivencia o correctivas) correspondientes con las limitaciones ambientales existentes y al mismo tiempo contribuyendo con la maximización del retorno financiero de la actividad (Resende et al.) [2]. Sin embargo, la variabilidad de los suelos en las áreas agrícolas, no es considerada por las empresas agrícolas, que optan, por razones de simplificación, en aplicar prácticas homogéneas de manejo del suelo para el total del área cultivada. Esa práctica puede ocasionar intervenciones de insumos o de irrigación abajo o arriba de la real necesidad de cada parte del cultivo, elevando los costos de producción y a largo plazo ser una fuente potencial de contaminación de aguas superficiales y subterráneas.

Conocer la variabilidad espacial de los atributos del suelo que controlan la productividad de las culturas es un factor indispensable en la instalación de un programa de agricultura de precisión. Existen varias técnicas disponibles para conocer tal variabilidad, tales como: levantamiento de los suelos, muestreo del suelo, utilización de sensores, técnicas sensoriales re-

motas o, aun, utilización de modelos de simulación (Corá et al.) [3].

El reconocimiento de la importancia de la variabilidad espacial de propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo para uso agrícola y la utilización del geoprocesamiento está incrementando de manera importante el número de estudios en esta temática. Según Queiroz et al. [4], el modelaje geoespacial, por medio de la técnicas de geoestadística, permite la descripción cuantitativa de la variación espacial del suelo y la estimación notendenciosa de la varianza mínima de valores de las propiedades, en puntos no muestreados, subsidiando la construcción de mapas de valores y la identificación de esquemas de muestreos eficientes.

En este orden de ideas, este estudio pretende mapear las variaciones espaciales de las características y la potencialidad ambiental de los suelos de un área conducida con la cultura del coco en el nordeste de Brasil, por medio de un modelo geoespacial de las propiedades químicas de este tipo de suelo, evaluando su importancia para la toma de decisiones en el ámbito de la actividad productiva en un sistema de producción integrada de frutas.

2. Materiales y metodología

2.1 Área de estudio

El área de estudio está ubicada en el perímetro irrigado de Neópolis (Neópolis, SE), entre las coordenadas 8.853.300 y 8.854.200 m N y 749.200 y 750.100 m E (24L), en la propiedad de la empresa Frutese. El clima de la región es del tipo As' (según Köppen), que corresponde al clima tropical lluvioso con verano seco, donde la estación lluviosa se adelanta para el otoño, antes del invierno (abril a julio). La temperatura media anual es de 25,6 °C, con precipitación media anual de 1.181 mm (Posto Pacatuba). Los paisajes comprenden en la cima planos a casi planos de elevaciones de tableros costeros (sedimentos de la Formación Barreras, de la edad Terciaria), con vegetación nativa entre cerrada y floresta subcaducifolia (Embrapa) [5].

Son 35,98 ha plantadas con coquero enano de 7 años de edad, irrigados por microaspersión. El cultivo de cocotero enano es el principal produc-

to del perímetro, presentando un área plantada de 1.874 ha y una producción de 41.500.000 frutos en el año 2005. El manejo de esos plantíos incluye el uso de abonos, a veces vía irrigación, calajes y aplicación de pesticidas. Las productividades alcanzadas en el perímetro pueden ser consideradas bajas para la cultura bajo régimen de irrigación, con plantaciones que presentan problemas en el manejo de agua, nutrientes e inconvenientes fitosanitarios.

2.2. Mapeamiento, coleta y análisis de suelos de las muestras

El mapeo fue realizado por medio de recorridos de área, con la observación de los suelos ocurrentes por medio de 93 microtrincheras. La variabilidad de los suelos del área exigió la descripción de cuatro perfiles (perfiles modales). Los suelos y las unidades de mapeo fueron identificados conforme a la nomenclatura del Sistema Brasileño de Clasificación de Suelos (Embrapa) [6].

Las microtrincheras fueron ubicadas en las entrelíneas del plantío y engloban, además de la clasificación del suelo, la descripción del relieve (declividad y posición en el paisaje) y la observación de algunos atributos morfológicos en las profundidades de 0-20 cm (o hasta el límite del horizonte A), 20-40 cm y 100-130 cm (color, presencia de mosqueado, textura evaluada por la sensación al tacto y la presencia de capas de impedimento hasta la profundidad de 150 cm). En 26 de las 93 microtrincheras también fueron recolectadas muestras en 3 profundidades. Las muestras de suelo fueran secas al aire, desmenuzadas y pasadas en cedazos de malla de 2 mm, para obtención de la tierra fina seca al aire (TFSA).

Los análisis físicos y químicos siguieron las recomendaciones de Embrapa [7]. En la TFSA de las muestras de los perfiles modales y de las microtrincheras ($n = 26$) fueron determinados Al, Ca y Mg cambiables, acidez potencial (Al+H), K y Na cambiables, pH en agua, P disponible y C orgánico. Con los resultados obtenidos en los análisis del complejo sortivo fueron calculadas la suma de bases cambiables (SB), la capacidad de cambio catiónica total (CTC) y las saturaciones

por bases (V) y por Al (m). Sólo en la TFSA de los perfiles modales fueron realizados análisis de granulometría y determinaciones de Fe, Al, Ti, P y Si, después tratamiento de la TFSA con H_2SO_4 1:1 (volumen). Las relaciones moleculares SiO_2/Al_2O_3 (Ki), $SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ (Kr) y Al_2O_3/Fe_2O_3 fueron calculadas.

2.3. Variabilidad espacial de los datos

Se analizó la variabilidad espacial del tenor de arcilla observado al tacto, C orgánico, pH en agua, P disponible y varias determinaciones asociadas al complejo sortivo (Ca+Mg, K, Na, Al, SB y CTC), se utilizaron técnicas de geoestadística (Vieira et al., 1983; Vieira, 2000). Todos los atributos fueron analizados en tres profundidades (0 a 20 cm o hasta el límite del horizonte A, 20-40 cm y 100-130 cm). El muestreo para el tenor de arcilla evaluado al tacto correspondió a la malla total del mapeo de suelos, o sea, 93 microtrincheras. Para los atributos químicos el muestreo correspondió a una subpoblación de 26 microtrincheras de las 93 totales (figura 1).

Las coordenadas geográficas de los puntos muestreados fueron localizadas por medio de sistema de posicionamiento global (GPS). Los datos de todos los atributos en cada punto muestreado fueron asociados a una tabla que contenía las coordenadas geográficas (x e y) de cada uno de los puntos. Los valores del coeficiente de determinación (R^2) y de la suma de los cuadrados de los residuos (SRC) fueron utilizados en la selección de los modelos de ajustes de los semivariogramas. La SRC es un indicador más robusto que R^2 y arroja una medida más exacta del ajuste del modelo a los datos (Robertson) [8]. Para el análisis geoestadístico se procedió a la verificación de la existencia de dependencia espacial por medio de semivariograma, estimado conforme a la ecuación 1:

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

Donde $N(h)$ representa el número de pares de valores medidos en $[Z(x_i), Z(x_i + h)]$, separados

por un vector h . Para el estudio en cuestión, los valores de Z fueron los atributos del suelo estudiados, mientras que los valores de x_i y x_i+h de acuerdo a las posiciones de las muestras en el campo.

El análisis de dependencia espacial está basado en la suposición de que las mediciones separadas por distancias pequeñas son más semejantes unas a las otras, que aquellas separadas por distancias mayores. La distancia límite de dependencia espacial, denominada alcance (A_0), indica que muestras ubicadas a distancias menores que el alcance están correlacionadas unas con otras. El alcance depende del tamaño del área muestreada y de la escala de observación realizada, siendo más alta en tanto mayor sea el intervalo entre medidas (Trangmar et al.) [9]. En este estudio se adoptó un nivel de confianza del 95% para los test de los semivariogramas: (a) esférico, $\gamma^*(h) = C_0 + C_1 [1,5 (h/a) - 0,5 (h/a)^3]$ para $(0 < h < a)$ y $\gamma^*(h) = C_0 + C_1$ para $h \geq a$; y (b) exponencial, $\gamma^*(h) = C_0 + C_1 [1 - \exp(-3h/a)]$ para $(0 < h < d)$, donde d es la distancia máxima.

El ajuste matemático de los datos a partir del semivariograma posibilitó definir los siguientes parámetros: efecto pepita (C_0); alcance de la dependencia espacial (A_0); nivel ($C_0 + C_1$); y la razón entre el efecto pepita y el nivel $[(C_0)/(C_0 + C_1)]$, siendo que este último permitió la clasificación y la comparación entre los atributos del suelo mediante grado de dependencia espacial. Se utilizó esta medida para definir las diferentes clases de dependencia espacial de los atributos del suelo, conforme Cambardella et al. [10]: dependencia espacial débil = $(C_0)/(C_0 + C_1) > 75\%$; dependencia espacial moderada = $(C_0)/(C_0 + C_1) \leq 75\%$ y $> 25\%$; y dependencia espacial fuerte = $(C_0)/(C_0 + C_1) \leq 25\%$. Así, cuanto menor sea esta relación, menor será el valor relativo del efecto pepita y, consecuentemente, mejor especializado será el atributo estudiado.

En la elaboración de los mapas de contorno de las variables estudiadas se utilizó el programa *Surfer 7.0 (Golden Software)* [11], que estima valores a partir del método interpolador geoestadístico *kriging*. Este interpolador utiliza la ecuación (2) (Thompson) [12] y la ecuación (3) (Vieira) [13] en su secuencia de cálculos.

$$[A]^{-1} * [b] = [\lambda] \quad (2)$$

Donde $[A]^{-1}$ es la matriz inversa de semivariación entre las localidades de la vecindad de un punto, determinada por el modelo de semivariograma basado en las distancias euclidianas entre las localidades; $[b]$ es la matriz de semivariación entre las localidades vecinas (con la variable estimada) y el punto para lo cual la variable será interpolada, que también está determinado por el modelo de semivariograma con base en las distancias entre las localidades vecinas y el punto a ser interpolado; y $[\lambda]$ es la matriz de pesos de *kriging*.

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (3)$$

Donde $Z(x_0)$ es la variable interpolada; λ_i es el peso de la i -ésima localidad vecina; $Z(x_i)$ es el valor de la variable para la i -ésima localidad; y n es el número de localidades vecinas empleadas para interpolación del punto. De esa forma, fueron estimados los valores de los atributos para todas las posiciones no muestreadas en el área de estudio.

3. Resultados y discusión

3.1 Caracterización de los suelos

El área mapeada corresponde a la cima amplia de tableros costeros, con una depresión cerrada en su extremo sur. A partir de esa depresión es que se encuentra la principal fuente de variabilidad de suelos en el área experimental. La conjugación de la textura y del color a lo largo del perfil de los suelos son los atributos que mejor definen las cualidades de cada punto de observación. Ellos se relacionan con la posición en el paisaje, lo que en el área se asocia a la proximidad entre el punto observado y el centro de la depresión. Del centro de la depresión para fuera siguen, en secuencia, cambisuelo háplico Tb distrófico (CXbd) gleysólico (subgrupo inexistente en el sistema), latosuelo amarillo distrocioso (LAdx) argissólico textura media/arcillosa, LAdx argissólico textura media (figura 1). Como inclusiones se tienen argissoles amarillos distrociosos.

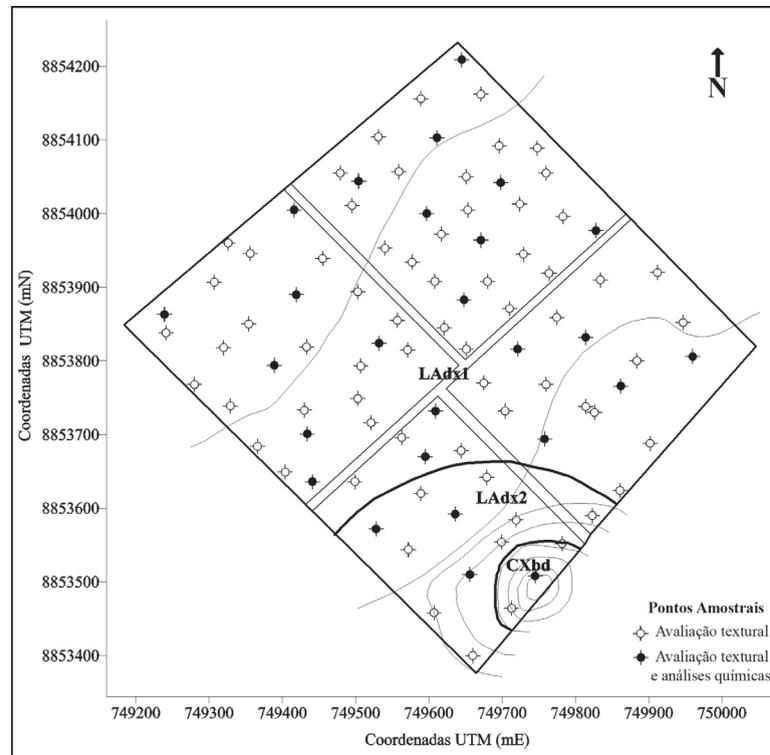


Figura 1. Mapa de suelos de las parcelas experimentales (PI, P2, P3 y P4) y puntos muestrales de la producción integrada de coco, Frutese, Platô de Neópolis, SE. Leyenda: LAdx1 – Latosuelo amarillo distrocoeso argissólico A moderado, textura media, cerrado/floresta tropical subcaducifolia, relieve plano (0-1% de declividad) epieutrófico; LAdx2 - Latosuelo amarillo distrocoeso argissólico A moderado, textura media/arcillosa, cerrado/floresta tropical subcaducifolia, relieve plano (0-1% de declividad) epieutrófico; CXbd – Cambisuelo háplico Tb distrófico gleysólico A moderado, textura media/arcillosa, cerrado/floresta tropical subcaducifolia, relieve plano a suave ondulado (1-4% de declividad) epieutrófico, endoálico.

3.2. Análisis de las estadísticas descriptivas

La mayoría de los atributos presentaron elevados grados de heterogeneidad, con altos coeficientes de variación (tabla 1).

Tabla 1. Estadísticas descriptivas y parámetros de normalidad de variables de materiales de suelos evaluados o colectados en microtrincheras de las parcelas, Frutese, Platô de Neópolis, SE.

Variable	Unidad	Media	Mínimo	Máximo	Desvío padrón	Coeficientes		
						Variación (%)	Asimetría	Curiose
<i>Muestras superficiales (0-20 cm o límite del horizonte A, cuando éste es más estrecho que el límite dado)</i>								
Arcilla	%	12	5	32	7,63	58,20	0,98	0,06
C orgánico	g kg ⁻¹	9,10	2,32	20,88	4,63	50,88	0,62	0,01
pH agua	-	6,42	5,40	7,00	0,40	6,23	-0,85	0,56
P	mg kg ⁻¹	15,85	2,90	61,90	14,33	90,41	1,66	2,94
Ca+Mg	cmol _c kg ⁻¹	2,45	1,27	4,19	0,77	31,43	0,52	-0,53
K	cmol _c kg ⁻¹	0,15	0,06	0,56	0,11	73,33	2,02	4,93
Na	cmol _c kg ⁻¹	0,04	0,02	0,12	0,03	75,00	1,76	3,94

Al	cmol _c kg ⁻¹	0,02	0,00	0,20	0,05	250,00	3,22	10,48
SB	cmol _c kg ⁻¹	2,64	1,41	4,41	0,82	31,06	0,51	-0,59
CTC	cmol _c kg ⁻¹	3,95	2,43	5,84	1,12	28,35	0,32	-1,17
<i>Muestras de 40-60 cm</i>								
Arcilla	%	29	22	55	5,90	34,76	2,58	6,35
C orgánico	g kg ⁻¹	5,20	0,58	12,76	3,21	61,73	0,70	-0,09
pH agua	-	5,57	4,30	6,90	0,61	11,01	0,35	-0,14
P	mg kg ⁻¹	1,13	0,10	5,40	1,02	89,95	3,04	12,35
Ca+Mg	cmol _c kg ⁻¹	0,64	0,23	1,67	0,34	54,07	1,67	3,30
K	cmol _c kg ⁻¹	0,08	0,02	0,23	0,05	62,13	1,32	2,23
Na	cmol _c kg ⁻¹	0,05	0,02	0,09	0,02	37,88	1,40	2,69
Al	cmol _c kg ⁻¹	0,54	0,00	1,72	0,41	75,76	1,67	3,09
SB	cmol _c kg ⁻¹	0,76	0,35	1,83	0,35	46,46	1,64	3,16
CTC	cmol _c kg ⁻¹	3,18	1,09	6,63	1,29	40,69	1,40	1,90
<i>Muestras de 100-130 cm</i>								
Arcilla	%	31	27,5	63	7,92	62,74	2,56	5,52
C orgánico	g kg ⁻¹	3,37	0,58	9,86	2,18	64,61	0,97	1,82
pH agua	-	5,19	4,30	6,40	0,46	8,88	0,56	0,68
P	mg kg ⁻¹	0,32	0,10	1,40	0,32	98,39	1,88	4,06
Ca+Mg	cmol _c kg ⁻¹	0,50	0,17	1,64	0,29	58,59	2,54	9,11
K	cmol _c kg ⁻¹	0,03	0,01	0,08	0,02	47,98	1,57	2,88
Na	cmol _c kg ⁻¹	0,03	0,01	0,08	0,02	50,14	0,85	0,26
Al	cmol _c kg ⁻¹	0,59	0,05	2,01	0,45	75,72	2,00	4,08
SB	cmol _c kg ⁻¹	0,66	0,22	3,04	0,57	85,22	3,39	13,13
CTC	cmol _c kg ⁻¹	2,66	1,04	6,25	1,19	44,60	1,56	2,29

El pH es una excepción esperada, por variar dentro de un intervalo muy estrecho. Parte de las variables no presentaron distribución normal, no siendo esa una exigencia en geoestadística (Corá et al.) [14]. Tres valores discrepantes sobresalieron en las variables Al, P disponible y SB (Al en una muestra de 0-20 cm, P disponible en una muestra de 40-60 cm y SB en una muestra de 100-130 cm), dando una distribución de los datos no normales. Las diferencias entre las tres profundidades muestreadas son marcadas y esperadas, principalmente en las muestras superficiales para las otras dos profundidades. Los valores medios de P, K y Ca+Mg están claramente influenciados por correcciones y abono sistemático realizado en el área de plantada (coberturas y fertilización). El único atributo a aumentar de contenido hasta la profundidad de 100-130 cm fue el Al, por la dificultad de su corrección en profundidad. De esa forma, el Al acumula en profundidad y los horizontes superficiales están básicamente exentos de él, una consecuen-

cia de las correcciones por el uso del calcáreo. El Na aumentó de la superficie para la profundidad de 40-60 cm, en razón de su elevada solubilidad (Miller & Donahue) [15]. Es probable que en esa profundidad del suelo un mayor tenor de arcilla esté posibilitando su inmovilización, así mismo considerando la relativa facilidad de lixiviación en profundidad del elemento para capas más profundas (Castrignanò et al.) [16], en concordancia con los bajos valores de permeabilidad registrados en el subsuelo.

3.3. Análisis de los variogramas

Para cada atributo estudiado se ajustaron los modelos esférico y exponencial por el método de ensayo y error, analizándose la sensibilidad, siendo adoptado para este estudio el modelo esférico, el cual presentó mejores parámetros en el estudio de errores (Vieira et al.) [17], resultado verosímil tratándose de atributos del suelo (Souza et al.) [18]. En el tabla 2 se presentan los parámetros estima-

dos de los semivariogramas y los coeficientes de determinación de los modelos ajustados. Los semivariogramas direccionales fueron evaluados y, como no fue detectada anisotropía (variabilidad diferenciada según la dirección tomada), fueron

utilizados los semivariogramas medios isotrópicos. Todas las variables analizadas presentaron alguna dependencia espacial en las diferentes profundidades (0-20 cm, 40-60 cm y 100-130 cm).

Tabla 2. Parámetros estimados de los semivariogramas ajustados (modelo esférico) de algunas variables de materiales de suelo evaluados o recolectados en microtrincheras de las parcelas, Frutese, Platô de Neópolis, SE.

Variable	Unidad	$C_0^{(1)}$	$C_0+C_1^{(2)}$	$A_0^{(3)}$	$C_0/(C_0+C_1)$	GDE ⁽⁴⁾	R ²	SQR
<i>Muestras superficiales (0-20 cm o limite del horizonte A, cuando éste es más estrecho que el limite dado)</i>								
Arcilla	%	6,4600	17,890	187	0,36	moderado	0,89	12,920
C orgánico	g kg ⁻¹	1,7000	14,400	255	0,12	fuerte	0,90	6,050
pH agua	-	0,0400	0,130	228	0,31	moderado	0,89	0,004
P	mg kg ⁻¹	15,2000	85,500	183	0,18	fuerte	0,93	49,260
Ca+Mg	cmol _c kg ⁻¹	0,1200	0,450	171	0,27	moderado	0,91	0,082
K	cmol _c kg ⁻¹	0,0040	0,010	119	0,40	moderado	0,88	0,087
Na	cmol _c kg ⁻¹	0,0350	0,310	352	0,11	fuerte	0,93	0,095
Al	cmol _c kg ⁻¹	0,0004	0,002	124	0,20	fuerte	0,91	0,126
SB	cmol _c kg ⁻¹	0,0900	0,650	216	0,14	fuerte	0,90	0,092
CTC	cmol _c kg ⁻¹	0,3500	1,100	297	0,32	moderado	0,92	0,041
<i>Muestras de 40-60 cm</i>								
Arcilla	%	8,4000	21,200	141	0,39	moderado	0,85	14,042
C orgánico	g kg ⁻¹	0,9000	7,500	354	0,12	fuerte	0,94	4,605
pH agua	-	0,0900	0,300	208	0,30	moderado	0,95	0,031
P	mg kg ⁻¹	0,1100	0,400	121	0,28	moderado	0,90	0,159
Ca+Mg	cmol _c kg ⁻¹	0,0200	0,110	277	0,18	fuerte	0,88	0,005
K	cmol _c kg ⁻¹	0,0200	0,100	204	0,20	fuerte	0,91	0,008
Na	cmol _c kg ⁻¹	0,0650	0,550	242	0,12	fuerte	0,92	0,070
Al	cmol _c kg ⁻¹	0,0020	0,011	329	0,18	fuerte	0,93	0,003
SB	cmol _c kg ⁻¹	0,0200	0,120	235	0,17	fuerte	0,89	0,012
CTC	cmol _c kg ⁻¹	0,1500	1,200	293	0,13	fuerte	0,91	0,063
<i>Muestras de 100-130 cm</i>								
Arcilla	%	9,6500	27,860	164	0,34	moderado	0,88	19,509
C orgánico	g kg ⁻¹	0,6000	3,500	298	0,17	fuerte	0,89	0,963
pH agua	-	0,0500	0,170	207	0,29	moderado	0,91	0,009
P	mg kg ⁻¹	0,0100	0,085	155	0,12	fuerte	0,93	0,006
Ca+Mg	cmol _c kg ⁻¹	0,0200	0,070	181	0,29	moderado	0,91	0,010
K	cmol _c kg ⁻¹	0,0001	0,001	193	0,11	fuerte	0,94	0,001
Na	cmol _c kg ⁻¹	0,0600	0,500	209	0,12	fuerte	0,88	0,027
Al	cmol _c kg ⁻¹	0,0020	0,017	367	0,12	fuerte	0,92	0,002
SB	cmol _c kg ⁻¹	0,0350	0,250	210	0,14	fuerte	0,91	0,210
CTC	cmol _c kg ⁻¹	0,1900	1,250	304	0,15	fuerte	0,93	0,068

⁽¹⁾C₀ = efecto pepita. ⁽²⁾C₀+C₁ = nivel. ⁽³⁾A₀ = alcance. ⁽⁴⁾GDE = grado de dependencia espacial. R² = coeficiente de determinación. SQR = suma de los cuadrados de los residuos.

Los atributos estudiados presentaron alcances que variaron de 119 a 367 (tabla 2). Los resultados apuntan a una gran heterogeneidad de la abonación en el área, principalmente en la observación de los valores de A_0 de la camada superficial. Esta camada, como es esperado, presenta, en media, menores valores de alcance de dependencia espacial. Corá et al. [4] discutieron el asunto trabajando con latosuelos rojos en Jaboticabal, SP. Los autores comentaron el mayor grado de discontinuidad de la camada más profunda de esos latosuelos con relación a la camada superficial, el inverso del obtenido aquí, explicando el obtenido por el largo período (más de 30 años con caña de azúcar) del área estudiada a la aplicación de abonos y correctivos y de preparación del suelo. Esas prácticas tendrían homogeneizada la camada superficial. En el presente estudio la cultura es perenne, no incluyendo el ardo del suelo por lo que el efecto de homogeneización de las abonaciones y correcciones son menores. Otro aspecto que puede ser considerado es la menor tasa de lixiviación de los suelos aquí estudiados, predominantemente LA originados de sedimentos de barreras, respecto de a los latosuelos estudiados por Corá et al. [4].

El carácter caulinítico impone una estructura en bloques de grado débil y la presencia de capas cohesas en subsuperficie desaceleran la lixiviación de los suelos originados de sedimentos de barreras (Zangrande & Rezende) [19].

El análisis de la relación $C_0/(C_0+C_1)$, que demuestra el grado de dependencia espacial, arrojó todas las variables dentro del nivel de moderado a fuerte. Los grados de dependencia alcanzados apuntan a una eficiencia de la malla de muestreo utilizada, sin olvidar que muestreos más intensivos pueden revelar mayor continuidad espacial de esos atributos, como comenta Corá et al. [4].

3.4. Variabilidad espacial del tenor de arcilla y de atributos químicos del suelo

Los parámetros de los modelos de semivariogramas ajustados para cada variable de estudio fueron utilizados para estimar los valores de esas variables en locales no muestreados por medio del interpolador geoestadístico krigaje. Con los valores estimados por krigaje fueron generados los mapas de estimativa de ocurrencia (de contorno) de los atributos seleccionados en el área estudiada (figuras 2, 3, 4 y 5).

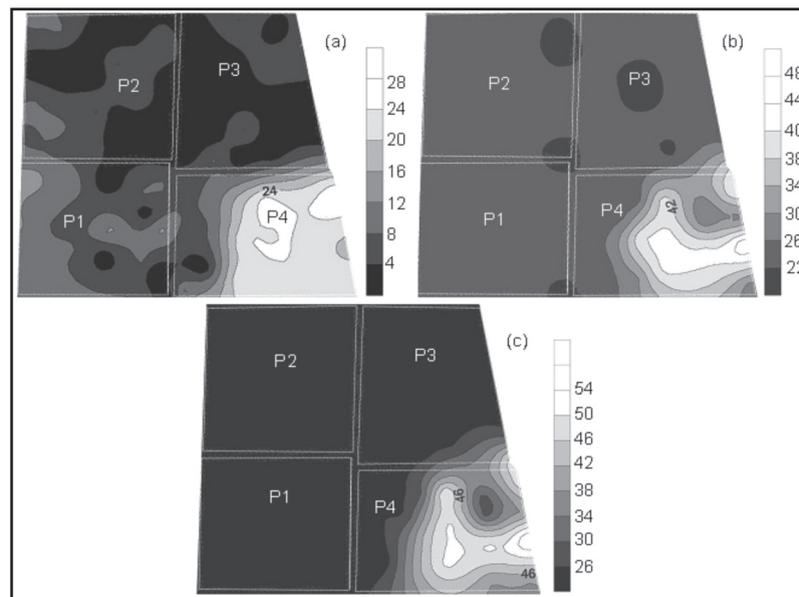


Figura 2. Mapas de contorno del tenor de arcilla de suelos de las parcelas experimentales de la PI de coco, Frutese, Platô de Neópolis, SE, donde P1, P2, P3 y P4 son, respectivamente, parcelas 1, 2, 3 y 4: (a) porcentaje de arcilla en la profundidad de 0-20 cm; (b) porcentaje de arcilla en la profundidad de 20-40 cm; y (c) porcentaje de arcilla en la profundidad de 100-120 cm.

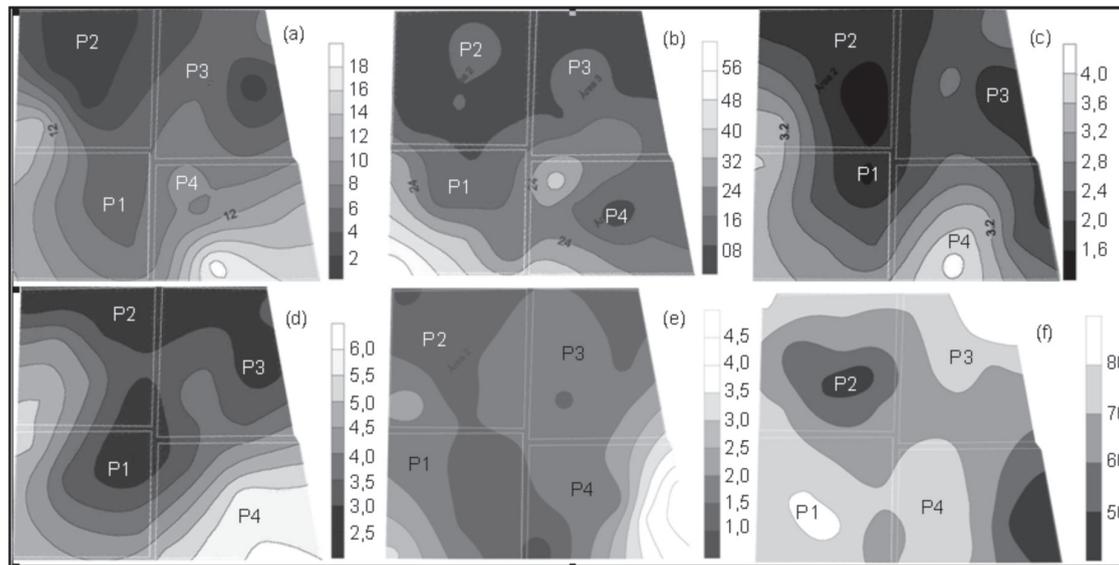


Figura 3. Mapas de contorno de atributos químicos del suelo seleccionados en la profundidad de 0 a 20 cm, parcelas experimentales de la PI de coco, Frutese, Platô de Neópolis, SE, donde P1, P2, P3 y P4 son, respectivamente, parcelas 1, 2, 3 y 4: (a) CO (g kg^{-1}); (b) P (mg kg^{-1}); (c) Ca+Mg ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$); (d) CTC ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$); (e) Relación Ca/Mg; y (f) V (%).

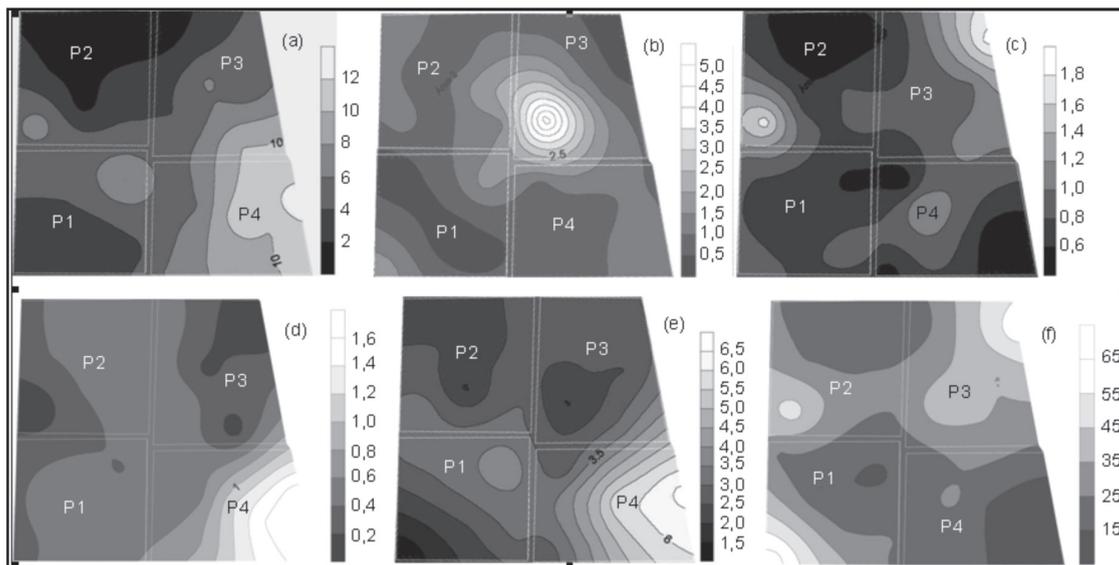


Figura 4. Mapas de contorno de atributos químicos del suelo seleccionados en la profundidad de 40 a 60 cm, parcelas experimentales de la PI de coco, Frutese, Platô de Neópolis, SE, donde P1, P2, P3 y P4 son, respectivamente, parcelas 1, 2, 3 y 4: (a) CO (g kg^{-1}); (b) P (mg kg^{-1}); (c) Ca+Mg ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$); (d) Al ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$); (e) CTC ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$); y (f) V (%).

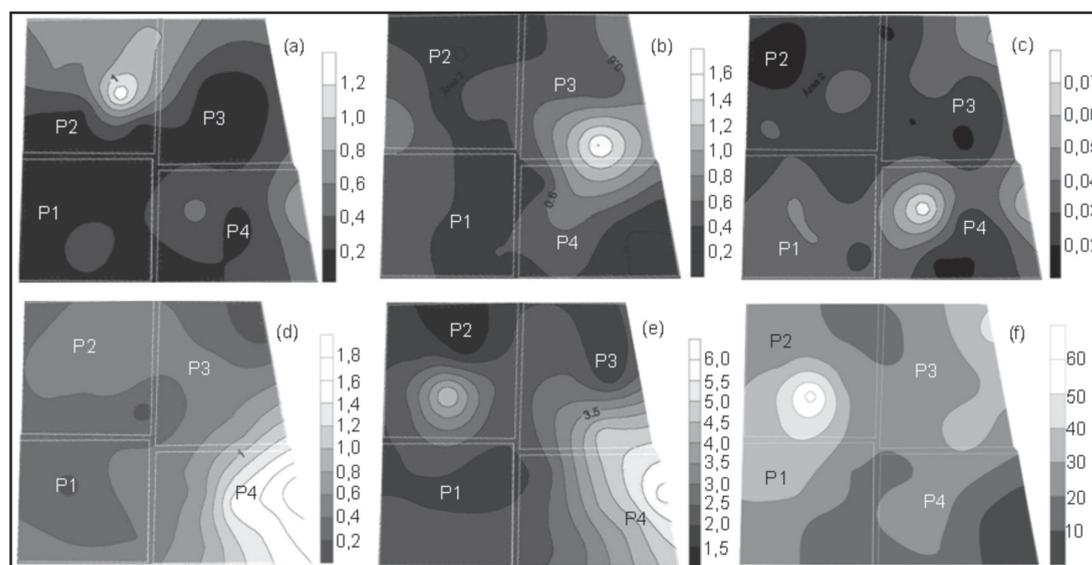


Figura 5. Mapas de contorno de atributos químicos del suelo seleccionados en la profundidad de 100 a 130 cm, parcelas experimentales de la PI de coco, Frutese, Platô de Neópolis, SE, donde P1, P2, P3 y P4 son, respectivamente, parcelas 1, 2, 3 y 4: (a) P (mg kg^{-1}); (b) Ca+Mg ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$); (c) K ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$); (d) Al ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$); (e) CTC ($\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$); y (f) V (%).

Para un terreno de plantación con varios años como la de la PI de coco estudiada, la variabilidad de los atributos químicos del suelo es el resultado de la sobreposición de factores naturales (material de origen, textura del suelo, etc.) y de prácticas de manejo locales (principalmente abonación mineral), como salientado, según Castrignanò et al. [16] para un campo de producción en Italia.

Los mapas de contorno del tenor de arcilla (figura 2) detallan las diferencias que el mapa de suelos (figura 1) ya consideraba, con isolíneas de tenor de arcilla relativamente mayores en la parcela 4, en todas las profundidades. Para algunos otros atributos, las diferenciaciones influenciadas por la depresión existente en la parcela 4 continúan. El CO presenta isolíneas de mayor valor en esa parcela, aunque dislocadas para el sur del área. El color oscuro de los suelos locales, al igual que en profundidad, ya se esperaba. La camada de suelo superficial está básicamente exenta de Al. La corrección no es tan eficiente en subsuperficie, con el valor de m pasando 50% en muchos locales, principalmente en la parcela 4, donde la presencia de suelos más arcillosos y permeabilidad más baja debe estar dificultando el efecto de las correc-

ciones. La corrección en profundidad es problema para suelos muy permeables (Resende et al., [20], que aquí podría estar siendo acelerada por la presencia constante del agua de irrigación como vehículo para la lixiviación, resaltando que los suelos locales (originados de sedimentos de barreras) presentan tasas de lixiviación relativamente bajas, comparadas con latosuelos más oxídicos, aspecto ya abordado. Lo comentado en subsuperficie para el Al, sirve de forma inversa para los valores de V. Superficialmente la V varía mucho, aunque con valores siempre mayores que 40%. Los resultados en subsuperficie, menores que los superficiales, pueden estar limitando la productividad del cocotal, desde que buena parte de la absorción de nutrientes se da en raíces en la profundidad de hasta 60 cm (Cintra et al.) [21].

La relación Ca/Mg puede ser considerada, en general, debajo de la esperada. Ella también va disminuyendo en profundidad, patrón que puede ser atribuido a la mayor absorción del Ca con relación al Mg, lo que permite su reposición parcial en superficie (Heck et al.) [22]. De toda forma, la adición de productos más calcínicos se hace necesaria para anchar las relaciones Ca/Mg de los suelos locales.

El P no siguió el patrón esperado, en función de la mayor capacidad de fijación de los suelos más arcillosos (Álvarez et al.) [23] de la parcela 4, pareciendo reflejar una abonación no uniforme. En subsuelos los valores son muy bajos y poca o ninguna influencia sufren de las adicionalmente realizadas.

3.5. Definición de unidades de manejo

Los mapas de suelos y de contorno (textura y atributos químicos) permitieron definir dos unidades

de manejo para la planeación del área (tabla 3). Se puede considerar que las características de las unidades de mapeo LAdx2 y CXbd presentan comportamientos semejantes y dominan la parcela 4 (unidad de manejo B). El área de las otras parcelas (1 a 3) es dominada por la unidad LAdx1 (unidad de manejo A). Esa división del área en dos unidades de manejo, debe ser testada en la conducción de los cultivos locales.

Tabla 3. Unidades de manejo, unidades de mapeo que las componen, áreas e indicaciones de prácticas de manejo correspondientes de las parcelas, Frutese, Platô de Neópolis, SE.

Unidad de manejo	Unidad de mapeamiento	Área		Prácticas de manejo
		ha	%	
A	LAdx1	27,63	76,8	< turno de riego; < lámina de agua; < dosis de P; e > parcelamiento de N y K
B	LAdx2	6,71	18,6	> turno de riego; > lámina de agua; > dosis de P; e < parcelamiento de N y K
	CXbd	1,64	4,6	
Área total		35,98	100	

4. Conclusiones

La mayoría de los atributos estudiados presentaron un elevado grado de heterogeneidad, el cual se evidencia en el análisis de dependencia espacial a lo largo del perfil, y influenciados por correcciones y abonos sistemáticos realizados en el área de plantación.

Los alcances de dependencia espacial para los atributos químicos en las diferentes camadas del suelo fueron distintos y sin relación directa con la profundidad, demostrando así una relativa conti-

nuidad en la distribución espacial de la mayoría de los atributos evaluados, posiblemente en función de las características de heterogeneidad del suelo.

El estudio de la variabilidad espacial de los atributos químicos del suelo proporcionó la definición y el mapeo de dos unidades de manejo para el área de estudio (unidades A y B), las cuales exigen, idealmente, prácticas de manejo de agua y del suelo diferenciadas, maximizando así la utilización de recursos naturales y subsidiando la implantación de la producción integrada de frutas.

Bibliografía

- [1] Andrigueto, J.R. & Kososki, A. R. Marco legal da produção integrada de frutas do Brasil. Brasília: Mapa/Sarc, 2002. 60 p.
- [2] Resende, M.; Curi, N.; Rezende, S. B. & Corrêa, G. F. Pedologia: base para distinção de ambientes. 4ª ed. Viçosa, MG, NEPUT, 2002, 338 p.
- [3] Corá, J. E.; Araujo, A.V.; Pereira, G.T. & Beraldo, J.M.G. “Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar”. R. Bras. Ci. Solo, 28, 1013-1021, 2004.
- [4] Queiroz, J. E.; Gonçalves, A. C.; Souto, J. S.; Folegatti, M. V. “Avaliação e monitoramento da salinidade do solo”. In: Gheyi, H. R.; Queiroz,

- J. E. *Manejo e controle da salinidade na agricultura irrigada*. Campina Grande: Ufpb, 1997, pp. 69-101.
- [5] Embrapa. Centro de Pesquisas Pedológicas. *Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Sergipe*. Recife, Embrapa/Sudene, 1975, 506 p.
- [6] Embrapa. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2ª ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 2006, 306 p.
- [7] Embrapa. *Manual de métodos de análise de solo*. 2a ed. Rio de Janeiro, EMBRAPA-CNPQ, 1997. 212 p.
- [8] Robertson, G. P. *GS+: Geostatistics for the environmental sciences – GS+ User's Guide*. Plainwell, Gamma Design Software, 1998, 152 p.
- [9] Trangmar, B. B.; Yost, R.S. & Uehara, G. "Application of geostatistics to spatial studies of soil properties". *Adv. Agron.*, 38: 45-93, 1985.
- [10] Cambardella, C.A.; Moorman, T.B.; Novak, J. M.; Parkin, T. B.; Karlen, D.L.; Turco, R. F. & Konopka, A. E. "Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils". *Soil Science Soc. Am. J.*, 58: 1501-1511, 1994.
- [11] Golden Software. *Surfer 7.0. Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers. User's Guide*. New York, Golden Software, 1999, 619 p.
- [12] Thompson, S. K. *Sampling*. 1ª ed. New York: A Wiley-Interscience Publication, 1992. 343p.
- [13] Vieira, S. R. "Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo". *Tópicos em ciência do solo*, 1-54, 2000.
- [14] Corá, J. E. & Beraldo, J. M. G. "Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar". *Engenharia Agrícola*, 26: 374-387, 2006.
- [15] Miller, R. W. & Donahue, R. L. *Soils: an introduction to soils and plant growth*. 6th ed. Englewood Cliffs, NJ, Prentice Hall, 1992, 768 p.
- [16] Castrignanò, A.; Giugliarini, L.; Risaliti, R. & Martinelli, N. "Study of spatial relationships among some soil physico-chemical properties of a field in central Italy using multivariate geostatistics". *Geoderma*, 97: 39-60, 2000.
- [17] Vieira, S. R.; Hatfield, J. L.; Nielsen, D. R. & Biggar, J. W. *Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties*". *Hilgardia*, 51, 1-75, 1983.
- [18] Souza, L. S.; Cogo, N.P. & Vieira, S.R. "Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico". *R. Bras. Ci. Solo*, 21: 367-372, 1997.
- [19] Zangrande, M. B. & Rezende, S. B. Características de um Podzólico Vermelho-Amarelo abrupto dos platôs litorâneos do norte do Espírito Santo. *Ceres*, 36, 147-172, 1989.
- [20] Resende, M.; Curi, N. & Santana, D. P. *Pedologia e fertilidade do solo: interações e aplicações*. Piracicaba, MEC/ESAL/POTAFÓS, 1988, 83 p.
- [21] Cintra, F. L. D.; Leal, M. De L. Da S. & Passos, E. E. M. "Root system distribution in dwarf coconuts". *Oléagineux*, 47: 225-234, 1992.
- [22] Heck, R. J.; Tiessen, H.; Santos, M. C.; Salcedo, I. H. & Alves, R. J. T. "Chemical changes in Argisols under irrigated grape production in the central São Francisco river valley, Brazil". *R. Bras. Ciência do Solo*, 26, 191-202, 2002.
- [23] Álvarez V., V. H.; Novais, R. F.; Barros, N. F.; Cantarutti, R. B. & Lopes, A.S. Interpretação dos resultados das análises de solos. In: A.C. Ribeiro; P.T. G. Guimarães & V. H. Álvarez V. (eds.) *Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5a aproximação*. Viçosa, Comissão de fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999, pp.25-32.



ÉDSON LUIS BOLFE

Ingeniero forestal, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (Embrapa). MSc en Ingeniería Agrícola, Universidad Federal de Santa María. Doctorando en Geografía, Universidad Estadual de Campiñas. Pesquisador da Embrapa desde 2001.

Correo electrónico: bolfe@cpatc.embrapa.br

JOÃO BOSCO VASCONCELLOS GOMES

Ingeniero agrónomo, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (Embrapa). MSc en Suelos, Universidad Federal de Viçosa. Doctorando en Suelos, Universidad Federal de Lavras. Pesquisador da Embrapa desde 1990.

Correo electrónico: bosco@cpatc.embrapa.br

HUMBERTO ROLLEMBERG FONTES

Ingeniero agrónomo, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria (Embrapa). MSc en Fitotecnia, Universidad Federal de Viçosa. Pesquisador da Embrapa desde 1980.

Correo electrónico: humberto@cpatc.embrapa.br

