Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

Análise espacial da condutividade elétrica e atributos físico-químicos de um Latossolo

Spatial analysis of electrical conductivity and physic-chemical attributes of a Oxisol

Elton Gean Araújo[1], Adriany Rodrigues Corrêa[2], Diana Carla de Oliveira Santana Lima[2], Eduardo de Pieri Prando[3], Karla Nascimento Sena[2], Rafael Montanari[2], Reinaldo Moraes da Silva[2]

[1]Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS), Campus de Paranaíba. Avenida Pedro Pedrossian, nº 725, Bairro Universitário, CEP:79500-000, Paranaíba, MS. E-mail: egarauj@yahoo.com.br
[2]Universidade Estatual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), Ilha Solteira, SP.
[3]Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo (IFSP), Campus de Votuporanga, Votuporanga, SP.

Recebido em: 27/04/2015 Aceito em: 20/08/2015

Resumo. Com o presente trabalho objetivou-se estudar a correlação linear entre a condutividade elétrica e os atributos químicos do solo, bem como caracterizar a variabilidade espacial dessas variáveis, visando obter zonas específicas de manejo em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. O estudo foi desenvolvido no município de Lucas do Rio Verde/MT em 2012, foi instalada um malha irregular com 588 pontos distribuídos aleatoriamente, em um talhão de 150 ha. Em cada ponto foram determinadas a condutividade elétrica do solo (CE) a 2 kHz, 7 kHz e 15 kHz utilizando o aparelho Profiler EMP-400 e em seu entorno coletadas amostras, na profundidade de 0,00-0,20m , para determinação do teor de matéria orgânica (MO), potássio (K), capacidade de troca de cátions (CTC) e análise granulométrica para determinação de argila (ARG). Foi realizada a análise descritiva clássica e de dependência espacial, para cada atributo analisado. Todos os atributos estudados apresentaram dependência espacial de moderada a forte, sendo que os atributos de condutividade elétrica nas três frequências estudadas apresentaram um padrão definido.

Palavras-chave: agricultura de precisão, dependência espacial, Profiler EMP-400

Abstract. The present work aimed to study the linear correlation between the electrical conductivity and the physical-chemical soil and to characterize the spatial variability of these variables in order to obtain specific management zones in a Oxisol dystrophic. The study was conducted in the municipality of Lucas do Rio Verde / MT in 2012, it was installed an irregular grid with 588 points distributed randomly on a plot of 150 ha. At each point were determined soil electrical conductivity (EC) to 2 kHz, 7 kHz and 15 kHz using the Profiler EMP-400 appliance and its surroundings samples collected at a depth of 0,00-0,20m, to determine the content of organic matter (MO), potassium (K), cation exchange capacity (CEC) and particle size analysis for the determination of clay (ARG). Classical descriptive analysis and spatial dependence analysis for each analyzed attribute is performed. All attributes presented spatial dependence of moderate to strong, and the attributes of electrical conductivity in the three frequencies studied showed a definite pattern.

Keywords: precision agriculture, space dependency, Profiler EMP-400

Introdução

A variabilidade espacial do solo ocorre de forma aleatória, segundo os princípios básicos da experimentação. No entanto, diversos estudos mostram que a variabilidade das propriedades químicas e físicas do solo apresenta correlação ou dependência espacial (Souza, 1992). A variabilidade das características do solo está relacionada com suas características intrínsecas, ou seja, com os fatores de formação do solo, e com o efeito do manejo do solo (Dobermann e George, 1994).

Uma das ferramentas de análise espacial é a geoestatística, que disponibiliza métodos univariantes e multivariantes de interpolação e simulação espacial baseados em modelos de continuidade espacial. A geoestatística tem por base a verificação da condição de existência da variabilidade espacial através do semivariograma,

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

permitindo a descrição da dependência espacial de tais atributos (Vieira, 2000). O método de análise tem sido usado em inúmeras aplicações de estudos sobre a distribuição espacial de propriedades do solo, e principalmente, em aplicações da agricultura de precisão.

A agricultura de precisão engloba aspectos da variabilidade dos solos, clima, diversidade de culturas, desempenho de máquinas agrícolas e insumos, usados na produção das culturas. Assim requer a aquisição, manejo, processamento e análise de grande quantidade de dados que variam no espaço e no tempo. Preconiza ainda que o manejo das lavouras pode ser conduzido com maior exatidão se a variabilidade espacial da produtividade e dos fatores a ela relacionados forem conhecidos. Esses fatores podem ser tratados localizadamente ou as lavouras podem ser divididas em unidades de gerenciamento diferenciado (Molin et al., 2005).

A realização da amostragem e a confecção de mapas baseados nos conceitos de agricultura de precisão torna possível estudar melhor a variabilidade espacial e temporal dos atributos químicos e a sua ocupação do solo, de maneira a representar com maior precisão e otimizar recursos e custos (Lima et al., 2010).

Em relação ao solo, o mapeamento de suas propriedades físicas e químicas depende de um número significativo de amostragens, para obter de maneira precisa a distribuição espacial de seus atributos, possibilitando a obtenção de zonas de manejo. Zonas de manejo são áreas numa propriedade agrícola ou talhão de uma propriedade que possuem atributos de relevo e de solo com menor heterogeneidade (Luchiari Junior et al., 2000).

A amostragem da condutividade elétrica com auxílio de GPS é uma ferramenta que tem sido utilizada para estimar a textura do solo, além de outras propriedades (McBride et al., 1990; Lund et al., 1999). Alguns equipamentos móveis para medição da condutividade elétrica no campo têm sido utilizados na agricultura, dentre os quais o sensor por indução EM38 (Kitchen et al., 1999) e o sensor de contato VERIS (Lund et al., 2001).

Neste contexto, o Profiler ™ EMP-400 apresenta-se como um equipamento de indução eletromagnética, que fornece dados em tempo real e sua saída consiste em um mapa codificado por cores, o que permite que o usuário rapidamente facilmente identifique áreas de interesse no local de estudo (GSSI, 2007). Estudos com o uso da condutividade elétrica do solo têm apontado seu potencial para a mensuração de conteúdo de argila (Williams e Hoey, 1987), conteúdo de água (Kachanoski et al., 1988), capacidade de troca catiônica e teores de cálcio e magnésio trocáveis (McBride et al., 1990), profundidade de camada de impedimento (Doolittle et al., 1994 e Clark et al., 2000), teor de matéria orgânica (Jaynes, 1996), teor de sais da solução do solo (Caminha Junior et al., 2000), dentre outros, para auxiliar na compreensão dos fatores que influenciam a produtividade.

Com o presente trabalho objetivou-se estudar a correlação linear entre a condutividade elétrica e os atributos físico-químicos do solo, bem como caracterizar a variabilidade espacial dessas variáveis, visando obter zonas específicas de manejo em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.

Material e Métodos

O estudo foi desenvolvido na Fazenda Cortesia no município de Lucas do Rio Verde, MT, no ano de 2012. Clima tropical de Savana, com duas estações bem definidas, temperatura média anual de 25ºC, precipitação média anual de 2.333 mm e Altitude média de 400 metros. Em um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico. Foi instalada um malha irregular com 588 pontos distribuídos aleatoriamente, em um talhão de 150 ha.

Em cada ponto foram determinadas a condutividade elétrica do solo (CE) a 2 kHz, 7 kHz e 15 kHz e em seu entorno coletadas amostras, na profundidade de 0,00-0,20m , para determinação do teor de matéria orgânica (MO), potássio (K), capacidade de troca de cátions (CTC) e análise granulométrica para determinação de argila (ARG). As análises foram feitas nos laboratórios de Física e de Fertilidade do Solo da Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, segundo Raij et al. (2001).

Para a análise da CE foi utilizado o equipamento por indução eletromagnética Profiler EMP-400 (Geophysical Survey Systems, 2006) com método da condutividade elétrica sem contato direto com o solo.

Realizou-se a análise descritiva clássica, através do SAS (Schlotzhaver e Littell, 1997), onde foram calculados a média, mediana, valores de mínimos e de máximos, desvio-padrão, coeficiente de variação, curtose, assimetria e distribuição de frequência. Para testar a hipótese de normalidade, foi utilizada a estatística de Shapiro & Wilk adotando-se o nível de significância de 5%. Montou-se matriz de correlação, para avaliar as correlações lineares entre as combinações de atributos, bem como ajustou-se

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

modelos de regressão linear para os pares com correlações significativas.

Isoladamente para cada atributo, foi analisada sua dependência espacial, pelo cálculo do semivariograma simples, com base nos pressupostos de estacionaridade da hipótese intrínseca, pelo uso do pacote *Gamma Design Software* (GS^+, 2004).

Os ajustes dos semivariogramas simples foram efetuados prioritariamente pela seleção inicial de: a) menor soma dos quadrados dos desvios (SQD); b) maior coeficiente de determinação (r^2), e c) maior avaliador da dependência espacial (ADE). A decisão final do modelo foi realizada pela validação cruzada. Para cada atributo, foram relacionados o efeito pepita (C_o), o alcance (A_o) e o patamar (C_o + C). A análise do avaliador da dependência espacial (ADE) foi efetuada conforme sugestões de Cambardella et al. (1994), modificada por Robertson (1998) conforme a seguinte expressão:

$$ADE=[C/(C+Co)]100$$

onde: ADE é o avaliador da dependência espacial; C é a variância estrutural; e $C + C_o$ é o patamar.

Utilizou-se a seguinte interpretação proposta para ADE: (≤ 20 % indicou variável espacial com muito baixa dependência; 20 % < ADE ≤ 40 % baixa dependência; 40 % < ADE ≤ 60 % média dependência; 60 % < ADE ≤ 80 % alta dependência e de 80 % < ADE ≤ 100 % muito alta dependência (Dalchiavon e Carvalho, 2012).

Por outro lado, sabe-se que a validação cruzada é uma ferramenta destinada a avaliar modelos alternativos de semivariogramas simples, que respectivamente, efetuarão a krigagem. Trabalhando-se na obtenção do número ideal de vizinhos, foram obtidos, por meio da interpolação, os mapas de krigagem para análise da dependência e da interdependência espacial entre os atributos. Os componentes geoestatísticos determinados foram o semivariogramas simples, validação cruzada e a krigagem.

Resultados e Discussão

Na Tabela 1, observa-se os valores das medidas descritivas dos atributos envolvidos neste estudo. Nota-se valores negativos de condutividade elétrica do solo nas frequências 7 kHz e 15 kHz. As medidas de CE nas três frequências consideradas apresentaram leve assimetria a direita, com as médias pouco maiores que a medianas, o que indica uma concentração de valores abaixo da média.

Tabela 1. Análise descritiva inicial da condutividade elétrica e de alguns atributos de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.

Atributos do solo [(a)]	Medidas estatísticas descritivas									
	Média	Mediana	Valor		Desvio Padrão	Coeficiente			Probabilidade do teste[(b)]	
			Mínimo	Máximo		Variação (%)	Curtose	Assimetria	Pr<w	DF
CE 2 kHz (dS m^{-1})	6,76	6,75	5,04	8,86	0,74	10,90	-0,47	0,04	0,0134	TN
CE 7 kHz (dS m^{-1})	-19,03	-19,06	-21,01	-15,96	0,79	-4,17	0,63	0,40	0,0005	IN
CE 15 kHz (dS m^{-1})	-0,89	-0,91	-2,27	1,11	0,69	-77,24	-0,38	0,32	0,0001	IN
K (mmolc dm^{-3})	58,27	57,79	35,18	98,67	10,19	17,49	0,86	0,59	0,0001	IN
ARG (%)	51,87	51,97	49,29	53,42	1,14	2,19	-0,63	-0,52	0,0001	IN
CTC ($mmol_c$ dm^{-3})	7,74	7,76	6,28	9,14	0,49	6,33	-0,13	-0,17	0,0338	TN
MO (%)	3,44	3,43	2,66	4,27	0,24	7,07	0,58	0,33	0,0001	IN

(a) Atributos do solo: Condutividade elétrica (CE); Potássio (K); Argila (ARG); Capacidade de troca catiônica (CTC); Matéria Orgânica (MO)**(b)** DF = distribuição de frequência, sendo TN e IN respectivamente do tipo tendendo a normal e indeterminada.

Na análise de normalidade, apenas o atributo CE (2 kHz) apresentou distribuição de frequência tendendo a Normal (p-valor = 0,0134). De acordo com Cressie (1991), a normalidade não é uma exigência da Geoestatística, sendo conveniente que o gráfico de distribuição de frequência não apresente caudas muitos alongadas, podendo comprometer as análises. Como neste trabalho, para os valores de CE nas três frequências, as médias foram próximas da mediana e apresentaram leve assimetria a direita,

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

não houve prejuízo nas análises posteriores, com relação a esse atributo.

Para avaliar a variabilidade dos dados de CE, foi utilizado o coeficiente de variação. Segundo Landim (2003), o coeficiente de variação (CV) fornece uma medida relativa da precisão do experimento, sendo bastante útil na dispersão dos dados. Nos atributos de condutividade elétrica, apenas para a CE (15 kHz), se considerarmos o módulo de tal coeficiente, apresentou um alto valor, sendo que para as outras frequências houve pequena dispersão. Grego et al. (2011) também encontraram leve assimetria à direita para os valores de CE (0,00 - 0,90m), com coeficiente igual a 0,71, apresentando um coeficiente de variação de 44,03%. Somadas ao coeficiente de curtose igual a 1,17, estas medidas levaram os autores a afirmarem que os dados de CE tivessem distribuição normal.

Com relação aos atributos químicos, K foi o que apresentou maior média, de 58,27 $mmol_c\ dm^{-3}$, com amplitude 35,18 a 98,67 $mmol_c\ dm^{-3}$, com leve assimetria positiva e coeficiente de variação considerado médio (17,49%), de acordo com Pimentel Gomes (2000). Lima et al. (2010) avaliaram a variabilidade espacial de atributos químicos do solo e da produção da cultura de pimenta-do-reino (*Piper Nigrum*, L.) no município de São Mateus, ES; e encontraram medidas próximas com relação ao atributo K, com média igual a 69,0 $mmol_c\ dm^{-3}$, com distribuição assimétrica positiva (Assimetria = 1,57), no entanto os dados não apresentaram distribuição de frequência definida, como neste trabalho.

Os atributos Argila (ARG) e CTC apresentaram assimetria negativa, (Tabela 1), sendo que as médias foram 51,87% e 7,74 $mmol_c\ dm^{-3}$, respectivamente e coeficientes de variação considerados baixos, segundo Pimentel Gomes (2000), com valores 2,19 e 6,33%, respectivamente. A variável CTC se mostrou distribuída seguindo um modelo quase normal (p-valor = 0,0338), considerando que o Teste de Shapiro & Wilk é realizado sob a hipótese nula de normalidade dos dados. No trabalho de Lima et al. (2010), o atributo CTC apresentou média igual a 5,64 $mmol_c\ dm^{-3}$, coeficiente de variação 13,6%, o que indica valores próximos dos encontrados neste trabalho para CTC, exceto que no trabalho dos autores citados anteriormente, a distribuição de frequência para este atributo foi indefinida e apresentou assimetria positiva.

Por fim, a variável MO apresentou leve assimetria à direita (Tabela 1), coeficiente de variação considerado baixo (7,07%) segundo Pimentel Gomes (2000), distribuição de frequência indefinida e média igual a 3,44%. Machado et al. (2007), quando estudaram a variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área de sistema de plantio convencional no município de Uberlândia, MG, chegaram a valores similares ao deste trabalho com relação a média e amplitude da MO, em que encontraram média igual a 3,08%.

As correlações entre as medidas de CE 2 kHz, 7 kHz e 15 kHz foram significativas ao nível de 1% de probabilidade (Tabela 2), sendo positivas, variando entre 0,49 e 0,68. Isso mostrou um comportamento semelhante com respeito às medidas de CE nas três diferentes frequências. Percebe-se também correlação positiva e significativa a 1% entre MO e CTC, fato já esperado, uma vez que quanto maior a quantidade de MO no solo, maior a CTC. Por fim, os maiores valores de correlação entre CE e os demais atributos foi entre CE (15 kHz) vs CTC e CE (15 kHz) vs K, sendo que em ambos os casos houve significância a 1%, com coeficientes 0,226 e 0,318, respectivamente.

Tabela 2. Matriz de correlação linear entre a condutividade elétrica e de alguns atributos de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.

Atributos[(a)]	Coeficiente de correlação[(b)]					
	CE 2 kHz	CE 7 kHz	CE 15 kHz	K	ARG	CTC
CE 7 kHz	0,49**	-	-	-	-	-
CE 15 kHz	0,54**	0,68**	-	-	-	-
K	0,15	0,24**	0,25**	-	-	-
ARG	-0,15	-0,18**	-0,28**	0,31**	-	-
CTC	0,17**	0,19**	0,23**	0,32**	0,03	-
MO	0,07	0,05	0,08	0,09	0,31**	0,52**

[(a)] CE = condutividade elétrica; K, ARG, CTC e MO são respectivamente potássio, argila, capacidade de troca catiônica e matéria orgânica; [(b)] * Significativo a 5%, ** Significativo a 1%.

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

Nota-se acréscimos de 0,322 e 0,017 na CE (15 kHz) quando se varia uma unidade positiva nos valores de CTC e K (Figura 1), respectivamente. Tal fato corrobora com a prática, uma vez que quantidades acrescidas de CTC e K provocam um aumento nos valores de CE (Rhoades, 1993; Molin et al., 2005; Machado et al., 2006; Molin & Castro, 2008).

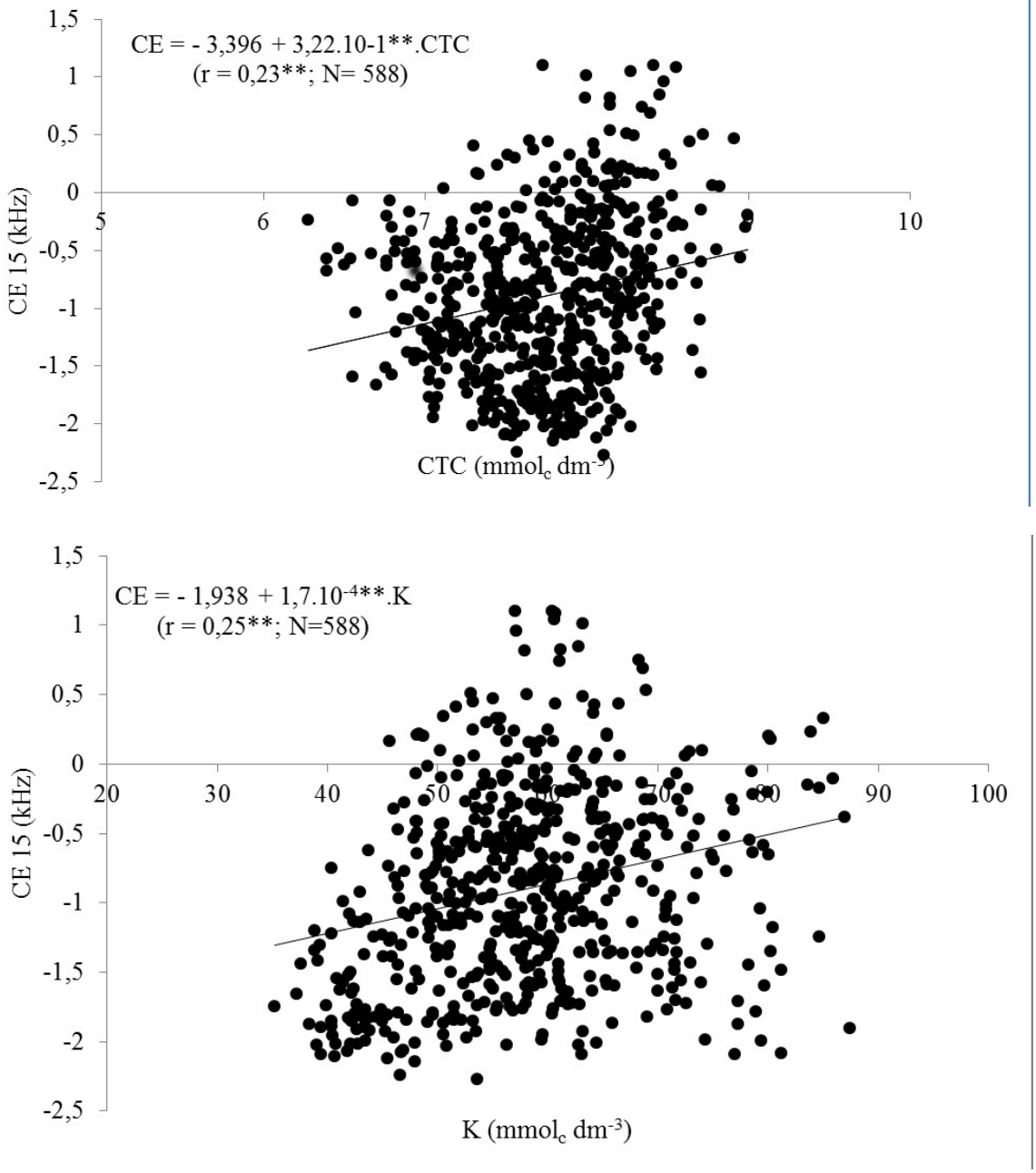


Figura 1. Equações de regressão entre condutividade elétrica e capacidade de troca catiônica (CTC) e potássio (K) de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.

Sudduth et al. (2005) avaliaram a CE medida por indução e por contato e suas relações com fatores do solo, observando boas correlações entre as duas formas de medição da CE com textura e CTC dos solos.

Todos os atributos apresentaram dependência espacial (Tabela 3). Os coeficientes de determinação espacial r² apresentaram valores acima de 0,90 para todos os semivariogramas.

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

Tabela 3. Parâmetros dos semivariogramas e validações cruzadas para a condutividade elétrica e alguns atributos de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico.
(a)CE= condutividade elétrica; ARG, CTC K e MO são respectivamente argila, potássio, capacidade de troca

Atributo[(a)]	Parâmetros do ajuste										
	Modelo[(b)]	C_o	C_o+C	A_o (m)	r^2	SQR[(c)]	ADE[(d)]		Validação cruzada		
							%	Classe	a	b	R
CE 2 kHz	Esf. (11090)	$3{,}33.10^{-1}$	$6{,}67.10^{-1}$	1387	0,923	$7{,}13.10^{-3}$	50,1	ME	-1,04	1,153	0,538
CE 7 kHz	Exp. (2152)	$2{,}41.10^{-1}$	$5{,}61.10^{-1}$	771	0,981	$1{,}07.10^{-3}$	57,0	ME	1,28	1,067	0,663
CE 15 kHz	Gau.(8976)	$2{,}11.10^{-1}$	$7{,}54.10^{-1}$	1430,67	0,948	$1{,}94.10^{-2}$	72,0	AL	0,07	1,091	0,681
ARG	Gau. (11090)	$2{,}85.10^{-1}$	3,189	1816,92	0,978	$2{,}08.10^{-1}$	91,1	MA	-4,07	1,078	0,926
CTC	Gau.(2111)	$2{,}90.10^{-3}$	$2{,}46.10^{-1}$	329,09	0,994	$3{,}29.10^{-4}$	98,8	MA	-0,02	1,002	0,995
K	Gau.(2091)	1,8	8,17.10	299,64	0,987	6,99.10	97,8	MA	-0,13	1,002	0,991
MO	Exp.(3078)	$1{,}0.10^{-4}$	$7{,}03.10^{-2}$	954	0,981	$5{,}627.10^{-5}$	99,9	MA	-0,19	1,055	0,991

catiônica e matéria orgânica;**(b)** gau = gaussiano, exp = exponencial e esf. = esférico; **(c)** SQR = soma dos quadrados dos resíduos; **(d)** ADE = avaliador da dependência espacial, sendo ME = média, AL = alta, MA = muito alta.

O atributo que apresentou maior dependência espacial foi MO (ADE = 99,9%), r^2 próximo de 1 (0,981), soma de quadrado de resíduo aproximadamente zero (SQR = $5{,}627.10^{-5}$) e modelo exponencial, cujo alcance foi de 954 m. Ajustes com parâmetros similares ocorreram para os semivariogramas dos atributos Argila, CTC e K, apenas fazendo uma exceção para a soma de quadrado de resíduos para K, a qual não apresentou magnitude tão próxima de zero quanto aos demais (SQR = 6,99.10) e os modelos para estes três últimos atributos foi o Gaussiano, com alcances de 1816,92 m; 329,09 m; 299,64 m, respectivamente (Tabela 3). De acordo com o critério de Cambardella et al. (1994), Argila, CTC, K e MO indicam forte dependência espacial.

Bernardi et al. (2011), trabalhando com avaliação da produção, propriedades químicas espacializadas e calagem e adubação a taxas variadas em lavoura de milho para silagem no município de São Carlos, SP, encontraram também forte dependência espacial para os atributos MO, CTC e Argila, com o ajuste do modelo de semivariograma exponencial para os três atributos e alcance 42,4 m, 145 m e 62,4 m, respectivamente. Mondo et al. (2012) conseguiram um ajuste gaussiano para o semivariograma do atributo K, com dependência espacial moderada (ADE = 27%) e alcance 422,7m, quando estudaram a variabilidade espacial da fertilidade do solo e sua relação com o potencila fisiológico de sementes em área de produção de soja no município de Campos Novos Paulistas, SP.

No que tange aos modelos de semivariogramas ajustados para o atributo CE, estes apresentaram ajuste esférico para CE (2 kHz), exponencial para CE (7 kHz) e Gaussiano para CE (15 kHz), com alcance 1387 m, 771 m e 1430,67 m, respectivamente, e dependência moderada paras três frequência de CE, variando entre 50,1% e 72%. Machado et al. (2006), desenvolveram um trabalho sobre o mapeamento da condutividade elétrica e relação com a argila de Latossolo de sob plantio direto; o modelo de semivariograma ajustado aos dados de CE foi o exponencial, com alcance 160m.

Em Grego et al. (2011), os semivariogramas para CE (0,00 – 0,30 m) e CE (0,00 – 0,90 m) mostraram dependência espacial, sendo os ajustes todos gaussianos e alcances variando de 175 a 240m, indicando as distâncias máximas para atingir o patamar (C1) da dependência espacial; sendo que o estudo foi conduzido em solo cultivado com cana-de-açúcar, no município de Mogi Mirim, SP.

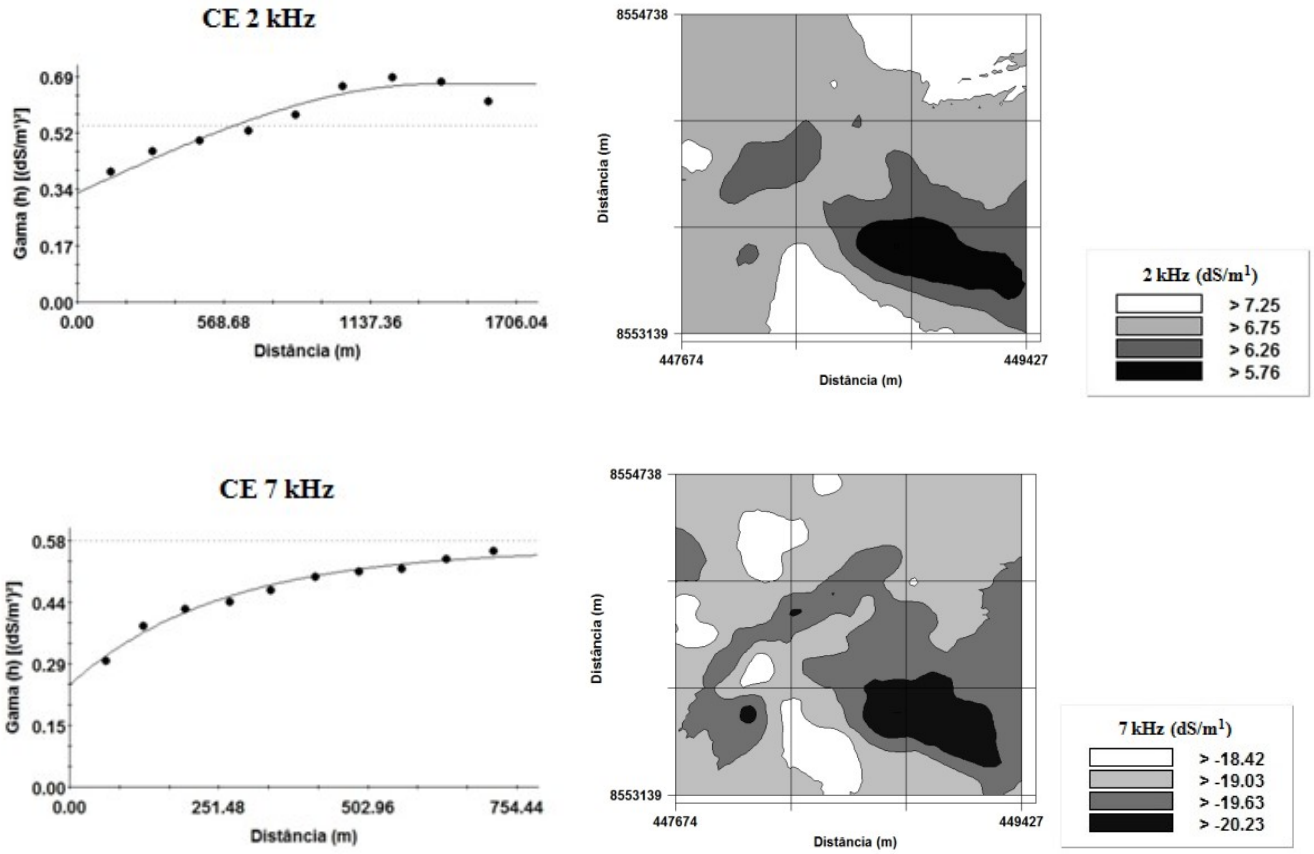
Na Figura 2 percebe-se um certo padrão entre os mapas para as três frequências (2, 7 e 15 kHz), ou seja, apontam menores valores de condutividade elétrica na região sudeste, sendo que nas demais regiões observou-se maiores concentrações de CE, com destaque para uma

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

pequena área na região Sul. A medida da CE é muito importante para avaliação de solos. Anderson Cook et al. (2002) classificaram solos quanto a sua capacidade de produção com precisão de 90% quando combinados dados de condutividade elétrica. Nota-se semelhança entre os mapas de krigagem de CTC e K, se comparado com o mapa de krigagem para CE (15 kHz), sendo que menores concentrações de K e CTC estão, mais precisamente, nas regiões leste, se estendendo nas direções sudeste e nordeste (Figuras 3 e 4), fato que vai de encontro aos valores de correlaçãoes positivas e significativas encontrados para estes atributos (Tabela 2), já discutidos anteriomente.

Reis et al. (2009) estudaram a correlação entre a condutividade elétrica de um Latossolo Amarelo Escuro com propriedades químicas do solo numa área pertencente a Embrapa/CNPMS, em Sete Lagoas, MG. O resultado encontrado corrobora com este trabalho, sendo que encontraram uma correlação média positiva (r = 0,66) para CE vs CTC, e, para CE vs K, o coeficiente de correlação de Pearson foi 0,14.

Ainda segundo os mesmos autores, a alta correlação entre CE e CTC está no fato de que a CTC indica a quantidade de ions positivos (cátions) que o solo é capaz de reter em determinadas condições e permutar por quantidades estequiométricas equivalentes de outros cátions equivalentes de outros cátions, sendo função da intensidade de cargas negativas que se manifesta nos colóides, o que justifica tal relação.



Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

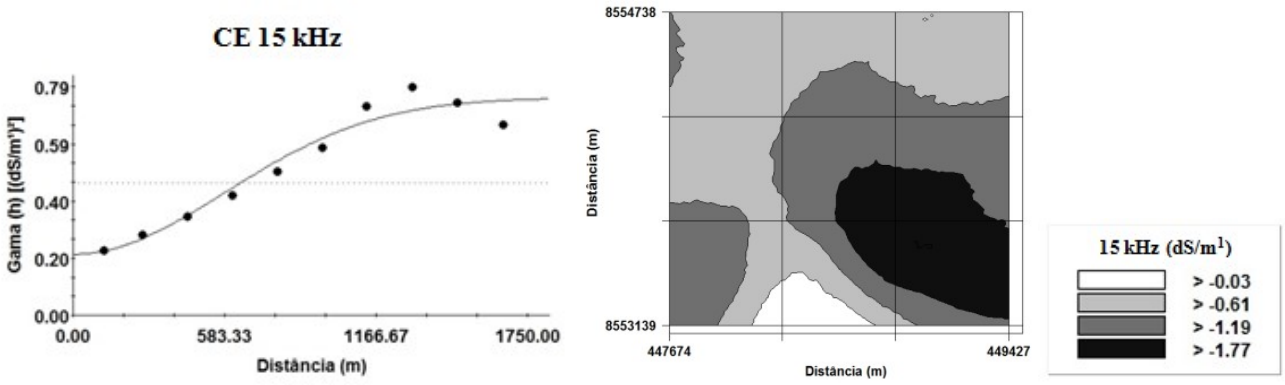


Figura 2- Semivariogramas simples e mapas de krigagem da condutividade elétrica (CE) nas frequências 2, 7 e 15 kHz de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de Lucas do Rio Verde, MT.

Com relação a MO, observa-se no mapa de krigagem (Figura 4), valores menores deste atributo na parte superior do mapa, com pequena extensão para parte sudeste. Notou-se uma pequena correlação positiva (r < 0,10), entre CE e MO, conforme a Tabela 2. No trabalho de Reis et al. (2009), houve pequena correlação negativa entre estes atributos (r = -0,13).

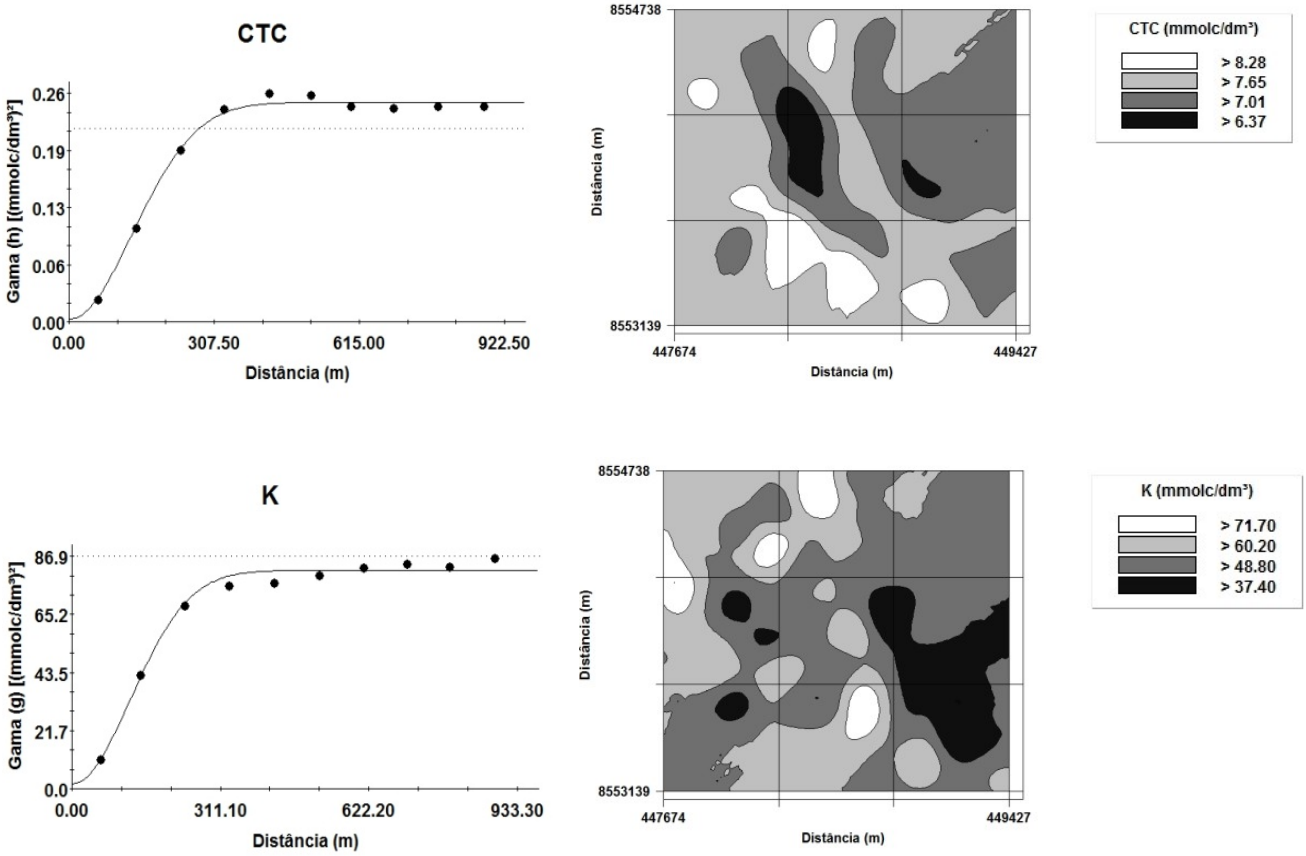


Figura 3. Semivariogramas simples e mapas de krigagem da CTC, K, de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de Lucas do Rio Verde, MT.

Revista Agrarian
ISSN: 1984-2538

No que tange ao atributo Argila, pode-se verificar um comportamento bem diferente com relação a disposição do mapa de krigagem (Figura 4) com relação ao da CE (Figura 2), em que houve maior concentração de Argila na região norte do mapa, se estendendo para direção noroeste e oeste. Neste trabalho, a correlação entre CE e Argila foi negativa (r = -0,28), valor bastante similar com o encontrado por Reis et a. (2009), sendo que o coeficiente de correlação foi igual a -0,24.

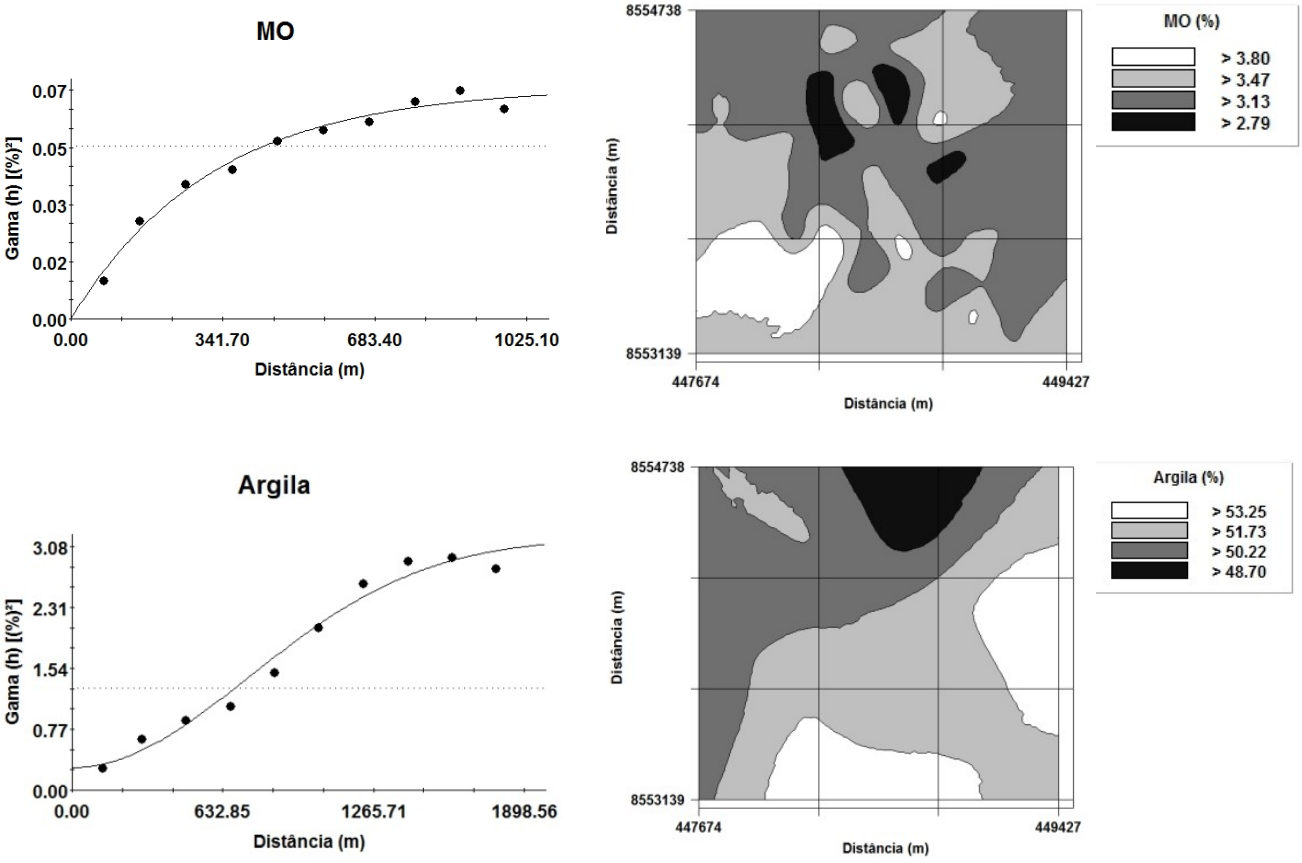


Figura 4. Semivariogramas simples e mapas de krigagem da Matéria Orgânica (MO) e Argila de um Latossolo Vermelho Amarelo distrófico de Lucas do Rio Verde, MT.

Conclusões

Todos os atributos apresentaram dependência espacial de moderada a forte, sendo que os atributos de CE nas três frequências estudadas apresentaram um padrão definido, com valores menores na região sudeste do mapa.

Os atributos que apresetaram maior relação com a Condutividade elétrica, foram K e CTC.

A Argila apresentou comportamento inverso ao da Condutividade elétrica, havendo maior concentração de Argila nas regiões sul e leste da área estudada.

Referências

ANDERSON COOK, C. M.; ALLEY, M. M.; ROYGARD, J. K. F.; KHOSLA, R.; NOBLE, R. B.; DOOLITLLE, J. A. Di-erentiating soil types using electromagnetic conductivity and crop yield map. **Soil Science Society of America Journal,** v. 66, p. 1562-1570, 2002.

BERNANDI, A. C. C.; BETTIOL, G. M.; INAMASU, R. I.; RABELLO, L. M. Avaliação da produção e propriedades químicas espacializadas e da calagem e adubação a taxas variadas em lavoura de milho para silagem em São Carlos, SP. In:_____. (Org). Agricultura de precisão: Um novo olhar. São Carlos, 2011. p. 178 – 183.

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 Society of American Journal,** Madison, v.58, n.5, p. 1501-11, 1994.

CAMINHA JUNIOR, I.C.; SERAPHIM, O.J.; GABRIEL, L.R.A. Caracterização de uma área agrícola irrigada com efluente agroindustrial, através de análises químicas e da resistividade do solo. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v.13, n.4, p.40-54, 2000.

CRESSIE, N**. Statistics for spatial data.** New York: John Wiley, 1991.

CLARK, R.L.; CHEN, F.; KISSEL, D.E.; ADKINS, W. Mapping soil hardpans with the penetrometer and electrical conductivity. Internacional Conference on Precision Agriculture, 5., 2000, Minneapolis. **Proceedings...** Minneapolis: P.C. Robert, 2000. 1 CD-ROM.

DALCHIAVON, F.C.; CARVALHO, M.P.; ANDREOTTI, M. ; MONTANARI, R. Variabilidade espacial de atributos da fertilidade de um Latossolo Vermelho Distroférrico sob Sistema Plantio Direto. **Revista Ciência Agronômica**, v.43, n.3, p.453-461, 2012.

DOBERMANN, A.; GEORGE, T. Field–scale soil fertility variability in acid tropical soils. In: World Congress of Soil Science, 15., Acapulco, 1994. Transactions. Acapulco, 1994. v.5. p.610-627.

DOOLITTLE, J.A.; SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; INDORANTE, S.J. Estimating depths to claypans using eletromagnetic induction methods. Journal of Soil and Water Conservation, Ankeny, v.49, n.6, p.572-5, 1994.

Geophysical Survey Systems. Profiler EMP-400. The world leader in subsurface Imaging, 2006, 85p.

GRECO, C. R. .; RABELLO, L. M.; BRANCALIÃO, S. R.; VIEIRA, S. R.; OLIVEIRA, A. Geoestatística aplicada a condutividade elétrica do solo e altitude do solo cultivado com cana-de-açúcar. In:_____. (Org). **Agricultura de precisão: Um novo olhar**. São Carlos, 2011. P. 245 – 248.

GS+: **Geostatistics for environmental sciences**. 7. ed. Plainwell: Gamma Desing Software, 2004. 159p.

GSSI: Geophysical Survey Systems, Inc. The World Leader in Subsurface Imaging™: Profiler EMP-400, 2007. Disponível em: http://www.alphageofisica.com.br/gssi/profiler/GSSI-ProfilerBrochure_br.pdf. Acesso em: 20/07/2015.

JAYNES, D.B. Improved soil mapping using electromagnetic induction surveys. In: International Conference on Precision Agriculture, 3., 1996, Minneapolis. **Proceedings**... Minneapolis: P.C. Robert, R.H. Rust and W.E. Larson, 1996. p.169-79.

KACHANOSKI, R.G.; GREGORICH, E.G.; WESENBECK, I.J. VAN. Estimating spatial variations of soil water content using noncontacting electromagnetic inductive methods. **Canadian Journal of Soil Science,** Toronto, v.68, p.715-22, 1988.

KITCHEN, N.R.; SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S.P. Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils. Journal of Production Agriculture. 12: 607-617. 1999.

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos.** 2. ed. São Paulo. UNESP, 253 p, 2003.

LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, R.; ROCHA, W.; QUARTEZANI, W. Z. Análise espacial de atributos químicos do solo e da produção da cultura pimenta-do-reino (piper nigrum, l.). IDESIA. Chile. v. 28, n. 2, 2010.

LIMA, C.G.R. .; CARVALHO, M. P.; NARIMATSU, K. C. P.; SILVA, M. G.; QUEIROZ, H. A. Atributos físico-químicos de um latossolo do cerrado brasileiro e sua relação com características dendrométricas do eucalipto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v.34, n.1, p.163-173, 2010.

LUCHIARI JUNIOR, A.; SHANAHAN, J.; LIEBIG, M.; SCHLEMMER, M.; SCHEPERS, J. S.; FRANCIS, D.; PAYTON, S. Strategies for Establishing Management Zones for Site Speci c Nutrient Management. In: International Conference on Precision Agrculture, 5., 2000, Minneapolis. **Proceedings…**Minneapolis: University of Minnesota, 2000.

LUND, E. D.; COLIN, P. E.; CHRISTY, C.; DRUMMOND, P. E. Applying soil electrical conductivity technology to precision agriculture. In: International Conference on Precision Agriculture, 4.,

1998, Madison. **Proceedings…**Madison: ASA-CSSA-SSSA, 1999. p.1089-1100.

LUND, E. D.; WOLCOTT, M. C.; HANSON, G. P. Applying nitrogen site-specifically using soil electrical conductivity maps and precision agriculture technology. **Scientific World**, v.1, p.767-776, 2001. Supplement 2.

MACHADO, L. O.; LANA, A. M. Q.; LANA, R. M. Q.; GUIMARÃES, E. C.; FERREIRA, C. V .Variabilidade espacial de atributos químicos do solo em área sob sistema plantio convencional. Revista Brasileira de Ciência do Solo. v. 31, p. 591 – 599, 2007.

MACHADO, P.L.O.A.; BERNANDI. A.C.C.; VALENCIA, L.I.O.; MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.; SILVA, C.A.; ANDRADE, A.G.; MADARI, B.E.; MEIRELLES, M.S.P. Mapeamento da condutividade elétrica do solo e relação com os teores de argila de um latossolo vermelho sob plantio direto no Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.41, n.6, p.1.023-1.031,2006.

MCBRIDE, R.A.; GORDON, A.M.; SHRIVE, S.C. Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity. **Soil Science Society of American Journal,** Madison, v.54, p.290-3, 1990.

MOLIN, J.P.; GIMENEZ, L.M.; PAULETTI, V.; SCHMIDHALTER, U.; HAMMER, J. Mensuração da condutividade elétrica do solo por indução e sua correlação com fatores de produção. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.2, p.420-426, 2005.

MOLIN, J.P.; CASTRO, C.N. Establishing management zones using soil electrical conductivity and other soil properties by the fuzzy clustering technique. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.65, p.567-573, 2008.

MONDO, V. H. V.; GOMES JUNIOR.; PINTO, T. L. F.; MARCHI, J. L.; MOTOMIYA, A. V. A.; MOLIN, J. P.; CICERO, S. M. Variabilidade espacial da fertilidade do solo e sua relação com o potencial fisiológico de sementes em área de produção de soja. **Revista Brasileira de Sementes**. v.34, n.2, 193 – 201, 2012.

PIMENTEL GOMES, F. **Curso de estatística experimental.** 14.ed. Piracicaba: Degaspari, 2000, 477 p.

RAIJ, B.V.; ANDRADE, J.C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. **Campinas Instituto Agronômico**, 2001. 285p.

REIS, L. R. .; VIEIRA, L. B.; MANTOVANI, E. C.; SANTOS, N. T.; QUEIROZ, D. M. Estudo da correlação da condutividade elétrica em um Latossolo Amarelo Escuro com propriedades químicas do solo. REVENG, Viçosa, p. 227 – 232, 2009.

RHOADES, J. D. Electrical conductivity methods for measuring and mapping soil salinity. Advances in Agronomy, San Diego, v.49, p.232-242, 1993.

ROBERTSON, G.P. GS+: geostatistics for the environmental sciences. Michigan: Gamma Design Software, 1998.

SCHLOTZHAVER, S.D.; LITTELL,R. C. SAS system for elementary statical analysis. 2.ed. Cary: SAS, 1997. 441p.

SOUZA, L .S. **Variabilidade espacial do solo em sistemas de manejo.** Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1992. 162p. (Tese de Doutorado)

SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; WIEBOLD, W.J.; BATCHELOR, W.D.; BOLLERO, G.A.; BULLOCK, D.G.; CLAY, D.E.; PALM, H.L.; PIERCEF, F.J.; SCHULER, R.T.; THELEN, K.D. Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. **Computers and Electronics in Agriculture**, New York, v.46, p.263-283, 2005.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais, R.F.; Alvarez, V.H.; Schaefer, C.E.G.R. (Ed.). Tópicos em ciência do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2000. V.1, p.1-53.

WILLIAMS, B.G.; HOEY, D. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt and clay content of soils. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.25, n.1, p.21-7, 1987.