

Distribuição espacial da condutividade elétrica do solo medida por indução eletromagnética e da produtividade de cana-de-açúcar

Glécio Machado Siqueira (1*); Ênio Farias de Franca e Silva (2); Jorge Dafonte Dafonte (3)

(1) Universidade Federal do Maranhão (UFMA), Centro de Ciências Agrárias e Ambientais, BR-222, km 04, s/n, 65500-000 Chapadinha (MA), Brasil.

(2) Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Departamento de Engenharia Agrícola, Rua Dom Manoel de Medeiros, s/n, 52171-900 Recife (PE), Brasil.

(3) Universidade de Santiago de Compostela (USC), Departamento de Engenharia Rural, Lugo, Galicia, Spain.

(*) Autor correspondente: gleciosiqueira@hotmail.com

Recebido: 23/jul./2014; Aceito: 18/dez./2014

Resumo

A agricultura atual requer a inserção de novas tecnologias que permitam a identificação dos padrões de solo e planta, possibilitando a determinação da sua variabilidade espacial. O objetivo deste trabalho foi determinar a relação espacial entre a produtividade da cana-de-açúcar, da condutividade elétrica do solo medida por indução eletromagnética e da textura do solo. A área experimental está localizada em Goiana (Pernambuco, Brasil) (Latitude 07°34'25"S, Longitude 34°55'39"W). O experimento foi conduzido em uma área de 6,5 ha. A produtividade da cana-de-açúcar e a condutividade elétrica aparente do solo (CE_a) foram medidas em 90 pontos de amostragem distribuídos aleatoriamente na área de estudo. Os mapas de condutividade elétrica do solo (CE_{a-V} e CE_{a-H}) apresentaram comportamento semelhante ao da produtividade de cana-de-açúcar. A correlação linear apresentou valores de 0,74 (produtividade $\times CE_{a-H}$) e 0,85 (produtividade $\times CE_{a-V}$). A condutividade elétrica medida por indução eletromagnética apresentou-se como uma ferramenta importante para a previsão da produtividade da cana-de-açúcar. Os atributos texturais (argila, silte e areia) apresentaram elevada variabilidade espacial.

Palavras-chave: geoestatística, agricultura de precisão, zonas de manejo do solo.

Spatial distribution of soil apparent electrical conductivity measured by electromagnetic induction and sugarcane yield

Abstract

The current agriculture requires the use of new technologies that allow the identification of soil and plant patterns, and the determination of their spatial variability. This work determined the spatial relationship between the sugarcane yield and soil apparent electrical conductivity (EC_a) measured by electromagnetic induction (EMI) and soil texture. The experimental area is located in Goiana (Pernambuco State, Brazil) (07°34'25"S, 34°55'39"W). The experimental area was 6.5 ha. Sugarcane yield and soil apparent electrical conductivity (EC_a) were measured at 90 sampling points randomly distributed in the study area. Maps of soil electrical conductivity (EC_{a-V} and EC_{a-H}) were similar to that of sugarcane yield. The linear correlation showed values of 0.74 (yield $\times EC_{a-H}$) and 0.85 (yield $\times EC_{a-V}$). The electrical conductivity measured by electromagnetic induction has been shown to be an important tool for predicting the yield of sugarcane. The textural properties (clay, silt and sand) showed high spatial variability.

Key words: geostatistics, precision agriculture, soil management zones.

1. INTRODUÇÃO

O complexo agroindustrial da cana-de-açúcar, especialmente a cadeia produtiva do álcool, coloca o Brasil em posição de país líder em progresso tecnológico na área energética a partir de biocombustíveis. Em um mercado global em que os conhecimentos fluem com grande velocidade, a

manutenção da competitividade está condicionada a uma permanente busca por tecnologias inovadoras.

A Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2012) prevê para a safra de 2012/2013 uma área estimada de plantio em 8.520,5 milhões hectares, distribuída em

todos estados produtores, representando um aumento de 2,0% com relação à safra anterior. A produtividade média da safra 2012/2013 foi de 69,44 t ha⁻¹, e uma produção de 595,13 milhões de toneladas (CONAB, 2012). O Estado de Pernambuco, segundo a CONAB (2012), possui uma área cultivada com cana-de-açúcar de 327,61 mil hectares na safra 2012/2013, com uma produtividade de 45,5 t ha⁻¹, e uma produção de 14.906,3 milhões de toneladas.

O crescimento da produção de cana-de-açúcar suscita a necessidade de avaliar quais são os impactos econômicos, sociais e ambientais deste processo, tanto para o País como um todo, como para as regiões em que tem ocorrido. Nesse sentido, a agricultura atual precisa de metodologias que promovam a mudança na técnica de quantificação dos atributos do solo, a fim de auxiliar na caracterização da variabilidade desses atributos de maneira rápida e precisa (Siqueira et al., 2010). Porém, os custos envolvidos, a grande demanda de tempo e trabalho e a necessidade de recursos humanos com elevado potencial técnico tornam a execução desses trabalhos mais detalhados, utilizando classificação numérica praticamente inexequível (Figueiredo et al., 2008).

Tentando resolver esse problema, autores como Cunha et al. (2005), Campos et al. (2009), Siqueira et al. (2010), além de utilizar a classificação numérica nos estudos de causa e efeito em ciência do solo, associam esses resultados a compartimentos identificados com base em conceitos de geomorfologia. Estes podem ser associados à aptidão agrícola de diferentes locais. Siqueira et al. (2010) chamam esses compartimentos de áreas de manejo específico. Segundo esses autores, a identificação dessas zonas de manejo específico permite a transferência de tecnologia para áreas semelhantes.

Esses compartimentos vêm sendo utilizados para os mais diversos fins em ciência do solo: planejamento amostral (Montanari et al., 2005); dinâmica de formação de argilominerais (Camargo et al., 2008); potencial de adsorção de nutrientes (Barbieri et al., 2008); perda de solo (Campos et al., 2008); aplicação de insumos em taxa variada (Barbieri et al., 2009); planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar (Campos et al., 2009), emissão de CO₂ (Brito et al., 2009), dentre outros temas.

Dentre os atributos do solo, a condutividade elétrica aparente (CE_a) tem sido amplamente utilizada devido a sua correlação com outros atributos do solo, e por conseguinte, com a produtividade dos cultivos (Lesch et al., 2005; Siqueira et al., 2009, 2013). Segundo McNeill (1980), Lesch et al. (2005), Sudduth et al. (2005), Kühn et al. (2009) e Siqueira et al. (2009), a CE_a está relacionada com o conteúdo de água no solo, textura, conteúdo de matéria orgânica, tamanho e distribuição dos poros, salinidade, capacidade de trocas catiônicas, concentração de eletrólitos na solução do solo.

Dessa maneira, o objetivo foi determinar a relação espacial entre a produtividade de cana-de-açúcar e a condutividade elétrica do solo medida por indução eletromagnética e a textura do solo em uma área de produção comercial sob

monocultivo há mais de 27 anos, em Goiana, Pernambuco, Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A área experimental está localizada no município de Goiana (Zona da Mata Norte, Pernambuco, Brasil), cujas coordenadas são: Latitude 07°34'25"S e Longitude 34°55'39"W. Os solos da região da área de estudo derivam do grupo Barreiras, constituídos de sedimentos de origem continental do final do Terciário, de textura arenosa até argilosa, caracterizados por uma alteração intensa (Brasil, 1969, 1972). O solo da área de estudo é classificado como "Orthic Podzol" (Soil Survey Staff, 2010) e de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos é um Espodossolo Humilúvico órtico textura arenosa, de acordo com a classificação EMBRAPA (2013), cuja caracterização física para área de estudo é apresentada na tabela 1. A textura do solo (argila, silte e areia) foi determinada pelo método da pipeta, a densidade do solo e a umidade volumétrica do solo foram determinados no perfil pedológico utilizando anéis volumétricos de 100 cm³, conforme descrito por Camargo et al. (1986).

O clima da região, segundo a Classificação Climática de Köppen, é tropical úmido do tipo As' ou pseudotropical, que se caracteriza por ser quente e úmido, com chuvas de outono a inverno, temperaturas médias anuais variando em torno de 24 °C.

A área em estudo possui aproximadamente 6,5 ha, altitude média de 8,5 m (Figura 1) e vem sendo manejada nos últimos 27 anos com monocultivo de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), com queima da palha para colheita. Na safra de 2010/2011, o cultivo foi renovado, sendo a área arada, gradeada e posteriormente cultivada novamente com cana-de-açúcar.

A amostragem da produtividade da cana-de-açúcar e da condutividade elétrica aparente do solo e da textura foi realizada no dia 9/11/2011 em 90 pontos de amostragem em uma malha irregular (Figura 2).

A área de estudo apresenta grande importância no contexto regional, uma vez que a cultura de cana-de-açúcar é o principal cultivo, localizado muitas vezes em zonas influenciadas por salinidade devido a sua proximidade com o mar, sobretudo nos períodos de maré alta, com a salinidade

Tabela 1. Atributos físicos para o Espodossolo Humilúvico órtico textura

Profundidade (m)	--- Textura (g kg ⁻¹) ---			Densidade do solo (kg dm ⁻³)	Umidade do solo (m ³ m ⁻³)
	Argila	Silte	Areia		
0,0-0,3	44	26	930	1,52	0,345
0,3-0,60	43	25	932	1,54	0,368
0,6-1	44	26	930	1,60	0,426
> 1 m	32	40	928	1,66	0,472

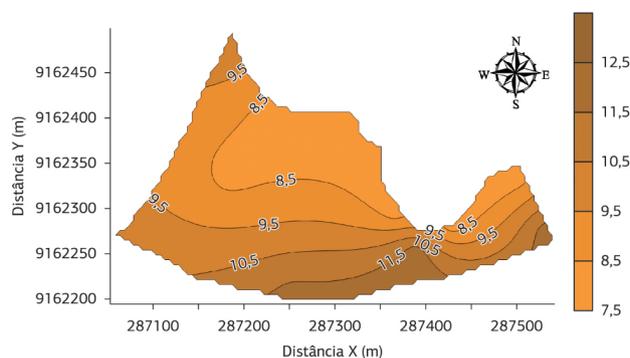


Figura 1. Mapa topográfico para área de estudo.

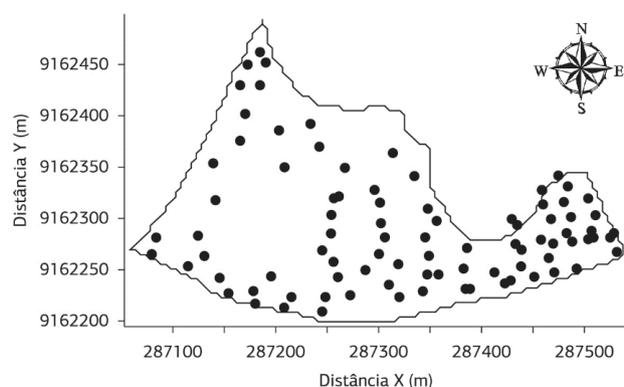


Figura 2. Localização dos pontos de amostragem na área de estudo.

mais acentuada nas partes mais baixas. A área está localizada a aproximadamente 10 km do Oceano Atlântico na direção leste e a 2,5 km a nordeste de um rio que deságua no oceano, sofrendo influência salina de duas fontes distintas.

A produtividade da cana-de-açúcar foi determinada por meio do método proposto por Gheller et al. (1999), que estima o peso total da parcela através da multiplicação do número de colmos da área amostrada pelo peso médio de dez colmos. Em cada ponto amostral foram escolhidas três linhas de cana-de-açúcar de dez metros de comprimento, nas quais se contaram os números de colmos para o cálculo de seu peso médio. Posteriormente, foram colhidos dez colmos ao acaso dentre as três linhas de cada ponto para a pesagem.

Dessa maneira, a produtividade pôde ser calculada da seguinte forma, como descrito por Gheller et al. (1999):

- a) Peso médio por colmo:

$$pmc = \frac{pf}{tcolmos} \quad (1)$$

em que: *pf* é o peso do feixe com os 10 colmos; *tcolmos* é o total de colmos contados nas três linhas.

- b) Peso estimado no ponto amostral:

$$pep = \frac{pmc}{tcolmos} \quad (2)$$

A partir do peso médio estimado em cada ponto amostral, pode-se calcular a produtividade por hectare ($t\ ha^{-1}$).

A condutividade elétrica aparente do solo (CE_a , $mS\ m^{-1}$) foi medida por indução eletromagnética com o equipamento EM38 (Geonics®) em duas profundidades: dipolo vertical (profundidade efetiva de avaliação de 1,5 m – CE_a-V) e dipolo horizontal (profundidade efetiva de avaliação de 0,4 m – CE_a-H). Os valores de CE_a medidos em campo (CE_a-V e CE_a-H) foram então correlacionados com a temperatura do solo, conforme metodologia proposta por Huth & Poulton (2007). No entanto, por se tratar de uma área pequena, onde é possível realizar a amostragem da CE_a em curto espaço de tempo, as correções dos valores de CE_a pela temperatura do solo não ofereceram mudanças consistentes aos valores originais assim que se optou por utilizar os valores originais de CE_a .

A textura do solo (argila, silte e areia) foi determinada nas camadas de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m de profundidade, de acordo com Camargo et al. (1986).

Os principais momentos estatísticos descritivos (média, desvio-padrão, coeficiente de variação, assimetria e curtose) foram determinados para cada ponto de amostragem. Os valores de coeficiente de variação (CV, %) foram utilizados para determinar a variabilidade dos dados segundo a classificação de Warrick & Nielsen (1980).

Para analisar a variabilidade espacial das variáveis, os dados foram analisados por meio de métodos geoestatísticos de análise de semivariogramas, descritos por Vieira (2000), partindo das pressuposições de estacionaridade da hipótese intrínseca. A autocorrelação espacial entre locais vizinhos foi calculada através da semivariância $\gamma(h)$, por meio do programa GEOSTAT (Vieira et al., 2002).

Modelos matemáticos foram ajustados aos semivariogramas, que permitiram visualizar a estrutura de variação espacial das variáveis. Os critérios e procedimentos para ajuste do modelo do semivariograma foram realizados conforme Vieira (2000), considerando os métodos dos mínimos quadrados ordinários e mínimos quadrados ponderados e a validação cruzada. Do ajuste de um modelo matemático aos dados, foram definidos os parâmetros do semivariograma:

- efeito pepita (C_0), que é o valor de γ quando $h=0$;
- alcance da dependência espacial (a), que é a distância em que $\gamma(h)$ permanece aproximadamente constante, após aumentar com o aumento de h ;
- patamar (C_0+C_f), que é o valor de $\gamma(h)$ a partir do alcance e que se aproxima da variância dos dados, se ela existir.

A análise geoestatística preliminar indicou que os dados da produtividade da cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$) apresentaram tendência, sendo então retirada a tendência por meio das seguintes equações para estimação dos resíduos:

1. Linear

$$m(x) = A_0 + A_1x + A_2y + A_3xy \quad (3)$$

2. Quadrática ou parabólica

$$m(x) = A_0 + A_1x + A_2y + A_3x^2 + A_4y^2 + A_5xy \quad (4)$$

3. Cúbica

$$m(x) = A_0 + A_1x + A_2y + A_3x^2 + A_4y^2 + A_5xy + A_6x^3 + A_7y^3 + A_8x^2y + A_9xy^2 \quad (5)$$

O semivariograma escalonado foi construído com a finalidade de avaliar os padrões de variabilidade espacial entre os atributos em estudo (Vieira, 2000; Vieira et al., 2002).

Para a análise do grau de dependência espacial (GD) das variáveis, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), considerando a seguinte relação: $(C_0/C_0+C_1)*100$, onde de 0 a 25% (forte), entre 25 e 75% (moderada) e > 75% (fraca).

O programa SURFER (Golden Software Inc., 1999) foi utilizado para construção dos mapas de isolinhas para os atributos físicos do solo envolvidos neste estudo. Dessa maneira, os parâmetros de ajuste do semivariograma foram utilizados no processo de construção dos mapas de isolinhas dos atributos que apresentaram variabilidade espacial. Para efeito de comparação entre os atributos em estudo, quando detectada a presença de efeito pepita puro, foram construídos mapas de isolinhas usando os parâmetros de “default” do programa SURFER, que se baseia em um modelo de interpolação linear por *krigagem* (Golden Software Inc., 1999).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estatísticos demonstram que a produtividade média da cana-de-açúcar na área de estudo é de 75,54 t ha⁻¹ (Tabela 2). Ressalta-se que a produtividade na área é cerca

de 66,02% superior, com relação à média do estado de Pernambuco para a safra de 2012/2013 (CONAB, 2012). A produção nacional na safra 2012/2013 (CONAB, 2012) foi de 69,44 t ha⁻¹, havendo uma produtividade na área de 8,78% superior à média nacional.

Os valores médios para a condutividade elétrica aparente do solo medida por indução eletromagnética no dipolo vertical (CE_a-V) e no dipolo horizontal (CE_a-H) são relativamente próximos (Tabela 2). Tal fato pode ser explicado porque no momento das amostragens o lençol freático encontrava-se próximo à superfície do solo (Siqueira et al., 2013), sendo este o fator que mais interferiu sobre as leituras realizadas com o EM38, corroborando com Lesch et al. (2005). Ressaltamos que na parte mais baixa do terreno o lençol freático encontrava-se 0,2 m acima da superfície do solo, afastando-se com o aumento da topografia.

A produtividade apresentou o maior valor variância dos dados, uma vez que ela varia consideravelmente com as mudanças do solo ao longo da paisagem. Os valores de coeficiente de variação (CV, %) são classificados como medianos (12-60%), conforme a classificação de Warrick & Nielsen (1980). Verifica-se um aumento dos valores de CV para a CE_a-V (31,10%) e a CE_a-H (40,60%). Siqueira et al. (2009) descrevem que as maiores diferenças entre os valores de condutividade elétrica medida por indução eletromagnética na camada superficial e em profundidade se devem às maiores diferenças do conteúdo de água no solo na camada superficial, sendo que em profundidade tal conteúdo torna-se mais estável. Confirmado por meio da análise do mapa topográfico da área de estudo (Figura 1), uma vez que no momento das amostragens as partes mais baixas do terreno encontravam-se encharcadas, enquanto nas partes mais altas do terreno o lençol freático encontrava-se mais afastado da superfície, justificando as diferenças nas leituras da CE_a.

Os atributos texturais (argila, silte e areia – g kg⁻¹) confirmam a textura arenosa da área de estudo nas duas camadas em estudo (0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m), contudo, o valor médio do conteúdo de areia (Tabela 2) encontrado na camada superficial (0,0-0,2 m) e na camada subsuperficial (0,2-0,4 m) são cerca de 20% menores do que o perfil

Tabela 2. Parâmetros estatísticos para a produtividade da cana-de-açúcar (t ha⁻¹), a condutividade elétrica do solo medida por indução eletromagnética (CE_a-V e CE_a-H, mS m⁻¹) e da textura do solo (g kg⁻¹)

Parâmetro estatístico	Produtividade (t ha ⁻¹)	CE _a -V		CE _a -H		Textura (g kg ⁻¹)			
		(mS m ⁻¹)				0,0-0,2 m		0,2-0,4 m	
		Argila	Silte	Argila	Silte	Argila	Silte	Areia	Argila
Média	75,54	15,67	13,90	253,2	42,3	712,9	253,4	26,9	719,8
Variância	241,94	23,67	31,80	7,87	8,37	13,99	4,48	5,82	9,90
DP	15,55	4,86	5,64	2,81	2,89	3,74	2,12	2,41	3,15
CV (%)	20,60	31,10	40,60	0,11	0,68	0,05	0,08	0,90	0,04
Assimetria	2,041	-0,081	0,087	-0,48	0,86	-0,24	0,15	1,05	-0,52
Curtose	9,112	-0,325	-0,349	0,54	-0,28	-0,20	0,42	1,01	0,33
D	0,141 n	0,076 n	0,084 n	0,14 n	0,19 n	0,13 n	0,12 n	0,16 n	0,11 n

DP = desvio-padrão. CV = coeficiente de variação. D = probabilidade de erro de 1% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. n = normal. Ln = lognormal. DP = desvio-padrão. CV = coeficiente de variação. D = probabilidade de erro de 1% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. n = normal. Ln = lognormal.

representativo para a área de estudo (Tabela 1). Os valores de coeficiente de variação (CV, %) são baixos para todos os atributos texturais. Tal fato está relacionado com o processo de formação do solo na área de estudo que se baseia na sedimentação, fazendo com que as partículas mais finas se acomodassem em profundidade e as partículas mais grossas na camada superior (Brasil, 1969, 1972).

A correlação linear entre os atributos (Tabela 3) demonstrou que o maior valor de correlação foi encontrado entre CE_a-V x CE_a-H (0,934). Justifica-se que esse elevado valor de correlação se deve à natureza de medição de ambas as propriedades, pois de acordo com Lesch et al. (2005), até 80% da resposta obtida com o dipolo vertical (CE_a-V) é oriunda da camada superficial do solo (CE_a-H). A correlação linear entre a produtividade e a CE_a foi elevada, apresentando valores de 0,850 (produtividade x CE_a-V) e 0,740 (produtividade x CE_a-H).

Dantas et al. (2006) ressaltam o aumento da produtividade da cana-de-açúcar quando não há restrições hídricas. Dessa maneira, os valores elevados de correlação entre a produtividade x CE_a-V (0,850) e produtividade x CE_a-H (0,740) são justificados, uma vez que nas zonas mais elevadas a produtividade é menor e, por sua vez, os valores de CEA, ocorrendo aumento da produtividade e da CEA nas partes mais baixas do terreno.

No entanto, quando os valores de produtividade da cana-de-açúcar foram correlacionados com o conteúdo de argila, silte e areia nas camadas de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m

(Tabela 3), não foram encontrados valores de correlação elevados; pelo contrário, os valores de correlação são baixos ou nulos, conforme classificação proposta por Santos (2007). O mesmo ocorre para a correlação entre os atributos texturais e a CE_a-V e a CE_a-H . A ocorrência de baixos valores de correlação linear entre os atributos texturais e a CE_a-V e a CE_a-H não era esperado, uma vez que o conteúdo de argila no solo é o atributo que mais interfere na manifestação dos valores de CE_a-V e a CE_a-H (McNeill, 1980; Lesch et al., 2005; Sudduth et al., 2005; Kühn et al., 2009; Siqueira et al., 2009). A ocorrência desse fato está relacionada ao excedente hídrico na área de estudo, representado pelo lençol freático que estava muito próximo à superfície do solo no momento da colheita da cana-de-açúcar e das amostragens dos demais atributos do solo em estudo.

Valores de correlação linear negativos entre os atributos texturais já eram esperados, uma vez que, com o aumento do conteúdo de areia na área de estudo, há uma diminuição dos valores de argila e silte, sendo o maior valor de correlação encontrado para o silte x areia na camada de 0,2-0,4 m de profundidade (-0,704).

A análise geoestatística (Tabela 4) demonstrou que o modelo gaussiano foi o que mais se ajustou ao conjunto de dados. Siqueira et al. (2009), estudando a variabilidade espacial da condutividade elétrica do solo em área com gradiente topográfico, ajustaram o modelo esférico para a CE_a na camada superficial e em profundidade.

Tabela 3. Correlação linear entre a produtividade da cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$), a condutividade elétrica do solo medida por indução eletromagnética (CE_a-V e CE_a-H , $mS\ m^{-1}$) e da textura do solo ($g\ kg^{-1}$)

	Produtividade ($t\ ha^{-1}$)	CE_a-V CE_a-H		Textura ($g\ kg^{-1}$)						
		--- ($mS\ m^{-1}$) ---		----- 0,0-0,2 m -----			----- 0,2-0,4 m -----			
				Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia	
Produtividade	1,000									
CE_a-V	0,850	1,000								
CE_a-H	0,740	0,934	1,000							
Argila	0,133	0,100	0,115	1,000						
0,0-0,2 m	Silte	0,084	0,010	0,078	-0,207	1,000				
	Areia	-0,054	0,016	-0,060	-0,550	-0,529	1,000			
Argila	0,115	-0,011	-0,026	0,461	-0,037	-0,288	1,000			
0,2-0,4 m	Silte	-0,007	0,161	0,164	0,040	-0,146	0,026	-0,039	1,000	
	Areia	-0,017	-0,115	-0,108	-0,341	0,137	0,173	-0,642	-0,704	1,000

Tabela 4. Parâmetros de ajuste do semivariograma para a produtividade da cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$), a condutividade elétrica do solo medida por indução eletromagnética (CE_a-V e CE_a-H , $mS\ m^{-1}$) e da textura do solo ($g\ kg^{-1}$)

Resíduos Produtividade ($t\ ha^{-1}$)	CE_a-V CE_a-H		Textura ($g\ kg^{-1}$)						
	----- ($mS\ m^{-1}$) -----		----- 0,0-0,2 m -----			----- 0,2-0,4 m -----			
			Argila	Silte	Areia	Argila	Silte	Areia	
Modelo	Gaussiano	Gaussiano	Gaussiano				Exponential		
C_0	200	6	10				0,690		
C_0+C_1	580	28	35	EPP	EPP	EPP	3,926	EPP	EPP
a (m)	110	180	180				70,00		
GD	25,64	17,64	22,22				14,94		

GD = grau de dependência espacial (C_0/C_0+C_1) x 100. EPP = efeito pepita puro.

A presença do modelo gaussiano para os dados em questão (Tabela 4) pode estar associada à presença de relevo côncavo na área de estudo, coincidindo com as áreas com maior produtividade e, conseqüentemente, com maiores valores de CE_a , devido ao maior conteúdo de água no solo quando comparado com as partes mais elevadas. Os dados da produtividade da cana-de-açúcar apresentaram tendência sendo calculados os seus resíduos por meio de uma equação linear. Siqueira et al. (2010) descrevem como a geomorfologia do solo interfere na identificação de zonas de manejo específico, com ajuste de distintos semivariogramas para cada uma das zonas de manejo. Diferentes autores têm justificado a importância da geomorfologia do solo para o planejamento amostral (Montanari et al., 2005); dinâmica de formação de argilominerais (Camargo et al., 2008); potencial de adsorção de nutrientes (Barbieri et al., 2008); perda de solo (Campos et al., 2008); aplicação de insumos em taxa variada (Barbieri et al., 2009); planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar (Campos et al., 2009), emissão de CO_2 (Brito et al., 2009), dentre outros temas.

A produtividade apresentou um alcance (a, m) de 110,00 m, enquanto a CE_a -V e CE_a -H apresentaram um valor de 180,00 m (Tabela 4). Tal fato pode ser justificado considerando que, entre os atributos de planta, a produtividade é o mais sensível às mudanças do solo ao longo do cenário agrícola. O grau de dependência espacial foi determinado conforme Cambardella et al. (1994), indicando elevada relação entre as amostras ($GD \leq 25,00\%$).

O semivariograma escalonado demonstrou que existe um padrão de variabilidade espacial similar entre a produtividade e a CE_a -V e a CE_a -H (Tabela 4). No entanto, pode-se verificar que o referido padrão ocorre em escalas diferentes de variabilidade espacial, uma vez que o comportamento da produtividade alcança maiores valores de C_0 e C_1 , estando relacionado à maior variação dos valores de produtividade ao longo da área (variância = 241,94), quando comparado a CE_a -V (23,67) e CE_a -H (31,80, Tabela 2).

O semivariograma escalonado foi modelado para verificar se ocorria um padrão espacial similar entre os pares de semivariância para a produtividade e a CE_a -V e a CE_a -H (Figura 3). Verifica-se que os valores de CE_a -V e a CE_a -H apresentam comportamento similar para os pares de semivariância, enquanto os pares de semivariância para a produtividade do solo (resíduos) apresentam comportamento completamente distinto da CE_a -V e a CE_a -H. Conforme já discutido, este fato se deve à geomorfologia da área e à presença de maiores valores de umidade nas partes mais baixas do terreno.

Os mapas de variabilidade espacial confirmam a similaridade no padrão de distribuição espacial para a CE_a -V e a CE_a -H (Figuras 4a,b). Conforme apresentado anteriormente, tal similaridade é devida à presença de maiores valores de umidade do solo nas partes mais baixas

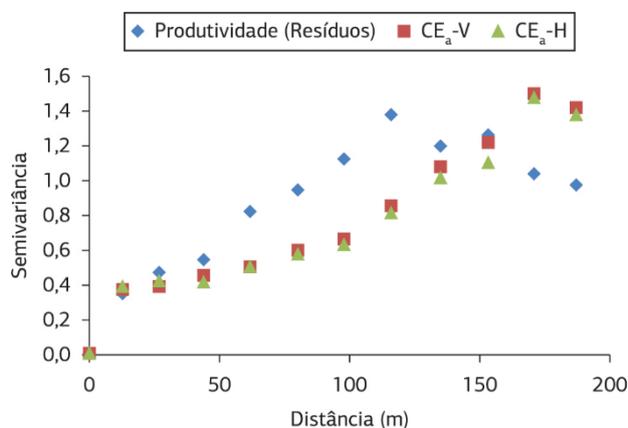


Figura 3. Semivariograma escalonado para a produtividade da cana-de-açúcar ($t\ ha^{-1}$) e da condutividade elétrica aparente do solo (CE_a -V e CE_a -H, $mS\ m^{-1}$) medida por indução eletromagnética.

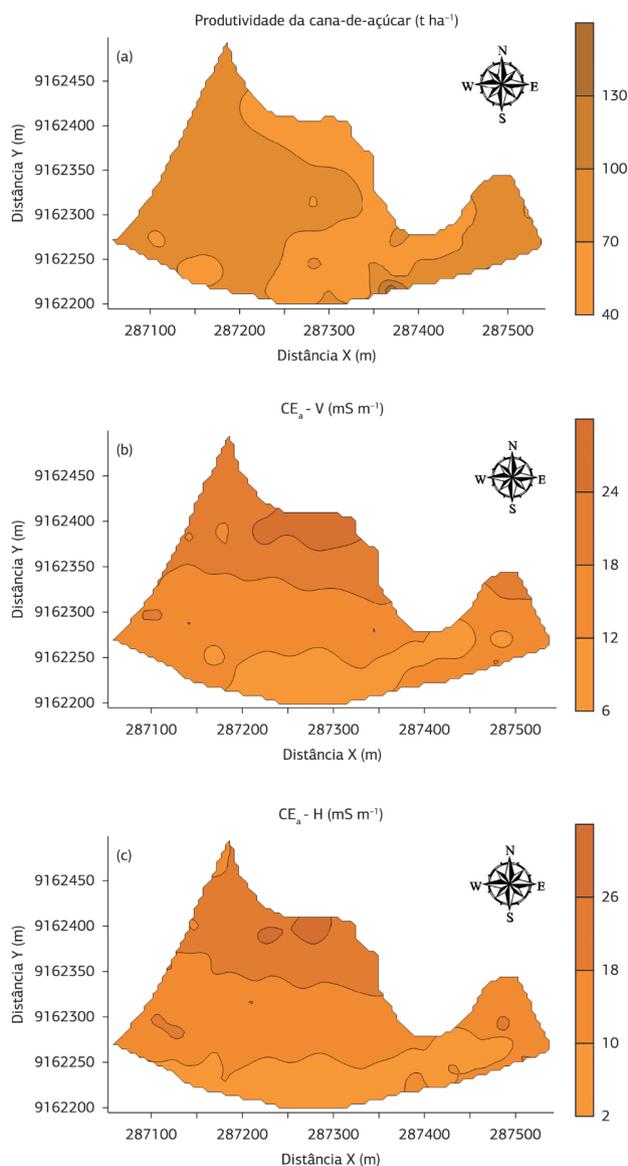


Figura 4. Mapas temáticos de variabilidade espacial para: a) produtividade ($t\ ha^{-1}$); b) CE_a -V ($mS\ m^{-1}$); c) CE_a -H ($mS\ m^{-1}$).

do terreno, que por sua vez corroboram para a existência de maior produtividade (Figura 4a). A maior similaridade entre os atributos analisados ocorre para os mapas temáticos de CE_a (Figuras 4b,c).

A produtividade da cana-de-açúcar apresentou valores de correlação linear elevados com a CE_a (Tabela 3). No entanto, quando analisamos os mapas de variabilidade espacial (Figura 4), não é possível descrever uma relação clara entre o mapa de produtividade (Figura 4a) e os mapas de CE_a (Figura 4b,c). Nota-se que o mapa de produtividade (Figura 4a) apresenta, na maior parte da área, valores de produtividade superiores a $75,54 \text{ t ha}^{-1}$, que representam a média de produtividade na área, alcançando valores de até 160 t ha^{-1} , coincidindo com zona côncava e com maiores valores de umidade do solo quando comparados às demais

zonas, confirmando mais uma vez a relação hídrica da cultura e a sua produtividade (Dantas et al., 2006).

Verifica-se que na parte onde a área apresenta sua menor largura (Figura 4a) e sua maior cota topográfica (Figura 1) estão localizados os menores valores de produtividade, havendo menores valores de produtividade também na parte superior esquerda do mapa onde ocorrem as menores cotas topográficas, evidenciando que o excesso de umidade também influencia a produtividade de cana-de-açúcar.

Os mapas de variabilidade espacial dos atributos texturais (argila, silte e areia) na camada de 0,0-0,2 m (Figura 5) e 0,2-0,4 m de profundidade (Figura 6) confirmam que não há relação entre os mapas da produtividade e CE_a-V e CE_a-H (Figura 4), corroborando com os baixos valores de correlação linear apresentados na tabela 3. De maneira

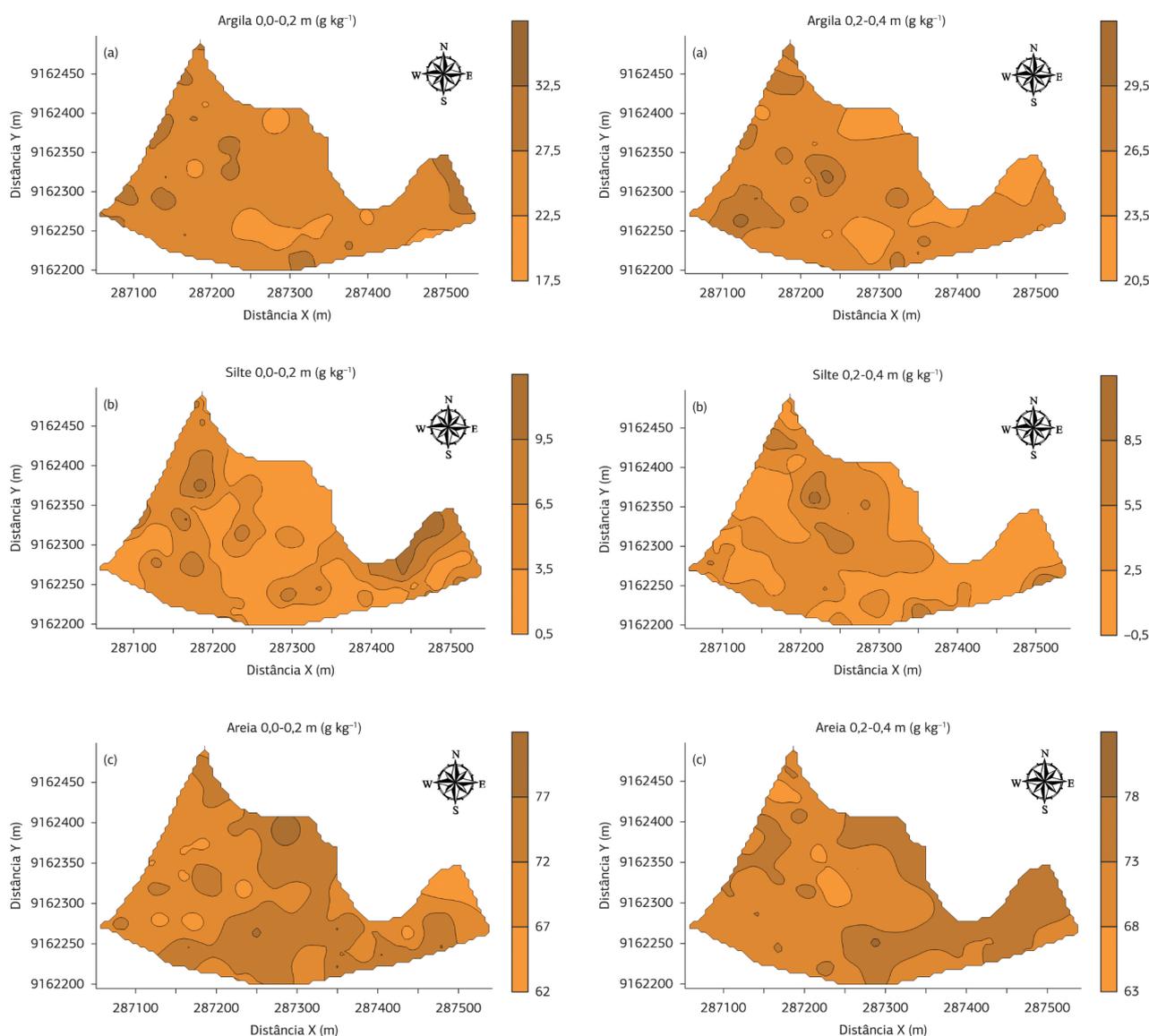


Figura 5. Mapas temáticos de variabilidade espacial para a textura do solo na camada de 0,0-0,2 m de profundidade: a) argila (g kg^{-1}); b) silte (g kg^{-1}); c) areia (g kg^{-1}).

Figura 6. Mapas temáticos de variabilidade espacial para a textura do solo na camada de 0,2-0,4 m de profundidade: a) argila (g kg^{-1}); b) silte (g kg^{-1}); c) areia (g kg^{-1}).

geral, os mapas de variabilidade espacial da textura do solo (Figuras 5 e 6) não demonstram nenhum padrão de similaridade na disposição das linhas de contorno das classes de textura. No entanto, em profundidade (Figura 6, camada de 0,2-0,4m), verifica-se uma relação inversa entre os valores de argila e areia ($r = -0,642$, Tabela 3) e entre o silte e a areia ($r = -0,704$, Tabela 3).

4. CONCLUSÃO

Os mapas de variabilidade espacial apresentaram padrão similar para a produtividade e a CE_a-V e a CE_a-H . A condutividade elétrica medida por indução eletromagnética demonstrou-se como uma importante ferramenta para a predição da produtividade de cana-de-açúcar. Os atributos texturais (argila, silte e areia) apresentaram elevada variabilidade espacial, demonstrando que o esquema de amostragem não foi suficiente para detectar a distribuição espacial, levando-se em consideração o relevo e o nível freático como fatores que mais interferiram sobre a variabilidade de todos os atributos estudados.

REFERÊNCIAS

- Barbieri, D. M., Marques, J., Jr., & Pereira, G. T. (2008). Variabilidade espacial de atributos químicos de um argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas de relevo. *Engenharia Agrícola*, 28, 645-653. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162008000400004>.
- Barbieri, D. M., Marques, J., Jr., Alleoni, L. F. R., Garbui, F. J., & Camargo, L. A. (2009). Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. *Scientia Agrícola*, 66, 819-826. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162009000600015>.
- Brasil. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica (1972). Levantamento exploratório-reconhecimento de solos do Estado de Pernambuco (Boletim Técnico, 26, Série Pedologia, 14). Recife: Convênio de mapeamento de solos MA/DNPEA-SUDENE/DRN convênio MA/CONTAP/USAID/ETA.
- Brasil. Ministério da Agricultura. Escritório de Pesquisas e Experimentação. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo (1969). Levantamento detalhado dos solos da Estação Experimental de Itapirema (Boletim Técnico, 12). Rio de Janeiro. 84 p.
- Brito, L. F., Marques, J., Jr., Pereira, G. T., Souza, Z. M., & La Scala, N., Jr. (2009). Soil CO₂ emission of sugarcane fields as affected by topography. *Scientia Agrícola*, 66, 77-83. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162009000100011>.
- Camargo, L. A., Marques, J., Jr., Pereira, G. T., & Horvat, R. A. (2008). Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo. I-Mineralogia da fração argila. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 2269-2277. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000600006>.
- Camargo, O. A., Moniz, A. C., Jorge, J. A., & Valadares, J. M. A. S. (1986). Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas (Boletim técnico, 106). Campinas: Instituto Agrônomo. 94 p.
- Cambardella, C. A., Moorman, T. B., Novak, J. M., Parkin, T. B., Karlen, D. L., Turco, R. F., & Konopa, A. E. (1994). Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. *Soil Science Society of America Journal*, 58, 1501-1511. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>.
- Campos, M. C. C., Marques, J., Jr., Martins, M. V., Fo., Pereira, G. T., Souza, Z. M., & Barbieri, D. M. (2008). Variação espacial da perda de solo por erosão em diferentes superfícies geomórficas. *Ciência Rural*, 38, 2485-2492. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782008000900011>.
- Campos, M. C. C., Marques, J., Jr., Pereira, G. T., Souza, Z. M., & Montanari, R. (2009). Planejamento agrícola e implantação de sistema de cultivo de cana-de-açúcar com auxílio de técnicas geoestatísticas. *Agriambi*, 13, 297-304.
- Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2012). Acompanhamento da safra brasileira: Cana-de-açúcar, terceiro levantamento, dezembro/2012. Brasília: CONAB. Recuperado em 27 de março de 2014, de http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/12_12_12_10_34_43_boletim_cana_portugues_12_2012.pdf
- Cunha, P., Marques, J., Jr., Curi, N., Pereira, G. T., & Lepsch, I. F. (2005). Superfícies geomórficas e atributos de latossolos em uma sequência areníticobasáltica da região de Jaboticabal (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29, 81-90. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000100009>.
- Dantas, J., No., Figueiredo, J. L. C., Farias, C. H. A., Azevedo, H. M., & Azevedo, C. A. V. (2006). Resposta da cana-de-açúcar, primeira soca, a níveis de irrigação e adubação de cobertura. *Agriambi*, 10, 283-288.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (2013). Sistema brasileiro de classificação de solos. Rio de Janeiro: EMBRAPA. 353 p.
- Figueiredo, S. R., Giasson, E., Tornquist, C. G., & Nascimento, P. C. (2008). Uso de regressões logísticas múltiplas para mapeamento digital de solos no planalto médio do RS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32, 2779-2785. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000700023>.
- Gheller, A. C. A., Menezes, L. L., Matsuoaka, S., Masuda, Y., Hoffmann, H. P., Arizono, H., & Garcia, A. A. F. (1999). Manual de método alternativo para medição da produção de cana-de-açúcar. Araras: UFSCar-CCA-DBV. 7 p.
- Golden Software Inc. (1999). SURFER for windows. Realese 7.0. Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers. User's guide. New York: Golden Software. 619 p.
- Huth, N. I., & Poulton, P. L. (2007). An electromagnetic induction method for monitoring variation in soil moisture in agroforestry systems. *Australian Journal of Soil Research*, 45, 63-72. <http://dx.doi.org/10.1071/SR06093>.
- Kühn, J., Brenning, A., Wehrhan, M., Koszinski, S., & Sommer, M. (2009). Interpretation of electrical conductivity patterns by soil

- properties and geological maps for precision agriculture. *Precision Agriculture*, 10, 490-507. <http://dx.doi.org/10.1007/s11119-008-9103-z>.
- Lesch, S. M., Corwin, D. L., & Robinson, D. A. (2005). Apparent soil electrical conductivity mapping as an agricultural management tool in arid zone soils. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46, 351-378. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.007>.
- McNeill, J. D. (1980). *Electrical conductivity of soils and rocks* (Technical Report, TN-5). Ontario: Geonics Ltda. 22 p.
- Montanari, R., Marques, J., Jr., Pereira, G. T., & Souza, Z. M. (2005). Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40, 69-77. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2005000100010>.
- Santos, C. M. A. (2007). *Estatística descritiva: manual de auto-aprendizagem*. Lisboa: Edições Sílabo. 261 p.
- Siqueira, G. M., Dafonte, J., & Paz González, A. (2009). Estimación de la textura y contenido de agua en el suelo a partir de datos de conductividad eléctrica utilizando geoestadística multivariante. *Estudios de la Zona No Saturada del Suelo*, 9, 228-235.
- Siqueira, D. S., Marques, J., Jr., & Pereira, G. T. (2010). The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. *Geoderma*, 155, 55-66. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.024>.
- Siqueira, G. M., Silva, E. F. F., Montenegro, A. A. A., Vidal Vázquez, E., & Paz-Ferreiro, J. (2013). Multifractal analysis of vertical profiles of soil penetration resistance at the field scale. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 20, 1-13. <http://dx.doi.org/10.5194/npg-20-529-2013>.
- Soil Survey Staff (2010). *Keys to soil taxonomy* (11 ed.). Washington, DC: United States Department of Agriculture – USDA, Natural Resources Conservation Service. 338 p.
- Sudduth, K. A., Kitchen, N. R., Wiebold, W. J., Batchelor, W. D., Bollero, G. A., Bullock, D. G., Clay, D. E., Palm, H. L., Pierce, F. J., Schuler, R. T., & Thelen, K. D. (2005). Relating apparent electrical conductivity to soil properties across the north-central USA. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46, 263-283. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.010>.
- Vieira, S. R. (2000). Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In R. F. Novais, V. H. Alvarez, & G. R. Schaefer (Eds.), *Tópicos em Ciência do solo* (Vol. 1, p. 1-54). Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Vieira, S. R., Millete, J., Topp, G. C., & Reynolds, W. D. (2002). Handbook for geoestatistical analysis of variability in soil and climate data. In V. V. H. Alvarez, C. E. G. R. Schaefer, N. F. Barros, J. W. V. Mello, & J. M. Costa (Eds.), *Tópicos em Ciência do Solo* (Vol. 2, p. 1-45). Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- Warrick, A. W., & Nielsen, D. R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. In D. Hillel (Ed.), *Applications of soil physics* (p. 319-344). New York: Academic Press. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50018-3>.