

Variabilidade espacial da resistência à penetração e da umidade do solo em Neossolo Flúvico

Uilka Elisa Tavares¹, Abelardo Antônio de Assunção Montenegro¹, Mário Monteiro Rolim¹, Jucicleia Soares da Silva¹, Thais Fernanda da Silva Vicente¹, Carolyne Wanessa Lins de Andrade¹

¹ DTR/UFRPE. R. Dom Manoel de Medeiros, s/n, Dois Irmãos, CEP 52.171-900, Recife, PE. Fone: (81) 3320-6264. E-mail: uetavares@yahoo.com.br; abelardo.montenegro@yahoo.com.br; rolim@dtr.ufrpe.br; thaisfsv@ig.com.br; jucicleiass@gmail.com; carolynelins200@gmail.com

Resumo: A resistência à penetração é uma variável de grande importância para o manejo agrícola. O estudo foi realizado com o objetivo de investigar a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração (RP) e da umidade de um Neossolo Flúvico cultivado com cenoura e irrigado por microaspersão, em Pesqueira, PE, sob condição de elevado estresse hídrico. As avaliações foram feitas nas camadas de 0-0,20 e 0,20-0,40 m, em 49 pontos, em uma malha com grid 7 m × 7 m, após irrigação em dois dias consecutivos, denominados amostragem 1 e amostragem 2. A distribuição normal foi verificada nas variáveis resistência à penetração, umidade e textura. Para a umidade do solo observou-se efeito pepita puro; enquanto que para a resistência à penetração, ajustaram-se os modelos esférico (0,00-0,20 m), na amostragem 1, e gaussiano para a amostragem 2. Os mapas de krigagem realizados mostram redução da RP, provavelmente devido ao acréscimo da umidade, embora não se tenha observado forte correlação entre as duas variáveis.

Palavras Chave: compactação, cenoura, geoestatística.

Spatial variability of penetration resistance and soil water content in Neossolo Flúvico

Abstract: The penetration resistance is a variable of great importance for agricultural management. The study was conducted to evaluate the spatial variability of soil resistance to penetration (RP) and water content of Fluvent cultivated with carrot and irrigated by micro sprinkler system, in Pesqueira, Pernambuco, under severe water stress scenario. The evaluations were performed in the 0-0.20 and 0.20-0.40 m layer, at 49 points, a grid mesh with 7 m × 7 m on two consecutive days, called sample 1 and sample 2. The Normal distribution was verified in the variables penetration resistance, water content and texture. For water content it was observed a nugget effect, while for the penetration resistance spherical model (0.00-0.20 m) was fitted, in sampling 1, and the Gaussian model for the sampling 2. The kriging maps of the two samplings show reduced RP, probably due to the increase in the water content, although it has not been observed a strong correlation between the two variables.

Keywords: compaction, carrot, geoestatistic.

Introdução

A região semiárida do Nordeste brasileiro apresenta altas taxas de evaporação, com solos rasos e recursos hídricos escassos, o que torna essencial o uso da irrigação nas atividades agrícolas, especialmente para a agricultura familiar, como forma de enfrentar as limitações climáticas, pedológicas e hidrológicas da região (Santos et al., 2012). O semiárido pernambucano é caracterizado por uma estação seca, com oferta irregular da precipitação ao longo do ano.

Diversos autores têm constatado o potencial agrícola de regiões semiáridas com o correto manejo aliado à agricultura irrigada (Montenegro & Montenegro, 2006; Souza et al., 2008; Souza et al., 2011; Silva et al., 2012; Santos et al., 2012). Entretanto, a elevada resistência do solo à penetração (RP) é uma das limitações nestas regiões, que pode influir no sucesso dos cultivos.

A RP é uma variável sensível à textura, estrutura do solo e principalmente à densidade do solo e à umidade. Por esta razão é considerada um indicador das dificuldades ao crescimento do sistema radicular das plantas, contribuindo para a detecção e prevenção de camadas com impedimentos (Coelho et al., 2012). Silveira et al. (2010) verificaram que, para um acréscimo da umidade, ocorre decréscimo da resistência à penetração, devido à influência da água sobre a coesão entre as partículas do solo.

Vários estudos têm sido desenvolvidos sobre as relações entre umidade e resistência à penetração (Moraes et al., 2013; Vaz et al., 2011). Busscher (1990) observou que a umidade e, por consequência, a RP podem variar rapidamente ao longo do dia, o que pode mascarar as diferenças observadas na RP devido ao manejo, sugerindo desta forma, que a RP seja avaliada em diferentes áreas ou ao longo do tempo na mesma área, a fim de se verificar sua relação com a umidade.

A variabilidade espacial de resistência à penetração em função da umidade tem sido objeto de estudo de diversos autores (Veronese Júnior et al., 2006; Souza et al., 2006a). Souza et al. (2006a) encontraram que a variabilidade espacial da resistência à penetração foi afetada pela umidade e que houve decréscimo na dependência espacial da resistência à penetração 24 horas após uma chuva de 38mm.

Tanto os processos pedogenéticos quanto a ação antrópica da agricultura contribuem para a heterogeneidade do solo (Veronese Júnior et al., 2006). Esta heterogeneidade pode ser mensurada por meio das ferramentas geoestatísticas, capazes de analisar e inferir a variabilidade que, diferentemente dos estudos estatísticos clássicos, considera a heterogeneidade

espacial sobre a representatividade dos valores médios das amostras, o que favorece o planejamento e a implantação de zoneamento nas áreas de cultivo (Carvalho et al., 2008). Coelho et al. (2012), ao investigarem a variabilidade espacial da resistência à penetração em um perímetro irrigado de Juazeiro na Bahia, constataram que os métodos geoestatísticos aplicados permitiram o zoneamento da área, através da definição de zonas com maior resistência à penetração, possibilitando assim o manejo localizado na área. De acordo com Carvalho et al. (2008), o método geoestatístico da krigagem e a análise do semivariograma permitem determinar se há estrutura de dependência espacial e, através do conhecimento do modelo de semivariograma, é possível mapear a área.

Souza et al. (2008) observaram elevada variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da curva de retenção de água no solo, consequência do manejo agrícola e atributos físicos, ao estudarem parâmetros hidrodinâmicos de duas parcelas agrícolas no Estado da Paraíba. Corroborando os autores, Silva et al. (2012) destacaram que propriedades físicas e hidráulicas do solo influenciam nos processos hidrológicos, como infiltração, erosão, distribuição de umidade e transporte de solutos no solo. Estes autores concluíram que nas Bacias do Jatobá e Mimoso a condutividade hidráulica do solo saturado apresentou alta variabilidade, até a profundidade de 0,50 m.

Com base nas hipóteses de que é possível estabelecer uma estrutura de dependência espacial para atributos físicos da área em estudo e que o teste de resistência à penetração não deve ser realizado apenas em um momento específico e, sim, em várias situações, quando o solo se encontrar com diferentes umidades (Oliveira et al., 2007), os objetivos do presente estudo, desenvolvido em um Neossolo Flúvico, cultivado com cenoura e irrigado por microaspersão, foram:

a) Avaliar a existência de estrutura de dependência espacial da resistência do solo à penetração, da umidade do solo e textura, bem como correlação espacial entre tais variáveis; b) Investigar o efeito do umedecimento do solo na sua resistência à penetração.

Material e Métodos

A área de estudo está localizada na Fazenda Nossa Senhora do Rosário, Pesqueira, a 230 km de Recife, PE, com coordenadas geográficas de 8° 21' 28" de latitude Sul e 36° 41' 47" de longitude Oeste. O clima da região é classificado como semiárido quente, tipo estepe, BSh, segundo a classificação de Köppen, com precipitação anual média estimada de 730 mm e

evapotranspiração potencial total anual média de 1683 mm. O solo do local foi classificado como Neossolo Flúvico (Souza et al., 2011). A malha de amostragem é apresentada na Figura 1:

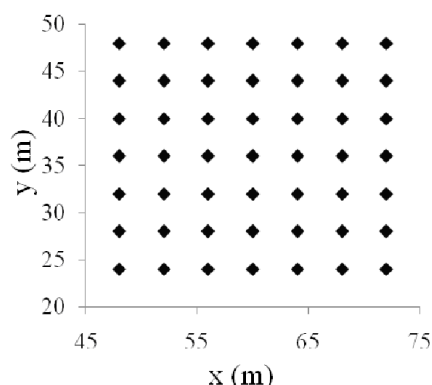


Figura 1. Malha de amostragem da Resistência à penetração e umidade

Na área explorada se cultivava cenoura, variedade G, marca Isla. Investigaram-se duas camadas de solo (0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m) na malha apresentada na Figura 1, em 49 pontos georreferenciados, espaçados em 4 metros, em um grid de 7×7.

A área é irrigada com microaspersores com vazão de 105 L h⁻¹, utilizando-se água subterrânea, por um período de 1,5 h por dia. Duas amostragens foram realizadas na área em diferentes condições de umidade:

Amostragem 1: As medições da resistência à penetração foram realizadas 30 minutos após o fim da irrigação. Simultaneamente, coletaram-se amostras de solo para aferição da umidade e textura.

Amostragem 2: A fim de verificar se houve diferença na dependência espacial da RP realizou-se nova amostragem 24h após a amostragem 1, onde a área foi novamente irrigada e uma nova medição da resistência à penetração e da umidade do solo foram realizadas com intervalo de 4h entre a irrigação e as leituras. A umidade para a amostragem 2 foi aferida até a profundidade de 0,20 m, por ser a profundidade de interesse para a cultura (Tabela 1).

A textura do solo foi determinada através do método do densímetro de Boyoucos, em que se utilizou como dispersante a solução de Calgon (hexametáfosfato

de sódio). Foram realizadas as determinações quantitativas das frações de argila (< 0,002 mm), silte (0,002-0,05 mm) e areia (0,05-0,20 mm), expressas em %. Foi reamizada determinação da umidade do solo no momento da medição da resistência a penetração. As análises foram realizadas no Laboratório de Aproveitamento de Resíduos e Mecânica dos Solos, da UFRPE, segundo metodologia da EMBRAPA (1997).

O percentual de material graúdo (MG) foi estimado com o objetivo de verificar sua influência na resistência a penetração. O solo coletado em campo, que variou de 0,5 a 1 kg, foi passado nas peneiras de 2, 4,75, 9,5, 12,5, 19 e 25 mm e a massa do material retido foi anotada e utilizada para se obter a massa em percentual em cada diâmetro, que expressa a proporção de material em relação a massa total. O percentual >2 mm foi utilizado para confrontar a RP e o percentual retido nas diversas peneiras foi utilizado para discriminar as frações que podem ser observadas no local de estudo.

A RP foi medida com um penetrômetro de impacto modelo Stolf reduzido, cujas medidas do equipamento encontram-se descritas na equação 1. A avaliação da RP foi realizada com a contagem do número de golpes a cada 0,05 m, até uma profundidade de 0,40 m.

A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm por impacto) em resistência à penetração, em MPa, foi obtida segundo Stolf (1991), pela aplicação da equação 1:

$$RP = \frac{Mg + mg + \left(\frac{M}{M+m} \times \frac{Mg \times h}{x} \right)}{A}$$

em que: RP = resistência do solo à penetração, kgf cm⁻² (kgf cm⁻² x 0,098 = MPa); M = massa do êmbolo, 1,6 kg (Mg – 1,6 kgf); m = massa do aparelho sem êmbolo, 1,47 kg (Mg – 1,47 kgf); h = altura de queda do êmbolo, 54 cm; x = penetração da haste do aparelho, cm por impacto, e A = área do cone, 1,35 cm². Na Tabela 2 são apresentadas as classes de RP adaptadas do Soil Survey Staff (1993).

O conjunto de dados foi submetido à estatística descritiva, utilizando-se o software Statistica (Statsoft,

Tabela 1. Esquema de amostragem

	Amostragem 1	Amostragem 2
Irrigação (h)	1,5	1,5
Vazão (L h ⁻¹)	105	105
Intervalo entre a irrigação e a coleta (h)	0,5	4
Variáveis analisadas	Resistência à penetração Umidade Textura Material graúdo	Resistência à penetração Umidade

Tabela 2. Classes da resistência à penetração

Classes	RP (Mpa)
Baixa	< 0,1
Moderada	0,1 - 2,0
Alta	> 2,0
Muito alta	4,0 - 8,0

2004). Foi calculada a matriz de coeficientes de correlação linear de Pearson (r) a 5%. A normalidade dos dados foi verificada por teste de Kolmogorov-Smirnov, exceto para a umidade (U) da amostragem 2. O critério de Hoaglin (Hoaglin et al., 1992) foi testado para a identificação e remoção dos pontos discrepantes (outliers) que, na maioria das vezes, são indicativos de erros na leitura das variáveis (Guimarães et al., 2010).

O grau de variação ou dispersão dos dados foi estimado pelo coeficiente de variação (CV), conforme descrito em Warrick & Nielsen (1980), que classificam como baixa variabilidade o $CV < 12\%$; média para o intervalo 12-60% e alta variabilidade quando $CV > 60\%$.

A dependência espacial foi avaliada por meio de ajuste de semivariograma, com base na pressuposição de estacionaridade da hipótese intrínseca. Para esta fase do trabalho utilizou-se o programa Geoeas (Englund&Sparks, 1991). Os modelos ajustados foram

validados utilizando-se a técnica geoestatística de *Jack-Knifing*. Os mapas espaciais foram gerados pelo software Surfer 7.0 (Golden Software, 1999).

A análise do grau de dependência espacial (GDE) foi realizada segundo Cambardella et al. (1994), que preconiza a proporção em porcentagem do efeito pepita (C_0) em relação ao patamar (C_0+C_1) e apresenta: (a) dependência forte $< 25\%$; (b) dependência moderada entre 25 e 75% e (c) dependência fraca $> 75\%$.

Resultados e Discussão

Os resultados obtidos no estudo encontram-se na Tabela 3. Verificou-se distribuição normal para todos os dados. O coeficiente de variação, segundo Warrick & Nielsen (1980), foi classificado como de média variabilidade, para a maioria das variáveis analisadas, exceto para a umidade (0,20-0,40 m) e argila (0,20-0,40 m), classificados como de baixa variabilidade. A média variabilidade da textura na camada 0,00-0,20 m, também foi observada por Souza et al. (2008) e Santos et al. (2012), em estudos realizados anteriormente na mesma região. Ainda para Santos et al. (2012), a média variabilidade decorre do uso e manejo do solo com implementos agrícolas, e também de processos geomorfológicos de transporte e sedimentação, que

Tabela 3. Estatística descritiva da resistência à penetração (RP), em MPa, na amostragem 1 e amostragem 2; Material grúdo (MG) > 2 mm, em %, textura, em %, umidade (U), em g/g, nas camadas de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m

	RP Amostragem 1	RP Amostragem 2	MG	Argila	Silte	Areia	U Amostragem 1	U Amostragem 2
0,0-0,20 m								
Média	1,72	1,06	21,92	21,37	21,70	56,18	12,13	20,47
Mediana	1,44	1,04	18,52	21,48	23,00	55,36	12,43	20,00
Variância	0,51	0,09	74,05	7,11	70,30	55,63	3,19	5,38
¹ DP	0,72	0,30	8,61	2,67	8,38	7,46	1,79	2,32
Curtose	-0,51	0,40	-1,19	-0,81	-0,91	-0,38	0,00	0,25
Assimetria	0,68	0,71	0,39	0,03	-0,43	0,63	-0,29	0,52
Máximo	3,29	1,81	37,73	26,64	34,72	71,36	15,74	26,00
Mínimo	0,83	0,55	10,71	15,92	4,00	43,36	7,76	15,00
² CV	42	29	39	12	39	13	15	0,11
³ d	0,16*	0,14*	0,18*	0,13*	0,11*	0,13*	0,21*	0,19
0,20-0,40 m								
Média	3,31	1,81	19,72	22,57	21,03	56,40	10,52	
Mediana	2,91	1,58	17,91	22,64	20,00	55,36	10,71	
Variância	2,30	0,75	73,93	5,78	68,52	87,84	1,26	
DP	1,52	0,89	8,60	2,40	8,28	9,37	1,12	
Curtose	0,00	0,21	-0,15	-0,12	-1,01	-0,76	0,01	
Assimetria	0,78	1,03	0,64	-0,10	-0,23	0,57	-0,53	
Máximo	7,46	3,98	41,83	27,04	34,72	77,36	12,79	
Mínimo	0,83	0,64	7,15	16,64	6,00	43,36	7,99	
CV	46	49	44	11	39	17	11	
d	0,12*	0,17*	0,12*	0,10*	0,11*	0,15*	0,21*	

¹Desvio padrão, ²Coefficiente de variação, ³Normalidade por K-S *Significativo a 5%

propiciam uma homogeneização maior das percentagens de areia e argila.

Os valores da média e mediana, para todas as variáveis, estão próximos, indicando distribuições simétricas, o que pode ser confirmado pelo coeficiente de assimetria próximo de zero, exceto para RP (0,20-0,40 m), realizada na amostragem 2 (Tabela 3). A RP de 3,31 MPa, observada na amostragem 1, na camada 0,20-0,40 m, pode ser classificada como muito alta, e moderada para as demais (Tabela 2).

Segundo o fabricante do penetrômetro, a umidade ideal para a medição da resistência à penetração é na capacidade campo do solo, pois nesta condição é obtida boa correlação com o crescimento radicular das plantas. Com base em Souza et al. (2011), que encontraram umidade na capacidade de campo para o Neossolo Flúvico estudado de 15,2%, verifica-se que apenas na amostragem 1, camada 0,00-0,20 m, a umidade estava adequada ao estudo da resistência à penetração (12,13%). Umidades acima da capacidade campo, como a observada na amostragem 2 (20,47%) ou abaixo desta, como na amostragem 1, camada 0,20-0,40 m (10,52%), não são as mais adequadas para o estudo da RP em virtude do próprio excesso ou déficit hídrico já ser uma fator limitante para o desenvolvimento da cultura, independente da restrição física, contudo justifica-se o trabalho de se procurar conhecer o comportamento da resistência à penetração, em função da umidade do solo, a fim de otimizar o uso desta ferramenta no diagnóstico da compactação do solo (Oliveira et al., 2007).

O solo é de textura franca, nas duas profundidades. Os valores obtidos da textura na camada 0,00-0,20 m (Tabela 3) são diferentes dos de Souza et al. (2008) cujos teores de silte e areia foram de 39,8 e 36,1%, respectivamente, no entanto corroboram Santos et al. (2012), que verificaram teores de 58,04, 19,83 e 22,10% para areia, argila e silte, respectivamente.

Podem-se verificar os elevados valores de RP (Figura 2) na amostragem 1, em 0,20-0,40 m, com 75% dos dados acima de 2 MPa. Na amostragem 2, houve decréscimo da RP na mesma camada, provavelmente

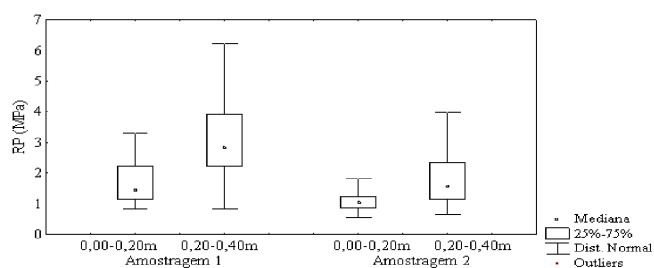


Figura 2. Boxplot da RP (MPa) para as duas amostragens realizadas

causada pela redistribuição de água no solo logo após a irrigação.

Na amostragem 1 observa-se que ocorreu um acréscimo progressivo da resistência com a profundidade do solo, até valores médios acima de 4 MPa; enquanto na amostragem 2, observa-se acréscimo da RP com a profundidade limitado a valores abaixo de 2,5 MPa (Figura 3). Provavelmente a movimentação da água no solo influenciou a RP nas duas amostragens, com o decréscimo da RP verificado na amostragem 2.

Ao se considerar que a RP é fortemente influenciada pela densidade do solo e pela umidade (ASAE, 1999), Silveira et al. (2010) observaram que a aplicação de técnicas que mantenham a umidade no solo, a um teor condizente com as características deste material, contribui como forma de controle da RP, proporcionando melhores condições para o desenvolvimento da cultura.

As correlações mais elevadas, com correlação superior a 50%, foram observadas na textura do solo, entre areia e silte, nas duas camadas, e entre areia e argila (0,20-0,40 m) (Tabela 4). Para a amostragem 1, a RP apresentou correlação de -0,19 com a umidade. Provavelmente a leitura da RP, logo após a irrigação, pode ter sido influenciada pelo excesso de umidade na camada 0,00-0,20 m, o que justifica a correlação inversa de -0,15 entre RP e areia e de -0,27 para RP e MG nesta camada.

Embora a RP tenha decrescido com o acréscimo da umidade, esta não apresentou influência pontual na RP, como se pode verificar na fraca correlação das amostragens 1 e 2 (Tabela 4). Tal comportamento pode ser devido ao manejo aplicado no solo, à irrigação e aos leirões existentes na área de cultivo, que influenciaram a distribuição da água no solo de forma aleatória.

Para a condição de umidade da amostragem 2 (Tabela 4), na camada 0,00-0,20 m, a RP apresentou correlação de 0,11, 0,09 e -0,24 com as variáveis MG, areia e umidade, respectivamente. Na camada 0,20-0,40 m, a RP apresentou correlação de 0,36 com os MG e de -0,15 com a areia.

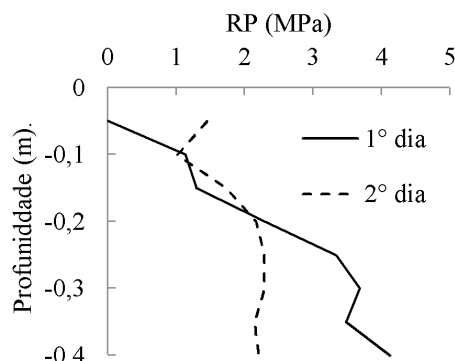


Figura 3. Resistência à penetração ao longo do perfil do solo nos dois dias avaliados

Tabela 4. Matriz de correlação das Amostragens 1 e 2, para a resistência à penetração (RP), material graúdo (MG), textura e umidade

	Amostragem 1					Amostragem 2					
	MG	Argila	Silte	Areia	U	MG	Argila	Silte	Areia	U	
0,00-0,20 m											
RP	-0,27	-0,03	0,23	-0,15	-0,19	RP	0,11	-0,09	0,08	0,09	-0,24
MG		0,42*	-0,23	0,16	0,4	MG		0,42*	-0,23	0,16	-0,06
Argila			-0,25	0,01	0,04	Argila			-0,25	0,01	-0,09
Silte				-0,94*	-0,2	Silte				-0,94*	0,07
Areia					0,25	Areia					-0,03
0,20-0,40 m											
RP	0,07	-0,19	-0,02	0,07	-0,37	RP	0,36	0,04	0,15	-0,15	
MG		0	-0,2	0,17	0,28	MG		0	-0,2	0,17	
Argila			0,34*	-0,56*	0,07	Argila			0,34*	-0,56*	
Silte				-0,97*	0,2	Silte				-0,97*	
Areia					-0,19	Areia					

* Correlação significativa ao nível de 5% de probabilidade, pelo teste de Pearson

A RP apresentou dependência espacial nas duas camadas, expressa por meio dos modelos de semivariogramas. Para a amostragem 1, ajustaram-se os modelos esférico e gaussiano, para a camada 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m, respectivamente (Tabela 5).

Na amostragem 2, porém, os modelos ajustados para a RP foram os gaussianos, para as duas camadas (Tabela 5). Além da mudança do modelo, pode-se observar que tanto o efeito pepita (C_0) quanto o patamar (C_0+C_1) foram reduzidos (Figura 4), provavelmente sob o efeito da irrigação.

Apenas na RP na camada 0,20-0,40 m, na amostragem 1, fez-se necessária a remoção dos discrepantes, pois

interferiam no desempenho do semivariograma. Também foi estudada a possibilidade de se trabalhar com os resíduos dos dados da RP incluindo os discrepantes, a fim de se considerar todas as medições, para ajustar o semivariograma. Foi verificado que tal procedimento não melhorou significativamente o semivariograma experimental. No caso da RP, os pontos discrepantes encontrados, provavelmente, receberam influência de material graúdo encontrado no perfil do solo. O material graúdo observado na área apresentava diâmetro de até 25 mm, pela Tabela 6, pode-se observar que o material acima de 4,75 mm apresentou 100% de ocorrência nos pontos amostrados, para as duas profundidades. A

Tabela 5. Parâmetros dos modelos de semivariograma, grau de dependência espacial (GDE), erro médio reduzido (Média) e desvio padrão do erro reduzido (DP)

	RP	RP	Argila	Silte	Areia	U	U
	Amostragem 1	Amostragem 2					
0,0-0,20 m							
¹ C ₀	0,35	0,075	135,67	4517,73	5380,72	epp	epp
² C ₁	0,17	0,032	37,12	1703,55	696,55		
³ a	11,72	15,75	23,1	18,81	14,28		
Modelo	Esférico	Gaussiano	Esférico	Esférico	Gaussiano		
⁴ GDE	67,31	70,09	78,52	72,62	88,54		
Média	0,03	0,004	0,045	0,002	-0,006		
⁵ DP	1,014	0,964	1,03	0,975	1,038		
⁶ R ²	0,74	0,86	0,74	0,92	0,61		
0,20 - 0,40 m							
C ₀	2	0,65	159,83	epp	epp	epp	
C ₁	0,55	0,35	10,73				
a	16,5	22,85	15,45				
Modelo	Gaussiano	Gaussiano	Esférico				
GDE	78,43	65,00	93,71				
Média	-0,03	-0,007	-0,003				
DP	1,016	1,068	0,945				
R ²	0,78	0,73	0,61				

¹ Efeito pepita ² Patamar ³ Alcance ⁴ Graude de dependência espacial ⁵ Desvio padrão ⁶ Ajuste do semivariograma

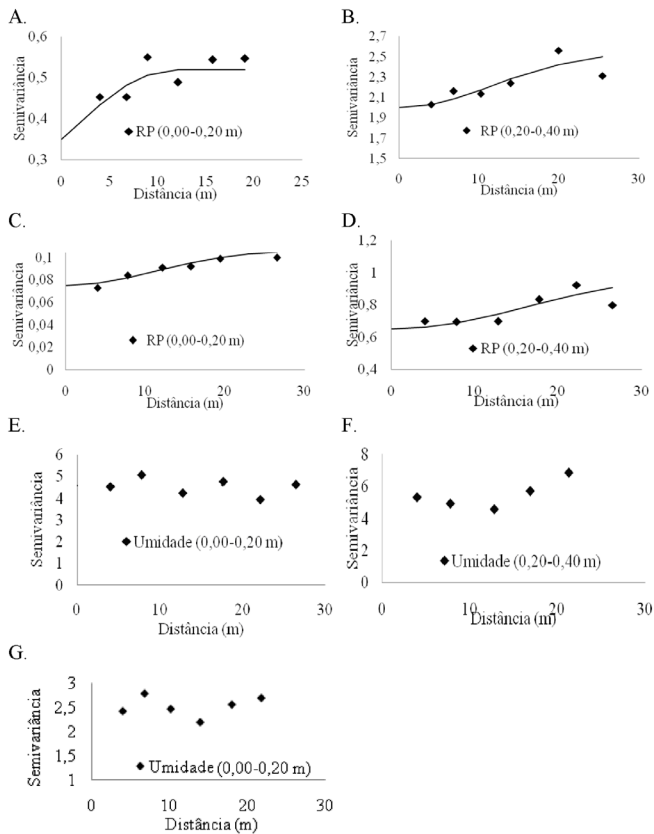


Figura 4. Semivariogramas da RP (amostragem 1, 0,00-0,20 m) (A); RP (amostragem 1, 0,20-0,40 m) (B); RP (amostragem 2, 0,00-0,20 m) (C); RP (amostragem 2, 0,20-0,40 m) (D); Umidade (Amostragem 1, 0,00-0,20 m) (E); Umidade (Amostragem 1, 0,20-0,40 m) (F); Umidade (Amostragem 2, 0,00-0,20 m) (G)

Tabela 6. Ocorrência e média (%) do material gráudo discriminados por diâmetro

	25	19	12,5	9,5	4,75
mm					
0-20 cm					
Ocorrência	0,00	28,57	71,43	85,71	100,00
Média	0,00	5,71	4,87	2,75	7,58
20-40 cm					
Ocorrência	11,11	22,22	55,56	100,00	100,00
Média	31,53	5,68	1,42	2,13	13,39

média indica o percentual de material retido na peneira em relação ao total de solo coletado.

O grau de dependência espacial (GDE) foi classificado como fraco para RP na camada 0,00-0,20 m, na amostragem 1, e moderado para as demais (Tabela 5). Para a textura do solo, apenas o silte apresentou GDE moderada, e os demais foram classificados como de fraca dependência. Souza et al. (2008) observaram forte GDE para a textura, na camada 0,00-0,20 m. Para Cambardella et al. (1994), atributos com forte dependência espacial são mais influenciados por

propriedades intrínsecas do solo, e os que apresentam fraca dependência são mais influenciados por fatores externos, como o manejo do solo.

Não houve ajuste para a umidade do solo (Figura 4), observando-se efeito pepita puro; provavelmente, a irrigação e a condição física do solo promoveram uma estrutura de não dependência espacial para a umidade.

A maior parte das variáveis apresentou coeficiente de ajuste do modelo ao semivariograma (R^2) acima de 0,61 (Tabela 5), ou seja, no mínimo 61% da variabilidade existente nos valores da semivariância estimada são explicadas pelos modelos ajustados.

Em relação à textura, verificou-se dependência espacial para a argila, nas duas camadas e para Areia e Silte, na camada 0,00-0,20 m. Identificou-se efeito pepita puro (EPP) para areia e silte, da camada 0,20-0,40 m (Figura 5), onde as semivariâncias apresentam-se em torno da variância. Provavelmente a variabilidade aleatória se sobressaiu à variabilidade estruturalmente espacializada ou o esquema de amostragem utilizado não foi adequado para a avaliação da estrutura espacial desses atributos.

O efeito pepita puro é o resultado da total ausência de correlação espacial entre as variáveis, devido à distância entre os pontos coletados não ser suficiente para detectar seu comportamento espacial, fazendo-se necessário um espaçamento diferente ao utilizado.

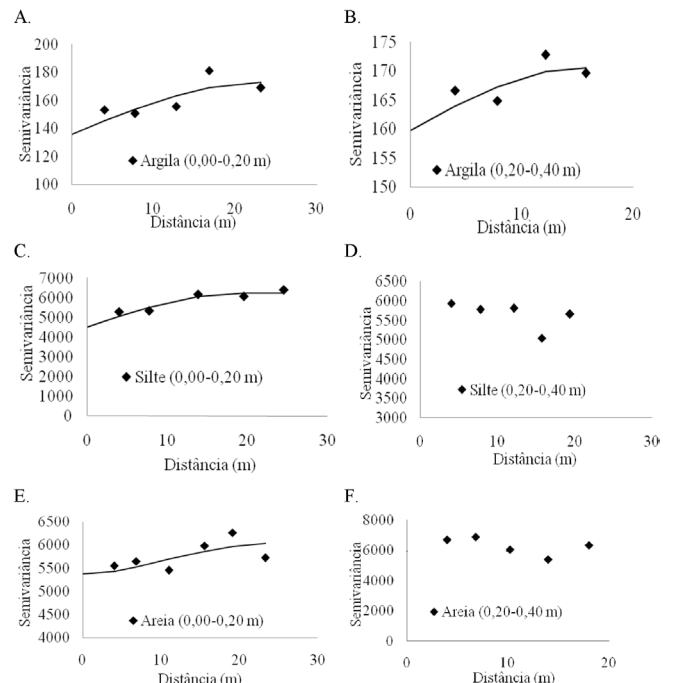


Figura 5. Semivariogramas da argila (0,00-0,20 m) (A) e (0,20-0,40 m) (B); silte (0,00-0,20 m) (C) e (0,20-0,40 m) (D); areia (0,00-0,20 m) (E) e (0,20-0,40 m) (F)

Em relação à profundidade, os alcances da camada 0,20-0,40 m foram maiores que na camada 0,0-0,20 m. Veronese Júnior et al. (2006) observaram semelhante condição e sugerem que o efeito perturbador do preparo do solo sobre a estrutura superficial pode ser o fator de influência. Em relação às amostragens, verificou-se que os alcances da RP foram maiores na amostragem 2 (Figura 4), provavelmente devido às irrigações aplicadas no perfil do solo. Carvalho et al. (2008) verificaram que os alcances da RP, em seus respectivos experimentos, diminuíram ou se alternaram com a profundidade. Para Coelho et al. (2012), a variação do alcance com a profundidade depende do tipo de solo e o manejo empregado, além da quantidade e distribuição das amostras no campo.

Os alcances (a) indicam a distância (m) da dependência espacial observada na área (Figuras 4 e 5). Pontos coletados com distâncias maiores que o alcance observado são considerados independentes e a eles são aplicados a estatística clássica (Vieira, 2000). Para Souza et al. (2006b), a utilização do alcance do

semivariograma pode diminuir o número de amostras a serem coletadas.

Os mapas de isolinhas da RP revelaram-se mais homogêneos na amostragem 2 (Figura 6). O acréscimo de umidade ao longo do perfil de solo provavelmente reduziu a RP e a variância dos dados. É sabido que a coesão entre as partículas é influenciada pela umidade, assim, quando o solo está seco, suas partículas apresentam maior resistência a qualquer força externa, nelas aplicadas, que repercutem na RP (Silveira et al., 2010). Como exemplo, esses autores observaram a redução da RP devido à chuva que ocorreu pouco antes da amostragem.

Na camada 0,00-0,20 m, os mapas da RP na amostragem 1 (Figura 6A) e amostragem 2 (Figura 6C) não se assemelham. Contudo, os mapas da camada 0,20-0,40 m, da amostragem 1 (Figura 6B) e amostragem 2 (Figura 6D) mostraram semelhanças, com os valores mais elevados da RP ocorrendo nos mesmos locais do mapa. Para a RP 0,20-0,40 m da amostragem 1 (Figura 6B) observa-se resistências acima de 4 MPa. Coelho et

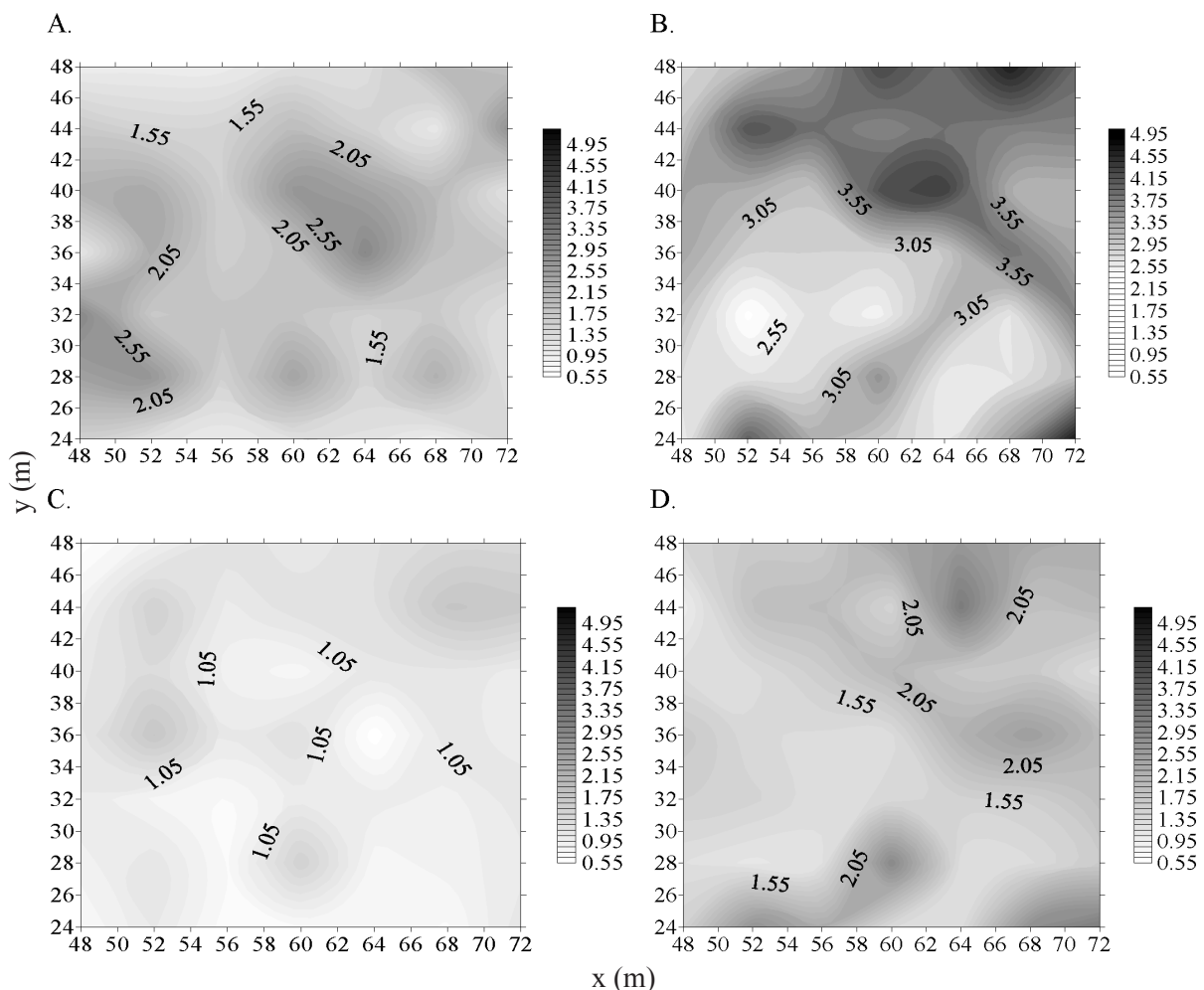


Figura 6. Mapa de isolinha da amostragem 1 da RP (0,00-0,20 m) (A) e RP (0,20-0,40 m) (B) e mapa e isolinha da amostragem 2 da RP (0,00-0,20 m) (C) e RP (0,20-0,40 m) (D)

al. (2012) observaram valores de RP acima de 4 MPa e sugerem que o não revolvimento do solo por longos períodos e a acomodação natural das partículas podem ser os fatores de influência.

Com o objetivo de verificar a hipótese de que a RP deve ser investigada em diferentes umidades, optou-se por refinar os mapas da Figura 6, tornando mais evidente as áreas consideradas de alta resistência à penetração igual ou acima de 2 MPa. Novos mapas de isolinhas foram gerados para a amostragem 1 e 2 nas profundidades 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, como se observa na Figura 7.

Entre as amostragens, pode-se observar notável redução da RP em ambas as profundidades. Na camada 0,00-0,20 m as regiões de alta resistência observadas na amostragem 1 são ausentes na amostragem 2. O mesmo ocorre na camada 0,20-0,40 m, que na amostragem 1 apresenta alta resistência à penetração dominando toda a área e na amostragem 2 apresentando alguns setores apenas.

Ao se analisar a textura do solo foi observado que os mapas de areia e silte apresentam-se inversamente proporcionais (Figuras 8C e 8D) e os mapas de argila e areia diretamente proporcionais (Figuras 8A e 8D), ocorrendo teores mais elevados de argila em áreas próximas dos mais elevados teores de areia. Comparando-se os mapas da argila, pode-se observar que a dependência na camada 0,00-0,20 m apresentou-se mais localizada em uma área delimitada que na camada 0,20-0,40 m, a qual se apresentou mais distribuída em toda a área, provavelmente devido ao manejo.

Os mapas de areia e silte (Figura 8) também se apresentaram bem delimitados na camada 0,00-0,20 m. Os mapas apresentados representam o ajuste do semivariograma (R^2), que explicam 74 e 61% da variabilidade da argila, nas camadas 0,00-0,20 e 0,20-0,40 m, e 92, 61% do silte e da areia, na camada 0,00-0,20 m, respectivamente.

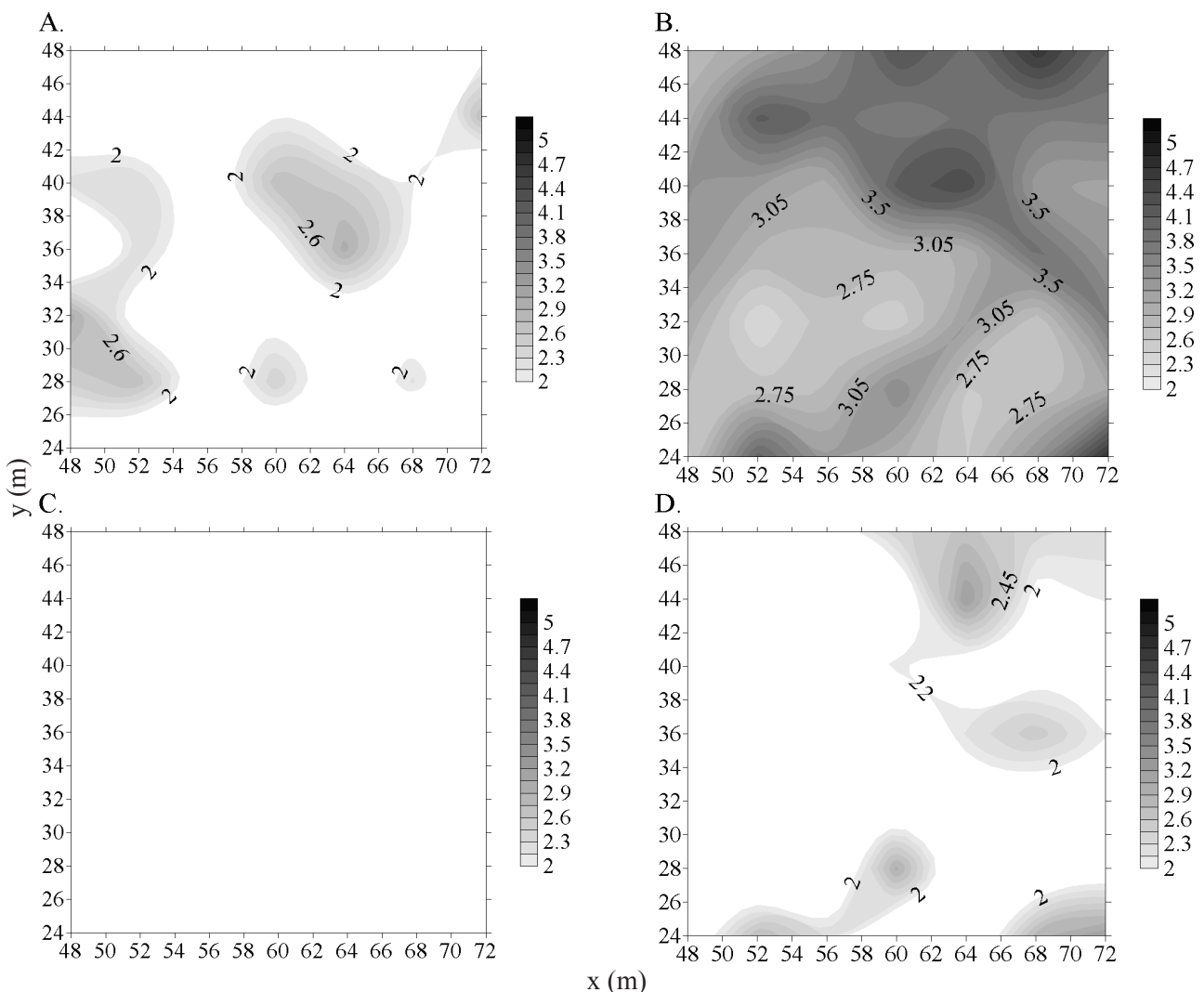


Figura 7. Mapa de isolinha da amostragem 1 da RP (0,00-0,20 m) (A) e RP (0,20-0,40 m) (B) e mapa e isolinha da amostragem 2 da RP (0,00-0,20 m) (C) e RP (0,20-0,40 m) (D)

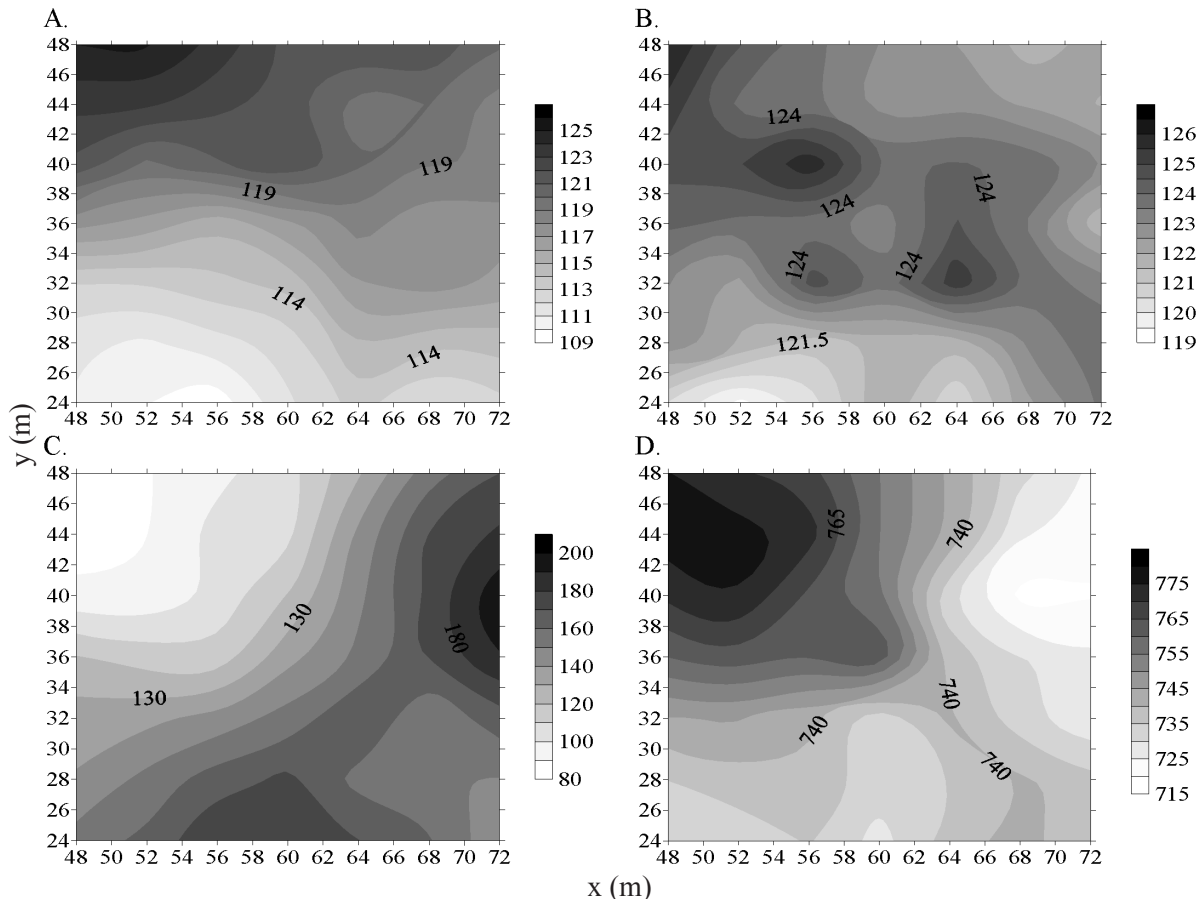


Figura 8. Mapa de isolinha da argila (0-0,20 m) (A); argila (0,20-0,40 m) (B); silte (0-0,20 m) (C); areia (0-0,20 m) (D)

Conclusões

1. A resistência do solo à penetração apresentou dependência espacial para todas as camadas da área em estudo, classificadas como de média variabilidade.

2. Os alcances obtidos indicam maior dependência espacial para a RP na camada 0,20-0,40 m.

3. O grid utilizado na área não detectou dependência espacial para a umidade do solo nas duas camadas estudadas, nem da percentagem de silte e de areia na camada 0,20-0,40 m.

4. O umedecimento do solo reduziu a resistência a penetração não oferecendo restrição ao crescimento radicular no solo estudado.

Literatura Citada

- ASAE - American Society of Agricultural Engineers. Soil Cone Penetrometer. In: *Asae Standards 1999: Standards Engineering Practices Data*. 46th (ed.) St. Joseph, 1999. p.834-835.
- Busscher, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v.33, p.519-524, 1990.
- Cambardella, C. A.; Moorman, J. M.; Novak, 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 America Journal*, v.58, p.1501-1511, 1994.
- Carvalho, L.A.; Valdemar Neto, V.J.; Silva, L.F.; Pereira, J.G.; Nunes, W.A.G.A.; Chaves, C.H.C. Resistência mecânica do solo à penetração (rmp) sob cultivo de cana-de-açúcar, no município de rio Brillhante-MS. *Agrária*, v.1, p.7-22, 2008.
- Coelho, D. S.; Cortez, J. W.; Olszewski, N. Variabilidade espacial da resistência mecânica à penetração em Vertissolo cultivado com manga no perímetro irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.36, p.755-764, 2012.
- EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual de métodos de análises de solo*. 2.Ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- Englund, E.; Sparks, A. *Geoeas (Geostatistical Environmental Assessment Software)* Las Vegas: U. S. Environmental Protection Agency, 1991. Epa/600/4-88/033a.
- Golden Software. *Surfer 7.0 - User's Guide*. New York: Golden Software, 1999. 61p.

- Guimarães, R. M. L.; Gonçalves, A. C. A.; Tormena, C. A.; Folegatti, M. V.; Blainsk, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Nitossolo sob a cultura do feijoeiro irrigado. *Engenharia Agrícola*, v.30, p.657-669, 2010.
- Hoaglin, D. C.; Mosteller, F.; Tukey, J. W. *Análise exploratória de dados: técnicas robustas, um guia*. Lisboa: Salamandra, 1992. 446p.
- Montenegro, A.A.A.; Montenegro, S.M.G.L. Variabilidade espacial de classes de textura, salinidade e condutividade hidráulica de solos em planície aluvial. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, p.30-37, 2006.
- Moraes, M. T.; Debiasi, H.; Franchici, J. C.; Silva, V. R. Soil penetration resistance in a rhodiceutradox affected by machinery traffic and soil water content. *Engenharia Agrícola*, v.33, p.748-757, 2013.
- Oliveira G.C.; Severiano, E.C.; Mello, C.R. Dinâmica da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho da Microrregião de Goiânia, GO. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, p.265-270, 2007.
- Santos, K. S.; Montenegro, A. A. A.; Almeida, B. G.; Montenegro, S. M. G. L.; Andrade, T. S.; Fontes Junior, R. V. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em solos de vale aluvial no semiárido de Pernambuco. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.828-835, 2012.
- Silva, J. R. L.; Montenegro, A. A. A.; Santos, T. E. M. Caracterização física e hidráulica de solos em bacias experimentais do Semiárido Brasileiro, sob manejo conservacionista. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.27-36, 2012.
- Silveira, D. C.; Melo Filho, J. F.; Sacramento, J. A. A. S.; Silveira, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no Recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.659-667, 2010.
- SoilSurvey Staff. *Soil Survey Manual*. Washington: Usda-Scs. U.S. Gov. Print. Office, 1993. 437p.
- Souza, E. R.; Freire, M. B. G. S.; Nascimento, C. W. A.; Montenegro, A. A. A.; Freire, F. J.; Melo, H. F. Fitoextração de sais pela Atriplex Nummularia Lindl. sob estresse hídrico em solo salino sódico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.477-483, 2011.
- Souza, E. R.; Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S. M. G. L.; Santos, T. E. M.; Andrade, T. S. A.; Pedrosa, E. G. Variabilidade espacial das frações granulométricas e da salinidade em um Neossolo Flúvico do Semi-árido. *Ciência Rural*, v.38, p.698-704, 2008.
- Souza, E. R.; Montenegro, A. A. A.; Montenegro, S. M. G.; Matos, J. A. Temporal stability of soil moisture in irrigated carrot crops in Northeast Brazil, *Agricultural Water Management*, v.99, p.26-32, 2011.
- Souza, Z. M.; Campos, M. C. C.; Cavalcante, I. H. L.; Marques Júnior, J.; Cesarin, L. G.; Souza, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, v.36, p.128-134, 2006a.
- Souza, Z. M.; Marques Junior, J.; Pereira, G. T; Montanari, R.. Otimização amostral de atributos de Latossolos considerando aspectos solo-relevo. *Ciência Rural*, v.36, p.829-836, 2006b.
- Statsoft - Statistica (Data Analysis Software System), Versão 7.0, (Www.Statsoft.Com), 2004.
- Stolf, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.15, p.229-35, 1991.
- Vaz, C.M.P.; Manieri, J.M.; De Maria, I.C.; Tuller, M. Modeling and correction of soil penetration resistance for varying soil water content. *Geoderma*, Amsterdam, v.166, p.92-101, 2011.
- Veronese Junior, V.V., Carvalho, M.P., Dafonte, J., Freddi, O.S., Vidal Vazquez, E., Ingaramo, O.E.. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian ferralsol. *Soil & Tillage Research*, v.85, p.166-177, 2006.
- Vieira, S. R. Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo. In: Novais, R. F. De; Alvarez V., V. H.; Schaefer, C. E. G. R. (ed.) *Tópicos Ciência do Solo*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 2000. p.1-54.
- Warrick, A. W.; Nielsen, D. R. Spatial Variability Of Soil Physical Properties In The Field. In: Hillel, D. (ed.). *Application of Soil Physics*, New York: Academic Press, 1980. p.319-324.