

Efeitos da variabilidade espacial da densidade do solo e fração grosseira na estimativa dos estoques de nutrientes em solo degradado**Effects of soil bulk density and coarse fraction spatial variability on nutrient stocks estimation in degraded soil**

DOI:10.34117/bjdv5n12-099

Recebimento dos originais: 07/10/2019

Aceitação para publicação: 07/12/2019

Emanoel Lima Martins

Doutor em Ciência do Solo pela Universidade Federal da Paraíba

Instituição: Instituto Nacional do Semiárido

Endereço: Av. Francisco Lopes de Almeida, S/N, Serrotão, Campina Grande, PB, Brasil

E-mail: emanoel.martins@insa.gov.br

Renato Francisco da Silva Souza

Doutorando em Ciência do Solo pela Universidade Federal da Paraíba

Instituição: Universidade Federal da Paraíba

Endereço: Centro de Ciências Agrárias, Rodovia BR 079 - Km 12, Areia, PB, Brasil

E-mail: renatofssouza@live.com

Vânia da Silva Fraga

Doutora Tecnologias Energéticas Nucleares pela Universidade Federal de Pernambuco

Instituição: Universidade Federal da Paraíba

Endereço: Centro de Ciências Agrárias, Rodovia BR 079 - Km 12, Areia, PB, Brasil

E-mail: vaniasfraga@gmail.com

Adriana Guedes Magalhães

Doutora em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal Rural de Pernambuco

Instituição: Instituto Nacional do Semiárido

Endereço: Av. Francisco Lopes de Almeida, S/N, Serrotão, Campina Grande, PB, Brasil

E-mail: adriana.magalhaes@insa.gov.br

Salomão de Sousa Medeiros

Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal da Paraíba

Instituição: Instituto Nacional do Semiárido

Endereço: Av. Francisco Lopes de Almeida, S/N, Serrotão, Campina Grande, PB, Brasil

E-mail: salomao.medeiros@insa.gov.br

RESUMO

A remoção total ou parcial de horizontes superficiais e exposição de camadas subjacentes pode causar danos irreversíveis à fertilidade do solo e o aumento da proporção de fragmentos grosseiros o que reduz efetivamente o volume disponível para armazenamento de água e desenvolvimento de raízes. Com o objetivo de avaliar a variabilidade espacial da densidade do solo e a sua influência na estimativa dos estoques de nutrientes do solo, foi definido uma malha, coletadas e analisadas 80 amostras de solo quanto aos atributos: densidade do solo (Ds), fração grosseira (fG) e teores de matéria orgânica do solo (MOS) e fósforo extraível (P) em duas profundidades de um Antropossolo Decápico em área periurbana em região semiárida. Influenciada pela fração grosseira a Ds

apresentou valores elevados nas duas profundidades, na ordem de 1,9 kg dm⁻³. Sugerindo elevado grau de compactação do solo, essas variáveis apresentaram elevada variabilidade espacial e forte dependência espacial. Os teores de MOS e P, apresentaram valores extremamente baixos da ordem de 3 g kg⁻¹ e 2 mg kg⁻¹, variabilidade espacial elevada e dependência espacial fraca. A estimativa do estoque de nutrientes em solos foi influenciada pela variabilidade espacial da Ds, quando feita sem considerar a massa e volume da fração grosseira superestimou os valores reais de nutrientes disponíveis no solo em relação ao mesmo cálculo quando se considerou essa fração.

Palavras-chave: variabilidade espacial, densidade do solo, estoque de nutrientes.

ABSTRACT

Total or partial removal of surface horizons and exposure of underlying layers can cause irreversible damage to soil fertility and increase the proportion of coarse fragments which effectively reduces the volume available for water storage and root development. In order to evaluate the spatial variability of soil density and its influence on the estimation of soil nutrient stocks, a mesh was defined and 80 soil samples were collected and analyzed for the attributes: soil density (Ds), coarse fraction (fG), soil organic matter (MOS) and extractable phosphorus (P) contents at two depths of a Decapitic Anthrosol in a periurban area in a semiarid region. Influenced by the coarse fraction to Ds presented high values in the two depths, in the order of 1.9 kg dm⁻³. Suggesting a high degree of soil compaction, these variables presented high spatial variability and strong spatial dependence. The MOS and P contents presented extremely low values of the order of 3 g kg⁻¹ and 2 mg kg⁻¹, high spatial variability and weak spatial dependence. The estimation of nutrient stock in soils was influenced by the spatial variability of Ds, when done without considering the mass and volume of the coarse fraction overestimated the actual values of nutrients available in the soil in relation to the same calculation when considering this fraction.

Key words: spatial variability, soil bulk density, rock fragments, nutrient stock.

1 INTRODUÇÃO

A degradação do solo é o principal fator responsável pela perda da capacidade produtiva do solo devido a alteração das características físicas, químicas e biológicas do solo, em decorrência da remoção da cobertura vegetal (DOETTERL et al, 2016). Além disso, a compactação do solo é outra característica inerente a essas áreas. Considerado um bom indicador de degradação física, por afetar negativamente a qualidade do solo e o crescimento das plantas, a compactação reduz a infiltração e transporte de água e ar no solo, o que dificulta muito o desenvolvimento do sistema radicular (REINERT et al, 2008; BRANDÃO et al., 2006).

A remoção das camadas superficiais de solos degradados ou que naturalmente apresentem pedregosidade em sua composição por serem solos jovens, desenvolvidos em embasamento cristalino, como Neossolos e alguns Luvisolos e Planossolos, aumenta a proporção de cascalho e calhaus (SSDS, 1993). O aumento dessa fração reduz efetivamente o volume disponível para armazenamento de água e desenvolvimento de raízes (NAGARAJA; SRINIVASAMURTHY, 2016).

A heterogeneidade na distribuição da fração grosseira (fração > 2mm) no solo faz pressupor uma variabilidade da densidade do solo também elevada, o que afeta a distribuição de nutrientes e

matéria orgânica (MOS) no solo. Considerada um dos atributos mais sensíveis ao manejo do solo, a MOS tem grande importância para as propriedades físicas do solo, melhorando sua estrutura e capacidade de infiltração e retenção de água, além de servir como fonte de nutrientes e carbono para os microrganismos do solo. Dentre os nutrientes destacamos o P por ser um dos elementos mais limitantes para a produtividade na região semiárida, devido aos baixos teores encontrados nos solos (SALCEDO; SAMPAIO, 2008).

As densidades dos solos sem fração grosseira apresentam dependência espacial elevada (CRUZ et al., 2010). No caso de solos degradados esperam-se variações na densidade do solo ainda maiores, devido à retirada seletiva de material e a compactação do solo. Consequentemente, essas variações na densidade afetarão também o cálculo do estoque de nutrientes e MOS, atualmente obtidos a partir da análise da fração fina (fração <2 mm).

Portanto, o volume ocupado pela fração grosseira não deve ser ignorado (VAN WESEMAEL et al., 2000), uma vez que a massa ou estoque de nutrientes totais ou potencialmente disponíveis em um volume de referência, na fração fina do solo diminui com o aumento na proporção da fração grosseira (HAMARASHID et al., 2010). Assim, os resultados das análises de rotina de fertilidade podem indicar teores de nutrientes superestimados por estar calculando o estoque apenas com base no volume de terra fina, desprezando o volume da fração grosseira, que afeta a densidade do solo levando a recomendações errôneas de nutrientes na adubação de solos com pedregosidade.

Nesse sentido, este trabalho teve como objetivos: i) avaliar a heterogeneidade da distribuição da fração grosseira e como esta afeta a distribuição espacial da densidade e das concentrações de fósforo extraível e matéria orgânica de um Antropossolo Decápico, em duas profundidades. ii) calcular os estoques de matéria orgânica e fósforo extraível considerando a fração grosseira e o número de amostras necessárias para estimar os valores médios dessas variáveis com um desvio de 10% e intervalo de confiança de 95%.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A pesquisa foi conduzida em área experimental localizada nas imediações da sede do Instituto Nacional do Semiárido (INSA) em Campina Grande, PB, (7°15'11"S a 7°15'13"S e 35°56'49"W a 35°56'51"W). A região é caracterizada por um clima quente e úmido com regime pluviométrico irregular e longo período de estiagem classificado como As' de acordo com a classificação de Köppen. A temperatura do ar varia entre a máxima anual de 28,6°C e a mínima 19,5 °C e a umidade relativa com média em torno de 80%.

O relevo da área de estudo é suave ondulado e o solo anteriormente correspondente a um

Planossolo Nátrico (BRASIL, 1972) com histórico de utilização como área de empréstimo para remoção de solo, classificado como Antropossolo Decapítico (CURCIO et al, 2004).

A área experimental tem dimensões de 60 x 60 m e foi previamente mapeada utilizando *sistema de posicionamento global* (GPS) para a vetorização e detalhamento do relevo. A partir deste, foi definido o grid para amostragem do solo, correspondente a uma malha irregular com espaçamentos de 6 x 6 m e 6 x 9 m.

Amostragem de solo

Foi realizada amostragem de solo com o auxílio de um cavador, por se tratar de uma área com muita pedregosidade. Dessa forma, cada ponto foi escavado até a profundidade definida, coletando-se todo o material (terra fina, cascalho e calhaus) em um saco plástico. O volume ocupado pela amostra foi determinado de acordo com os procedimentos descritos por Kohl (1988), no qual foi inserido um saco plástico no interior da cavidade, em seguida preenchido com água e posteriormente medindo o volume da água em proveta graduada.

O material coletado foi seco e pesado e em seguida foi peneirado para separação e pesagem da fração grosseira (fração >2mm) correspondente a cascalho e calhaus e a fração fina (fração <2mm), respectivamente de acordo com metodologia da Embrapa (DONAGEMA, 2011).

As ocasiões foram calculadas as densidades do solo com o intuito de se verificar a compactação do solo. A densidade do solo (D_s) foi calculada dividindo-se o peso total do solo seco, incluindo fragmentos grosseiros, pelo volume total ocupado pelo solo coletado:

$$D_s = \frac{M_{ss}}{V_s} \quad (1)$$

Sendo M_{ss} , a massa do solo seco (kg) e V_s , o volume do solo (dm^3)

A densidade da terra fina (D_{tf}) (fração <2mm) foi calculada de acordo com Andraski (1991):

$$D_{tf} = \frac{D_s(1 - g_r)}{1 - v_r} \quad (2)$$

Sendo g_r a proporção de fragmentos grosseiros (cascalho e calhaus) que foi calculado dividindo-se o peso de fragmentos grosseiros pelo peso total da amostra, e v_r , o conteúdo volumétrico de fragmentos grosseiros, calculado pela seguinte equação:

$$v_r = D_s \frac{g_r}{D_{fg}} \quad (3)$$

Sendo D_{fg} a densidade dos fragmentos rochosos, assumindo-se o valor de $2,65 \text{ kg dm}^{-3}$ (PAGE-DUMROESE et al, 1999).

Análise atributos do solo

As amostras de terra fina (TFSA) foram analisadas quanto ao pH em água (DONAGEMA, 2011), matéria orgânica do solo (MOS) pelo método de ignição em mufla a $550 \text{ }^\circ\text{C}$ (SCHULTE et al, 1987), P extraível por Mehlich-1 e determinação colorimétrica (MURPHY; RILEY 1962). Nas mesmas amostras foi realizada análise granulométrica para se determinar a classe textural do solo pelo método do densímetro, separando-se as frações areia, silte e argila (DONAGEMA, 2011).

Tabela 1. Atributos químicos e físicos (n=80) de um Antropossolo Decápico em área de empréstimo, Campina Grande, PB.

Prof.	pH	P	MOS	Areia	Silte	Argila	Classe
cm		mg kg ⁻¹		-----g kg ⁻¹ -----			
0 – 15	5,9	2,33	3,01	716	150	134	Franco arenoso
15 – 30	6,0	0,65	3,12	707	146	147	Franco arenoso

P, fósforo mehlich-1; MO, matéria orgânica.

Estoque de matéria orgânica e fosforo solo

Os estoques (E_N) de MOS (g kg^{-1}) e P (mg ha^{-1}) em cada profundidade foram calculados multiplicando-se o teor de MOS e de P na amostra pela densidade (kg dm^{-1}) de cada camada, multiplicado pela espessura da camada amostrada (cm). Para comparar os estoques entre massas iguais de solo, foram feitas correções pela massa de solo equivalente (Ellert & Bettany, 1995).

$$E_N = \frac{(N \cdot D_s \cdot e)}{10} \quad (5)$$

Em que N é o teor da variável avaliada, D_s , a densidade do solo, e e , a espessura da camada amostrada.

Análise estatística

Os dados foram submetidos a análise estatística descritiva, na qual foram determinados a média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria, coeficiente de curtose e teste de normalidade. Foi utilizado o *PROC UNIVARIATE* do pacote estatístico SAS University Edition (SAS, 2016).

Para a determinação do grau de dependência espacial da Densidade do solo, da Densidade da TFSA, a Densidade corrigida, a fração grosseira, a MOS e o P-Mehlich-1, foram selecionadas 60 das 80 amostras de forma aleatória e os dados submetidos ao *PROC VARIOGRAM* para obtenção das semivariâncias utilizando o pacote estatístico SAS University Edition (SAS, 2016). Para a obtenção dos variogramas foram testados os modelos teóricos Esférico, Exponencial, Gaussiano e Matern utilizando critério de Akaike (AIC) para a escolha do melhor modelo. Em seguida feito o ajuste das semivariâncias em função da distância que separa as amostras, a partir da seguinte equação:

(6)

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

Em que $y(h)$ é a semivariância estimada, $N(h)$ é o número de pares de dados experimentais separados pelo vetor h ; Z representa os valores das medidas dos atributos do solo.

A partir dos parâmetros do modelo escolhido para cada variável foi calculado o Índice de Dependência Espacial (IDE) proposto por Cambardella et al. (1994). O cálculo do IDE é a relação entre o efeito pepita (C_0) e o patamar; ($C_0 + C$). A partir deste se classifica a dependência espacial em forte quando $IDE < 25$, moderada $25 < IDE < 75$ e fraca para $IDE > 75$ e é determinado pela seguinte equação:

$$IDE = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) X 100 \quad (7)$$

Os modelos foram utilizados para interpolar os dados amostrais por krigagem ordinária, mapeando-se a variabilidade espacial das variáveis estudadas. Foram utilizados 75% da base de dados para cada camada para validação dos mapas. Dessa forma, para avaliar a qualidade dos mapas gerados calculou-se o erro de predição, chamado de precisão da predição, para isso foram comparados os dados estimados $z(\hat{y}_i)$ com as observações obtidas nos pontos de validação do grupo controle $z(y_i)$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**Análise Univariada**

A densidade do solo (Ds), que inclui a fração grosseira, foi muito elevada nas duas camadas (Tabela 2), 1,91 kg dm⁻³ e 1,96 kg dm⁻³, respectivamente (Tabela 1). É possível que essa semelhança entre camadas seja devido a pequena variação encontradas nas percentagens de fração grosseira (26,8 % para 0-15 e 30,2% para 15-30 cm). Sem dúvida a fração grosseira, com densidade de 2,68 kg dm⁻³ contribui com esses valores elevados de densidade do solo.

Tabela 1. Estatística descritiva de atributos do solo nas camadas 0-15 e 15-30 cm de um Antropossolo Decapítico em região semiárida.

Variável		\bar{X}	Md	Min	Max	DP	CV	p
----- Camada 0 – 15 cm -----								
Densidade do solo	kg dm ⁻³	1,97	1,96	1,48	2,25	0,17	9,12	0,09
Densidade terra fina	kg dm ⁻³	1,72	1,78	1,38	2,05	0,14	8,11	0,07
pFG		0,22	0,21	0,05	0,42	0,04	47,8	0,06
MOS	g kg ⁻¹	3,06	2,25	0,54	8,42	1,97	64,6	0,18
Fósforo	mg kg ⁻¹	2,33	2,21	0,10	7,37	1,46	62,8	0,08
----- Camada 15 – 30 cm -----								
Densidade do solo	kg dm ⁻³	1,92	1,99	1,46	2,27	0,20	10,8	0,10
Densidade terra fina	kg dm ⁻³	1,83	1,84	1,41	2,08	0,16	9,55	0,11
pFG		0,26	0,29	0,04	0,46	0,11	42,2	0,15
MOS	g kg ⁻¹	3,12	2,51	0,09	9,99	2,12	68,2	0,15
Fósforo	mg kg ⁻¹	0,65	0,50	0,02	3,25	0,56	86,2	0,24

\bar{X} , média; Md, mediana; min, mínimo, max, máximo; DP, desvio padrão; CV(%), coeficiente de variação; K, coeficiente de curtose; Ass, coeficiente de assimetria; p, teste de Kolmogorov-Smirnok

A densidade da terra fina (Dtf), que só considera o peso e volume da fração <2 mm, também foi elevada, com valores médios de 1,72 kg dm⁻³ na camada 0-15, e de 1,83 kg dm⁻³ na camada de 15-30 cm. Esses valores médios para TFSA indicam um elevado nível de compactação, provavelmente decorrentes do tráfego de máquinas pesadas à época de remoção de material.

O coeficiente de variação (CV) da densidade do solo e da TFSA, ficou entre 8 e 10% para as duas camadas, valores de 3 a 5 vezes superiores aos encontrados em solos cultivados ou que não apresentam material grosseiro (SILVA et al, 2000, ANDRADE et al, 2005).

A proporção de fragmentos grosseiros (pFG) apresentou grande amplitude de variação, com valores entre 0,05 até 0,42 na camada de 0 – 15 cm e de 0,04 até 0,46 na camada de 15 a 30 cm.

Mostrando correlação direta com a densidade do solo, à medida que aumenta a proporção de TFSA e diminui pFG (Figura 1).

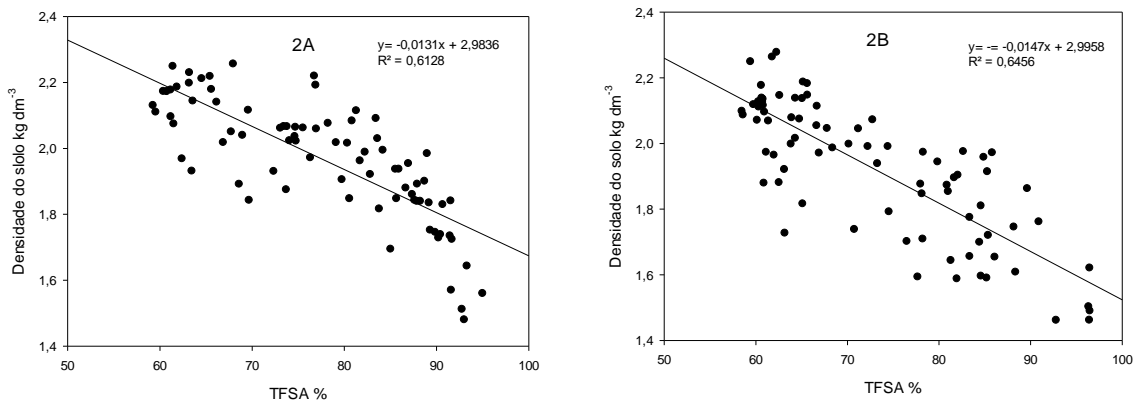


Figura 1. Relação terra fina (%) e densidade do solo (kg dm^{-3}) nas camadas de 0 a 15 cm (A) e 15 a 30cm (B) em Antropossolo Decápico em região semiárida.

Os teores médios de matéria orgânica do solo (MOS) encontrado foram muito baixos, de $3,06 \text{ g kg}^{-1}$ e de $3,12 \text{ g kg}^{-1}$ nas camadas de 0-15 e 15-30 cm respectivamente. Da mesma forma, os teores P_{MI} , com médias de $2,33$ e $0,65 \text{ mg kg}^{-1}$ nas camadas de 0-15 cm e de 15-30 cm, respectivamente são totalmente insuficientes para o fornecimento de P para as plantas.

Admitindo-se um valor crítico de $p < 0,10$, todas as variáveis na camada de 15-30 cm apresentaram desvios da distribuição normal enquanto na camada superficial somente a MOS. Essas variáveis foram transformadas para a forma logarítmica e o valor informado na tabela é da média geométrica. Entretanto, vale lembrar que o critério de normalidade não é uma condição necessária para utilizar a técnica de geoestatística, que foi aplicada nas variáveis não transformadas. (ISAACS & SRIVASTAVA 1989).

Análise da variabilidade espacial

Todas as variáveis analisadas indicaram forte dependência espacial, apenas a densidade de TFSA na camada de 15-30 cm apresentou dependência espacial fraca ($>75\%$) pelo índice de Cambardella et al. (1994). O modelo esférico foi o mais frequente entre os modelos teóricos utilizados para o ajuste dos semivariogramas experimentais (Tabela 2). Segundo Isaacs&Srivastava (1989), esse modelo é o que melhor descreve propriedades com alta continuidade espacial ou menos erráticos a curta distância. Os modelos esféricos e exponenciais apresentam-se como os modelos teóricos mais comuns para o ajuste dos atributos do solo (MONTOMIYA et al. 2011).

A matéria orgânica do solo foi a que apresentou valores superiores de alcance, de 23,90 m, para ambas as camadas. Para as demais variáveis, o alcance foi inferior a 20 m. A proporção da fração grosseira apresentou a maior diferença do efeito pepita (C_0) em relação ao patamar ($C_0 + C_1$) do

semivariograma, indicando uma forte dependência espacial nessas distâncias (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989).

Tabela 2. Parâmetros e modelos ajustados aos semivariogramas de atributos físicos e químicos de um Antropossolo Decápítico em região semiárida.

Variável	Unidade	Modelo	C0	C0+C1	a (m)	R ²	IDE
----- Camada 0 – 15 cm -----							
Densidade do solo	kg dm ⁻³	Esférico	0,00	0,03	15,8	0,89	Forte
Densidade terra fina	kg dm ⁻³	Esférico	0,00	0,01	19,1	0,91	Forte
pFG		Exponencial	0,00	0,56	18,9	0,90	Forte
MOS	g kg ⁻¹	Matern	1,60	3,21	23,9	0,85	Moderado
Fósforo	mg kg ⁻¹	Esférico	0,00	1,13	18,9	0,91	Fraca
----- Camada 15 – 30 cm -----							
Densidade do solo	kg dm ⁻³	Esférico	0,02	0,04	15,8	0,91	Moderado
Densidade terra fina	kg dm ⁻³	Esférico	0,02	0,02	21,6	0,95	Fraca
pFG		Exponencial	0,00	0,57	17,1	0,87	Forte
MOS	g kg ⁻¹	Matern	1,61	3,73	23,9	0,82	Moderado
Fósforo	mg kg ⁻¹	Matern	0,17	0,24	19,9	0,93	Fraca

C0, efeito pepita; C0+C1, patamar; a, Alcance; R², coeficiente de correlação; IDE, Índice de dependência espacial; pFG, proporção de fração grosseira, MOS, matéria orgânica do solo.

Na distribuição espacial das propriedades físicas, predominaram na área valores de Ds entre 1,85 e 2,15 g cm⁻³, de forma relativamente coincidente com a faixa de 1,75 e 1,95 g cm⁻³ para Dtf, indicando que a maior parte da área está severamente compactada. Os fragmentos grosseiros estão distribuídos em praticamente toda a área, com valores de pFG entre 0,15 a 0,45. Nas áreas menores onde pFG superou 0,45, a correção de Ds pela massa de FG foi maior, e a Dco ficou < 1,3 g cm⁻³.

A variabilidade espacial dos teores de MOS e P_{M1} foi bastante elevada, uma vez que as escalas da Figura 2 mostram variações de pelo menos uma ordem de magnitude, e não sugerem relação entre si ou com os demais atributos.

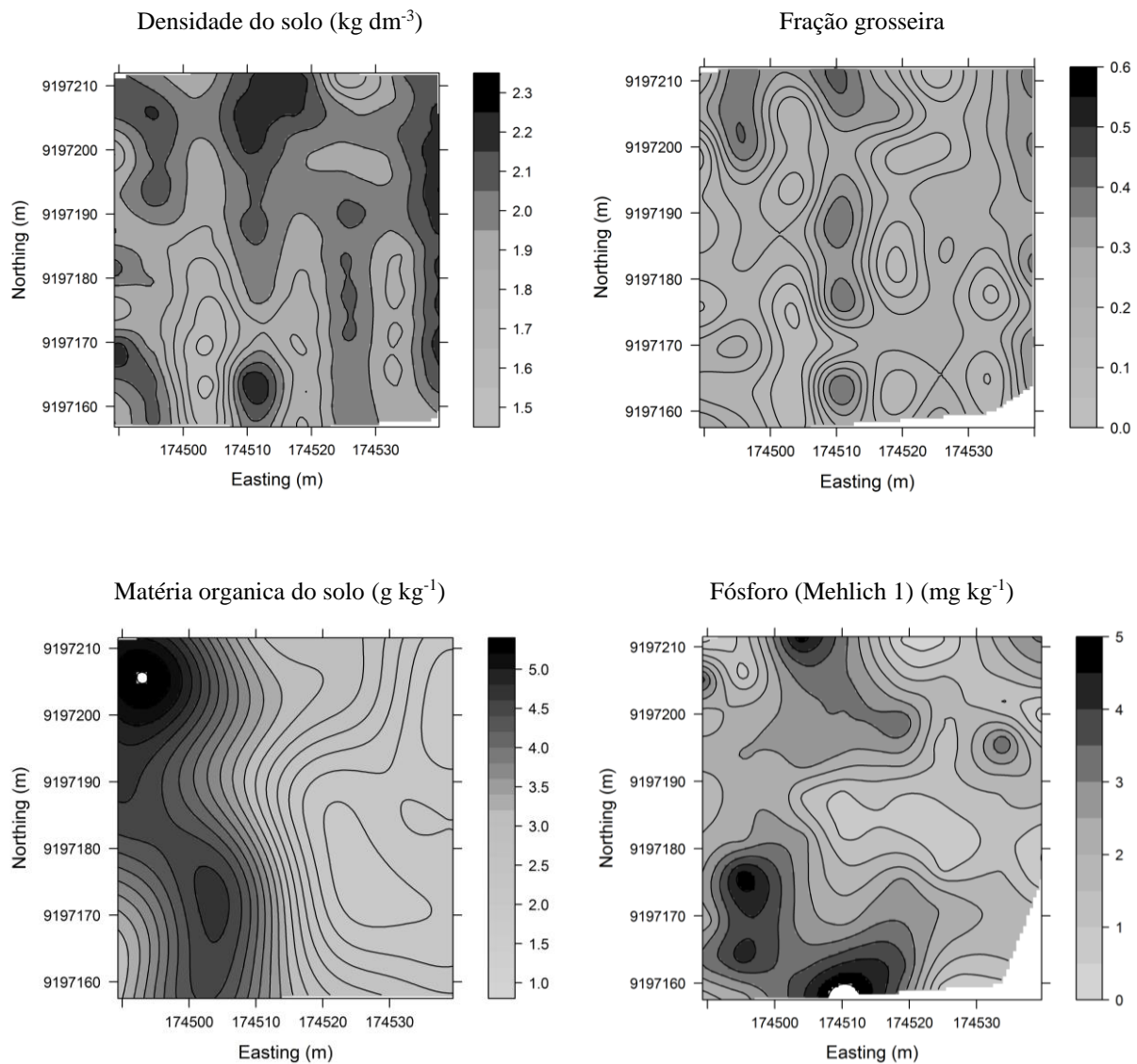


Figura 2. Distribuição espacial de atributos físicos e químicos do solo na camada de 0 – 15 cm em Antropossolo Decapítico em região semiárida.

A precisão dos mapas gerados foi determinada simulando-se os valores das variáveis em 20 pontos amostrais não incluídos na base de dados dos modelos. Os erros médios (EM) das estimativas foram mínimos para as variáveis físicas (Tabela 3). Para as variáveis químicas ME foi maior, devido a variabilidade bem mais acentuada dos atributos químicos (Figura 2). Apesar disso, considerando-se que a variabilidade da MOS e P_{MI} foi de uma ordem de magnitude, as estimativas dessas variáveis apresentam desvios razoáveis. A correlação entre os valores estimados e os valores experimentais (Tabela 3) manteve-se baixa, indicando a ausência de vícios ou tendenciosidade nas estimativas de todas as variáveis

Tabela 3. Parâmetros de validação dos modelos para pontos não amostrados.

Variável	Observado	Estimado	EM	RMSE	r
Ds(kg dm ⁻³)	1,97	1,97	0,00	0,03	0,35
pFG	0,23	0,22	0,01	0,01	0,24
P _{M1} (mg kg ⁻¹)	2,00	2,50	-0,49	1,26	-0,20
MOS (g kg ⁻¹)	3,60	2,87	0,72	3,78	0,26

Ds, densidade do solo; α FG, proporção da fração grosseira; P_{M1}, Fósforo Mehlich 1; MOS, matéria orgânica do solo; ME, erro médio; RMSE, Raiz quadrada do erro médio; r, correlação.

A estimativa do estoque de nutrientes no solo quando realizada utilizando a densidade do solo superestimou os valores em até 20 pontos percentuais na profundidade de 0 a 15 cm (Tabela 4). Quando se utiliza a densidade da terra fina, desconsiderando a massa ocupada pela fração grosseira, tem-se sempre valores mais próximos da realidade local.

Tabela 4. Estimativa dos estoques de fósforo e matéria orgânica do solo com base na densidade o solo e na densidade da terra fina em um Antropossolo Decapítico.

Prof.	Estoque de MOS (kg ha ⁻¹)		Estoque de P (kg ha ⁻¹)	
	Ds	Dtf	Ds	Dtf
0 – 15 cm	8,87±5,68	6,31±4,19	6,81±4,28	4,80±3,06
15 – 30 cm	8,90±6,20	6,16±4,24	1,89±1,78	1,28±1,04

MOS, matéria orgânica do solo; P, fósforo; Ds, Densidade do solo; Dco, Densidade da terra fina.

4 DISCUSSÃO

De maneira geral, o solo da área estudada encontra-se em um acentuado estágio de degradação, tanto nos aspectos de fertilidade, definidos pelos baixíssimos teores de MOS e de P encontrados, quanto nos aspectos físicos, destacando-se os elevados valores de densidade do solo e densidade da terra fina.

Embora não exista uma área controle, não degradada, para comparação direta, dados existentes de carbono orgânico total (COT) para solos do semiárido, indicam 7,4 g kg⁻¹ em Planossolos, aumentando para 10,4 em Neossolo litólico e 11,8 g kg⁻¹ em Luvisolos (SALCEDO; SAMPAIO, 2008). Convertendo-se o teor de MOS para COT (58% de C na MOS), a área sob estudo apresentou valor médio de 1,8 g kg⁻¹; um valor tão baixo claramente indica que houve a retirada da camada de solo superficial, que normalmente acumula os maiores teores de MOS.

Quanto aos teores de P, não é incomum encontrar valores de 1 a 2 mg kg⁻¹ de solo em solos da região (GALVÃO et al, 2008), de forma que esses baixos valores não podem ser atribuídos ao fato

de ser uma área de empréstimo, embora talvez fossem maiores por conta da queda de serapilheira, na condição de mata nativa. Não foi observada nenhuma relação espacial entre os teores de MOS e P_{M1} contrariamente ao observado em um Latossolo Vermelho cultivado (BARBIERI et al 2013).

O aspecto mais marcante da degradação da área refere-se aos elevados valores de Dtf, com médias de 1,78 e 1,82 g cm⁻³ nas camadas de 0-15 cm e 15-30 cm. Valores de densidades próximo de 1,75 g cm⁻³ já são críticos para o desenvolvimento normal das plantas (REINERT et al, 2008). Vários autores sugerem o uso de valores relativos de densidade para descrever comparativamente o grau de compactação de vários tipos de solos (REICHERT et al., 2009; HAKANSSON; LIPIEC, 2000)

Os principais fatores que afetam o crescimento radicular são a umidade ou conteúdo de água no solo, a resistência mecânica, a aeração e a temperatura (ZHANG; HU, 2013). Nas regiões semiáridas a escassez de água é o principal fator limitante ao desenvolvimento das plantas, isso aliado ao regime pluviométrico irregular. As condições precipitação pluvial no semiárido geram três aspectos que devem ser considerados quando há chuvas: a taxa de infiltração da água no solo, a sua velocidade de redistribuição no solo e a capacidade de armazenamento do solo. Além disso, o relevo irregular promove o escoamento superficial, que limita o armazenamento de água no perfil do solo, pois diminui a infiltração.

Os elevados valores de Dtf indicam forte predominância de microporos que determinam uma baixa taxa de infiltração e lenta redistribuição de água no solo, que depende fundamentalmente de um solo agregado e com boa proporção de macroporos, resultando numa maior condutividade hidráulica (BRANDÃO et al, 2006). Ao mesmo tempo, valores elevados de densidade diminuem a capacidade de armazenamento de água, pois diminuem a porosidade total (BONO et al., 2012). A ausência quase completa de MOS no solo agrava essa situação, pois a MOS atua como um condicionador da estrutura do solo e contribui na formação e estabilidade de agregados do solo, que por sua vez influem sobre a densidade e porosidade do solo (RAWLS et al, 2003)

Com a lenta redistribuição da água em profundidade, fica também comprometida as trocas gasosas na camada de 0-30 cm do solo, onde normalmente se concentra o sistema radicular (REICHARDT, 1981).

Em relação ao crescimento radicular, solos muito compactados apresentam maior resistência mecânica a penetração de raízes, o que pode se tornar um fator limitante ao desenvolvimento do sistema radicular. Embora diferentes espécies poderão apresentar condições adaptativas diferenciadas (MALAMY, 2005), haverá sempre um elevado gasto metabólico para vencer esses obstáculos, que irá limitar a produção de biomassa (GONÇALVES; LYNCH, 2014). Bengough et al (1999) apresentam uma extensa análise dos efeitos do estresse mecânico sobre o alongamento radicular.

A variabilidade espacial da dinâmica de água e de crescimento radicular, embora não tenham sido medidas especificamente, podem ser inferidas da variabilidade de pFG e sua influência na Dco. Em estudo com Luvisolos e Neossolos Litólicos, comparando áreas sob vegetação nativa e sob agricultura, Fraga e Salcedo (2004) observaram também uma relativa constância na quantidade de cascalho entre manejos e camadas, mas diferenças entre classes de solo. Assim, é possível pensar que a quantidade de FG e sua distribuição vertical na área experimental, representem valores típicos do solo amostrado como constatado por Cunha et al (2010).

Ainda que a presença de FG limite o volume de solo disponível para armazenamento de água e crescimento de raízes, sua mistura com a TFSA adensada introduz uma elevada quantidade de canais e o volume de macroporos nas áreas de contato entre a TFSA e os cascalhos e calhaus. Nas áreas onde pFG é pequena ou próxima de zero ($Dco \approx Dtf$), a dinâmica da água e crescimento de raízes seriam críticos devido aos altos valores de Dtf, inclusive favorecendo o escoamento superficial (MONTENEGRO et al., 2013). Nas áreas em que pFG oscila entre 0,15 e 0,45, a presença desses canais e macroporos sem dúvida irá melhorar a entrada e distribuição de água assim como o crescimento de raízes. Observações qualitativas (não mostradas) indicaram uma correlação espacial entre o desenvolvimento de vegetação na área e a variabilidade espacial da Dco. Já para solos com densidades entre 0,8 e 1,6 g cm⁻³ Logsdon e Karlen (2004) não encontraram relação entre a densidade e a produtividade de várias espécies.

Os modelos de ajuste dos variogramas experimentais foram muito precisos na estimativa dos valores das variáveis físicas em locais que não participaram da base de dados do modelo. Essa elevada precisão resultou em um baixo número de amostras (2-3 amostras) necessárias para conseguir detectar diferenças de 10% entre as médias, com 95% de confiança. Esses números de amostras corresponderam aos encontrados por Han et al (2016) para solos com pedregosidade. Entretanto para a densidade da terra fina estes autores encontraram valores da ordem de 9 a 17 amostras para as profundidades avaliadas.

O caso das variáveis químicas foi o oposto, pois a precisão do ajuste dos teores de MOS e P_{M1} pelos modelos não foi boa (EM = 0,72 e -0,49, respectivamente). Isso exigiu um número de amostras inviável, do ponto de vista prático, para atingir o mesmo nível de separação de médias (10%) com confiança semelhante (95%) ao das propriedades físicas. Neste caso é necessário aceitar a detecção de diferenças maiores (20% ou maiores) diminuindo o nível de confiança para 90%. É importante ressaltar que no caso do cálculo de estoque de nutrientes neste tipo de áreas, a variabilidade dos estoques será da mesma ordem de magnitude da variabilidade das concentrações, requerendo também um número elevado de amostras para detectar diferenças significativas. A variabilidade da Dco, que deve ser o atributo utilizado para o cálculo dos estoques, foi bem menor que os das concentrações.

NAGARAJA et al, (2016), encontraram variações de 10 a 120% no estoque de N, P e K, dependendo da proporção de fragmentos grosseiros no solo em um Planossolo degradado na Índia, concluindo que a estimativa do estoque de nutrientes para solos degradados utilizando a Ds superestima os nutrientes do solo.

5 CONCLUSÃO

A densidade do solo foi influenciada pela distribuição da fração grosseira e ambos atributos apresentaram dependência espacial de moderada a forte.

O cálculo do estoque de nutrientes em solos com pedregosidade sem considerar a massa e volume da fração grosseira superestima os valores reais de nutrientes disponíveis no solo.

Os atributos físicos com dependência espacial forte requerem menor número de amostras para estimativa de seus valores médios com um desvio de até 10% e intervalo de confiança de 95% atributos químicos com dependência espacial moderada a fraca.

REFERÊNCIAS

- AL-OMRAN, A. M; AL-WABEL, M.I; NADEEM, M. F; AL-SHARANI, S. Spatial variability for some properties of the wastewater irrigated soils. **Soil Science Society of America Journal**. S, 12, p. 167-175, 2013.
- AQUINO, R. E; MARQUES JUNIOR, J. Distribuição espacial de atributos químicos do solo em área de pastagem e floresta. **Pesq. Agropec. Trop**. V.44, n.1, p. 32-41, 2014.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. **Levantamento Exploratório e de Reconhecimento dos Solos do Estado da Paraíba**. Boletim 15, Série Pedologia, 8, Rio de Janeiro: 1972.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1501-1511, 1994.
- CAVALCANTE, E. G. S; ALVES, M. C; SOUZA, Z. M; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Rev. Bras. Ci. Solo**, 31, p. 1329-1339, 2007.
- BABALOLA, O; LAL, R. Subsoil gravel horizon and maize root growth: Gravel concentration and bulk density effects. **Plant and soil**, 46, 337-346, 1977.

GRÄLER, B., PEBESMA, E., HEUVELINK, G. **Spatio-Temporal Interpolation using gstat**. The R Journal 8(1), 204-218, 2016.

BENITES, V. M.; MACHADO, P. L. O. A; FIDALGO, E. C. C; COELHO, M. R; MADARI, B. E. Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, 139, p. 90-97, 2007.

BONO, J. A. M.; MACEDO, M. C. M.; TORMENA, C. A.; NANNI, M. R.; GOMES, E. P.; MÜLLER, M. M. L. Infiltração de água no solo em um Latossolo Vermelho da região sudoeste dos Cerrados com diferentes sistemas de uso e manejo. **Rev. Bras. Ci. Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, 2012.

BOTTEGA, E. L; QUEIROZ, D. M; PINTO, F. A. C; SOUZA, C. M. A. Variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no cerrado brasileiro. **Rev. Ci. Agronom.** V. 44, n. 1, p. 1-9, 2013.

DOETTERL, S; BERHE, A. A; NADEU, E; WANG, Z; SOMMER, Z; FIENER, P. Erosion, deposition and soil carbon: A review of process-level controls, experimental tools and models to address C cycling in dynamic landscapes. **Earth-Science Reviews**, 2016. 145, p.102-122.

BRANDÃO, V. dos S. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: Editora da UFV, 2006. 120 p.

HAN, Y., ZHANG, J., MATTSON, K. G., ZHANG, W. WEBER, T. A. Sample Sizes to Control Error Estimates in Determining Soil Bulk Density in California Forest Soils. **Soil Sci. Soc. Am. J.** 80:756–764, 2016.

KUMAR, S. Estimating spatial distribution of soil organic carbon for the Midwestern United States Using historical database. **Chemosphere**, 127, p. 49-57, 2015.

MARCOLIN, C.D. & KLEIN, V.A. Determinação da densidade relativa do solo por uma função de pedotransferência para a densidade do solo máxima. **Acta Sci. Agron.**, 33:349-354, 2011.

MONTENEGRO, A. A. A.; ABRANTES, J. R. C. B.; LIMA, J. L. M. P.; SINHGH, V. P.; SANTOS, T. E. M. Impact of mulching on soil and water dynamics under intermittent simulated rainfall. **Catena**, Amsterdam, v.109, p. 139-149, 2013.

SCHULTE, E. E.; J.B. PETERS; P.R. HODGSON. **Wisconsin Procedures for soil testing, plant analysis and fud & forage analysis**. Department of soil Science. University of Wisconsin-Extension, Madison, WI, 1987. 9p.

SAS INSTITUTE INC. **SAS/STAT® University Edition**, User's Guide. Cary, NC: SAS Institute Inc, 2016.

SATO, M. K; LIMA, H. V; OLIVEIRA, P. D; RODRIGUES, S. Critical soil bulk density for soybean growth in Oxisols. **Int. Agrophys**, 29, p. 441-447, 2015.

RAWLS, W.J.; PACHEPSKY, Y.A.; RITCHIE, J.C.; SOBECKI, T.M. & BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. **Geoderma**, 116:61-76, 2003.

REICHERT, J. M; SUZUKI, L. E. A. S; REINERT, D. J; HORN, R. HAKANSSON, I. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil&tillageresearch**, 102, p. 242-254, 2009.

REINERT, D. J; ALBUQUERQUE, J. A; REICHERT, J. M; AITA, C; ANDRADA, M. M. C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Rev. Bras. Ci. do Solo**, 32:1805-1816, 2008.