



ISSN: 2525-815X

Journal of Environmental Analysis and Progress

Journal homepage: www.jeap.ufrpe.br/

10.24221/JEAP.4.3.2019.2511.200-208



Avaliação da variabilidade espacial da resistência à penetração e teor de água de um solo de Terra Preta Arqueológica

Evaluation of the spatial variability of the penetration resistance and water content of an Archaeological Black Earth soil

Miqueias Lima Duarte^a, Eliomar Pereira da Silva Filho^b, Milton César Costa Campos^c, Bruno Campos Mantovanelli^c, Pedro Cardoso Mota Júnior^c

^a Universidade Estadual Paulista-UNESP, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Av. Três de Março, n. 1435, CP: 18087-180, Alto do Boa Vista, Sorocaba/SP, Brasil. E-mail: miqueiaseng@hotmail.com.

^b Fundação Universidade Federal de Rondônia-UNIR, Campus - BR 364, Km 9,5, Porto Velho/RO, Brasil. CEP: 76801-059. E-mail: eliomar@unir.br.

^c Universidade Federal do Amazonas-UFAM, Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente, Rua Vinte e Nove de Agosto, n. 786, Centro, Humaitá/AM, Brasil. CEP: 69800-000. E-mail: mcesarsolos@gmail.com, brunomantovanelli21@gmail.com, pedrocardoso115@gmail.com.

ARTICLE INFO

Recebido 13 Mai 2019

Aceito 29 Jul 2019

Publicado 30 Jul 2019

ABSTRACT

The southern region of the state of Amazonas has recently undergone the substitution of forest areas for agricultural and livestock activities. The advancement of these activities, without taking into consideration the structural conditions of the soil, can cause damage to the environment and may exhaust them. The objective of this study was to evaluate the spatial dependence of resistance to penetration and moisture in relation to soil depth of Archaeological Black Earth under the cultivation of Conilon coffee in the south of the state of Amazonas. A sample mesh of 88x64 meters was delimited, with regular spacing of eight meters, totaling 88 sampling points. In these locations, soil samples were collected at depths of 0-5, 5-10 and 10-20 cm. Texture analyses, soil penetration resistance and volumetric humidity were performed. The results of the soil analyses were subjected to classical and spatial statistical analysis. The results obtained indicate that the resistance to penetration and volumetric soil moisture have moderate to strong spatial dependence in the depths of 0-5, 5-10 and 10-20 cm. The soil water content affected considerably the spatial variability of penetration resistance and the lower the water content was the spatial dependence.

Keywords: Soil attributes, geostatistics, anthropogenic soil.

RESUMO

A região sul do estado do Amazonas vem sofrendo recentemente com a substituição de áreas de floresta por atividades agrícolas e pecuária. O avanço dessas atividades, sem levar em consideração as condições estruturais do solo, pode causar danos ao ambiente, podendo esgotá-los. O objetivo do estudo foi avaliar a dependência espacial da resistência à penetração e umidade em relação a profundidade do solo de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de café Conilon no sul do estado do Amazonas. Foi delimitado uma malha amostral de 88x64 metros, com espaçamento regular de oito metros, perfazendo um total de 88 pontos amostrais. Nesses locais, foram coletadas amostras de solo nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Foram realizadas análises de textura, resistência a penetração do solo e umidade volumétrica. Os resultados das análises de solos foram submetidos à análise estatística clássica e espacial. Os resultados obtidos indicam que a resistência à penetração e umidade volumétrica do solo possuem moderada a forte dependência espacial nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm. O teor de água no solo afetou consideravelmente a variabilidade espacial da resistência à penetração; quanto menor o teor de água, menor foi a dependência espacial.

Palavras-Chave: Atributos do solo, geoestatística, solo antropogênico.

Introdução

Um dos atributos físicos do solo que tem sido utilizado para detectar a compactação do solo é a Resistência à Penetração do solo (RP), por ser um parâmetro de fácil determinação e estar diretamente relacionada com o crescimento das plantas, bem como ser mais eficiente na identificação de estados de compactação quando comparado à densidade de solo (Silva et al., 2003; Bergamin et al., 2010).

A RP do solo é uma propriedade dinâmica identificada como a reação do solo à ação de uma força aplicada através de uma ponteira cônica. Esse atributo pode ser influenciado pela densidade, pelo teor de água e pelo tipo de solo (Júnior et al., 2006). Lima et al. (2008) apontam que a resistência do solo aumenta com a elevação da densidade e diminui com o incremento no teor de água do solo.

Conhecer a variabilidade espacial dos atributos do solo e das culturas, no espaço e no tempo, é considerado atualmente, o princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas (Souza et al., 2004), uma vez que, seja qual for a escala, conhecendo as coordenadas geográficas do ponto amostrado, os dados podem ser especializados e relacionados com sua produtividade local, possibilitando identificar os locais com baixo desempenho agrícola e corrigi-los (Marasca et al., 2017).

Assim, princípios de agricultura de precisão possibilitam a identificação da variabilidade espacial de atributos do solo e da produtividade das lavouras, otimizando as aplicações de corretivos e fertilizantes, melhorando o controle do sistema de produção das culturas, conseqüentemente, reduzindo os custos gerados pela alta aplicação de insumos e degradação ambiental, provocada pelo excesso ou falta de nutrientes (Souza et al., 2007; Araujo et al., 2012; Ferraz et al., 2012; Miranda et al., 2017; Dall'Agno et al., 2018).

Segundo Bravo & Andreu (2011), as propriedades físicas dos solos têm alta variabilidade espacial, tanto horizontalmente quanto verticalmente, e estão sujeitos a mudanças contínuas em condições naturais. Nesse sentido, as técnicas de geoestatística têm sido de suma importância para o melhor conhecimento das propriedades e mudanças dos solos (Marques et al., 2014).

Atualmente, as técnicas de geoestatística têm se destacado em estudos de atributos de solo, o que tem permitido detectar o comportamento e distribuição espacial dos atributos físicos e químicos do solo (Silva et al., 2008), tendo por base a estrutura da variabilidade natural dos atributos avaliados considerando a interdependência

espacial de variáveis dentro do intervalo de amostragem (Cassel et al., 2000).

A análise geoestatística pode indicar alternativas de manejo não apenas para reduzir efeitos da variabilidade do solo sobre a produtividade agrícola, mas também para aumentar a possibilidade de se estimarem respostas dos atributos do solo em função de determinadas práticas de manejo (Ovalles e Rey, 1994), além de verificar a condição de existência da variabilidade espacial através do semivariograma, permitindo assim, a descrição da dependência espacial de demais atributos.

Coelho et al. (2012) citam que a RP, assim como qualquer outro atributo do solo, pode ter elevada variabilidade espacial, podendo ser estudada pela geoestatística, que trata de um conjunto de técnicas aplicadas a variáveis regionalizadas, que definem a estrutura de dependência espacial de cada variável.

A geoestatística dispõe de várias técnicas utilizadas para a análise e inferência de uma variável espacialmente georreferenciada, possibilitando o mapeamento de áreas para a avaliação do comportamento da variável em estudo e o planejamento mais eficaz da implantação de zoneamento de áreas (Souza et al., 2004).

Conhecer a variabilidade espacial da RP é de suma importância, pois possibilita identificar problemas de compactação do solo em locais específicos, além de permitir o desenvolvimento de ações de gerenciamento a fim de evitar os impactos negativos no meio ambiente gerado pelo uso inadequado do solo.

Em ambientes arqueológicos de Terra Preta, os solos apresentam uma particularidade em relação aos solos adjacentes (Campos et al., 2012; Soares et al., 2018), normalmente apresentam elevada fertilidade natural devido à grande concentração de matéria orgânica e minerais, e além da presença de artefatos cerâmicos (Cunha et al., 2018). Nesses ambientes poucos estudos avaliam a dependência espacial dos atributos dos solos, sejam em áreas naturais ou agricultáveis.

Esse trabalho avaliou a variabilidade espacial da Resistência à Penetração (RP) e Umidade Volumétrica do Solo (θ) em uma área de Terra Preta Arqueológica sob cultivo de café Conilon, no município de Apuí, sul do estado do Amazonas.

Material e Métodos

Caracterização da área de estudo

A área de estudo está localizada no município de Apuí, Sul do Estado do Amazonas, situada à margem direita do rio Madeira (Figura 1). O município de Apuí limita-se com os municípios

de Novo Aripuanã, Borba, Maués, Manicoré e com o estado de Mato Grosso. A principal via de acesso do município é a BR 319 (Transamazônica), que liga ao município de Humaitá/AM no sentido sudoeste e o município de Taraocanga/PA no sentido nordeste.

A área de estudo onde a lavoura foi cultivada possui declividade plana (0 - 3%), o período de cultivo do cafezal na área é de seis anos, o método adotado de colheita é do tipo manual realizada por meio da coleta dos frutos em todos os estágios de maturação, utilizando pano de colheita ou peneira. Nenhuma máquina foi utilizada na implantação ou manutenção das áreas cultivadas.

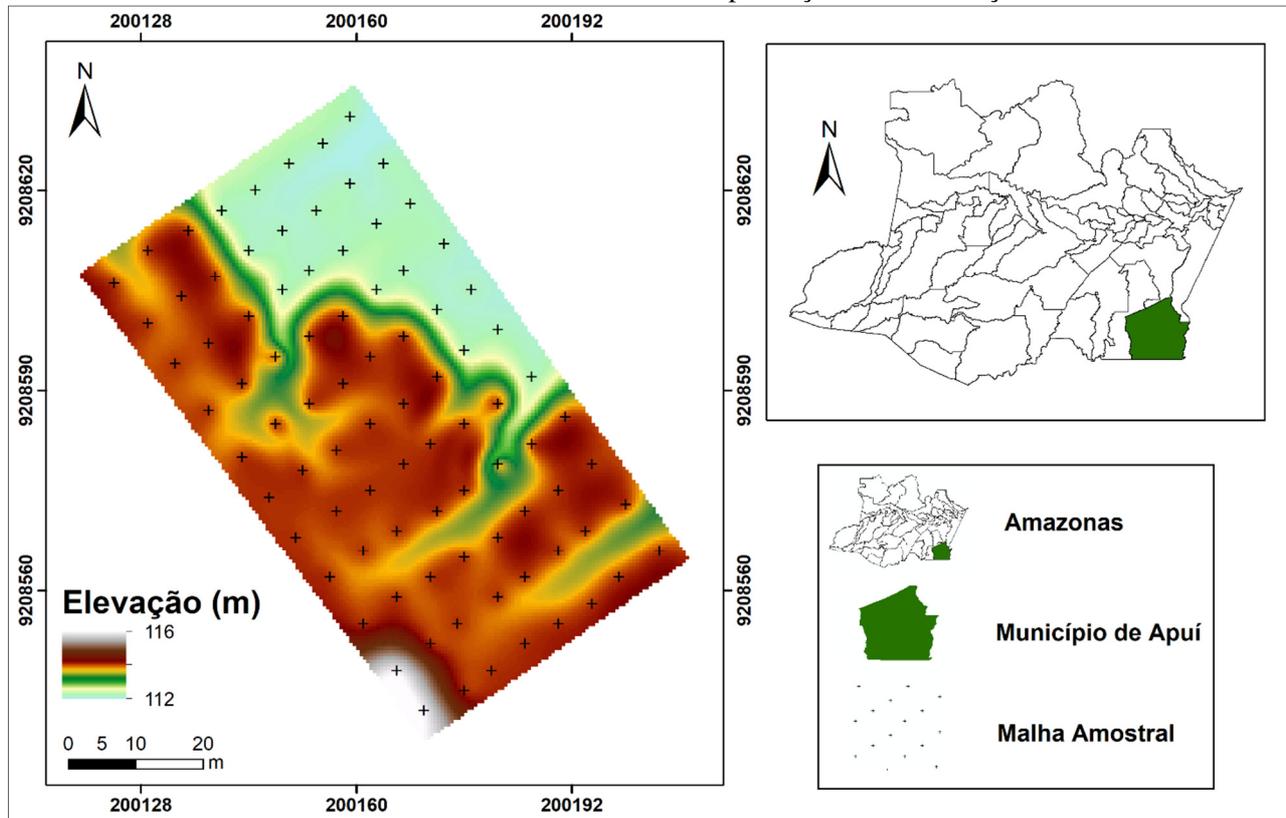


Figura 1. Área de estudo localizada no município de Apuí, sul do Estado do Amazonas, à margem direita do rio Madeira.

Os solos da região onde foram coletadas as amostras apresentam, em seus horizontes superficiais, fragmentos de cerâmicas variando de 13,5 a 220,1 k.kg^{-1} , e coloração escura atendendo assim os requisitos para serem considerados como solos de Terras Arqueológicas (Santos et al., 2011). Segundo Campos et al. (2011), os horizontes antropogênicos dos solos da região variam de 37 a 50 cm de profundidade e, por sua vez, os horizontes antropogênicos variam entre as texturas fraco-arenosa, fraco-siltosa e fraco-argilosa e muito argilosa.

O clima, segundo a classificação de Köppen é do tipo tropical chuvoso e tipo climático AM (chuvas do tipo monção), apresentando um período seco de pequena duração, temperaturas variando entre 25 a 27°C e precipitação média anual de 2.500 mm, com um período mais chuvoso entre janeiro a março, e menos chuvoso de julho a agosto, e umidade relativa do ar entre 85 a 90% (Duarte & Silva Filho, 2019).

Coleta de amostras de solo

A coleta de amostras de solo para a medição de parâmetros físicos do solo foi realizada em uma malha amostral de 88 x 64 metros, em pontos amostrais no cruzamento da malha, com espaçamento regular de 8 metros, perfazendo um total de 88 pontos amostrais (Figura 1), em uma área cultivada com café Conilon (*Coffea canephora*).

As coletas das amostras foram realizadas nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm (perfazendo um total de 264 amostras), com uso de anel volumétrico tipo Kopeck, em cilindros com volume médio de 98,53 cm^3 . As amostras foram coletadas mantendo sua estrutura preservada. Os pontos amostrais foram georreferenciados com uso de um GPSMAP 76CS.

Análise e processamento dos dados

A textura do solo foi determinada conforme método descrito pela Embrapa (2011), utilizando dispersão com NaOH 1,0 mol.L^{-1} e

agitação rápida (6.000 rpm), por 15 minutos, obtendo-se a fração argila por sedimentação, a fração areia por tamisação e o silte foi calculado por diferença. A RP do solo foi determinada em laboratório utilizando um penetrômetro eletrônico com velocidade constante de 0,1667 mm.s⁻¹, equipado com uma célula de carga de 200 N, com haste tipo cone de 4 mm de diâmetro de base e semiângulo de 30°, e receptor com interface gráfica acoplado a um microcomputador para registro das leituras por meio de um *software* (Dalchiavon et al., 2011). O θ foi obtido pela diferença entre a massa do solo úmido e a massa do solo seco em estufa a 105°C durante 24 h, conforme metodologia descrita pela EMBRAPA (2011).

Os atributos textura, resistência do solo à penetração e teor de água no solo foram analisados através da análise estatística descritiva e de técnicas de geoestatística por meio do programa Rstudio. A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov a um nível de significância de 5%, bem como a dependência espacial por meio do estudo de semivariogramas. A análise de semivariograma foi realizada para identificar se existe autocorrelação espacial entre os pontos georreferenciados. O semivariograma é, por definição, dado pelas Equações 2 e 3, conforme descrito por Vieira (2000).

$$y(h) = \frac{1}{2} E[Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad \text{Eq. (2)}$$

Estes podem ser estimados através de:

$$y^*(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad \text{Eq. (3)}$$

Tabela 1. Estatística descritiva da textura do solo nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

Estatística descritiva									
Parâmetros	Silte _{p1}	Argila _{p1}	Areia _{p1}	Silte _{p2}	Argila _{p2}	Areia _{p2}	Silte _{p3}	Argila _{p3}	Areia _{p3}
Média	617,30	17,98	364,65	567,98	14,33	417,68	638,51	19,53	344,32
Mediana	614,86	17,12	367,44	566,36	14,26	420,93	635,38	19,24	346,92
Máximo	706,30	78,60	405,85	673,60	15,292	311,10	809,25	19,27	380,02
Mínimo	515,54	11,35	429,15	494,08	12,48	493,43	541,23	14,73	444,03
Variância	1229,04	48,64	1202,83	1056,43	8,36	1098,72	1302,86	7,05	1058,64
Desvio padrão	35,05	6,97	34,68	32,50	2,89	33,14	36,09	2,65	32,53
Assimetria	-0,08	7,67	-0,13	0,21	1,62	-0,24	-0,08	7,67	-0,13
Curtose	0,21	2,90	-0,14	0,56	4,57	0,62	5,61	0,13	1,76
d	0,13	0,09 ^{ns}	0,13	0,14	0,07 ^{ns}	0,13	0,04 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,13
Geoestatística									
Modelo	Exp	Esf	Exp	Esf	Exp	Exp	Exp	Exp	Exp
Efeito Pepita	0,96	0,29	0,95	0,98	0,92	0,91	0,87	0,41	1,00
Patamar	120,00	38,06	124,00	129,00	129,48	127,00	123,00	60,82	160,00
Alcance (m)	20,58	12,05	13,61	17,27	12,18	16,6	9,00	8,6	9,48
R ²	0,86	0,12	0,79	0,74	0,60	0,67	0,18	0,16	0,19

onde: $N(h)$ corresponde ao número de pares de valores medidos X_i , $Z(X_i + h)$, separados por um vetor h . O gráfico de $y^*(h)$ versus os valores correspondes de h e, portanto, dependendo de ambos, da magnitude e da direção h .

A modelagem dos semivariograma foram realizados com uso do software RStudio, os dados foram agrupados em Excel no qual foram diretamente copiados para o bloco de notas e salvo no formato de texto (.txt). Os comandos utilizados para leitura e análise dos dados, modelagem e ajustes dos semivariograma no software RStudio foram o geoR, Hmisc, calibrate, fields e o fBasics.

Após o ajuste de um modelo matemático realizado visualmente, aos valores calculados de $y^*(h)$, foram obtidos os coeficientes, efeito pepita “Co”, o patamar “Co + C1”, e o alcance de dependência espacial, “a” para os modelos teóricos de semivariogramas selecionados. Levou-se em consideração os valores do coeficiente de determinação (R^2) para a escolha do melhor modelo ajustado.

O Gau de Dependência Espacial (GDE) foi avaliado conforme metodologia proposta por Robertson (1998), sendo considerada fraca se essa razão for $\leq 25\%$, moderada quando a razão estiver entre 25 e 75%, e forte se a razão for $> 75\%$ (Robertson, 1998).

Resultados

Os resultados da estatística descritiva e geoestatística da textura do solo, RP e θ para as análises dos dados de Terra Preta Arqueológica, sob cultivo de café Conilon, nas quais encontram as variáveis nas profundidades de 0-5; 5-10 e 10-20 cm, estão apresentados nas Tabelas 1 e 2.

GDE (%) 80,00 76,20 76,61 75,97 71,05 71,65 70,73 67,41 62,50

*p1 = Profundidade de 0-5 cm; p2 = Profundidade de 5-10 cm; p3 = Profundidade de 10-20 cm. d = teste de normalidade, ^{ns} = não-significativo a 5 % de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov, GDE = Grau de Dependência Espacial.

Tabela 2. Estatística descritiva das variáveis RP e θ nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

Estatística descritiva						
Parâmetros	RP _{p1} (kPa)	θ_{p1} (cm ³ .cm ⁻³)	RP _{p2} (kPa)	θ_{p2} (cm ³ .cm ⁻³)	RP _{p3} (kPa)	θ_{p3} (cm ³ .cm ⁻³)
Média	4,41	5,47	1,17	4,14	1,28	3,96
Mediana	4,09	4,96	1,12	3,99	1,27	3,84
Máximo	5,50	14,70	3,05	7,60	2,20	6,70
Mínimo	3,14	2,70	0,39	2,14	0,48	2,04
Variância	0,17	1,28	0,18	1,36	0,19	1,31
Desvio Padrão	0,41	2,06	0,43	1,16	0,43	1,14
Assimetria	0,55	1,94	1,24	2,99	0,21	1,04
Curtose	0,98	1,82	1,98	0,42	-0,81	-0,58
d	0,17	0,15	0,14	0,09 ^{ns}	0,15	0,14
Geoestatística						
Modelo	Exp	Esf	Exp	Esf	Lin	Esf
Efeito Pepita	0,81	0,75	0,74	0,58	0,59	0,67
Patamar	1,08	1,23	1,25	0,98	1,06	1,21
Alcance (m)	63,34	26,00	54,30	12,56	25,64	25,27
R ²	0,85	0,42	0,79	0,44	0,77	0,43
GDE (%)	75,00	60,98	59,20	59,18	55,66	55,37

*RP = Resistência a Penetração do solo; θ = Umidade Volumétrica do Solo; p1 = Profundidade de 0-5 cm; p2 = Profundidade de 5-10 cm; p3 = Profundidade de 10-20 cm. d = teste de normalidade, ^{ns} = não-significativo a 5% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov, GDE=Grau de Dependência Espacial.

Observa-se que as medidas de tendência central média e mediana apresentam valores próximos em todos os atributos avaliados, evidenciando que elas se aproximam de uma distribuição normal e indicando que os dados seguem uma distribuição simétrica, da mesma forma os valores de assimetria e curtose. Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov para 0,5% de significância indicaram normalidade para todas as variáveis estudadas.

Os coeficientes de curtose são utilizados para avaliar se os dados seguem uma distribuição normal (Ortiz, 2003). Segundo Laércio et al. (2011), valores aceitáveis devem estar entre +2 e -2, enquadrando os obtidos nesse estudo, exceto para os valores observados para argila nas profundidades de 0-5; 5-10 cm e silte na profundidade de 10-20 cm.

Os resultados de testes de normalidade para a textura demonstram que nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm a argila não apresentam distribuição normal, bem como silte, na profundidade de 10-20 cm. Já a RP apresentou distribuição normal em todas as profundidades, apenas na profundidade de 10-20 cm para θ não apresentou normalidade.

Vale ressaltar que a condição de normalidade não é uma exigência para análise geoestatística, é conveniente apenas que a média e

a variabilidade dos dados sejam constantes em toda a área de estudo, ou seja, que ocorra a estacionaridade necessária para o uso da geoestatística (Vieira, 2000).

Os valores médios de RP nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm foram de 4,41, 1,17; e 1,28 MPa respectivamente (Tabela 2). A exceção foi para a profundidade de 0-5 cm, que apresentou valor de 4,41 MPa, os demais valores foram inferiores a 2,0 MPa.

Segundo Vieira (2000), o valor do alcance indica a distância limite entre os pontos correlacionados entre si. Pontos coletados com distâncias maiores que os alcances são independentes e, para sua análise, pode-se utilizar a estatística clássica. A distância máxima na qual os atributos estão espacialmente correlacionados mostra a dimensão com que esses parâmetros podem ser estimados entre os pontos amostrais estudados.

Os semivariogramas dos atributos do solo (Figura 2) apresentam dependência espacial e ajuste aos modelos exponencial e esférico, apenas um caso o modelo linear foi o que mais se ajustou (RP na profundidade de 10-20 cm). Isto corrobora resultados observados na literatura, em que os modelos exponenciais e esféricos são os modelos que melhor se ajustam aos atributos do solo

(Carvalho et al., 2002; Oliveira et al., 2013; Silva et al., 2016).

A construção dos mapas de krigagem possibilitaram avaliar a variabilidade espacial nas diferentes profundidades estudadas (Figura 3). Ressalta-se que, em função da extrapolação cartográfica, a forma geométrica da área foi alterada, pois foi considerada na estrutura do semivariograma e no alcance espacial obtido.

Os resultados da análise geoestatística da RP e de θ (Tabela 2) mostram que todos os atributos avaliados apresentam GDE moderada a forte nas três profundidades, os quais são expressos por meio dos modelos de semivariograma ajustados (Figura 2).

Os maiores valores de alcance, em sua maioria, foram próximos, variando entre 7,60 e 63 m; o menor alcance foi encontrado para θ , na profundidade de 5-10 cm, e o maior alcance foi para a RP, na profundidade de 0-5 cm. Os resultados podem ser observados na Tabela 2, a qual apresenta os dados da geoestatística para as variáveis estudadas.

A elaboração dos mapas de RP e θ possibilitaram identificar que existe uma correlação inversamente proporcional entre as variáveis RP e UVS; através do mapa é possível observar que à medida que a RP diminui (de 0-5 a 10-20 cm) a θ aumenta, e isso ocorre em todas os pontos estudados.

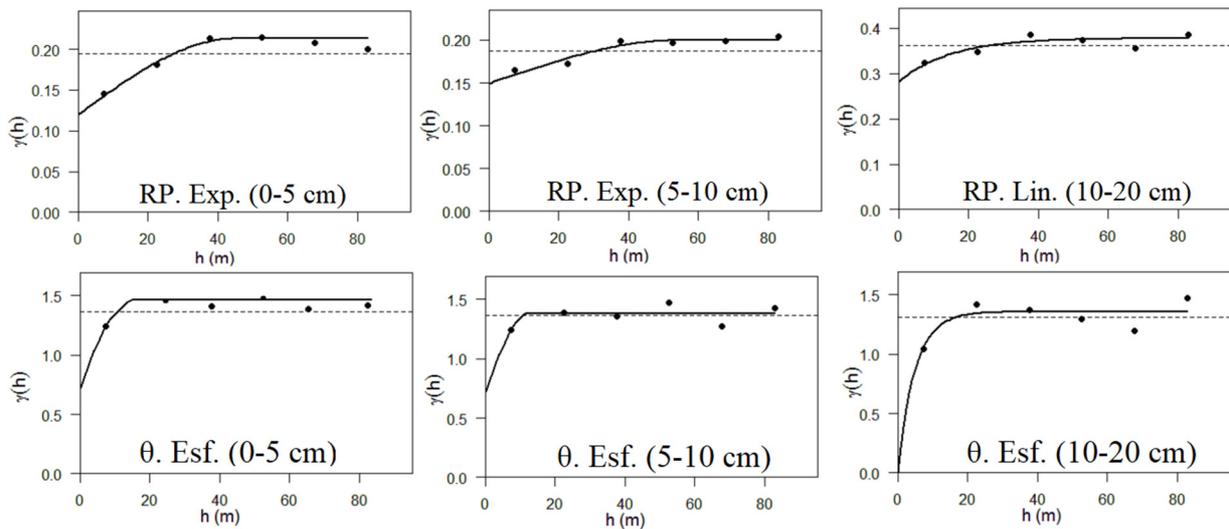


Figura 2. Semivariogramas da variável RP e θ nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

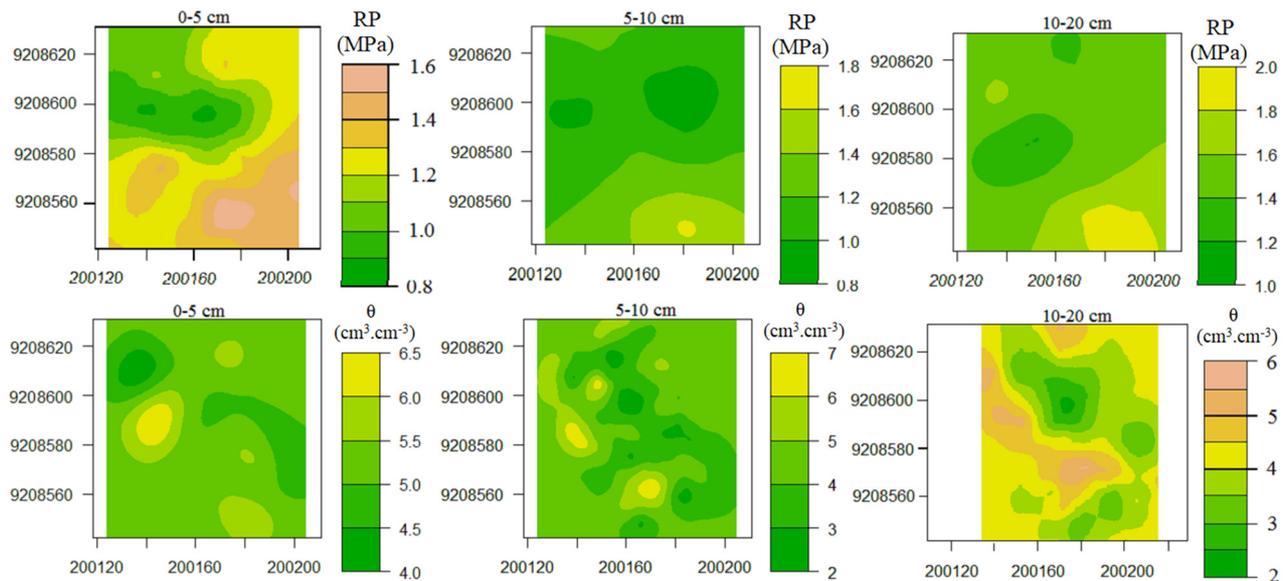


Figura 3. Mapas de krigagem da RP e θ nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm.

Discussão

Considerando a RP, observa-se que o ajuste ao modelo exponencial nas duas primeiras profundidades (0-5 e 5-10 cm) foi mais eficiente e,

na profundidade de 10-20 cm, o modelo linear foi o que mais se ajustou. Relativo à θ , observou-se que, em todas as profundidades, o modelo que mais

se ajustou foi o esférico, corroborando o estudo realizado por Silva et al. (2016).

Observou-se que, na profundidade de 0-5 cm, os valores médios de RP foram superiores a 2 MPa. Esses valores têm sido indicados como os limites críticos de resistência do solo à penetração para a maioria dos vegetais superior (Tormena & Roloff, 1996; Merotto & Mundstock, 1999), esses valores de RP observados evidenciam os efeitos do preparo convencional do solo em áreas sob cultivo de café, conforme descrito por Effgen et al. (2012) e Palma et al. (2013). No entanto, faz-se necessário relacionar a resistência mecânica do solo à penetração das raízes com a aeração e com o potencial matricial de água do solo, a fim de melhor compreender as restrições causadas pela compactação (Silva et al., 2003; Silveira et al., 2010).

Nota-se que ocorreu uma redução do alcance para a RP, à medida que se aprofundou no perfil do solo, enquanto para θ esse comportamento foi inverso, o que implica dizer que quanto maior a profundidade, menos homogênea será a RP enquanto para θ essa homogeneidade será maior. Esse comportamento pode estar associado à presença de horizontes antropogênicos, em profundidades de até 50 cm (Campos et al., 2011).

Segundo Tormena et al. (2002) e Assis et al. (2009), a RP diminui em função do aumento da θ . Em solos húmidos, onde o espaço dos poros é preenchido com água, as forças mecânicas (nesse caso corresponde à tensão efetiva do solo) fazem com que as partículas do solo percam contato entre si, diminuindo o RP, devido à menor coesão entre partículas e agregados (Cunha et al., 2018).

Nesse caso, a umidade altera a coesão entre as partículas do solo, ou seja, nas profundidades em que o solo apresenta menor conteúdo de água, como observado na profundidade de 10 a 20 cm, as partículas do solo apresentam-se mais próximas e difíceis de serem separadas, aumentando o RP.

Conclusão

Os atributos textura, RP e θ apresentam dependência espacial de moderada a forte, com modelo esférico e exponencial apresentando os melhores ajustes, e alcance a partir de 8,60 metros mostrando estar dentro do estabelecido pela mala amostral.

O teor de água no solo afeta a variabilidade espacial da resistência do solo à penetração, uma vez que a RP diminui à medida que a θ aumenta, nas profundidades com menor teor de água no solo, com uma menor dependência espacial.

Referências

ARAUJO, G.; FERRAZ, S.; SILVA, F. M.; COSTA, P. A. N.; SILVA, A. C.; CARVALHO, F. M. 2012. Agricultura de Precisão no Estudo de Atributos Químicos do Solo e da Produtividade de Lavoura Cafeeira. *Coffee Science*, v. 7, n. 1, p. 59-67.

ASSIS, R. L.; LAZARINI, G. D.; LANÇAS, K. P.; FILHO, A. C. 2009. Avaliação da resistência do solo à penetração em diferentes solos com a variação do teor de água. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 29, n. 4, p. 558-568.

BERGAMIN, A. C.; VITORINO, A. C. T.; FRANCHINI, J. C.; SOUZA, C. M. A.; SOUZA, F. R. 2010. Compactação em um Latossolo Vermelho distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 34, n. 3, p. 681-91.

BRAVO, C.; ANDREU, E. 2011. Propiedades físicas y producción de maíz (*Zea mays* L.) en un Alfisol del estado Guárico, Venezuela, bajo dos sistemas de labranza. *Venesuelos*, v. 3, n. 2, p. 62-68.

CAMPOS, M. C. C.; RIBEIRO, M. R.; SOUZA JÚNIOR, V. S.; RIBEIRO FILHO, M. R.; SOUZA, R. V. C. C.; ALMEIDA, M. C. 2011. Caracterização e classificação de Terras Pretas Arqueológicas na região do Médio Rio Madeira. *Bragantia*, v. 70, n. 3, p. 18-27.

CAMPOS, M. C. C.; SANTOS, L. A. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOARES, M. D. R. 2012. Caracterização física e química de terras pretas arqueológicas e de solos não antropogênicos na região de Manicoré, Amazonas. *Revista Agro@mbiente*, v. 2, p. 102-109.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. 2002. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. *Pesquisa Agropecuária brasileira*, v. 37, n. 8, p. 1151-1159.

CASSEL, D. K.; WENDROTH, O.; NIELSEN, D. R. 2000. Assessing spatial variability in an agricultural experiment station field: opportunities arising from spatial dependence. *Agronomy Journal*, v. 92, p. 706-714.

COELHO, D. S.; CORTEZ, J. W.; OLSZEWSKI, N. 2012. Mecânica à penetração em Vertissolo cultivado com manga no perímetro irrigado de Mandacaru, Juazeiro, Bahia, Brasil. *Revista*

Brasileira de Ciência do Solo, v. 36, n. 3, p. 755-763.

CUNHA, J. M.; CAMPOS, M. C. C.; GAIO, D. C.; SOUZA, Z. M.; SOARES, M. R.; SILVA, D. M. P.; SIMÕES, E. L. 2018. Spatial variability of soil respiration in Archaeological Dark Earth areas in the Amazon. *Catena*, v. 162, p. 148-156.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; NOGUEIRA, D. C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F. L.; ASSIS, J. T.; OLIVEIRA, M. S. 2011. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 41, n. 1, p. 8-19.

DALL'AGNOL, R. W.; BETZEK, N. M.; BAZZI, C. L. 2018. Aplicação do software R para análise geoestatística, interpolação de dados por krigagem ordinária e geração de mapas temáticos de produtividade agrícola. *Revista Computação Aplicada ao Agronegócio*, v. 1, n. 1, p. 24-37.

DUARTE, M. L.; SILVA FILHO, E. P. 2019. Estimativa da erosividade da chuva na bacia hidrográfica do rio Juma com base em dados do satélite TRMM. *Caderno de Geografia*, v. 29, n. 56, p. 45-60.

EFFGEN, T. A. M.; PASSOS, R. R.; ANDRADE, F. V.; LIMA, J. S.; REIS, E. F.; BORGES, E. N. 2012. Propriedades físicas do solo em função de manejos em lavouras de cafeeiro conilon. *Revista Ceres*, v. 59, n. 3, p. 414-421.

EMBRAPA-Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2011. Manual de métodos de análise de solos. 2. ed. Rio de Janeiro, 230p.

FERRAZ, G. A. E. S.; SILVA, F. M.; CARVALHO, L. C. C.; ALVES, M. C.; FRANCO, B. C. 2012. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 32, n. 1, p. 140-150.

JÚNIOR, V. V.; CARVALHO, M. P.; DAFONTE, J.; FREDDI, O. S.; VIDAL, E. V.; INGARAMO, O. E. 2006. Spatial variability of soil water content and mechanical resistance of Brazilian Ferralsol. *Soil and Tillage Research*, v. 85, n. 1-2, p. 166-177.

LAÉRCIO, A. de C.; MEURER, I.; JUNIOR, C. A. da S.; CAVALIERI, K. M. V.; SANTOS, C. F. B. 2011. Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar

sob colheita mecanizada. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 9, p. 940-949.

LIMA, J. S. S.; OLIVEIRA, P. C.; OLIVEIRA, R. B.; XAVIER, A. C. 2008. Métodos geoestatísticos no estudo da resistência do solo à penetração em trilha de tráfego de tratores na colheita de madeira. *Revista Árvore*, v. 32, n. 5, p. 931-938.

MARASCA, I.; GLADENUCCI, J.; SPADIM, E. R.; BARBOSA, R. D.; LANÇAS, K. P. 2017. Geoestatística aplicada na determinação da compactação do solo no cultivo da cana-de-açúcar. *Revista de Agricultura Neotropical*, v. 4, n. 2, p. 49-55.

MARQUES, J. D. S.; SIQUEIRA, L. A.; CAMARGO, D. D. B.; TEIXEIRA, V.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. 2014. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. *Geoderma*, v. 219-220, p. 63-71.

MEROTTO, A.; MUNDSTOCK, C. M. 1999. Wheat root growth as affected soil strength. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 23, p. 197-202.

MIRANDA, A. C. C.; VERÍSSIMO, A. M.; CEOLIN, A. C. 2017. Agricultura de precisão: um mapeamento da base da SciELO. *Revista Eletrônica de Gestão Organizacional*, v. 15, p. 129-137.

OLIVEIRA, I. R.; TEIXEIRA, D. B.; PANOSSO, A. R.; CAMARGO, L. A.; JÚNIOR, M. J.; PEREIRA, G. T. 2013. Modelagem geoestatística das incertezas da distribuição espacial do fósforo disponível no solo, em área de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 37, n. 6, p. 1481-1491.

ORTIZ, J. L. 2003. Emprego do geoprocessamento no estudo da relação entre potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo. Piracicaba: ESALQ, Dissertação Mestrado. 205p.

OVALLES, F.; REY, J. 1994. Variabilidad interna de unidades de fertilidad en suelos de la depresión del Lago de Valencia. *Agronomía Tropical*, v. 44, p. 41- 65.

PALMA, M. A. Z.; VOLPATO, C. E. S.; SILVA, F. C.; SOUZA, P.; SILVA, J. A. 2013. Resistência do solo à penetração em cafezais cultivados com

sistema mecanizado e manual. *Coffee Science*, v. 8, n. 3, p. 364-370.

ROBERTSON, G. P. 1998. *GS+: Geostatistics for the environmental sciences - GS+ User Guide*. Plainwell: Gamma Design Software. 152p.

SANTOS, L. A. C.; CAMPOS, M. C. C.; BERGAMIN, A. C.; SILVA, D. M. P.; JÚNIOR, A. F. M. 2011. Caracterização física de seis sítios de terras pretas arqueológicas na região de Apuí-AM. *Revista Verde*, v. 6, n. 4, p. 167-174.

SILVA, D. M. P.; CAMPOS, M. C. C.; ALO, L. C.; CUNA, J. M.; PAULA NETO, P. 2016. Variação espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em área de terra preta arqueológica sob cultivo de cacau. *Revista Brasileira de Agroecologia*, v. 11, n. 3, p. 179-187.

SILVA, E. A. A.; URIBE-OPAZO, M. A.; ROCHA, J. V.; SOUZA, E. G. 2003. Um estimador robusto e o semivariograma cruzado na análise de variabilidade espacial de atributos do solo e planta. *Acta Scientiarum*, v. 25, n. 2, p. 365-371.

SILVA, J. M.; LIMA, J. S. S.; PIRES, F. R.; ASSIS, R. L. 2008. Variabilidade espacial dos atributos físicos em um Latossolo sob plantio direto e preparo convencional no cultivo da soja no cerrado. *Revista de Ciências Agrárias*, v. 50, p. 167-180.

SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. 2010. Relação umidade versus resistência do solo à penetração para um Argissolo Amarelo distrocóeso no Recôncavo da Bahia. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, v. 34, n. 3, p. 659-667.

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; CUNHA, J. M.; MANTOVANELLI, B. C.; OLIVEIRA, I. A.; FILHO, E. G. B.; LEITE, A. F. L. 2018. Variabilidade espacial da estabilidade dos

agregados e matéria orgânica do solo em terra preta arqueológica sob pastagem. *Gaia Scientia*, v. 12, n. 2, p. 125-133.

SOUZA, Z. M.; BARBIERI, D. M.; JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T.; CAMPOS, C. C. 2007. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo na aplicação de insumos para cultura de cana-de-açúcar. *Ciência e Agroecologia*, v. 31, n. 2, p. 371-377.

SOUZA, Z. M.; CAMPOS, M. C. C.; CAVALCANTE, I. H. L.; JÚNIOR, J. M.; CESARIN, L. G.; SOUZA, S. R. 2006. 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, n. 1, p. 128-134.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T. 2004. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 28, p. 937-944.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. C. A. 2002. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia Agricola*, v. 59, n. 4, p. 795-801.

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. 1996. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 20, p. 333-339.

VIEIRA, S. R. 2000. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, G. R. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v. 1, p. 1-54.