



Revista Brasileira de Ciência do Solo

ISSN: 0100-0683

revista@sbc.org.br

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Brasil

de Oliveira, Ivanildo Amorim; Marques Junior, José; Costa Campos, Milton César; de Aquino, Renato Eleotério; de Freitas, Ludmila; Silva Siqueira, Diego; da Cunha, José Maurício

Variabilidade Espacial e Densidade Amostral da Suscetibilidade Magnética e dos Atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM

Revista Brasileira de Ciência do Solo, vol. 39, núm. 3, mayo-junio, 2015, pp. 668-681

Sociedade Brasileira de Ciência do Solo
Viçosa, Brasil

Disponível em: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=180240404004>

- ▶ Como citar este artigo
- ▶ Número completo
- ▶ Mais artigos
- ▶ Home da revista no Redalyc

Comissão 1.3 - Pedometria

VARIABILIDADE ESPACIAL E DENSIDADE AMOSTRAL DA SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA E DOS ATRIBUTOS DE ARGISSOLOS DA REGIÃO DE MANICORÉ, AM

Ivanildo Amorim de Oliveira⁽¹⁾, José Marques Junior⁽²⁾, Milton César Costa Campos^{(3)*}, Renato Eleotério de Aquino⁽¹⁾, Ludmila de Freitas⁽¹⁾, Diego Silva Siqueira⁽¹⁾ e José Maurício da Cunha⁽³⁾

⁽¹⁾ Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Programa de Pós-graduação em Agronomia - Ciências do Solo, Jaboticabal, São Paulo, Brasil.

⁽²⁾ Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Departamento de Solos e Adubos, Jaboticabal, São Paulo, Brasil.

⁽³⁾ Universidade Federal do Amazonas, Instituto de Educação, Agricultura e Ambiente, Humaitá, Amazonas, Brasil.

* Autor correspondente.

E-mail: mcesar@ufam.edu.br

RESUMO

A dificuldade em encontrar informações recentes sobre o comportamento espacial dos atributos dos solos na Região Amazônica tem sido preocupação de muitos pesquisadores. Em razão da grande dificuldade e dos custos para avaliar os atributos dos solos, têm-se utilizados métodos alternativos para predição de atributos do solo como a suscetibilidade magnética. Sendo assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial da suscetibilidade magnética (SM), os atributos físicos e químicos e determinar a densidade amostral de coleta em Argissolo Vermelho sob floresta nativa, Terra Preta Arqueológica (TPA) sob cultivo, e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. Nessas áreas, foram estabelecidas malhas com dimensão de 70 × 70 m e demarcados pontos nessas malhas, espaçados a cada 10 m, totalizando 64 pontos. Esses pontos foram georreferenciados e, em seguida, realizaram-se as coletas de solo em cada ponto da malha nas camadas de 0,00-0,20 e 0,40-0,60 m para determinar atributos químicos (pH em água, matéria orgânica, P, K, Ca, Mg e acidez potencial), físicos (textura, macroporosidade, microporosidade, diâmetro médio ponderado, densidade do solo e densidade de partículas) e suscetibilidade magnética. Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias, comparadas pelo teste de Tukey a 5 %. Realizou-se a estatística descritiva. Para caracterizar a variabilidade, fez-se a geoestatística com uso de semivariograma escalonado. O alcance dos semivariogramas escalonados foi utilizado para determinar a densidade amostral mínima de coleta para estimar a variabilidade dos atributos estudados. As áreas de TPA e pastagem

Recebido para publicação em 12 de agosto de 2014 e aprovado em 4 de fevereiro de 2015.

DOI: 10.1590/01000683rbcs20140496

apresentaram maior variabilidade, apresentando menor alcance e maior densidade amostral (cinco pontos por hectare). A SM apresentou comportamento espacial similar aos atributos físicos e químicos estudados, sendo a densidade amostral da SM próxima à densidade amostral dos atributos nos ambientes estudados.

Palavras-chave: geoestatística, Terra Preta Arqueológica, semivariograma escalonado.

ABSTRACT: SPATIAL VARIABILITY AND SAMPLING DENSITY OF MAGNETIC SUSCEPTIBILITY AND SOIL PROPERTIES IN ULTISOLS OF THE MANICORÉ REGION, AM, BRAZIL

The difficulty in finding recent information on the spatial behavior of properties of soils in the Brazilian Amazon region has been a concern of many researchers. Due to the great difficulty and costs in assessing soil properties, alternative methods have been used for prediction, such as magnetic susceptibility. Thus, the objective of this study was to evaluate the spatial variability of magnetic susceptibility and of physical and chemical soil properties in an Argissolo Vermelho (Ultisol) from native forest, Archaeological Black Earth under cultivation, and pasture in the region of Manicore, Amazonas. Grids of 70 × 70 m were established in these areas, demarcating points at a regular 10 × 10 m spacing, for a total of 64 points. These points were georeferenced, and then soil samples were taken at each point of the grid in the 0.00-0.20 and 0.40-0.60 m layers for determination of chemical properties (pH in water, organic matter, P, K, Ca, Mg, and potential acidity), physical properties (texture, macroporosity, microporosity, weighted mean diameter, bulk density, and particle density), and magnetic susceptibility. The data were subjected to analysis of variance, and mean values were compared by the Tukey test at 5 %. Descriptive statistics were carried out, as well as geostatistics with the use of scaled semivariograms, for characterization of variability. The range of the scaled semivariograms was used to determine the minimum sampling density to estimate the variability of the properties under study. The area of Archaeological Black Earth and pasture exhibited greater variability, with a lower range and higher sampling density (five points per hectare). Magnetic susceptibility exhibited spatial behavior similar to the physical and chemical properties studied, with the magnetic susceptibility sampling density near the sampling density of the soil properties in the environments under study.

Keywords: geostatistics, Archaeological Black Earth, scaled semivariogram.

INTRODUÇÃO

As informações sobre a distribuição e o comportamento dos solos na região sul do Amazonas são com base, principalmente, em levantamentos generalizados, já que poucos são os trabalhos detalhado ou semidetalhado. No entanto, a região destaca-se por apresentar grande diversidade de solos, como Argissolos, Latossolos, Cambissolos, Gleissolos, Espodossolos e Neossolos (Campos, 2009), estando em condições naturais ou sob manejo agropecuário.

Vários trabalhos foram realizados visando caracterizar os atributos dos solos da região amazônica; dentre esses, podem-se destacar Cunha et al. (2009) e Campos et al. (2011), os quais estudaram Terras Pretas Arqueológicas; Campos et al. (2012), os quais pesquisaram solos ocupados por florestas; e Perin et al. (2009), os quais trabalharam com solos sob manejo de pastagem. Entretanto, há ausência de trabalhos que visam estudar a distribuição dos atributos do solo em ambientes naturais e cultivados na Amazônia

ocidental. Nesse contexto, o conhecimento da distribuição espacial dos atributos do solo em áreas naturais e antropizadas é de extrema importância, pois os processos de formação que imprimiram, no longo do tempo, somados ao manejo realizado pelo homem, acentuam a variação dos atributos do solo (Cavalcante et al., 2007) e seu entendimento é fundamental para o refinamento das práticas de manejo e avaliação dos efeitos sobre o ambiente (Cambardella et al., 1994).

Uma das grandes dificuldades encontradas nos estudos de variabilidade espacial dos atributos do solo na região deve-se possivelmente a dois fatores: grande extensão territorial da região amazônica e carência de pesquisadores; e grande quantidade de amostras de solo nos estudos da variabilidade espacial, tornando o estudo de alto custo, além da falta de conhecimento e consenso sobre o espaçamento ideal de amostragem. Alguns trabalhos que utilizam as técnicas geostatísticas têm sido realizados para determinar a variabilidade espacial de atributos do solo (Siqueira et al., 2010), por meio do semivariograma escalonado (Aquino et al., 2014) conjuntamente

com o uso do software *Sanos for Windows* 0.1 para subsidiar o planejamento amostral para caracterizar a variabilidade (Montanari et al., 2012).

Para reduzir os custos na determinação de atributos do solo, alguns pesquisadores utilizaram a suscetibilidade magnética (SM), que pode ser utilizada como método alternativo para estimar atributos do solo (Grimley e Vepraskas, 2000). A SM é uma propriedade do solo que reflete parte da sua composição mineralógica (Souza Júnior et al., 2010) e é resultado da rotação e translação dos elétrons que constituem alguns minerais que estão presentes nas rochas, nos sedimentos e nos solos. Siqueira (2010) encontrou relação entre a SM e os atributos do solo, demonstrando que a SM pode ser utilizada para auxiliar na estimativa do teor de argila e matéria orgânica, na saturação por bases (V) e no teor de hematita de solos. Porém, nenhum estudo dessa natureza foi realizado na região sul do Estado do Amazonas, sendo de fundamental importância no mapeamento da variabilidade espacial dos solos; e o uso de técnicas alternativas para estimar atributos do solo pode auxiliar na exploração do potencial da produção da cultura e do solo.

Diante disso, os objetivos deste trabalho foram avaliar a variabilidade espacial da suscetibilidade magnética e dos atributos físicos e químicos do solo em Argissolo Vermelho sob floresta, Terra Preta Arqueológica sob cultivo, e pastagem na região de Manicoré, Amazonas.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado ao sul do Estado do Amazonas, nas imediações da comunidade Santo Antônio de Matupi, do Município de Manicoré, AM, sendo mapeadas três áreas com diferentes ambientes: solo com presença de horizonte antrópico ou Terra Preta Arqueológica (TPA) ($07^{\circ} 55' 02,1''$ S e $61^{\circ} 31' 45,2''$ W, numa altitude média de 102 m), solo em ambiente natural ou floresta que consta de um fragmento de Floresta Tropical Densa, formada por árvores de 20 a 50 m de altura ($7^{\circ} 54' 44,5''$ S e $61^{\circ} 31' 44,7''$ W, numa altitude média de 140 m) e solo em uso pecuário com pastagem de braquiária (*Brachiaria brizantha*) com aproximadamente 10 anos de uso com pastejo extensivo e densidade de pastejo de uma unidade animal (UA) por hectare ($07^{\circ} 54' 42''$ S e $61^{\circ} 31' 50''$ W, com altitude média de 135 m).

A região apresenta relevo com presença de platôs nas partes mais elevadas, e planície nas partes mais baixas (CPRM, 2001), e o material de origem é proveniente da alteração de granitos Rondonianos, do Pré-Cambriano Superior (Brasil, 1978). Os solos foram classificados como Argissolo Vermelho alítico plintico, exceto o solo de TPA, que

foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico ab्रúptico (Embrapa, 2013); a vegetação primária da região é a Floresta Tropical Densa. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical chuvoso (Am) com temperaturas variando entre 25 e 27 °C com precipitação pluvial média anual de 2.500 mm e umidade relativa do ar entre 85 e 90 %.

Em cada área, foi estabelecida uma malha com dimensão 70×70 m e demarcados pontos nessas malhas, espaçados a cada 10 m, totalizando 64 pontos (Figura 1). Esses pontos foram georreferenciados com um equipamento de GPS Garmin Etrex (Datum South American '69). Foram realizadas, sob cada ponto amostral, a coleta de amostras de solos deformadas nas camadas de 0,00-0,20 e 0,40-0,60 m, correspondentes ao horizonte A e ao horizonte diagnóstico, e a de amostras indeformadas, na camada de 0,00-0,20 m.

Nas amostras deformadas coletadas nas profundidades 0,00-0,20 e 0,40-0,60 m, foi realizada a análise granulométrica pelo método da pipeta, conforme Embrapa (2011). As amostras de solo com estrutura preservada recolhidas em anel volumétrico com 0,045 m de altura e 0,0405 m de diâmetro na camada de 0,00-0,20 m, coletadas no centro da camada amostrada, foram utilizadas para as análises de macroporosidade (Macro), microporosidade (Micro), porosidade total (Pt), obtidas pela diferença entre a massa do solo saturado e a massa do solo seco em estufa a 105 °C, e densidade do solo (Ds) calculada pela relação entre a massa seca a 105 °C durante 24 h da amostra de solo do cilindro volumétrico e o volume do mesmo cilindro (Embrapa 2011), por meio de anel volumétrico. A microporosidade do solo foi determinada pelo método da mesa de tensão, segundo métodos da Embrapa (2011). Pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, obteve-se a macroporosidade. Em cada ponto amostral, recolheram-se amostras com estrutura preservada na camada de 0,00-0,20 m em forma de torrão para determinar a estabilidade dos agregados do solo segundo Kemper e Chepil (1965); os resultados foram expressos em diâmetro médio ponderado (DMP).

Foram determinados nas duas camadas coletadas os teores de Ca, Mg e K trocáveis, P disponível e a acidez potencial (H+Al), utilizando-se o método da resina trocadora de íons (Raij et al., 1987). O pH foi determinado potenciométricamente, utilizando-se relação 1:2,5 de solo em água (Embrapa, 2011). Determinou-se o carbono orgânico (CO) pelo método Walkley-Black modificado por Yeomans e Bremner (1988). A matéria orgânica, por sua vez, foi estimada com base no CO.

A medida da suscetibilidade magnética (SM) foi realizada em laboratório, em todas as amostras coletadas, utilizando o medidor MS2, da Bartington Instruments Ltda. A variabilidade espacial dos

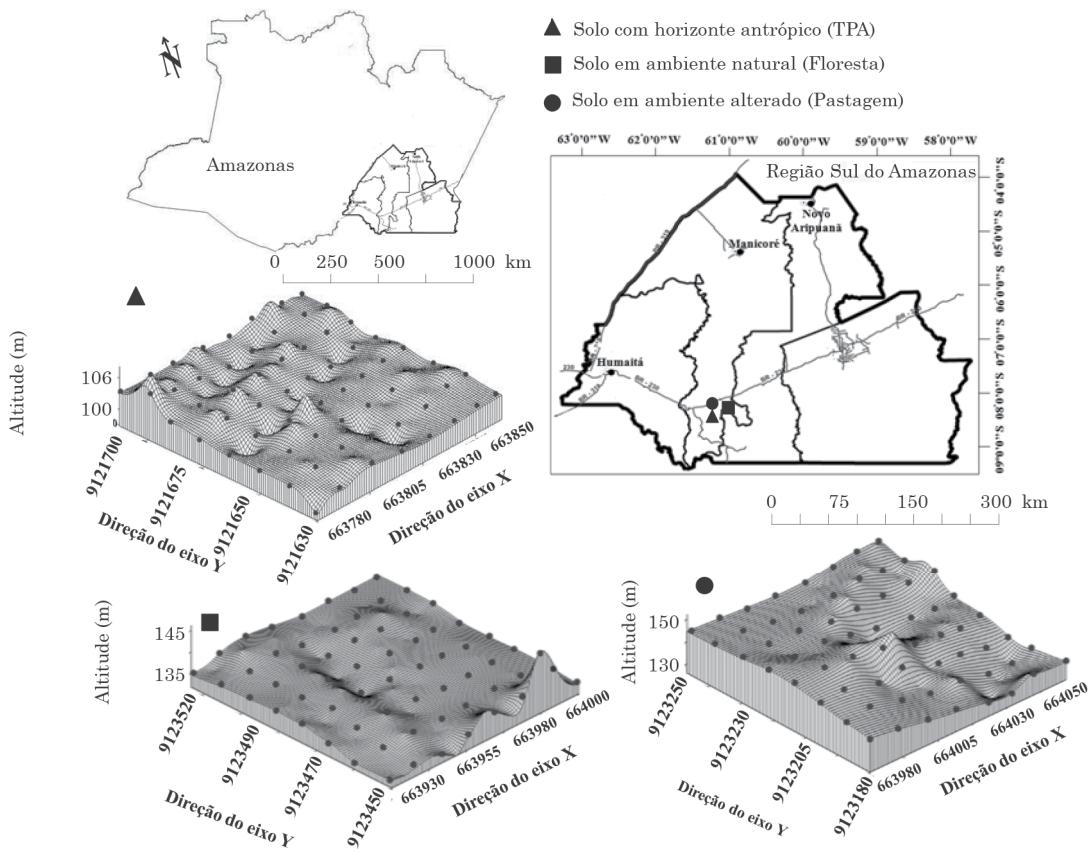


Figura 1. Mapa de localização e modelo de elevação digital das áreas estudadas em Manicoré, AM.

atributos do solo foi comparada com a SM a fim de verificar se há semelhança no comportamento espacial entre a SM e os atributos do solo em cada área estudada.

Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias, comparadas pelo teste Tukey a 5 %, realizadas no software Minitab (Minitab, 2000). Realizou-se a análise exploratória dos dados, calculando-se média, coeficiente de variação (CV), coeficiente de assimetria e teste de normalidade. O CV foi classificado com base no critério de Warrick e Nielsen (1980), que classifica o CV como baixo <12 %, médio de 12 a 24 % e alto >4 %. A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov.

Para determinar a existência da dependência espacial, foram modelados semivariogramas, utilizando análise geoestatística (Isaaks e Srivastava, 1989). Sob teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela equação 1:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad \text{Eq. 1}$$

sendo $\gamma(h)$: valor da semivariância para uma distância h ; $N(h)$: número de pares envolvidos no

cálculo da semivariância; $Z(x_i)$: valor do atributo Z na posição x_i ; e $Z(x_i + h)$: valor do atributo Z separado por uma distância h da posição x_i .

Com base nos parâmetros dos semivariogramas experimentais dos atributos do solo, foram utilizados os semivariogramas escalonados com o objetivo de reduzi-los à mesma escala, facilitando a comparação entre resultados de diferentes variáveis (Ceddia et al., 2009). Os semivariogramas experimentais foram escalonados por meio da divisão das semivariâncias pela variância estatística (Guimarães, 1993). A escolha do modelo de semivariograma escalonado que melhor se ajustou aos dados foi realizada com base no menor resíduo gerado com o ajuste do modelo, além do conhecimento prático do comportamento dos atributos nos ambientes.

Os semivariogramas experimentais escalonados foram ajustados aos modelos esférico (Equação 2) e exponencial (Equação 3), identificados nas figuras como: Esf. ou Exp. ($C_0, C_1 + C_0, [(C_0/(C_0 + C_1)) \times 100], R^2, a, SQRes$):

$$\begin{cases} \hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right], & \text{se } 0 < h < a \\ \hat{\gamma}(h) = C_0 + C_1, & \text{se } h \geq a \end{cases} \quad \text{Eq. 2}$$

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - \exp(-\frac{3h}{a}) \right], \quad h \geq 0 \quad \text{Eq. 3}$$

em que C_0 : efeito pepita; $C_0 + C_1$: patamar; $[(C_0/(C_0 + C_1)) \times 100]$: grau de dependência espacial; h : distância de separação entre duas observações; a : o alcance do semivariograma; R^2 : coeficiente de determinação; e SQRes: soma dos quadrados dos resíduos.

Na análise do grau de dependência espacial das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), em que os valores de $[(C_0/(C_0 + C_1)) \times 100]$ menores que 25 % foram considerados dependência espacial forte; aqueles entre 25 e 75 % indicaram dependência espacial moderada; e os maiores que 75 %, dependência espacial fraca.

Pelo alcance dos semivariogramas de cada variável, foi determinado o número mínimo de amostras para que ainda seja possível promover a caracterização da variabilidade espacial de cada atributo estudado individualmente.

Posteriormente, os semivariogramas escalonados serviram como base de informação para calcular o número mínimo de amostragem do solo e para determinar a variabilidade de todos os atributos em ambas às profundidades nos três ambientes estudados (Equação 4):

$$N = \frac{A}{(a^2)/10000} \quad \text{Eq. 4}$$

em que N é o número mínimo de amostras necessárias para a determinação de uma malha de amostragem; A : área total, em ha; e a , o alcance do semivariograma, em m.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os atributos granulométricos apresentaram diferenças significativas entre os ambientes estudados. A área Terra Preta Arqueológica (TPA) evidenciou maiores teores de areia em comparação ao solo das áreas com floresta e pastagem (Quadro 1), e dominância de silte semelhante aos resultados encontrados por Campos et al. (2011) em TPA na região do médio Rio Madeira; já os maiores teores de argila foram encontrados nas áreas de pastagem e floresta com 361,6 e 327,9 g kg⁻¹, respectivamente, na profundidade de 0,00-0,20 m, e esse mesmo comportamento foi encontrado na profundidade de 0,40-0,60 m. A dominância de partículas maiores na área de TPA, de acordo com German (2003), pode ser explicada pela contribuição de pequenos fragmentos líticos e cerâmicos e, assim, apresentando elevados teores da fração areia.

Os maiores valores de macroporosidade (Macro) foram encontrados na área com TPA e floresta,

Quadro 1. Atributos físicos e químicos e suscetibilidade magnética de Argissolos em áreas sob diferentes usos na região de Manicoré, Amazonas

Atributo	TPA	Floresta	Pastagem	TPA	Floresta	Pastagem
	0,00-0,20 m		0,40-0,60 m			
Areia (g kg ⁻¹)	434	359 C	411 B	426 A	251 C	321 B
Silte (g kg ⁻¹)	444 A	313 B	228 C	298 B	356 A	203 C
Argila (g kg ⁻¹)	121 C	328 B	362 A	276 C	393 B	475 A
Ds (kg dm ⁻³)	0,89 C	1,30 B	1,34 A	-	-	-
Dp (kg dm ⁻³)	2,63 A	2,659 A	2,40 B	-	-	-
Macro (m ³ m ⁻³)	0,22 A	0,21 A	0,17 B	-	-	-
Micro (m ³ m ⁻³)	0,28 A	0,20 B	0,21 B	-	-	-
DMP (mm)	2,57 C	2,83 B	3,13 A	-	-	-
pH(H ₂ O)	6,27 A	3,97 B	4,30 B	5,90 A	4,11 C	4,29 B
H+Al (mmol _c kg ⁻¹)	28,30 C	74,92 A	61,13 B	30,56 C	59,55 A	51,52 B
MO (g dm ⁻³)	68,19 A	18,66 C	27,47 B	24,11 A	14,05 B	15,92 B
P (mg dm ⁻³)	309,39 A	6,09 B	4,61 B	252,38 A	6,50 B	2,63 B
K ⁺ (mmol _c kg ⁻¹)	1,72 A	1,66 A	1,71 A	0,74 B	1,39 A	0,69 B
Ca ²⁺ (mmol _c kg ⁻¹)	166,02 A	4,77 B	10,27 B	75,90 A	3,44 B	4,69 B
Mg ²⁺ (mmol _c kg ⁻¹)	29,45 A	2,52 C	4,64 B	14,02 A	1,98 B	2,34 B
SM	428,8 A	70,3 B	82,3 B	190,1 A	85,8 B	87,4 B

Médias seguidas da mesma letra maiúscula na linha da mesma profundidade não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 %. TPA: Terra Preta Arqueológica; Ds: densidade do solo, Dp: densidade de partículas; Macro: macroporosidade; Micro: microporosidade; DMP: Diâmetro Médio Ponderado; H + Al: acidez potencial; MO: matéria orgânica estimada com base no carbono orgânico a partir do método de Walkley-Black; Macronutrientes: extraídos com resina trocadora de íons. SM: suscetibilidade magnética obtida pelo medidor MS2, da Bartington Instruments Ltda.

sendo os valores de Macro mais baixos na área com pastagem (Quadro 1). O menor valor de Macro obtido na pastagem pode ser em razão do pisoteio causado por animais, ocasionando maior adensamento das partículas do solo, podendo se observar aumento no valor de densidade (Ds) e na microporosidade (Micro) do solo, assim como a diminuição na taxa de infiltração de água. Os valores de Ds observados na pastagem e na floresta são mais elevados em relação à área de TPA. Flores et al. (2007), avaliando as alterações promovidas pelo pisoteio animal sobre atributos físicos do solo, observaram maior Ds e menor porosidade do solo em áreas pastejadas em relação a áreas não pastejadas. Pignataro Netto et al. (2009) afirmaram que os atributos físicos que mais influenciaram na redução da qualidade do solo foram Ds, porosidade total e resistência mecânica do solo. Já os baixos valores de Ds na TPA, segundo Steinbeiss et al. (2009), este comportamento é resultante dos elevados teores de carbono orgânico e de intensa atividade biológica (fauna e raízes), que constroem canais, cavidades e galerias.

A estabilidade dos agregados representada pelo diâmetro médio ponderado (DMP) apresentou diferença significativa, sendo maior para a pastagem e menor na área de floresta e horizonte antrópico (TPA) na camada de 0,00-0,20 m. Portugal et al. (2010), trabalhando com estabilidade de agregados em solo com diferentes usos e comparado com mata, encontraram elevada Ds em superfície e elevada estabilidade de agregados. Na pastagem, a agregação provavelmente está relacionada com a maior ocorrência de ciclos de umedecimento e secagem, em razão da pouca cobertura do solo, ocasionando maior exposição aos raios solares (Portugal et al., 2010). Para a área de TPA, o menor valor de DMP está relacionado ao menor valor de Ds nos horizontes antrópicos, conforme resultados encontrados por Campos et al. (2011), o que, segundo Kern e Kämpf (1989), os menores valores de Ds estão associados ao alto teor de matéria orgânica (MO) encontrada nos solos de TPA; de acordo com os autores, favoreceu a redução da compactação decorrente do pisoteio dos povos indígenas que habitavam essas localidades.

O pH em água, matéria orgânica (MO), P, Ca²⁺, Mg²⁺ e SM nas duas camadas estudadas apresentaram maiores valores na área com TPA. Esse resultado é em razão da presença do horizonte antrópico na superfície do solo. Campos et al. (2011) encontraram valores semelhantes para Ca²⁺ e Mg²⁺, os quais afirmaram que as TPAs exibem elevados níveis de nutrientes, principalmente Ca²⁺ e P, provavelmente proveniente de restos de ossos humanos e de animais, além da formação de complexos matéria orgânica-Ca, de alta estabilidade (elevados teores de Ca), associados ao carvão pirogênico (Novotny et al., 2007). O P normalmente apresenta valores elevados em solos com presença de horizonte antrópico, de acordo com Falcão e Borges

(2006), os quais afirmaram que esses altos valores de P são uma característica peculiar das TPAs; essa característica tem sido observada por muitos autores e é atribuída à incorporação de ossos de animais (e, possivelmente, de seres humanos), de espinhas de peixes e de carapaças de quelônios (Lima et al., 2002).

Lima et al. (2002) encontraram valores semelhantes aos resultados encontrados neste trabalho em relação à fertilidade das TPAs e relataram que seria improvável para qualquer solo atingir valores altos de fertilidade sem influência antrópica, ao qual grande quantidade de resíduos orgânicos foram depositados durante o processo de formação desses solos. Quanto aos teores de MO mais elevados na área com TPA, Moreira (2007) afirmou que a capacidade das TPAs em manter alto teor de MO é por essas serem constituídas, em sua maior parte, por substâncias húmicas mais estáveis, de difícil degradação, além da contribuição de restos orgânicos. Com isso, a MO contribuiu diretamente com a alta fertilidade destes solos.

A acidez potencial (H+Al) foi menor para a área com TPA e maior para as áreas com floresta e pastagem, respectivamente. As áreas de pastagem e floresta são caracterizadas por apresentar maiores teores de argila e de H+Al (Quadro 1). Os valores de H+Al na área de floresta foram maiores entre os ambientes, provavelmente em consequência da maior lixiviação promovida pelo intenso regime hídrico associado às melhores condições de drenagem (Campos et al., 2012).

O K⁺ apresenta valores iguais para todos os ambientes. Os baixos valores de K⁺ também foram observados por Falcão e Borges (2006) em área de TPA, pois, segundo os autores, normalmente solos de terra preta apresentam baixos teores de K⁺. Esses estudos comprovaram essa deficiência de K⁺ com experimentos de campo em TPA e revelaram que culturas como banana e coco, altamente exigentes em K, não apresentaram boa produtividade quando os produtores não aplicam esse nutriente. A SM foi superior na área com TPA nas duas camadas em relação às demais áreas de estudo e esse comportamento pode ser explicado em razão da maior presença de MO. Segundo Mullins (1977), a presença de MO favorece o aumento da suscetibilidade, pois proporciona as condições necessárias para a redução de Fe.

A estatística descritiva evidenciou que os atributos apresentaram valores de assimetria próximos a zero, evidenciando simetria dos dados, com exceção para alguns atributos, como por exemplo o K⁺ (Quadro 2). O teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov indicou normalidade para alguns atributos nos ambientes estudados, embora Isaaks e Srivastava (1989) afirmassem que a normalidade dos dados não é uma exigência da geostatística, essa permite observar maior precisão das estimativas da krigagem por meio de seus valores médios.

Quadro 2. Estatística descritiva dos atributos físicos, químicos e suscetibilidade magnética em áreas de Argissolos sob diferentes usos na região Manicoré, Amazonas

Atributo	Terra Preta Arqueológica			Floresta			Pastagem		
	CV	Assimetria	d	CV	Assimetria	d	CV	Assimetria	d
	%			%			%		
0,00-0,20 m									
Areia	13,55	-1,13	0,12*	16,52	1,74	0,10 ^{ns}	9,32	0,10	0,05 ^{ns}
Silte	16,52	1,16	0,12*	18,98	-1,23	0,09 ^{ns}	16,63	-0,64	0,08 ^{ns}
Argila	35,01	0,61	0,09 ^{ns}	12,67	0,16	0,06 ^{ns}	10,40	0,10	0,08 ^{ns}
Ds	9,40	-0,43	0,08 ^{ns}	5,98	-0,62	0,08 ^{ns}	8,79	0,66	0,11*
Dp	3,00	0,38	0,07 ^{ns}	2,63	0,16	0,06 ^{ns}	5,51	0,28	0,05 ^{ns}
Macro	37,82	0,24	0,09 ^{ns}	15,05	-0,16	0,11*	35,45	-0,88	0,11*
Micro	11,26	0,85	0,08 ^{ns}	14,91	0,34	0,08 ^{ns}	12,99	0,17	0,06 ^{ns}
DMP	10,03	-0,37	0,07 ^{ns}	8,02	-0,62	0,11*	5,96	-2,82	0,15*
pH(H ₂ O)	4,70	0,58	0,09 ^{ns}	4,79	0,74	0,11*	6,09	1,38	0,11*
H+Al	23,46	-0,08	0,06 ^{ns}	29,42	-0,21	0,15*	22,23	-0,48	0,06 ^{ns}
MO	19,86	-0,26	0,06 ^{ns}	35,29	-0,28	0,13*	13,59	0,43	0,07 ^{ns}
P	27,93	0,53	0,07 ^{ns}	36,13	0,49	0,09 ^{ns}	25,23	1,82	0,07 ^{ns}
K ⁺	82,30	4,66	0,27*	67,25	2,97	0,14*	67,29	1,58	0,16*
Ca ²⁺	16,10	-0,51	0,06 ^{ns}	101,96	4,50	0,28*	64,06	1,69	0,16*
Mg ²⁺	22,04	0,27	0,05 ^{ns}	50,58	1,80	0,16*	38,85	0,78	0,08 ^{ns}
SM	21,87	0,13	0,06 ^{ns}	23,44	0,79	0,11*	44,61	2,39	0,17*
CV médio (%)	22,20			28,01			22,83		
0,40-0,60 m									
Areia	8,36	-0,02	0,07 ^{ns}	18,92	1,15	0,11*	14,79	1,25	0,12*
Silte	16,44	1,03	0,11*	13,85	0,01	0,09 ^{ns}	34,49	-3,70	0,17*
Argila	24,30	-1,14	0,15*	12,64	-0,53	0,16*	17,08	2,16	0,13*
pH(H ₂ O)	5,30	0,66	0,11*	3,18	-0,16	0,07 ^{ns}	4,59	1,14	0,13v
H+Al	19,57	0,03	0,05 ^{ns}	24,23	0,87	0,14*	19,99	1,15	0,10 ^{ns}
MO	22,19	0,67	0,14*	38,73	0,90	0,20*	25,84	1,46	0,13*
P	37,64	2,46	0,15*	27,41	1,06	0,14*	44,25	0,78	0,04 ^{ns}
K ⁺	141,74	7,02	0,31*	56,24	1,61	0,11*	79,20	2,54	0,20*
Ca ²⁺	22,55	0,67	0,08 ^{ns}	54,58	2,76	0,16*	68,41	2,43	0,23*
Mg ²⁺	29,68	1,62	0,12*	59,21	2,64	0,10 ^{ns}	52,79	1,44	0,09 ^{ns}
SM	31,20	2,52	0,18*	105,84	7,27	0,34*	76,88	4,30	0,32*
CV médio (%)	32,78			39,90			36,14		

CV: coeficiente de variação (%); d: teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov. Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partículas; Macro: macroporosidade; Micro: microporosidade; DMP: Diâmetro Médio Ponderado; H + Al: acidez potencial; MO: matéria orgânica estimada com base no carbono orgânico a partir do método Walkley-Black; Macronutrientes: extraídos com resina trocadora de íons. SM: suscetibilidade magnética obtida pelo medidor MS2 da Bartington Instruments Ltda.

Os atributos apresentaram coeficiente de variação (CV) oscilando entre baixo ≤12 %, médio de 12 a 24 % e alto ≥24 %. Entre os atributos estudados, o K apresentou alto CV, principalmente na área com TPA, 82,30 e 141,74 %, nas duas camadas, respectivamente, seguida da área com floresta e pastagem (Quadro 2). Isso pode ser indicativo de alta variabilidade, que pode influenciar nos métodos ou na quantidade de amostragem para determinar os atributos desses solos. A SM também apresentou alto valor de CV, seguindo a mesma tendência

dos atributos nas áreas estudadas. Isso reflete a grande sensibilidade da SM aos processos do solo que variam continuamente na paisagem, podendo ser expressa nas propriedades cristalográficas dos minerais presentes nos sedimentos e no solo. Essa propriedade do solo é influenciada por fatores como clima (Eyre e Shaw, 1994), material de origem (Fontes et al., 2000), relevo (Jong et al., 2000), regime hídrico (Maher, 1998), influência antrópica (Hanesch e Scholger, 2005) e tempo (White e Walden, 1997).

Na estatística descritiva, é possível verificar pequena variação nos atributos do solo da pastagem e TPA em relação ao da floresta nativa, tanto nos valores da média, assimetria e principalmente no CV, em que é possível verificar maiores variações em relação à floresta (Quadros 1 e 2). Contudo, a medida estatística CV permite comparar a variabilidade entre amostras de variáveis com unidades diferentes, porém não permite analisar a variabilidade espacial dos atributos do solo nem seu padrão espacial. Para isso, o ajuste dos semivariogramas pela análise geoestatística evidenciou que os ambientes apresentaram variabilidade no espaço dos atributos estudados (Quadro 3).

O modelo esférico predominou na área com TPA (0,00-0,20 m) e floresta (0,00-0,20 e 0,40-0,60 m); na área de pastagem o modelo exponencial prevaleceu ao ajuste dos semivariogramas para os atributos do solo. Avaliando o alcance dos semivariogramas individuais, é possível observar que os atributos apresentaram variabilidade espacial menor que o estabelecido na malha amostral (Quadro 3). A área com TPA apresentou valores de alcance menor em relação à área com floresta e pastagem, indicando maior variabilidade dos dados. Esses valores de alcance forneceram informações a respeito da heterogeneidade da distribuição espacial em relação às propriedades estudadas em cada sistema de manejo.

Quadro 3. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas dos atributos físicos, químicos e suscetibilidade magnética de Argissolos sob diferentes usos na região de Manicoré, Amazonas

Atributo	Terra Preta Arqueológica					Floresta					Pastagem				
	Modelo	EP	C ₀ + C ₁	a	R ²	Modelo	EP	C ₀ + C ₁	a	R ²	Modelo	EP	C ₀ + C ₁	a	R ²
0,0-0,20 m															
Areia	Exp.	189,00	3.073,00	31,20	0,89	Exp.	0,00	0,02	18,90	0,59	Exp.	605,81	1.262,49	40,20	0,83
Silte	Esf.	1.117,00	2.235,00	30,60	0,83	Exp.	0,03	0,10	44,56	0,92	Esf.	574,19	1.504,00	12,90	0,60
Argila	Exp.	3,00	1.612,00	19,80	0,95	Esf.	0,00001	0,01	17,30	0,94	Exp.	437,17	1.324,00	14,70	0,67
Ds	Exp.	0,01	0,01	58,02	0,90	Esf.	0,00001	0,01	29,70	0,73	Esf.	0,00	0,01	29,70	0,73
Dp	Esf.	0,003	0,01	54,90	0,95	Esf.	0,00001	0,00	53,20	0,99	EPP	-	-	-	-
Macro	Esf.	44,31	59,47	30,68	0,81	Esf.	1,17	11,57	15,70	0,91	Exp.	2,27	13,31	18,30	0,66
Micro	Esf.	4,92	9,54	28,10	0,88	Esf.	0,00001	0,02	36,30	0,90	Esf.	1,67	3,62	52,30	0,98
DMP	Exp.	0,01	0,06	26,36	0,85	Esf.	0,00001	0,04	16,10	0,90	Esf.	0,00	0,03	18,80	0,98
pH(H ₂ O)	Esf.	0,02	0,06	32,70	0,65	Esf.	0,01	0,03	38,70	0,97	Esf.	0,02	0,04	60,50	0,98
H+Al	Esf.	7,21	31,92	22,60	0,87	Esf.	131,00	594,20	72,70	0,98	Esf.	82,90	165,90	53,40	0,97
MO	Esf.	38,40	117,00	33,10	0,77	Esf.	7,60	51,27	63,50	0,98	Esf.	3,14	12,78	16,91	0,75
P	EPP	-	-	-	-	Esf.	0,70	3,81	25,10	0,59	Esp.	0,02	0,04	15,30	0,92
K ⁺	Esf.	0,06	0,20	23,86	0,94	Esf.	0,24	0,65	31,80	0,58	Exp.	0,062	0,314	20,70	0,86
Ca ²⁺	Esf.	215,00	589,00	31,00	0,94	Esf.	0,08	1,70	41,70	0,94	Exp.	6,80	47,28	24,60	0,94
Mg ²⁺	Esf.	16,70	38,94	35,04	0,54	Esf.	0,70	1,67	55,70	0,89	Exp.	0,96	2,93	25,50	0,82
SM	Exp.	3.297,96	7.272,35	45,00	0,88	Esf.	0,01	0,04	60,00	0,82	Esf.	410,00	45,00	56,00	0,94
0,40-0,60 m															
Areia	Esf.	523,00	1.536,00	23,98	0,99	Esf.	0,00001	0,01	21,00	0,77	Exp.	718,00	2.390,00	33,00	0,97
Silte	Exp.	479,06	1.284,00	48,91	0,91	Exp.	0,00001	0,02	27,60	0,85	EPP	-	-	-	-
Argila	Esf.	270,94	2.854,00	19,00	0,73	Exp.	0,00001	0,01	14,70	0,61	Esf.	1.406,96	6.504,00	15,70	0,86
pH(H ₂ O)	Esf.	0,04	0,10	24,20	0,73	Exp.	0,0009	0,01	50,16	0,95	Exp.	0,01	0,02	58,12	0,86
H+Al	Esf.	11,64	32,08	26,30	0,77	Gau	64,000	272,40	84,18	0,98	Esf.	31,53	63,07	40,00	0,93
MO	Exp	12,22	25,18	40,00	0,51	Esf.	0,10	50,31	92,00	0,99	Esf.	0,03	0,06	39,00	0,96
P	Esf.	1.754,00	4.716,00	59,10	0,96	Esf.	0,10	3,87	79,20	0,95	Esf.	0,65	1,48	48,60	0,94
K ⁺	Esf.	0,01	0,10	23,70	0,96	EPP	-	-	-	-	Esf.	0,01	0,07	19,14	0,99
Ca ²⁺	Esf.	101,20	208,10	40,00	0,97	Esf.	0,52	1,79	72,30	0,97	Exp.	0,81	2,51	15,00	0,56
Mg ²⁺	Esf.	2,69	8,26	20,60	0,43	Esf.	0,19	1,03	60,80	0,98	Exp.	0,15	0,70	23,70	0,91
SM	Exp.	0,0001	0,06	45,00	0,85	Esf.	0,02	0,04	54,00	0,99	Exp.	18,90	205,30	42,00	0,98

Exp.: Exponencial; Esf.: Esférico; C₀ + C₁: Patamar; a: alcance (m). R²: coeficiente de determinação; EP: Efeito Pepita. Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partículas; Macro: macroporosidade; Micro: microporosidade; DMP: Diâmetro Médio Ponderado; H + Al: acidez potencial; MO: matéria orgânica estimada com base no carbono orgânico a partir do método Walkley-Black; Macronutrientes: extraídos com resina trocadora de íons; e SM: suscetibilidade magnética obtida pelo medidor MS2 da Bartington Instruments Ltda.

O grau de dependência espacial (GDE) para os semivariogramas escalonados, expresso pela razão entre o efeito pepita (C_0) e o patamar ($C_0 + C_1$) (Cambardella et al., 1994), foi classificado como moderado para quase todos os manejos estudados (Figuras 2, 3 e 4), exceto para os atributos físicos e químicos da floresta na profundidade de 0,00-0,20 m (Figura 3a), que apresentaram GDE forte (>25%). Para Cambardella et al. (1994), as variáveis que evidenciam forte dependência espacial são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo, ou seja, pelos fatores de formação do solo, enquanto a dependência espacial moderada possivelmente seria em razão da homogeneização do solo.

Com base no ajuste dos semivariogramas escalonados, verificou-se comportamento semelhante com os atributos avaliados individualmente e a SM (Figuras 2, 3 e 4). Avaliando o comportamento espacial dos atributos físicos e químicos do solo na área com TPA, este se apresentou diferente em relação aos demais ambientes avaliados. O modelo que melhor se ajustou aos atributos físicos, químicos e SM na área com TPA na profundidade de 0,00-0,20 m (Figuras 2a e 2c) foi o esférico, sendo o modelo exponencial o que melhor ajustou a esses atributos na profundidade de 0,40-0,60 m (Figuras 2b e 2d).

Para a área com floresta e pastagem, observou-se comportamento similar quanto ao ajuste dos semivariogramas aos atributos. O modelo exponencial apresentou melhor ajuste aos atributos físicos e químicos para a área com pastagem (0,00-0,20 e 0,40-0,60 m) (Figuras 4a e 4b) e floresta (0,00-0,20 m) (Figura 3a). O modelo esférico ajustou a SM nas duas profundidades para floresta (Figuras 3c e 3d) e pastagem (Figuras 4c e 4d), e aos atributos físicos e químicos da floresta na profundidade de 0,40-0,60 m (Figura 3b).

O ajuste dos semivariogramas evidenciou uma relação espacial entre a SM e os atributos físicos e químicos para os ambientes estudados. A área com TPA ajustou ao mesmo modelo esférico para a SM e atributos do solo na profundidade de 0,00-0,20 m; o modelo exponencial ajustou aos mesmos atributos na profundidade de 0,40-0,60 m. Esses resultados indicaram que a SM está diretamente ligada aos atributos do solo e que essa pode ser utilizada como um método alternativo para estimar atributos do solo (Grimley e Vepraskas, 2000). Nas áreas de floresta e pastagem, observou-se comportamento similar entre a SM e os atributos do solo. Os atributos físicos e químicos se ajustaram ao modelo exponencial exceto para a floresta que ajustou ao modelo esférico, enquanto a SM ajustou ao modelo esférico nas profundidades de 0,00-0,20 e 0,40-0,60 m nos dois manejos.

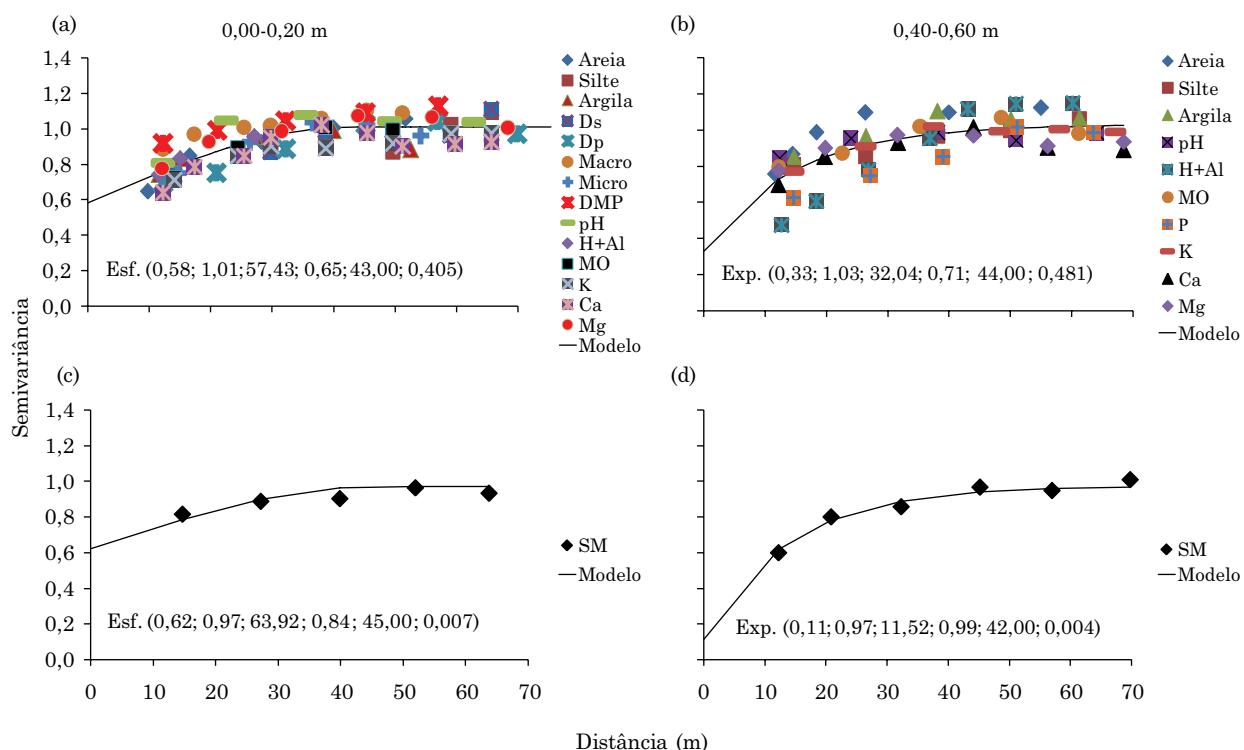


Figura 2. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos físicos e químicos (a, b) e à suscetibilidade magnética (c, d) de Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico abrúptico da Terra Preta Arqueológica com cultivo, na região de Manicoré, Amazonas. [modelo (efeito pepita; patamar; GDE; R^2 ; alcance; resíduo)]. Esf.: Esférico; Exp.: exponencial; GDE: grau de dependência espacial; R^2 : coeficiente de determinação.

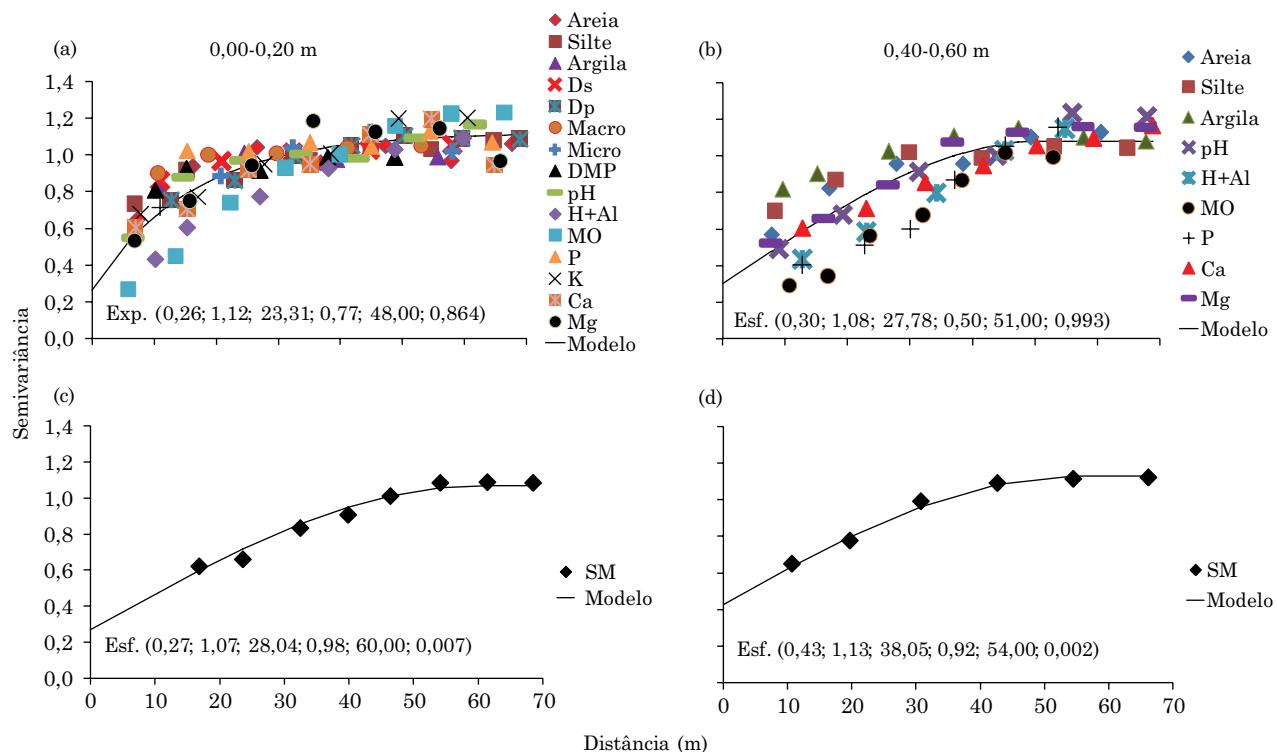


Figura 3. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos físicos e químicos (a, b) e à suscetibilidade magnética (c, d) de Argissolo Vermelho alítico plíntico sob floresta na região de Manicoré, Amazonas. [modelo (efeito pepita; patamar; GDE; R²; alcance; resíduo)]. Exp.: exponencial; Esf.: Esférico; GDE: grau de dependência espacial; R²: coeficiente de determinação.

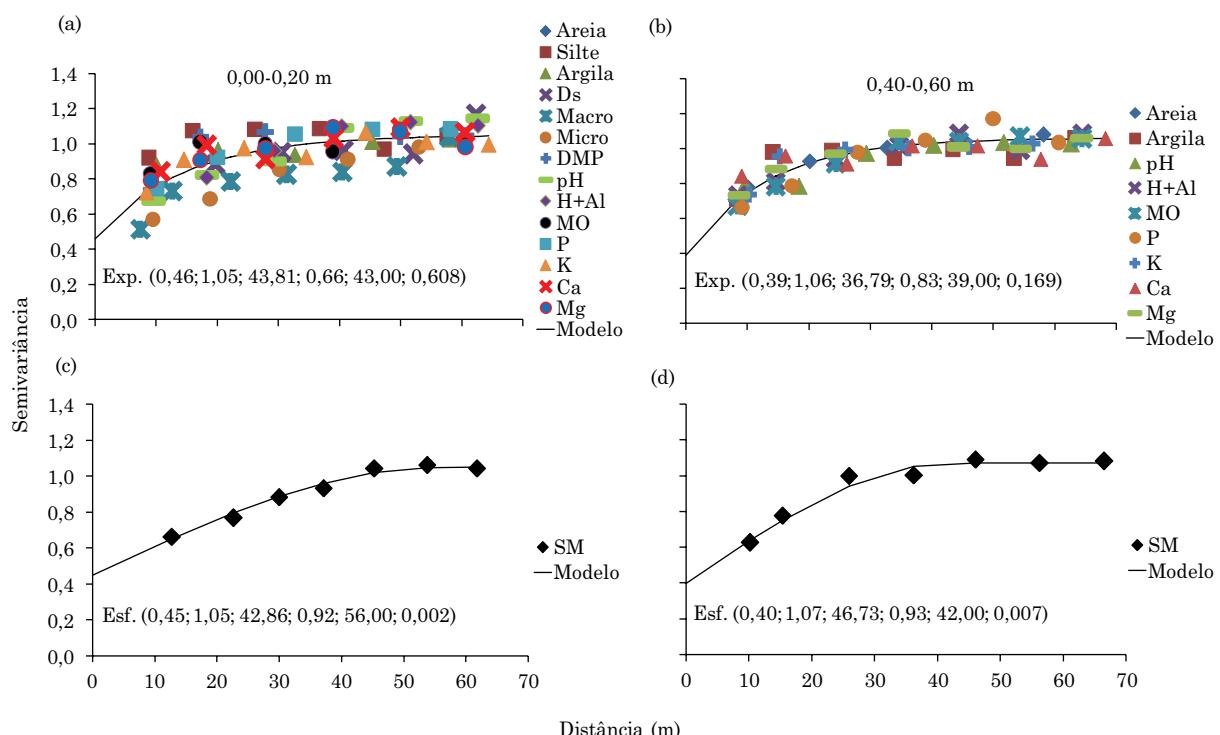


Figura 4. Parâmetros e modelos dos semivariogramas escalonados ajustados aos atributos físicos e químicos (a, b) e à suscetibilidade magnética (c, d) do Argissolo Vermelho alítico plíntico sob pastagem na região de Manicoré, Amazonas. [modelo (efeito pepita; patamar; GDE; R²; alcance; resíduo)]. Esf.: Esférico; Exp.: exponencial; GDE: grau de dependência espacial; R²: coeficiente de determinação.

Avaliando os valores do alcance ajustados aos modelos dos semivariogramas escalonados, observou-se maior variabilidade na área com TPA em relação às áreas de floresta e pastagem. O alcance dos semivariogramas para a área com TPA foi de 43

e 44 m (0,00-0,20 e 0,40-0,60 m, respectivamente) e a SM apresentou valores de alcance similares aos atributos físicos e químicos nas duas profundidades. Para área com floresta, o alcance foi de 48 e 51 m (0,00-0,20 e 0,40-0,60 m, respectivamente); a SM

Quadro 4. Densidade amostral mínima com base no alcance dos semivariogramas para atributos físicos e químicos e suscetibilidade magnética de Argissolos em áreas sob diferentes usos na região de Manicoré, Amazonas

Atributo	Terra Preta Arqueológica		Floresta		Pastagem	
	Dens. amostral	Espaçamento	Dens. amostral	Espaçamento	Dens. amostral	Espaçamento
	pontos ha ⁻¹	m	pontos ha ⁻¹	m	pontos ha ⁻¹	m
0,0-0,20 m						
Areia	10	31	28	19	6	40
Silte	11	31	5	45	60	13
Argila	26	20	33	17	46	15
Ds	3	58	11	30	11	30
Dp	3	55	4	53	-	-
Macro	11	31	41	16	30	18
Micro	13	28	8	36	4	52
DMP	14	26	39	16	28	19
pH(H ₂ O)	9	33	7	39	3	61
H+Al	20	23	3	61	4	53
MO	9	33	2	64	35	17
P	-	-	16	25	43	15
K ⁺	18	24	10	32	23	21
Ca ²⁺	10	31	6	42	17	25
Mg ²⁺	8	35	3	56	15	26
CV médio (%)	12	33	14	37	23	29
SM	5	45	3	60	3	56
S.E.	5	43	4	48	5	43
0,40-0,60 m						
Areia	17	24	23	21	9	33
Silte	4	49	13	28	-	-
Argila	28	19	46	15	41	16
pH(H ₂ O)	17	24	4	50	3	58
H+Al	14	26	3	62	6	40
MO	6	40	3	56	7	39
P	3	59	3	59	4	49
K ⁺	18	24	-	-	27	19
Ca ²⁺	6	40	2	65	44	15
Mg ²⁺	24	21	3	61	18	24
CV médio (%)	14	33	11	46	18	32
SM	5	42	3	54	6	42
S.E.	5	44	4	51	7	39

Ds: densidade do solo; Dp: densidade de partículas; Macro: macroporosidade; Micro: microporosidade; DMP: Diâmetro Médio Ponderado; H + Al: acidez potencial; MO: matéria orgânica estimada com base no carbono orgânico a partir do método Walkley-Black. Macronutrientes: extraídos com resina trocadora de íons; e SM: suscetibilidade magnética obtida pelo medidor MS2 da Bartington Instruments Ltda. CV: coeficiente de variação; S.E.: Semivariograma Escalonado.

evidenciou valores superiores (60 e 54 m) nas duas profundidades. Para área de pastagem, o alcance foi de 43 e 39 m para os atributos físicos químicos (0,00-0,20 e 0,40-0,60 m, respectivamente); a SM demonstrou alcance de 56 e 42 m nas duas profundidades, respectivamente.

Esses valores evidenciaram que possivelmente existe maior heterogeneidade dos atributos na área de TPA e pastagem, fato justificado em razão de esses solos serem formados por movimentações antrópicas, o que pode causar maior variabilidade dos atributos, uma vez que, segundo Vieira (2000), o alcance representa a distância em que os pontos amostrais estão dependentes espacialmente entre si, ou seja, os pontos localizados numa área de raio menor ou igual ao alcance são mais similares. A SM também apresentou maior variabilidade nas áreas com TPA e pastagem, sendo menor para a área com floresta, evidenciando que essa pode estar diretamente ligada ao comportamento dos atributos desses solos, como encontrado por Siqueira (2010). Nesse sentido, Souza et al. (2009) afirmaram que uma das principais utilizações dos semivariogramas é na determinação do número ideal de amostras de solos para estimar as características do solo.

Com o conhecimento do alcance da dependência espacial, definiu-se o raio de amostragem, em que os atributos estudados apresentaram diferentes valores de alcance em ambas as áreas, mas com valores acima do estipulado pela malha (Aquino et al., 2014). Sendo assim, com base no parâmetro alcance dos semivariogramas dos atributos, foi determinado a densidade amostral mínima para cada atributo para ambos os manejos; o alcance dos semivariogramas escalonados foi utilizado para comparar a densidade amostral mínima para todos os atributos conjuntamente (Quadro 4).

Analizando os atributos individualmente, observou-se que a densidade amostral mínima variou de 3 a 26 pontos ha^{-1} para TPA com média de 12 pontos ha^{-1} e espaçamento médio de 33 m. Para floresta, a densidade amostral variou de 3 a 41 e 3 a 60 pontos ha^{-1} na pastagem, média de 14 e 23 pontos ha^{-1} e espaçamento médio de 37 e 29 m para a floresta e pastagem, respectivamente, na profundidade de 0,00-0,20 m, enquanto na profundidade de 0,40-0,60 m variou 3 a 28, 1 a 46 e 3 a 44 com média de 14, 11 e 18 pontos ha^{-1} para a TPA, floresta e pastagem, respectivamente (Quadro 4).

O alcance do semivariograma escalonado indicou comportamento semelhante quanto ao comportamento dos atributos do solo, evidenciando maior variabilidade para as áreas com TPA e pastagem na profundidade de 0,00-0,20 m, sendo a densidade amostral mínima de 5 pontos ha^{-1} para as duas áreas, enquanto na área de floresta a densidade amostral foi de 4 pontos ha^{-1} . Na profundidade de 0,40-0,60 m, a área de floresta apresentou menor variabilidade dos dados, com 4 pontos ha^{-1} , e a pastagem com

7 pontos ha^{-1} demonstrou maior densidade amostral. Esse comportamento mostra que a ação antrópica causa maior variabilidade dos atributos do solo.

Avaliando os valores da densidade amostral (Quadro 4) com base no alcance do semivariograma escalonado da SM para as diferentes áreas, verificou-se comportamento similar aos atributos físicos e químicos. Comparando os valores de densidade amostral calculada pelo alcance do semivariograma escalonado entre SM e os atributos do solo, os valores para a TPA são de 5 pontos ha^{-1} nas duas profundidades. Para floresta, a densidade amostral mínima é de 3 nas duas profundidades, enquanto na pastagem as densidades são de 3 e 6 pontos ha^{-1} nas duas profundidades, respectivamente. A SM também apresentou maior variabilidade nas áreas de TPA e pastagem, sendo menor para a floresta, evidenciando que essa pode estar diretamente ligada ao comportamento dos atributos desses solos. Siqueira (2010) encontrou relação entre a SM e os atributos do solo. Segundo o autor, a SM pode auxiliar na estimativa de alguns atributos físicos químicos e mineralógicos do solo.

CONCLUSÕES

A área com Terra Preta Arqueológica apresentou maior fertilidade com maiores valores de pH(H_2O), Ca, Mg, P, com exceção do K, que não diferiu dos ambientes pastagem e floresta.

As áreas com Terra Preta Arqueológica e pastagem evidenciaram maior variabilidade espacial para os atributos argila, K e Mg para Terra Preta Arqueológica; e argila, macroporosidade, P e Ca para a pastagem, demonstrando menor alcance do ajuste do semivariograma escalonado.

A densidade amostral foi maior para as áreas de Terra Preta Arqueológica e pastagem, sendo 5 pontos ha^{-1} para a profundidade de 0,00-20 m, e com 5 e 7 pontos ha^{-1} , respectivamente, para a profundidade de 0,40-0,60 m, com base no alcance do semivariograma escalonado.

A suscetibilidade magnética evidenciou comportamento similar aos atributos do solo nos ambientes estudados, apresentando mesmos ajustes de semivariograma, podendo ser utilizada como propriedade do solo para estimar atributos do solo.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas - FAPEAM; à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP; e à Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia e Inovação - SECT/AM, pelo financiamento e apoio da pesquisa; ao CNPq, pela bolsa de produtividade ao terceiro autor.

REFERÊNCIAS

- Aquino RE, Campos MCC, Marques Júnior J, Oliveira IA, Mantovaneli BC, Soares MDR. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. *R Bras Ci Solo*. 2014;38:397-406.
- Brasil. Ministério das Minas e Energia. Projeto Radambrasil, folha SB. 20, Purus. Rio de Janeiro: 1978.
- Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. *Soil Sci Soc Am J*. 1994;58:1501-11.
- Campos MCC, Ribeiro MR, Souza Júnior VS, Ribeiro Filho MR, Almeida MC. Topossequência de solos na transição Campos Naturais-Floresta na região de Humaitá, Amazonas. *Acta Amaz.* 2012;42:387-98.
- Campos MCC, Ribeiro MR, Souza Júnior VS, Ribeiro Filho MR, Souza RVCC, Almeida MC. Caracterização e classificação de terras pretas arqueológicas na Região do Médio Rio Madeira. *Bragantia*. 2011;70:598-609.
- Campos MCC. Pedogeomorfologia aplicada a ambientes Amazônicos do Médio Rio Madeira [tese]. Recife: Universidade Federal Rural de Pernambuco; 2009.
- Cavalcante EGS, Alves MC, Souza ZM, Pereira GT. Variabilidade espacial de atributos químicos do solo sob diferentes usos e manejos. *R Bras Ci Solo*. 2007;31:1329-39.
- Ceddia MB, Vieira SR, Villela ALO, Mota LS, Anjos LHC, Carvalho DF. Topography and spatial variability of soil physical properties. *Sci Agríc.* 2009;66:338-52.
- Centro de Pesquisa de Recursos Minerais - CPRM. Hidroclimatologia, geologia, recursos minerais, geomorfologia e unidades de paisagens. Manaus: 2001. (Relatório técnico).
- Cunha TJF, Madari BE, Canellas LP, Ribeiro LP, Benites VM, Santos GA. Soil organic matter and fertility of Anthropogenic Dark Earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian Amazon Basin. *R Bras Ci Solo*. 2009;33:85-93.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: 2011.
- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3^a.ed. Brasília: Embrapa Solos; 2013.
- Eyre JK, Shaw J. Magnetic enhancement of Chinese loess - the role of $\gamma\text{Fe}_2\text{O}_3$. *Geo J Inter*. 1994;117:265-71.
- Falcão NPS, Borges LF. Efeito da fertilidade de Terra Preta de Índio da Amazônia Central no estado nutricional e na produtividade do mamão Hawai (*Carica papaya* L.). *Acta Amaz.* 2006;36:401-6.
- Flores JPC, Anghinoni I, Cassol LC, Carvalho PCF, Leite JGDB, Fraga TI. Atributos físicos do solo e rendimento de soja em sistema plantio direto em integração lavoura-pecuária com diferentes pressões de pastejo. *R Bras Ci Solo*. 2007;31:771-80.
- Fontes MPF, Oliveira TS, Costa LM, Campos AAG. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. *Geoderma*. 2000;96:81-99.
- German LA. Historical contingencies in the coevolution of environment and livelihood: contributions to the debate on Amazonian Black Earth. *Geoderma*. 2003;111:307-31.
- Grimley DA, Vepraskas MJ. Magnetic susceptibility for use in delineating hydric soils. *Soil Sci Soc Am J*. 2000;64:2174-80.
- Guimarães EC. Variabilidade espacial da umidade e da densidade do solo em um Latossolo Roxo [dissertação]. Campinas: Universidade de Campinas; 1993.
- Hanesch M, Scholger R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. *Geo J Inter*. 2005;161:50-6.
- Isaaks EH, Srivastava RM. An introduction to applied geoestatistics. New York: Oxford University Press; 1989.
- Jong E, Pennock DJ, Nestor PA. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada. *Catena*. 2000;40:291-305.
- Kemper WD, Chepil WS. Aggregate stability and size distribution. In: Black CA, editor. Methods of soil analysis. Madison: American Society of Agronomy; 1965. p.499-510.
- Kern DC, Kämpf N. O efeito de antigos assentamentos indígenas na formação de solos com Terra Preta Arqueológica na região de Oriximiná, Pará. *R Bras Ci Solo*. 1989;13:219-25.
- Lima HN, Schaefer CER, Mello JWV, Gilkes RJ, Ker J. Pedogenesis and pre-Colombian land use of “Terra Preta Anthrosols” (“Indian Black Earth”) of Western Amazonia. *Geoderma*. 2002;110:1-17.
- Maher BA. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications. *Palaeog Palaeoc Palaeoec*. 1998;137:25-54.
- Minitab Release 14.1. Statistical Software. Canadá [USA]; 2000.
- Montanari R, Souza GSA, Pereira GT, Marques J, Siqueira DS, Siqueira GM. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. *Precision Agric*. 2012;13:542-52.
- Moreira A. Fertilidade, matéria orgânica e substâncias húmicas em solos antropogênicos da Amazônia Ocidental. *Bragantia*. 2007;66:307-15.
- Mullins CE. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science-a review. *J Soil Sci*. 1977;28:223-46.
- Novotny EH, Azevedo ER, Bonagamba TJ, Cunha TJF, Madari BE, Benites VM, Hayes MHB. Studies of the compositions of humic acids from Amazonian dark earth soils. *Environ Sci Technol*. 2007;41:400-5.
- Perin R, Martins GC, Muniz SR, Linhares GM. Sistema de pastejo rotacionado intensivo como alternativa para a recuperação de áreas degradadas no Estado do Amazonas, AM. *Ci Desenv*. 2009;4:235-41.
- Pignataro Netto IT, Kato E, Goedert WJ. Atributos físicos e químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo sob pastagens com diferentes históricos de uso. *R Bras Ci Solo*. 2009;33:1441-8.
- Portugal AF, Juncksh I, Schaefer CERG, Neves JCL. Estabilidade de agregados em Argissolo sob diferentes usos, comparado com mata. *R Ceres*. 2010;57:545-53.
- Raij Bvan, Quaggio JA, Cantarella H. Análise química do solo para fins de fertilidade. Campinas: Fundação Cargill; 1987.
- Siqueira DS, Marques Júnior J, Pereira GT. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. *Geoderma*. 2010;155:55-66.

- Siqueira DS. Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar [dissertação]. Jaboticabal: Universidade Estadual Paulista; 2010.
- Souza Júnior IG, Costa ACS, Vilar CC, Hoepers A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. *Ci Rural*. 2010;40:513-9.
- Souza ZM, Marques Júnior J, Pereira GT. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. *Ci Rural*. 2009;40:48-56.
- Steinbeiss S, Gleixner G, Antonietti M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. *Soil Biol Biochem*. 2009;41:1301-10.
- Vieira SR. Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo. *Tópicos Ci Solo*. 2000;1:1-54.
- Warrick AW, Nielsen DR. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel D, editor. *Applications of soil physics*. New York: Academic; 1980. p.319-44.
- White K, Walden J. The rate of iron oxide enrichment in arid zone alluvial fan soils, Tunisian southern atlas, measured by mineral magnetic techniques. *Catena*. 1997;30:215-27.
- Yeomans JC, Bremner JM. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Commun Soil Sci Plant Anal*. 1988;19:1467-76.