

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO SOB CONVERSÃO DE FLORESTA EM SISTEMA AGROFLORESTAL NA AMAZÔNIA CENTRAL

Alexandre Gomes de Oliveira

Universidade do Estado do Amazonas,
Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara, AM, Brasil
alexandreoliveira@gmail.com

Luís Antônio Coutrim dos Santos

Universidade do Estado do Amazonas,
Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara, AM, Brasil
santoslac@gmail.com

Romário Pimenta Gomes

Universidade do Estado do Amazonas,
Centro de Estudos Superiores de Itacoatiara, AM, Brasil
rpgagronomia@gmail.com

Mariana Coutrim dos Santos

Universidade Federal do Amazonas, câmpus Humaitá, AM, Brasil
marianacoutrimsantos@gmail.com

Noeme da Costa Santos

Universidade Federal de Santa Maria,
Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, RS, Brasil
ncsnoeme@gmail.com

RESUMO

O conhecimento da qualidade física do solo em sistemas agroflorestais na região amazônica é importante para conhecer o nível de mudança no ecossistema e subsidiar na escolha de metodologias de manejo conservacionista. O objetivo deste trabalho foi avaliar a variabilidade espacial e qualidade física do solo em função da conversão de floresta em sistema agroflorestal na Amazônia Central. O estudo foi realizado em uma propriedade rural com cultivo de agrofloresta (SAF) e área sob floresta nativa (FN), localizado no município de Silves, Amazonas. Nessas áreas, foram estabelecidas malhas de 70x70 m, com espaçamento regular de 10 m, totalizando 64 pontos e, em seguida, coletadas as amostras de solos nas profundidades 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Foram avaliados os atributos físicos: análise granulométrica, macroporosidade (MaP), microporosidade (MiP), porosidade total (Pt), densidade do solo (Ds) e resistência do solo à penetração (RSP). Os dados foram analisados, utilizando-se estatística descritiva e geoestatística. Os resultados mostram que a área de SAF modificou positivamente apenas para os atributos Ds e Pt, enquanto a FN apresentou as melhores condições para MaP e RSP. Todos os atributos em estudo apresentaram dependência espacial em todas as profundidades e os valores de alcances foram maiores que o espaçamento da malha, variando de 24,60 a 111,30 m para FN e 16,38 a 85,11 m para o SAF.

Palavras-chave: Sistema conservacionista. Solos amazônicos. Variabilidade espacial.

PHYSICAL SOIL QUALITY UNDER FOREST CONVERSION INTO AGROFORESTRY SYSTEM IN CENTRAL AMAZON

ABSTRACT

Knowledge of soil physical quality in agroforestry systems in the Amazon region is crucial for understanding ecosystem changes and choosing conservation management approaches. This study aimed to assess the spatial variability and physical quality of the soil resulting from forest conversion into agroforestry systems in the Central Amazon. The research was conducted in the municipality of Silves, state of Amazonas, comparing a rural area under agroforestry cultivation (SAF) with an area of native forest (FN). Sampling grids of 70x70 m with one sampling site at every 10 m were established in both areas, totaling 64 sites. Soil samples were taken at depths of 0.00-0.10, 0.10-0.20, and 0.20-0.40 m. The physical

properties evaluated included particle size analysis, macroporosity (MaP), microporosity (MiP), total porosity (Pt), soil bulk density (Ds), and soil resistance to penetration (RSP). Descriptive statistics and geostatistics were used for data analysis. The results indicated that the SAF area showed positive changes only for Ds and Pt, while the FN area exhibited the best conditions for MaP and RSP. Spatial dependence was observed for all properties at all depths, with range values greater than the grid spacing, ranging from 24.60 to 111.30 m for FN and 16.38 to 85.11 m for SAF.

Keywords: Conservation system. Amazonian soils. Spatial variability.

INTRODUÇÃO

A conversão de ambientes naturais em áreas agrícolas e florestais sem adotar princípios técnicos é um dos principais problemas que vem sendo acarretados pelas atividades antrópicas na região amazônica (AQUINO; OLIVEIRA; SILVA, 2015a). Essas intervenções resultam em alterações nas propriedades físicas, químicas e biológica do solo e, por conseguinte, trazem sérios problemas à sua conservação (ENCK *et al.*, 2020; MELO *et al.*, 2021; SOUZA *et al.*, 2022).

Nesse sentido, o conhecimento das alterações nos atributos do solo decorrentes das atividades antrópicas em ambientes naturais pode constituir uma ferramenta necessária para subsidiar nas tomadas de decisões e auxiliar na elaboração de novas metodologias de manejo que buscam diminuir os efeitos deletérios ou até mesmo extinguir danos ambientais, permitindo o rendimento do processo produtivo e respeitando a conservação dos ambientes, a partir do desenvolvimento sustentável (FROZZI *et al.*, 2022).

Assim, a análise dos atributos do solo ao longo de uma linha temporal possibilita quantificar a magnitude e duração das alterações provocadas por diferentes sistemas de manejo. Essas propriedades, por serem parâmetros sensíveis, permitem avaliar o nível de mudança ou se houve melhoria em função do manejo do solo (REICHERT *et al.*, 2009). Contudo, segundo Carneiro *et al.* (2009), esta avaliação é complexa e deve ser realizada de forma conjunta com outros indicadores específicos (atributos) e suas inter-relações, uma vez que se tem constatado que indicadores isolados não são satisfatórios para explicar a perda ou ganho produtivo de um determinado solo. Dentro desta perspectiva, indicadores físicos como densidade, porosidade e resistência à penetração das raízes tem sido frequentemente utilizado para medir os impactos destes sistemas de produção (LONG *et al.*, 2012; SOARES *et al.*, 2016; CARMO *et al.*, 2018).

Para tanto, é importante ressaltar que independentemente de sua escala, o princípio básico para o manejo preciso das áreas agrícolas é o conhecimento da variação das características do solo e das culturas no espaço e no tempo, através de avaliações com uso de métodos estatísticos (GREGO; VIEIRA, 2005; JORDÃO *et al.*, 2022). O emprego de técnicas estatísticas contribui para a compreensão dos atributos do solo possibilitando, assim, a adoção de práticas de manejo sustentáveis (FREITAS *et al.*, 2015). Dessa forma, a geoestatística revela-se uma ferramenta que auxilia à ciência do solo a caracterizar e estudar a variação espacial de suas propriedades, com base na estrutura da variabilidade dos atributos avaliados, considerando ainda a dependência espacial dentro de um intervalo de amostragem conhecido (ARAÚJO *et al.*, 2022; ALVES *et al.*, 2021), permitindo a construção detalhada do comportamento dos atributos físicos do solo (Aquino *et al.*, 2014). Entretanto, é necessário considerar que a determinação da variabilidade exige uma amostragem precisa e confiável para evitar erros graves de interpretação (CRUZ *et al.*, 2010).

Em meio a um cenário agravante do avanço da fronteira agrícola, os sistemas agroflorestais surgem como modelos de sustentabilidade produtiva de uso e ocupação do solo, na qual plantas lenhosas perenes são manejadas em consorciação com plantas herbáceas, agrícolas e animais em uma mesma unidade de manejo, de forma simultânea ou sequencial, tornando o ambiente diversificado com alta relação ecológica entre estes componentes (RIGHI; BERNARDES, 2015). A adoção deste sistema tem como vantagem a incorporação de grande quantidade de matéria orgânica ao solo via serapilheira e outros detritos, resultando em melhoria nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (MARCHINI *et al.*, 2015).

Diante da problemática citada, estudos sobre a qualidade física do solo em ambientes transformados na Amazônia são fundamentais, visto que os poucos trabalhos que fazem uso da ferramenta

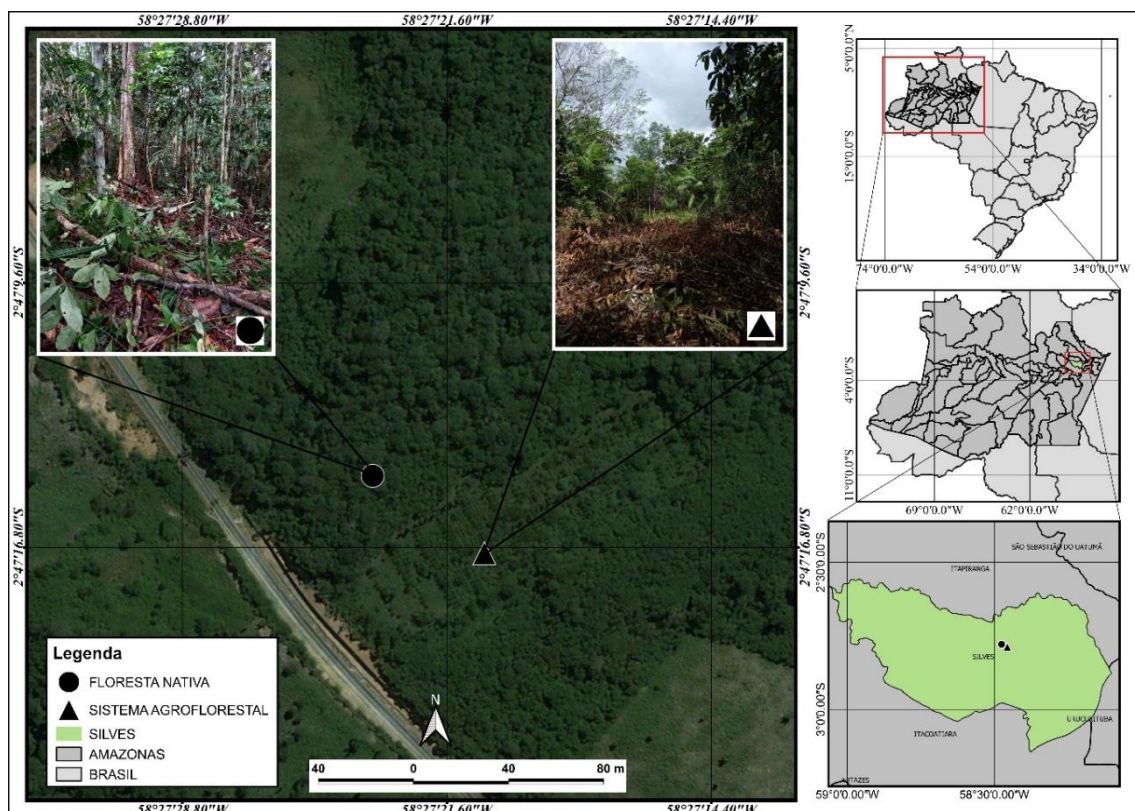
geoestatística na região são incipientes em função da complexidade do bioma (AQUINO *et al.*, 2015b). Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a variabilidade espacial e qualidade física do solo em função da conversão de floresta em sistema agroflorestal na Amazônia Central.

METODOLOGIA

Descrição e histórico de uso das áreas

O estudo foi realizado em uma propriedade rural, localizada nas imediações da rodovia estadual AM-363 no município de Silves, Amazonas. A área de floresta está situada sob as coordenadas geográficas 02°47'17,72" S e 58°27'19,97" W (DATUM SIGARS_2000). Paralela à área de floresta, encontra-se a área de sistema agroflorestal sob as coordenadas geográficas 02°47'15,51" S e 58°27'22,74" W (Figura 1).

Figura 1 - Localização das áreas de estudo na região de Silves, Amazonas



Fonte: Os autores, 2023.

O solo foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico de textura argilosa (IBGE, 2010), apresentando boa drenagem, profundo, porém, ácido e, majoritariamente com baixa fertilidade natural, característico de solos amazônicos (SILVA; RODRIGUES, 2003). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Af (tropical úmido), com temperatura média entorno de 29,9°C, apresentando poucas variações ao longo do ano. A pluviosidade anual é superior a 2.000 mm, sendo os meses mais chuvosos entre novembro a maio, com a umidade relativa do ar variando entre 80% e 85%.

O ambiente do sistema agroflorestal (SAF) possui aproximadamente 22 anos de implantação. Esta área, inicialmente, era cultivada com a mandioca (*Manihot esculenta*), no entanto, a mesma foi substituída pelo SAF, que tinha a finalidade de introduzir o cacau (*Theobroma cacao*). Atualmente a área é composta exclusivamente por espécies nativas, destacando-se as espécies de *Bertholletia excelsa* (Castanha-do-brasil), *Carapa guianensis* Aubl., (Andiroba) e *Euterpe oleracea* Mart. (Açaí). O

SAF é descrito por apresentar caráter protetor e atua na recuperação da área desmatada destinada à mandioca, tendo como característica vegetal a presença de floresta secundária (capoeira), com limpeza do sub-bosque através da roçagem. Já a floresta é nativa (FN) da área, sendo classificada como Floresta Ombrófila Densa com predomínio de árvores de grande porte (SILVA; RODRIGUES, 2003).

Amostragem de solo e análise laboratorial

Nessas áreas, foi estabelecida uma malha amostral com dimensões de 70 x 70 m, e o solo foi amostrado nos pontos de interseção da malha, com espaçamentos regulares de 10 metros, totalizando 64 pontos amostrais. Esses pontos foram georreferenciados com uso da ferramenta GPS, modelo GPSMAP 64sx, marca GARMIM, com precisão de 5 metros para construção do modelo digital de elevação (MDE). Foram coletadas amostras de solos com estrutura deformadas, para caracterização da textura do solo e amostras com estrutura preservada com auxílio de anéis volumétricos de 5 cm de altura e 4 cm de diâmetro interno nas profundidades de 0,00–0,10, 0,10–0,20 e 0,20–0,40 m, totalizando 384 amostras.

Nas amostras deformadas foi realizada a análise granulométrica pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 mol. L⁻¹ como dispersante químico e agitação mecânica lenta por 16 horas a 50 RPM, conforme a metodologia de Teixeira *et al.* (2017). A fração argila foi separada por sedimentação, a areia por tamisação e o silte calculado por diferença.

Para as determinações da densidade (Ds) e porosidade do solo, foram utilizadas as amostras com estrutura preservada em anéis volumétricos. As amostras foram, inicialmente, preparadas retirando-se o excesso de solo de suas bordas, seguidos da saturação em uma bandeja plástica por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir dois terços da altura dos anéis. Posteriormente, as amostras foram pesadas e levadas à mesa de tensão para obtenção da microporosidade (MiP) a uma tensão de -0,006 MPa. Depois de atingirem o equilíbrio em um potencial matricial de -0,006 MPa, novamente as amostras foram pesadas, em seguida, realizadas as leituras de resistência do solo à penetração (RSP), utilizando-se um penetrômetro estático de bancada, modelo MA-933 da Marconi, com velocidade constante de 0,1667 mm s⁻¹, com ponteira de diâmetro da base de 4 mm, desenvolvido por Serafim *et al.* (2008). Após esta etapa, as amostras foram levadas à estufa a 105°C para determinação da densidade do solo (Ds), calculada pela relação entre a massa seca da amostra de solo presente no cilindro volumétrico em estufa a 105°C durante 24 horas e o volume do cilindro. A porosidade total (Pt) foi calculada pela diferença entre a massa de solo saturado e a massa de solo seco em estufa a 105°C até massa constante (TEIXEIRA *et al.*, 2017). Pela diferença entre a porosidade total (Pt) e a microporosidade (MiP), obteve-se a macroporosidade (MaP).

Análise estatística

Os dados foram inicialmente avaliados pela análise exploratória da estatística descritiva, calculando-se os valores de média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e o coeficiente de curtose. Foi aplicada uma análise de variância univariada (ANOVA) e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para verificar a diferença estatística dos atributos estudados entre os ambientes. O coeficiente de variação (CV%) foi avaliado conforme classificação proposta por Warrick e Nielsen (1980), que classificam as variáveis do solo como CV < 12%, 12 < CV < 60%, e CV > 60% como baixa, média e alta variabilidade, respectivamente. As hipóteses de normalidade dos dados dentro de cada ambiente foram testadas pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (KS), disponível no programa computacional STATISTICA®, versão 7.0 (STATSOFT, 2004).

Para a caracterização da variabilidade espacial dos atributos em estudo, foram modelados semivariogramas utilizando análise geoestatística (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). Sob a teoria da prognose intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela Equação 1:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} * \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(X_i) - Z(X_i + h)]^2 \quad (1)$$

em que: $\gamma(h)$ - 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 ; $Z(x_i+h)$ - valor do atributo Z separado por um intervalo h da posição x_i .

Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\gamma(h)$, são definidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (o efeito pepita, C_0 ; a variância estrutural, C_1 ; o patamar, $C_0 + C_1$; e o alcance, a). O efeito pepita é o valor da semivariância para intervalo zero e representa descontinuidade devida a possíveis erros de medição ou microvariações não detectadas pela amostragem de campo; o patamar, corresponde a determinado ponto da semivariância em que a curva se mantém estável sobre um valor constante; e o alcance é a distância além da qual as amostras não são correlacionadas entre si (VIEIRA *et al.*, 1983; TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1986). Para a determinação da existência ou não da dependência espacial utilizou-se o exame de semivariogramas, por meio do programa GS+ (ROBERTSON, 1998). Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, considerou-se o maior R^2 (coeficiente de determinação).

Para análise do grau de dependência espacial (GDE) dos atributos em estudo, aplicou-se a classificação de Cambardella *et al.* (1994), em que valores de $[(C_0/(C_0+C_1))]$ menores que 25% são considerados dependência espacial forte, valores de $[(C_0/(C_0+C_1))]$ entre 25 e 75% indicam dependência espacial moderada e valores de $[(C_0/(C_0+C_1))]$ maiores que 75% determinam dependência espacial fraca. A estimativa dos valores dos pontos não amostrados foi obtida por meio da krigagem ordinária, para produzir mapas de padrões espaciais utilizando o programa Surfer (SURFER FOR WINDOWS, 1999).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise descritiva dos atributos físicos do solo

Os resultados da estatística descritiva para os atributos físicos do solo estudados na área de FN e SAF são apresentados nas Tabelas 1 e 2. Os valores de média e mediana são semelhantes para todas as variáveis, em todas as profundidades, evidenciando ajuste a uma distribuição normal, tendendo neste caso, uma distribuição simétrica dos dados. Esse fato é justificado pelos valores de assimetria e curtose próximo de zero, exceto para os atributos Ds, MaP e silte da área FN nas profundidades de 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m respectivamente. Na área de SAF, essas exceções foram observadas para Ds, MaP e Pt para as camadas de 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, que apresentaram valores de assimetria e curtose mais elevado, evidenciando que estas variáveis não seguem a curva padrão de distribuição, sugerindo que esse resultado seja decorrente de microvariações no relevo ou ainda de procedimentos metodológicos (SOUZA *et al.*, 2024). O mesmo foi observado por Campos *et al.* (2013a), estudando a distribuição espacial de atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar.

De acordo com Alves *et al.* (2014), o coeficiente de assimetria é empregado para caracterizar como e quanto à distribuição de frequências se afasta da simetria: se $C_s > 0$, tem-se uma distribuição assimétrica à direita; se $C_s < 0$, a distribuição é assimétrica à esquerda; se $C_s = 0$ obtém-se uma distribuição simétrica. Conforme observado, valores negativos de assimetria para os atributos areia, silte, argila, Ds, MiP e RSP indicam uma distribuição assimétrica à esquerda, enquanto que valores positivos para os demais atributos caracteriza uma distribuição assimétrica à direita (Tabelas 1 e 2). Esses resultados, segundo Guimarães *et al.* (2010), não caracterizam o deslocamento expressivo da normalidade, apenas mostram que, na natureza, não são encontradas distribuições que sejam absolutamente normais.

Quanto ao coeficiente de curtose que expressa o grau de dispersão (achatamento) da distribuição em relação a um padrão, geralmente a curva normal, em que: se $C_k = 0$ caracteriza a distribuição mesocúrtica; se $C_k < 0$ platicúrtica e se $C_k > 0$ leptocúrtica. A maior parte dos dados apresentou uma distribuição platicúrtica, com achatamento pouco expressivo da curva de distribuição normal, uma vez que esses valores se encontram próximos de zero. Trabalhos de Kamimura *et al.* (2013) e Alho *et al.* (2014) ressaltam que a assimetria e curtose são mais sensíveis a valores extremos que a média e mediana, por isso, valores próximos a zero indicam maior normalidade de dados.

Os resultados referentes ao teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) indicaram normalidade para todos os atributos em estudo. Embora, a condição de normalidade dos dados não é caracterizada como um dos pré-requisitos fundamentais para o emprego da análise geoestatística, uma vez que se tratando de dados obtidos da natureza, uma distribuição teórica é apenas aproximada (ALHO *et al.*, 2014). Porém, é importante que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as

estimativas da krigagem, as quais são fundamentadas com base em valores médios (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). Portanto, as informações geradas pela estatística descritiva permitem certificar que as variáveis apresentam distribuição suficientemente simétricas, o que facilita a modelagem proporcionada pelo uso da análise geoestatística.

De acordo com a classificação de Warrick e Nielsen (1980) para o coeficiente de variação (CV), a FN e o SAF tenderam a um mesmo comportamento de variação (Tabelas 1 e 2). Os teores de areia e silte apresentaram CV entre 12% e 60%, indicando assim, moderada variabilidade para os dois ambientes em todas profundidades. Enquanto a fração argila apresentou CV moderado apenas na camada 0,00-0,10 m para FN e para o SAF nas profundidades 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m; apresentando ainda baixa variabilidade para as profundidades de 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m do ambiente floresta e para a camada mais profunda do SAF, demonstrando a menor heterogeneidade e maior homogeneidade dessa variável para a área de estudo (SOARES *et al.*, 2018). Nos trabalhos de Campos *et al.* (2013a), os autores verificaram CV baixo para silte e argila, mediano para areia e argila em profundidade distinta. É importante mencionar que as frações granulométricas são estáveis, ou seja, se modificam pouco ao longo do tempo, apresentando baixo coeficiente de variação (SOARES *et al.*, 2015).

Ainda em relação ao CV, na área de floresta nativa, os atributos Ds, MiP e Pt também apresentaram baixo CV, indicando baixa variabilidade em todas as profundidades (Tabela 2), concordando com os resultados encontrados por Oliveira *et al.* (2013a) em um Cambissolo háplico, sob diferentes usos no sul do Amazonas, enquanto a MaP e a RSP apresentaram moderada variabilidade. Para área cultivada com SAF, os baixos CV são observados para os atributos MiP e Pt (0,00-0,10 m), Ds, MaP e Pt (0,10-0,20 m), Ds, MiP e Pt (0,20-0,40 m), ocorrendo moderada variabilidade nas demais variáveis. Somente o atributo MaP (0,20-0,40 m) apresentou alta variabilidade (CV > 60%). De acordo com Bottega *et al.* (2013), altos valores de CV indicam as primeiras estimativas da heterogeneidade dos dados.

Tabela 1 - Estatística descritiva da textura do solo em área de floresta nativa e sistema agroflorestal, na Amazônia Central

Parâmetros		FN	SAF	FN	SAF	FN	SAF
		0,00-0,10 m		0,10-0,20 m		0,20-0,40 m	
Areia (g kg ⁻¹)	Média	453,53a	383,30b	360,44a	332,93b	322,39b	268,26a
	Mediana	462,36	372,52	360,98	322,31	323,10	261,79
	DP	65,43	87,85	55,94	69,35	54,04	58,64
	CV%	14,43	22,92	15,52	20,83	16,76	21,86
	Assimetria	-0,23	0,28	0,20	0,48	-0,10	0,50
	Curtose	-0,86	-0,77	-0,61	-0,48	-0,83	-0,11
	K-S	0,08*	0,07*	0,07*	0,08*	0,06*	0,09*
Silte (g kg ⁻¹)	Média	135,26b	263,22a	226,41b	312,54a	207,36b	295,72a
	Mediana	134,53	241,85	229,04	300,51	205,38	300,38
	DP	36,33	79,91	30,50	80,87	29,96	37,52
	CV%	26,86	30,36	13,47	25,87	14,45	12,69
	Assimetria	0,11	1,35	-0,01	0,33	1,45	-0,22
	Curtose	-0,95	1,80	-0,28	1,23	4,49	-0,32
	K-S	0,06*	0,15*	0,06*	0,09*	0,12*	0,09*
Argila (g kg ⁻¹)	Média	411,20a	353,47b	413,15a	354,52b	470,25a	436,02b
	Mediana	413,25	365,02	409,40	356,00	472,45	430,60
	DP	53,89	81,42	48,05	69,15	52,17	38,12
	CV%	13,10	23,06	11,63	19,50	11,09	8,74
	Assimetria	-0,15	-0,40	0,22	-0,37	-0,16	0,12
	Curtose	-0,20	-0,00	-0,28	1,98	-0,31	-0,56
	K-S	0,05*	0,11*	0,06*	0,10*	0,07*	0,11*

DP = desvio padrão; CV (%) = coeficiente de variação; K-S = * significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Médias seguidas da mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05). As comparações foram realizadas para cada camada de forma separada.

Fonte: Os autores, 2023.

Tabela 2 - Estatística descritiva da densidade do solo (Ds), macroporosidade (MaP), microporosidade (MiP), porosidade total (Pt) e resistência do solo à penetração (RSP) em área de floresta nativa e sistema agroflorestal, na Amazônia Central

Estatística Descritiva	Ds	MaP	MiP	Pt	RSP	Ds	MaP	MiP	Pt	RSP	Ds	MaP	MiP	Pt	RSP
	Mg m ⁻³	-----m ³ m ⁻³ -----			MPa	Mg m ⁻³	-----m ³ m ⁻³ -----			MPa	Mg m ⁻³	-----m ³ m ⁻³ -----			MPa
0,00-0,10 m						0,10-0,20 m					0,20-0,40 m				
Floresta Nativa															
Média	1,38a	0,11b	0,40a	0,51a	1,26b	1,51a	0,07b	0,41a	0,48a	1,59b	1,51a	0,09a	0,40a	0,49a	1,80b
Mediana	1,42	0,08	0,41	0,50	1,17	1,51	0,07	0,41	0,48	1,53	1,52	0,08	0,40	0,49	1,89
DP	0,13	0,06	0,04	0,04	0,47	0,09	0,03	0,03	0,03	0,44	0,09	0,03	0,02	0,02	0,41
CV (%)	9,42	54,54	10,00	7,84	41,30	5,96	42,86	7,32	6,12	27,99	5,96	33,33	5,00	4,08	22,73
Assimetria	-0,94	1,09	-0,92	0,32	0,36	-0,57	2,05	0,20	0,41	0,47	-1,56	1,46	-0,03	0,37	-0,54
Curtose	0,35	0,25	0,54	-0,52	0,03	0,88	6,38	1,28	1,06	-0,29	3,50	3,98	-0,52	0,65	-0,33
K-S	0,16*	0,20*	0,13*	0,08*	0,87*	0,08*	0,15*	0,07*	0,12*	0,34*	0,15*	0,09*	0,07*	0,07*	0,43*
Sistema Agroflorestal															
Média	1,21b	0,14a	0,35b	0,49b	1,64a	1,39b	0,09a	0,38b	0,47a	2,25a	1,41b	0,07b	0,38b	0,45b	2,27a
Mediana	1,20	0,13	0,35	0,49	1,54	1,39	0,08	0,37	0,46	2,22	1,40	0,06	0,38	0,45	2,32
DP	0,16	0,06	0,04	0,04	0,77	0,12	0,06	0,05	0,05	0,78	0,13	0,05	0,03	0,04	0,97
CV (%)	13,22	42,86	11,43	8,16	47,98	8,63	6,25	13,16	10,64	34,82	9,22	71,43	7,89	8,88	43,02
Assimetria	-0,44	0,22	-0,42	0,26	0,51	-1,14	1,32	0,65	1,88	0,04	-1,95	1,84	-0,46	0,06	0,21
Curtose	1,02	-0,84	-0,24	1,72	-0,46	2,81	2,88	1,86	5,13	-0,18	6,97	5,19	0,17	3,46	-0,35
K-S	0,86*	0,10*	0,07*	0,07*	0,67*	0,14*	0,11*	0,13*	0,17*	0,68*	0,13*	0,12*	0,10*	0,08*	0,69*

DP = desvio padrão; CV (%) = coeficiente de variação; K-S = * significativo a 5% de probabilidade pelo teste de Kolmogorov-Smirnov. Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem significativamente entre si pelo teste de Tukey (p < 0,05).

Fonte: Os autores, 2023.

Os atributos granulométricos apresentaram diferenças significativas entre os ambientes avaliados (Tabela 1). A área de FN apresentou textura variando de argilo arenosa a argila, com teores de areia entre 322,39 a 453,53 g kg⁻¹, silte 135,26 a 226,41 g kg⁻¹ e argila de 411,20 a 470,25 g kg⁻¹. No ambiente de SAF a textura variou de franco argilosa a argila, com teores de areia entre 268,26 a 383,30 g kg⁻¹, silte 263,22 a 312,54 g kg⁻¹ e argila oscilando entre 353,47 a 436,02 g kg⁻¹. Observa-se que para os dois ambientes a fração dominante foi a argila nas camadas de 0,10-0,20 e 0,20-0,40 m. Este fato pode estar justificado ao maior intemperismo dos solos ocorrentes na região.

A densidade do solo (Ds) foi menor na área cultivada com SAF (1,21 e 1,41 Mg m⁻³) em relação a FN (1,38 e 1,51 Mg m⁻³), diferindo estatisticamente em todas as profundidades (Tabela 2). A alta Ds encontrada na área FN pode ser explicado pela maior concentração de areia presente neste ambiente, uma vez que, segundo Mantovanelli *et al.* (2015a), a Ds é afetada pelo material constituinte do solo (partículas primárias, maior proporção de areia) e o tipo de cobertura vegetal. De modo geral, na camada superficial observou-se menor Ds para as duas áreas (Tabela 2). Fato que pode ser justificado em função da elevada interação desta camada como fonte de resíduos orgânicos e a intensa atividade biológica (DENARDIM *et al.*, 2014). Carvalho *et al.* (2004), avaliando a qualidade física do solo sob sistema agroflorestal, os autores observaram menores valores de Ds e RSP, maior valor de Pt e estabilidade de agregados, quando comparado ao solo sob sistema convencional. Conforme os autores, esse fato foi pela quantidade de serapilheira em decomposição em estágios diferentes, que estimula atividade biológica para formação de agregados mais estáveis.

Os baixos valores de Ds encontrados na área de SAF, possivelmente, estão relacionados aos teores de carbono orgânico no solo, como ressaltado por Freitas (2013), estudando as estimativas do estoque de carbono orgânico do solo ao longo de um gradiente topográfico na Amazônia Central, notou-se Ds média em área de platô de 0,70 a 1,0 g cm⁻³, aumentando na área de encosta para 1,10 e 1,51 g cm⁻³ em baixo. Couto *et al.* (2016), estudando diferentes tipos de solos sob SAF's, encontraram valores de Ds em Latossolos variando de 1,1 a 1,3 g cm⁻³, segundo os autores, esse fato é atribuído à condição de umidade elevada, considerando que os Latossolos são mais desenvolvidos e pela sua agregação, permite maior porosidade e retenção de água. Contudo, resultados contrários a esta pesquisa foram observados por Silva *et al.* (2022), avaliando aspectos físicos e químicos em solos naturais e em áreas com sistema agroflorestal no sul do Amazonas.

Ademais, os menores valores de Ds, observados na área de SAF, não significa que ela possui melhor qualidade física quando comparada com a FN, uma vez que precisamos sempre avaliar os atributos de forma conjunta, e observar os outros atributos do solo como, por exemplo, a RSP e Pt. De modo geral, a Ds média dos solos nas duas áreas foi considerada elevada, de acordo com os critérios de nível crítico estabelecido por Reichert *et al.* (2003), em que os autores apontam que em solos argilosos o crescimento radicular das plantas pode ser limitado com Ds na faixa de 1,30 e 1,40 Mg m⁻³, os quais indicam possível compactação ou adensamento destas áreas (ENCK *et al.*, 2020). Todavia, segundo Oliveira *et al.* (2015a), não há critério definido entre pesquisadores sobre um valor crítico de Ds para maioria dos solos.

O acréscimo na Ds reflete a condição de solo com maior resistência para crescimento radicular, diminuição da porosidade total, da macroporosidade, da condutividade hidráulica, absorção iônica, aumentando a microporosidade; por isso, este atributo é amplamente empregado como indicador de qualidade em diversas pesquisas (LIMA *et al.*, 2007; FROZZI *et al.*, 2022). Observa-se que nos dois ambientes, a Ds aumenta conforme a profundidade do solo (Tabela 2), sendo esta uma característica natural e típica, pois, segundo Cunha *et al.* (2011), isso acontece pela pressão exercida das camadas superficiais sobre as inferiores, resultando no seu adensamento e, conseqüentemente, reduz a porosidade do solo. Além disso, pode-se atribuir para esse aumento a diminuição da quantidade de raízes e o conteúdo de matéria orgânica (SILVA *et al.*, 2017).

A microporosidade (MiP) da FN foi estatisticamente superior em comparação à área de SAF, em todas as profundidades (Tabelas 1 e 2). Esse comportamento da MiP pode ser explicado em função de a área de floresta apresentar elevados teores de areia e maior Ds em relação ao ambiente cultivado. Pois, como já conhecido, a compactação do solo resulta no incremento Ds, diminui a MaP e aumenta a micro (VIANA *et al.*, 2011). Assim, de acordo com Fonseca *et al.* (2007), a diminuição da MiP pode afetar o armazenamento de água no solo e seu aumento pode ser visto como fator de compactação quando relacionado à diminuição da macroporosidade. Mazurana *et al.* (2013) afirmam que este atributo é fortemente influenciado pela textura e pelo teor de matéria orgânica e tampouco influenciada pela cobertura vegetal e o tráfego sobre o solo. Contudo, a quantidade de microporos nos solos é uma

característica desejável, pois são responsáveis pela retenção e armazenamento de água (ARAÚJO *et al.*, 2022).

Quanto à porosidade total (Pt), as médias foram estatisticamente diferentes, exceto na profundidade 0,10-0,20 m das áreas estudadas, com maior volume de poros observados para o ambiente de FN em relação à área de SAF (Tabela 2). No entanto, é possível observar que para os dois ambientes, o volume total de poros reduziu em profundidade. Esse resultado deve-se ao fato de que o aumento da compactação do solo, influenciada pelo aumento da Ds, provoca a diminuição da MaP (VIANA *et al.*, 2011; BRASIL NETO *et al.*, 2018), podendo ainda ser agravado com incremento do teor de argila (SILVA; PAULETTO; SILVA, 2020).

Um solo ideal (em relação aos valores de Pt) deve apresentar valores iguais ou superiores a $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de Pt, no qual a MiP deve oscilar entre $0,25$ e $0,33 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ e a MaP entre $0,17$ e $0,25 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (PARENTE; MAIA, 2011). Neste estudo, constatou-se que na camada de 0,00-0,10 m, a FN apresentou Pt superior a $0,50 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, configurando um solo com qualidade física desejável para atividades agrícolas ou florestais. A elevada porosidade no solo de floresta pode estar relacionada à baixa incidência de interferência antrópica e ao aporte de resíduos vegetais proveniente da diversidade de espécies florestais que compõem a área de estudo. Conforme Tavares-Silva *et al.* (2011), solos argilosos e francos-argilosos geralmente apresentam alta porosidade total, uma vez que as partículas que compõem estes solos não se arranjam de forma compactada, contribuindo para a formação de agregados, e atuando positivamente para o aumento da porosidade do solo. Sendo este atributo um importante indicador de qualidade, visto que quanto maior porosidade, demonstra que as condições do meio não foram alteradas com a pressão exercida pelo tráfego de máquinas e revolvimento de solo (OLIVEIRA; LIMA; VERBURG, 2015b).

Com relação à macroporosidade (MaP), verificou-se que a área de SAF exibiu maiores valores deste atributo quando comparado ao ambiente FN, principalmente na profundidade de 0,00-0,10 m, onde foram encontrados valores de $0,14 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, indicando, segundo Dexter (1998), boas condições ao desenvolvimento das plantas e logo abaixo dos valores apresentados como ideias por Parente e Maia (2011) (Tabela 2). Já nas camadas 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, foram encontrados valores de $0,09$ e $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, respectivamente, sendo inferior a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, o qual é considerado o valor mínimo necessário de porosidade de aeração para crescimento radicular (DEXTER, 1998; ROQUE *et al.*, 2010). De acordo com Neves Júnior *et al.* (2013), esta variável é fortemente influenciada pelo sistema de manejo e o aumento da Ds provoca sua redução, concordando com os valores de Ds observados nesse ambiente. Além disso, o decréscimo em profundidade possivelmente está relacionado à diminuição do conteúdo de matéria orgânica e ao próprio adensamento natural do solo (TEZOLIN *et al.*, 2021).

Quanto à RSP, os menores valores foram encontrados no ambiente de FN com valores médios de 1,55 MPa (Tabela 2). Quando avaliada a área de SAF, essa apresentou valores superiores de RSP, com média de 2,05 MPa. Para Tormena e Roloff (1996), valores de RSP iguais ou superiores a 2 MPa são críticos e podem restringir o desenvolvimento radicular. Todavia, segundo Dexter (1987), a compactação do solo é mais severa em solo seco, visto que em condições com maior conteúdo de água o sistema radicular pode crescer em solos com resistência maior que 4 MPa.

Os altos valores de RSP em profundidade nas duas áreas podem ser atribuídos ao maior teor de argila presente nessas camadas, estando condizentes com os estudos de Lopes *et al.* (2015), avaliando a compactação do solo submetido ao tráfego de harvester e forwarder na colheita de madeira. Esses resultados apontam correlação entre Ds e RSP na área de estudo, corroborando os resultados de Alho e Nascimento (2015), estudando atributos físicos e geoespaciais de um Argissolo sob floresta na região de Humaitá, Amazonas.

Caracterização do padrão espacial dos atributos físicos do solo.

Os parâmetros dos semivariogramas, ajustados aos modelos matemáticos que melhor descrevem o comportamento da variabilidade espacial dos atributos em estudo, são apresentados nas Tabelas 3 e 4. Os resultados da análise geoestatística mostram que todos os atributos apresentam estrutura de dependência espacial, evidenciando que as variáveis não estão distribuídas aleatoriamente no espaço (CAVALCANTE *et al.*, 2011), sendo expressas por meio de ajustes aos modelos de semivariogramas (CAMPOS *et al.*, 2012; 2013b).

Todos os atributos foram ajustados preferencialmente ao modelo exponencial e esférico, que segundo Trangmar, Yost e Uehara (1985), Cambardella *et al.* (1994), Grego e Vieira (2005), são os modelos teóricos que melhor se ajustam para o estudo dos atributos do solo. Os modelos exponenciais descrevem fenômenos erráticos a curta distância, enquanto os modelos esféricos descrevem propriedades do solo com alta continuidade espacial, ou menos erráticos a curta distância (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Nota-se que na fração granulométrica, o modelo exponencial foi o que melhor se ajustou para explicar a variabilidade existente das áreas estudadas (Tabela 3). Por outro lado, para os atributos relacionado à compactação do solo (Ds e RSP) e porosidade (MaP, MiP e Pt), o modelo esférico foi o que predominou para a área de FN. O mesmo comportamento foi observado para a área de SAF (Tabela 4).

Tabela 3 - Parâmetros geoestatísticos para textura do solo na profundidade de 0,00-0,10 m em área de floresta nativa (FN) e sistema agroflorestal (SAF) na Amazônia Central

Atributos	Modelo	Efeito pepita	Patamar	GDE	Alcance (m)	R ²
Floresta nativa						
0,00-0,10 m						
Areia	Exponencial	290	5,582	5,19	111,30	0,93
Silte	Exponencial	97,00	1,066,00	9,10	24,60	0,88
Argila	Exponencial	109,80	2,876,40	3,82	42,90	0,86
Sistema agroflorestal						
0,00-0,10 m						
Areia	Esférico	340,00	8,790,00	3,87	85,11	0,91
Silte	Exponencial	800,00	7,123,00	4,99	32,73	0,89
Argila	Esférico	232,77	6,896,81	3,37	16,38	0,87

GDE (%): grau de dependência espacial; R²: coeficiente de determinação

Fonte: Os autores, 2023.

Tabela 4 - Parâmetros geoestatísticos dos atributos físicos do solo em área de floresta nativa (FN) e sistema agroflorestal (SAF) na Amazônia Central

Atributos	Modelo	Efeito pepita	Patamar	GDE	Alcance (m)	R ²
Floresta nativa						
0,00-0,10 m						
Ds	Exponencial	0,0026	0,0202	13	40,04	0,85
MaP	Esférico	0,0007	0,0039	18	11,12	0,72
MiP	Esférico	0,0005	0,0015	33	10,10	0,75
Pt	Esférico	0,0003	0,0013	23	10,81	0,67
RSP	Esférico	0,0295	0,2265	13	10,79	0,61
0,10-0,20 m						
Ds	Esférico	0,0010	0,0056	18	11,86	0,69
MaP	Esférico	0,0001	0,0003	33	12,39	0,76
MiP	Esférico	0,0005	0,0009	55	12,14	0,73
Pt	Exponencial	0,0002	0,0008	25	19,80	0,82
RSP	Esférico	0,0294	0,1913	15	15,50	0,78
0,20-0,40 m						
Ds	Exponencial	0,0004	0,0023	17	21,60	0,88
MaP	Esférico	0,0002	0,0006	33	18,60	0,76
MiP	Esférico	0,0001	0,0003	33	40,41	0,77
Pt	Esférico	0,0002	0,0005	40	13,82	0,79
RSP	Esférico	0,0143	0,1730	8	12,80	0,79

Sistema agroflorestal						
0,00-0,10 m						
Ds	Exponencial	0,0008	0,0167	5	19,94	0,94
MaP	Esférico	0,0006	0,0034	18	27,71	0,83
MiP	Esférico	0,0011	0,0020	55	13,26	0,77
Pt	Esférico	0,0010	0,0018	56	23,49	0,83
RSP	Esférico	0,4133	0,7354	56	22,53	0,74
0,10-0,20 m						
Ds	Esférico	0,0010	0,0100	10	16,57	0,85
MaP	Esférico	0,0002	0,0022	9	12,28	0,87
MiP	Esférico	0,0003	0,0022	14	14,85	0,82
Pt	Esférico	0,0005	0,0016	31	14,25	0,93
RSP	Exponencial	0,1790	0,5786	31	22,81	0,76
0,20-0,40 m						
Ds	Exponencial	0,0010	0,0075	13	13,72	0,78
MaP	Esférico	0,0006	0,0015	40	18,01	0,76
MiP	Esférico	0,0002	0,0010	20	41,96	0,81
Pt	Esférico	0,0001	0,0015	7	22,46	0,87
RSP	Esférico	0,1011	0,6970	15	12,27	0,96

GDE (%): grau de dependência espacial; R²: coeficiente de determinação
Fonte: Os autores, 2023.

O alcance é um parâmetro importante na análise geoestatística, pois expressa a dependência espacial ou a distância em que uma variável pode apresentar o mesmo efeito (OLIVEIRA *et al.*, 2013a). Sendo assim, pode-se dizer que quanto maior o alcance, menor é a variabilidade, pois segundo Campos *et al.* (2013b), o alcance indica a distância limite entre pontos correlacionados entre si. Nesse sentido, observou-se comportamento similar entre os dois ambientes, para textura do solo na área de FN, o alcance foi de 24,60 e 111,30 m e para o SAF esta foi de 16,38 e 85,11 m (Tabela 3). Para os atributos Ds, MaP, MiP, Pt e RSP, de modo geral, na área de SAF o alcance variou de 12,27 a 41,96, já na FN essa variação foi de 10,10 a 40,41 m, indicando que nesses ambientes a distribuição espacial das propriedades do solo é maior (Tabela 4).

O grau de dependência espacial (GDE), expresso na relação entre o efeito pepita (C_0) e o patamar (C_0+C_1), seguindo a classificação de Cambardella *et al.* (1994), evidenciou-se que a partir da relação $[(C_0)/(C_0+C_1)]$, na área de SAF, na profundidade de 0,00-0,10 m as variáveis areia, silte, argila, Ds e MaP apresentou forte GDE, enquanto MiP, Pt e RSP apresentaram moderada dependência espacial (Tabelas 3 e 4). Na camada de 0,10-0,20 m, a Pt e RSP apresentaram moderada dependência espacial e a Ds, MaP e MiP, forte. Já na profundidade de 0,20-0,40 m, com exceção da MaP e MiP que apresentou moderada dependência, todas as outras variáveis apresentaram forte GDE.

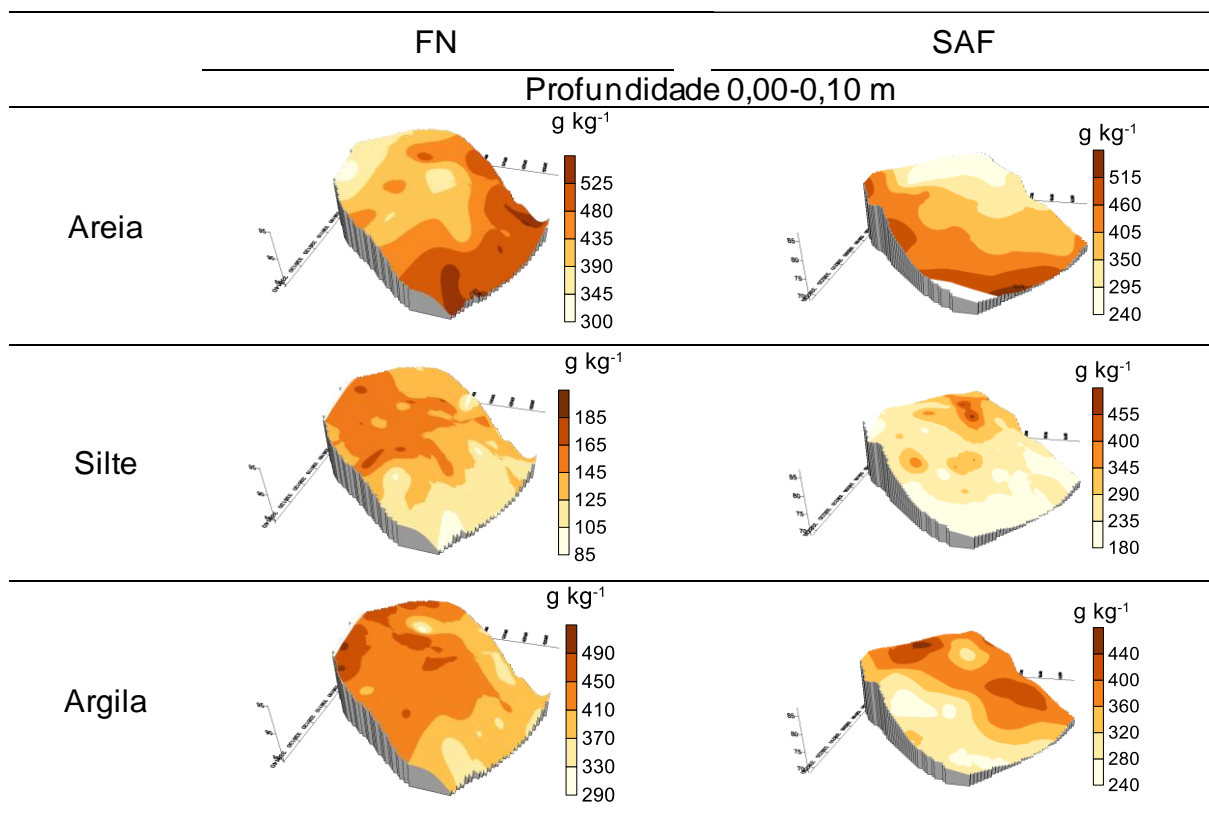
Avaliando a área de FN na camada superficial, a dependência espacial foi forte para os atributos areia, silte, argila, Ds, MaP, Pt e RSP, apenas a MiP apresentou GDE moderado (Tabelas 3 e 4). Ainda nesse ambiente, nas profundidades 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, o GDE obtido foi forte para a Ds e RSP e moderado para as demais variáveis. Para Cambardella *et al.* (1994), uma forte dependência espacial dos atributos do solo indica que eles são os influenciados por fatores intrínsecos do solo (material de origem, relevo, clima, organismos e tempo), por outro lado, uma dependência espacial moderada e fraca pode ser atribuída a fatores extrínsecos, como práticas de manejo.

Para o coeficiente de determinação (R²) dos semivariogramas, grande parte das variáveis estudadas apresentaram valores superiores a 0,75 (Tabelas 3 e 4), destacando-se os atributos areia, Ds e Pt da área de SAF nas profundidades 0,00-0,10, e 0,10-0,20 m, com R² de 0,91, 0,94 e 0,93, respectivamente, enquanto na camada de 0,20-0,40 m a RSP apresentou R² de 0,96. Esses resultados mostram que no mínimo 75% da variabilidade existente na área são explicadas pelos semivariogramas (CAMPOS *et al.*, 2007). Indicando que quanto mais próximos a 1 ou 100% forem esses coeficientes, maior será a confiabilidade dos dados, influenciando diretamente no melhor desempenho dos valores da krigagem (WANDERLEY *et al.*, 2013).

Com os parâmetros dos modelos ajustados foram construídos os mapas de distribuição espacial para textura (Figura 2), Ds e RSP (Figura 3), Pt, MaP e MiP (Figura 4) em diferentes profundidades do solo,

mostrando-se promissores na qualidade da visualização da distribuição espacial dos atributos em função do manejo adotado (OLIVEIRA *et al.*, 2013a; AQUINO *et al.*, 2015b; MANTOVANELLI *et al.*, 2015b) e na paisagem (CAMPOS *et al.*, 2013a).

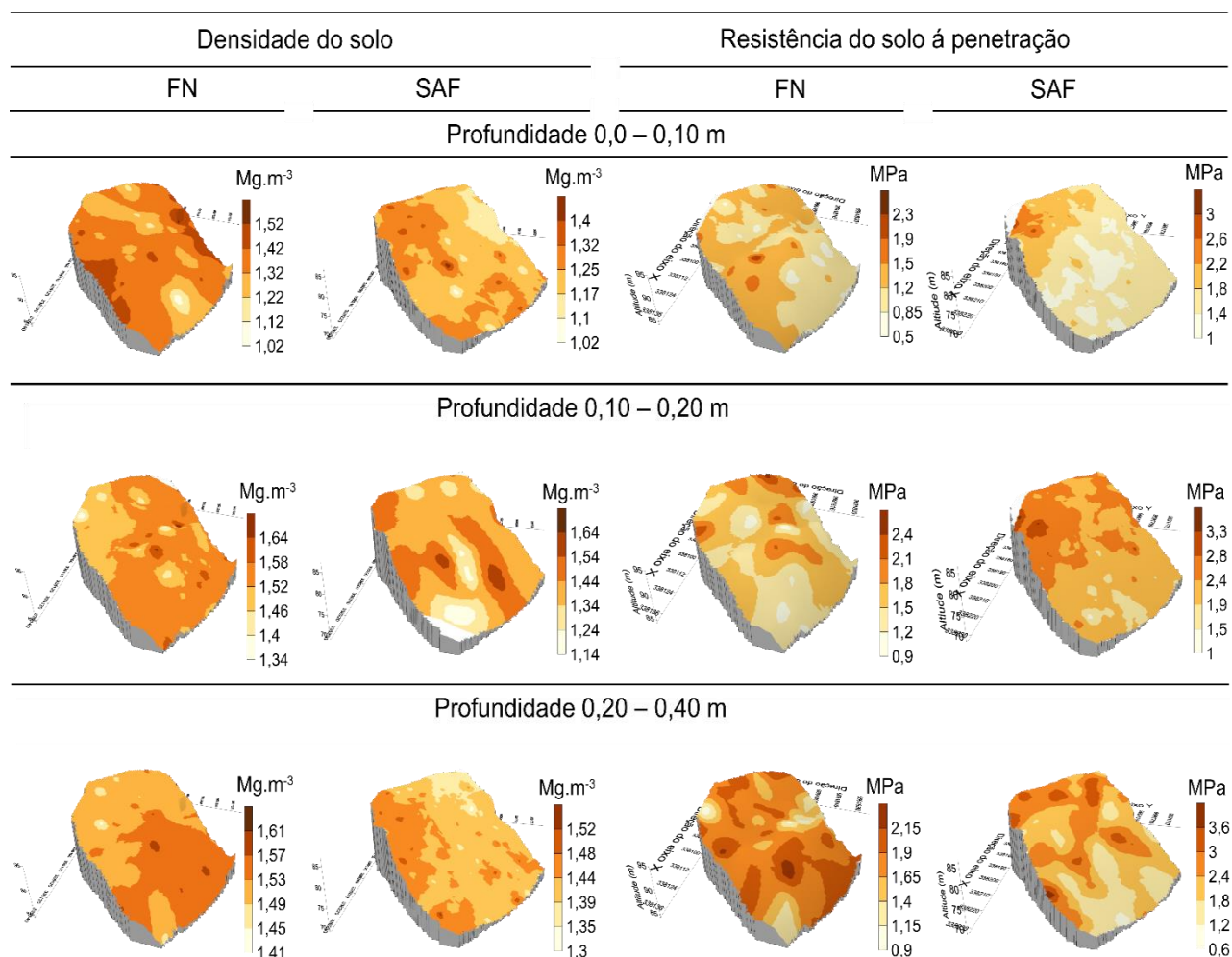
Figura 2 - Mapas de krigagem dos constituintes textural do solo em áreas de floresta nativa (FN) e sistema agroflorestal (SAF) na profundidade de 0,00-0,10 m, no Médio Amazonas



Fonte: Os autores, 2023.

Verifica-se nos mapas de isolinhas da textura do solo (Figura 2), a distribuição superficial da areia em FN concentra-se nas regiões mais baixa do terreno, onde são observadas as maiores manchas que oscilam entre 435 a 480 g kg⁻¹, o mesmo acontece na área de SAF (405 e 460 g kg⁻¹), enquanto o silte e argila nas áreas de maiores elevações, o que demonstra a atuação do relevo na variabilidade espacial dessas partículas (ALHO; NASCIMENTO, 2015). A presença de microrrelevo na área de estudo, influenciados pelo movimento da água no solo, transporta as partículas primária do solo das partes mais alta para as áreas mais baixa (OLIVEIRA *et al.*, 2013b).

Figura 3 - Mapas de krigagem da densidade do solo e resistência do solo a penetração em áreas de floresta nativa (FN) e sistema agroflorestal (SAF) em três profundidades na Amazônia Central



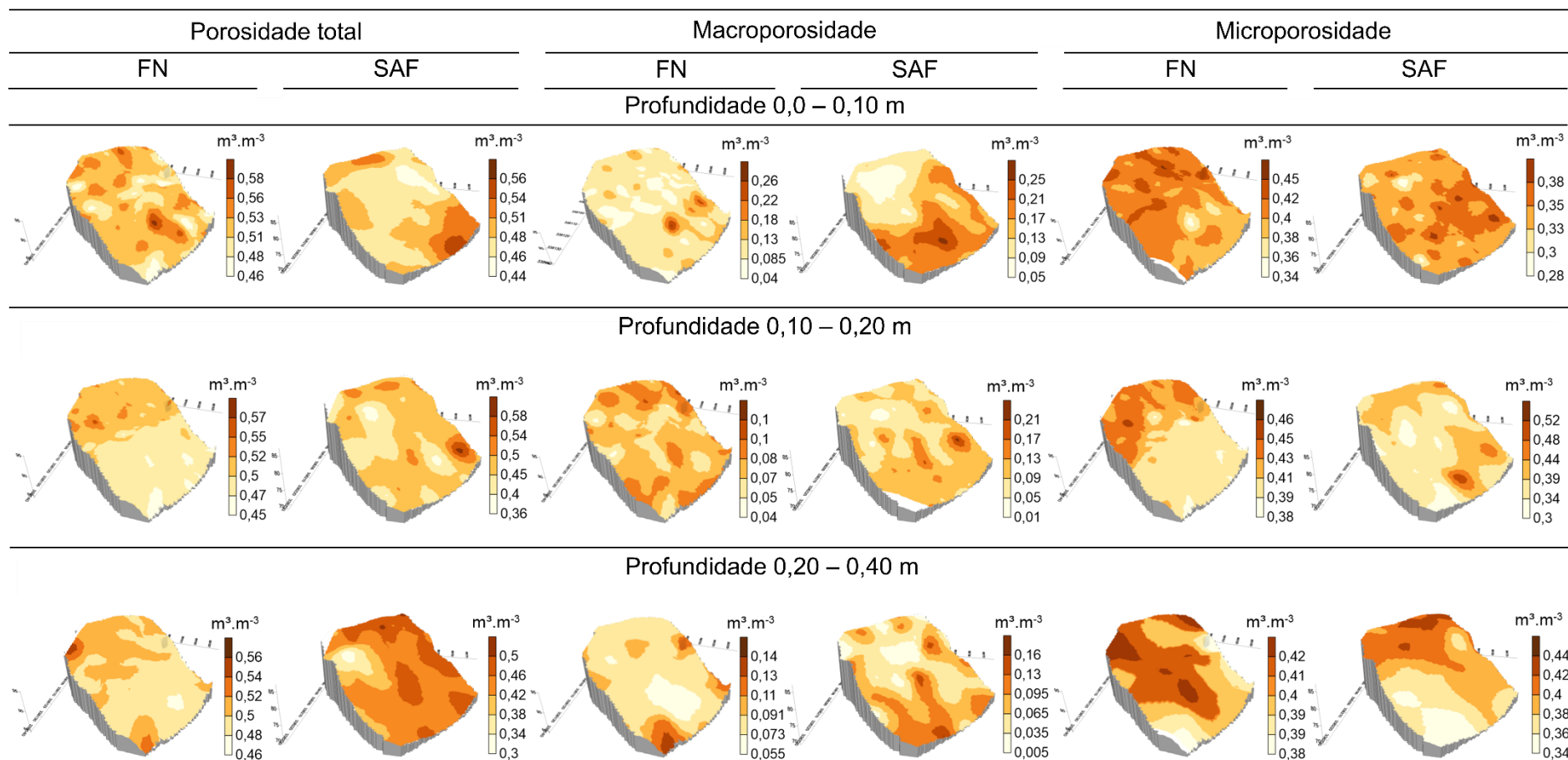
Fonte: Os autores, 2023.

Retificar – Resistência do solo à penetração

É importante observar que as maiores manchas nos mapas de FN para D_s (variando entre 1,3 e 1,5 Mg m^{-3}) (Figura 3) e MiP (variando entre 0,41 e 0,42 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) (Figura 4), foram superiores em relação aos mapas de SAF (D_s variando entre 1,1 e 1,4 Mg m^{-3} e a MiP variando entre 0,34 e 0,39 $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), fato que pode ser justificado ao maior aporte de material vegetativo ou ainda, a diferença no teor de areia entre os dois ambientes. Afinal, valores de D_s acima de 1,4 Mg m^{-3} já podem causar restrições ao crescimento radicular das plantas (ARSHAD; LOWERY; GROSSMAN, 1996; PACHECO *et al.*, 2015), visto que a porosidade do solo está relacionada com a densidade, ocasionando comportamento similar (CARDOSO *et al.* 2011).

A RSP foi o atributo que apresentou maior variabilidade como um todo, com manchas nos mapas mais irregulares e em maior quantidade (Figura 4), isso se deve à sensibilidade do atributo às alterações na estrutura, agregação, aeração e número de poros do solo proporcionadas pelo manejo contínuo (BOTTEGA *et al.*, 2011; CAMPOS *et al.*, 2013b). Assim, a RSP pode ser considerada um dos atributos que mais refletem as alterações à qualidade física do solo (VALADÃO *et al.*, 2015).

Figura 4 - Mapas de krigagem da porosidade total, macro e microporosidade em áreas de floresta nativa (FN) e sistema agroflorestal (SAF) em três profundidades na Amazônia Central



Fonte: Os autores, 2023.

Os mapas de FN dos atributos físicos estudados (Figuras 3 e 4) mostram-se com maior heterogeneidade, na camada superficial do solo (0,0 – 0,10 m). A mesma tendência foi constatada no SAF, à medida que se aumenta a profundidade, exceto para a Pt. Isso pode ser atribuído às características das camadas superficiais, que possuem maior teor de matéria orgânica no solo, exercendo influência na variação de outros atributos físicos e químicos (BAYER; MIELNICZUK, 2008). Além disso, é na superfície do solo que ocorre a maior atividade da fauna e flora (Moço *et al.*, 2005; HUERTA; WAL, 2012). Com isso, é possível avançar no entendimento da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo ao longo do tempo, contribuindo para a aplicação de manejo conservacionista adequado e para a delimitação de zonas que demandam abordagens diferenciadas de manejo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manejo do solo com o SAF, na área de estudo, influenciou na variabilidade espacial dos atributos físicos do solo, principalmente na camada superficial de 0,0 – 0,10 m, provocando alterações na densidade do solo, resistência do solo à penetração e porosidade.

Todos os atributos físicos estudados apresentaram estrutura de dependência espacial, variando de forte a moderado grau de dependência nas profundidades analisadas.

A caracterização do padrão espacial dos indicadores de qualidade física do solo em sistemas conservacionistas, como o SAF, pode gerar informações úteis na definição de zonas mínimas de manejo distintas e viabilizar o trabalho de campo, reafirmando que o uso da ferramenta geoestatística e dos dados gerados podem contribuir para o conhecimento dos solos e ambientes da região.

AGRADECIMENTOS

A Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado do Amazonas (FAPEAM; PROSPAM 008/2021 - 54272.UNI849.8873.23082021), à Secretaria Estadual de Ciência, Tecnologia e Inovação (SECTI-AM) e governo do estado do Amazonas.

REFERÊNCIAS

- ALHO, L. C.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P.; MANTOVANELLI, B. C.; SOUZA, Z. M. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e estoque de carbono em Cambissolo e Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 44, n. 3, p. 246-254, 2014. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000300001>
- ALHO, L. C.; NASCIMENTO, M. F. Atributos físicos e geoespaciais de Argissolo sob floresta na região de Humaitá, AM. In: CAMPOS, M. C. C.; BERGAMIN, A. C.; CUNHA, J. M.; OLIVEIRA, I. A. (Org). **Caracterização dos atributos do solo em ambiente natural e transformado na região sul do Amazonas**. Goiânia: ed. PUC GOIÁS, 2015.
- ALVES, S. M. F.; QUEIROZ, D. M.; ALCANTRA, G. R.; REIS, E. F. Variabilidade espacial de atributos físico-químicos do solo usando técnicas de análise de componentes principais e geoestatística. **Bioci. J.**, v. 30, p. 22-30, 2014.
- ALVES, P. F. S.; KONDO, M. K.; FERREIRA, V. G.; SILVA, R. F.; GUERRA, J. V. S. Variabilidade espacial e análise multivariada dos atributos físicos do solo em uma microbacia do rio Pandeiros. **Geo UERJ**, [S. l.], n. 39, p. e40190, 2021. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2021.40190>
- AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; JÚNIOR, J. M.; OLIVEIRA, I. A.; MANTOVANELLI, B. C.; SOARES, M. D. R. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em Latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de Manicoré, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, n. 2, p. 397-406, 2014. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200004>
- AQUINO, R. E.; OLIVEIRA, I. A.; SILVA, D. M. P. Atributos físicos e químicos do solo avaliados por geoestatística em área com cana-de-açúcar. In: CAMPOS, M. C. C.; BERGAMIN, A. C.; CUNHA, J. M.; OLIVEIRA, I. A. (Org). **Caracterização dos atributos do solo em ambiente natural e transformado na região sul do Amazonas**. Goiânia: ed. PUC GOIÁS, 2015a.

- AQUINO, R. E.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; SIQUEIRA, D. S.; SOARES, M. D. R.; FREITAS, L. Técnicas geoestatísticas na avaliação de atributos químicos em Cambissolo com agrofloresta e cana-de-açúcar em Humaitá, Amazonas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 10, n. 4, p. 544-552, 2015b. <https://doi.org/10.5039/agraria.v10i4a3346>
- ARAUJO, W. O.; ALVARES, A. E. S.; EMERICK, H. F.; CRUZ, S. N.; OLIVEIRA, M. V.; SILVA, C. D. T.; ALMEIDA, W. S.; CAMPOS, M. C. C.; FREITAS, L.; OLIVEIRA, I. A. Impactos na variabilidade espacial da densidade e porosidade do solo em função da transformação de floresta em pastagem no Vale do Jamari, Rondônia. **Investigação, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 15, p. e284111537170, 2022. <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i15.37170>
- ARSHAD, M. A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J., eds. **Methods for assessing soil quality**. Soil Science Society of America: Madson, 1996. p. 123-141. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub49.c7>
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L.S. da; CANELLAS, L.P.; CAMARGO, F. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. rev. e atual. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 7-18.
- BOTTEGA, E. L.; BOTTEGA, S. P.; SILVA, S. A.; QUEIROZ, D. M.; SOUZA, C. M. A.; RAFULL, L. Z. L. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em um Latossolo Vermelho distroférrico. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, n. 2, p. 331-336, 2011. <https://doi.org/10.5039/agraria.v6i2a882>
- 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. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 44, n. 1, p. 1-9, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1806-66902013000100001>
- BRASIL NETO, A. B.; SANTOS, C. R. C.; NORONHA, N. C.; GAMA, M. A. P.; CARVALHO, E. J. M.; SILVA, A. R.; GUIMARÃES, I. V. P.; SOUZA, P. I. A. A. Matéria orgânica e atributos físico-hídricos de um latossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Agroecossistemas**, v. 10, n. 2, p. 147-164, 2018. <https://doi.org/10.18542/ragros.v10i2.5134>
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; VOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil science society of America journal**, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994. <https://doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>
- CAMPOS, M. C. C.; JUNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; SIQUEIRA, D. S. Variabilidade espacial da textura de solos de diferentes materiais de origem em Pereira Barreto, SP. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 38, n. 2, p. 149-157, 2007.
- CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; SANTOS, L. A. C.; AQUINO, R. E.; SOARES, M. D. R. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração e umidade em áreas cultivadas com mandioca na região de Humaitá, AM. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 6, n. 1, p. 09-16, 2012. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v6i1.689>
- CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; AQUINO, R. E.; BERGAMIN, A. C.; SILVA, D. A. P. Distribuição espacial de atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Revista Agro@mbiente On-line**, v. 7, n. 2, p. 119-128, 2013a. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v7i2.1262>
- CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; OLIVEIRA, I. A.; BERGAMIN, A. C. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 8, n. 2, p. 305-310, 2013b. <https://doi.org/10.5039/agraria.v8i2a2091>
- CARDOSO, E. L.; SILVA, M. L. N.; CURI, N.; FERREIRA, M. M.; FREITAS, D. A. F. Qualidade química e física do solo sob vegetação arbórea nativa e pastagens no Pantanal Sul-Mato-Grossense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 2, p. 613-622, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200030>
- CARMO, M.; CUNICO, J.; SANTOS, M.; SILVA, P.; SIQUEIRA, M. Densidade e porosidade do solo em pastagem recuperada e degradada, na Amazônia Ocidental. **Agrarian Academy**, [S. l.], v. 5, n. 09, 2018. https://doi.org/10.18677/Agrarian_Academy_2018a15

- CARNEIRO, M. A. C.; SOUZA, E. D.; REIS, E. F.; PEREIRA, H. S.; AZEVEDO, W. R. Atributos físicos, químicos e biológicos de solo de cerrado sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 33, n. 1, p. 147-157, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100016>
- CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J.; ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 39, n. 11, p. 1153-1155, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2004001100015>
- CAVALCANTE, E. G.; ALVES, M. C.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 3, p. 237-243, 2011. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000300003>
- COUTO, W. H.; ANJOS, L. H. C.; WADT, P. G. S.; PEREIRA, M. G. Atributos edáficos e resistência a penetração em áreas de sistemas agroflorestais no sudoeste amazônico. **Revista Ciência Florestal**, Santa Maria, RS, v. 26, n. 3, p. 811-823, jul-set., 2016. <https://doi.org/10.5902/1980509824210>
- CRUZ, J. S.; JUNIOR, R. N. A.; MATIAS, S. S. R.; CAMACHO-TAMAYO, J. H.; TAVARES, R. C. Análise espacial de atributos físicos e carbono orgânico em Argissolo Vermelho-Amarelo cultivado com cana-de-açúcar. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 2, p. 271-278, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000200001>
- CUNHA, E. Q.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. B.; DIDONET, A. D.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho: I- Atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 589-602, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200028>
- DENARDIN, R. B. N.; MATTIAS, J. L.; WILDNER, L. P.; NESI, C. N.; SORDI, A.; KOLLING, D. F.; BUSNELLO, F. J.; CERUTTI, T. Estoque de carbono no solo sob diferentes formações florestais, Chapecó-SC. **Ciência Florestal**, v. 24, n. 1, p. 59-69, 2014. <https://doi.org/10.5902/1980509813323>
- DEXTER, A. R. Mechanics of root growth. **Plant and Soil**, v. 98, p. 303–312, 1987. <https://doi.org/10.1007/BF02378351>
- DEXTER, A. R. Advances in characterization of soil structure. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 11, n. 3, p. 199-238, 1998. [https://doi.org/10.1016/0167-1987\(88\)90002-5](https://doi.org/10.1016/0167-1987(88)90002-5)
- ENCK, B. F.; RODRIGUES, J. C. W. R.; HASSANE, A. L.; TEMPOL, R. A.; CAMPOS, M. C. C.; SANTOS, L. A. C.; BRITO, W. B. M. Impacto nos atributos do solo sob conversão de floresta para áreas cultivadas na região sul do Amazonas, Brasil. **Geografia Ensino e Pesquisa**, v. 24, p. e54, 2020. <https://doi.org/10.5902/2236499443591>
- FONSECA, G. C.; CARNEIRO, M. A. C.; COSTA, A. R.; OLIVEIRA, G. C.; BALBINO, L. C. Atributos físicos, químicos e biológicos de latossolo vermelho distrófico de cerrado sob duas rotações de cultura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 37, n. 1, p. 22–30, 2007.
- FREITAS, A. C. A. **Estimativas para o estoque de carbono do solo ao longo de um gradiente topográfico na Amazônia central**. 2013, 61. Dissertação (Ciências de Florestas Tropicais) – Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia, Manaus, AM, 2013.
- FREITAS, L.; CASSAGRANDE, J. C.; OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, L. S. Técnicas multivariadas na avaliação de atributos de um Latossolo vermelho submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 1, p. 17-26, 2015. <https://doi.org/10.5039/agraria.v10i1a3928>
- FROZZI, J. C.; CUNHA, J. M.; CAMPOS, M. C. C.; BERGAMIN, A. C.; FRANCISCON, U.; SILVA, D. M. P.; LIMA, A. F. L.; FILHO, E. G. B. Atributos físicos, carbono orgânico e dimensão fractal da textura em solos sob ambientes naturais e antropizados da região sul do Amazonas. In: CUNHA, J. M.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P. (Org). **Solo, água, planta e variáveis ambientais: impactos e suas transformações no sul do Amazonas**. Ponta Grossa. PR: ATENA, 2022. <https://doi.org/10.22533/at.ed.3432219052>

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 2, p. 169-177, 2005.

<https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000200002>

GUIMARÃES, R. M. L.; GONÇALVES, A. C. A.; TORMENA, C. A.; FOLEGATTI, M. V.; BLAINSKI, E. Variabilidade espacial de propriedades físico-hídricas de um Nitossolo sob a cultura do feijoeiro irrigado. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 657-669,

2010 <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000400010>

HUERTA, E.; WAL, H. Soil macroinvertebrates abundance and diversity in home gardens in Tabasco, Mexico, vary with soil texture, organic matter and vegetation cover. **European Journal Soil Biology**, Oxford, v. 50, n. 12, p. 68-75, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2011.12.007>

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. **Estado do Amazonas Pedologia**: Mapa Exploratório dos Solos. 1: 1.800.000. Brasil: IBGE

ISAACS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**, Oxford University, p. 279-3007, 1989.

JORDÃO, H. W. C.; CAMPOS, M. C. C.; FROZZI, J. C.; MANTOVANELLI, B. C.; CUNHA, J. M.; SILVA, D. M. P. Atributos químicos de solos sob ambientes naturais e antropizados na região de Humaitá – AM. In: CUNHA, J. M.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P.; SOUZA, R. F. S. (Org). **Solos Amazônicos: Qualidade estrutural, físico, químico e suas correlações geoespacial no Sul do Amazonas**. Ponta Grossa. PR: ATENA, 2022. <https://doi.org/10.22533/at.ed.4732219052>

KAMIMURA, K. M.; SANTOS, G. R.; OLIVEIRA, M. S.; DIAS JUNIOR, M. SOUZA. GUIMARÃES, P. T. G. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo, sob lavoura cafeeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, n. 4, p. 877-888, 2013.

<https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400006>

LIMA, C. G. R.; CARVALHO, M. P.; MELLO, L. M. M.; LIMA, R. C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de forragem, a porosidade total e a densidade do solo de Pereira Barreto (SP). **Revista Brasileira de Ciência do solo**, Viçosa, v. 31, n. 6, p. 1233-1244, 2007.

<https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000600002>

LONG, R. M.; GREGO, C. R.; RODRIGUES, C. A. G.; NOGUEIRA, S. F.; FURTADO, A. L. S. Indicadores físicos da qualidade do solo relacionados espacialmente com a produtividade da cana-de-açúcar e pastagem. In: CONGRESSO INTERINSTITUCIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 6., 2012. Jaguariúna, SP. Anais. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2012.

LOPES, E. S.; OLIVEIRA, D.; RODRIGUES, C. K.; DRINKO, D. H. Compactação de um Solo Submetido ao Tráfego do Harvester e do Forwarder na Colheita de Madeira. **Floresta e Ambiente**, v. 22, n. 2, p. 223-230, 2015. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.046413>

MANTOVANELLI, B. C.; SILVA, D. A. P.; CAMPOS, M. C. C.; GOMES, R. P.; SOARES, M. D. R.; SANTOS, L. A. C. Avaliação dos atributos do solo sob diferentes usos na região de Humaitá, Amazonas. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v. 58, n. 2, p. 122-130, 2015a. <https://doi.org/10.4322/rca.1822>

MANTOVANELLI, B. C.; ALHO, L. C.; SILVA, D. A. P. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo sob campo natural na região Sul do Amazonas. In: CAMPOS, M. C. C.; BERGAMIN, A. C.; CUNHA, J. M.; OLIVEIRA, I. A. (Org). **Caracterização dos atributos do solo em ambiente natural e transformado na região sul do Amazonas**. Goiânia: ed. PUC GOIÁS, 2015b.

MARCHINI, D. C.; LING, T. G. C.; ALVES, M. C.; CRESTANA, S.; SOUTO FILHO, S. N.; ARRUDA, O. G. Matéria orgânica, infiltração e imagens tomográficas de Latossolo em recuperação sob diferentes tipos de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 6, p. 574-580, 2015. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n6p574-580>

MAZURANA, M.; FINK, J. R.; SILVEIRA, V. H.; LEVIEN, R.; ZULPO, L.; BREZOLIN, D. Propriedades físicas do solo e crescimento de raízes de milho em um Argissolo Vermelho sob tráfego controlado de máquinas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 5, p. 1185-1195, 2013.

<https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000500008>

- MELO, V. S.; MARQUES, J. D.; SILVA JÚNIOR, M. L.; MEYER, L. F. F.; DIAS, V. H. R.; AGUIAR, T. S.; TEIXEIRA, O. M. M. Atributos físicos e químicos de solos sob diferentes tipos de uso e manejo no assentamento Abril Vermelho, Amazônia Oriental. **Conjecturas**, [S. l.], v. 22, p. 79–97, 2021. <https://doi.org/10.53660/CONJ-453-521>
- MOÇO, M. K. S.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; CORREIA, M. E. F. Caracterização da fauna edáfica em diferentes coberturas vegetais na região Norte Fluminense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 4, p. 555-564, 2005. DOI. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832005000400008>.
- NEVES JUNIOR, A. F.; SILVA, A. P.; NORNHA, N. C.; CERRI, C. C. Sistemas de manejo do solo na recuperação de uma pastagem degradada em Rondônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 232-241, 2013. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000100024>
- OLIVEIRA, I. A.; CAMPOS, M. C. C.; SOARES, M. D. R.; AQUINO, R. E.; JÚNIOR, J. M.; NASCIMENTO, E. P. Variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do Amazonas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 1103–1112, jul. 2013a. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832013000400027>
- OLIVEIRA, D. P.; FERREIRA, T. O.; ROMERO, R. E.; FARIAS, P. R. S.; COSTA, M. C. G. Microrrelevo e a distribuição de frações granulométricas em Cambissolos de origem calcária. **Revista Ciência Agronômica**, v. 44, n. 4, p. 676–684, out. 2013b.
- OLIVEIRA, I. A.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; SOARES, M. D. R. Geoestatística na caracterização da variabilidade e densidade amostral de atributos físicos e químicos de um Cambissolo cultivado com mandioca. In: CAMPOS, M. C. C.; BERGAMIN, A. C.; CUNHA, J. M.; OLIVEIRA, I. A. (Org). **Caracterização dos atributos do solo em ambiente natural e transformado na região sul do Amazonas**. Goiânia: ed. PUC GOIÁS, 2015a.
- OLIVEIRA, D.; LIMA, R. P.; VERBURG, E. E. J. Qualidade física do solo sob diferentes sistemas de manejo e aplicação de dejetos líquido suíno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 19, n. 3, p. 280-285, 2015b. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n3p280-285>
- PACHECO, L. P.; MIGUEL, A. S. D. C. S.; SILVA, E. M. B.; SOUZA, E. D.; SILVA, F. D. Influência da densidade do solo em atributos da parte aérea e sistema radicular de crotalária. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 4, p. 464-472, 2015. <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4538107>
- PARENTE, H. N.; MAIA, M. O. Impacto do pastejo sobre a compactação dos solos com ênfase no Semiárido. **Revista Trópica: Ciências Agrárias**, Chapadinho, v. 5, n. 3, p. 3-15, 2011.
- REICHERT, J. M.; KAISER, D. R.; REINERT, D. J.; RIQUELME, U. F. B. Variação temporal de propriedades físicas do solo e crescimento radicular de feijoeiro em quatro sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 44, p. 310-319, 2009. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000300013>
- REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, v. 27, n. 2, p. 29-48, 2003.
- RIGHI, C. A.; BERNARDES, M. S. Sistemas Agroflorestais: definição e perspectivas. **Cadernos da Disciplina de Sistemas Agroflorestais**, v. 1, p. 1-5, 2015.
- ROBERTSON, G. P. (1998). GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ user's guide. Plainwell: Gamma Design Software.
- ROQUE, A. A. O.; SOUZA, Z. M.; BARBOSA, R. S.; SOUZA, G. S. Controle de tráfego agrícola e atributos físicos do solo em área cultivada com cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 7, p. 744-750, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2010000700016>
- SERAFIM, M. E.; VITORINO, A. C. T.; SOUZA, C. M. A.; PRADO, E. D.; VENTURIN, J. C.; YAMAMOTO, N. T. Desenvolvimento de um penetrógrafo eletromecânico de bancada. **Revista Científica e Técnica Agropecuária**, v. 17, n. 1, p. 61-65, 2008.
- SILVA, J. M. L.; RODRIGUES, T. E. **Levantamento de solos de alta intensidade do Município de Silves-Estado do Amazonas**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, p. 55, 2003.

SILVA, M. P.; ARF, O.; SÁ, M. E.; ABRANTES, F. L.; BERTI, C. L. F.; SOUZA, L. C. D. Plantas de cobertura e qualidade química e física de Latossolo Vermelho distrófico sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 12, n. 1, p. 60-67, 2017.

<https://doi.org/10.5039/agraria.v12i1a5424>

SILVA, G. R.; PAULETTO, D.; SILVA, A. R. Dinâmica sazonal de nutrientes e atributos físicos do solo em sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 63, 2020.

SILVA, G. A.; FILHO, E. G. B.; CUNHA, J. M.; CAMPOS, M. C. C.; SALES, M. C. G.; BELLO, O. C.; LIMA, A. F. L.; BARBOSA, J. M. S.; LIMA, J. M. G. Aspectos dos atributos físicos e químicos do solo em ambientes naturais e áreas com sistema agroflorestal no sul do Amazonas. **Scientia Plena**, v. 18, n. 7, 070205 2022. <https://doi.org/10.14808/sci.plena.2022.070205>

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M.; BRITO, W. B. M.; FRANCISCON, U.; CASTIONI, G. A. F. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em área de Terra Preta Arqueológica sob pastagem em Manicoré, AM. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 58, n. 4, p. 434-441, 2015.

<https://doi.org/10.4322/rca.1975>

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; CUNHA, J. M.; SANTOS, L. A. C.; FONSECA, J. S.; SOUZA, Z. M. Atributos físicos do solo em áreas sob diferentes sistemas de usos na região de Manicoré, AM. **Revista de Ciências Agrárias-Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, Belém, v. 59, n. 1, p. 9-15, 2016. <https://doi.org/10.4322/rca.2020>

SOARES, M. D. R.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; CUNHA, J. M.; SOUZA, Z. M.; AQUINO, R. E.; SILVA, D. M. P.; SILVA, J. F. Variabilidade espacial dos atributos do solo sob agrofloresta na região de Humaitá, AM. **Gaia Scientia**, [S. l.], v. 12, n. 1, 2018. <https://doi.org/10.22478/ufpb.1981-1268.2018v12n1.34353>

SOUZA, F. G.; CAMPOS, M. C. C.; CUNHA, J. M.; MARTINS, T. S.; LIMA, A. F. L.; BRITO, W. B. M. Estabilidade de agregados e estoque de carbono sob conversão de floresta para diferentes sistemas de cultivo no sul do Amazonas, Brasil. In: CUNHA, J. M.; CAMPOS, M. C. C.; SILVA, D. M. P. (Org). **Solo, água, planta e variáveis ambientais: impactos e suas transformações no sul do Amazonas**. Ponta Grossa. PR: Atena, 2022. <https://doi.org/10.22533/at.ed.4732219057>

SOUZA, F. G.; CAMPOS, M. C. C.; MANTOVANELLI, B. C.; SANTOS, R. V.; CUNHA, J. M.; OLIVEIRA, F. P.; LIMA, A. F. L.; BRITO, W. B. M.; FREITAS, L.; FILHO, E. G. B.; SILVA, J. B.; ALMEIDA, R. G. Spatial variability of soil resistance penetration in forest areas converted for agricultural uses in the Amazon, Brazil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 17, n. 1, p. 332–348, 2024. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.1.p332-348>

SURFER, S., 1999. 7.0. **Contouring and 3D Surface Mapping for Scientist's Engineers**. User's Guide. Golden software Inc, New York.

STATSOFT INC. **Statistica** - data analysis software system, 2004.

TAVARES-SILVA, C. A.; MARIOTTO CEZAR, T. C.; PEREIRA NÓBREGA, L. H. Porosidade de Latossolos e práticas de manejo agrícola visando conservação do solo. **Varia Scientia Agrárias**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 153–164, 2011.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. (Eds.). **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 3ª ed. Revista e ampliada. – Brasília, DF: Embrapa, 2017, 573 p.

TEZOLIN, T. A.; MONTEIRO, F. N.; FALCÃO, K. S.; MENEZES, R. S.; XIMENES, TS; PANACHUKI, E.; CARVALHO, L. A. Atributos físicos do solo em diferentes sistemas de produção agrícola. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, [S. l.], v. 1, p. e5110111278, 2021. <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i1.11278>

TORMENA, C. A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 20, n. 2, p. 333-339, 1996.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in agronomy**, v.38, p. 45-94, 1985. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60673-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60673-2)

VALADÃO, F. C. A.; WEBER, O. L. S.; VALADÃO JÚNIOR, D. D.; SCAPINELLI, A.; DEINA, F. R.; BIANCHINI, A. Adubação fosfatada e compactação do solo: sistema radicular da soja e do milho e atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 243-255, 2015. <https://doi.org/10.1590/01000683rbcS20150144>

VIANA, E. T.; BATISTA, M. A.; TORMENA, C. A.; COSTA, A. C. S.; INOUE, T. T. Atributos físicos e carbono orgânico em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 6, p. 2105-2114, 2011. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000600025>

VIEIRA, S. R. J. L.; HATFIELD, J.; NIELSEN, D.; BIGGAR, J. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983. <https://doi.org/10.3733/hilg.v51n03p075>

WANDERLEY, H. S.; AMORIM, R. F. C.; CARVALHO, F. O. Interpolação espacial da precipitação no Estado de Alagoas utilizando técnicas geoestatística. **Campo Digital**, v. 8, n. 1, p. 1-12, 2013.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-348580-9.50018-3>

Recebido em: 30/11/2023

Aceito para publicação em: 28/05/2024