










Article

# Geoestatística Aplicada a Atributos Físicos e Químicos em Área com Mandioca na Região de Humaitá, Amazonas

Ivanildo Amorim de Oliveira <sup>1</sup>, Robson Vinício dos Santos <sup>2</sup>, Douglas Marcelo Pinheiro da Silva <sup>3</sup>, Romária Gomes de Almeida <sup>4</sup>, Ludmila de Freitas <sup>5</sup>, José Maurício da Cunha <sup>6</sup>, Flávio Pereira de Oliveira <sup>7</sup>, Emanuel da Costa Cavalcante <sup>8</sup>, Milton César Costa Campos <sup>9</sup>

<sup>1</sup> Doutor. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia. ORCID: 0000-0003-2299-3229. E-mail: ivanildo.oliveira@ifro.edu.br

<sup>2</sup> Graduando. Universidade Federal da Paraíba. ORCID: 0000-0003-0339-6197. E-mail: robson4651@hotmail.com

<sup>3</sup> Doutor. Universidade Federal do Amazonas – UFAM. ORCID: 0000-0001-8147-5726. E-mail: douglasmarcelo@gmail.com

<sup>4</sup> Mestra. Universidade Federal do Amazonas - UFAM. ORCID: 0000-0001-6380-4370. E-mail: ro\_gomes14@hotmail.com

<sup>5</sup> Doutora. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Rondônia - IFRO. ORCID: 0000-0002-9976-3387. E-mail: ludmila.freitas@ifro.edu.br

<sup>6</sup> Doutor. Universidade Federal do Amazonas – UFAM. ORCID: 0000-0003-4057-1708. E-mail: mauj@gmail.com

<sup>7</sup> Doutor. Universidade Federal da Paraíba – UFPB. ORCID: 0000-0001-7968-6145. E-mail: flavio.oliveira@academico.ufpb.br

<sup>8</sup> Mestrando. Universidade Federal da Paraíba – UFPB. ORCID: 0000-0003-3015-4847. E-mail: emanueltfc@gmail.com

<sup>9</sup> Doutor. Universidade Federal da Paraíba – UFPB. ORCID: 0000-0002-8183-7069. E-mail: mcesarsolos@gmail.com

## RESUMO

A mandioca é uma cultura de grande importância regional devido à sua adaptabilidade e excelente fonte de proteína, por outro lado, o sistema de manejo é fundamental para o sucesso do cultivo. O objetivo deste estudo foi utilizar semivariogramas escalonados para determinar a variabilidade espacial e o planejamento amostral de atributos físicos e químicos em um Cambissolo Háplico cultivado com mandioca na região de Humaitá, Amazonas. O experimento foi realizado em um Cambissolo Háplico cultivado com mandioca, estabelecendo-se uma malha de 70 x 70 m. Foram coletadas 64 amostras de solos deformadas e indeformadas com espaçamento regular de 10 m na profundidade de 0,0-0,20 m para determinação dos atributos químicos e físicos. Os dados foram submetidos a análises estatísticas descritivas e geoestatística. Concluiu-se que os atributos físicos apresentam maior variabilidade espacial em relação aos atributos químicos do solo, apresentando alcance de 30 e 42 metros respectivamente no ajuste do semivariograma escalonado. Com base no semivariograma escalonado, para caracterização da variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em Cambissolo cultivado com mandioca, a densidade amostral é de 11 e 6 pontos ha<sup>-1</sup> respectivamente. O uso de semivariograma escalonado é eficiente na determinação da densidade amostral, pois apresentam valores de alcance próximos aos valores médios dos atributos analisados individualmente.

**Palavras-chave:** krigagem; variabilidade espacial; densidade amostral.

## ABSTRACT

Cassava is a regional culture of great importance because of its adaptability and an excellent source of protein, on the other hand, the management system is critical to the success of cultivation. This study aimed to use a scaled semivariogram to determine the spatial variability and sample planning of physical and chemical attributes in a Cambissolo cultivated with cassava in the region of Humaitá, Amazonas. The experiment was conducted in a Cambissolo cultivated with cassava, establishing a grid of 70 x 70 m. We collected 64 samples of soil disturbed and undisturbed with a regular spacing of 10 m in depth, 0.0-0.20 m to determine chemical attributes and physical. The data were subjected to analysis descriptive statistics and geostatistics. It was concluded that the physical attributes have higher spatial variability concerning chemical attributes of the soil showing a range of 30 and 42 meters, respectively, in the adjustment of the scaled semivariogram. Based on the scaled semivariogram, to characterize the spatial variability of physical attributes and chemicals in Cambissolo cultivated with cassava, the sampling density is 11 and 6 points ha<sup>-1</sup> respectively. The use of



Submissão: 22/05/2023



Aceite: 27/05/2024



Publicação: 15/07/2024



a scaled semivariogram is efficient in determining the sampling density because the present values range close to the average values of attributes analyzed individually.

**Keywords:** kriging; spatial variability; sampling density.

## Introdução

O uso indiscriminado das terras agricultáveis para a produção vegetal e animal tem causado a perda da fertilidade natural e da qualidade física do solo (Lima et al. 2022c). A ocupação e substituição de áreas antes florestadas por áreas agrícolas sem o devido critério técnico é sem dúvida um dos principais problemas causados pela ação antrópica na região Amazônica. Problemas estes que afetam diretamente a preservação dos recursos naturais e consequentemente os atributos do solo (Fonseca et al. 2021).

Neste sentido a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) é uma cultura de grande importância regional devido à sua adaptabilidade e se desenvolve bem em várias regiões do Brasil (Oliveira et al. 2020). A mandioca está presente na maioria das pequenas propriedades familiares, por ser importante fonte de carboidratos na alimentação humana e animal (Pacheco et al. 2024), sendo cultivada em grande parte do estado do Amazonas como espécie de subsistência e fonte de renda para os moradores. O preparo do solo para seu cultivo é tradicionalmente realizado com arações e gradagens, o que pode ocasionar problemas de erosão, compactação e empobrecimento progressivo do solo, com consequente diminuição da produtividade dos cultivos (Frozzi et al. 2020).

O uso e manejo inadequado do solo proporciona alterações nos seus atributos, ocasionando degradação, em razão de diversos processos que levam ao depauperamento das características físicas, químicas e biológicas (Silva et al. 2024), podendo comprometer a capacidade produtiva (Souza et al. 2024). A degradação das características físicas é um dos principais processos responsáveis pela perda da qualidade estrutural do solo (Oliveira et al. 2023) e a degradação das características químicas responsável pela perda da fertilidade e consequente perda de produtividade das culturas. Com o intuito de avaliar o impacto causado pelo uso e ocupação do solo de maneira quantitativa, alguns pesquisadores tem utilizado a geoestatística (Lima et al. 2024) para auxiliar na caracterização do padrão de variabilidade de atributos físicos e químicos (Souza et al. 2023a).

As grandes dificuldades encontradas nos estudos de variabilidade espacial dos atributos do solo na região deve-se possivelmente a dois fatores: i) grande extensão territorial da região amazônica e carência de pesquisadores e ii) a 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 estudos que utilizam as técnicas geoestatísticas têm sido realizados para determinar a variabilidade espacial de atributos do solo (Araújo et al. 2023), por meio do semivariograma escalonado (Martins et al. 2023a) conjuntamente com o uso do software Sanos para subsidiar o planejamento amostral para caracterização da variabilidade (Praça et al. 2023).

A densidade amostral é um importante fator para determinação dos atributos do solo e sua variabilidade. Martins et al. (2023b) afirmam que cerca de 80-85 % dos erros cometidos na aplicação de insumos agrícolas, como fertilizantes e corretivos do solo, podem ser atribuídos a amostragem mal planejada. O estudo dos aspectos da amostragem do solo, a fim de subsidiar definições sobre a utilização e recomendação das técnicas de amostragem em ambientes distintos, tem sido preocupação constante dos pesquisadores (Souza et al. 2023b; Brito et al. 2022).

O objetivo deste estudo foi utilizar semivariogramas escalonados para determinar a variabilidade espacial e o planejamento amostral de atributos físicos e químicos em um Cambissolo Háplico, cultivado com mandioca na região de Humaitá, Amazonas.



## Material e Métodos

A área de estudo localiza-se no município de Humaitá, sul do Estado do Amazonas, imediações da BR 119 km 50 sentido Humaitá/AM para Porto Velho/RO, situada nas coordenadas geográficas: 7° 30' 24" S e 63° 04'56" W, altitude de 73 m. O material de origem é proveniente dos sedimentos aluviais antigos, que são cronologicamente oriundos do Holoceno. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo tropical chuvoso, com um período seco de pequena duração (Am), e temperaturas variando entre 25 °C e 27 °C, e com precipitações pluviais entre 2.250 e 2.750 mm anuais, com chuvas concentradas no período de outubro a junho.

O experimento foi realizado em um Cambissolo Háplico Alítico plúntico, A moderado, textura média de acordo com o Sistema Brasileira de Classificação do Solo (Santos et al. 2018), com 10 anos de cultivo sucessivo de mandioca, sendo que esta foi corrigida, adubada e gradeada apenas no segundo ano de cultivo e a cultura encontrava-se no quarto mês de plantio. Foi realizado o mapeamento da área, estabelecendo-se uma malha de 70 x 70 m, abrangendo uma área de 0,49 hectares. As amostras de solo foram coletadas nos pontos de cruzamento da malha na profundidade de 0,0-0,20 m, com espaçamentos regulares de 10 m, perfazendo um total de 64 pontos (Figura 1). Os pontos foram georreferenciados com um receptor de GPS Garmin Etrex com acurácia de 2,00 m (South American'69).

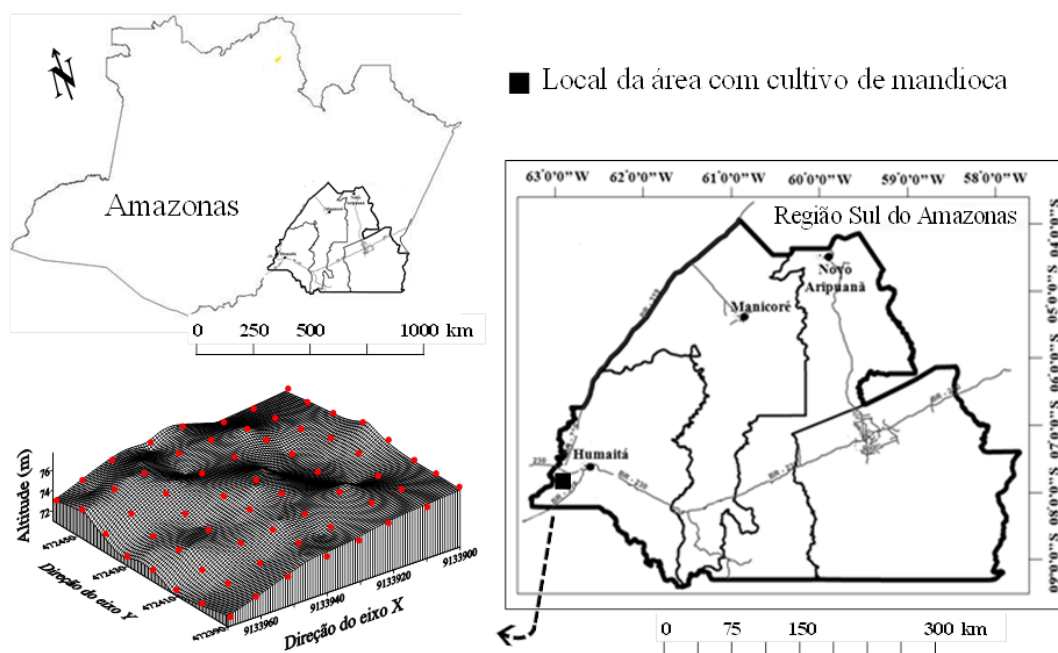


Figura 1. Mapa de localização e modelo de elevação digital da área de mandioca em Humaitá, AM. Fonte: Oliveira et al. (2023).

A análise granulométrica foi realizada pelo método da pipeta utilizando solução de NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de alta rotação (~15.000 rpm) por 15 min, seguindo método proposto por Teixeira et al. (2017). A fração argila foi separada por sedimentação, as areias grossa e fina por tamisação e o silte foi calculado por diferença.

As coletas de solo com estrutura preservada foram realizadas por meio de anel volumétrico com 0,045 m de altura e 0,045 m de diâmetro. Em seguida, foram saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir cerca de 2/3 da altura do anel, para determinação da porosidade total (Pt) obtida pela diferença entre a massa do solo saturado e a massa do solo seco em estufa a 105° C durante 24 h (Teixeira et al. 2017). A microporosidade do solo foi determinada pelo método da mesa de tensão, segundo metodologia estabelecida



por Teixeira et al. (2017). Pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade, obteve-se a macroporosidade. A densidade do solo (Ds) foi 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 (Teixeira et al. 2017).

Em cada ponto amostral, foram coletadas amostras com estrutura preservada na forma de “torrão”, para determinação da estabilidade dos agregados do solo. Estas amostras foram levemente destorroadas, de forma manual e passadas em peneira de 9,51 mm de diâmetro de malha e retidos na peneira de 4,76 mm, secadas à sombra, para as análises relativas à estabilidade de agregados via úmida segundo Kemper & Chepil (1965). Os agregados foram colocados sobre um jogo de peneiras com malhas de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,125; e 0,063 mm e submetendo-as a oscilações verticais durante 15 min, numa frequência de 32 oscilações por min. e a massa do material retido em cada peneira, foi levada a estufa a 105°C por pelo menos 48 horas. A estabilidade dos agregados foi determinada adotando os índices de estabilidade tais como os agregados nas classes >2,00, 2,00-1,00 e <1,00 mm, o diâmetro médio geométrico (DMG) e o diâmetro médio ponderado (DMP).

A umidade gravimétrica no solo foi determinada com amostras deformadas, conforme proposto por Teixeira et al. (2017). Para a determinação da resistência do solo a penetração (RSP) a campo, foi utilizado um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar, com ângulo de cone de 30° e área do cone de 1,29 cm<sup>2</sup>, seguindo-se as normas da ASAES 313 (Asabe 2006). A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto) em resistência à penetração foi obtida segundo Stolf (1991), aplicando a Equação 1.

$$R = \frac{Mg + mg + \left( \frac{M}{M+m} * \frac{Mg * h}{x} \right)}{A} \quad \text{Eq. (1)}$$

Onde:

R = resistência do solo à penetração, kgf cm<sup>-2</sup> (kgf cm<sup>-2</sup> × 0,098 = MPa); M = massa do êmbolo, 4 kg (Mg – 4 kgf); m = massa do aparelho sem êmbolo, 3,2 kg (mg – 3,2 kgf); h = altura de queda do êmbolo, 40 cm; x = penetração da haste do aparelho, cm impacto<sup>-1</sup>; A = área do cone, 1,29 cm<sup>2</sup>.

Foram determinados os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg) e potássio (K) trocáveis, fósforo (P) disponível e a acidez potencial (H+Al) utilizando-se o método da resina trocadora de íons (Raij et al. 2001). O pH foi determinado potenciométricamente utilizando-se relação 1:2,5 de solo em água (Teixeira et al. 2017). O carbono orgânico foi determinado pelo método de Walkley-Black modificado por Yeomans & Bremner (1988), a matéria orgânica, por sua vez, foi estimada com base no carbono orgânico.

A variabilidade dos atributos do solo foi analisada pela análise exploratória dos dados, calculando-se média, mediana, desvio padrão, variância, coeficiente de variação, máximo, mínimo, coeficiente de assimetria e coeficiente de curtose. O coeficiente de variação (CV%) foi analisado com base no critério de Warrick & Nielsen (1980), que classifica o CV como baixo (<12%), médio (de 12 a 24%) e alto (>24%). A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov no programa computacional estatístico Minitab 14.

Para determinação da existência da dependência espacial, foram modelados semivariogramas, utilizando análise geoestatística (Isaaks & Srivastava 1989), por meio do programa computacional GS<sup>+</sup> (Robertson 2008). Sob teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela Equação 2.

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

Eq. (2)



Onde:

$\hat{y}(h)$  = valor da semivariância para o vetor  $h$ ;  $N(h)$  = 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 uma distância  $h$  da posição  $x_i$ .

A escolha dos melhores modelos teóricos de semivariância foi realizada com base nos parâmetros da validação cruzada, sendo estes: coeficiente de regressão (CR); intercepto ( $y$  int.); erro padrão (SE), e coeficiente de determinação ( $R^2$ ). Com base nos parâmetros dos semivariogramas experimentais dos atributos do solo foi utilizado 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 através da divisão das semivariâncias pela variância estatística. A escolha do modelo de semivariograma escalonado que melhor se ajustou aos dados foi realizada com base no menor resíduo gerado ou soma dos quadrados dos resíduos (SQR) com o ajuste do modelo, além do conhecimento prático do comportamento dos atributos no ambiente.

Os semivariogramas experimentais escalonados foram ajustados ao modelo esférico (Equação 3) identificado nas figuras como: Esf. ( $C_0, C_1 + C_0, [(C_0/(C_0+C_1)*100], R^2, a, SQRes.$ ).

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

Eq. (3)

Onde:

$C_0$  = efeito pepita;  $C_0 + C_1$  = patamar;  $a$  = alcance do semivariograma;  $h$  = distância de separação entre duas observações e  $a$  = alcance de dependência espacial;  $R^2$  = coeficiente de determinação;  $SQRes$  = soma dos quadrados dos resíduos.

Na análise do grau de dependência espacial ((GDE)  $[(C_0/(C_0+C_1)*100]$ ) das variáveis em estudo, utilizou-se a classificação de Cambardella et al. (1994), no qual os valores de menores que 25 % são considerados dependência espacial forte, valores de GDE entre 25 e 75 % indicam dependência espacial moderada e valores de GDE maiores que 75 % dependência espacial fraca.

Por meio do 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, o alcance dos semivariogramas escalonados serviu como base de informação para calcular o número mínimo médio de amostragem do solo, para determinar a variabilidade de todos os atributos em ambas às profundidades nos três ambientes estudados (Equação 4).

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

Onde:

$N$  = número mínimo de amostras necessárias para a determinação de uma malha de amostragem;  $A$  = área total em hectares;  $a$  = alcance do semivariograma em metros.



## Resultados e Discussão

As medidas de tendência central média e mediana apresentaram valores próximos em quase todos os atributos físicos, sendo exceção apenas a granulometria e a classe de agregados <1,00 mm que apresentaram maiores distanciamentos, revelando casos de valores não simétricos para estes atributos, caso que pode ser observado nos valores mínimos e máximos para estes atributos. Para os atributos químicos, os valores de média e mediana não apresentam grandes variações, no entanto, apresentam certa assimetria nos dados, sendo características de alta variabilidade (Tabela 1).

É relevante destacar o comportamento dos atributos físicos e químicos na área de estudo, onde o solo apresentou textura siltosa, (Tabela 1), corroborando estudos desenvolvidos por Campos et al. (2012), em toposequência na região sul do Amazonas.

**Tabela 1.** Estatística descritiva de atributos físicos e químicos em área cultivada com mandioca em Humaitá-AM.

Atributos	Estatística descritiva										
	Un.	Méd.	Med.	Mín.	Máx.	DP	Var.	CV	Curt.	Assim.	d
<b>Atributos Físicos</b>											
Areia	g kg <sup>-1</sup>	282,41	272,00	104,8	662,90	58,60	3433,83	20,75	29,45	4,04	0,21*
Silte	g kg <sup>-1</sup>	558,65	573,23	161,22	649,93	74,53	5554,83	13,34	17,81	-3,88	0,25*
Argila	g kg <sup>-1</sup>	158,95	145,9	101,71	664,73	71,91	5171,68	45,24	39,86	5,78	0,24*
Ds	kgdm <sup>-3</sup>	1,16	1,16	0,99	1,36	0,07	0,01	6,28	-0,24	0,08	0,07ns
Macro	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	12,93	13,11	5,64	22,65	3,39	11,48	26,19	0,31	0,27	0,08ns
Micro	m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	27,49	27,45	22,10	34,40	1,80	3,24	6,55	3,66	0,67	0,10*
> 2,00 mm	%	85,06	86,42	65,58	96,01	7,14	51,09	8,00	-0,27	-0,63	0,10*
2,00- 1,00mm	%	3,58	3,41	0,29	9,13	2,11	4,45	58,00	0,00	0,67	0,11*
<1,00mm	%	11,34	10,29	2,87	26,57	5,36	28,80	47,00	0,01	0,74	0,13*
DMG	mm	2,29	2,32	1,28	3,02	0,37	0,14	16,00	0,08	-0,56	0,09*
DMP	mm	2,96	3,00	2,48	3,25	0,17	0,03	6,00	-0,01	-0,72	0,11*
Umidade	kg kg <sup>-1</sup>	14,39	14,22	11,10	19,24	0,61	0,35	171	2,91	11,86	0,09ns
RSP	MPa	1,74	1,42	0,90	4,15	1,06	0,25	83	0,69	47,60	0,22*
<b>Atributos Químicos</b>											
pH	H <sub>2</sub> O	3,91	3,90	3,80	4,10	0,06	0,00	1,57	1,78	0,77	0,39*
H+Al	mmol kg <sup>-1</sup>	157,69	150,00	109,00	185,00	16,10	259,23	10,21	0,29	0,02	0,25*
MO	g dm <sup>-3</sup>	27,69	28,00	19,00	40,00	4,79	22,95	17,30	-0,25	0,51	0,12*
P	mg dm <sup>-3</sup>	6,03	6,00	3,00	8,00	0,94	0,89	15,62	0,82	-0,53	0,24*
K	mmol kg <sup>-1</sup>	1,40	1,20	0,70	9,50	1,10	1,20	78,45	48,83	6,60	0,31*
Ca	mmol kg <sup>-1</sup>	2,38	2,00	2,00	4,00	0,52	0,27	21,87	-0,48	0,88	0,41*
Mg	mmol kg <sup>-1</sup>	1,39	1,00	1,00	9,00	1,06	1,13	76,47	42,68	6,02	0,36*
SB	mmol kg <sup>-1</sup>	5,16	4,40	3,70	14,50	2,00	3,99	38,69	13,34	3,31	0,23*
CTC	mmol kg <sup>-1</sup>	162,85	156,40	123,50	189,50	15,08	227,49	9,26	-0,19	0,21	0,20*
V	%	3,26	2,79	1,96	11,74	1,58	2,49	48,45	16,36	3,62	0,21*



Un.= Unidade; Méd.= Média; Med.= Mediana; Min.= Mínimo; Máx.= Máximo; DP= Desvio Padrão; Var.= Variância; CV= Coeficiente de Variância; Assim.= Assimetria; d= Teste de normalidade a 5 % de probabilidade, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov; Macro= Macroporosidade; Micro= Microporosidade; Ds= Densidade do Solo; RSP= Resistência do solo a penetração; DMG= Diâmetro médio geométrico; DMP= Diâmetro médio ponderado; >2,00, 2,00-1,00 e <1,00= agregados nas classes maior que 2,00 mm, 2,00-1,00 mm e menor que 1,00 mm; pH= Potencial Hidrogênio; H+Al= Acidez Potencial; MO= Matéria Orgânica; P= Fósforo; K= Potássio; Ca= Cálcio; Mg= Magnésio; SB= Soma de Bases; CTC= Capacidade de Troca Catiônica; V= Saturação por Bases; \*= significativo; ns= não significativo. Fonte: Oliveira et al. (2023)

Verifica-se que os atributos macro, micro e Ds podem ter sofrido alterações, em razão do sistema de manejo implantado (Tabela 1). A elevada macroporosidade e a baixa Ds deve-se possivelmente à área ter sofrido gradagem no último ano para plantio da lavoura, ou seja, esta área sofreu alteração por parte de maquinário, fazendo com que os atributos do solo tivessem alterações, conforme resultados encontrados por Oliveira et al. (2023), que avaliou a variabilidade espacial de atributos físicos em um Cambissolo Háplico sob diferentes usos na região sul do Amazonas. Estes resultados mostram valores considerados bons para o cultivo, uma vez que a maioria dos estudos considera  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  como sendo a macroporosidade mínima para o adequado crescimento das plantas.

A macroporosidade é uma medida diretamente relacionada com a difusão de oxigênio no solo para as raízes e determina a capacidade de aeração do solo. No estudo, a macroporosidade representa 32% da porosidade total, no entanto, valores de porosidade de aeração (macroporosidade) abaixo de 10-15% são, geralmente, adotados como restritivos para o crescimento e produtividade da maioria das culturas, apesar da dependência da espécie de planta e da atividade biológica do solo (Souza et al. 2023a).

Para valores da Ds do solo não há um consenso entre pesquisadores sobre um valor crítico de densidade do solo. Guimarães & Moreira (2001) descrevem que valores de densidade do solo acima de  $1,2 \text{ kg dm}^{-3}$  são restritivos para o desenvolvimento de raízes das plantas. Souza et al. 2024 descrevem que valores de densidade superiores a  $1,35 \text{ kg dm}^{-3}$  restringem o desenvolvimento radicular em solo argiloso. Camargo & Alleoni (1997) consideram o valor crítico de  $1,55 \text{ kg dm}^{-3}$  em solos franco-argilosos a argilosos para o desenvolvimento das culturas, quando então é considerado como compactado. Os valores da densidade do solo para a área em estudo (Tabela 1) variaram entre 0,99 e  $1,36 \text{ kg dm}^{-3}$  (Tabela 1) com média de  $1,16 \text{ kg dm}^{-3}$ , sendo um valor considerado satisfatório para o desenvolvimento da cultura da mandioca.

Para a estabilidade de agregados (Tabela 1), observa-se elevados valores de DMG e DMP (2,29 e 2,96 mm respectivamente). Esse aumento no tamanho dos agregados pode ter ocorrido por causa da maior pressão recebida nesse solo em razão da mecanização. Almeida et al. (2024), trabalhando com estabilidade de agregados sob diferentes usos (pastagens) e comparado com mata, encontraram elevada estabilidade de agregados em superfície. Souza et al. (2005), ao avaliarem sistemas de colheita de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho-Amarelo na região de Jaboticabal, SP, verificaram que a colheita de cana-de-açúcar sem queima e com incorporação parcial dos resíduos proporcionou maiores valores de DMP, até 30 cm de profundidade. Contudo, são os agentes cimentantes, ligados a aspectos biológicos, como a atividade microbiana, a liberação de exsudados por raízes, o crescimento e funcionamento das raízes, o crescimento e a morte dos tecidos etc., que conferem maior estabilidade aos agregados (Souza et al. 2020). Além disso, observa-se maior porcentagem de agregados na classe > 2,00 mm, apresentando valores acima de 80 % (Tabela 2), indicando maior resistência à desagregação.

Para a RSP, Ribeiro et al. (2024) afirmam que a compactação do solo é mais prejudicial em solo seco, e em condições de maior umidade no solo pode haver crescimento radicular mesmo em valores de RSP superiores a 4,0 MPa. Martins et al. (2023b) citam que valores de RSP entre 2 MPa e 3 MPa são considerados limitantes ao desenvolvimento radicular de várias culturas. No presente estudo a RSP apresentou grande variação entre os valores mínimo e máximo de 0,90 MPa a 4,15 MPa, com média de 1,72 MPa com a umidade variando de



11,10 kg kg<sup>-1</sup> a 19,24 kg kg<sup>-1</sup> justificando a alta variabilidade deste atributo, conforme o estudo de Oliveira et al. (2023), em um Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar onde os autores encontraram relação da variabilidade espacial entre a umidade e a RSP, onde os maiores teores de umidade do solo coincidem com os menores valores de RSP.

Segundo Martins et al. (2023a), os valores atípicos de RSP não poderiam ser desprezados, pois estes representam a realidade encontrada no campo, em que a compactação pode-se mostrar de forma pontual e com considerável variabilidade ao longo da área e das camadas avaliadas. Desta maneira, Praça et al. (2023) destacaram que, com a utilização da geoestatística, esses valores discrepantes devem ser confrontados com os valores vizinhos, a fim de se verificar a necessidade de excluí-los.

Os coeficientes de assimetria e curtose apresentam comportamento semelhantes aos valores de média e mediana, apresentando variações ou valores maiores ou menores que zero (Tabela 1), para quase todas as variáveis caracterizando distribuição assimétrica. Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov indicou normalidade para as variáveis estudadas, exceção para a Ds, macroporosidade, porcentagem de agregados na classe > 2,00 mm e umidade que apresentaram valores não significativos. Lima et al. (2022c), encontraram valores normais para RSP em área de Cambissolo cultivados com mandioca e Oliveira et al. (2023) para atributos granulométricos e estabilidade de agregados em área cultivada com mandioca na região Sul do Amazonas. Apesar da normalidade dos dados não ser uma exigência da geoestatística, é importante que a distribuição não apresente caudas muito alongadas, o que poderia comprometer as estimativas da krigagem (Isaaks & Srivastava 1989), podendo ser um indicativo de alta variabilidade.

Esta alta variabilidade pode ser verificada a partir dos coeficientes de variação (CV) de cada atributo que apresentaram altos valores de CV, sendo algumas exceções como Ds, Microporosidade, agregados na classe 2,00-1,00 mm, DMG, pH, H+Al e CTC, que apresentaram baixos valores de CV (Tabela 1), com base no critério de Warrick & Nielsen (1980).

A variabilidade dos atributos do solo medida pelo CV pode ser considerada a primeira indicação da existência de heterogeneidade nos dados. Os atributos físicos e químicos analisados apresentaram valores de CV variando de baixo, médio a alto, embora tenha ocorrido maior predominância de médios altos valores de CV. Esses resultados estão de acordo com os resultados encontrados por Lima et al. (2022c) estudando atributos físicos em solos na Amazônia, encontraram valores de CV baixos, médios e altos.

A partir da análise estatística descritiva é possível verificar pequena variação nos atributos do solo, tanto nos valores da média, mediana, assimetria e curtose e principalmente no CV, em que é possível verificar maiores variações. 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 (Warrick & Nielsen 1980). Para isso, o ajuste dos semivariogramas pela análise geoestatística mostrou que os atributos apresentaram variabilidade espacial (Tabela 2).

O modelo esférico predominou na maioria dos atributos físicos e químicos, exceção aos atributos areia e V%, que se ajustou ao modelo exponencial conforme encontrados por Araújo et al. (2023) em área de Argissolo cultivada com cupuaçu e urucum e Brito et al. (2022) em áreas cultivadas em Cambissolos na região Sul do Amazonas. De acordo com Lima et al. (2022b), os modelos esféricos e exponenciais são os que mais se ajustam aos dados dos atributos do solo. Isaaks & Srivastava (1989), afirmam que os resultados do modelo exponencial ajustado explicaram uma mudança mais abrupta da variabilidade dos atributos do solo, em contrapartida, o modelo esférico ajustado evidenciou que existe uma mudança mais suave e uma transeção entre os valores estimados de variabilidade.





**Tabela 2.** Estatística descritiva dos atributos físicos e químicos em área cultivada com mandioca em Humaitá-AM.

Atributos	TPA				
	Modelo	C <sub>0</sub>	GDE	a	R <sup>2</sup>
<b>Atributos físicos</b>					
Areia	Exp.	306,50	50,00	48,30	0,799
Silte	Esf.	196,00	84,90	17,21	0,999
Argila	Esf.	2,88e <sup>-003</sup>	54,60	56,22	0,837
Ds	Esf.	2,77e <sup>-004</sup>	49,00	61,45	0,855
Macro	Esf.	3,51	56,00	57,70	0,963
Micro	Esf.	1,04	43,30	54,00	0,984
> 2,00 mm	Esf.	14,47	67,90	14,46	0,728
2,00-1,00 mm	Esf.	0,02	72,20	14,28	0,730
<1,00 mm	EPP	-	-	-	-
DMG	Esf.	4,33e <sup>-005</sup>	83,80	18,96	0,723
DMP	Esf.	0,010	63,10	18,07	0,696
Umidade	Esf.	0,04	98,30	15,95	0,899
RSP	Esf.	0,03	90,20	17,00	0,759
<b>Atributos químicos</b>					
pH	Esf.	0,01	48,40	28,82	0,894
H+Al	Esf.	83,20	61,80	41,20	0,990
MO	Esf.	6,50	69,40	25,00	0,977
P	Esf.	0,23	73,36	25,09	0,933
K	Esf.	0,01	39,80	51,33	0,971
Ca	Esf.	0,10	56,50	54,35	0,725
Mg	Esf.	0,07	60,50	49,05	0,999
SB	Esf.	0,41	57,90	31,50	0,930
CTC	Esf.	2,98e <sup>-003</sup>	58,00	44,20	0,994
V	Exp.	0,10	83,70	41,40	0,928

Exp = exponencial; Esf = Esférico; EPP = Efeito pepita puro; C<sub>0</sub> = Efeito pepita; GDE = grau de dependência espacial; a= alcance; R<sup>2</sup> = Coeficiente de determinação; Macro= Macroporosidade; Micro= Microporosidade; Ds = Densidade do Solo; RSP = Resistência do solo a penetração; DMG= Diâmetro médio geométrico; DMP = Diâmetro médio ponderado; >2,00, 2,00-1,00 e <1,00 = agregados nas classes maior que 2,00 mm, 2,00-1,00 mm e menor que 1,00 mm; pH = Potencial Hidrogênio; H+Al = Acidez Potencial; MO = Matéria Orgânica; P = Fósforo; K = Potássio; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; SB = Soma de Bases; CTC = Capacidade de Troca Catiônica; V = Saturação por Bases. Fonte: Oliveira et al. (2023)

A maior parte dos atributos estudados apresentou coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) acima de 0,80 (Tabela 2), ou seja, no mínimo 80% da variabilidade existente nos valores da semivariância estimada são explicadas pelos modelos ajustados (Lima et al. 2024).

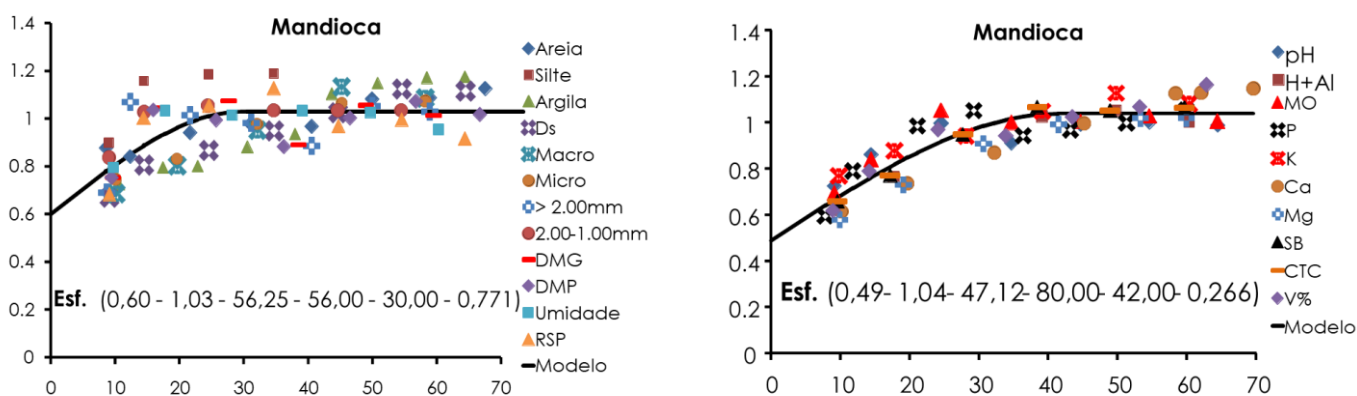
Avaliando o alcance dos semivariogramas individuais, é possível observar que os atributos apresentaram variabilidade espacial menor que o estabelecido na malha amostral (Tabela 2), com valores superiores a 10 m estabelecidos em campo. Estes valores de alcance fornecem informações a respeito da heterogeneidade da distribuição espacial em relação às propriedades estudadas independente do sistema de manejo adotado. Somente a classe de agregados <1,00 mm não foi possível caracterizar a variabilidade espacial ao qual apresentou efeito pepita puro. O efeito pepita indica a variabilidade não explicada em razão da distância de



amostragem utilizada (Lima et al. 2022a), ou seja, a distância de coleta dos pontos amostrais em campo não foi suficiente para caracterizar a variabilidade espacial para este atributo.

O grau de dependência espacial (GDE), expresso pela razão entre o efeito pepita ( $C_0$ ) e o patamar ( $C_0 + C_1$ ) (Cambardella et al. 1994), para os atributos físicos e químicos, foi classificado como moderado para quase todos os atributos estudados (Tabela 2). Para Cambardella et al. (1994), as variáveis que apresentam forte dependência espacial são mais influenciadas por propriedades intrínsecas do solo, ou seja, pelos fatores de formação do solo, enquanto que a dependência espacial moderada, possivelmente seria devido à homogeneização do solo.

A partir do ajuste dos semivariogramas escalonados, pode-se observar comportamento semelhante ao ajuste individual dos semivariogramas para cada atributo estudado, com o modelo esférico predominante para os atributos físicos e químicos (Figura 2). Este ajuste de semivariogramas é justificado pelos menores SQR encontrados de 0,771 e 0,226 para os atributos físicos e químicos respectivamente. Oliveira et al. (2023) encontraram valores de SQR abaixo de 1 (um) para RSP em Cambissolo cultivado com cana-de-açúcar.



**Figura 2.** Semivariogramas escalonados para os atributos físicos e químicos em área cultivada com mandioca em Humaitá-AM. Esf. = Esférico; [modelo ( $C_0$ ,  $C_1+C_0$ ,  $[(C_0/(C_0+C_1)*100]$ ,  $R^2$ ,  $a$ , Resíduo)].  $C_0$ = efeito pepita;  $C_1+C_0$ = patamar;  $[(C_0/(C_0+C_1)*100]$ = grau de dependência espacial;  $R^2$  = coeficiente de determinação;  $a$ = alcance. Fonte: Oliveira et al. (2023).

O GDE dos semivariogramas escalonados, para os atributos físicos e químicos, foi classificado como moderado (Figura 2), seguindo o mesmo comportamento dos ajustes de semivariogramas para os atributos individuais. Neste sentido, avaliando os valores de alcance ajustados aos modelos dos semivariogramas escalonados, observa-se que o espaçamento de coleta é superior que o estabelecido na malha amostral, com valores superiores a 10 m, sendo 30 m para os atributos físicos e 42 m para os atributos químicos. Segundo Lima et al. (2022b), 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.

Segundo Souza et al. (2023b), o conhecimento da variabilidade espacial de um solo, além de caracterizar uma região, pode indicar o número e a distribuição de amostras a serem retiradas, possibilitando melhor detalhamento da área e dos resultados. Os valores de alcance são importantes medidas no planejamento e na avaliação experimental, uma vez que este pode auxiliar na definição dos procedimentos de amostragem (Souza et al. 2009). Este parâmetro representa a máxima distância em que os pontos amostrais estão correlacionados entre si. As amostras que forem coletadas nos intervalos amostrais estabelecidos pelo alcance, representam a



variabilidade espacial dos dados. Amostras de solos coletadas em um intervalo menor do que o alcance proporciona sobreposição das características espaciais, enquanto um intervalo maior do que o alcance não inclui a variabilidade espacial (Lima et al. 2022a). É importante que as amostras sejam coletadas em um intervalo amostral ótimo, o qual é igual ao alcance da dependência espacial (Silva et al. 2024).

Neste sentido, o alcance obtido no ajuste dos semivariograma foi utilizado para estabelecer a densidade amostral mínima e espaçamento mínimo de coleta de amostras de solo para que seja estabelecido a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos em área de mandioca cultivada em Cambissolo (Tabela 3).

Tabela 3. Valores de densidade amostral e espaçamento ideal com base no alcance estimado na análise geoestatística em área cultivada com mandioca em Humaitá-AM

Atributos	Planejamento amostral	
	Geoestatística	
	Densidade amostral (pontos ha <sup>-1</sup> )	Espaçamento (m)
<b>Atributos Físicos</b>		
Areia	4	48
Silte	34	17
Argila	3	56
Ds	3	61
Macro	3	58
Micro	3	54
> 2,00 mm	48	14
2,00-1,00 mm	49	14
<1,00 mm	-	-
DMG	28	19
DMP	31	18
Umidade	39	16
RSP	35	17
Média	22	30
Semivariograma escalonado	11	30
<b>Atributos Químicos</b>		
pH	12	29
H+Al	6	41
MO	16	25
P	16	25
K	4	51
Ca	3	54
Mg	4	49
SB	10	32
CTC	5	44
V	6	41
Média	8	39
Semivariograma escalonado	6	42



Macro = Macroporosidade; Micro = Microporosidade; Ds = Densidade do Solo; RSP = Resistência do solo a penetração; DMG = Diâmetro médio geométrico; DMP = Diâmetro médio ponderado; pH = Potencial Hidrogênio; H+Al = Acidez Potencial; MO = Matéria Orgânica; P = Fósforo; K = Potássio; Ca = Cálcio; Mg = Magnésio; SB = Soma de Bases; CTC = Capacidade de Troca Catiônica; V = Saturação por Bases; pontos ha<sup>-1</sup> = pontos por hectare. Fonte: Oliveira et al. (2023)

Nota-se que para os atributos físicos exige uma quantidade maior de pontos por hectare (12 pontos ha<sup>-1</sup>) em relação aos atributos químicos (6 pontos ha<sup>-1</sup>) para representação da variabilidade. No entanto, esta diferença é elevada, sendo que o espaçamento de coleta de 42 m e 30 m para os atributos químicos e físicos respectivamente. Estes resultados mostram que os atributos físicos e químicos do solo em área cultivada com mandioca apresentam variabilidade independentes, ou seja, a variabilidade dos atributos físicos e químicos não apresenta o mesmo padrão de distribuição no espaço. Por outro lado, considerando os valores médios de alcance dos semivariogramas ajustados aos atributos individualmente, a densidade amostral para os atributos físicos foi de 22 pontos ha<sup>-1</sup> e para os atributos químicos 8 pontos ha<sup>-1</sup> com espaçamento de amostragem de 30 m e 39 m, respectivamente. Neste sentido, a maior eficiência ou rigor do uso do semivariograma escalonado, que apresenta valores próximos de espaçamento e densidade amostral dos valores médios obtidos com os semivariogramas individuais.

A obtenção destes resultados pressupõem o uso destes valores de densidade amostral e espaçamento como base para futuros levantamentos para estudos dos atributos do solo na região, visto que o ambiente estudado é bem representativo perante o que ocorre na região em se tratando do tipo de solo, tipo de manejo e de ambiente em toda a extensão sul do Amazonas.

## Conclusões

Os atributos físicos apresentam maior variabilidade espacial em relação aos atributos químicos do solo, apresentando alcance de 30 e 42 metros, respectivamente, no ajuste do semivariograma escalonado.

Considerando o semivariograma escalonado, para a caracterização da variabilidade espacial de atributos físicos e químicos em Cambissolo cultivado com mandioca, a densidade amostral é de 11 e 6 pontos ha<sup>-1</sup> respectivamente.

O uso de semivariograma escalonado é eficiente na determinação da densidade amostral, pois apresenta valores de alcance próximos aos valores médios dos atributos analisados individualmente.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Amazonas (FAPEAM) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo financiamento e apoio à pesquisa.

## Referências

Almeida RG, Campos MCC, Silva DMP, Santos RV, Lima AFL, Silva Souza RF, Bezerra FA, Araújo WO, Oliveira FP 2024. Organic Carbon and Formation of Soil Aggregates on Areas of Natural Vegetation Converted to Pasture in Southern Amazonas. *Eurasian soil science*, 4:1-14.

Araújo RM, Silva DMP, Campos MCC, Lima AFL, Brito WBM, Santos LAC, Cunha JM 2023. Spatial variability of organic carbon and soil carbon stock in pasture areas in União Bandeirantes, Rondônia. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16,1013 – 1024.



Asabe - American Society of Agricultural and Biological Engineers 2006. Soil cone penetrometer: ASAE standard S313.3. St. Joseph: ASABE.

Brito WBM, Campos MCC, Souza FG, Silva LS, Cunha JM, Lima AFL, Martins TS, Oliveira FP, Oliveira IA 2022. Spatial patterns of magnetic susceptibility optimized by anisotropic correction in different Alisols in southern Amazonas, Brazil. *Precision agriculture*, 23:419-449.

Camargo OA, Alleoni LRF 1997. Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas. 1.ed. Piracicaba: ESALQ, 132p.

Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka, AE 1994. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. *Soil Science Society of America Journal*, 58: 1501-1511.

Campos MCC, Ribeira MR, Souza Júnior VS, Ribeiro Filho MR, Almeida MC 2012. Toposequência de solos na transição Campos Naturais-Floresta na região de Humaitá, Amazonas. *Acta Amazônica*, 42:387-398.

Ceddia MB, Vieira SR, Villela ALO, Mota LS, Anjos LHC, Carvalho DF 2009. Topography and spatial variability of soil physical properties. *Scientia Agrícola*, 66: 338-352.

Fonseca JS, Campos MCC, Brito Filho EG, Mantovanelli BC, Silva LS, Lima AFL, Cunha JM, Simões EL, Santos LAC 2021. Soil-landscape relationship in a sandstone-gneiss topolithosequence in the State of Amazonas, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, 80:713-728.

Frozzi JC, Cunha JM, Campos MCC, Bergamin AC, Brito WBM, Fraciscon U, Silva DMP, Lima AFL, Brito Filho EG 2020. Physical attributes and organic carbon in soils under natural and anthropogenic environments in the South Amazon region. *Environmental Earth Sciences*, 79:251-266.

Guimarães CM, Moreira JAA 2001. Compactação do solo na cultura do arroz de terras altas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 36:703-707.

Isaaks EH, Srivastava RM 1989. An introduction to applied geostatistics. New York: Oxford University Press, 561p.

Kemper WD, Chepil WS 1965. Aggregate stability and size distribution. In: Black, C. A., ed. Methods of soil analysis. Madison, *American Society of Agronomy*, p.499-510.

Lima AFL, Campos MCC, Brito Silva, J, Araújo WO, Mantovanelli BC, Souza FG, Beirigo RM, Silva DMP, Macedo RS, Oliveira FP 2024. The Stability of Aggregates in Different Amazonian Agroecosystems Is Influenced by the Texture, Acidity, and Availability of Ca and Mg in the Soil. *Agronomy-Basel*, 14:677-695.

Lima AFL, Campos MCC, Enck BF, Silva Simões W, Araújo RM, Santos LAC, Cunha JM 2022a. Physical soil attributes in areas under forest/pasture conversion in northern Rondônia, Brazil. *Environmental monitoring and assessment*, 194:34-43.

Lima AFL, Campos MCC, Martins TS, Silva GA, Brito WBM, Santos LAC, Oliveira IA, Cunha JM 2022c. Soil chemical attributes in areas under conversion from forest to pasture in southern Brazilian Amazon. *Scientific Reports*, 12:22555.



Lima AFL, Cunha JM, Campos MCC, Martins TS, Brito WBM, Brito Filho EG 2022b. Influência do relevo na distribuição espacial da textura e fertilidade do solo em uma área de Terra Preta Arqueológica em Novo Aripuanã, AM. *Revista brasileira de geomorfologia*, 23:1548-1567.

Martins TS, Cunha JM, Brito WB, Santos RV, Lima AFL, Souza FG, Campos MCC, Brito Filho EG, Oliveira FP 2023a. Distribuição espacial anisotrópica de atributos químicos do solo em agroecossistemas e floresta nativa em Canutama, Sul do Amazonas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16:1629-1646.

Martins TS, Souza FG, Campos MCC, Cunha JM, Brito WBM, Lima AFL, Assis JM, Oliveira IA, Oliveira FP, Brito Filho EG 2023b. Spatial variability of chemical indicators of Amazon agricultural soils through geomultivariate statistics, Brazil. *Environmental monitoring and assessment*, 195:1167.

Oliveira IA, Campos MCC, Santos RV, Almeida RG, Martins TS, Silva DMP, Freitas L, Oliveira FP, Mantovanelli BC 2023. Geostatistics and Sample Density of Chemical Attributes for Soil under Sugarcane and Agroforestry in Humaitá - AM, Brazil. *Journal of sustainable development*, 16:79-91.

Oliveira IA, Campos MCC, Siqueira DS, Freitas L, Aquino RE, Oliveira FP 2020. Pedoenviromental indicators of soil in Western Amazonia, Brazil. *Environmental monitoring and assessment*, 192:768-774.

Pacheco FD, Escada MIS, Souza AR 2020. Padrão Espacial de Ocorrência de Plantação de Mandioca na Amazônia Brasileira: a Região Oeste do Estado do Pará. *Revista Brasileira de Cartografia*, 76:1-22.

Praca JIS, Enck BF, Campos MCC, Pereira MG, Souza FG, Mantovanelli BC, Brito Filho EG, Silva LS, Cunha JM 2023. Spatial variability of soil organic carbon fractions in areas under cultivation of Amazonian species in the southern region of Amazonas state, Brazil. *International journal of agriculture and natural resources*, v. 2, p. 1-14, 2023.

Raij BV, Andrade JC, Cantarella H, Quaggio JA 2001. Análise química para avaliação da fertilidade do solo. Campinas: Instituto Agrônômico. 285p.

Robertson GP 2008. GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences. Plainwell: Gamma Design Software, 179p.

Santos HG, Jacomine PKT, Anjos LHC, Oliveira VA, Lumberras JF, Coelho MR, Cunha TJF 2018. *Sistema Brasileiro de Classificação do Solo*, 3 ed. Embrapa.

Silva JR, Farias CHA, Oliveira FP, Silva PLF, Campos MCC, Tavares DD 2024. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em áreas cultivadas com cana-de-açúcar sob diferentes tempos de colheita mecanizada com tráfego controlado-de-açúcar sob colheita mecanizada com tráfego controlado. *Revista de agricultura neotropical*, 11:e7696-e7708.

Souza FG, Campos MCC, Mantovanelli BC, Santos RV, Cunha JM, Oliveira FP, Lima AFL, Brito WBM, Freitas L, Brito Filho EG, Brito Silva J, Almeida R.G 2024. Spatial variability of soil resistance penetration in forest areas converted for agricultural uses in the Amazon, Brazil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 17:332-348.



Souza FG, Campos MCC, Cunha JM, Martins, TS, Assis JM, Brito Filho EG, Brito WB, Silva, DMP, Oliveira FP 2023a. Chemical attributes of amazon forest soil under conversion for different cultivation systems in the south of Amazonas, Brazil. *Applied ecology and environmental research*, 21:1767-1787.

Souza FG, Campos MCC, Pinheiro EM, Lima AFL, Brito Filho EG, Cunha JM, Santos EAN, Brito WBM 2020. Aggregate stability and carbon stocks in Forest conversion to different cropping systems in Southern Amazonas, Brazil. *Carbon Management*, 11:81-96.

Souza FG, Silva JV, Sampaio TI, Morais JT, Moura V, Lima AFL, Brito WBM, Pinheiro EN, Santos RV, Campos MCC 2023b. Soil erodibility in areas under citrus (*Citrus sinensis* l. Osbeck) and forest in rondônia, brazil. *Revista de agricultura neotropical*, 10:e7683-e7699.

Souza ZM, Marques Júnior J, Pereira GT 2009. Geoestatística e atributos do solo em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. *Ciência Rural*, 40:48-56.

Souza ZM, Prado RM, Paixão ACS, Cesarin LG 2005. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40:271-278.

Stolf R 1991. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 15:229-235.

Teixeira PC, Donagemma GK, Wenceslau AF, Teixeira G 2017. *Manual de Métodos de Análise de Solo*, 3.ed, Embrapa Solos, Rio de Janeiro.

Warrick AW, Nielsen, DR 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel D, ed. *Applications of soil physics*. New York, USA, p.344.

Yeomans JC, Bremner JM 1988. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communication in Soil Science and Plant Analysis*, 19:1467-1476.