

VARIABILIDADE DE ATRIBUTOS EDÁFICOS EM DIFERENTES AMBIENTES DE VOÇOROCAS NO BIOMA DA MATA ATLÂNTICA

JOÃO HENRIQUE GAIA GOMES¹, MARCOS GERVASIO PEREIRA¹, MARCOS BACIS CEDDIA¹, ANDRÉ GERALDO DE LIMA MORAIS¹, FABIANA DA COSTA BARROS²

¹ Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Km 07, Zona Rural, BR-465, 23890-000, Seropédica, Rio de Janeiro, Brasil, gaia.gomes.pgeaamb@gmail.com; mgervasiopereira01@gmail.com; marcosceddia@gmail.com; andrehmuz@hotmail.com.

² Departamento de Engenharia Agrícola e Ambiental, Universidade Federal Fluminense, R. Mario Santos Braga, 30 - Centro, 24020-140, Niterói - RJ, Rio de Janeiro, Brasil, barros.faby@hotmail.com.

RESUMO: O estudo teve como objetivo avaliar e determinar a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo no ambiente interno e externo de voçoroca em pedoforma convexa. O estudo foi realizado na sub-bacia do ribeirão do Cachimbal, Pinheiral, RJ. O mapeamento da área foi desenvolvido a partir da imagem do ano de 2017, obtida no Google Earth, com resolução espacial de 2,34 metros, sendo realizadas avaliações quantitativas, quanto a expressão de voçorocas e qualitativas (pedoforma côncava ou convexa) através do modelo digital de elevação de superfície de curvatura (MDESC), com validação no campo. Posteriormente, foi selecionada uma voçoroca ocorrente em pedoforma convexa, mais expressiva, em que foram coletadas amostras nos ambientes interno e externo na profundidade de 0,0-0,10 m para avaliação dos atributos químicos e físicos das voçorocas. Verificou-se que algumas variáveis necessitam de um número amostral maior e/ou que sejam testados outros métodos geoestatísticos, pois não foi possível verificar a existência de dependência espacial. Foi observado que os atributos químicos e físicos do solo apresentam variabilidade espacial de forma diferenciada quando comparados os ambientes interno e externo. A geoestatística apresenta-se com elevado potencial na espacialização dos atributos químicos e físicos do solo em ambientes degradados como voçorocas.

Palavras-chave: erosão, geoestatística, indicadores de qualidade do solo.

VARIABILITY OF SOIL ATTRIBUTES IN DIFFERENT GULLIE ENVIRONMENTS IN ATLANTIC FOREST BIOME

ABSTRACT: The study had to evaluate and determine the spatial variability of soil chemical and physical attributes in the internal and external environment of a gullie convex pedoform. The study was conducted in the Cachimbal stream sub-basin, Pinheiral, RJ. The mapping of the area was developed from the image of 2017, obtained in Google Earth, with a spatial resolution of 2.34 meters, being quantitative data quantities, with a voice expression and quality (concave or convex pedoform) through digital curvature surface access model (CSEDM) with field validation. Subsequently, it was an incident intermittence, was more intense, in which samples were collected indoors and outdoors at a depth of 0-0.10 m for the evaluation of chemical and physical attributes of gullies. The tests were larger than a larger number and / or larger than the most recent geological tests since it was impossible to verify the existence of spatial dependence. It was seen that the chemical and physical attributes of soil spatial variability differed compared to indoor and outdoor environments. A geostatistic can spatialize the chemical and physical attributes of the soil in degraded environments such as gullies.

Keywords: erosion, geostatistics, soil quality indicators.

1 INTRODUÇÃO

Atualmente a degradação do solo vem sendo amplamente abordada, visto que a erosão do solo vem se intensificando. A ação antrópica atua promovendo uma série de alterações que podem vir a influenciar nas características do ambiente, tendo como principais contribuintes o uso e ocupação das terras e a adoção de práticas agrícolas inadequadas.

Os processos erosivos podem apresentar-se de diferentes formas, sendo uma destas as voçorocas que contribuem para a remoção de solo e nutrientes. A sua dinâmica difere dentre as feições topográficas côncava, plana e convexa, que nesse estudo foram denominadas de pedoformas. Essas características do terreno podem ser consideradas como indicadores do padrão de distribuição dos atributos do solo.

O município de Pinheiral – RJ possui grande parte de sua extensão territorial degradada, consequência de seu histórico de uso, em que em tempos pretéritos, grande parte da área era ocupada com o plantio de café (*Coffea canephora*), sendo esse realizado preferencialmente nas pedoformas convexas em função das melhores condições de umidade microclimáticas para o desenvolvimento da cultura (MENEZES, 2008). Atualmente grande parte dessa área encontra-se sob o predomínio de pastagens com diferentes graus de degradação (SANTOS et al., 2016).

Alguns autores, como Miqueloni, Gianello e Bueno (2015) consideram que o processo erosivo de perda de solo tende a ser mais intenso em pedoformas convexas, onde a susceptibilidade erosiva é maior, devido ao fluxo concentrado. O que para Rubira et al.

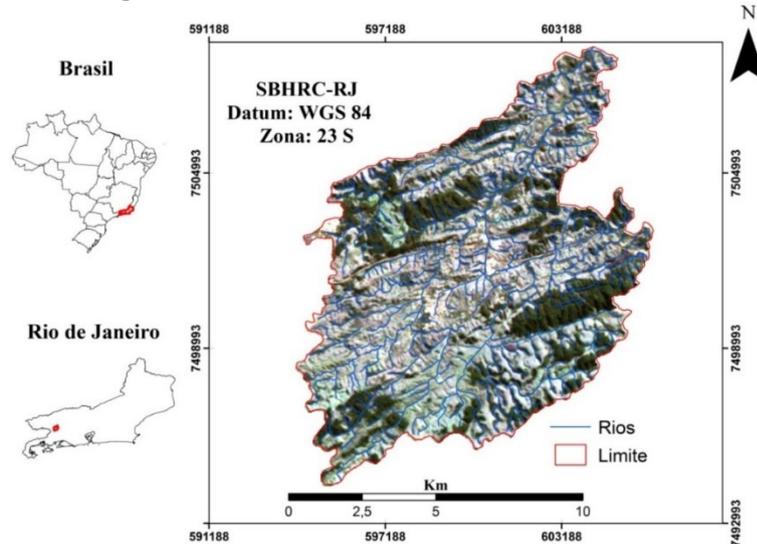
(2019), está associado também com o clima, declividade, vegetação, faces de exposição, fatores estes ocorrendo de forma conjunta e distintas intensidades.

As propriedades do solo apresentam variabilidade espacial, principalmente devido à heterogeneidade de fatores como o manejo, uso do solo (ROSEMERY et al., 2017), curvatura da superfície, declividade, altitude e dinâmica da água (SANTOS et al., 2016). Desse modo, para o correto uso e manejo do solo, estudos da variabilidade espacial de seus atributos são uma importante ferramenta para a conservação ou recuperação do solo. Para isso o emprego da geostatística tem grande aplicação (SILVEIRA JUNIOR et al., 2014).

Poucos são os estudos relacionados à análise da variabilidade espacial em processos erosivos (RODRIGUES, 2010; MACHADO et al., 2010), no entanto esse tipo de análise pode fornecer informações fundamentais para subsidiar programas de recuperação de áreas degradadas. Desse modo, o objetivo desse estudo foi espacializar os atributos químicos e físicos do solo em diferentes ambientes de voçoroca em pedoforma convexa na sub-bacia do Ribeirão Cachimbal, Pinheiral-RJ.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no município de Pinheiral - RJ, na sub-bacia do Ribeirão Cachimbal-RJ (Figura 1). Ela está situada na região do Médio Paraíba Fluminense e compõe a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, localizando-se entre as latitudes 22°29'03" S e 22°35'27" S e longitudes 43°54'49" W e 44°04'05" W.

Figura 1. Sub-bacia hidrográfica do ribeirão Cachimbal, Pinheiral – RJ.

Fonte: Gaia-Gomes (2017).

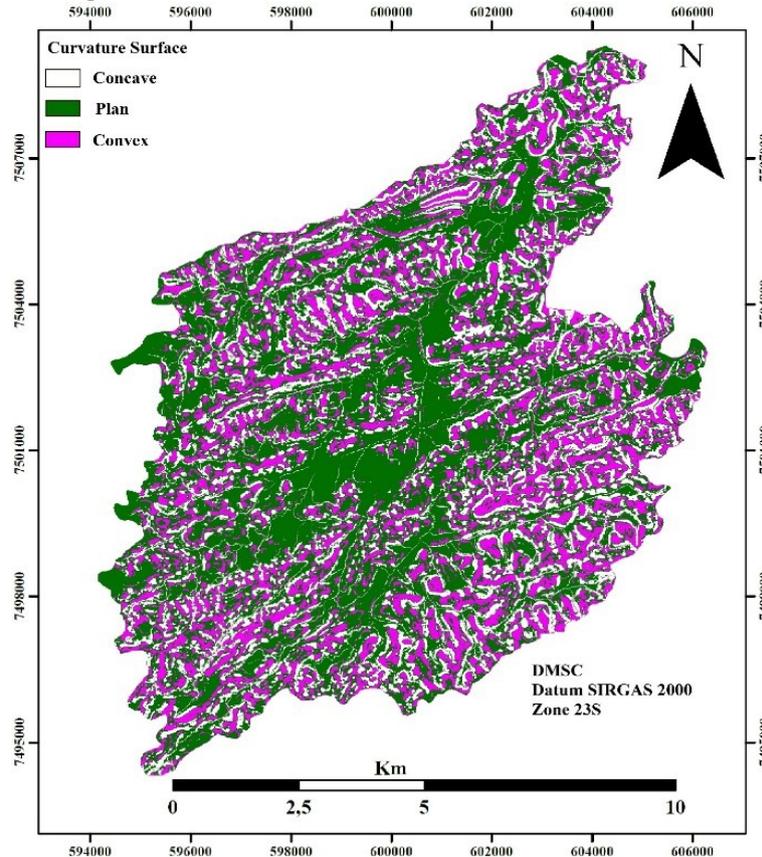
O clima foi classificado como Cwa - clima temperado de inverno seco e verão chuvoso, e Am - clima tropical chuvoso com inverno seco segundo Koppen (ALVARES et al., 2014), com precipitação média variando entre 1300 a 1500 mm ano⁻¹. A sub-bacia possui a altitude variando de 360 metros, na foz do ribeirão Cachimbal, até 720 metros na serra do Arrozal (MACHADO et al., 2010).

Os solos predominantes na região são os Argissolos Vermelho-Amarelos e Cambissolos Háplicos, ocorrentes no terço médio da encosta, e Latossolos Vermelho-Amarelos, no topo e terço superior da encosta (SANTOS et al., 2017).

O mapeamento da voçoroca foi realizado a partir da imagem do ano de 2016, disponível no Google Earth, com resolução espacial de 2,34 metros. Na imagem foram georreferenciadas todas as voçorocas ocorrentes ao longo da sub-bacia, 30 ao todo. Posteriormente foi realizada a classificação

qualitativa através do modelo digital de elevação de superfície de curvatura (MDESC) (Figura 2), que foi gerado através das cartas topográficas dos municípios de Volta Redonda (Folha SF-23-Z-A-V-2) e Pirai (Folha SF- 23-Z-VI-1), obtidas no IBGE na escala de 1:50.000 com resolução espacial de 10 m na escala de 1:100.000, por intermédio do ArcGIS 10.5.

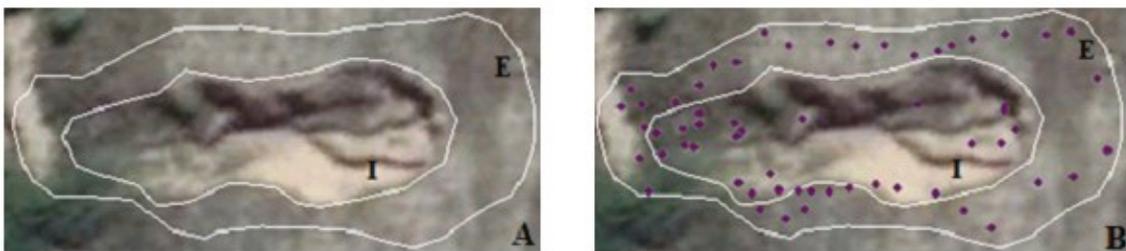
No MDESC foram plotadas as coordenadas de todas as voçorocas, onde foi verificado o predomínio de ocorrência em pedoforma convexa, 24 no total. Desse modo, foi selecionada uma voçoroca ocorrente em pedoforma convexa e plotadas as suas respectivas coordenadas. Posteriormente a ocorrência desta, em superfície convexa foi validada com ida ao campo. Esse padrão pode estar associado ao histórico de uso e ocupação como também as características geomorfológicas da região, vegetação, vertentes de exposição e incidência solar, como pode ser verificado em Gaia-Gomes (2017).

Figura 2. Sub-bacia hidrográfica do ribeirão Cachimbal, Pinheiral – RJ.

Fonte: Gaia-Gomes (2017).

A voçoroca foi dividida em dois ambientes, interno e externo (Figura 3A). Neles foram coletadas amostras deformadas de 0,0 – 0,10 cm no interior e no exterior da voçoroca em 59 pontos (Figura 3B). Após a coleta, as

amostras deformadas foram secas, destorroadas e passadas por peneira de 2 mm, obtendo-se então a terra fina seca ao ar (TFSA). Cada ponto de coleta foi georreferenciado com o GPS Geodésico modelo Trimbe Pathfinder – ProXT.

Figura 3. Ambientes interno (I) e externo (E) (A) e a distribuição dos pontos de coleta (B) em voçoroca convexa.

Fonte: Gaia-Gomes (2017).

Foram determinados os valores de pH, utilizando-se relação 1:2,5 de solo em água; cálcio (Ca^{+2}), magnésio (Mg^{+2}), alumínio trocáveis (Al^{+3}), potássio (K^{+}), sódio (Na^{+}); fósforo disponível (P); hidrogênio+alumínio (H+Al) extraíveis (acidez potencial) de acordo com Teixeira et al. (2017). Os teores de carbono

orgânico total (COT) foram quantificados segundo Yeomans e Bremner (1988).

A partir dos dados obtidos foi calculado o Valor S (S) (soma dos teores de cálcio, magnésio, potássio e sódio). O Valor T, V% e saturação por Al^{+3} conforme Teixeira et al. (2017).

Quanto aos atributos físicos, foi realizada a análise granulométrica, sendo quantificadas as seguintes frações do solo: areia total (g kg^{-1}), areia grossa (g kg^{-1}), areia fina (g kg^{-1}), argila total (g kg^{-1}), argila natural (g kg^{-1}) e silte (g kg^{-1}) (TEIXEIRA et al., 2017).

Após as análises, os dados obtidos foram submetidos à estatística descritiva e análise geoestatística. Para a estatística descritiva foi utilizado o *software R Development Core Team* por meio da biblioteca *Agricolae* (DELGADO, 2018), obtendo-se as medidas de posição (mínimo, média e máximo) e de dispersão (coeficiente de variação (CV%), de assimetria e de curtose).

Os valores de CV foram classificados segundo Pimentel-Gomes e Garcia (2002) como de variabilidade baixa ($\text{CV} < 10\%$), média ($10 < \text{CV} < 20\%$), alta ($20 < \text{CV} < 30\%$) e muito alta ($\text{CV} > 30\%$). A hipótese de normalidade foi testada pelo teste W a 5% de significância (SHAPIRO; WILK, 1965).

Para a realização da análise geoestatística também se utilizou o *software R Development Core Team*. Foram calculados os semivariogramas de acordo com a proposição realizada por Vieira et al. (1983), conforme a equação 1:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) + Z(x_i + h)]^2 \quad (01)$$

Em que:

$\hat{\gamma}(h)$ - semivariância estimada;

$N(h)$ - número de pares experimentais de observações;

$Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ - valores dos atributos medidos na posição x_i e $x_i + h$, separados por um vetor h (distância entre amostras).

Para cada atributo químico do solo foram realizados os cálculos das semivariâncias $\hat{\gamma}(h)$ e obtido o gráfico “semivariância dos dados” versus “distância entre os pontos (h)”, que representa o semivariograma.

Foi necessário ajustar os semivariogramas a um modelo matemático que descrevesse continuamente a correlação espacial de cada um dos parâmetros do solo avaliados. Os modelos testados foram o esférico, exponencial e gaussiano.

Para a determinação do melhor modelo ajustado de semivariograma escolheu-se aquele que apresentava o melhor valor de coeficiente de determinação (R^2) dentre os modelos. Após o ajuste do modelo matemático e cálculo dos valores do semivariograma, foram estimados os coeficientes do modelo teórico para o mesmo: efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C_1) e o alcance, conforme descrito por Vieira et al. (1983).

O grau de dependência espacial dos atributos foi verificado utilizando-se a classificação de Cambardella et al. (1994), onde valores de $[(C_0 / (C_0 + C_1))] < 25\%$ são considerados dependência espacial forte, valores de $[(C_0 / (C_0 + C_1))$ entre 25 e 75% indicam dependência espacial moderada e $[(C_0 / (C_0 + C_1))] > \text{que } 75\%$ dependência espacial fraca.

Em seguida, os dados foram exportados para o *software ArcGis 10.5.2* e realizou-se sua interpolação por krigagem ordinária (KO), de forma a possibilitar a visualização dos padrões de distribuição espacial das variáveis na área estudada, obtendo-se os mapas na projeção nas coordenadas métricas Universal Transversa de Mercator zona 23 Sul.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

No MDESC (Figura 2), o qual representa o fator topográfico superfície de curvatura foi verificado que maior parte da área possui superfície plana. Através da Tabela 1 verifica-se que a classe plana representa a maior porcentagem de área da sub-bacia totalizando 59,3 %, já o menor valor de área foi observado para a classe de côncava, totalizando 19,1%.

Tabela 1. Distribuição da superfície de curvatura em classes.

Classes	Área (%)
Côncava	19,1
Plana	59,3
Convexa	21,6

Fonte: Gaia-Gomes (2017).

As três classes de superfície de curvatura compõem a topografia, porém contribuem de diferentes maneiras. Na superfície côncava ocorrem processos de acúmulo de água, sedimentos, minerais, matéria orgânica e regeneração espontânea devido ao microclima formado em seu interior.

Para Silva et al. (2013) as pedoformas côncavas proporcionam maior desenvolvimento pedogenético em razão da maior infiltração da água no solo. A superfície de curvatura convexa caracteriza-se por processos de escoamento superficial de água e sedimentos. Nas superfícies convexas, os fluxos externos e internos de matéria e energia levam à dissipação de energia e perdas por erosão e lixiviação (AUMOND et al., 2014). Nas superfícies planas os processos de movimentação de água e sedimentos são menos intensos que nas demais superfícies.

Gaia-Gomes (2017) ao realizar a caracterização morfométrica da Sub-bacia do Ribeirão Cachimbal, verificaram o predomínio das classes noroeste e norte, respectivamente 17,2 % e 16,3 % da área, o que pode estar

associada à altimetria e a declividade, que interferem no sombreamento causado pelas feições geomorfológicas, formando gradientes, que atuam na distribuição de energia e no fluxo de água (FU; RICH, 2002).

Para Sirtoli et al. (2008) no hemisfério sul as encostas orientadas para o norte são superfícies com incidência de radiação mais elevada. O que corrobora com Marques et al. (2005), que estudando as encostas do Estado do Rio de Janeiro verificou que as orientações para norte e nordeste são mais secas. O que em ação conjunta atuam, para a região em específico, como possíveis agentes intensificadores para a ocorrência e evolução de processos erosivos em estágio avançado.

Os resultados referentes à estatística descritiva dos atributos do solo na profundidade de 0-0,10 m, são apresentados na Tabela 2. Para o Teste de Shapiro-Wilk para distribuição normal, em níveis de $p \leq 0,05$, para as variáveis pH, Al^{+3} , Na, K^+ , P, V. Sat. Al, argila natural, argila total, areia fina, areia grossa, silte, foi observada diferença significativa.

Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos do solo avaliados.

Var. ⁽¹⁾	pH	Mg ⁺²	Al ⁺³	Na ⁺	K ⁺	H+Al	S	T	P
					-----cmol _c dm ⁻³				mg kg ⁻¹
Mínimo	3,5	0,94	0,95	0,003	0,00	2,31	0,95	3,64	4,9
Média	4,3	1,31	1,69	0,004	0,04	4,64	1,33	5,97	11,3
Mediana	4,4	1,33	1,75	0,003	0,01	4,62	1,34	5,98	11,4
Máximo	4,8	1,66	1,95	0,008	0,09	6,60	1,75	8,24	31,5
CV (%)	6,7	12,09	13,11	33,32	79,30	23,20	12,32	19,57	26,5
Ass. ⁽²⁾	-0,9	-0,19	-2,27	2,22	2,77	-0,21	-0,13	-0,14	4,9
Curtose	0,6	0,13	5,46	4,82	12,31	-0,76	0,30	-0,86	36,2
Var. ⁽¹⁾	COT	V	Sat.Al	Argila Total	Argila Natural	Areia Total	Areia Fina	Areia Grossa	Silte
	g kg ⁻¹		----- (%)-----						
Mínimo	1,24	18	40	2,20	0,10	20,50	5,40	15,10	10,00
Média	10,72	23	56	29,93	17,09	46,63	10,14	37,40	18,83
Mediana	10,18	22	56	32,50	22	44,40	9,80	35,50	19,00
Máximo	19,71	38	66	51,80	40	75,10	18,12	69,30	40,00
CV (%)	26,46	17,94	9,71	37,30	72,98	21,75	25,46	25,96	34,22
Ass. ⁽²⁾	4,97	1,55	-1,07	-0,55	-0,05	0,80	0,89	1,18	1,01
Curtose	-0,74	3,20	2,32	-0,30	-1,55	1,54	1,34	2,26	0,79

⁽¹⁾ Var. = Variável; ⁽²⁾ Ass. = Assimetria.

Fonte: Gaia-Gomes (2017).

Os valores de assimetria demonstram distribuições assimétricas para os atributos

estudados. Observa-se que os atributos pH, Mg⁺², Al⁺³, H+Al, S, Valor T, saturação por

Al³⁺, argila total e argila natural coeficiente de assimetria negativo, indicando tendência de maior quantidade de valores maiores que a média. O padrão de assimetria positiva foi observado para todos os outros parâmetros analisados.

Através do teste de Shapiro-Wilk (W) verificou-se que os atributos pH, Al³⁺, Na⁺, K⁺, P, V%, saturação por Al³⁺, argila total, argila natural, areia total, areia fina, areia grossa e silte apresentaram normalidade. A normalidade dos dados é respaldada pela média e mediana dos parâmetros estudados que se apresentaram muito próximas dos valores do banco de dados, indicando que estes não são dominados por distribuição de forma atípica e, desta forma, não apresentaram assimetria acentuada (CAMBARDELLA et al., 1994). A normalidade dos dados permite uma melhor predição dos valores não amostrados por meio da geoestatística, contudo não é uma exigência, apenas uma característica desejável (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

Em relação aos coeficientes de variação (CV), apenas para os atributos pH e saturação por Al³⁺, foram verificados valores menores que 10%, sendo estes classificados como de baixa variação segundo Pimentel-Gomes e Garcia (2002), indicando homogeneidade dos atributos na área estudada. Valores médios de CV (10 < CV < 20%) foram encontrados para Mg²⁺, Al³⁺, S, Valor T e V%; valores de CV considerados altos (20 < CV < 30%) em H+Al,

P, COT, areia total, areia fina, areia grossa e valores classificados como muito alto (CV > 30%) foram observados para os demais parâmetros estudados. Sabe-se que um CV elevado é o primeiro indicativo da heterogeneidade dos dados da variável, causa que pode estar associada às influências de formação do solo e manejo (OLIVEIRA et al., 2015).

As variáveis do solo pH, Ca²⁺, Mg²⁺, Al³⁺, Na⁺, H+Al, S, Valor T, areia total, silte, argila total e argila natural não apresentaram ajuste ao semivariograma, pois o GDE foi igual a 100%, indicando que essa variável é espacialmente independente, ou seja, possui semivariograma com efeito pepita puro (EPP).

Para as variáveis que não apresentaram ajuste, esse padrão pode estar relacionado aos dados amostrais, já que eles não apresentaram patamar bem definido, demonstrando que o grau de aleatoriedade é alto e que não existe dependência espacial influenciando nos dados. Esse resultado comprova que não há estacionaridade dos dados, o que inviabiliza a aplicação da krigagem ordinária (ASSUMPCÃO; HADLICH, 2017).

Os resultados referentes à análise geoestatística encontram-se na Tabela 3 e Figura 4, evidenciando os modelos dos semivariogramas, o alcance obtido e o índice de dependência espacial entre as amostras da área em estudo.

Tabela 3. Parâmetros dos semivariogramas para as variáveis do solo analisadas.

Variável	Modelo ⁽¹⁾	C0 ⁽²⁾	C0+C ⁽³⁾	R ² ⁽⁴⁾	GDE ⁽⁵⁾	Classe ⁽⁶⁾
					(%)	
K ⁺ (cmol _c dm ⁻³)	Exp ⁽⁴⁾	0,00	0,0002	43	0	Forte
P (mg dm ⁻³)	Exp	1,43	12,22	10	11	Forte
COT (g kg ⁻¹)	Exp	0,00	24,00	0,8	0	Forte
V (%)	Sph ⁽⁵⁾	6,55	17,46	47	27	Moderada
Saturação por Al ³⁺ (%)	Sph	0,00	43,03	43	0	Forte
Areia fina (g kg ⁻¹)	Exp	1,83	7,64	12	19	Forte
Areia grossa (g kg ⁻¹)	Exp	43,49	83,49	11	34	Moderada

¹Modelo = Esf – Esférico, Exp – Exponencial, Gau – Gaussiano; ²C0 = Efeito pepita; ³C0 + C = Patamar; ⁴R² = coeficiente da validação cruzada; ⁵GDE = Grau de dependência espacial (C0/(C0+C1))*100; ⁶Classe = F - Forte, M – Moderada.

Os modelos ajustados para as variáveis foram o esférico e o exponencial, como apresentado na Tabela 3. Os modelos foram selecionados conforme o R².

Todos os dados analisados apresentaram R² abaixo de 0,50, ou seja, no máximo 50% da variabilidade existente nos valores da semivariância estimada são

explicadas pelos modelos ajustados (CAMPOS et al., 2007). Amaral et al. (2013), observaram padrão diferente ao verificado nesse estudo, onde ao estudar a variabilidade espacial do Índice de Diversidade de Shannon-Wiener em Floresta Ombrófila Mista, domínio da Mata Atlântica, localizada em General Carneiro, sudoeste do Estado do Paraná, observaram valores de R^2 superiores a 0,76.

As variáveis K^+ , P, COT, saturação por Al^{+3} e areia fina apresentaram GDE forte e valor V e areia grossa apresentaram GDE moderado. A maioria dos atributos se ajustou ao modelo exponencial, em concordância com Neves Neto et al. (2013) que indicaram os modelos exponenciais e esféricos como os mais comuns aos atributos do solo.

Avaliando a variabilidade de alguns atributos químicos em Latossolo Amarelo distrófico cultivado de modo convencional com soja no cerrado do Piauí, Matias et al. (2016) encontraram resultados diferentes para as variáveis P, V (%) e saturação por Al^{+3} . Segundo os autores, o P e a saturação por Al^{+3} apresentaram dependência espacial com ajuste para o modelo gaussiano, e o V(%) um GDE moderado.

O padrão observado para as variáveis K^+ e COT corroboram com Zonta et al. (2014), que ao analisar a variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil, verificou GDE forte. De acordo com Cambardella et al. (1994) as variáveis que apresentam forte dependência espacial são mais influenciadas pelas propriedades como textura e mineralogia, enquanto aquelas que apresentam fraca dependência são influenciadas por

propriedades como uso e manejo do solo, o que possibilita inferir a influência do processo erosivo na variabilidade espacial das variáveis analisadas.

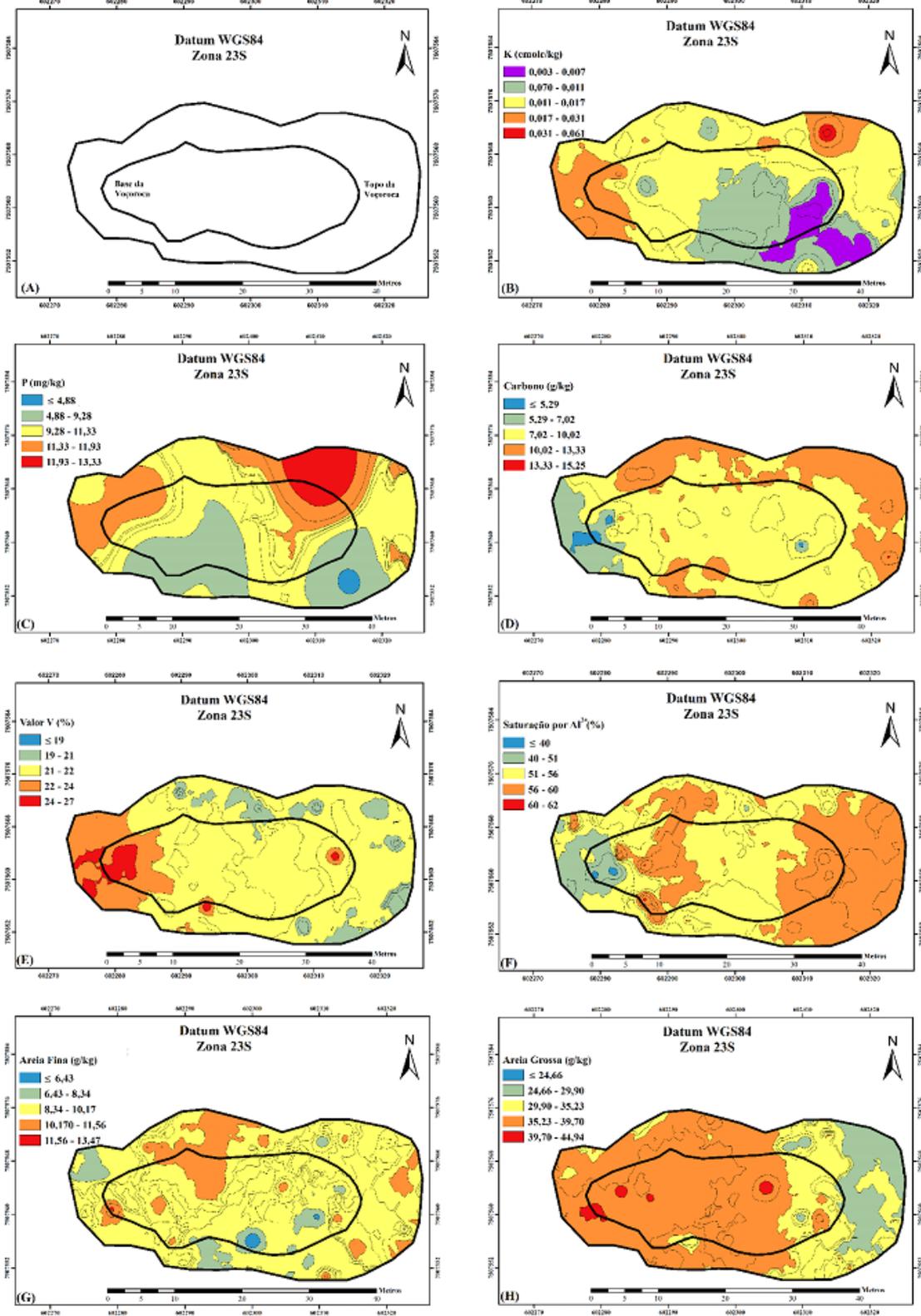
O padrão verificado para os valores de assimetria e curtose, a maioria afastados do zero, indica que os dados não apresentam normalidade. De qualquer forma, de acordo com Corá e Beraldo (2006) a normalidade dos dados não é uma exigência para se realizar análises geoestatísticas.

Ao avaliar a variabilidade espacial de atributos do solo em sistema de semeadura direta com rotação de culturas no Cerrado do Brasil, Bottega, Pinto e Souza (2013), verificaram que as variáveis areia fina e areia grossa apresentaram GDE forte e moderado, respectivamente, corroborando com os resultados observados nesse estudo para essas variáveis.

Os autores supracitados ainda afirmam que a continuidade da variabilidade dos atributos do solo quando ajustados nos modelos exponenciais e esféricos são respectivamente, média e baixa, sendo a continuidade da variabilidade espacial dos atributos químicos menor que a da textura do solo.

Foi gerado um mapa com a delimitação do ambiente interno, topo e base da voçoroca, a fim de auxiliar na discussão dos resultados (Figura 4A). A partir do ajuste do semivariograma, verificação do GDE e de presença de dependência espacial dos atributos do solo analisados, foram gerados os mapas das distribuições espaciais (Figura 4B a Figura 4H), com exceção das variáveis que apresentaram EPP.

Figura 4. Mapas da distribuição espacial do K^+ , P, COT, V (%), e saturação por Al^{3+} nos diferentes ambientes em voçoroca ocorrente em pedoforma convexa.



Por meio da análise da figura 4B, foi possível verificar que os valores de K^+ variaram de 0,003 ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) a 0,061 ($\text{cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Houve variações na distribuição desse atributo

ao longo da extensão da voçoroca, porém os maiores valores foram quantificados, no ambiente externo da voçoroca, com distribuição mais homogênea em sua base, no

ponto mais baixo. Esse padrão pode estar relacionado com a dinâmica da água e a elevada mobilidade que esse elemento tende a apresentar, sendo que o escoamento superficial da água pode favorecer a lixiviação do K^+ .

Ao avaliar a variabilidade espacial do K^+ em solos agrícolas na Suíça, Blanchet et al. (2017), verificaram grandes variações, estando os maiores valores quantificados nas áreas mais baixas da paisagem. Os autores ainda afirmam que a distribuição do K pode ser influenciada pelos processos de formação do solo e uso da terra.

O P, como pode ser observado na Figura (4C), apresentou valores variando de 4,88 ($mg\ kg^{-1}$) a 13,33 ($mg\ kg^{-1}$). Através da análise da Figura (4C), verificou-se que os teores mais elevados foram quantificados no ambiente externo da voçoroca. O que pode estar associado com possíveis teores mais elevados de argila presentes no solo, que devido à sua capacidade adsorver o P o torna indisponível (LANA et al., 2014). Ao estudar a influência da calagem na adsorção de fósforo em diferentes solos do estado do Ceará, Ferreira et al. (2013), observaram que em locais com maiores teores de P, tendem a apresentar menores quantidade de argila total e maior quantidade de areia total.

Os valores de COT variaram entre 5,29 a 15,25 ($g\ kg^{-1}$), sendo os maiores valores quantificados no ambiente externo e predominando próximo ao topo da voçoroca (Figura 4D). Esse ambiente possui toda sua extensão tomada por cobertura vegetal, o que pode ter influenciado na variação dos teores de Carbono. Uma outra possível explicação para o padrão observado, seria o deslizamento do solo devido ao desenvolvimento do processo erosivo e conseqüentemente remoção da cobertura do solo, o que pode ser verificado no ambiente interno e na base da voçoroca. Ao realizar uma avaliação preliminar do impacto do escorregamento, do fluxo da terra e da erosão nos estoques de carbono do solo em voçoroca na Nova Zelândia, Basher et al. (2018), verificaram que o deslizamento de terra reduz os teores de carbono do solo.

Os maiores valores para V% foram quantificados na base da voçoroca, variando de 19 a 27 (%) (Figura 4E). Esses valores são considerados baixos, visto que segundo Freire

et al. (2013), consideram solos com valores abaixo de 50% como distróficos.

O processo de formação de voçorocas contribui para dentre outras perdas, a remoção das bases do solo. Dessa forma, ao observar a Figura 4E, pode-se inferir que esse padrão pode estar associado à perda de bases promovida pelo processo erosivo, em que no ambiente externo nos pontos mais elevados do relevo (sentido topo/base) está ocorrendo a remoção de bases, para o ambiente interno e a para a região da base da voçoroca.

O processo erosivo de formação de voçorocas ocorre das partes mais baixas da paisagem para as mais altas podendo promover um gradiente de escoamento, direcionando a dinâmica da água e conseqüentemente a lixiviação para o interior e partes mais baixas do relevo. Ao estudar os atributos químicos, físicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras – MG, Gomide, Silva e Soares (2011) verificaram valores de V% inferiores a 50%, corroborando com o apresentado no presente estudo.

Ao analisar a Figura 4F, verificou-se que os valores da saturação por Al^{+3} variaram de 40% a 62%. Os menores teores foram quantificados no ambiente externo e na base da voçoroca, padrão diferente ao observado para o V% (Figura 4E). Os autores supracitados, Gomide, Silva e Soares (2011), verificaram também valores mais baixos de saturação por Al^{+3} na base, porém mais elevados em outros pontos da voçoroca, corroborando com o observado no presente estudo.

Os autores supracitados, ainda afirmam que valores elevados para esse atributo podem trazer grandes prejuízos à reabilitação desses ambientes, o que torna o solo mais limitante ao estabelecimento da vegetação, e que esses resultados podem ser atribuídos à baixa densidade da vegetação encontrada, além da baixa deposição de material orgânico proveniente dessa vegetação, diminuindo a ciclagem de nutrientes e a entrada de bases ao solo (MACHADO et al., 2010).

Os valores de areia fina e areia grossa variaram de 6,43 ($g\ kg^{-1}$) a 13,47 ($g\ kg^{-1}$) e 24,60 ($g\ kg^{-1}$) a 44,94 ($g\ kg^{-1}$), respectivamente (Figura 4G e 4H). Ao estudar a perda de solo e nutrientes em voçorocas em diferentes graus de

restauração no município de Pinheiral-RJ, Machado et al. (2010), também verificaram maiores valores de areia grossa. Os valores de areia fina não apresentaram uma distribuição homogênea, como o observado para a areia grossa. Os valores quantificados para a areia fina variaram ao longo dos ambientes da voçoroca, padrão diferente ao observado para a areia grossa, onde os maiores valores considerando a proporção de área dos ambientes foram quantificados no ambiente interno.

Os padrões verificados para as frações granulométricas podem estar associados ao escoamento superficial, que tende a carrear as partículas do solo, que no tocante a areia fina é mais facilmente carregada quando comparada a areia grossa, visto que demandam de menos energia cinética para seu transporte ao longo da superfície, já que possuem dimensões menores (LIMA et al., 2015).

As maiores quantidades de areia grossa foram verificadas no ambiente interno da voçoroca. Esse padrão pode estar relacionado com a intensidade do carreamento de partículas e a sua deposição ao longo da superfície. Ao analisar a Figura 4H, pode-se verificar que a deposição desse material mais grosso se

concentrou na parte mais baixa da voçoroca, ou seja seu interior.

4 CONCLUSÕES

As variáveis que apresentaram EPP necessitam de um maior número amostral ou que sejam testados outros métodos da geoestatística, visto que a partir do utilizado no presente estudo não foi possível verificar a existência de dependência espacial.

Os atributos K^+ , P, COT, areia fina e areia grossa apresentaram ajuste para o modelo exponencial. Com exceção da saturação por Al^{+3} , que apresentou GDE moderado, os demais apresentaram GDE forte. Já as variáveis V% e saturação por Al^{+3} ajustaram-se ao modelo esférico, e apresentaram GDE moderado e forte, respectivamente.

As variáveis apresentaram variabilidade espacial entre os ambientes interno e externo da voçoroca em pedoforma convexa.

O uso da ferramenta geoestatística para espacializar os atributos químicos e físicos do solo em ambientes degradados como voçorocas é viável, e apresenta resultados que podem ser utilizados em programas de recuperação de áreas degradadas.

5 REFERÊNCIAS

- AMARAL, L. P.; FERREIRA, R. A.; LISBOA, G. S.; LONGHI, S. J.; WATZLAWICK, L. F. Variabilidade espacial do Índice de Diversidade de Shannon-Wiener em Floresta Ombrófila Mista. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 41, n. 97, p. 83-93, 2013.
- ASSUMPCÃO, H. C. P.; HADLICH, G. M. Estatística descritiva e estacionaridade em variáveis geoquímicas ambientais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 22, n. 4, p. 671-677, 2017.
- AUMOND, J. J.; MAÇANEIRO, J. P. Abordagem sistêmica e aplicação de rugosidades para desencadear propriedades emergentes em restauração de solos degradados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 24, n. 3, p. 759-770, 2014.
- BASHER, L.; BETTS, H.; LYNN, I.; MARDEN, M.; MCNEILL, S.; PAGE, M.; ROSSER, B. A preliminary assessment of the impact of landslide, earthflow, and gully erosion on soil carbon stocks in New Zealand. **Geomorphology**, Amsterdam, v. 33, n. 15, p. 93-106, 2018.
- BLANCHET, G.; LIBOHOVA, Z.; JOOST, S.; ROSSIER, N. Spatial variability of potassium in agricultural soils of the canton of Fribourg, Switzerland. **Geoderma**, Amsterdam, v. 290, p. 107-121, 2017.

- BOTTEGA, E. L.; 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.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511, 1994.
- CAMPOS, M. C. C.; JÚNIOR, J. M.; PEDREIRA, 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.
- CORÁ, J. E.; BERVALDO, J. M. G. Variabilidade espacial de atributos do solo antes e após calagem e fosfatagem em doses variadas na cultura de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 2, p. 374-387, 2006.
- DELGADO, F. M. **AgricolaeR**: a package for statistical analysis. Lima: Universidade Nacional Agrária La Molina, 2018.
- FERREIRA, A. L. L.; LIMA, I. M. A.; NASCIMENTO, B. L. M.; AQUINO, B. F. Influência da calagem na adsorção de fósforo em diferentes solos do estado do Ceará. **Agropecuária Científica no Semiárido**, Campina Grande, v. 9, n. 4, p. 1-5, 2013.
- FREIRE, L. R.; BALIEIRO, F. C.; ZONTA, E. Z.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; LIMA, E.; GUERRA, J. G. M.; FERREIRA, M. B. C.; LEAL, M. A. A.; CAMPOS, D. V.; POLIDORO, J. C. **Manual de Calagem e Adubação do Estado do Rio de Janeiro**. Seropédica: Editora Universidade Rural, 2013.
- FU, P.; RICH, P. M. A geometric solar radiation model and its applications in agriculture and forestry. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 37, n. 1-3, p. 25-35, 2002.
- GAIA-GOMES, J. H. **Caracterização Morfométrica da Sub-Bacia do ribeirão Cachimbal, RJ e Atributos Edáficos Condicionantes no Processo Erosivo em Pedoformas Côncava e Convexa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola e Ambiental) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2017.
- GOMIDE, P. H. O.; SILVA, M. L. N.; SOARES, C. R. F. S. Atributos físicos, químicos e biológicos do solo em ambientes de voçorocas no município de Lavras – MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Lavras, v. 35, n. 2, p. 567-577, 2011.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. 1. ed. New York: Oxford University, 1989.
- LANA, M. C.; RAMPIM, L.; SCHULZ, L. R.; KAEFER, J. E. Disponibilidade de fósforo para plantas de milho cultivadas com fertilizantes organomineral e fosfato monoamônico. **Scientia Agraria Paranaensis**, Marechal Cândido Rondon, v. 13, n. 3, p. 198-209, 2014.
- LIMA, C. A.; MONTENEGRO; A. A. A.; SANTOS, T. E. M.; ANDRADE, E. M.; MONTEIRO, A. L. N. Práticas agrícolas no cultivo da mandioca e suas relações com o escoamento superficial, perdas de solo e água. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 4, p. 697-706, 2015.

- MACHADO, R. L.; RESENDE, A. S.; CAMPELLO, E. F. C.; OLIVEIRA, J. A.; FRANCO, A. A. Soil and nutrient losses in erosion gullies at different degrees of restoration. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 945-954, 2010.
- MARQUES, O.; TIENNE, L.; CORTINES, E.; VALCARCEL, R. Atributos ambientais definidores de presença de fragmentos florestais de Mata Atlântica em microbacias instáveis. EDUR. **Revista Universidade Rural Série Ciências da Vida**, Rio de Janeiro, v. 24, n. 2, p. 145-150, 2005.
- MATIAS, S. S. R.; NÓBREGA, J. C. A.; NÓBREGA, R. F. A.; ANDRADE, F. A.; BAPTISTEL, A. C. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo cultivado de modo convencional com soja no cerrado piauiense. **Revista Agroambiente**, Boa Vista, v. 9, n. 1, p. 17-26, 2016.
- MENEZES, C. E. G. **Integridade de pastagem, manejo e atributos do solo no médio vale do paraíba do sul**. 2008. Tese (Doutorado em Ciências em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2008.
- MIQUELONI, D. P.; GIANELLO, E. M.; BUENO, C. R. P. Variabilidade espacial de atributos e perda de solo na definição de zonas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 45, n. 1, p. 18-28, 2015.
- NEVES NETO, D. N.; SANTOS, A. C.; SANTOS, P. M.; MELO, J. C.; SANTOS, J. S. Análise espacial de atributos do solo e cobertura vegetal em diferentes condições de pastagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 9, p. 995-1004, 2013.
- OLIVEIRA, I. A.; MARQUES JUNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; FREITAS, L.; SIQUEIRA, D. S.; CUNHA, J. M. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de Argissolos da Região de Manicoré, AM. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 3, p. 668-681, 2015.
- PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA, C. H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais**. 1. ed. Piracicaba: FEALQ, 2002.
- RODRIGUES, K. M. **Variabilidade espacial de atributos químicos, físicos e biológicos em voçoroca revegetada no município de Pinheiral-RJ**. Dissertação (Mestrado em Agronomia e Ciência do Solo) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2010.
- ROSEMERY, F.; VITHARANA, U. W. A.; INDRARATNE, S. P.; WEERASOORIYA, R.; MISHRA, U. Exploring the spatial variability of soil properties in an Alfisol soil catena. **Catena**, Amsterdam, v. 150, n. 1, p. 53-51, 2017.
- RUBIRA, F. G.; BARREIROS, A. M.; VILLELA, F. N. J.; PEREZ FILHO, A. Pedogeomorphological systems in the interpretation of the evolution of quaternary landscapes in humid tropical climates. **Revista Mercator**, Fortaleza, v. 18, n. 1, p. 1-17, 2019.
- SANTOS, G. L.; PEREIRA, M. G.; LIMA, S. S.; CEDDIA, M. B.; MENDONÇA, V. M. M.; DELGADO, R. C. Landform curvature and its effect on the spatial variability of soil attributes, Pinheiral-RJ/BR. **Cerne**, Seropédica, v. 22, n. 4, p. 431-438, 2016.
- SANTOS, G. L.; PEREIRA, M. G.; DELGADO, R. C.; MORAIS, L. F. D. Padrões da Regeneração Natural na Região de Mar de Morros, Pinheiral-RJ. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, n. 1, p. 1-11, 2017.

SILVA, M. B.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; SCHIAVO, J. A.; COOPER, M.; CAVASSANI, R. S. Gênese e classificação dos solos de uma topossequência em área de carste na serra da Bodoquena, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 1, p. 1464-1480, 2013.

SILVEIRA JUNIOR, O.; SANTOS, C. A.; SANTOS, P. M.; ROCHA, J. M. L.; ALEXANDRINO, E. Distribuição espacial de atributos químicos do solo em áreas sob diferentes usos agrícolas. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 22, n. 5, p. 442- 455, 2014.

SIRTOLI, A. E.; SILVEIRA, C. T.; MANTOVANI, L. E.; SIRTOLI, A. R. A.; OKA-FIORI, C. Atributos do relevo derivados de modelo digital de elevação e suas relações com solos. **Scientia Agrária**, Curitiba, v. 9, n. 3, p. 317-329, 2008.

SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. Analysis of variance test for normality: complete samples. **Biometrika**, Oxford, v. 52, n. 3-4, p. 591-611, 1965.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília, DF: Embrapa Solos, 2017.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geoestatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v. 51, n. 3, p. 1-75, 1983.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 19, n. 13, p. 1467-1476, 1988.

ZONTA, J. H.; BRANDÃO, Z. N.; MEDEIROS, J. C.; SANA, R. S.; SOFIATTI, V. Variabilidade espacial da fertilidade do solo em área cultivada com algodoeiro no Cerrado do Brasil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 18, n. 6, p. 595-602, 2014.