

DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DOS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS DO SOLO COMO AUXÍLIO À IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS PRIORITÁRIAS PARA RECARGA DE NASCENTES

Alice Raquel Caminha
Jonas Faria Dionísio de Oliveira
Lucas Ribeiro Guimarães
Flávia Vilela Córrea
Gabriela Rezende de Souza
Luiz Fernando Coutinho de Oliveira
Jorge Enrique Romero Prieto
Gilberto Coelho

RESUMO

A produção de água de uma nascente depende dos fenômenos que ocorrem em sua área de recarga, entre eles, a infiltração de água no solo. Porém, a variabilidade natural dos atributos físico-hídricos, associada às alterações causadas pelas atividades antrópicas, dificultam o planejamento e manejo adequados do solo e água nestes locais. Nesse sentido, objetivou-se analisar a distribuição espacial e realizar o mapeamento dos atributos físico-hídricos do solo na área de recarga da principal nascente que abastece a Universidade Federal de Lavras, visando a identificação de áreas prioritárias para a conservação dos recursos hídricos. Para tal, foram coletadas amostras de solo deformadas e indeformadas, na camada de 0 – 20 cm. Foram determinadas a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), densidade do solo (D_s), densidade de partículas (D_p), volume total de poros (VTP), porosidade drenável (μ) e porcentagem de matéria orgânica (MO), areia, argila e silte. A geoestatística foi utilizada para a análise da distribuição espacial, utilizando a krigagem ordinária como interpolador. Verificou-se que a maior parte dos atributos apresentou dependência espacial forte, sendo o modelo exponencial o que apresentou melhor ajuste para a descrição da continuidade espacial da maioria dos atributos. A espacialização dos dados por meio da krigagem ordinária permitiu a identificação de zonas com condições favoráveis à infiltração de água, contribuindo para o estabelecimento de locais prioritários para as práticas de conservação do solo, destacando-se a região próxima à nascente, parte da área cultivada e as regiões com as maiores cotas.

Palavras-chave: Geoestatística. Krigagem ordinária. Física do solo. Dinâmica hidrológica.

SPATIAL DISTRIBUTION OF SOIL PHYSICAL-HYDRAULIC ATTRIBUTES AS AID IN IDENTIFYING PRIORITY AREAS FOR SPRING RECHARGE

ABSTRACT

The water yield of a spring relies on the factors operating within its recharge area, including the physical-hydraulic attributes of the soil. However, the natural variability of these attributes, coupled with alterations caused by human activities, poses challenges to proper soil and water planning and management in these sites. In this context, the objective was to analyze the spatial distribution and map the physical-hydraulic attributes of the soil in the recharge area of the main spring that supplies the Federal University of Lavras, with the aim of identifying priority areas for

water resource conservation. For this purpose, deformed and undeformed soil samples were collected within the 0 – 20 cm depth. The following attributes were assessed: saturated hydraulic conductivity (K₀), bulk density (D_s), particle density (D_p), total pore volume (VTP), drainable porosity (μ), content of organic matter (MO), sand, clay, and silt. Geostatistics were applied for the analysis of spatial distribution, using ordinary kriging as the interpolation method. Most attributes exhibited strong spatial dependence, with the exponential model standing out as the most suitable for describing the spatial continuity of the majority of them. The spatialization of data through ordinary kriging allowed the identification of zones with favorable conditions for water infiltration, contributing to the establishment of priority sites for soil conservation practices, notably the region near the spring, part of the cultivated area, and regions with the highest elevations.

Key words: Geostatistics. Ordinary kriging. Soil physics, Hydrological dynamics.

1. INTRODUÇÃO

A produção de água de uma nascente está intimamente ligada aos processos que ocorrem em sua área de recarga, sobretudo a infiltração, que é influenciada, entre outros, pelo comportamento dos atributos físico-hídricos do solo (LETZ et al., 2021). A determinação e caracterização destes atributos é crucial para compreender a dinâmica hidrológica em ambientes naturais e antropizados, visando o manejo adequado dos recursos naturais, como o solo e água. No entanto, a alta variabilidade espacial dos atributos físico-hídricos, que ocorre naturalmente devido aos processos físicos, químicos e biológicos de formação e desenvolvimento dos solos, tem sido reconhecida como uma limitação para o planejamento e gestão ambiental adequados (YENEHUN et al., 2022).

Somada a essa variabilidade natural, alterações indesejáveis destes atributos têm sido causadas pela intensificação das atividades antrópicas, resultando no desequilíbrio da distribuição de água no ciclo hidrológico. Estas

alterações atuam, principalmente, sobre os atributos considerados indicadores de qualidade do solo associados à recarga de água, sendo evidenciadas pela redução da condutividade hidráulica do solo saturado (ALVARENGA et al., 2011; GALARZA et al., 2023), aumento da densidade do solo (SENA et al., 2021), diminuição da porosidade drenável (FUENTES-GUEVARA et al., 2022) e do teor de matéria orgânica (SUZUKI et al., 2023).

Uma das ferramentas que podem ser utilizadas no estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo é a geoestatística, a qual considera que as características e propriedades do solo variam em função da localização dos pontos de observação no espaço. Dessa forma, torna-se possível caracterizar uma variável de interesse a partir do conhecimento de sua distribuição espacial e, posteriormente, realizar estimativas para pontos não amostrados a partir de ferramentas de interpolação.

A krigagem tem sido um dos métodos de interpolação mais aplicados aos estudos dos atributos físico-hídricos do solo, fornecendo mapas com estimativas não tendenciosas e

variância de estimação mínima, desde que seja feita a modelagem adequada da continuidade espacial. Resultados obtidos a partir da aplicação desta ferramenta podem ser verificados pelos trabalhos de Santos et al. (2018) e Ding, Zhou e Cai (2023).

Considerando a importância da manutenção da produção de água pelas nascentes, a análise da distribuição espacial dos atributos físico-hídricos do solo nas áreas de recarga torna-se um importante instrumento para o levantamento de zonas prioritárias e de áreas com necessidade de intervenções, bem como o estabelecimento, por parte dos tomadores de decisão, de medidas voltadas à gestão e sustentabilidade dos recursos hídricos (VIEIRA et al., 2020).

Nesse sentido, objetivou-se, com este trabalho, analisar, descrever e mapear a distribuição espacial dos atributos físico-hídricos dos solos da área de recarga de uma nascente perene, responsável pelo abastecimento da Universidade Federal de Lavras, MG, visando compreender os fatores associados ao solo que instauram locais com condições favoráveis e desfavoráveis à recarga de água.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo

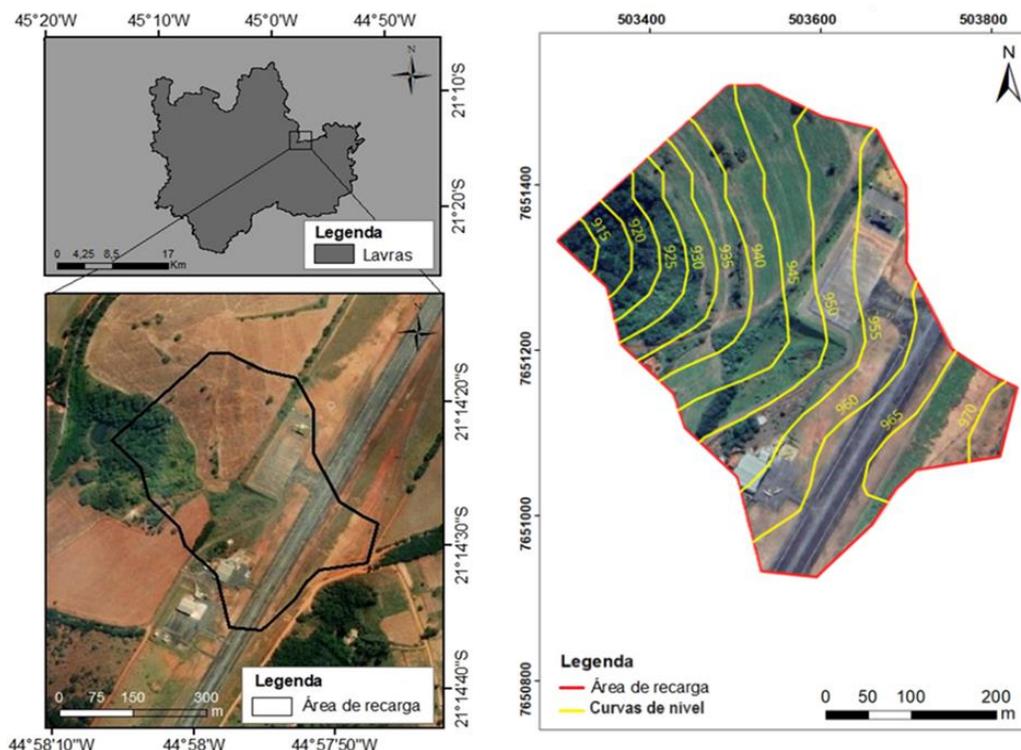
A área de estudo está localizada no município de Lavras, situado na região do Alto Rio Grande, no sul do Estado de Minas Gerais, a uma altitude média de 918 metros. A classificação climática, segundo Köppen, é Cwa, com inverno seco e verão chuvoso, temperatura média anual de 19,4 °C e precipitação média

anual em torno de 1400 mm, concentrada entre os meses de outubro e março (MARTINS et al., 2018).

As amostras de solo foram coletadas na área de recarga da nascente de maior contribuição para o sistema de abastecimento de água da Universidade Federal de Lavras. A área possui 17,4 hectares e sua delimitação foi realizada por meio de cenas obtidas do satélite Alos Palsar (Fig. 1a). A nascente (N1) está localizada sob coordenadas 21°14'22.50"S 44°58'5.75"O e, embora já tenha sido classificada como degradada (FERREIRA et al., 2009), é responsável pela produção de cerca de 90% da água destinada ao consumo interno da universidade.

O tipo de solo predominante na área é o Latossolo Vermelho, com classes de relevo predominantes: suave ondulado (53%), ondulado (39%) e plano (8%). Com relação ao uso e ocupação do solo (Fig. 2a), 30% da área é destinado ao cultivo de culturas anuais (milho e feijão); 29,3% é ocupada pelo Aeroporto Municipal de Lavras; 25,4% é coberto por mata e 15,3% correspondem a áreas com solo exposto.

Figura 1 - Localização da área de recarga (a) e curvas de nível (b).



Fonte: Os autores (2023).

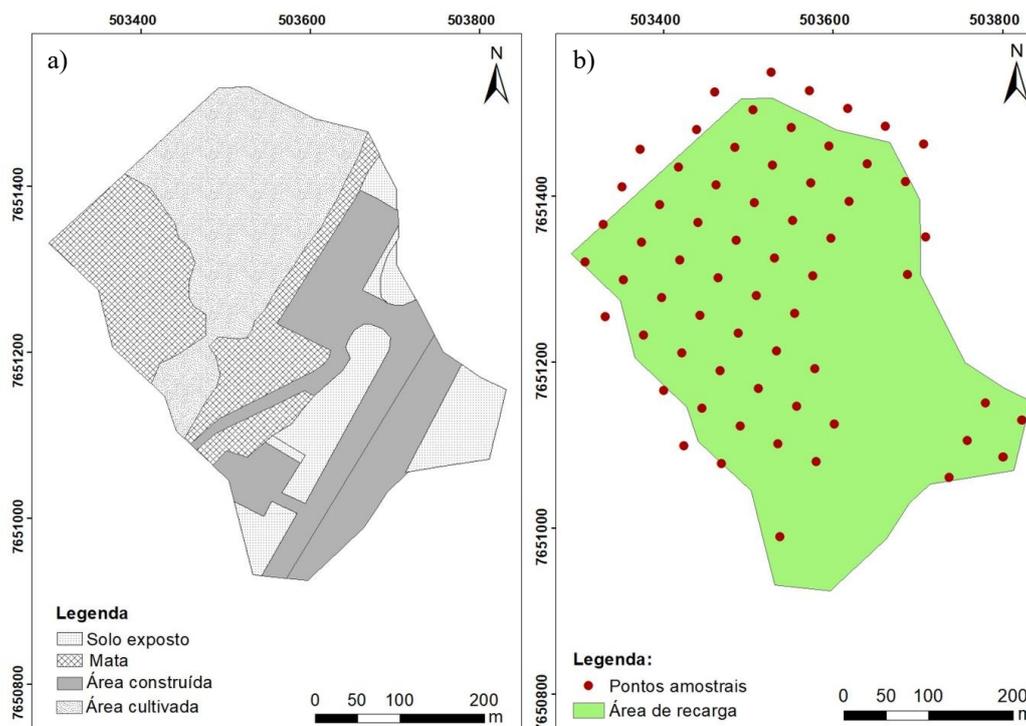
2.2 Amostragem do solo e análises laboratoriais

Para elaboração do plano amostral, foi estabelecida uma malha com pontos espaçados em 50 m, totalizando 63 pontos, sendo descartados os pontos situados sob área construída (Fig. 2b). Foram coletadas amostras de solo na camada 0 – 20 cm utilizando uma cavadeira manual para amostras deformadas e um amostrador do tipo Uhland para as indeformadas.

Para a caracterização físico-hídrica do solo, foram determinadas a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0), densidade do

solo (D_s), densidade de partículas (D_p), volume total de poros (VTP), porosidade drenável (μ), teores de areia, argila e silte e teor de matéria orgânica (MO), conforme metodologias propostas pela Embrapa (2017). Para a determinação da umidade do solo na capacidade de campo (θ_{cc}), as amostras foram dispostas em funis de placa porosa e submetidas a uma tensão de 6 kPa (ANDRADE; STONE, 2011). O volume total de poros (VTP) foi obtido a partir da relação entre a D_s e a D_p e a porosidade drenável, obtida pela diferença entre o VTP e a θ_{cc} (REICHARDT; TIMM, 2012).

Figura 2 - Uso e ocupação do solo da área de recarga e pontos amostrais.



Fonte: Os autores (2023).

2.3 Análise estatística

Anteriormente ao uso da geoestatística, os dados foram submetidos a uma análise exploratória, em que foram calculados os valores mínimos, máximos, média, mediana, desvio padrão, coeficiente de variação e coeficiente de assimetria. Também foram identificados valores discrepantes, que foram removidos do conjunto amostral em caso de diferenças acentuadas em relação a seus vizinhos mais próximos. Para a verificação da normalidade dos dados, foi aplicado o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância.

Posteriormente, uma transformação logarítmica foi aplicada aos dados de K_0 , visando reduzir a assimetria dos dados e facilitar o ajuste do semivariograma.

2.4 Análise geoestatística

Posteriormente à etapa de análise exploratória, a geoestatística foi utilizada para o estudo da distribuição espacial dos atributos físico-hídricos, visando realizar o mapeamento destes. Assim, a análise da dependência espacial dos dados foi feita a partir da função semivariograma, conforme descrito por Isaaks e Srivastava (1989):

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

Em que $\gamma(h)$ é a semivariância e $N(h)$ é o número de pares $[z(x_i), z(x_i + h)]$, separados pelo vetor h .

O software GS+ (ROBERTSON, 2008) foi utilizado para determinação do semivariograma experimental e, posteriormente, para os ajustes dos semivariogramas teóricos do tipo esférico, exponencial e gaussiano. Segundo Yamamoto e Landim (2013), estes são os modelos mais utilizados na geoestatística.

Para a avaliação da qualidade do ajuste de cada modelo teórico ao semivariograma experimental, foram considerados o coeficiente de determinação (R^2) e o grau de dependência espacial (GD), que pode ser classificada como forte ($GD < 25\%$), moderada ($25\% < GD < 75\%$) e fraca ($GD > 75\%$), segundo Cambardella et al. (1994). O GD pode ser descrito conforme a equação:

$$GD = \left(\frac{C_0}{C_0 + C_1} \right) \times 100$$

Em que C_0 é o efeito pepita e $C_0 + C_1$ é o patamar.

Para escolha do modelo mais adequado entre os três ajustados, foram avaliadas as estatísticas Erro Médio Reduzido (EMR) e Desvio Padrão do Erro (DPE), gerados no procedimento de validação cruzada. Foram considerados como critério, o EMR mais próximo de zero e o DPE mais próximo de 1,

conforme recomendado por Yamamoto e Landim (2013). A análise do GD foi utilizada como critério auxiliar, quando necessário.

Por fim, o software ArcMap®, versão 10.8 foi utilizado para gerar os mapas de distribuição espacial de cada atributo, utilizando os parâmetros do semivariograma fornecidos pelo ajuste do modelo mais adequado e a krigagem ordinária como método de interpolação.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Análise estatística

Os resultados da estatística descritiva de cada variável evidenciaram que nenhum dos atributos mostrou grandes discrepâncias quando comparado aos vizinhos mais próximos (Tabela 1), não sendo necessária a remoção destes do conjunto amostral.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas dos atributos físico-hídricos do solo.

Variável	Mínimo	Máximo	Média	Mediana	D. P. ²	CV ³	Assimetria	W ⁴
K_0 (cm h ⁻¹)	0,012	55,431	10,113	4,784	12,960	128,156	1,620	0,758
Log K_0 (cm h ⁻¹)	-1,921	1,744	0,395	0,677	0,970	245,339	-0,731	0,921
Ds (g cm ⁻³)	1,020	1,791	1,217	1,211	0,135	11,066	1,320	0,910
Dp (g cm ⁻³)	2,483	3,042	2,710	2,698	0,109	4,015	0,889	0,931
VTP (%)	32,810	61,648	54,953	55,933	4,857	8,839	-1,739	0,867
μ (cm ³ cm ⁻³)	0,022	0,245	0,112	0,089	0,064	56,613	0,472	0,941 ¹
MO (%)	0,280	5,970	3,208	3,480	1,361	42,423	-0,481	0,954
Areia (%)	5,000	55,000	17,274	15,000	9,135	52,882	1,671	0,842
Argila (%)	2,000	73,000	55,762	60,000	15,178	27,220	-2,085	0,740
Silte (%)	8,000	75,000	26,889	24,000	12,446	46,287	1,713	0,837

¹Dados seguem distribuição normal segundo o teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância; ²Desvio Padrão; ³Coefficiente de Variação (%); ⁴Estatística do teste de Shapiro-Wilk.

Os atributos Ds, Dp e VTP foram classificados como de baixa variabilidade ($CV < 12\%$), enquanto as variáveis μ , MO, areia, argila e silte apresentaram média variabilidade ($12\% < CV < 60\%$), conforme classificação proposta por

Warrick e Nielsen (1980). Já os maiores CV encontrados para as frações areia e silte, de acordo Klinke Neto et al. (2017), podem indicar grande mobilidade destas partículas no ambiente, além da heterogeneidade natural do solo.

Apenas a porosidade drenável (μ) apresentou distribuição normal. Embora o mesmo não tenha sido observado para as variáveis $\text{Log}K_0$, D_s , D_p e MO , os coeficientes de assimetria próximos a zero, bem como a proximidade entre os valores da média e mediana, indicam uma tendência à normalidade dos dados, contribuindo de forma positiva para que as análises geoestatísticas possam ser realizadas de forma mais precisa.

3.2 Análise geoestatística

Na Tabela 2 estão dispostos os resultados gerados pela análise geoestatística dos atributos físico-hídricos. A maioria deles apresentou dependência espacial classificada como forte, com exceção de D_s e VTP , que foi moderada apenas para o modelo gaussiano. Já a porosidade drenável (μ) apresentou dependência espacial moderada para os três modelos ajustados.

Tabela 2 - Parâmetros de ajuste dos modelos de semivariograma, graus de dependência espacial e coeficientes estatísticos gerados no procedimento de validação cruzada.

Variável	Modelo	C_1	C_0	$(C_0 + C_1)$	a (m)	GD (%)	R^2	EMR	DPE	
K_0	Esf. ¹	165,117	6,483	171,600	66,53	3,778	Forte	0,950	-0,013	0,902
	Gaus.	172,300	0,100	172,400	53,35	0,058	Forte	0,910	-0,013	0,901
	Exp.	181,800	0,100	181,900	86,24	0,055	Forte	0,928	-0,014	0,871
$\text{Log}(K_0)$	Esf.	0,763	0,095	0,858	216,10	11,072	Forte	0,756	-0,003	1,474
	Gaus.	0,808	0,001	0,809	118,82	0,124	Forte	0,776	-0,019	3,399
	Exp. ¹	0,992	0,001	0,993	331,80	0,101	Forte	0,793	0,001	1,465
D_s	Esf.	0,020	0,004	0,024	364,90	16,942	Forte	0,993	0,014	1,207
	Gaus.	0,017	0,008	0,024	321,30	30,738	Mod. ²	0,991	0,024	1,146
	Exp. ¹	0,031	0,002	0,033	776,40	7,527	Forte	0,996	0,008	1,283
D_p	Esf.	0,012	0,001	0,013	253,00	6,240	Forte	0,672	-0,018	1,731
	Gaus.	0,012	0,000	0,012	133,71	0,084	Forte	0,690	0,004	4,497
	Exp. ¹	0,015	0,000	0,015	393,60	0,066	Forte	0,695	-0,013	1,611
VTP	Esf.	27,930	6,660	34,590	405,40	19,254	Forte	0,994	-0,021	1,284
	Gaus.	22,180	10,890	33,070	325,97	32,930	Mod. ²	0,998	-0,017	1,257
	Exp. ¹	35,900	4,900	40,800	699,30	12,010	Forte	0,986	-0,013	1,285
MO	Esf.	1,975	0,122	2,097	460,30	5,818	Forte	0,934	0,019	1,171
	Gaus. ¹	1,558	0,382	1,940	355,76	19,691	Forte	0,944	0,004	1,162
	Exp.	2,010	0,001	2,011	565,80	0,050	Forte	0,933	0,027	1,136
μ	Esf.	0,003	0,002	0,006	397,37	41,062	Mod. ²	0,517	-0,002	1,046
	Gaus. ¹	0,002	0,003	0,005	423,35	54,465	Mod. ²	0,550	0,005	1,024
	Exp.	0,004	0,002	0,006	706,39	36,665	Mod. ²	0,515	-0,001	1,059
Areia	Esf. ¹	76,920	2,100	79,020	110,80	2,658	Forte	0,453	0,017	1,011
	Gaus.	79,010	0,100	79,110	89,20	0,126	Forte	0,450	0,012	1,054
	Exp.	79,360	2,600	81,960	147,60	3,172	Forte	0,446	-0,004	1,039
Argila	Esf. ¹	99,300	6,200	105,500	280,80	5,877	Forte	0,735	0,023	1,162
	Gaus.	83,600	22,200	105,800	241,62	20,983	Forte	0,718	0,033	1,174
	Exp.	113,500	0,100	113,600	371,70	0,088	Forte	0,665	0,033	1,160
Silte	Esf.	311,000	0,100	311,100	685,30	0,032	Forte	0,919	-0,025	1,070
	Gaus. ¹	335,900	25,000	360,900	610,37	6,927	Forte	0,961	0,021	1,018
	Exp.	206,768	0,100	206,868	507,09	0,048	Forte	0,872	-0,037	1,076

¹melhor modelo ajustado; ²moderada.

Em camadas mais superficiais, a variabilidade a densidade do solo é maior devido ao processo de estruturação do solo, presença de matéria orgânica e do sistema radicular de plantas (SOUZA et al., 2020). Lemos Filho et al. (2008) analisaram a variabilidade espacial de Ds e MO em uma área de 0,9 ha com 49 pontos separados de forma equidistante e encontraram moderada dependência espacial para Ds para os modelos gaussiano, esférico e exponencial, considerando a camada 0 – 20 cm. Para MO, os autores encontraram forte dependência espacial apenas para o modelo exponencial, contrastando com os resultados obtidos neste trabalho, em que foi observada dependência espacial classificada como forte para os três modelos ajustados para este atributo.

Já a forte dependência espacial encontrada para as frações texturais areia, argila e silte pode ser atribuída ao material de origem do solo e à ação do processo de intemperismo (SANI et al., 2023). Estes resultados se assemelham aos obtidos por Delbari et al. (2019), que analisaram a variabilidade espacial dos atributos físicos do solo em uma área de 85 ha utilizando uma malha amostral com pontos separados por 70 m. Os autores relatam que as frações texturais apresentaram um grau de dependência espacial variando entre moderada e forte para a camada 0 – 15 cm.

Conforme aponta Cambardella et al. (1994), a forte dependência espacial dos atributos do solo pode ser atribuída a sua variabilidade intrínseca, relacionada aos processos pedogenéticos. Já dependência espacial moderada e fraca geralmente se relacionam à variabilidade extrínseca, causada por mudanças

no uso e ocupação do solo, práticas culturais, erosão e compactação. Dessa forma, os diferentes graus de dependência espacial das propriedades do solo encontrados neste estudo podem estar relacionados tanto aos processos de gênese e formação, quanto às práticas de manejo do solo adotadas na área.

Quanto ao alcance do semivariograma, os menores valores foram obtidos para o atributo K_0 , pelos modelos gaussiano e esférico, com alcances de 53,35 m e 66,53 m, respectivamente. Scherpinski et al. (2010) utilizaram uma malha amostral semelhante à deste estudo em uma área localizada no sul do Brasil e detectaram estruturas de dependência espacial para o atributo com alcances de até 96,22 m. Já Guimarães et al. (2016), por sua vez, adotaram uma malha regular com espaçamento de 10 x 10 m em áreas de pastagem e encontraram alcances menores para K_0 , de 20,7 m para o modelo esférico e 38,9 m para o modelo exponencial.

Ademais, destaca-se a qualidade dos ajustes dos modelos ao semivariograma experimental para os atributos K_0 , Ds, VTP e MO, com valores de R^2 maiores que 0,9. Além disso, foram observados valores de EMR próximos de 0 para todas as variáveis, fato que evidencia a qualidade das estimativas. Por outro lado, foram encontrados valores de DPE maiores que 1 para a maioria dos atributos, o que indica subestimativa da variância, enquanto valores menores que 1 indicam superestimativa.

Conforme constata-se pela análise da Tabela 2, o modelo exponencial foi considerado o mais adequado para a maioria dos atributos, corroborando com os resultados obtidos por Gouvêa et al. (2020). De acordo com Terra et al.

(2014), o modelo exponencial é o mais adequado para descrever a estrutura de variabilidade espacial das variáveis físico-hídricas do solo e das variáveis relacionadas às plantas.

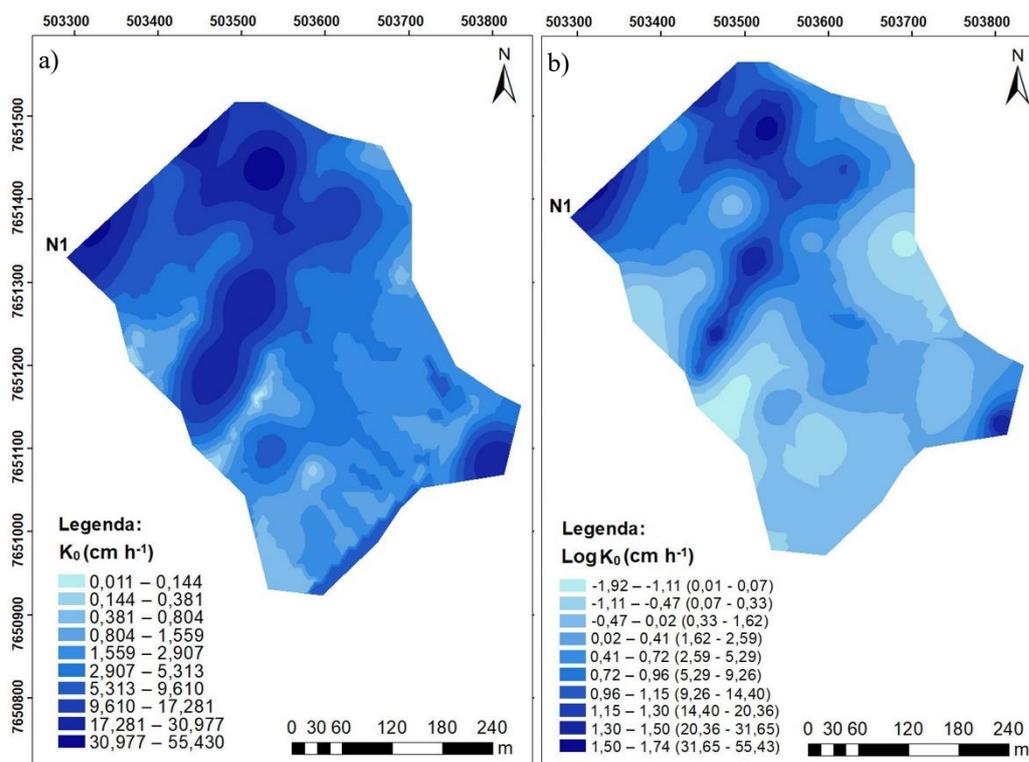
3.3 Mapeamento dos atributos físico-hídricos do solo

Associando a distribuição espacial de K_0 (Fig. 3a) ao mapa de uso e ocupação do solo na área (Fig. 2a), observa-se que os maiores valores para K_0 são encontrados em áreas sob mata, como aquelas próximas à nascente, nas áreas cultivadas e nas pequenas porções com altos teores de areia. Tal fato evidencia a importância da cobertura vegetal e da textura no processo de infiltração da água no solo. Todavia, a infiltração também sofre forte influência das condições de

manejo, uma vez que estas atuam diretamente na estruturação do solo e condições de superfície (LETZ et al., 2021).

A transformação logarítmica dos dados não permitiu uma visão mais detalhada da distribuição espacial de K_0 (Fig. 3b), diferindo dos resultados obtidos por Alvarenga et al. (2011), que obtiveram melhores respostas a partir dos dados transformados. Entretanto, em ambos os mapas, foram observados os maiores valores em áreas próximas à nascente, na porção central da área cultivada e na parte mais elevada. Por outro lado, os menores valores foram encontrados próximos às áreas impermeabilizadas, onde se localiza o Aeroporto Municipal de Lavras, e nas áreas com maiores teores de silte.

Figura 3 - Distribuição espacial dos atributos K_0 (a), $\text{Log}(K_0)$ (b).



Fonte: Os autores (2023).

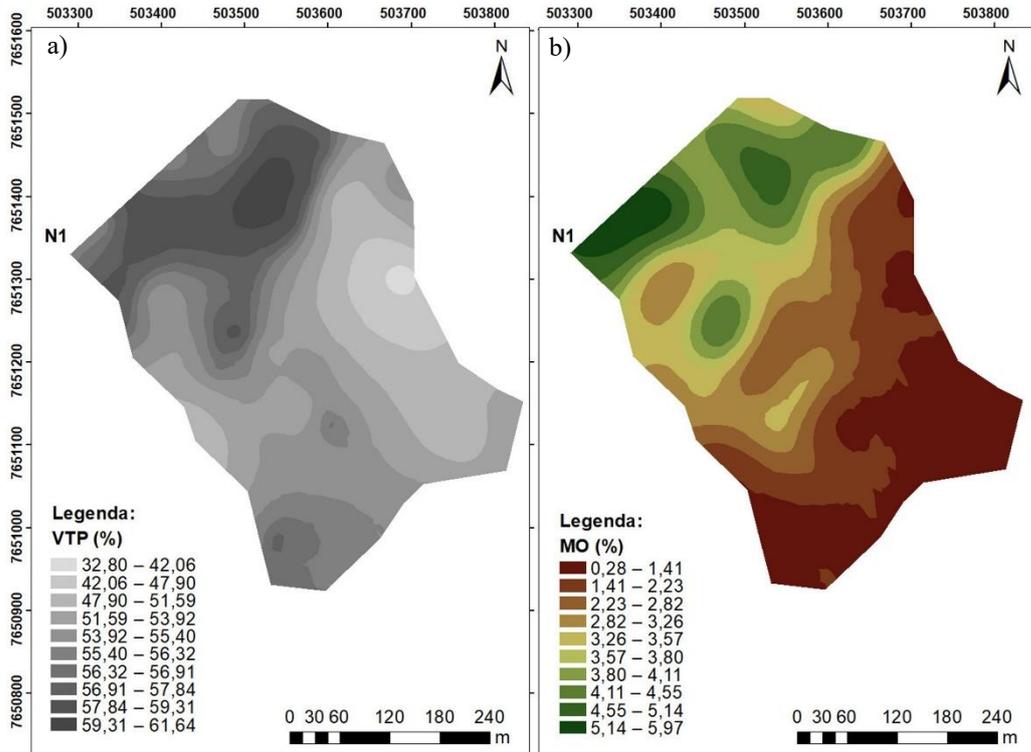
Áreas cobertas por mata geralmente oferecem melhores condições para o processo de

infiltração. Tal fato pode ser explicado pelo maior aporte de matéria orgânica conferido pela

presença de árvores, que confere maior estabilidade dos agregados e contribui para o aumento da porosidade do solo, contribuindo para a formação de fluxos preferenciais e favorecendo a percolação da água (LAL, 2020).

Por meio das Figuras 4a e 4b, visualiza-se os maiores valores de VTP, provavelmente com maior predomínio de macroporos, em porções com maiores teores de MO.

Figura 4 - Distribuição espacial dos atributos VTP (a) e MO (b).

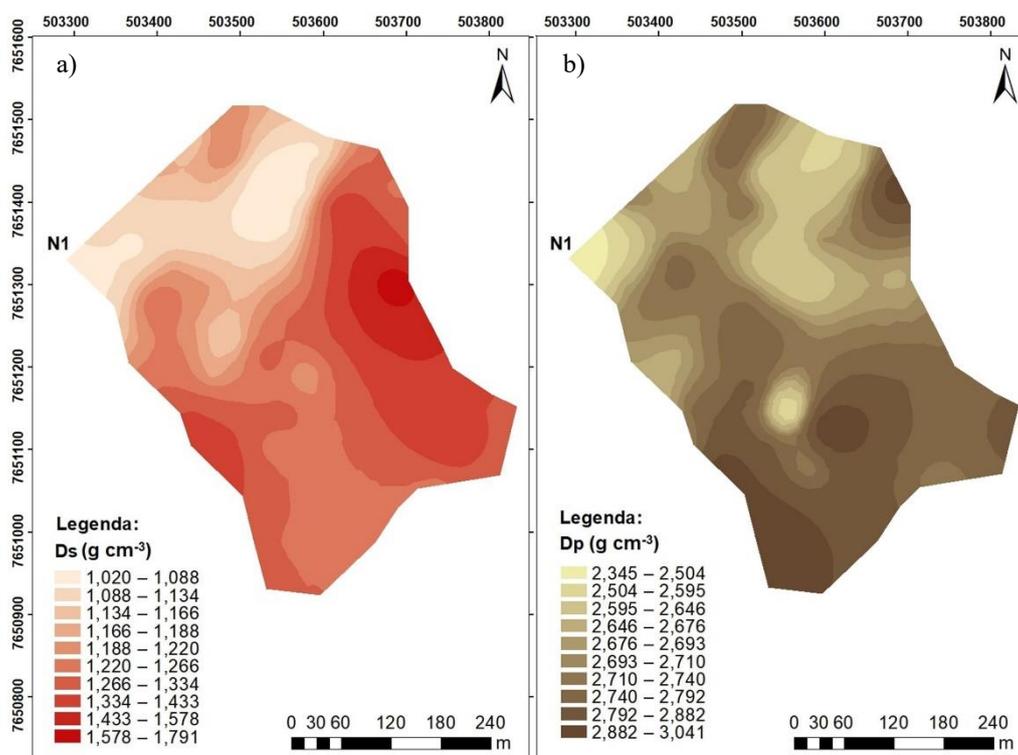


Fonte: Os autores (2023).

A partir da comparação dos mapas da distribuição espacial de K_0 e D_s (Fig. 3a e 5a) é possível observar maiores valores de condutividade hidráulica do solo saturado em áreas com menores valores de densidade, indicando os locais favoráveis à recarga de água. Estes resultados corroboram com os encontrados

por Klinke Neto et al. (2017), que analisaram a variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em uma sub-bacia do estado no sudeste do Brasil, dando foco às questões hidrogeológicas acerca da capacidade de infiltração da água no solo.

Figura 5 - Distribuição espacial dos atributos Ds (a) e Dp (b).



Fonte: Os autores (2023).

Foram observados os maiores valores de densidade do solo (1,334 a 1,791 g cm⁻³) nas regiões mais próximas às áreas construídas (Fig. 2a) o que evidencia o possível comprometimento da qualidade do solo nessa região, em razão do atual uso. Tal fato pode indicar prejuízos às condições de infiltração e restrição ao fluxo de água no solo, podendo comprometer o abastecimento do lençol subterrâneo e prejudicar o desenvolvimento de plantas, uma vez que os maiores valores se encontram acima do intervalo de densidade crítica para solos argilosos (1,30 a 1,40 g/cm³) (LAL, 2020). Estes resultados refletem a influência antrópica sobre os atributos considerados sensíveis ao manejo do solo, sendo a densidade um dos mais mencionados na literatura (MARTINS FILHO et al., 2020; SENA et al., 2021).

A densidade de partículas possui grande relevância para determinação da composição mineralógica do solo, cálculo da velocidade de sedimentação de partículas em fluidos e determinação indireta da porosidade. A Dp é um atributo estático, para o qual só seriam observadas mudanças perceptíveis em um longo período de tempo, uma vez que está relacionada ao tipo e quantidade dos componentes minerais e orgânicos. Segundo Lepsch (2011), para horizontes orgânicos, a Dp geralmente é menor que 0,9 g/cm³; em horizontes minerais com altos teores de óxidos de ferro, são encontrados valores em torno de 3,0 g/cm³ e em solos minerais com baixo teor de óxidos de ferro, os valores variam em torno de 2,6 g/cm³.

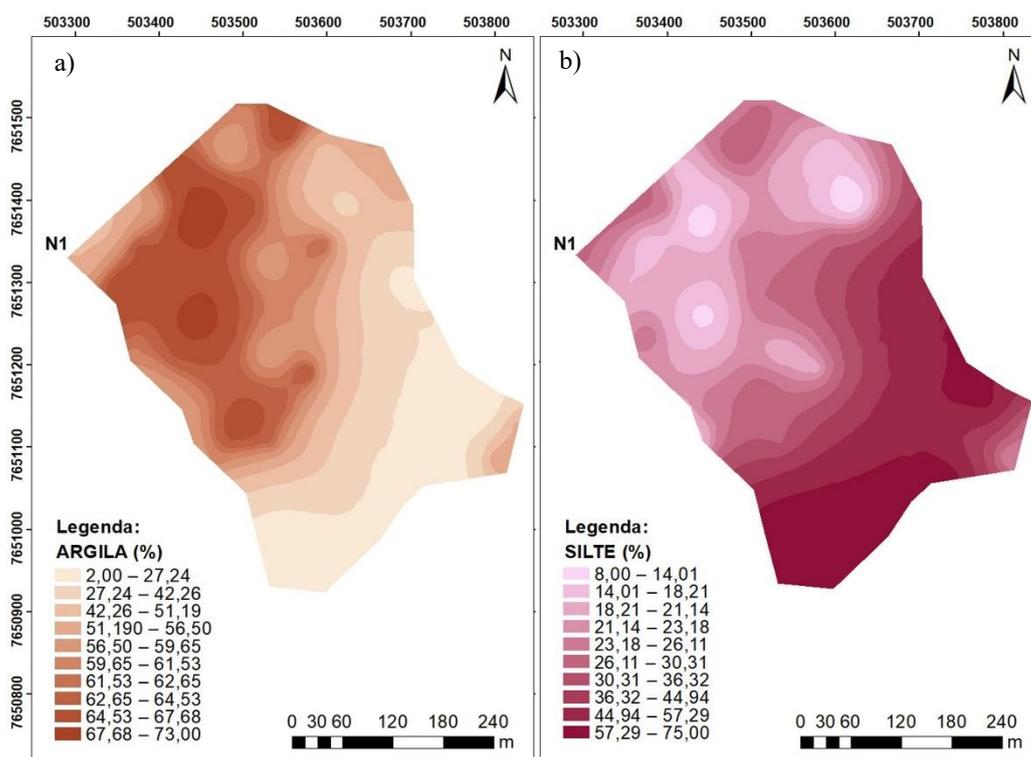
Comparando-se as Figuras 4b e 5b, verificam-se, no geral, menores valores de Dp em áreas com elevado teor de matéria orgânica,

especialmente na região ao entorno da nascente e na área cultivada, evidenciando uma relação inversa entre D_p e MO. Dessa forma, a fração orgânica do solo pode reduzir os possíveis efeitos indesejáveis da elevada densidade de partículas, sobretudo para o crescimento de plantas, além de contribuir para a melhora da qualidade do solo no que diz respeito à estrutura, fertilidade e capacidade de retenção de água.

Menores valores de K_0 em áreas com maiores teores de silte (Fig. 3a e 6b) se justificam, pois, em locais com predomínio

destas partículas, a possibilidade de obstrução dos poros é potencializada, o que diminui consideravelmente a permeabilidade do solo. Em função de sua instabilidade, a fração silte é pouco desejável no ambiente por ser a primeira a ser desprendida e arrastada pela ação das gotas de chuva, o que pode levar ao assoreamento de corpos d'água.

Figura 6 - Distribuição espacial dos atributos Argila (a) e Silte (b).



Fonte: Os autores (2023).

A partir do mapa da distribuição espacial da porosidade drenável (Fig. 7a) foram verificados maiores valores principalmente nas áreas com maiores teores de areia (Fig. 7b), o que pode ter ocorrido devido à maior presença de macroporos. Além disso, solos com altos teores de areia tendem a possuir baixos valores de θ_{cc} ,

variável que compõe o cálculo da porosidade drenável, o que reflete diretamente nos resultados.

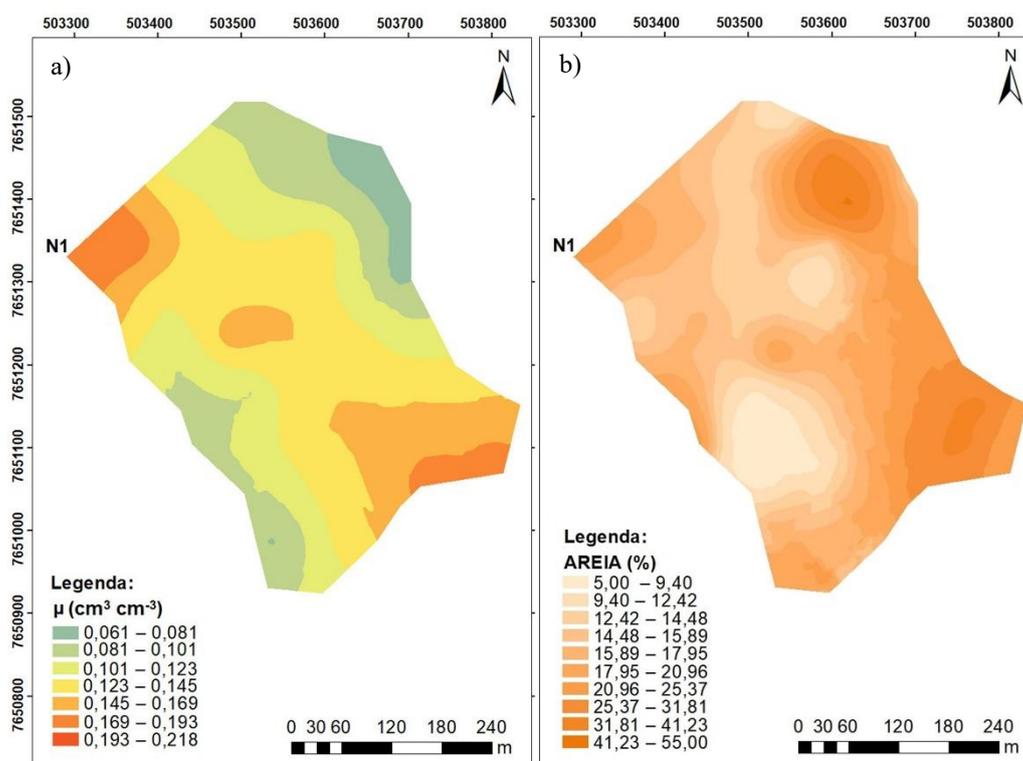
Entretanto, segundo Lal (2020), a retenção e o movimento de água no solo não são dependentes apenas das frações texturais, mas também da estrutura, porosidade e pedoforma.

Estes elementos podem integrar-se de diferentes maneiras, sobretudo em solos altamente intemperizados, como os Latossolos.

Solos argilosos com boa estrutura podem possuir capacidade de infiltração semelhante ou até mesmo maiores que solos arenosos. Dessa forma,

não se pode prever os mecanismos que envolvem o movimento de água apenas pela textura, sendo recomendado que a análise seja feita com mais cuidado, levando em consideração parâmetros como macro e microporosidade.

Figura 7 - Distribuição espacial dos atributos Porosidade Drenável (μ) (a) e Areia (b).



Fonte: Os autores (2023).

A partir dos resultados encontrados, como locais prioritários para conservação do solo e água, foram evidenciadas a região ao entorno da nascente, a porção central da área sob cultivo e a parte mais elevada da área de recarga (Fig. 1b), que possui altos teores de areia e elevada condutividade hidráulica (Fig. 7b). Estas áreas foram destacadas por possuírem condições mais favoráveis à infiltração, sendo fundamental a adoção de práticas de manejo conservacionistas nestes locais, visando a manutenção da produção de água da nascente.

As técnicas de conservação do solo de caráter vegetativo, como florestamento e reflorestamento, são recomendadas para a área ao entorno da nascente, de forma que, neste local, a presença da vegetação funcional seja capaz de promover a estruturação do solo (macro e microporos) visando melhorar as condições de infiltração.

Para a área cultivada, optar pelo sistema de plantio direto e ações de menor revolvimento do solo podem promover melhores condições de infiltração. Isso se deve à cobertura do solo com os restos das culturas, que promove o aumento da

matéria orgânica, além de beneficiar a atividade biológica e disponibilizar nutrientes para as plantas. Práticas com maior revolvimento do solo, como o sistema de plantio convencional, inicialmente podem levar ao aumento da capacidade de infiltração, porém a ausência de cobertura tende a gerar selamento superficial pelo impacto direto das gotas de chuva.

Por fim, na região mais elevada, onde há maior exposição do solo (Fig. 1b e 2a), são indicadas práticas de conservação mecânicas como o terraceamento, visando reduzir a velocidade do escoamento superficial e potenciais perdas de solo. Esta técnica é mais empregada em áreas com maior declividade, onde os terraços servem como barreiras ao fluxo de água e facilitam a infiltração, devido ao maior tempo de contato entre a água e o solo (BASSANI et al., 2023).

4. CONCLUSÕES

Os atributos físico-hídricos do solo apresentaram continuidade espacial que variou de moderada a forte e o modelo de semivariograma teórico do tipo exponencial foi considerado o que melhor descreveu a distribuição espacial na maioria dos casos.

O mapeamento destes atributos possibilitou a identificação de zonas prioritárias para a conservação do solo e água, para as quais foram evidenciadas condições favoráveis à recarga. Dentre estas áreas, destacam-se as regiões mais baixas, ao entorno da nascente; a porção central da área cultivada e a região mais alta, que possui maior fração de areia e elevada condutividade hidráulica.

Em contrapartida, áreas com alto grau de interferência humana, como as

impermeabilizadas ou próximas às edificações, foram consideradas desfavoráveis, devido às menores condições de recarga. Deste modo, recomenda-se a adoção de práticas conservacionistas, que contribuem para a melhora da qualidade do solo e, conseqüentemente, aumentam as condições de infiltração na área de recarga.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, e à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais (FAPEMIG).

REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, C. C. et al. Continuidade espacial da condutividade hidráulica saturada do solo na bacia hidrográfica do Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 5, p. 1745–1758, 2011.
- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. Estimation of moisture at field capacity in soils under Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p. 111–116, 2011.
- BASSANI, M. H. et al. **Terraceamento: uma prática complementar ao manejo conservacionista do solo e da água**. Florianópolis: Epagri, 2023.
- CAMBARDELLA, C. A. et al. Field-Scale Variability of Soil Properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, n. 5, p. 1501–1511, 1994.
- DELBARI, M. et al. Spatial variability analysis and mapping of soil physical and chemical attributes in a salt-affected soil. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 3, 2019.
- DING, J.; ZHOU, J.; CAI, W. An efficient variable selection-based Kriging model method for the reliability analysis of slopes with spatially variable soils. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 235, p. 109234, jul. 2023.
- FERREIRA, M. J. et al. Avaliação da regeneração

- natural em nascentes perturbadas no município de Lavras, MG. **Ciência Florestal**, v. 19, n. 2, p. 109–129, 2009.
- FUENTES-GUEVARA, M. D. et al. Examining the land leveling impacts on the physical quality of low-land soils in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 215, n. August 2021, p. 0–3, 2022.
- GALARZA, R. DE M. et al. Changes in physical and hydraulic properties in sandy soils of the Pampa Biome under different uses. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 47, 3 out. 2023.
- GOUVÊA, D. D. S. et al. Spatial distribution of *Prae-longorthezia praelonga* in citrus cultivation in areas of agroforestry and conventional systems in the eastern Amazon. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 12, p. e20991211018, 19 dez. 2020.
- GUIMARÃES, W. D. et al. Variabilidade espacial de atributos físicos de solos ocupados por pastagens. **Revista Ciência Agronômica**, v. 47, n. 2, p. 247–255, 2016.
- ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989.
- KLINKE NETO, G.; OLIVEIRA, A. H.; PEREIRA, S. Y. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo em uma sub-bacia às margens do Rio Mogi Guaçu (SP). **Geociências**, v. 36, n. 2, p. 381–394, 2017.
- LAL, R. Soil organic matter and water retention. **Agronomy Journal**, v. 112, n. 5, p. 3265–3277, 26 set. 2020.
- LEMOS FILHO, L. C. A. et al. Variação espacial da densidade do solo e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v. 39, p. 193–202. 2008.
- LEPSCH, I. F. **19 lições de pedologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- LETZ, O. et al. The impact of geomorphology on groundwater recharge in a semi-arid mountainous area. **Journal of Hydrology**, v. 603, p. 127029, dez. 2021.
- MARTINS FILHO, J. B. et al. Soil-water physical attributes under different managements systems in the humid tropics in Maranhão. **Scientific Electronic Archives**, v. 13, n. 9, p. 38, 2020.
- MARTINS, F. B. et al. Classificação climática de Köppen e de Thornthwaite para Minas Gerais: Cenário atual e projeções futuras. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 22, p. 149–164, 2018.
- REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2012.
- ROBERTSON, G. P. **GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences**. Plainwell, Michigan, USA: Gamma Design Software, 2008.
- SANI, S. et al. Spatial Variability and Mapping of Selected Soil Physical Properties under Continuous Cultivation. **Turkish Journal of Agriculture - Food Science and Technology**, v. 11, n. 4, p. 719–729, 23 abr. 2023.
- SANTOS, D. P. DOS et al. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em vale aluvial na região de Pernambuco. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 12, n. 1, p. 2271–2282, 2018.
- SENA, C. C. R. et al. Atributos físico-hídricos de solos do cerrado. **Revista Agrotecnologia**, v. 12, n. 1, p. 80–91, 2021.
- SCHERPINSKI, C. et al. Variabilidade espacial da condutividade hidráulica e da infiltração da água no solo. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 7–13, 2010.
- SOUZA, E. DE A. et al. Distribuição da umidade e condutividade elétrica em latossolo com cobertura morta em bananeira fertirrigada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 4, p. 4180–4189, 8 fev. 2020.
- SUZUKI, L. E. A. S. et al. Challenges in the Management of Environmentally Fragile Sandy Soils in Southern Brazil. **Soil Systems**, v. 7, n. 1, p. 9, 2 fev. 2023.
- TERRA, V. S. S. et al. Correlação linear e espacial entre os atributos da planta de um pomar de pessegueiro e os atributos físico-hídricos do solo. In: **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. Brasília: Embrapa, 2014. p. 434–441.
- VIEIRA, I. F. B. et al. Water security assessment of groundwater quality in an anthropized rural area from the atlantic forest biome in Brazil. **Water (Switzerland)**, v. 12, n. 3, p. 623, 2020.
- WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. Em: HILLEL, D. **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980.
- YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geostatística: conceitos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.
- YENEHUN, A. et al. Spatial and temporal simulation of groundwater recharge and cross-validation with point estimations in volcanic aquifers with variable topography. **Journal of Hydrology: Regional Studies**

ies, v. 42, p. 101142, ago. 2022.