

Aspectos Práticos Sobre a Variabilidade Espacial em Atributos do Solo

Eduardo Lucas Ensslin dos Santos^a, Enio Junior Seidel^b, Edemar Appel Neto^c

^a*Pós-Graduação em Estatística, UFPE, e-mail: eleds1@de.ufpe.br*

^b*Departamento de Estatística, UFSM, e-mail: enioseidel@gmail.com*

^c*Pós-Graduação em Estatística e Experimentação Agropecuária, UFLA, e-mail: nettoappel@hotmail.com*

Resumo

O objetivo deste estudo foi analisar o comportamento da distribuição amostral do alcance e do grau de dependência espacial (DE). Também, teve-se objetivo de avaliar a correlação existente entre estas medidas e o índice de dependência espacial (IDE). Foi possível identificar que o alcance, de maneira geral, apresentou comportamento assimétrico positivo. O DE apresentou distribuição assimétrica negativa e, por consequência, o efeito pepita relativo (EPR) se mostrou com distribuição assimétrica positiva. O alcance apresenta melhores correlações com o IDE. Ao se compararem as classificações da dependência espacial, a partir do DE e do IDE, foi possível verificar que esta última é mais coerente por também considerar a variabilidade espacial devida ao parâmetro alcance, e não apenas a variabilidade explicada por contribuição e patamar.

Palavras-chave: Geoestatística, Dependência espacial, Variabilidade espacial, Semivariograma

1. Introdução

Os métodos geoestatísticos são cada vez mais importantes nas ciências agrárias e, em particular, na implementação da agricultura de precisão (Ferraz et al., 2012) já que o conhecimento de variabilidade espacial e/ou temporal de fatores do solo é muito relevante na tomada de decisão de práticas de manejo em sistemas de produção agrícola (dos Santos Nascimento et al., 2014).

Usualmente, a avaliação da variabilidade espacial se utiliza do semivariograma experimental e, por consequência, da estimação dos parâmetros efeito pepita, contribuição, patamar e alcance. O efeito pepita pode ser entendido como uma variância aleatória que indica a variabilidade existente no espaço de distâncias mínimas não medidas (Cambardella et al., 1994; Wu et al., 2008; Ferraz et al., 2012). O parâmetro contribuição é definido como a variância estrutural. O patamar é a soma da variância aleatória e da variância estrutural, sendo então equivalente a variância do atributo em estudo (Trangmar et al., 1986; Lima et al., 2014; Soares Souza Lima et al., 2014; Na-

gahama et al., 2014; Corrêa Jordão et al., 2015). O alcance indica a distância até onde há dependência espacial entre as amostras, isto é, a distância que os pontos amostrados estão correlacionados, sendo que quanto mais próximos uns dos outros, mais homogêneos são entre si (Resende et al., 2014). Recentemente, Seidel e de Oliveira (2014); Seidel e Oliveira (2016) propuseram um índice de dependência espacial (IDE) para avaliar a variabilidade espacial contemplando todos os parâmetros do semivariograma sob ajuste dos modelos esférico, exponencial e gaussiano.

O alcance possui a capacidade de descrever a variabilidade espacial no sentido horizontal do semivariograma, sendo que este parâmetro é medido em metros independentemente do atributo em estudo. Já o efeito pepita, a contribuição e o patamar permitem avaliar a variabilidade espacial no sentido vertical do semivariograma. Contudo, estes parâmetros dependem da unidade de medida do atributo em estudo, inviabilizando uma avaliação geral diretamente baseada em seus valores. Desse modo, faz-se a opção pelo uso do grau de dependência espacial (DE) (Biondi et al.,

1994) que relaciona a contribuição com o patamar, gerando uma medida adimensional que pode ser usada para avaliação da variabilidade espacial no sentido vertical do semivariograma.

No presente trabalho tem-se objetivo de estudar a correlação existente entre o alcance e o DE com o IDE.

2. Materiais e Métodos

Os dados para realizar o estudo foram obtidos de artigos, da área de Ciências do Solo, obtidos do portal de revistas Scientific Electronic Library Online (SciElo Brasil) de acordo com o seguinte procedimento: Foram coletados artigos publicados na Revista Brasileira de Ciência do Solo (RBCS) com a palavra chave “Geoestatística”, nos quais, os modelos de semivariograma Esférico, Exponencial ou Gaussiano foram utilizados no estudo geoestatístico, que foram publicados no período de 2006 a 2015 (últimos 10 anos), e que disponibilizaram algum tipo de informação para obter-se a máxima distância do grid de amostragem. Foram coletados artigos até que se obteve, pelo menos, 100 atributos com aplicação de cada um dos três modelos de semivariograma (Esférico, Exponencial ou Gaussiano). Foi necessário coletar alguns artigos em outras revistas da área de Ciência do Solo, no período considerado, para completar os 100 atributos para cada modelo de semivariograma. Foram coletados os 25 artigos a seguir: Lima Simões et al. (2006); Camargo et al. (2010); Cavallini et al. (2010); Rocha Lima et al. (2010); Montanari et al. (2010); Zanão Júnior et al. (2010); Gontijo et al. (2012); Rodrigues et al. (2012); Fernandes da Silva Júnior et al. (2012); Teixeira et al. (2012); da Vitoria et al. (2012); Camargo et al. (2013); Amorim de Oliveira et al. (2013); Dalchiavon et al. (2013); Eleotério de Aquino et al. (2014); Costa et al. (2014); Dalchiavon et al. (2014); Luciano et al. (2014); dos Santos Nascimento et al. (2014); Resende et al. (2014); de Oliveira et al. (2015); Oliveira et al. (2015); Oliveira de Jesus Santos et al. (2015); Siqueira et al. (2015).

A partir dos artigos citados acima, coletou-se, para cada atributo, as seguintes informações: Modelo de semivariograma ajustado, Alcance esti-

mado, Efeito pepita estimado, Contribuição estimada, DE estimado, tamanho da amostra e máxima distância do grid de amostragem.

No número total de atributos em que a busca foi realizada, somando um total de 587 atributos, deste total foram ajustados em 275(46,85%) vezes utilizando modelo esférico, 123(20,95%) vezes utilizando o modelo exponencial, 102(17,38%) ocorrências para o modelo gaussiano e 87(14,82%) eventos para o modelo de efeito pepita puro. Este resultado mostra a grande utilização destes três modelos de semivariograma como já destacado por Lourenço e Landim (2005) e Seidel e de Oliveira (2014), sendo que é possível destacar o modelo esférico como o de maior utilização em estudos de variabilidade espacial de atributos de solo.

A partir da amostragem de valores de Alcance e DE, realizou-se análises descritivas destas informações, por meio de medidas descritivas e utilização de gráficos box-plot. Para a confecção dos gráficos box-plot no sentido de avaliar as distribuições de alcance e DE, são criadas as seguintes categorizações:

- Modelo: ESF = esférico; EXP = exponencial; GAUS = gaussiano.

Após, faz-se a comparação da classificação da dependência espacial proposta por Cambardella et al. (1994), que se aplica ao DE e ao EPR (o EPR é obtido pela relação entre o efeito pepita e o patamar), com a classificação proposta por Seidel e Oliveira (2016), que se aplica ao IDE. Além disso, são calculadas as correlações de Spearman do alcance, do DE e do EPR com o IDE. Todos os procedimentos de análise dos dados foram realizados no software R (R Core Team, 2018).

A intenção em avaliar o comportamento do alcance e do DE vem do fato de que estas medidas fazem parte do índice IDE (Seidel e de Oliveira, 2014; Seidel e Oliveira, 2016) conforme pode ser visualizado em sua expressão:

$$IDE_{modelo}(\%) = FM \times \left(\frac{C_1}{C_0 + C_1} \right) \times \left(\frac{a}{0.5MD} \right) \times 100$$

em que FM é um fator de modelo (0,375 no modelo esférico, 0,317 no modelo exponencial e 0,504 no modelo gaussiano), C_0 é o efeito pepita, C_1 é a contribuição, a é o alcance, e $0.5MD$ é a metade

da maior distância (MD) entre pontos amostrados, sendo que nos casos em que a relação $\frac{a}{0.5MD}$ resulte em valor maior que 1, esta razão é, então, truncada em 1, para que assuma apenas valores entre zero e 1.

Espera-se poder avaliar como se comportam os elementos (a e DE) que compõem o IDE e como se relacionam com este.

3. Resultados e Discussão

Observa-se que a distribuição do alcance apresentou uma assimetria positiva, como pode ser visto na Figura 1(a) e no coeficiente de assimetria na Tabela 1, sendo que a mediana do alcance é de 39 m. O mesmo comportamento de assimetria positiva é evidente para o alcance se forem considerados os diferentes modelos de semivariograma (esférico, exponencial e Gaussiano), sendo que os modelos exponencial e gaussiano apresentaram uma amplitude menor que a do alcance no modelo esférico (Figura 1(b)).

Para $\frac{a}{0.5MD}$ observou-se que de maneira geral apresentou comportamento levemente simétrico visto na Figura 1(c), com coeficiente de assimetria igual a 0.1856 (Tabela 1). Quando foi considerado os modelos de semivariograma na Figura 1(d), para o modelo esférico observou-se comportamento entre simétrico e assimétrico negativo, exponencial levemente simétrico e para o Gaussiano assimétrico positivo.

O DE apresentou comportamento aproximadamente simétrico tanto de maneira geral, com mediana igual a 66.66% (Figura 1(e)), quanto em função dos modelos de semivariograma (Figura 1(f)), com exceção do modelo Gaussiano que apresentou assimetria negativa, onde o coeficiente de assimetria foi igual a -0.3352 (Tabela 1). Ainda, com base na Figura 1(f), pode-se destacar que o modelo exponencial teve uma amplitude menor em relação aos demais modelos, apresentando um valor mínimo de 34.32% e máximo de 100%.

A amplitude do DE, em geral, variou de 19.69% até 100%, mostrando que esta medida não tende a apresentar baixos valores de dependência espacial na prática. Porém, esta característica de distribuição aproximadamente simétrica não é efetivamente verdadeira, pois, em teoria essa medida varia entre zero e 100%, e como não foram observados valores abaixo de 19%, tem-se a falsa impressão de um comportamento aproximadamente simétrico, quando, na realidade, foi observada uma distribuição assimétrica negativa. Com base nisso, levando-se em consideração a relação complementar existente entre DE e EPR (EPR% = 100 - DE%), é possível afirmar que o EPR possui distribuição assimétrica positiva com mediana de 33,34%.

Aplicando a classificação sugerida por Cambarcella et al. (1994) na distribuição de valores do DE, tende-se a classificar os dados, em sua maioria, entre moderada e forte dependência espacial.

Com base nos resultados da Tabela 2, pode-se evidenciar que para todos os cenários testados, as correlações entre o alcance e IDE apresentaram valor significativo, o mesmo foi observado para a relação do $\frac{a}{0.5MD}$ com o IDE e o alcance.

Tabela 2: Correlações entre alcance, $\frac{a}{0.5MD}$, $\frac{c_1}{c_0+c_1}$ e IDE.

Geral			
	IDE	Alcance	$\frac{a}{0.5MD}$
Alcance	0.5606*		
$\frac{a}{0.5MD}$	0.8327*	0.7841*	
$\frac{c_1}{c_0+c_1}$	0.2582*	-0.3416*	-0.2235*
Modelo: Esférico			
	IDE	Alcance	$\frac{a}{0.5MD}$
Alcance	0.5637*		
$\frac{a}{0.5MD}$	0.8229*	0.7915*	
$\frac{c_1}{c_0+c_1}$	0.4906*	-0.1740*	-0.0491 ^{ns}
Modelo: Exponencial			
	IDE	Alcance	$\frac{a}{0.5MD}$
Alcance	0.5890*		
$\frac{a}{0.5MD}$	0.8925*	0.7456*	
$\frac{c_1}{c_0+c_1}$	0.2542*	-0.2616*	-0.1625 ^{ns}
Modelo: Gaussiano			
	IDE	Alcance	$\frac{a}{0.5MD}$
Alcance	0.6296*		
$\frac{a}{0.5MD}$	0.9177*	0.7628*	
$\frac{c_1}{c_0+c_1}$	-0.0879 ^{ns}	-0.5052*	-0.4235*

Para realizar uma comparação entre a classificação de Cambarcella et al. (1994) e a classificação de Seidel e Oliveira (2016) tem-se a Tabela 3 a seguir. Observa-se que a classificação de Cambarcella et al. (1994) considerou mais de 98% dos atributos como tendo de moderada a forte dependência espacial no caso geral. Já a classificação de Seidel e Oliveira (2016) avaliou como tendo de mo-

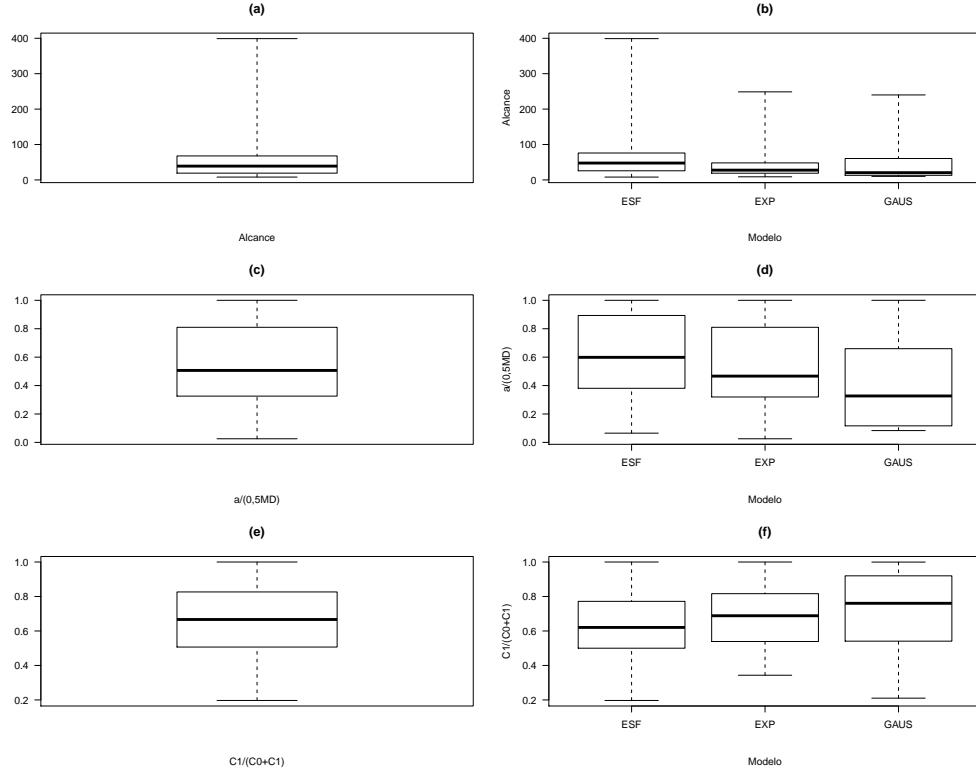


Figura 1: Gráficos Box-plot gerais (alcance, $\frac{a}{0.5MD}$, $\frac{C1}{C0+C1}$ e também considerando os modelos de semivariograma (esférico, exponencial e Gaussiano).

Tabela 1: Valores dos intervalos dos gráficos box-plot, desvio padrão e seu coeficiente de assimetria.

Medida	Mín	1º Qu	Mediana	3º Qu	Máx	Média	DP	CA
Geral								
Alcance	8.00	19.13	39.00	67.72	399.00	54.61	50.80	2.12
$\frac{a}{0.5MD}$	0.0254	0.3257	0.5065	0.8091	1.00	0.5631	0.2920	0.1856
$\frac{c_1}{c_0+c_1}$	0.1969	0.5071	0.6666	0.8264	1.00	0.6715	0.1997	0.0876
Modelo: Esférico								
Alcance	8.00	25.79	47.60	76.00	399.00	63.05	53.82	2.05
$\frac{a}{0.5MD}$	0.0650	0.3807	0.5986	0.8933	1.00	0.6213	0.2667	0.1519
$\frac{c_1}{c_0+c_1}$	0.1969	0.5000	0.6205	0.7718	1.00	0.6398	0.2026	0.2645
Modelo: Exponencial								
Alcance	8.80	18.95	27.60	48.06	248.70	46.22	47.13	2.37
$\frac{a}{0.5MD}$	0.0254	0.3196	0.4664	0.8101	1.00	0.5364	0.2835	0.3066
$\frac{c_1}{c_0+c_1}$	0.3432	0.5390	0.6883	0.8164	1.00	0.6951	0.1706	0.1736
Modelo: Gaussiano								
Alcance	10.00	13.25	20.48	60.38	240.00	41.98	42.11	1.99
$\frac{a}{0.5MD}$	0.0832	0.1165	0.3268	0.6594	1.00	0.4383	0.3244	0.6333
$\frac{c_1}{c_0+c_1}$	0.2102	0.5409	0.7606	0.9193	0.9996	0.7285	0.2094	-0.3352

derada a forte dependência espacial cerca de 80% dos atributos também no caso geral. Entende-se que a utilização do IDE e de sua classificação seja mais coerente, pois apesar de que o DE tenda a assumir valores altos e o alcance tende a assu-

mir valores pequenos, e o IDE capta esta situação mais eficientemente.

No caso geral, quando utilizada a classificação de Cambardella, 7 atributos foram classificados como fraca dependência, 329 moderada

Tabela 3: Comparação entre a classificação de Cambardella et al. (1994) e a Classificação do IDE (Seidel e Oliveira, 2016).

Cambardella	Classificação IDE			Total
	Fraca	Moderada	Forte	
Geral				
Fraca	4	3	0	7 (1.4%)
Moderada	70	139	120	329 (65.8%)
Forte	26	67	71	164 (32.8%)
Total	100 (20%)	209 (41.8%)	191 (38.2%)	500 (100%)
Modelo: Esférico				
Fraca	4	1	0	5 (1.8%)
Moderada	36	86	77	199 (72.4%)
Forte	3	28	40	71 (25.8%)
Total	43 (15.6%)	115 (41.8%)	137 (49.8%)	275 (100%)
Modelo: Exponencial				
Fraca	0	0	0	0 (0%)
Moderada	17	38	27	82 (66.7%)
Forte	0	22	19	41 (33.3%)
Total	17 (13.8%)	60 (48.8%)	46 (37.4%)	123 (100%)
Modelo: Gaussiano				
Fraca	0	2	0	2 (2%)
Moderada	17	15	16	48 (47%)
Forte	23	17	12	52 (51%)
Total	40 (39.2%)	34 (33.3%)	28 (27.5%)	102 (100%)

dependência e 164 forte dependência espacial. Quando utilizado a Classificação IDE, 100 atributos foram classificados como fraca dependência, 209 moderada dependência e 191 forte dependência espacial. Dos 7 atributos classificados como fraca dependência na classificação de Cambardella, quando foi utilizada a Classificação IDE, 4 foram classificados como fraca dependência e 3 como moderada dependência espacial. Dos 329 atributos classificados como moderada dependência, para a Classificação do IDE, 70 foram classificados como fraca dependência, 139 moderada dependência e 120 como forte dependência espacial. Dos 164 classificados como forte dependência espacial utilizando a classificação de Cambardella, na Classificação IDE, 26 destes tiveram fraca dependência, 67 moderada dependência e 71 forte dependência espacial.

É notável através da comparação das classificações, que a classificação proposta por Cambardella tende a classificar a maioria dos atributos como moderada ou forte dependência espacial. Para a Classificação IDE, como considera também o parâmetro do alcance, obteve-se resultados mais coerentes/realistas, mostrando a importância de considerar também este parâmetro.

Avaliar mais coerentemente a variabilidade espacial dos atributos é fundamental, para realizar previsões, somente quando elas possuem moderada ou forte dependência espacial (Wu et al., 2008). Neste sentido, não considerar a influência do alcance seria uma incoerência já que, de acordo com Ferraz et al. (2012) este parâmetro tem papel considerável na determinação do limite da dependência espacial.

4. Conclusões

Neste estudo foi possível identificar que o alcance, de maneira geral, apresentou comportamento assimétrico positivo.

O DE apresentou distribuição assimétrica negativa e, por consequência, o EPR se mostrou com distribuição assimétrica positiva.

Foi possível verificar que a classificação do IDE é mais coerente por também considerar a variabilidade espacial devida ao parâmetro alcance.

Referências

- Amorim de Oliveira, I., Costa Campos, M. C., Rodrigues Soares, M. D., Eleotério de Aquino, R., Júnior, J. M., Pereira do Nascimento, E., 2013. Variabilidade espacial de atributos físicos em um cambissolo háplico, sob diferentes usos na região sul do amazonas. Revista Brasileira de Ciência do Solo 37 (4).

- Biondi, F., Myers, D. E., Avery, C. C., 1994. Geostatistically modeling stem size and increment in an old-growth forest. *Canadian Journal of Forest Research* 24 (7), 1354–1368.
- Camargo, L. A., Marques Júnior, J., Pereira, G. T., 2010. Spatial variability of physical attributes of an alfisol under different hillslope curvatures. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34 (3), 617–630.
- Camargo, L. A., Marques Júnior, J., Pereira, G. T., 2013. Mineralogy of the clay fraction of alfisols in two slope curvatures: Iii-spatial variability. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 37 (2), 295–306.
- Cambardella, C., Moorman, T., Parkin, T., Karlen, D., Novak, J., Turco, R., Konopka, A., 1994. Field-scale variability of soil properties in central iowa soils. *Soil science society of America journal* 58 (5), 1501–1511.
- Cavallini, M. C., Andreotti, M., Lisbôa Oliveira, L., Magalhães Pariz, C., Passos e Carvalho, M. d., 2010. Relações entre produtividade de brachiaria brizantha e atributos físicos de um latossolo do cerrado. *Revista Brasileira de Ciência do solo* 34 (4).
- Corrêa Jordão, W. H., Berton Zanchi, F., Moraes Ferreira, D. M., Patrício Pagani, C. H., Luizão, F. J., Rocha Duarte Neves, J., Lima Duarte, M., 2015. Variabilidade do índice de área foliar em campos naturais e floresta de transição na região sul do amazônia. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science* 10 (2).
- Costa, N. R., de Passos e Carvalho, M., Dal Bem, E. A., Dalchavon, F. C., Rodrigues Caldas, R., 2014. Produtividade de laranja correlacionada com atributos químicos do solo visando a zonas específicas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Tropical* 44 (4).
- da Vitória, E. L., Fernandes, H. C., Teixeira, M. M., Cecon, P. R., Lacerda, E. D. G., 2012. Correlação linear e espacial entre produtividade de brachiaria brizantha, densidade do solo e porosidade total em função do sistema de manejo do solo linear and spatial correlations among forage yield, bulk density and total porosity in function of soil management system. *Engenharia Agrícola* 32 (5), 909–919.
- Dalchavon, F. C., Carvalho, M. d. P., Montanari, R., Andreotti, M., 2013. Sugarcane productivity correlated with physical-chemical attributes to create soil management zone. *Revista Ceres* 60 (5), 706–714.
- Dalchavon, F. C., de Passos e Carvalho, M., Montanari, R., Andreotti, M., Dal Bem, E. A., 2014. Inter-relações da produtividade de cana soka com resistência à penetração, umidade e matéria orgânica do solo. *Revista Ceres* 61 (2).
- de Oliveira, I. A., Marques Junior, J., Costa Campos, M. C., de Aquino, R. E., de Freitas, L., Silva Siqueira, D., da Cunha, J. M., 2015. Variabilidade espacial e densidade amostral da suscetibilidade magnética e dos atributos de argissolos da região de manicoré, am. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 39 (3).
- dos Santos Nascimento, P., Athayde Silva, J., Silva Costa, B. R., Bassoi, L. H., 2014. Zonas homogêneas de atributos do solo para o manejo de irrigação em pomar de videira. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38 (4).
- Eleotério de Aquino, R., Costa Campos, M. C., Marques Júnior, J., Amorim de Oliveira, I., Campos Mantovani, B., Rodrigues Soares, M. D., 2014. Geoestatística na avaliação dos atributos físicos em latossolo sob floresta nativa e pastagem na região de manicoré, amazônia. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38 (2).
- Fernandes da Silva Junior, J., Marques Júnior, J., Arantes Camargo, L., De Bortoli Teixeira, D., Panosso, A. R., Tadeu Pereira, G., 2012. Simulação geoestatística na caracterização espacial de óxidos de ferro em diferentes pedoformas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36 (6).
- Ferraz, G. A. S., da Silva, F. M., Carvalho, L. C., Alves, M. d. C., Franco, B. C., 2012. Variabilidade espacial e temporal do fósforo, potássio e da produtividade de uma lavoura cafeeira spatial and temporal variability of phosphorus, potassium and of the yield of a coffee field. *Engenharia Agrícola* 32 (1), 140–150.
- Gontijo, I., Rodrigues Nicole, L., Partelli, F. L., Bonomo, R., Oliveira de Jesus Santos, E., 2012. Variabilidade e correlação espacial de micronutrientes e matéria orgânica do solo com a produtividade da pimenta-do-reino. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36 (4).
- Lima, G. C., Silva, M. L., de Oliveira, M. S., Curi, N., Da Silva, M. A., Oliveira, A. H., 2014. Variabilidade de atributos do solo sob pastagens e mata atlântica na escala de microbacia hidrográfica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi* 18 (5).
- Lima Simões, W., Lemos da Silva, É., Miranda de Lima, D., Silva de Oliveira, M., 2006. Variabilidade espacial de atributos físicos de um latossolo vermelho distroférico, submetido a diferentes manejos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 30 (6).
- Lourenço, R. W., Landim, P. M. B., 2005. Mapeamento de áreas de risco à saúde pública por meio de métodos geoestatísticos. *Cadernos de Saúde Pública* 21, 150–160.
- Luciano, R. V., Albuquerque, J. A., Mafra, Á. L., Costa, A. d., Grah, J., 2014. Water storage variability in a vineyard soil in the southern highlands of santa catarina state. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38 (1), 82–93.
- Montanari, R., Passos e Carvalho, M. d., Andreotti, M., Dalchavon, F. C., Lovera, L. H., Oliveira Honorato, M. A. d., 2010. Aspectos da produtividade do feijão correlacionados com atributos físicos do solo sob elevado nível tecnológico de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34 (6).
- Nagahama, H., Cortez, J., Concenço, G., Araujo, V., Honorato, A., 2014. Dinâmica e variabilidade espacial de plantas daninhas em sistemas de mobilização do solo em sorgo forrageiro. *Embrapa Agropecuária Oeste-Artigo em periódico indexado (ALICE)*.
- Oliveira, I. A. d., Campos, M. C. C., Marques Junior, J., Aquino, R. E. d., Teixeira, D. d. B., Silva, D. M. P. d., 2015. Use of scaled semivariograms in the planning sample of soil chemical properties in southern amazonas, brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 39 (1), 31–39.
- Oliveira de Jesus Santos, E., Gontijo, I., Barreto da Silva, M., Pereira Drumond Neto, A., 2015. Variabilidade espacial de macronutrientes em uma lavoura de café conilon no norte do espírito santo. *Revista Ciência Agronômica* 46 (3).
- R Core Team, 2018. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>
- Resende, J. M. d. A., Marques Júnior, J., Vieira Martins Filho, M., Silva Dantas, J., Silva Siqueira, D., De Bortoli Teixeira, D., 2014. Variabilidade espacial de atributos de solos coesos do leste maranhense. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38 (4).
- Rocha Lima, C. G. d., Passos e Carvalho, M. d., Narimatsu, K. C. P., Silva, M. G. d., Queiroz, H. A. d., 2010. Atributos físico-químicos de um latossolo do cerrado brasileiro e sua relação com características dendrométricas do eucalipto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34 (1).
- Rodrigues, M. S., Corá, J. E., Fernandes, C., 2012. Spatial relationships between soil attributes and corn yield in no-tillage system. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36 (2), 599–609.
- Seidel, E. J., de Oliveira, M. S. d., 2014. Novo índice geoestatístico para a mensuração da dependência espacial. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 38 (3).
- Seidel, E. J., Oliveira, M. S. d., 2016. A classification for a geostatistical index of spatial dependence. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 40.
- Siqueira, G. M., da Silva, J. S., Bezerra, J. M., Dafonte, J. D., de Melo, R. F., et al., 2015. Estacionariedade do conteúdo de água de um espodossolo humílico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental-Agriambi* 19 (5).
- Soares Souza Lima, J., Ottonelli Bona, D. A., Fiedler, N. C., Pena Pereira, D., 2014. Distribuição espacial das frações granulométricas argila e areia total em um latossolo vermelho-amarelo. *Revista Árvore* 38 (3).
- Teixeira, D. D. B., Bicalho, E. d. S., Panosso, A. R., Perillo, L. I., Iamaguti, J. L., Pereira, G. T., La Scala Jr, N., 2012. Uncertainties in the prediction of spatial variability of soil co₂ emissions and related properties. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36 (5), 1466–1475.
- Trangmar, B. B., Yost, R. S., Uehara, G., 1986. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. In: *Advances in agronomy*. Vol. 38. Elsevier, pp. 45–94.
- Wu, C., Wu, J., Luo, Y., Zhang, H., Teng, Y., 2008. Statistical and geoestatistical characterization of heavy metal concentrations in a contaminated area taking into account soil map units. *Geoderma* 144 (1-2), 171–179.
- Zanão Júnior, L. A., Quintão Lana, R. M., Carvalho Guimarães, E., Monteiro de Araújo Pereira, J., 2010. Variabilidade espacial dos teores de macronutrientes em latossolos sob sistema plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 34 (2).