

Geoestatística integrada a estatística multivariada de atributos químicos do solo e produtividade da cana-de açúcar

Geostatistics integrated with multivariate statistics of soil chemical attributes and sugarcane productivity

Geoestadística integrada con estadísticas multivariadas de atributos químicos del suelo y productividad de la caña de azúcar

DOI: 10.54033/cadpedv23n1-012

Originals received: 12/5/2025
Acceptance for publication: 12/30/2025

Edvander Prudente de Almeida

Doutorando em Biodiversidade e Biotecnologia
Instituição: Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
Endereço: São Luís, Maranhão, Brasil
E-mail: edvanderpa@gmail.com

Thiago Cândido dos Santos

Doutorando em Biodiversidade e Biotecnologia
Instituição: Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
Endereço: São Luís, Maranhão, Brasil
E-mail: candidothiago@proton.me

Guilherme Domingues Ferreira

Mestrando em Biodiversidade e Conservação
Instituição: Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
Endereço: São Luís, Maranhão, Brasil
E-mail: guilherme.domingues@discente.ufma.br

Antonio Carlos Carneiro dos Santos Sobrinho

Graduando em Ciências Biológicas
Instituição: Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
Endereço: São Luís, Maranhão, Brasil
E-mail: antoniocarloscarneiro117@gmail.com

Andreza Maciel de Sousa

Mestranda em Ciências Ambientais
Instituição: Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
Endereço: Chapadinha, Maranhão, Brasil
E-mail: andreza.maciel@discente.ufma.br

Bruno de Souza Barreto

Doutor em Ciências Ambientais

Instituição: Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Endereço: São Luís, Maranhão, Brasil

E-mail: barretobruno@gmail.com

Aldair de Souza Medeiros

Doutor em Agronomia (Produção Vegetal)

Instituição: Universidade Federal do Piauí (UFPI)

Endereço: São Luís, Maranhão, Brasil

E-mail: aldairmedeiros@gmail.com

Glécio Machado Siqueira

Doutor em Engenharia para o Desenvolvimento Rural

Instituição: Universidade Federal do Maranhão (UFMA)

Endereço: São Luís, Maranhão, Brasil

E-mail: glecio.siqueira@ufma.br

RESUMO

O objetivo com este trabalho foi caracterizar a variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produtividade de cana-de-açúcar por meio da integração de ferramentas de geoestatística e de estatística multivariada. O estudo foi realizado na Usina Itajubara, no município de Coelho Neto, Maranhão, Brasil. Os atributos de solo e planta foram amostrados em 100 pontos. Os atributos químicos estudados foram: pH, matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial, sódio (Na), soma de Bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação de bases, zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe), cádmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni) e chumbo (Pb). Os dados foram analisados por meio da estatística descritiva, geoestatística e análise de componentes principais. A produtividade da cana-de-açúcar para os anos agrícolas de 2015 e 2016, foi de 75,81 e 81,80 Mg ha⁻¹. Os valores de alcance para os atributos químicos tiveram variação de 36 a 130 m em 2015, e variação de 45 a 140 m em 2016. Os atributos MO, Ca, SB, Cr, Cu e Mn apresentaram variabilidade espacial em todos os anos e camadas avaliadas. O modelo esférico e exponencial foram os mais eficientes para descrever a variabilidade espacial. A produtividade da cana-de-açúcar apresentou distribuição semelhante até o raio de 100 m da área, de acordo com os valores de alcance obtidos nos anos agrícolas 2015 e 2016. A análise integrada de ferramentas de geoestatística e de estatística multivariada permitiu definir quais variáveis possuem maior explicação no sistema.

Palavra-chave: Zonas de Manejo. Variabilidade Espacial. Agricultura de Precisão.

ABSTRACT

The objective of this study was to characterize the spatial variability of soil chemical attributes and sugarcane productivity through the integration of geostatistical

and multivariate statistical tools. The study was conducted at the Itajubara Sugar Mill, in the municipality of Coelho Neto, Maranhão, Brazil. Soil and plant attributes were sampled at 100 sampling points. The chemical attributes studied were: pH, organic matter (OM), phosphorus (P), potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mn), potential acidity, sodium (Na), sum of bases (SB), cation exchange capacity (CEC), base saturation, zinc (Zn), copper (Cu), manganese (Mg), iron (Fe), cadmium (Cd), chromium (Cr), nickel (Ni), and lead (Pb). The data were analyzed using descriptive statistics, geostatistics, and principal component analysis. Sugarcane productivity for the 2015 and 2016 agricultural years was 75.81 and 81.80 Mg ha⁻¹, respectively. The range values for chemical attributes varied from 36 to 130 m in 2015, and from 45 to 140 m in 2016. The attributes OM, Ca, SB, Cr, Cu, and Mn showed spatial variability in all years and layers evaluated. The spherical and exponential models were the most efficient in describing spatial variability. Sugarcane productivity showed a similar distribution up to a radius of 100 m from the area, according to the range values obtained in the 2015 and 2016 agricultural years. The integrated analysis of geostatistical and multivariate statistical tools allowed us to define which variables have the greatest explanatory power in the system.

Keywords: Management Zones. Spatial Variability. Precision Agriculture.

RESUMEN

El objetivo de este estudio fue caracterizar la variabilidad espacial de los atributos químicos del suelo y la productividad de la caña de azúcar mediante la integración de herramientas estadísticas geoestadísticas y multivariadas. el estudio se realizó en la planta azucarera Itajubara, en el municipio de Coelho Neto, Maranhão, Brasil. se muestrearon los atributos del suelo y de la planta en 100 puntos de muestreo. los atributos químicos estudiados fueron: pH, materia orgánica (MO), fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), acidez potencial, sodio (Na), suma de bases (SB), capacidad de intercambio catiónico (CIC), saturación de bases, zinc (Zn), cobre (Cu), manganeso (Mg), hierro (Fe), cadmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni) y plomo (Pb). los datos se analizaron utilizando estadística descriptiva, geoestadística y análisis de componentes principales. la productividad de la caña de azúcar para los años agrícolas 2015 y 2016 fue de 75,81 y 81,80 mg ha⁻¹, respectivamente. los valores de rango para los atributos químicos variaron de 36 a 130 m en 2015, y de 45 a 140 m en 2016. los Atributos OM, Ca, Sb, Cr, Cu y Mn mostraron variabilidad espacial en todos los años y capas evaluadas. los modelos esférico y exponencial fueron los más eficientes en la descripción de la variabilidad espacial. la productividad de la caña de azúcar mostró una distribución similar hasta un radio de 100 m del área, de acuerdo con los valores de rango obtenidos en los años agrícolas 2015 y 2016. el análisis integrado de herramientas estadísticas geoestadísticas y multivariadas permitió definir qué variables tienen el mayor poder explicativo en el sistema.

Palabras clave: Zonas de Manejo. Variabilidad Espacial. Agricultura de Precisión.

1 INTRODUÇÃO

A literatura relata a importância do manejo adequado da fertilidade do solo sobre os rendimentos das safras de cana-de-açúcar e efeitos positivos na produtividade têm sido observados em diferentes anos de cultivo.

A variabilidade do solo ocorre devido à vários fatores (Montanari; Eduardo; Bahia, 2025) que atuam em diferentes escalas espaciais e pode ser afetada pelo material de origem (Mulder *et al.*, 2016), topografia e clima (Umali *et al.*, 2012). A variabilidade espacial dos atributos do solo pode afetar o rendimento das culturas (Dalchiavon *et al.*, 2011, Silva *et al.*, 2024). Sendo assim, o estudo da dependência espacial de variáveis relacionadas com a agricultura facilita a compreensão do comportamento e ocorrência dessas variáveis nas áreas agrícolas e, conseqüentemente, a interferência dessas na produtividade.

A geoestatística é uma das técnicas utilizadas para mapear a variabilidade espacial dos atributos do solo e tem como principal função a identificação, em uma área geralmente tratada como homogênea, características e necessidades que requerem manejos diferenciados (Brevik *et al.*, 2016; Silva *et al.*, 2024; Montanari; Eduardo; Bahia, 2025). No entanto, a representação da distribuição espacial de um atributo químico isolado do solo por meio dos mapas, geralmente não tem sido eficiente para estabelecer relação causa-efeito com a produtividade das culturas (Silva *et al.*, 2015). Isso se deve à complexidade do solo, que é considerado um sistema dinâmico cuja funcionalidade emerge de interações entre componentes físicos, químicos e biológicos, além da interação de fatores geológicos, topográficos e climáticos (Vezzani; Mielniczuk, 2009).

Deste modo, o uso de análises e as abordagens estatísticas multivariadas em conjunto com as análises geoestatísticas podem ser uma ferramenta em potencial e útil para avaliar os atributos do solo, otimizar a aplicação de insumos agrícolas, e principalmente poder correlacionar com os dados de produção das culturas (Liu *et al.*, 2016). Diante desse contexto, o objetivo com este trabalho foi caracterizar a variabilidade espacial de atributos químicos do solo e da produtividade de cana-de-açúcar por meio da integração de ferramentas de

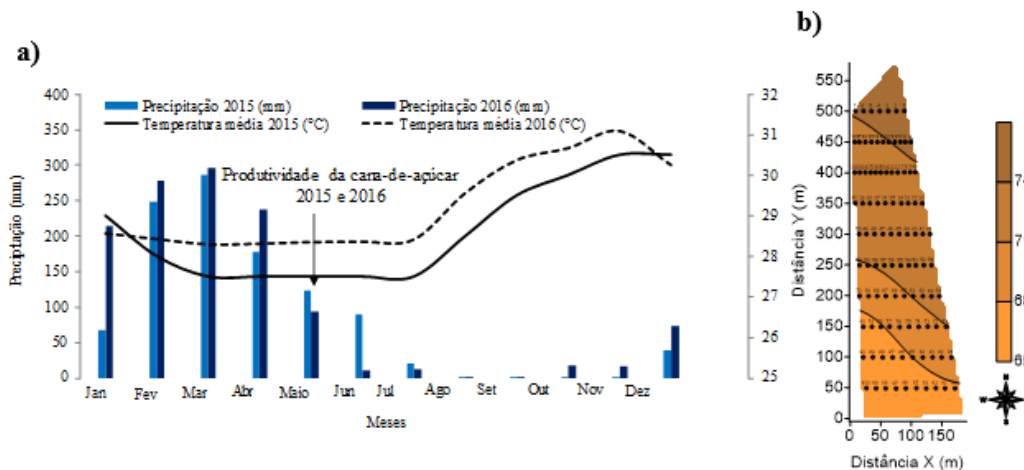
geoestatística e de estatística multivariada.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo abrange a Usina Itajubara no município de Coelho Neto na mesorregião Leste do estado do Maranhão, Brasil. A área possui 6,85 ha, irrigada por meio de pivot linear nos períodos de estiagem, entre as coordenadas geográficas 04° 15' 25" S e 43° 00' 46" O. A precipitação acumulada em 2015 e 2016 foi 1057 mm ano⁻¹ e 1254 mm ano⁻¹, respectivamente (Figura 1a). Foram instalados 100 pontos de amostragem em malha para coleta dos atributos químicos do solo e da produtividade da cana-de-açúcar (Figura 1b). As amostras de solo foram coletadas nas camadas 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m em dois anos subsequentes, 2015 e 2016.

Figura 1. Temperatura e precipitação durante o período experimental (1a); Mapa topográfico com altitude absoluta em metros (m) e esquema de amostragem contendo 100 pontos (1b).



Fonte: Autores (2025)

2.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

A irrigação suplementar foi realizada nos meses de agosto a novembro do ano de 2015, e nos meses de agosto e setembro no ano de 2016, foi aplicado uma lâmina de 15 mm por mês, totalizando 60 mm e 30 mm, nos anos 2015 e

2016, respectivamente. O solo da região é um Latossolo Vermelho segundo o manual de classificação de solo de Santos *et al.* (2025), cultivado com cana-de-açúcar desde 1980.

Em setembro de 2014 a área foi renovada, gradeada, subsolada e aplicado como fonte de matéria orgânica 60 mm de vinhaça e 30 t ha⁻¹ de torta de filtro e agricultada com a cultivar RB92579. A colheita da cana-de-açúcar foi realizada com queima da palhada.

A amostragem da produtividade da safra do ano de 2015 e 2016 foram ambas realizadas no mês de maio. O método aplicado foi o proposto por Gheller *et al.* (1999), que estima o peso total da parcela por meio da multiplicação do número de colmos da área amostrada pelo peso médio de cada colmo, determinado por meio da amostragem. Em cada ponto amostral com área útil de 35 m², foram escolhidas três linhas de cana-de-açúcar de 10 metros de comprimento, e contados os números de colmos de cada linha para ser calculado o peso médio. Posteriormente, foram colhidos 10 colmos ao acaso dentre as três linhas de cada ponto para a pesagem e determinação da produtividade.

As amostras de solo após coletadas foram secas em estufa a 60 °C durante 24 h e peneiradas em malha de 2 mm, para a determinação das propriedades químicas do solo: matéria orgânica (MO, g dm⁻³), pH em solução de CaCl₂, acidez potencial (H+Al, mmolc dm⁻³), fósforo (P, mg dm⁻³), potássio (K, mmolc dm⁻³), cálcio (Ca, mmolc dm⁻³), magnésio (Mg, mmolc dm⁻³), sódio (Na, mmolc dm⁻³), cobre (Cu, mg kg⁻¹), ferro (Fe, mg kg⁻¹), manganês (Mn, mg kg⁻¹) e cádmio (Cd, mg kg⁻¹). Os atributos químicos do solo foram determinados seguindo metodologia proposta por Raij *et al.* (2001), e após a realização da análise química, foram calculados os seguintes atributos de fertilidade do solo: capacidade de troca catiônica (CTC), soma de bases (SB) e saturação por bases (V%).

2.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Realizou-se uma estatística descritiva utilizando o *software* Statistica 12.0 (Statsoft, 2015), onde foram calculados os valores mínimos, máximo, média,

variância, desvio padrão, coeficiente de variação (CV), assimetria, curtose e desvio máximo em relação à distribuição normal por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov com probabilidade de erro de 0,01. O CV foi classificado segundo Warrick e Nielsen (1980) em baixo ($CV \leq 12$), moderado ($12 < CV < 60$) e alto ($CV \geq 60$).

A análise da variabilidade espacial das propriedades químicas do solo, produtividade da cultura de cana-de-açúcar e altitude utilizou-se o variograma experimental. Modelos matemáticos foram ajustados aos semivariogramas, os quais permitiram visualizar a estrutura de variação espacial das variáveis. Os critérios e procedimentos para ajuste do modelo do semivariograma foram feitos de acordo Vieira *et al.* (2000), Siqueira *et al.* (2009) e Siqueira *et al.* (2015).

Na identificação da importância de cada variável no sistema utilizou-se a ferramenta multivariada de análise de componentes principais (PCA), com os dados padronizados. Após a seleção e padronização das variáveis (média nula e variância unitária), a análise foi processada no programa Statistica 12.0 (Statsoft, 2015). A análise de componentes principais (PCA) foi calculada a partir da matriz de correlação entre as variáveis (Jeffers, 1978).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A média da produtividade da cana-de-açúcar na área de estudo foi de 75,8 Mg ha⁻¹ para o ano de 2015 e 81,8 Mg ha⁻¹ para 2016 (Tabela 1). Esses valores foram em média, 35% superior em comparação a média da região Nordeste para a Safra de 2016/2017 (CONAB, 2025).

Tabela 1. Estatística descritiva para altitude (m) e a produtividade da cana-de-açúcar (Mg ha⁻¹) nas safras de 2015 e 2016.

Atributo	Unidade	Mín.	Máx.	Média	Variância	DP	CV	Ass.	Curtose	D
Altitude	m	65,55	74,97	71,18	6,84	2,62	3,67	-	-0,793	0,157n
Prod.2015	Mg ha ⁻¹	49,46	102,99	75,81	146,36	12,10	16,00	0,04	-0,15	0,06Ln
Prod. 2016	Mg ha ⁻¹	40,65	205,71	81,80	702,91	26,51	32,00	1,89	4,85	0,177Ln

Min.: valor mínimo; Max: valor máximo; DP = desvio padrão. CV = coeficiente de variação.; Ass: assimetria; D = Teste de normalidade de Kolmogorov Smirnov à 1%. Ln: Lognormal; n: normal. Fonte: Autores (2025)

O valor médio de MO no solo da área em 2015 foi de 14,68 e 10,67 g dm⁻³ para as camadas de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m, respectivamente (Tabela 2), e 11,84 e 12,01 g dm⁻³ para as camadas de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m em 2016 (Tabela 3). Os valores médios de pH na camada de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m em 2015 foram de 5,23 e 5,36, respectivamente. Em 2016 foram de 5,48 e 5,46 na camada de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m, corroborando com Siqueira *et al.* (2015).

Em relação ao K, o valor médio no solo da área em 2015 foi de 4,97 e 4,39 mmolc dm⁻³ para as camadas de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m, respectivamente, e 4,72 e 4,78 mmolc dm⁻³ para as camadas de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m em 2016 (Tabela 2 e 3). A porcentagem de saturação por bases (V%) apresentou valores médios de 70,11% e 68,19% no ano de 2015 para as camadas de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m do solo, respectivamente, e valores de 69,62% e 66,86% em 2016 para as camadas de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m do solo, respectivamente. Esses resultados corroboram com os achados de Montanari, Eduardo e Bahia (2025).

Foi observado um alto valor de variância para os teores de P em ambas as camadas avaliadas em 2015. Em 2016 houve redução na variância dos teores de P nas duas camadas. Os valores de CV da produtividade foram de 15,96% e 32,41%, e valores de variância de 146,36 e 702,91 para 2015 e 2016, respectivamente. No ano de 2015 e 2016, os CVs foram baixos para os valores de pH, independentemente da camada avaliada. Os atributos químicos P, Cd e Ni apresentaram altos valores de CV de acordo com a classificação de Warrick e Nielsen (1980) nas duas camadas e nos dois períodos avaliados (Siqueira *et al.*, 2015).

Tabela 2. Estatística descritiva para as propriedades químicas do solo (camadas 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m) no ano 2015.

Atributo	unidade	Mín.	Máx.	Média	Variância	DP	CV	Ass.	Curtose	D
Camada 0,0-0,2 m										
MO	g dm ⁻³	3,40	91,90	14,68	193,73	13,92	94,80	4,04	18,135	0,288Ln
pH		3,80	6,35	5,23	0,23	0,48	9,10	-0,05	0,068	0,048n
P	mg dm ⁻³	3,40	91,90	16,47	226,72	15,06	91,45	2,98	11,093	0,207Ln
K	mmolc dm ⁻³	0,62	34,62	4,97	11,02	3,32	66,75	7,41	66,033	0,067Ln
Ca	mmolc dm ⁻³	7,00	41,00	18,06	54,51	7,38	40,88	1,16	1,036	0,146n
Mg	mmolc dm ⁻³	0	42,00	12,84	45,97	6,78	52,81	1,07	3,274	0,159n
H+Al	mmolc dm ⁻³	7,58	78,60	18,51	76,87	8,77	47,37	3,47	21,764	0,131n
Na	mmolc dm ⁻³	1,70	15,43	7,45	5,73	2,39	32,12	0,54	1,155	0,045n
SB	mmolc dm ⁻³	18,91	84,62	43,25	155,93	12,49	28,87	0,54	0,317	0,080n
CTC	mmolc dm ⁻³	33,37	124,71	61,76	262,64	16,21	26,24	0,83	1,329	0,070n

V	%	36,97	86,78	70,11	89,89	9,48	14,00	1,05	1,049	0,130n
Cd	mg dm ⁻³	0,0002	0,024	0,006	0,00003	0,0053	86,80	1,686	3,447	0,167n
Cr	mg dm ⁻³	0,0024	0,089	0,021	0,00015	0,0121	56,64	1,981	9,449	0,105n
Cu	mg dm ⁻³	0,3019	3,025	0,750	0,137	0,3702	49,34	2,562	13,528	0,122n
Fe	mg dm ⁻³	4,7297	74,831	17,393	100,077	10,00	57,52	3,234	14,946	0,177Ln
Mn	mg dm ⁻³	5,6651	208,906	68,961	2131,28	46,17	66,95	0,705	-0,379	0,144n
Ni	mg dm ⁻³	0,0046	0,292	0,074	0,003	0,0564	76,08	1,461	2,556	0,147n
Pb	mg dm ⁻³	0,3548	3,119	1,478	0,437	0,6613	44,74	0,449	-0,422	0,104n
Zn	mg dm ⁻³	0,7116	42,581	3,143	19,512	4,4172	140,56	7,568	66,237	0,299Ln
Camada 0,2-0,4 m										
MO	g dm ⁻³	4,80	25,70	10,67	13,31	3,65	34,18	1,579	3,427	0,161n
pH		4,38	6,53	5,36	0,27	0,52	9,65	0,142	-0,720	0,066n
P	mg dm ⁻³	3,70	114,30	20,89	404,78	20,12	96,31	2,448	7,095	0,225Ln
K	mmol _c dm ⁻³	1,67	7,74	4,39	1,59	1,26	28,73	0,207	-0,181	0,046n
Ca	mmol _c dm ⁻³	8,00	37,00	18,94	43,75	6,61	34,92	0,622	-0,185	0,113n
Mg	mmol _c dm ⁻³	0,00	41,00	12,93	38,15	6,18	47,77	1,785	6,351	0,156n
H+Al	mmol _c dm ⁻³	9,26	54,36	19,86	33,65	5,80	29,21	2,756	12,872	0,048n
Na	mmol _c dm ⁻³	4,04	12,48	7,38	2,99	1,73	23,42	0,345	0,079	0,111n
SB	mmol _c dm ⁻³	25,45	80,04	43,52	122,17	11,05	25,40	0,974	1,195	0,112n
CTC	mmol _c dm ⁻³	44,42	101,55	63,38	137,63	11,73	18,51	1,295	2,309	0,162n
V	%	46,37	83,56	68,19	66,43	8,15	11,95	-0,44	-0,509	0,101n
Cd	mg dm ⁻³	0,0005	0,0270	0,0082	0,00002	0,007	79,43	1,017	0,584	0,138n
Cr	mg dm ⁻³	0,0013	0,0888	0,0200	0,0002	0,014	72,08	2,226	8,682	0,137n
Cu	mg dm ⁻³	0,072	3,025	0,629	0,283	0,532	84,68	2,062	6,880	0,148n
Fe	mg dm ⁻³	4,730	74,83	21,77	149,65	12,233	56,19	2,011	5,964	0,130n
Mn	mg dm ⁻³	15,643	208,91	59,85	1909,33	43,696	73,01	1,207	0,843	0,174Ln
Ni	mg dm ⁻³	0,004	0,194	0,065	0,002	0,042	63,88	1,121	1,425	0,120n
Pb	mg dm ⁻³	0,355	2,983	1,285	0,401	0,633	49,28	0,776	0,075	0,128n
Zn	mg dm ⁻³	0,712	13,253	2,845	4,771	2,184	76,78	2,943	10,917	0,178Ln

Min.: valor mínimo; Max: valor máximo; DP = desvio padrão. CV = coeficiente de variação.;
Ass: assimetria; D = Teste de normalidade de KolmogorovSmirnov à 1%. Ln: Lognormal; n:
normal

Fonte: Autores (2025)

Tabela 3. Estatística descritiva para as propriedades químicas do solo (camadas 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m) no ano 2016.

Atributo	unidade	Mín.	Máx.	Média	Variância	DP	CV	Ass.	Curtose	D
Camada 0,0-0,2 m										
MO	g dm ⁻³	7,10	20,30	11,84	9,51	3,08	26,05	0,757	-0,093	0,115n
pH		4,41	6,50	5,48	0,23	0,48	8,84	-0,299	-0,619	0,090n
P	mg dm ⁻³	3,40	54,70	12,95	76,57	8,75	67,55	2,305	7,053	0,176Ln
K	mmol _c dm ⁻³	1,67	7,74	4,72	1,23	1,11	23,44	-0,510	0,804	0,091n
Ca	mmol _c dm ⁻³	2,00	30,00	20,07	36,80	6,07	30,22	-0,442	-0,083	0,114n
Mg	mmol _c dm ⁻³	0,02	24,00	12,16	22,64	4,76	39,14	-0,220	0,167	0,075n
H+Al	mmol _c dm ⁻³	9,76	39,63	19,33	29,19	5,40	27,95	1,150	2,124	0,117n
Na	mmol _c dm ⁻³	3,22	12,48	7,96	2,85	1,69	21,23	-0,271	0,144	0,069n
SB	mmol _c dm ⁻³	18,91	74,04	44,91	99,49	9,97	22,21	-0,114	-0,034	0,066n
CTC	mmol _c dm ⁻³	33,37	88,61	64,24	118,84	10,90	16,97	-0,364	-0,365	0,082n
V	%	45,74	84,42	69,62	62,56	7,90	11,32	0,307	0,044	0,063n
Cd	mg dm ⁻³	0,0002	0,024	0,0063	0,00002	0,0049	76,88	1,74	4,34	0,202n
Cr	mg dm ⁻³	0,0024	0,088	0,0243	0,0002	0,0140	57,42	1,44	3,98	0,132n
Cu	mg dm ⁻³	0,2175	1,717	0,7528	0,0913	0,3022	40,14	0,47	-0,10	0,136n
Fe	mg dm ⁻³	4,7297	44,707	16,54	37,077	6,0891	36,81	1,67	5,24	0,115n
Mn	mg dm ⁻³	10,6651	142,322	57,97	1220,85	34,94	60,27	0,58	-0,70	0,159n
Ni	mg dm ⁻³	0,0041	0,292	0,075	0,0030	0,055	72,62	1,47	2,68	0,129n
Pb	mg dm ⁻³	0,3548	2,982	1,607	0,431	0,657	40,88	0,32	-0,46	0,086n

Zn	mg dm ⁻³	0,7116	9,872	2,587	2,246	1,498	57,93	2,28	8,29	0,131n
Camada 0,2-0,4 m										
MO	g dm ⁻³	6,55	20,35	12,01	8,76	2,96	24,65	0,457	0,075	0,056n
pH		4,12	6,89	5,46	0,30	0,55	10,10	0,040	-0,225	0,116n
P	mg dm ⁻³	2,80	57,20	13,21	75,54	8,69	65,81	2,811	11,756	0,159n
K	mmol _c dm ⁻³	2,67	7,62	4,78	1,20	1,10	22,93	-0,594	1,066	0,143n
Ca	mmol _c dm ⁻³	8,00	33,00	16,47	28,68	5,36	32,52	0,968	0,759	0,114n
Mg	mmol _c dm ⁻³	2,00	22,00	10,94	15,63	3,95	36,14	0,516	1,379	0,129n
H+Al	mmol _c dm ⁻³	9,80	40,61	19,54	27,84	5,28	27,01	1,162	2,297	0,129n
Na	mmol _c dm ⁻³	3,40	12,13	7,28	3,85	1,96	26,96	0,132	-0,447	0,047n
SB	mmol _c dm ⁻³	21,77	65,92	39,47	46,74	6,84	17,32	0,587	1,374	0,064n
CTC	mmol _c dm ⁻³	40,92	85,86	59,10	73,76	8,59	14,53	0,327	0,594	0,050n
V	%	48,22	82,54	66,86	46,63	6,82	10,22	-0,478	0,458	0,090n
Cd	mg dm ⁻³	0,0002	0,0222	0,0071	0,00003	0,005	72,73	1,289	1,903	0,204n
Cr	mg dm ⁻³	0,0024	0,0993	0,0309	0,0004	0,021	67,24	1,547	2,821	0,128n
Cu	mg dm ⁻³	0,3019	1,7178	0,7970	0,1054	0,325	40,72	1,142	0,581	0,212Ln
Fe	mg dm ⁻³	4,96	42,250	17,22	39,57	6,290	36,52	1,589	4,680	0,118n
Mn	mg dm ⁻³	14,00	141,24	50,34	922,10	30,366	60,33	0,877	0,284	0,121n
Ni	mg dm ⁻³	0,0048	0,3109	0,0681	0,0031	0,056	82,00	2,245	6,570	0,190n
Pb	mg dm ⁻³	0,2267	2,8836	1,2932	0,2990	0,547	42,29	0,304	0,468	0,169Ln
Zn	mg dm ⁻³	0,5116	5,5678	1,9055	0,6528	0,808	42,40	0,942	3,115	0,163Ln

Min.: valor mínimo; Max: valor máximo; DP = desvio padrão. CV = coeficiente de variação.;
Ass: assimetria; D = Teste de normalidade de KolmogorovSmirnov à 1%. Ln: Lognormal; n:
normal

Fonte: Autores (2025)

As Tabelas 4 e 5 e as Figuras 2 a 3 apresentam os parâmetros relativos aos ajustes e os modelos dos semivariogramas para os atributos químicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar nos anos de 2015 e 2016. Verifica-se efeito pepita puro ou ausência total de dependência espacial para os teores de pH, P, K, Mg, H+Al, Na, CTC, V%, Cd, Fe, Ni e Zn na camada 0,0-0,2 m, e para K, H+Al, V, Cd, Cr, Mn, Ni, Pb, e Zn na camada 0,2-0,4 m do ano de 2015. Na camada de 0,0-0,2 m os atributos MO, Ca e SB apresentaram fortes dependências espaciais ($GD < 25\%$), enquanto os demais atributos apresentaram dependência espacial moderada ($25\% < GD < 75\%$), de acordo com a classificação de Cambardella *et al.* (1994) e Souza *et al.* (2023).

Tabela 4. Modelos ajustados dos semivariogramas dos atributos químicos nas camadas 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m do solo no ano 2015.

Atributo	Modelo	C ₀	C ₁	a (m)	GD	R ² :
Prod. 2015	Exponencial	0,001	0,018	110	35	0,999
Altitude	Gaussiano	0,05	13000	120	0	0,999
Camada 0,0-0,2 m						
Log MO	Gaussiano	0	0,073	78	0	0,998
Log pH						Efeito pepita puro
Log P						Efeito pepita puro
Log K						Efeito pepita puro

Log Ca	Exponencial	0,005	0,017	70	22	0,999
Log Mg		Efeito pepita puro				
Log H+Al		Efeito pepita puro				
Log Na		Efeito pepita puro				
Log SB	Exponencial	0,003	0,0102	80	22	0,999
Log CTC		Efeito pepita puro				
Log V		Efeito pepita puro				
Cd		Efeito pepita puro				
Cr	Exponencial	0,00005	0,00014	120	26	0,999
Cu	Exponencial	0,039	0,08	125	32	0,999
Log Fe		Efeito pepita puro				
Mn	Exponencial					
Ni		Efeito pepita puro				
Pb	esférico	0,028	0,006	110	72	0,999
Zn		Efeito pepita puro				
Camada 0,2-0,4 m						
MO	Gaussiano	0,028	0,072	73	28	0,999
pH	Exponencial	0,04	0,15	37	21	0,999
P	Gaussiano	165	255	36	39	0,999
Log K		Efeito pepita puro				
Log Ca	Esférico	14.5	22	85	39	0,998
Log Mg	Exponencial	0,022	0,022	65	50	0,998
Log H+Al		Efeito pepita puro				
Log Na	Gaussiano	0,0035	0,085	105	52	0,999
Log SB	Gaussiano	0,0053	0,057	130	48	0,999
Log CTC	Gaussiano	0,017	0,0045	100	27	0,999
Log V		Efeito pepita puro				
Cd						
Cr						
Cu	Spherical	0,075	0,22	100	25	0,999
Fe	Spherical	65	75	100	46	0,999
Mn		Efeito pepita puro				
Log Ni		Efeito pepita puro				
Pb		Efeito pepita puro				
Zn		Efeito pepita puro				

Fonte: Autores (2025)

Tabela 5. Modelos ajustados dos semivariogramas dos atributos químicos nas camadas 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m do solo no ano 2015.

Atributo	Modelo	C ₀	C ₁	a (m)	GD	R ² :
Log Prod. 2016	Esférico	0,0037	0,009	100	29	0,999
Camada 0,0-0,2 m						
MO	Exponencial	3,5	6.5	130	35	0,999
pH	Esférico	0,06	0,175	90	25	0,999
P		Efeito pepita puro				
K	Exponencial	0,3	0.95	105	24	0,999
Ca	Exponencial	17,5	18.5	75	48	0,999
Mg	Exponencial	7,5	16	85	31	0,999
H+Al	Exponencial	7	28	140	20	0,999
Log Na	Esférico	0,022	0,045	90	32	0,999
Log SB	Esférico	0,003	0,0085	105	24	0,999
Log CTC	Esférico	0,0019	0,0014	125	57	0,999
Log V		Efeito pepita puro				
Cd		Efeito pepita puro				
Cr	Exponencial	0,0006	0,00013	120	31	0,999

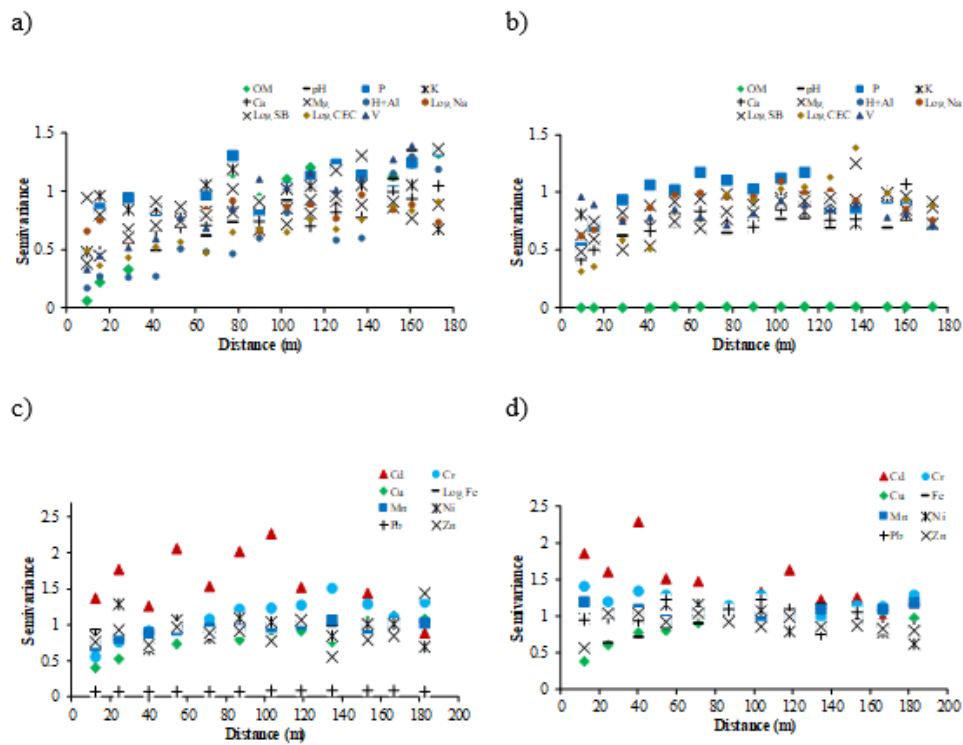
Cu			Efeito pepita puro				
Fe	Exponencial	17	16	80	51	0,999	
Mn	Esférico	450	800	90	36	0,999	
Ni			Efeito pepita puro				
Pb			Efeito pepita puro				
Zn	Exponencial	1,45	1,3	90	52	0,999	
Camada 0,2-0,4 m							
MO	Gaussiano	3	5,5	50	35	0,999	
pH	Gaussiano	0,08	0,16	100	33	0,999	
P	Gaussiano	46	238	80	16	0,999	
K	Exponencial	0,7	1,15	80	37	0,999	
Ca	Exponencial	2	37	60	5	0,999	
Mg	Exponencial	39	10	45	69	0,999	
H+Al	Exponencial	2,4	50	80	4	0,999	
Na	Exponencial	0,6	3,2	90	15	0,999	
SB	Exponencial	23	92	88	20	0,999	
CTC	Gaussiano	11,5	10,5	45	52	0,999	
Log V	Exponencial	12	53	70	18	0,999	
Cd			Efeito pepita puro				
Cr			Efeito pepita puro				
Log Cu			Efeito pepita puro				
Fe	Exponencial	19	17	80	52	0,998	
Mn	Esférico	250	280	95	47	0,999	
Log Ni			Efeito pepita puro				
Log Pb			Efeito pepita puro				
Zn	Gaussiano	0,53	0,2	110	72	0,999	

Co: efeito pepita; C₁: Variância estrutural; a (m): alcance em m; R²: coeficiente de determinação; GD: Grau de dependência espacial.

Fonte: Autores (2025)

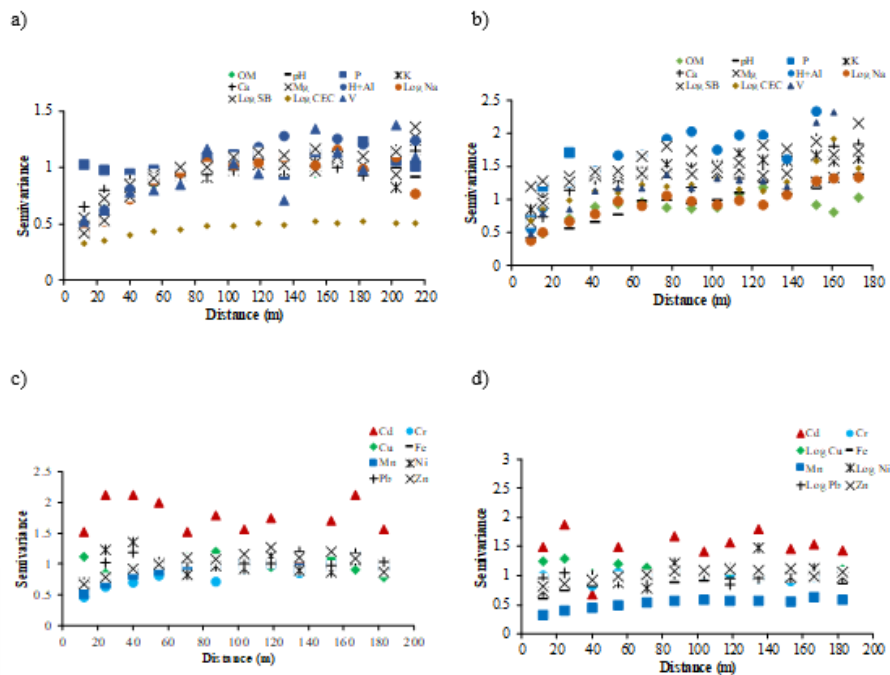
A Figura 2a demonstra comportamento similar do padrão de variabilidade entre os pares de semivariância dos atributos MO, pH, P, K, Ca, Mg, H+Al, Na, SB, CTC e V% na camada 0,0-0,2 m do ano de 2015, enquanto na camada 0,2-0,4 m, os pares de semivariância para a MO apresentaram comportamento distinto dos demais atributos (Figura 2B). Com relação aos micronutrientes no ano de 2015 (Figura 2c e 2d) foi observado que o Cd apresentou comportamento distinto aos demais atributos nas duas camadas avaliadas e Pb na camada 0,0-0,2 m do solo, este mesmo padrão foi observado para os pares de semivariância dos micronutrientes no ano de 2016 em ambas camadas (Figura 3c e 3d). No ano de 2016 na camada 0,2-0,4 m (Figura 3b) houve similaridade entre todos os pares de semivariância dos atributos químicos (MO, pH, P, K, Ca, Mg, H+Al, Na, SB, CTC e V%) até a distância de 140 m, enquanto que na camada 0,0-0,2 m, os atributos P, CTC e V% tiveram comportamento distinto dos demais (Figura 3a).

Figura 2. Massa fresca de plantas (g pl⁻¹) de milho cv. MG580 sob tratamentos microbiológicos e diferentes potenciais hídricos.



Fonte: Autores (2025)

Figura 3. Semivariogramas escalonados do ano de 2016 para: a e b) Atributos químicos do solo (MO, pH, P, K, Ca, Mg, H+Al, Na, SB, CTC e V%) nas camadas 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m; c e d) Micronutrientes (Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Zn) nas camadas 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m.



Fonte: Autores (2025)

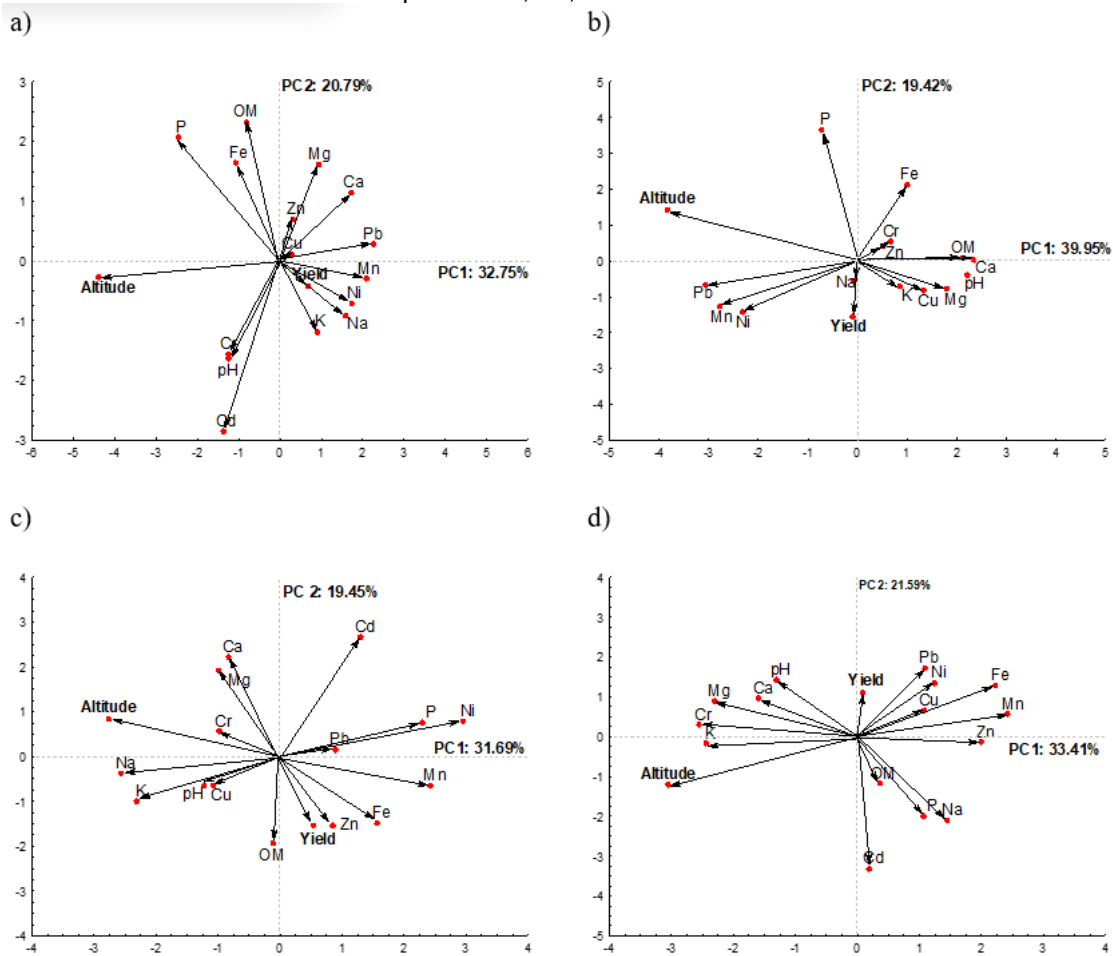
A análise de componentes principais (ACP) para os dois anos experimentais e camadas avaliadas considerou os dois primeiros componentes principais e permitiu o agrupamento de 17 atributos: Altitude, produtividade, MO, pH, P, K, Ca, Mg, Na, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn (Figura 4). Verificou-se que na camada 0,0–0,2 m do ano de 2015, o primeiro e segundo componentes são responsáveis por 53% da variância total dos dados originais, sendo 32,75% na CP1 e 20,79% na CP2. Na CP1, a altitude, Cd, P, MO e Pb foram as variáveis com maior explicação no sistema. Foi observado uma relação de dependência direta entre os teores de Zn, Mg, Ca, Pb, Cu, Mn, Ni, Na e K e a produtividade e relação inversa da produtividade com os teores de Cr, Cd, pH e a altitude. Todas as bases na camada 0,0-0,2 m apresentaram relação direta com a produtividade da cana-de-açúcar. Os atributos P, Fe, MO, Cr, Cd e pH apresentaram relação direta com a altitude. Enquanto os teores de Zn, Mg, Ca, Pb, Cu, Mn, Ni, Na e K apresentaram relação inversa. Na camada 0,2–0,4 m do ano de 2015 os dois componentes principais explicaram em conjunto 59,37% da variabilidade dos dados. O primeiro componente explicou 39,95% e o segundo componente explicou 19,42%, corroborando com Siqueira *et al.* (2014).

Em 2016 na camada 0,0–0,2 m o primeiro e segundo componentes principais explicaram 51% da variância total dos dados originais, no qual o primeiro componente explicou 31,69% e o segundo componente explicou 19,45%. Nessa camada a altitude e Ni foram os atributos com maior explicação no sistema. Observa-se que os micronutrientes Zn, Fe e Mn apresentaram relação direta com a produtividade. Na camada 0,2-0,4 m o primeiro e segundo componentes são responsáveis por 55% da variância total dos dados originais, sendo 33,41% na CP1 e 21,59% na CP2. Nessa camada também foi observada relação direta dos micronutrientes com a produtividade de cana-de-açúcar. Nos dois anos experimentais a maior porcentagem de explicação da variabilidade total dos dados é observada na camada mais profunda (0,2-0,4 m).

A análise geoestatística foi realizada com o intuito de mapear os atributos do primeiro e segundo componentes principais em cada ano e camada (Tabela 6). Os semivariogramas foram ajustados ao modelo esférico e exponencial e tiveram um alcance variando de 80 a 105 m, com o maior valor observado para

a CP1 da camada 0,0-0,2 m do solo no ano de 2016. Esse componente (CP1) apresentou maior contribuição da altitude e P e MO. Os modelos ajustados para os semivariogramas dos CPs do estudo estão apresentados também na Figura 4, apresentaram padrão semelhante de ajuste dos pontos em cada ano e camada avaliada.

Figura 4. Análise de componentes principais: a) Atributos químicos 0,0-0,2 m ano 2015; b) Atributos químicos 0,2-0,4 m ano 2015; a) Atributos químicos 0,0-0,2 m ano 2016; b) Atributos químicos 0,2-0,4 m ano 2016.



Fonte: Autores (2025)

Tabela 6. Parâmetros de ajuste dos semivariogramas para os componentes principais dos atributos em estudo nas camadas de 0,0-0,2 e 0,2-0,4 m de profundidade nos anos 2015 e 2016.

Atributo	Modelo	C ₀	C ₁	a (m)	GD
Camada 0,0-0,2 m 2015					
PC1 (32.75%)	Esférico	0.13	0.13	85	50
PC2 (20.79%)	Esférico	0.05	0.12	85	29.41
Camada 0,2-0,4 m 2015					
PC1 (39.95%)	Exponencial	0.00001	0.0008	90	10.23
PC2 (19.4%)	Exponencial	0.005	0.018	80	21.74
Camada 0.0-0.2 m 2016					
PC1 (31.69%)	Esférico	0.028	0.135	105	17.7
PC2 (19.45%)	Gaussiano	0.035	0.09	85	31.81
Camada 0.2-0.4 m 2016					
PC1 (33.41%)	Exponencial	0.075	0.015	80	33.33
PC2 (21.59%)	Esférico	0.069	0.12	90	36

C₀: efeito pepita; C₁: Variância estrutural; a (m): alcance em m; GD: Grau de dependência espacial; R²: coeficiente de determinação

Fonte: Autores (2025)

4 CONCLUSÃO

Os atributos químicos do solo nas camadas estudadas apresentaram elevada variabilidade espacial. A produtividade da cana-de-açúcar apresentou distribuição semelhante em um raio de 100 m, indicando a aplicação de zonas de manejo específico. A análise integrada de ferramentas de geoestatística e de estatística multivariada permitiu definir quais variáveis possuem maior explicação no sistema. Os resultados obtidos podem apoiar na tomada de decisões de futuras amostragens e no controle da aplicação variável de fertilizantes e insumos na área de estudo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa e ao Desenvolvimento científico e Tecnológico do Maranhão (FAPEMA - BD-09115/24) pela concessão de bolsa de estudo ao autor Edvander Prudente de Almeida.

REFERÊNCIAS

BREVIK, E. C.; CALZOLARI, C. C.; MILLER, B. A.; PEREIRA, P.; KABALA, C.; BAUMGARTEN, A.; JORDAN, A. Soil mapping, classification, and pedological modelling: history and future directions. **Geoderma**, v.264, p.256–274, 2016.

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 soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, n.5, p.1501–1511, 1994.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. (2025) Disponível em: https://www.novacana.com/pdf/18042017090451_Conab_-_1_Levantamento_2017-18_180417.pdf. Acesso em: 14 de dezembro de 2025.

DALCHIAVON, F. C.; CARVALHO, M. P.; NOGUEIRA, D. C.; ROMANO, D.; ABRANTES, F. L.; ASSIS, J. T.; OLIVEIRA, M. S. Produtividade da soja e resistência mecânica à penetração do solo sob sistema plantio direto no cerrado brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.41, p.8–19, 2011.

GHELLER, A. C. A.; MENEZES, L. L.; MATSUOKA, S.; MASUDA, Y.; HOFFMANN, H. P.; ARIZONO, H.; GARCIA, A. A. F. **Manual de método alternativo para medição da produção de cana-de-açúcar**. Araras: UFSCAR/CCA/DBV, 1999. 7p.

JEFFERS, J. N. R. An introduction to system analysis: with ecological applications. London: **Edward Arnold Publishers Ltd**, 1978. 198 p.

LIU, R.; XU, F.; YU, W.; SHI, J.; ZHANG, P.; SHEN, Z. Analysis of field-scale spatial correlations and variations of soil nutrients using geostatistics. **Environmental Monitoring and Assessment**, v.188, n.2, p.1–10, 2016.

MONTANARI, R.; EDUARDO, M. J.; BAHIA, A. S. R. de S. Variabilidade espacial de atributos químicos e físicos de um latossolo em diferentes profundidades sob o cultivo de cana-de-açúcar. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, v.23, n.2, e9085, 2025.

MULDER, V. L.; LACOSTE, M.; RICHER-DE-FORGES, A. C.; MARTIN, M. P.; ARROUAYS, D. National versus global modelling the 3D distribution of soil organic carbon in mainland France. **Geoderma**, v.263, p.16–34, 2016.

RAIJ, B. van; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: **Instituto Agrônomo**, 2001. 285p.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; LIMA, H. N.; MARQUES, F. A.; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. (2025). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. (6 ed) Brasília, DF: **Embrapa Solos**.

SILVA, A. F.; PEREIRA, M. J.; ZIMBACK, C. R. L.; LANDIM, P. M. B.;

SOARES, A. Simulação sequencial de atributos diagnósticos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.1, p.418–425, 2015.

SILVA, J. R.; FARIAS, C. H. de A.; OLIVEIRA, F. P. de; SILVA, P. L. F. da; CAMPOS, M. C. C.; TAVARES, D. D. Spatial variability of soil penetration resistance in areas cultivated with sugarcane under different times of mechanized harvesting with controlled traffic. **Revista de Agricultura Neotropical**, v.11, n.1, e7696, 2024.

SIQUEIRA, G. M.; SILVA, J.; BEZERRA, J. M.; SILVA, Ê. F. F.; DAFONTE, J. D.; MELO, R. F. Estacionariedade do conteúdo de água de um Espodossolo Humilúvico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.5, p.439–448, 2015.

SIQUEIRA, G. M.; VIEIRA, S. R.; CEDDIA, M. B. Variabilidade de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, v.67, n.1, p.203–211, 2009.

SOUZA, D. H. S. DE, SILVA, Ê. F. DE F. E, PAZ-GONZÁLEZ, A., SIQUEIRA, G. M., SILVA, J. S. DA, & DANTAS, D. C. da. Spatial variability of physical attributes of a Spodosol and sugarcane yield. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.27, p.521–530, 2023.

STATSOFT. StatSoft Electronic Statistics Textbook. Disponível em: <www.statsoft.com/Textbook/Basic-Statistics#Correlationsc>. Acesso em: mar. 2025.

UMALI, B. P.; OLIVER, D. P.; FORRESTER, S.; CHITTLEBOROUGH, D. J.; HUTSON, J. L.; KOOKANA, R. S.; OSTENDORF, B. The effect of terrain and management on the spatial variability of soil properties in an apple orchard. **Cartena**, v.93, p.38–48, 2012.

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.33, p.743-755, 2009.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; SCHAEFER, G. R. (ed.). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, v.1, p.1–54, 2000.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.). **Applications of Soil Physics**. New York: Academic Press, 1980. Cap.2, p.319–344.