



Variabilidade Espacial dos Atributos Químicos do Solo em Cultivo de Cana-de-açúcar

Cícero Gomes dos Santos¹, Julio César Calixto Costa², Ravi Emanuel de Melo³, Gilson Moura Filho⁴, Elvis da Silva Alves⁵, Thaís Rayane Gomes da Silva⁶, Márcio Aurélio Lins dos Santos⁷, José Ferreira de Oliveira⁸, Renato Luis Tertuliano de Gois⁹, Julianna Catônio da Silva¹⁰

¹Dr. Em Agronomia (Ciência do Solo), Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Av. Manoel Severino Barbosa, CEP 57309-005, Arapiraca, Alagoas, Brasil. cgomes@arapiraca.ufal.br. ²Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, CEP 52171-900, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. julio.calixto@ufrpe.br. ³Me. em Produção Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), Rua Dom Manuel de Medeiros, s/n, CEP 52171-900, Dois Irmãos, Recife, Pernambuco, Brasil. ravi.melo@ufrpe.br. ⁴Dr. em Agronomia (Solos e Nutrição de Plantas), Universidade Federal de Alagoas, Centro de Ciências Agrárias - (CECA). Laboratório de Solo, Água e Planta/CECA/UFAL Campus Universitário, CEP 57100000, Rio Largo, Alagoas, Brasil. gmf.ufal@gmail.com. ⁵Dr em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa (UFV), Av. Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário, CEP 36570-900 Viçosa, Minas Gerais, Brasil. elvistv@gmail.com. ⁶Dra. em Agronomia (Produção Vegetal), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, Via de Acesso Prof. Paulo Donato Castellane, Vila Industrial CEP 14884900, Jaboticabal, São Paulo, Brasil. trg.silva@unesp.br. ⁷Dr. em Agronomia, Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Av. Manoel Severino Barbosa, CEP 57309-005, Arapiraca, Alagoas, Brasil. mal.santo@arapiraca.ufal.br. ⁸Eng. Agrônomo, Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Av. Manoel Severino Barbosa, CEP 57309-005, Arapiraca, Alagoas, Brasil. jose.oliveira1@arapiraca.ufal.br. ⁹Me. em Química e Biotecnologia, Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Av. Manoel Severino Barbosa, CEP 57309-005, Arapiraca, Alagoas, Brasil. renatogois08@gmail.com. ¹⁰Dra. em Agronomia (Produção Vegetal), Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Av. Manoel Severino Barbosa, CEP 57309-005, Arapiraca, Alagoas, Brasil. julianna_cds@hotmail.com.

Artigo submetido em 25/01/2025 e aceite em 12/12/2025

RESUMO

A cana-de-açúcar é uma cultura de grande relevância nacional e global, com características fisiológicas de cultivo em climas tropicais que permitem a adoção de uma ampla gama de sistemas de manejo. Entretanto, as atividades de uso da terra podem afetar os atributos do solo, especialmente os químicos. Assim, os métodos geoestatísticos surgem como ferramenta para analisar e descrever a variabilidade espaço-temporal dos atributos do solo. Desta forma, objetivou-se avaliar a variabilidade de atributos químicos utilizando técnicas de geoestatística em área sob cultivo de cana-de-açúcar. O experimento foi realizado na Fazenda Capiatã em Coruripe - Alagoas. Realizou-se uma amostragem sistemática em malha regular de 50x50 m (70 pontos) em duas profundidades (0-20 e 20-40 cm). As amostras foram submetidas às seguintes análises: pH em água, cálcio e magnésio, potássio, acidez potencial, soma de bases, troca catiônica, saturação por alumínio e necessidade de calcário. Os resultados foram submetidos à análise estatística descritiva. Realizou-se hipótese da normalidade através do programa Analyse-it for Microsoft Excel®. Semivariogramas foram estimados e após a validação, utilizou-se o método de interpolação de krigagem, usando o Software SURFER® 8.0. Entre os principais resultados, nota-se a pouca variação no pH em ambas profundidades, com baixo DP, o que sugere uniformidade nos níveis de acidez. O modelo exponencial se ajustou melhor aos dados, com tais resultados apresentando alta dependência espacial. A variabilidade espacial dos atributos químicos do solo mostrou que a maioria dos atributos apresentaram dependência espacial. A utilização dos mapas de variabilidade espacial permite que as correções ocorram de forma localizada, reduzindo possíveis custos de operação. Portanto, os atributos químicos apresentaram dependência espacial forte ou muito forte. A análise geoestatística, através de semivariogramas e krigagem identificou padrões espaciais bem definidos para maioria dos atributos químicos, possibilitando localizar áreas com maior necessidade de correções.

Palavras-chave: *Saccharum officinarum*, geoestatística, krigagem, manejo agrícola, padrões espaciais.

Spatial Variability of Soil Chemical Attributes in Sugarcane Cultivation

ABSTRACT

Sugarcane is a crop of great national and global relevance, with physiological characteristics of cultivation in tropical climates that allow the adoption of a wide range of management systems. However, land use activities can affect soil attributes, especially chemicals. Thus, geostatistical methods emerge as a tool to analyze and describe the spatio-temporal variability of soil attributes. In this way, the objective was to evaluate the variability of chemical attributes using geostatistics techniques in an area under sugarcane cultivation. The experiment was carried out at the Capiatã Farm in Coruripe - Alagoas. A systematic sampling was carried out in a regular mesh of 50x50 m (70 points) at two depths (0-20 and 20-40 cm). The samples were subjected to the following analyzes: pH in water, calcium and

magnesium, potassium, potential acidity, sum of bases, cationic exchange, aluminum saturation and need for limestone. The results were submitted to descriptive statistical analysis. Normality was hypothesized through the Analyse-it for Microsoft Excel® program. Semivariograms were estimated and after validation, the krigage interpolation method was used, using the SURFER® 8.0 Software. Among the main results, there is little variation in pH at both depths, with low PD, which suggests uniformity in acidity levels. The exponential model adjusted better to the data, with such results showing high spatial dependence. The spatial variability of the chemical attributes of the soil showed that most of the attributes showed spatial dependence. The use of spatial variability maps allows corrections to occur in a localized way, reducing possible operating costs. Therefore, the chemical attributes showed strong or very strong spatial dependence. Geostatistical analysis, through semivariograms and krigagem, identified well-defined spatial patterns for most chemical attributes, making it possible to locate areas with greater need for corrections.

Keywords: *Saccharum officinarum*, geostatistics, krigagem, agricultural management, spatial patterns.

Introdução

A cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.) é uma cultura comercialmente significativa pertencente à família Poaceae (Satpathi et al., 2025), sendo cultivada em mais de cem países e regiões, cobrindo uma área total de cerca de 26 milhões de hectares (Lu et al., 2024). Essa cultura apresentou um aumento expressivo na produção global entre 1994 e 2018 (Som-Ard et al., 2021), acompanhando a expansão da demanda por açúcar, etanol e produtos derivados. Amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais (Kumar et al., 2020), a cana-de-açúcar contribui com aproximadamente 80% do açúcar e 40% da produção mundial de biocombustíveis (Budeguer et al., 2021), configurando-se como uma das principais commodities agrícolas do planeta.

Estimativas recentes apontam que aproximadamente 1,9 bilhão de toneladas de cana-de-açúcar são produzidas globalmente (Huang et al., 2025), reflexo do avanço tecnológico, melhoramento genético e expansão de áreas cultivadas. No cenário internacional, o Brasil é reconhecido como o maior produtor (Thomas et al., 2021), desempenhando papel estratégico no mercado sucroenergético, sobretudo pelas condições climáticas favoráveis, pela estrutura industrial consolidada e pelo uso crescente de práticas sustentáveis no campo. Na região Nordeste, há previsão de incremento de 2,2% na safra 2024/25 em comparação à safra anterior, alcançando 57,72 milhões de toneladas (Conab, 2024), sustentada por melhorias no manejo, expansão de áreas e condições climáticas mais regulares.

As características fisiológicas deste cultivo em climas tropicais permitem a adoção de uma ampla gama de sistemas de manejo (Rocha; Sparovek, 2021), incluindo colheita mecanizada, integração com culturas de cobertura e estratégias de redução de impacto ambiental. No entanto, a cultura exige solos produtivos, bem estruturados e com pequena variação nutricional (Dalchiavon et al., 2013), visando atingir produções satisfatórias e manter a eficiência do sistema sucroenergético.

O solo desempenha funções essenciais no desenvolvimento das plantas, atuando como meio de sustentação física, armazenamento e ciclagem de nutrientes, regulação do fluxo de água e manutenção da atividade biológica, além de funcionar como um indicador de qualidade ambiental capaz de refletir processos ecológicos

por meio de seus atributos químicos, físicos e biológicos (Bach et al., 2020; Guerra et al., 2020). Esses atributos, quando equilibrados, garantem condições adequadas para o crescimento vegetal e para o funcionamento dos ecossistemas terrestres. Entretanto, as atividades de uso e manejo da terra, especialmente práticas agrícolas intensivas, podem modificar profundamente a estrutura, a fertilidade e a dinâmica dos nutrientes no solo, afetando sua capacidade produtiva e sua estabilidade ao longo do tempo (Cherubin et al., 2015).

Diante disso, torna-se fundamental o monitoramento contínuo desses atributos, a fim de identificar alterações, prevenir degradação e orientar estratégias de manejo mais eficientes. Silva et al. (2019) destacam que estudos sobre a variabilidade espacial e temporal dos atributos do solo são essenciais para compreender a heterogeneidade natural e antrópica, permitindo a elaboração de práticas de manejo mais precisas e eficientes, com reflexos positivos na produtividade das culturas. Nessa perspectiva, os métodos geoestatísticos surgem como ferramentas fundamentais para analisar, quantificar e descrever a variabilidade espaço-temporal do solo, contribuindo para a identificação de padrões, a construção de mapas temáticos e a compreensão de como diferentes sistemas de manejo influenciam essa variabilidade (Batista et al., 2019).

Estudos envolvendo geoestatística no contexto da cana-de-açúcar no Nordeste têm sido registrados principalmente nos estados de Pernambuco, Paraíba, Ceará, Maranhão e Rio Grande do Norte (Cardoso et al., 2023). Apesar disso, ainda existem lacunas importantes relacionadas à disponibilidade de dados para o estado de Alagoas, indicando a necessidade de

ampliar investigações que considerem a variabilidade espacial de atributos do solo em áreas produtoras dessa cultura. Os atributos químicos do solo apresentam comportamento dinâmico, influenciado por fatores intrínsecos como mineralogia, textura e matéria orgânica, bem como por aspectos externos relacionados ao manejo agrícola, às condições ambientais e ao tempo de cultivo (Arcoverde et al., 2023). Esses autores reforçam que, para compreender de maneira mais robusta as alterações estruturais e funcionais do solo, a geoestatística tem se consolidado como uma abordagem indispensável, possibilitando a obtenção de informações espaciais detalhadas que orientam práticas de manejo mais eficientes e sustentáveis.

Nesse sentido, diversas pesquisas demonstram o potencial da krigagem como método de interpolação capaz de identificar e representar a variabilidade espacial tanto dos atributos do solo quanto das características das culturas, com destaque para os atributos químicos, cuja distribuição é fortemente dependente de processos pedogenéticos e do uso da terra (Borelli et al., 2023). A interpolação desses atributos é fundamental para avaliar padrões de variação e distribuição espacial, uma vez que tais características são influenciadas por fenômenos naturais como relevo, precipitação e mecanismos de transporte no perfil do solo. Assim, estudar os atributos químicos em ambientes agrícolas torna-se essencial para assegurar a manutenção da qualidade do solo, subsidiar práticas de manejo localizado e aprimorar estratégias de produção agrícola sustentável (Delarmelina et al., 2022).

Neste escopo, visando fornecer *insights* sobre o impacto do manejo no comportamento de variáveis químicas do solo, o estudo objetivou avaliar a variabilidade de atributos químicos utilizando técnicas de geoestatística em área sob cultivo de cana-de-açúcar.

Material e métodos

Local de estudo

O experimento foi realizado na Fazenda Capiatã, pertencente a Usina Coruripe, no município de Coruripe em Alagoas (10° 00' 37" S, 36° 17' 60" O, 160 m altitude), em área destinada ao plantio comercial de cana-de-açúcar (Figura 1). A escolha da área experimental deve-se à representatividade de seus sistemas de manejo e das condições edafoclimáticas locais, que refletem o padrão produtivo predominante na região.

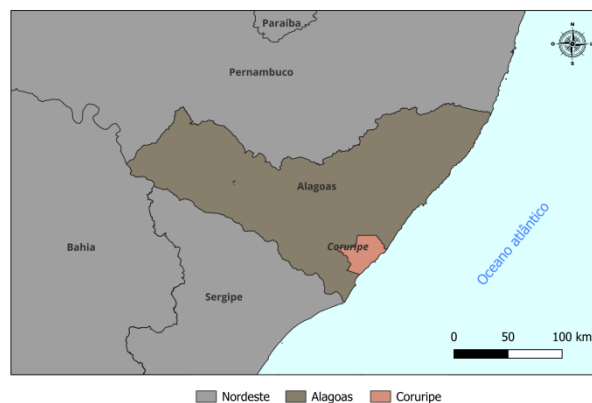


Figura 1. Localização do município de Coruripe em Alagoas.

Características da área

O solo foi classificado como Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico textura média (leve) / argiloso relevo plano (Dos Santos et al. 2018), o material de origem corresponde a sedimentos argilominerais do Grupo Barreiras, formação geológica datada do Terciário, composta por depósitos arenosos e argilosos que condicionam propriedades químicas e físicas típicas desses solos. O clima da região, segundo a classificação de Köppen (1948) é do tipo BSh, característico de ambientes tropicais semiáridos a subúmidos com estação seca bem definida, apresentando verões quentes e maior concentração de chuvas ao longo de poucos meses. Esses fatores edafoclimáticos, em conjunto, influenciam diretamente a produtividade da cana-de-açúcar, a dinâmica dos atributos químicos do solo e as respostas ao manejo agrícola adotado.

Amostragem do solo e análises realizadas

Foi realizada uma amostragem sistemática em malha regular com espaçamento de 50 × 50 m, totalizando 70 pontos distribuídos uniformemente ao longo do talhão. Em cada ponto de amostragem foram coletadas amostras de solo em duas profundidades distintas, 0-20 cm e 20-40 cm, contemplando tanto a camada superficial, mais diretamente influenciada pelo manejo agrícola, quanto a subsuperficial, onde ocorrem processos mais lentos de redistribuição de nutrientes e alterações estruturais. Ao todo, foram obtidas 140 amostras, garantindo representatividade espacial adequada para a aplicação das análises geoestatísticas e permitindo a avaliação

consistente da variabilidade vertical e horizontal dos atributos químicos do solo.

As amostras foram submetidas às seguintes análises químicas: pH em água (pH), cálcio e magnésio (Ca+Mg), potássio (K), acidez potencial (H+Al), soma de bases (SB), troca catiônica (T), saturação por alumínio (m%) e necessidade de calcário (NC). Esses atributos foram selecionados por representarem indicadores essenciais da fertilidade do solo e por influenciarem diretamente a disponibilidade de nutrientes, o equilíbrio químico e o desenvolvimento das plantas.

Estatística descritiva

Os resultados obtidos foram inicialmente submetidos à análise estatística descritiva, seguindo a metodologia proposta por Warrick & Nielsen (1980), a fim de caracterizar o comportamento central e a dispersão dos atributos químicos avaliados. Essa etapa incluiu a determinação de medidas como média, mediana, desvio padrão, variância, valor máximo e valor mínimo, fundamentais para compreender a variabilidade inicial dos dados antes da aplicação dos métodos geoestatísticos.

A verificação da hipótese de normalidade dos dados foi conduzida por meio do teste de Shapiro & Wilk (1965), adotando-se nível de significância de 1% de probabilidade. O teste foi executado utilizando o programa Analyse-it for Microsoft Excel®, que oferece recursos robustos para análise estatística integrada ao ambiente de planilhas, permitindo avaliar se a distribuição dos dados se aproxima ou não da normalidade.

Geoestatística

A análise por meio de técnicas de geoestatística permite avaliar a presença ou ausência de dependência espacial entre os atributos estudados, possibilitando identificar padrões de continuidade ou descontinuidade ao longo da área avaliada. Os semivariogramas foram estimados pela equação 1, proposta por Journel (1989):

$$\gamma^*(h) = \frac{1}{2N(h)_0} \sum_{i=1}^{N(K)} (Z(x_i) - Z(x_i + h))^2 \quad (1)$$

Onde: $\gamma(h)$ é o valor estimado da semivariância dos dados experimentais; $Z(X_i + h)$ e $Z(X_i)$ são os valores observados da variável regionalizada; $N(h)$ representa o número de pares de valores

medidos separados pela distância h ; e X_i e $X_i + h$ referem-se a dois pontos de dados (locais onde a variável Z é medida) que estão a uma distância de defasagem, h , de distância (Landim, 2003).

Conforme Landim (2003) as somas necessárias para calcular $\gamma(h)$ devem incluir um número suficiente de pares para produzir resultados consistentes, sendo adotado um número mínimo de 30 pares por classe de distância (Journel; Huijbregts, 1978). Finalizada a avaliação do semivariograma experimental, foram testados modelos teóricos exponencial, esférico e gaussiano, e estimados os parâmetros C_0 (efeito pepita), $C_0 + C_1$ (soleira) e A (amplitude de dependência espacial) e IDE (índice de dependência espacial). Os modelos teóricos utilizadas foram descritos por Deutsch e Journel (1998) e apresentados a seguir:

Modelo Esférico:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]; 0 < h < a; \gamma(h) = C_0 + C_1; h < a \quad (2)$$

Modelo Exponencial:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e \left(-3 \frac{h}{a} \right) \right]; a < h < d \quad (3)$$

Modelo Gaussiano:

$$\gamma(h) = C_0 + C_1 \left[1 - e \left(-3 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right) \right]; h < 0 \quad (4)$$

Onde: C_0 é o efeito pepita; $C = C_0 + C_1$ é o limiar; A é o alcance; e h denota a distância entre pontos.

Após a validação e o ajuste dos modelos teóricos de semivariograma para cada atributo químico, procedeu-se à etapa de interpolação espacial utilizando o método de krigagem ordinária, técnica amplamente empregada por sua capacidade de fornecer estimativas não tendenciosas e de minimizar a variância de predição. A krigagem foi aplicada com base nos parâmetros obtidos dos semivariogramas validados, garantindo que a estrutura espacial identificada fosse devidamente incorporada ao processo de interpolação. Os mapas temáticos gerados foram confeccionados no software Surfer for Windows, versão 13.0 (Golden Software, 2010), o qual permite visualização detalhada da distribuição espacial dos atributos do solo, auxiliando na interpretação dos resultados e na identificação de zonas de manejo diferenciado dentro da área de estudo.

Resultados e discussão

A estatística descritiva dos atributos químicos do solo nas profundidades avaliadas pode ser observada na Tabela 1. Nota-se pouca variação nos valores de pH em ambas as profundidades, acompanhada de baixo desvio-padrão, o que indica elevada uniformidade nos níveis de acidez ao longo do perfil analisado. Excetuando-se a saturação por alumínio (m%), que apresentou incremento em subsuperfície, os demais atributos químicos demonstraram redução entre 0-20 cm e 20-40 cm, comportamento comumente associado às características naturais dos Argissolos, nos quais a lixiviação de bases e a

menor acumulação de matéria orgânica em profundidade tendem a reduzir a fertilidade. Comportamento semelhante foi descrito por Gomes et al. (2021), ao estudarem a variabilidade espacial de atributos químicos, verificando diminuição de determinados nutrientes e indicadores químicos à medida que a profundidade aumentava. No mais, os valores observados apresentam distribuição estatisticamente uniforme, evidenciada pela proximidade entre média e mediana, sugerindo ausência de valores extremos expressivos e indicando homogeneidade nos dados avaliados antes da aplicação dos métodos geoestatísticos.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos do solo para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm.

Atributos	Profundidade (cm)	Nº	Unidade	Média	Mediana	DP	Var.	Máx	Min
pH	0-20	72 (0)	Ad	5,3	5,3	0,41	0,17	6,30	4,00
	20-40	70 (2)	Ad	5,3	5,3	0,38	0,14	6,70	4,40
Ca+Mg	0-20	72 (0)	mmolc dm ⁻³	26,6	23,5	11,39	129,80	60,00	11,00
	20-40	72 (0)	mmolc dm ⁻³	22,3	21,0	5,64	31,80	35,00	11,00
K	0-20	72 (0)	mmolc dm ⁻³	0,92	0,80	0,43	0,19	2,30	0,30
	20-40	72 (0)	mmolc dm ⁻³	0,72	0,60	0,43	0,19	2,30	0,30
H+Al	0-20	72 (0)	mmolc dm ⁻³	32,39	32,00	3,02	9,14	39,00	25,00
	20-40	72 (0)	mmolc dm ⁻³	31,65	30,00	3,92	15,38	45,00	24,00
SB	0-20	72 (0)	mmolc dm ⁻³	28,24	25,50	12,00	144,06	66,90	12,00
	20-40	72 (0)	mmolc dm ⁻³	24,02	22,45	9,07	82,28	47,90	9,70
T	0-20	72 (0)	mmolc dm ⁻³	63,40	63,50	12,39	153,57	95,80	39,10
	20-40	72 (0)	mmolc dm ⁻³	58,48	54,65	15,32	234,65	109,60	32,20
m	0-20	72 (0)	%	10,54	8,50	8,77	76,87	42,00	1,00
	20-40	72 (0)	%	12,22	9,50	9,94	98,82	45,00	1,00
NC	0-20	72 (0)	t ha ⁻¹	11,10	10,32	6,66	44,38	30,12	0,00
	20-40	72 (0)	t ha ⁻¹	9,96	9,54	4,62	21,38	21,81	0,00

Em que: Nº - Número de dados da amostra; DP - desvio padrão; Var - variância; Máx - valor máximo; Min - valor mínimo.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas referentes aos atributos químicos do solo nas duas profundidades avaliadas. Observa-se que o modelo exponencial foi o que melhor se ajustou aos dados na maior parte dos atributos, indicando que a estrutura de continuidade espacial ocorre de forma gradual, sem ruptura brusca na transição entre distâncias amostrais.

Os resultados revelam ainda elevados níveis de dependência espacial, sugerindo que os

atributos avaliados apresentam forte organização estrutural no solo, característica frequentemente associada a fatores pedogenéticos e ao manejo agrícola adotado. Comportamento semelhante foi relatado por Lemos Filho et al. (2017), ao analisarem a variabilidade espacial de atributos do solo, nos quais o modelo exponencial se destacou como o mais confiável para representar a estrutura espacial dos dados.

Tabela 2. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas relacionados aos atributos químicos do solo, nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm.

Atributos	Profundidade (cm)	Modelos	C	C0	Alcance	C/C0+C	IDE (%)
pH	0-20	Exponencial	0,139	0,020	108,60	0,872	87
	20-40	Exponencial	0,098	0,009	99,00	0,916	91
Ca+Mg	0-20	Exponencial	113,400	9,200	93,60	0,925	92

K	20-40	Esférico	31,590	0,820	73,20	0,975	97
	0-20	Esférico	0,183	0,000	83,60	0,998	99
H+Al	20-40	Exponencial	0,175	0,011	90,90	0,941	94
	0-20	Exponencial	8,516	0,940	88,80	0,901	90
SB	20-40	Exponencial	14,220	1,620	98,10	0,898	89
	0-20	Exponencial	178,100	96,000	2432,70	0,650	64
T	20-40	Esférico	78,940	0,100	59,70	0,999	99
	0-20	Gaussiano	141,900	6,900	81,23	0,954	95
m	20-40	Exponencial	216,800	12,500	101,40	0,945	94
	0-20	Exponencial	70,780	7,800	60,30	0,901	90
NC	20-40	Esférico	95,900	0,100	59,70	0,999	99
	0-20	Esférico	43,710	0,100	67,20	0,998	99
	20-40	Esférico	21,160	0,230	59,70	0,989	98

Em estudo conduzido com variabilidade de atributos químicos na cultura da soja, Dalchiavon et al. (2017) também verificaram predominância de dependência espacial entre os atributos avaliados, corroborando os resultados observados neste estudo. Entretanto, diferentemente do presente trabalho, esses autores constataram que o modelo gaussiano apresentou melhor desempenho de ajuste em sua área experimental, evidenciando que a escolha do modelo teórico pode variar conforme as condições edafoclimáticas, o tipo de solo, o manejo empregado e a escala de amostragem utilizada.

A Figura 2 apresenta a frequência de distribuição dos dados para os atributos químicos analisados nas duas profundidades avaliadas. Observou-se que o pH apresenta comportamento moderadamente mais ácido na camada superficial, com valores concentrados entre 5,03 e 5,67, característica comum em áreas cultivadas com cana-de-açúcar devido ao manejo intensivo e à maior oxidação da matéria orgânica na superfície. Para Ca+Mg, registrou-se maior frequência em torno de 27,33 mmolc dm⁻³ na profundidade de 0-20 cm, indicando boa disponibilidade destes cátions trocáveis na camada superficial, possivelmente associada à maior contribuição de resíduos culturais e maior atividade biogeoquímica. Em contrapartida, observou-se menor disponibilidade em profundidade, refletindo a dinâmica natural de lixiviação e o gradiente textural típico de Argissolos.

Os valores de K foram baixos em ambas as profundidades, sugerindo possível deficiência ou alta mobilidade deste nutriente no perfil, o que pode requerer ajustes no manejo da adubação potássica. A acidez potencial (H+Al), por sua vez, apresentou valores relativamente mais elevados na camada de 20-40 cm, condição que tende a restringir o desenvolvimento radicular e pode induzir a reduções de produtividade na cultura da cana-de-açúcar. Resultados semelhantes foram descritos por Artur et al. (2014), que também observaram

maiores níveis de acidez potencial nas camadas subsuperficiais, corroborando os achados do presente estudo. Em pesquisas sobre a variabilidade espacial de atributos químicos, Aquino et al. (2014) verificaram comportamento próximo ao observado aqui, reforçando que esses atributos apresentam variabilidade estruturada e são fortemente influenciados pelas características intrínsecas do solo e pelas práticas de manejo adotadas.

Observa-se uma diminuição da soma de bases (SB) em profundidades maiores, refletindo a menor disponibilidade de cátions trocáveis em subsuperfície e indicando a necessidade de correção química nessa camada, sobretudo para garantir melhor desenvolvimento radicular e maior eficiência na absorção de nutrientes pela cultura. Na camada de 0-20 cm, verifica-se maior frequência de valores de capacidade de troca catiônica (T) entre 58 e 76,9 mmolc dm⁻³, sugerindo boa retenção de nutrientes e maior atividade coloidal na zona superficial do solo, condição que favorece a manutenção da fertilidade. A saturação por alumínio (m%) apresentou baixos valores na camada superficial, com frequências concentradas entre 1,0 e 14,67%, indicando ambiente pouco restritivo ao crescimento das plantas. Entretanto, na profundidade de 20-40 cm observa-se tendência de aumento dos valores de m%, o que pode comprometer o desenvolvimento radicular e impactar negativamente a produtividade da cana-de-açúcar caso não haja manejo corretivo adequado.

A necessidade de calcário (NC) mostrou-se maior na camada superficial em comparação à subsuperficial, comportamento esperado devido à maior intensidade de processos de acidificação nessa zona do solo, intensificados pelo manejo agrícola e pela decomposição da matéria orgânica. Barros et al. (2022) destacam que o conhecimento da distribuição espacial de atributos químicos é fundamental para identificar áreas com maior ou menor disponibilidade de nutrientes, subsidiando práticas de manejo localizado. Valores elevados de

troca catiônica na camada superficial também foram relatados por Oliveira et al. (2024) em estudos sobre variabilidade espacial de atributos químicos, comportamento que se assemelha aos resultados

obtidos nesta pesquisa e reforça a importância de avaliar separadamente cada profundidade para melhor compreensão da dinâmica de fertilidade no perfil do solo.

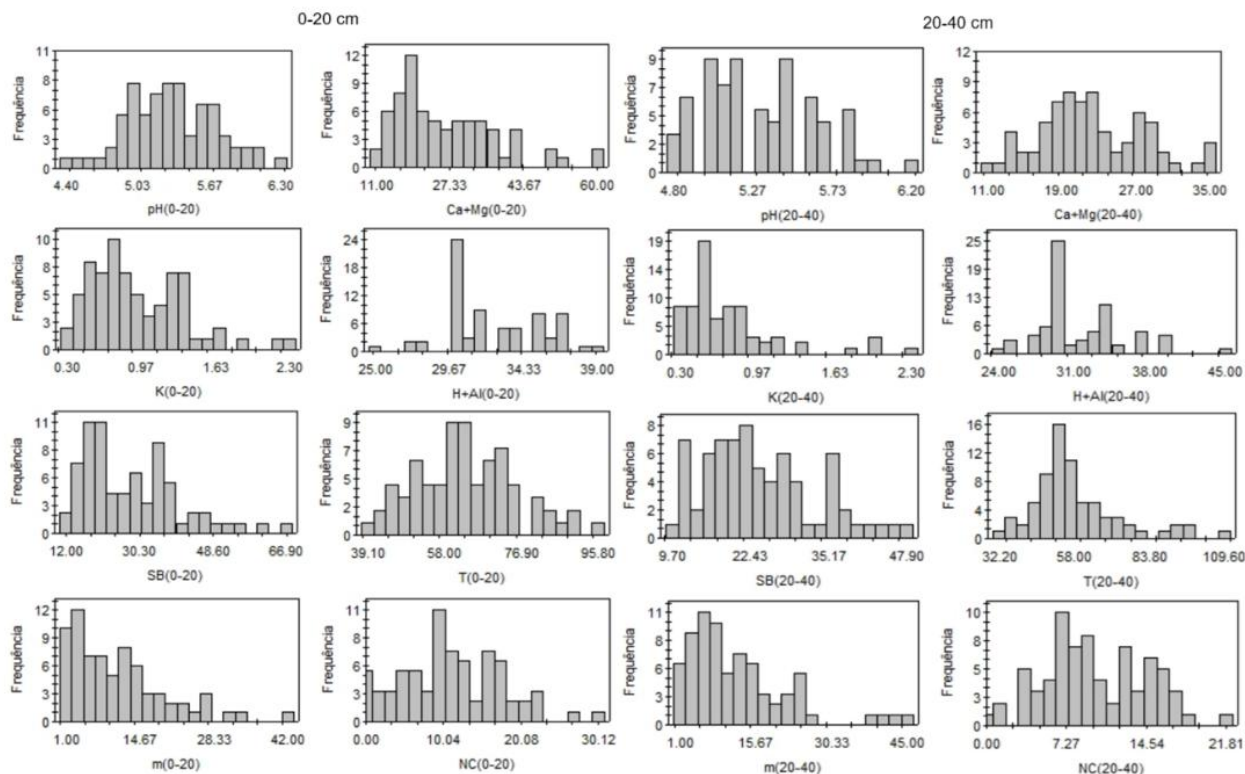


Figura 2. Frequência de distribuição dos atributos químicos nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm.

Outro parâmetro fundamental no estudo dos atributos do solo por meio de semivariogramas é o alcance da dependência espacial, o qual representa a distância máxima até a qual uma variável mantém relação espacial com outra, indicando o limite em que as observações deixam de apresentar dependência e passam a comportar-se de forma aleatória (Lima et al., 2015). Valores de alcance maiores sugerem maior continuidade espacial dos atributos, enquanto valores menores indicam maior heterogeneidade em pequenas distâncias.

No presente estudo, os alcances variaram significativamente entre os atributos e entre as profundidades analisadas, oscilando de 59,70 m – observados para NC, SB e m% na camada de 20-40 cm – até 2432,70 m para SB na camada superficial de 0–20 cm (Figura 3 e Tabela 2). Essa grande amplitude demonstra que alguns atributos apresentam forte estrutura espacial e continuidade ao longo do talhão, enquanto outros exibem maior variabilidade localizada. Além disso, maiores alcances na camada superficial sugerem que processos de manejo agrícola e deposição de resíduos culturais podem estar contribuindo para

maior uniformidade espacial nessa profundidade, ao passo que a camada subsuperficial apresenta condições mais heterogêneas e influenciadas por fatores intrínsecos do solo.

A variabilidade espacial dos atributos químicos do solo evidenciou que a maioria dos atributos apresentou dependência espacial bem definida, indicando que sua distribuição ao longo da área não ocorre de forma aleatória, mas segue um padrão estruturado influenciado por fatores pedogenéticos, manejo agrícola e características intrínsecas do solo.

Resultados semelhantes foram reportados por Zanão Júnior et al. (2010), que, ao utilizarem semivariogramas para a análise geoestatística de atributos químicos, também verificaram a existência de dependência espacial para grande parte das variáveis avaliadas. No entanto, esses autores observaram ausência de dependência espacial para pH em água, B, Zn e Fe na profundidade de 0-10 cm, bem como para pH em água e SB na profundidade de 10-20 cm, comportamento que difere dos resultados obtidos no presente estudo. Essa divergência reforça que a

estrutura espacial dos atributos do solo pode variar de acordo com o tipo de solo, a escala de amostragem, as condições ambientais e o sistema de manejo adotado, ressaltando a importância de análises regionais para compreensão da variabilidade espacial em diferentes contextos agrícolas.

Os valores de alcance constituem medidas fundamentais no planejamento e na avaliação experimental, pois permitem definir o espaçamento ideal entre pontos de amostragem e, consequentemente, otimizar o uso de recursos em levantamentos de solo (Oliveira et al., 2024). Esses autores destacam que o alcance representa a distância máxima na qual os pontos amostrais permanecem correlacionados entre si, configurando-se como um indicador direto da continuidade espacial dos atributos avaliados.

Assim, conhecer o alcance contribui não apenas para aprimorar estratégias de amostragem, mas também para interpretar a escala dos processos que controlam a variabilidade do solo, possibilitando delinear zonas de manejo mais precisas e melhorar a eficiência de intervenções agrônômicas.

Além disso, alcances maiores indicam maior homogeneidade e extensão dos padrões espaciais, enquanto alcances menores revelam elevada heterogeneidade local, reforçando a importância de avaliações detalhadas em estudos de fertilidade e variabilidade espacial.

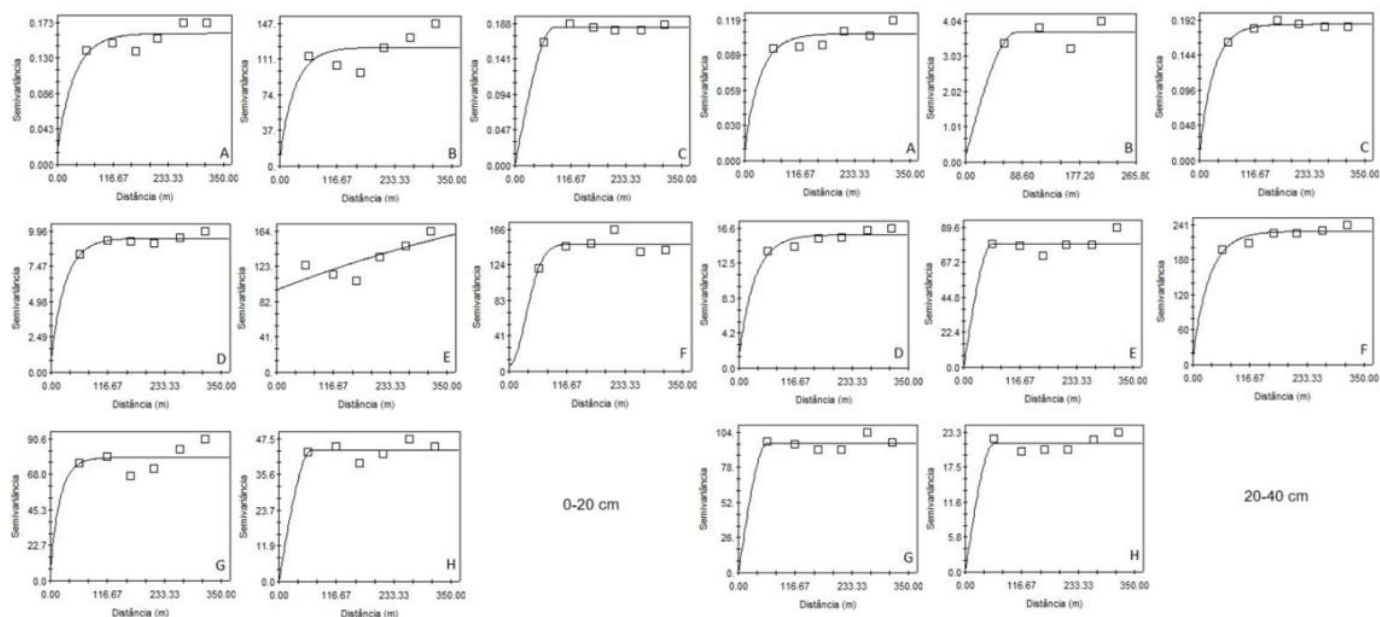


Figura 3. Semivariogramas ajustados para pH (A), Ca+Mg (B), K (C), H+Al (D), SB (E), T (F), m% (G) e NC (H) nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm.

Nas Figuras 4 e 5 são apresentados os mapas da variabilidade espacial dos atributos químicos do solo nas duas profundidades avaliadas. Para o pH, observa-se predominância de valores mais ácidos em ambas as camadas, com maior intensidade na profundidade de 20-40 cm, onde os teores tendem a ser ainda mais baixos. Esse comportamento é típico de solos fortemente intemperizados e com maior mobilidade de bases em subsuperfície, indicando a necessidade de práticas de manejo que busquem reduzir a acidez e

melhorar as condições químicas para o desenvolvimento radicular da cana-de-açúcar.

O pH mais ácido em profundidade pode limitar a absorção de nutrientes essenciais, comprometer a disponibilidade de cálcio e magnésio e aumentar a solubilidade do alumínio, afetando diretamente o crescimento das plantas. Maiores ocorrências de pH ácido na camada superficial (0-20 cm) também foram relatadas por Matias et al. (2019) em estudos de variabilidade espacial de atributos químicos, resultado que se assemelha ao encontrado neste trabalho e reforça

que a acidez é um fator recorrente em áreas cultivadas com cana-de-açúcar, especialmente em sistemas intensificados. Assim, a espacialização do pH permite identificar regiões mais críticas do talhão, orientando intervenções específicas, como correção localizada com calcário e ajustes no manejo de fertilidade.

Para Ca+Mg, observa-se a ocorrência de pontos específicos de maior incidência na camada superficial (0-20 cm), o que está de acordo com a maior frequência desse atributo apresentada nos histogramas (Figura 2). Essa distribuição sugere maior disponibilidade de bases trocáveis na

superfície, possivelmente associada ao aporte de matéria orgânica, ao manejo de resíduos culturais e à aplicação superficial de corretivos e fertilizantes ao longo dos ciclos produtivos. Os teores de K apresentaram-se baixos em ambas as profundidades, reforçando a elevada mobilidade desse nutriente no perfil do solo e indicando a necessidade de atenção especial ao manejo potássico, sobretudo em sistemas de produção de cana-de-açúcar que apresentam alta demanda nutricional.

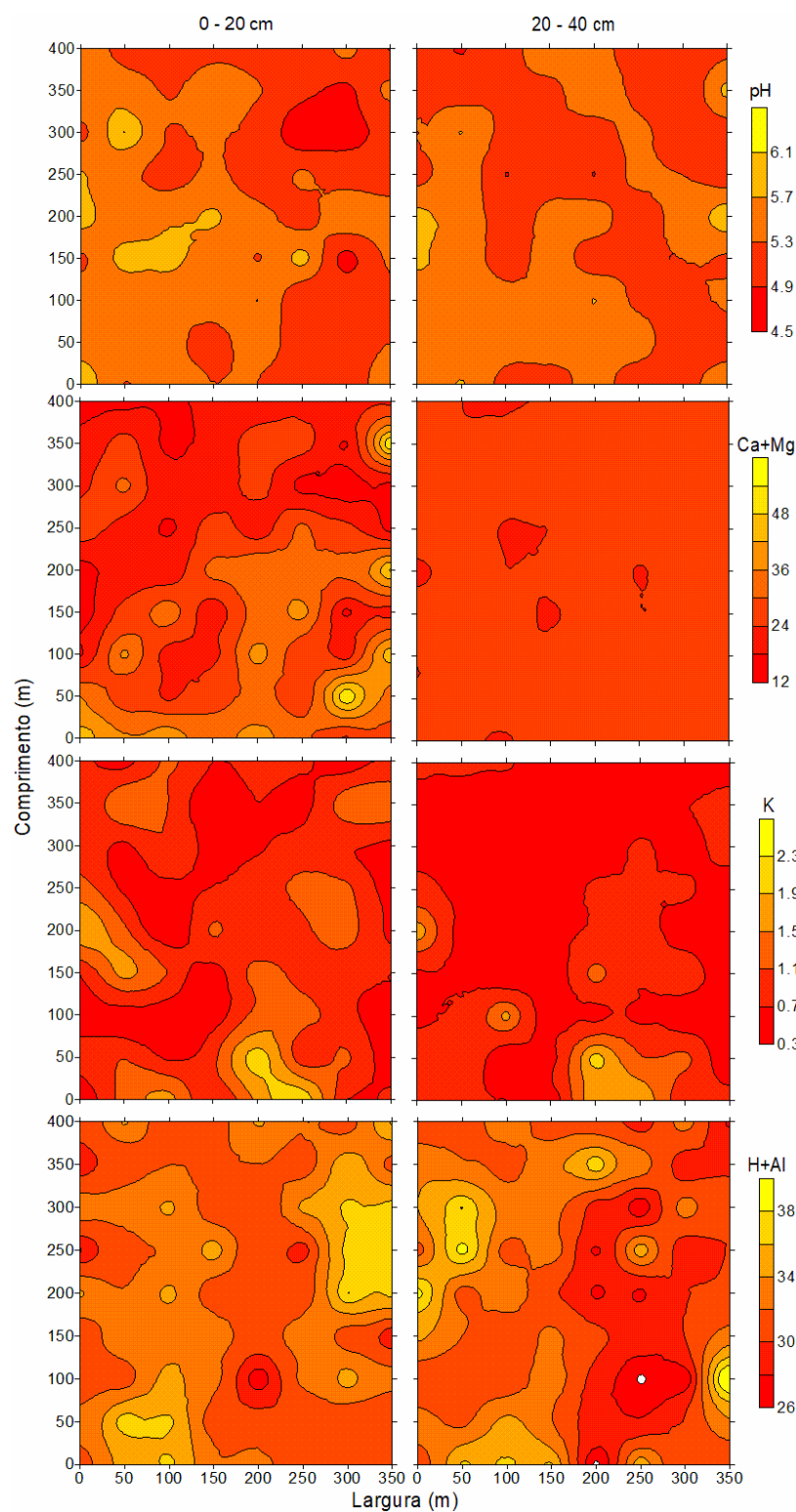


Figura 4. Mapa da variabilidade espacial dos atributos pH, Ca+Mg, K e H+Al nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm.

Em contraste, o atributo H+Al exibiu maior concentração na camada de 20-40 cm, revelando condições mais ácidas em subsuperfície. Essa elevação da acidez potencial pode afetar diretamente a absorção de K e outros nutrientes essenciais, além de favorecer a solubilização do

alumínio, o que pode comprometer o desenvolvimento radicular e impactar negativamente o crescimento da cultura.

Em estudo sobre a variabilidade espacial de atributos químicos, Morato et al. (2021) observaram resultados distintos aos desta

pesquisa, relatando concentrações medianas de acidez potencial (H+Al), o que evidencia que a distribuição espacial desses atributos pode variar amplamente entre diferentes ambientes, tipos de solo e sistemas de manejo. Tais comparações

reforçam a importância de análises regionais para compreender as particularidades químicas de cada área agrícola e subsidiar práticas de manejo mais precisas.

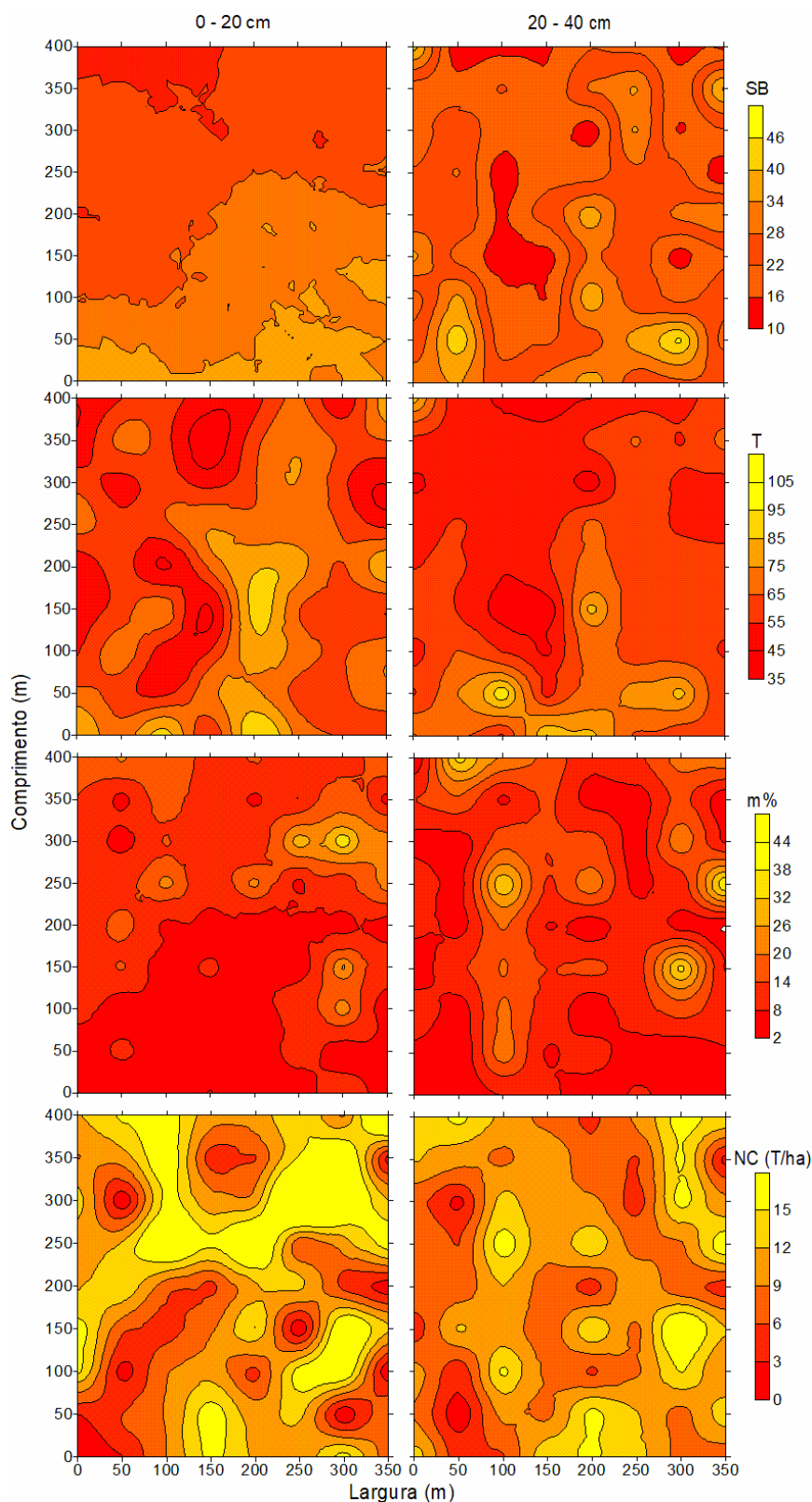


Figura 5. Mapa da variabilidade espacial dos atributos SB, T, m(%) e NC nas profundidades de 0-20 e 20-40 cm.

A SB apresentou melhor distribuição na camada superficial, indicando maior fertilidade nessa região do solo e reforçando a predominância de cátions básicos na zona mais influenciada pelo manejo agrícola, pela ciclagem de nutrientes e pela deposição de resíduos culturais. Essa maior uniformidade na superfície sugere condições químicas mais favoráveis ao desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar, especialmente por favorecer o estabelecimento radicular e a absorção de nutrientes essenciais nos estágios iniciais da cultura. Além disso, a maior disponibilidade e regularidade espacial da soma de bases em superfície pode estar associada ao efeito residual de adubações anteriores, à maior atividade biológica e ao maior teor relativo de matéria orgânica nesse horizonte, características que contribuem para aumentar a capacidade de troca e a estabilidade dos agregados.

Tais resultados diferem dos observados por Gelain et al. (2021), que não identificaram dependência espacial para esse atributo, evidenciando que a expressão espacial da soma de bases pode variar amplamente conforme o tipo de solo, o clima, o sistema de cultivo, a intensidade das operações agrícolas e o histórico de adubação e calagem das áreas estudadas. Essa divergência ressalta a importância de avaliações regionais e específicas, pois atributos como SB respondem de forma diferenciada às características intrínsecas de cada ambiente, tornando essencial a espacialização para o planejamento de práticas de manejo mais eficientes e direcionadas.

A capacidade de troca catiônica (T) também apresentou melhor distribuição nos primeiros 20 cm do solo, alcançando valores mais elevados nessa camada. Esse comportamento indica maior presença de colóides ativos – principalmente argilas e matéria orgânica – e maior capacidade de retenção de nutrientes, o que favorece a disponibilidade de íons essenciais para o crescimento e desenvolvimento da cana-de-açúcar. A predominância de altos valores de T na camada superficial é comum em ambientes agrícolas intensificados, especialmente onde há maior acúmulo de matéria orgânica, maior aporte de resíduos culturais e maior atividade microbiana, fatores que contribuem diretamente para aumentar a densidade de cargas negativas e, consequentemente, a capacidade de adsorção de nutrientes.

Além disso, a ação contínua das práticas de manejo, como preparo superficial, adubação e incorporação de corretivos, tende a promover maior agregação e renovação da matéria orgânica no horizonte mais raso, reforçando essa maior eficiência química na superfície. Esse padrão espacial é relevante do ponto de vista agrônomo, pois solos com maior T apresentam maior resiliência frente às perdas de nutrientes por lixiviação e maior eficiência no uso de fertilizantes aplicados ao sistema produtivo. Portanto, compreender a distribuição espacial da capacidade de troca catiônica permite ajustar estratégias de calagem e adubação, promovendo o manejo localizado e otimizando o uso de insumos. Esses resultados reforçam que a camada superficial desempenha papel fundamental na sustentação da fertilidade e na resposta da cultura, especialmente em solos Argissolos, onde o gradiente textural e químico entre horizontes é marcante.

Resultados semelhantes foram relatados por Oliveira et al. (2021) ao estudarem a espacialidade de atributos químicos do solo, nos quais também observaram valores mais expressivos de troca catiônica na superfície, corroborando os achados do presente estudo e reforçando a relevância dessa camada para o entendimento da dinâmica nutricional da cana-de-açúcar. Esses padrões ressaltam a importância de considerar o perfil do solo de forma estratificada na formulação de práticas de manejo e adubação, permitindo ajustes mais precisos de calagem, recomendação de fertilizantes e adoção de estratégias de manejo localizado, contribuindo assim para maior eficiência produtiva e sustentabilidade do sistema agrícola.

Há uma baixa concentração de saturação por alumínio (m%) na camada superficial, o que representa um indicador favorável ao cultivo da cana-de-açúcar, uma vez que menores teores de Al^{3+} reduzem o risco de toxicidade radicular e favorecem a absorção de nutrientes essenciais. Essa condição contribui para um ambiente químico mais adequado ao desenvolvimento inicial das plantas e reforça a importância da manutenção da fertilidade na camada superficial. Em contrapartida, a necessidade de calcário (NC) apresenta maiores valores nessa mesma profundidade, indicando que, apesar da baixa saturação por alumínio, ainda há demanda por

correção da acidez para melhorar o equilíbrio químico do solo. A identificação dessa discrepância entre m% e NC ilustra a importância de uma análise espacial detalhada, já que diferentes atributos podem demandar intervenções específicas em pontos distintos do talhão.

A utilização de mapas de variabilidade espacial possibilita que a aplicação de corretivos seja realizada de forma localizada e precisa, reduzindo custos operacionais, evitando desperdícios e aumentando a eficiência da calagem. Essa abordagem permite direcionar insumos apenas às áreas que realmente necessitam, promovendo um manejo mais sustentável e economicamente vantajoso. Resultados semelhantes foram relatados por Barros et al. (2022) e Santos Júnior (2021), que destacaram que a espacialização dos atributos químicos é uma ferramenta estratégica para orientar o manejo localizado e identificar zonas críticas ou de maior potencial produtivo dentro dos sistemas agrícolas. Isso reforça a relevância da geoestatística como auxílio na tomada de decisão e na melhoria da eficiência produtiva da cana-de-açúcar.

Conclusões

O estudo permitiu caracterizar de forma detalhada a variabilidade espacial dos principais atributos químicos do solo em área comercial de cultivo de cana-de-açúcar no município de Coruripe-AL, demonstrando que a geoestatística é uma ferramenta essencial para interpretação e manejo de ambientes agrícolas.

A análise descritiva mostrou que a maioria dos atributos apresentou distribuição uniforme, com baixa discrepância entre média e mediana, reforçando a consistência dos dados. Observou-se pouca variação do pH, porém com acidez evidente em ambas as profundidades, situação que indica a necessidade de intervenções corretivas pontuais.

Os atributos Ca+Mg e SB apresentaram maiores valores e melhor distribuição na camada superficial, refletindo melhores condições de

fertilidade nessa profundidade, enquanto K apresentou baixos teores em todo o perfil, sugerindo atenção ao manejo potássico. Em contrapartida, H+Al foi mais elevado na camada de 20-40 cm, evidenciando maior acidez em subsuperfície e possível restrição ao desenvolvimento radicular.

A análise geoestatística indicou que a maioria dos atributos apresentou dependência espacial estruturada, com predominância do modelo exponencial para ajuste dos semivariogramas. Os alcances variaram amplamente entre os atributos e profundidades, demonstrando que diferentes propriedades do solo respondem de forma distinta aos fatores de manejo e às características intrínsecas do Argissolo Amarelo Distrófico fragipânico. A identificação de dependência espacial permite aprimorar estratégias de amostragem e reduzir custos operacionais em futuras avaliações.

Os mapas gerados por krigagem revelaram zonas específicas de maior acidez, maior necessidade de calcário, variabilidade da soma de bases e diferenças expressivas na disponibilidade de Ca+Mg e K entre as camadas. A espacialização desses atributos possibilita identificar alterações químicas ao longo do talhão, subsidiando práticas de correção e fertilização localizadas e mais eficientes. A maior NC e a baixa saturação por alumínio na superfície reforçam que intervenções químicas devem se concentrar prioritariamente nesta camada, garantindo melhores condições para o desenvolvimento inicial da cana-de-açúcar.

Dessa forma, o uso integrado de análises estatísticas e geoestatísticas permitiu compreender a dinâmica dos atributos químicos, evidenciando que o manejo agrícola, aliado às características naturais do solo, influencia diretamente o comportamento espacial dos nutrientes e da acidez. Esse diagnóstico espacial fortalece a adoção de estratégias de manejo sustentável, mitigando desperdícios, otimizando insumos e promovendo maior eficiência no sistema produtivo da cana-de-açúcar.

Agradecimentos

À Usina Coruripe Açúcar e Álcool S/A pelo apoio logístico.

Referências

Aquino, R. E. D., Marques Júnior, J., Campos, M. C. C., Oliveira, I. A. D., & Siqueira, D. S. (2014). Distribuição espacial de atributos

- químicos do solo em área de pastagem e floresta. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 44, 32-41. <https://doi.org/10.1590/S1983-40632014000100001>
- Arcoverde, S. N. S., de Souza, C. M. A., de Jesus Nagahama, H., Cortez, J. W., & Nascimento, J. M. (2023). Spatial variability of soil physical attributes under conservation management systems for sugarcane cultivation. *Revista Engenharia na Agricultura-REVENG*, 31(Continua), 127-139. <https://doi.org/10.13083/reveng.v30i1.15695>
- Artur, A. G., Oliveira, D. P., Costa, M. C., Romero, R. E., Silva, M. V., & Ferreira, T. O. (2014). Variabilidade espacial dos atributos químicos do solo, associada ao microrrelevo. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18, 141-149. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000200003>
- Bach, E. M., Ramirez, K. S., Fraser, T. D., & Wall, D. H. (2020). Soil biodiversity integrates solutions for a sustainable future. *Sustainability*, 12(7), 2662. <https://doi.org/10.3390/su12072662>
- Barros, L. S., Silva, E. R. R., Maciel, M. D. N. M., de Melo, V. S., Cicerelli, R. E., & de Almeida, T. (2022). Dispersão espacial de atributos químicos do solo de um açaizeiro na região amazônica. *Anuário do Instituto de Geociências*, 45, 1-10.
- Batista, P. H. D., de Assunção Montenegro, A. A., de Almeida, G. L. P., Tavares, U. E., & Rodrigues, R. A. S. (2019). Variabilidade espacial da resistência à penetração e teor de água em Neossolo cultivado com banana no agreste pernambucano. *Revista Engenharia na Agricultura-REVENG*, 27(1), 54-60. <https://doi.org/10.13083/reveng.v27i1.881>
- Borelli, J. H., Monteiro, C. R. I., da Silva Campos, T., dos Santos Guedes, P. O. A., & Caneppele, C. (2023). COMPARAÇÃO ENTRE AS FARINHAS BRASILEIRAS E ARGENTINAS: ANÁLISE DE UMIDADE, QUEDA E ALVEOGRAFIA. *agrOCiências*, 6.
- Budeguer, F., Enrique, R., Perera, M. F., Racedo, J., Castagnaro, A. P., Noguera, A. S., & Welin, B. (2021). Genetic transformation of sugarcane, current status and future prospects. *Frontiers in Plant Science*, 12, 768609. <https://doi.org/10.3389/fpls.2021.768609>
- Cardoso, L. A. S., Silva Farias, P. R., Soares, J. A. C., & de Oliveira, F. J. (2023). Use of Geostatistics in the sugarcane context in Brazil: a review. *Environment, Development and Sustainability*, 1-34. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03927-1>
- Cherubin, M. R., Franco, A. L. C., Cerri, C. E. P., da Silva Oliveira, D. M., Davies, C. A., & Cerri, C. C. (2015). Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils—Effects of land use change on soil chemical attributes. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 211, 173-184. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2015.06.006>
- CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento). *Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar* – v.12, n.3 – Brasília: Conab, 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 11 jan. 2025.
- Dalchiavon, F. C., Rodrigues, A. R., De Lima, E. S., Lovera, L. H., & Montanari, R. (2017). Variabilidade espacial de atributos químicos do solo cultivado com soja sob plantio direto. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, 16(2), 144-154. <https://doi.org/10.5965/223811711622017144>
- Delarmelina, W. M., Caldeira, M. V. W., Gomes, D., Godinho, T. D. O., Caliman, J. P., Gonçalves, E. D. O., ... & Silva, C. S. D. (2022). Soil attributes and spatial variability of soil organic carbon stock under the Atlantic Forest, Brazil. *Ciência Florestal*, 32(3), 1528-1551. <https://doi.org/10.5902/1980509867028>
- Deutsch, C.V.; Journel, A.G. (1998). *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*, 2nd ed.; Oxford University Press: New York, NY, USA, ISBN 0195073924.
- Gelain, E., Bottega, E. L., de Araujo Motomiya, A. V., & de OLIVEIRA, Z. B. (2021). Variabilidade espacial e correlação dos atributos do solo com produtividade do milho e da soja. *Nativa*, 9(5), 536-543. <https://doi.org/10.31413/nativa.v9i5.11717>
- Golden Software. (2010). Surfer for Windows Version 9.0; Golden Software: Golden, CO, USA, 66p.
- Gomes, A. D., dos Santos, P. H. L., do Nascimento, J. M., Arcoverde, S. N. S., Secretti, M. L., & da Costa, E. G. (2021). Variabilidade espacial de atributos químicos do solo e produtividade da soja. *Anais da*

Academia Pernambucana de Ciência Agrônômica, 18(2).

- Guerra, C. A., Heintz-Buschart, A., Sikorski, J., Chatzinotas, A., Guerrero-Ramírez, N., Cesarz, S., ... & Eisenhauer, N. (2020). Blind spots in global soil biodiversity and ecosystem function research. *Nature communications*, 11(1), 3870. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17688-2>
- Huang, Q., Wen, T., Fang, T., Lao, H., Zhou, X., Wei, T., ... & Li, K. (2025). A comparative evaluation of the composition and antioxidant activity of free and bound polyphenols in sugarcane tips. *Food Chemistry*, 463, 141510. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2024.141510>
- Journel, A.G. (1989). *Fundamentals of Geostatistics in Five Lessons*; American Geophysical Union: Washington, DC, USA, ISBN 0-87590-708-3.
- Journel, A.G.; Huijbregts, C.J. (1978). *Mining Geostatistics*; Oxford University Press: London, UK, ISBN 0123910501.
- Koppen, W. (1948). *Climatología con un estudio de los climas de la tierra*. México Fondo de Cultura Económica.
- Kumar, A., Kumar, V., & Singh, B. (2021). Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. *International Journal of Biological Macromolecules*, 169, 564-582. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.175>
- Landim, P.M.B. (2003). *Análise Estatística de Dados Geológicos*, 2nd ed.; Edunesp: Rio Claro, Brazil, ISBN 9788571395046.
- Lemos Filho, L. C. A., Ferreira, L. L. N., & de Lyra, D. L. (2017). Variabilidade espacial de atributos do solo indicadores de degradação ambiental em microbacia hidrográfica. *Revista Agro@mbiente On-line*, 11(1), 11-20. <https://doi.org/10.18227/1982-8470ragro.v11i1.3413>
- Lima, F. V. D., Silvino, G. D. S., Melo, R. S. D. S., Lira, E. C., & Ribeiro, T. D. S. (2015). Spatial variability of soil physical properties in the hilly area of degradation process. *Revista Caatinga*, 28, 53-63. <https://doi.org/10.1590/1983-21252015v28n406rc>
- Lu, G., Liu, P., Wu, Q., Zhang, S., Zhao, P., Zhang, Y., & Que, Y. (2024). Sugarcane breeding: a fantastic past and promising future driven by technology and methods. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1375934. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1375934>
- Matias, S. S. R., Matos, A., Landim, J., Feitosa, S., Alves, M. A., & Silva, R. (2019). Recomendação de calagem com base na variabilidade espacial de atributos químicos do solo no Cerrado brasileiro. *Revista de Ciências Agrárias*, 42(4), 896-907. <https://doi.org/10.19084/rca.17735>
- Oliveira, B. D. A., Campos, L. P., Matias, S. S. R., da Silva, T. S., & Gualberto, A. V. S. (2021). ESPACIALIDADE DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO EM ÁREA DE CULTIVO DE BANANEIRA NO OESTE DA BAHIA. *Revista Caatinga*, 34(1), 177-188. <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n118rc>
- Oliveira, I. A., dos Santos, R. V., da Silva, D. M. P., de Almeida, R. G., de Freitas, L., da Cunha, J. M., ... & Campos, M. C. C. (2024). Geoestatística Aplicada a Atributos Físicos e Químicos em Área com Mandioca na Região de Humaitá, Amazonas. *Fronteira: Journal of Social, Technological and Environmental Science*, 13(2), 35-49. <https://doi.org/10.21664/2238-8869.2024v13i2.p35-49>
- Rocha, G. C. D., & Sparovek, G. (2021). Scientific and technical knowledge of sugarcane cover-management USLE/RUSLE factor. *Scientia Agricola*, 78(suppl 1), e20200234. <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2020-0234>
- Santos Júnior, A. B. dos, Silveira Júnior, O., Lima, Ítalo C. S., Nunes, M. E., Santos, A. C. dos, & Faria, A. F. G. de. (2021). VARIABILIDADE ESPACIAL DOS ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO SOB DIFERENTES USOS AGRÍCOLAS NO ECÓTONO CERRADO-AMAZÔNIA. *AGRI-ENVIRONMENTAL SCIENCES*, 7(1), 16. <https://doi.org/10.36725/agries.v7i1.5224>
- Santos, H.G.; Jacomine, P.K.T.; Dos Anjos, L.H.C.; De Oliveira, V.A.; Lumbrreras, J.F.; Coelho, M.R.; Almeida, J.A. de; Arruda Filho, J.C. de; Oliveira, J.B. de & Cunha, T.J.F. (2018) – *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 5. Ed. rev. e ampl. Brasília DF: Embrapa, 356 p.
- Satpathi, A., Chand, N., Setiya, P., Ranjan, R., Nain, A. S., Vishwakarma, D. K., ... & Kisi, O. (2025). Evaluating statistical and machine learning techniques for sugarcane yield forecasting in the tarai region of North India. *Computers and Electronics in Agriculture*,

229, 109667.
<https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109667>

Shapiro, S.S., & Wilk, M.B. (1965). *An analysis of variance test for normality: complete samples*. *Biometrika* 52: p. 591-611.

Silva, M.V., Pontes de Almeida, G. L., Dias Batista, P. H., Pandorfi, H., Pontes de Almeida Macêdo, G. A., Mesquita, M., & Batista da Silva, R. A. (2019). Variabilidade Espacial dos Atributos Físicos do Solo em Área Cultivada com Palma Forrageira Resistente a Cochonilha do Carmim no Semiárido Nordestino. *Anuário Do Instituto De Geociências*, 42(4).

Som-Ard, J., Atzberger, C., Izquierdo-Verdiguier, E., Vuolo, F., & Immitzer, M. (2021). Remote sensing applications in sugarcane cultivation: A review. *Remote sensing*, 13(20), 4040.
<https://doi.org/10.3390/rs13204040>

Thomas, B. S., Yang, J., Bahurudeen, A., Abdalla, J. A., Hawileh, R. A., Hamada, H. M., ... & Ashish, D. K. (2021). Sugarcane bagasse ash as supplementary cementitious material in concrete—a review. *Materials Today Sustainability*, 15, 100086.
<https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2021.100086>

Warrick, A.W., & Nielsen, D.R. (1980). Spatial variability of soil physical properties in the field. In: D. HILLEL, 3.ed. *Applications of physics*. New York. Academic Press. p.319-344.

Zanão Júnior, L. A., Lana, R. M. Q., Carvalho-Zanão, M. P., & Guimarães, E. C. (2010). Variabilidade espacial de atributos químicos em diferentes profundidades em um Latossolo em sistema de plantio direto. *Revista Ceres*, 57, 429-438.
<https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000300021>