

Geoestatística E SIG Como Técnica De Mapeamentos Das Propriedades Químicas Do Solo

Geostatistics and GIS as a Technique for Chemical Soil Properties Mapping

Geoestadística y SIG Como Técnica De Mapeamientos de las Propriedades Químicas del suelo

Orlando Inácio Jalane¹

<https://orcid.org/0000-0001-8127-4529>

Jacinto Mirione Mafalacusser²

<https://orcid.org/0009-0008-7005-8351>

Edson Vicente da Siva³

<https://orcid.org/0000-0001-5688-750X>

Ausvaldo Salvador Armando Mabjaia⁴

<https://orcid.org/0009-0008-0967-9319>

RECEBIDO: Setembro, 2023 | **ACEITE:** Novembro, 2023 | **PUBLICADO:** Dezembro, 2023

Como citar: Jalane, O. I., Mafalacusser, J. M., da Siva, E. V., & Mabjaia, A. S. A. (2023). Geoestatística e SIG como Técnica de Mapeamentos das Propriedades Químicas do Solo. *RAC: Revista Angolana de Ciências*, 5(2). e050208. <https://doi.org/10.54580/R0502.08>

RESUMO

As propriedades do solo desempenham um papel fundamental na agricultura, e a compreensão de sua distribuição espacial é essencial para a gestão eficaz da terra e o aumento da produtividade agrícola. O presente estudo debruça sobre a aplicação da geoestatística e dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) como técnicas de mapeamento das propriedades do solo, o caso da Açucareira de Moçambique (ADM) em Mafambisse, na província de Sofala, Moçambique. O objetivo central é demonstrar como a geoestatística e o SIG podem ser empregados para caracterizar e mapear as propriedades do solo. A pesquisa foi materializada com recursos aos levantamentos de campo que estimaram o pH em campo de vários pontos amostrais em diferente profundidade no perímetro irrigado da ADM. A geoestatística é aplicada, utilizando métodos como a krigagem e a análise de variograma, permitindo a criação de mapas contínuos que representam as propriedades do solo em locais não amostrados. O SIG é uma ferramenta

¹ Mestre. Universidade Federal do Ceará. Ceará, Brasil. ojalane@alu.ufc.br

² Mestre. Instituto de Investigação Agrária de Moçambique, Departamento de Agronomia e Recursos Naturais (IIAM – DARN). Maputo, Moçambique. jmafalacusser@gmail.com

³ Doutor. Universidade Federal do Ceará. Ceará, Brasil. cacauceara@gmail.com

⁴ Licenciado. Instituto de Investigação Agrária de Moçambique, Departamento de Agronomia e Recursos Naturais (IIAM – DARN). Maputo, Moçambique. asamabjaia@gmail.com

essencial para a integração dos dados geoestatísticos e a criação de mapas acessíveis e informativos. Os resultados desse estudo indicam que a combinação da geoestatística e do SIG oferece uma abordagem eficaz para o mapeamento de propriedades do solo. Esse conhecimento é crucial para a Açucareira de Moçambique, uma empresa importante na indústria açucareira, para otimizar suas práticas agrícolas, aumentar a produtividade e minimizar os impactos ambientais. Dessa forma oferecendo bases sólidas para a tomada de decisões agrícolas informadas e sustentáveis, contribuindo para o desenvolvimento agrícola eficiente em Moçambique e em outras regiões com desafios semelhantes.

Palavras-chave: Geoestatística; SIG, pH; Mapeamento, Mafambisse Moçambique.

ABSTRACT

Soil properties play a fundamental role in agriculture, and understanding their spatial distribution is essential for effective land management and increasing agricultural productivity. This study focuses on the application of geostatistics and Geographic Information Systems (GIS) as techniques for mapping soil properties, in the case of the Mozambique Sugar cane company (ADM) in Mafambisse, in the province of Sofala, Mozambique. The central objective is to demonstrate how geostatistics and GIS can be used to characterize and map soil properties. The research was materialized using field surveys that estimated the pH in the field of several sampling points at different depths in the irrigated perimeter of the ADM. Geostatistics is applied, using methods such as kriging and variogram analysis, allowing the creation of continuous maps that represent soil properties in unsampled locations. GIS is an essential tool for integrating geostatistical data and creating accessible and informative maps. The results of this study indicate that the combination of geostatistics and GIS offers an effective approach for mapping soil properties. This knowledge is crucial for Mozambique sugar cane company, an important company in the sugar industry, to optimize its agricultural practices, increase productivity and minimize environmental impacts. Thus, offering solid bases for making informed and sustainable agricultural decisions, contributing to efficient agricultural development in Mozambique and other regions with similar challenges.

Keywords: Geostatistics; SIG, pH; Mapping, Mafambisse -Mozambique.

RESUMEN

Las propiedades del suelo desempeñan un papel fundamental en la agricultura y comprender su distribución espacial es esencial para una gestión eficaz de la tierra y un aumento de la productividad agrícola. Este estudio se centra en la aplicación de la geoestadística y los Sistemas de Información Geográfica (SIG) como técnicas para mapear las propiedades del suelo, en el caso de la Azucarera de Mozambique (ADM) en Mafambisse, en la provincia de Sofala, Mozambique. El objetivo central es demostrar cómo se pueden utilizar la geoestadística y los SIG para caracterizar y mapear las propiedades del suelo. La investigación se materializó mediante levantamientos de campo que estimaron el pH en campo de varios puntos de muestreo a diferentes profundidades en el perímetro irrigado del ADM. Se aplica la geoestadística, utilizando métodos como kriging y análisis de variogramas, lo que permite la creación de mapas continuos que representan las propiedades del suelo en ubicaciones no muestreadas. SIG es una herramienta esencial para integrar datos geoestadísticos y crear mapas accesibles e informativos. Los resultados de este estudio indican que la combinación de geoestadística y SIG ofrece un enfoque eficaz para mapear las propiedades del suelo. Este conocimiento es crucial para que Azucarera de Mozambique, una importante empresa de la industria azucarera, optimice sus prácticas agrícolas, aumente la productividad y minimice los impactos ambientales. Ofreciendo así bases sólidas para tomar decisiones agrícolas informadas y sostenibles, contribuyendo al desarrollo agrícola eficiente en Mozambique y otras regiones con desafíos similares.

Palabras clave: Geoestadística; SIG, pH; Mapeo, Mafambisse -Mozambique.

INTRODUÇÃO

O uso das tecnologias de mapeamento para a estimação dos recursos naturais constitui um dos grandes campos de aplicação das geociências e da estatística aplicada aos dados

espaciais (Geoestatística) na atualidade. Para o Brenning (2008), a análise espacial de dados ambientais utilizando SIG e a estatística fornecem visões diferentes por conta das barreiras disciplinares das ciências envolvidas, no entanto, ambas as perspectivas contribuem para a análise de dados espaciais. Isso vai se dever a forma como cada uma das disciplinas irá enxergar os objectos em análise. Ainda citando Brenning (2008) os SIG vão fornecer um rico conjunto de ferramentas ou manipulação, consultas e visualização de dados espaciais, enquanto análise de dados estatísticos podem oferecer técnicas espaciais e não espaciais necessárias para a compreensão do fenómeno em estudo.

Os usos dessas técnicas de mapeamento vieram para aliviar as dificuldades relacionadas a estimação dos erros envolvidos no mapeamento dos fenómenos naturais e auxiliar os países de baixa renda que enfrentam grandes dificuldades para a inveteração dos recursos naturais nos seus territórios, principalmente em condições físicos naturais bastantes adversos aos levantamentos no terreno. Moçambique é um país extenso com condições naturais bastantes adversas e muito pouco estudado, maior concentração de dados e áreas muito pouco amostrados, é por essa e outras razões que torna o mapeamento com recurso as técnicas Geoestatística bastante interessante. Nesta larga escala de indisponibilidade surge oportunidades para o estudo de forma mais detalhado e particular de vários elementos dos solos que direito ou indiretamente impactam na atividade agraria, como são os processos salinização, perda de matéria orgânica e acidez dos solos.

Os solos podem ser naturalmente ácidos, pela dissociação do gás carbônico ou pela reação de alguns fertilizantes no solo que liberam H⁺, como também pode se tornar ácidos devido as ações humanas não sustentáveis principalmente através de práticas agrícolas como uso de adubos com base em hidrogénio.

O estudo tem como objetivo demonstrar a eficácia das técnicas de geoestatística e SIG como ferramentas para caracterizar e mapear as propriedades do solo dentro da propriedade da ADM. A pesquisa combina amostragem de campo, análises laboratoriais, modelagem geoestatística e tecnologias SIG para criar mapas espaciais detalhados de atributos chaves do solo, como pH do solo, teor de matéria orgânica e concentrações de nutrientes.

Geoestatística no mapeamento de fenómenos naturais espaciais

Neste trabalho não procuramos esgotar as possibilidades da geoestatística aplicada aos mapeamentos, mais apresentar uma pequena possibilidade de muitas existentes desta técnica de mapeamento que na verdade não é nova.

A necessidade da tomada da melhor decisão, planificar e tornar os custos de pesquisas principalmente em áreas como da indústria petrolífera e mineira levava a criação de novos métodos de análise e mapeamento desses fenómenos espaciais, tais decisões de investimento são baseadas em estudos envolvendo muitas disciplinas além da geoestatística, mas ilustram a noção de incerteza espacial e como isso afeta as decisões de desenvolvimento.

O desenvolvimento da geoestatística remota desde os ensaios do Kolmogorov, Weiner, Matern, Gandin, Fisher nos meados de 1900 que deram os primeiros passos para a materialização da estatística com variáveis regionalizados passado por Krige (1951) e De Wijs (1952-1953) no estabelecimento da Geoestatística baseado na localização geográfica e a dependência espacial e por fim a contribuição do Matheron (1962,1963) e a teoria das variáveis regionalizadas. A geoestatística foi se desenvolvendo com o recurso de outras ciências de análise e representação, como os casos das ciências de informação geografia. Dai a tentativa de mostrar não a dependência de uma a outra, mais sim a correlação das suas técnicas para o mapeamento de recursos naturais com melhores detalhes e com o conhecimento das incertezas dos mapas que são produzidos.

Segundo o Sousa (1989), a análise dos variogramas simples e cruzados das diversas variáveis, enriquece os resultados dos métodos clássicos de Análise de Dados, que não tomam em conta a estrutura espacial das variáveis, justificando, só por si, o estudo conjunto das variáveis regionalizadas (CHILES, 2012, p.10), aponta o que seria quando falamos de uso de geoestatística

“Resumindo, a essência da abordagem geoestatística é reconhecer a variabilidade inerente dos fenômenos espaciais naturais e o caráter fragmentário de nossos dados e incorporar essas noções em um modelo de natureza estocástica. Ele identifica os relacionamentos estruturais nos dados e os utiliza para resolver problemas específicos. Não tenta qualquer interpretação física ou genética, mas usa-os tanto quanto possível quando estão disponíveis” (p.10).

Segundo Malone et al. (2011), a premissa básica por trás de todo mapeamento digital do solo, é dado um conjunto de amostras do solo e um modelo adequado, podemos fazer previsões do solo em locais não amostrados. Essa previsão só é possível com o uso de técnicas estatísticas aliadas ao fator geoespacial das amostras.

Aquisição de dados

Segundo Grego et al. (2014), a coleta de amostra é um fator primordial para aplicação da geoestatística para o mapeamento das propriedades dos solos desde que contempla a obtenção de dados com as correspondentes coordenadas geográficas.

O maior desafio de coletas de amostras para os estudos geoespaciais se prende com os custos relacionado, daí a necessidade de ser o mais preciso possível na sua rede de amostragem; há ainda uma necessidade de velar pela maior densidade possível para evitar ilhas não amostradas, porém este claro que nem sempre esses processos metodológicos são possíveis por fatores de vária ordem, como o caso já anunciado os custos mais existem locais de pouca acessibilidade ou de défices acessos. Esses locais justificam a pouca amostragem ou as tais ilhas de ausência de amostras.

Os processos de aquisição dados, variam em relação aos meios usados para o efeito como os casos de sensores de satélites orbitais, sensores *on ground*⁵. Nesse estudo foram coletados amostras de solos em toda a extensão do campo e posteriormente medidos os valores de pH em *H2O* de cada um dos pontos coletados em três níveis.

METODOLOGIA / MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

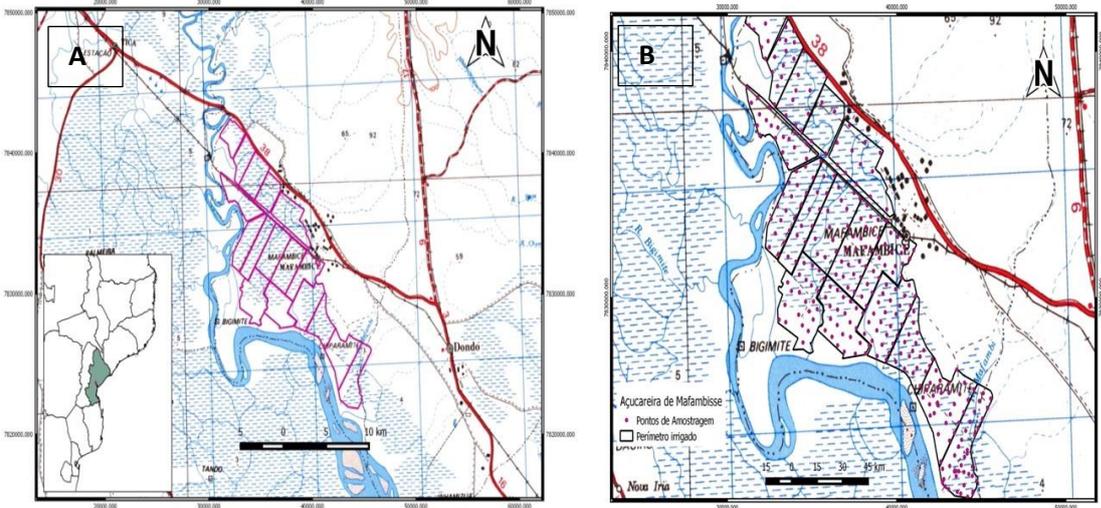
O estudo foi realizado na província de Sofala, no distrito de Dondo, nos campos de produção açucareira em Mafambisse⁶ (Figuras 1 e 2) sob a tutela da Açucareira de Moçambique SARL (AM), isso no extremo centro de Moçambique numa área aproximada de 9455.6ha. Esta região localiza – se ao longo da faixa costeira e é constituída pelas planícies costeiras com altitudes que variam entre 1 a 12 metros. Esta planície é drenada por uma densa rede de riachos e cursos de águas superficiais

⁵ Sensores que permite a coleta local no campo de diversos índices, desde o PH, CE, grau de humidade do solo, etc.

⁶ Mafambisse – Posto administrativo do distrito de Dondo, província de Sofala.

que escorrem na direção a costa, e na época chuvosa são inundáveis (DPCA; 2012)⁷. Sendo que apresenta uma variação topográfica não superior (0 – 5%). Amplitude Térmica Média de 7°C (cerca de 27,5°C em Janeiro e 21°C em Julho/Agosto). A temperatura média anual é de 30-31°C cujos valores máximos, ocorrem entre Janeiro/Fevereiro (32°C-33°C) e os mínimos em Julho (26°-27°C). O valor médio anual das temperaturas mínimas é de 18-19°C, com os valores mais altos em Jan-Fev (22°C) e os mais baixos em Julho (14-15°C). A precipitação anual varia de 1.000 a 1.459 mm, com valores mais altos nas zonas mais próximas da costa e diminuindo progressivamente para o interior. A evapotranspiração potencial média está na ordem de 1.496mm (MAE, 2005).

Figura 1: (A) Localização da Açucareira de Moçambique na região central país (Provi. Sofala), (B) esquema de distribuição de amostras no perímetro irrigado da Açucareira de Moçambique em Mafambisse.



Fonte: elaborado pelos autores, com base a dados cartográficas da (DINAGECA,1995).

Amostragem

O processo de colheita de amostra foi realizado durante 15 dias de agosto, isso no fim da estação seca da região centro do país. Foi estabelecido uma grade de intervalo entre as amostras de 150m e as vezes pouco menos, mas que não se afeta os sistemas de grade por isso assumisse que a amostragem é sistemática. Na primeira fase a ideia original do estudo estava centrado na análise dos micronutrientes do solo e a distribuição espacial das classes dos solos e como eles se comportavam em diferentes tipos de manejo de solos, apenas mais tarde houve uma preocupação na análise da variabilidade dos níveis de pH, visto que nos indicam havia uma grande variação do mesmo ao longo do campo com uma tendência a acidez.

Foram coletadas 387 amostras de solos nos intervalos de 0 a 20cm, 40-60cm e 100-120cm, isso totaliza 1161 amostras nas 3 profundidades. As amostras foram dissolvidas em frascos contendo água destilada para a posterior medição do pH e CE através de um laboratório móvel constituído por um Phmetro e condutivímetros.

Os dados foram analisados e modelados em ferramentas de análise geoestatística e estatística, com recurso a dois softwares, o GeoMS e o R. No que se refere a análises de dados espaciais foi utilizado o QGIS 2.8, SIG de disponibilidade livre.

⁷ DPCA - Departamento de Planeamento e Ordenamento Territorial.

Figura 2: (A) Sondagem e recolha de amostras para a determinação do PH- H_2O , CE, (B) amostras perfiladas em ordem de leitura.



Fonte: arquivo próprio dos autores 2013.

Mapeamento dos recursos naturais

A representação fiel do mundo levou ao surgimento de ciências vocacionadas para este fim, e a cartografia é uma dessas ciências que se ocupa da representação do mundo e dos seus fenómenos. Na década 80 do século passado aos nossos dias ela evoluiu bastante, que no momento falamos de cartografia digital, que se confunde com o desenvolvimento e avanço dos SIG. Segundo Aronoff, (1993) os sistemas de informação geográfica (SIG) foram desenhados para armazenar e analisar os objetos ou fenómenos onde a sua localização geográfica é o fator importante ou crítica para sua análise. A informação espacial dos objetos e fenómenos tem sido até hoje o elemento mais importante para os mapeamentos, sejam eles de natureza de SIG tradicional ou envolvendo outras técnicas como os casos da Geoestatística.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Geostática e as suas aplicações no estudo de recursos naturais

Estatísticas discretivas

As estatísticas discretivas do fenómeno em análise desempenham um papel importante para a melhor compreensão do mesmo, isso compreende a distribuição da amostragem na verificação da discrepância dos dados e na distribuição normal deles. Para Yamamoto e Landim (2013) a distribuição normal dos dados, portanto simetria negativa normalmente dispensam qualquer transformação para adequá-los a análise geoestatística.

De acordo com Malone et al. (2017), a média e a mediana são quase equivalentes indica que a distribuição desses dados não se desvia muito do normal. Isso pode ser visto na figura 3 nos gráficos A, B e C, correspondentes aos histogramas da variável PH em três diferentes níveis, com os valores das médias e mediana bastante próximos e com o coeficiente de variação próximos do zero.

$$\gamma(h) = \frac{1}{2m(h)} \sum_{i=1}^{m(h)} \{s(x_i) - s(x_i + h)\}^2$$

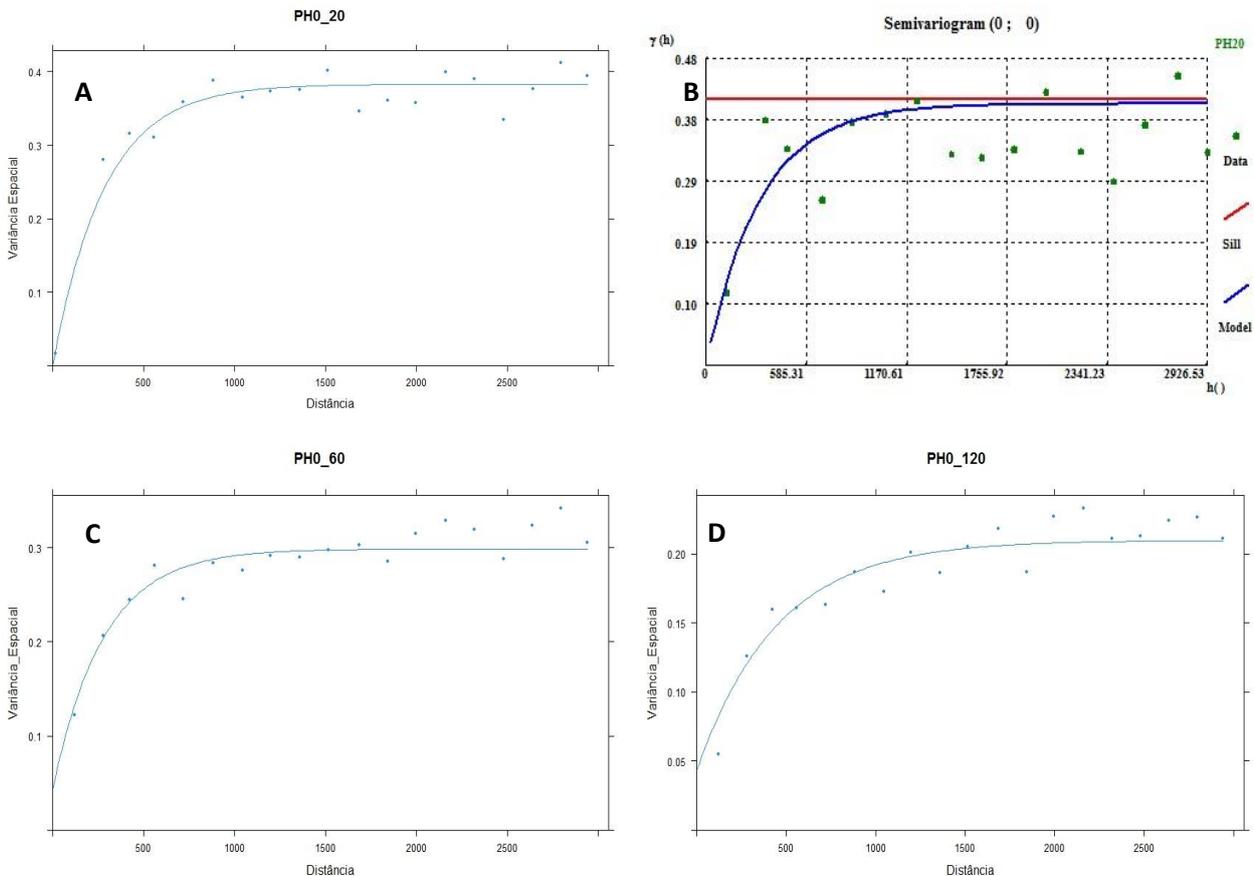
Sendo que $\gamma(h)$ é a semi-variância média, m é o número de pares de pontos de amostragem, s é o valor do atributo sob investigação, x são as coordenadas do ponto e h é o atraso (distância de separação dos pares de pontos). Os gráficos abaixo ilustram o ajuste dos variogramas para as diferentes profundidades do pH, sendo que não existe uma alteração significativa na equação do modelo final. Todos os variogramas se ajustaram quase perfeitamente no modelo exponencial que é traduzida pela seguinte equação matemática:

$$\gamma(h) = C_o + C_1 \left[1 - \exp\left(-3\left(\frac{h}{a}\right)\right) \right]$$

Onde C , C (e a são os parâmetros de ajuste, h a distância e $\gamma(h)$ o valor da semi-variância.

Sousa (2000) considera o variograma como uma função mais geral do que a covariância ou a correlação espacial, pois estes só existem na hipótese de estacionaridade de 2ª ordem, enquanto o variograma pode ser definido na hipótese intrínseca, justificando-se, assim, o uso generalizado do variograma em geoestatística.

Figura 4: Ajuste dos variogramas ao modelo teórico do pH na profundidade 0 -20cm, (A) no R e (B) GEOMS, e o ajuste dos variogramas dos modelos teóricos do PH nas profundidades 40 -60cm (C) e 100-120 (D).



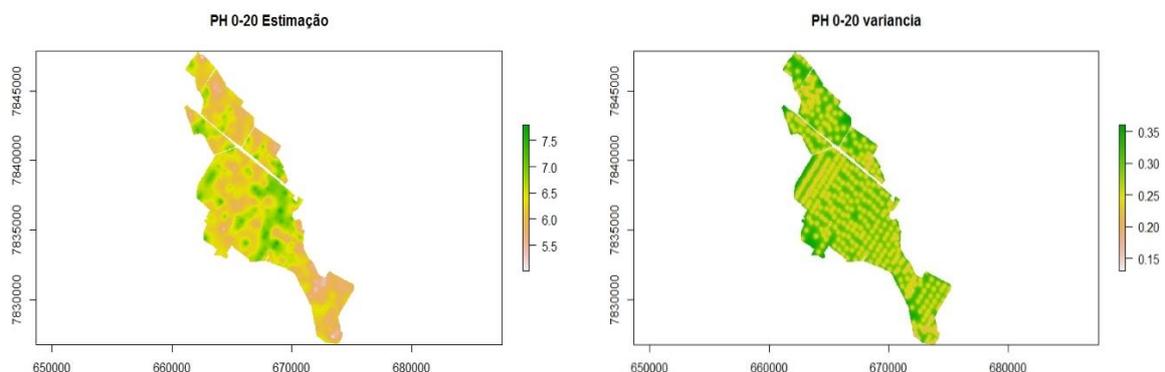
Fonte: elaboração dos autores usando dados de amostragem de Mafambisse, no software R e GEOMS.

Geo – Kirgegem e mapeamento

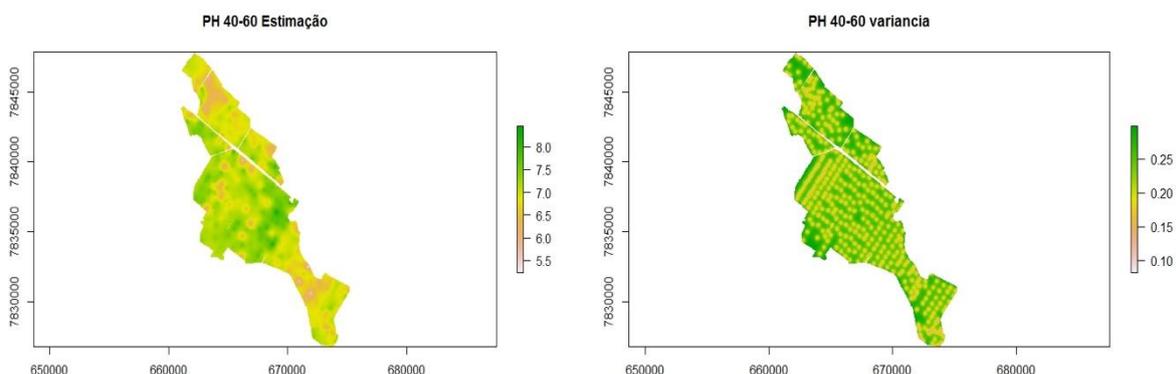
No mapeamento de fenômenos espaciais, tornou-se bastante comum o uso de ferramentas geoestatística (Krigagem), pelo simples fato de não olhar os dados de uma forma isolada, mas sim procurar estabelecer relações entre o mesmo tendo como base a sua espacialidade (Valladares, 2012). A outra grande vantagem dos mapas produzidos com inferência estatística prende-se com a possibilidade de poder estimar os erros a eles associados. Geralmente é feito através da estimação do RMSE, que representa os valores da raiz quadrada do quadrado médio do erro. (Willmont 1992) citado por (Santos, 2017) aponta o RMSE como um dos melhores estimadores de desempenho de modelos. Além do RMSE, o coeficiente de determinação, mais conhecido como R² que também é medida de ajuste de modelos de regressão. Com o recurso a ferramentas estáticas e uso dos SIG foi possível mapear as propriedades de solo da açucareira de Mafambisse com níveis de precisão bastante altos. Os coeficientes de determinação dos valores estimados nas três profundidades foram positivos sendo do PH na primeira profundidade igual a 0.43, na segunda de 0.34 e 0.37. A variante pH demonstra uma variação de valores abaixo de 7 com mais ou menos 80% dos casos na profundidade inicial tornando os solos ácidos, vai aumentando a medida com a profundidade e com tendência a subir e a estabilizar nos 6.5 a 7.6.

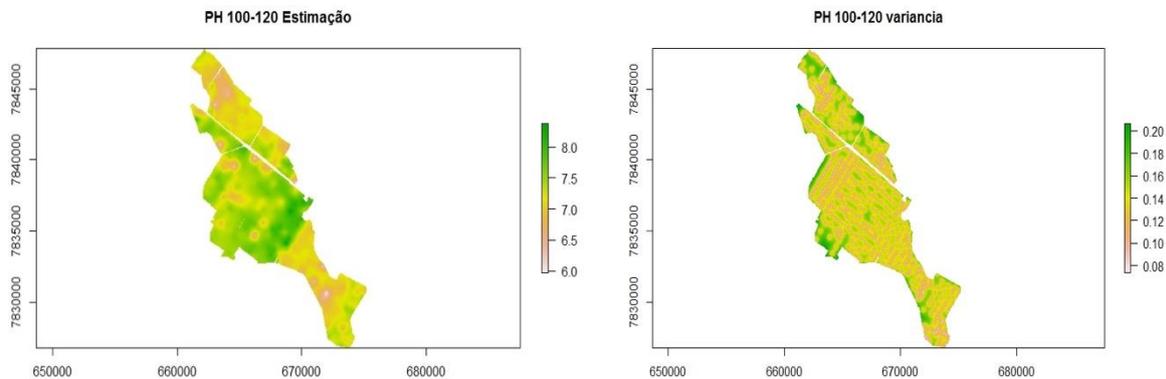
Figura 5: Mapas de estimação do pH em diferentes profundidades e os respectivos mapas de variância PH 0-20 (6A), PH 40 -60 (6B) e PH 100-120 (6C).

6A



6B





Fonte: elaboração dos autores usando dados de amostragem de Mafambisse, no software R e GEOMS.

Locais com pouca ou maiores espaçamentos das amostram mostram variâncias relativamente elevados em comparação a outros locais com uma melhor cobertura. Portanto, a abordagem geoestatística carece de uma melhor distribuição e representatividade do factor a ser analisado.

CONCLUSÃO

O uso das técnicas de geoprocessamento e geoestatística se revelam de extrema importância no mapeamento de fenómenos naturais que apresentam uma grande dependência espacial, isso devido a uma correlação natural e espacial entre os fenómenos. O emprego da geoestatística mostrou se bastante útil para o auxílio a tomada de decisão, através de fornecimento de dados estáticos e mapas bem mais precisos. É também uma verdade que só existe bons resultados quando os trabalhos de pesquisa inicial tinham sido de melhor qualidade exigida, visto que o maior inimigo da geostática e dos SIG e de toda pesquisa é a qualidade dos dados fornecidos. Isso pode se visto na questão da tomada de amostra que mostrou se de extrema importância pós as ilhas de indisponibilidade da amostragem são os que apresentaram valores de variância mais elevada entre os valores reais e os estimados. Mesmo com essas exigências da perfeição em todos os aspetos ligados a este processo podemos dizer que existe um grande potencial de aplicação das técnicas geoestatística para a análise e mapeamentos das propriedades do solo e dos recursos naturais no geral, deste modo aumentar a eficácia no processo de tomada de decisão que tenha um impacto desejado. Os resultados desse estudo indicam que a combinação da geoestatística e do SIG oferece uma abordagem eficaz para o mapeamento de propriedades do solo. Esse conhecimento é crucial para as companhias agrícolas que prezam por maior exatidão possível nas suas operações, facto que pode ajudar a otimizar suas práticas agrícolas, aumentar a produtividade e minimizar os impactos ambientais.

AGRADECIMENTOS

À CAPES PRINT Proc. 88887.312019/2018-00: Tecnologias e métodos socioambientais integrados para a sustentabilidade territorial: alternativas para comunidades locais no contexto

das mudanças climáticas; e Programa CAPES/FUNCAP Proc. 88887.165948/2018-00: "Apoio às Estratégias de Cooperação Científica do Programa de Pós-Graduação em Geografia – UFC." Ao LAGEPLAN -Laboratório de Geoecologia das Paisagens e Planejamento Ambiental, Universidade Federal do Ceará-UFC.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aronoff, S. (1993). *Geographic information systems: a management perspective*. Wdl publication. Ottawa, Canada.
- Brenning, A. (2008). Statistical geocomputing combining R and SAGA: The example of landslide susceptibility analysis with generalized additive models. *Hamburger Beiträge zur Physischen Geographie und Landschaftsökologie*. 19. 23-32.
- Chiles, J.P., e Delfiner, P. (2012). *Geostatistics modeling spatial uncertainty*. In v. Barnett, n. A. C. Cressie, n. I. Fisher, i. M. Johnstone, j. B. Kadane, d. G. Kendall, ... a (eds.), *American Statistician* (vol. 43). <https://doi.org/10.1080/00031305.1989.10475658>
- DINAGECA (Direção Nacional de Geografia e Cadastro).(1995). *Carta Topográfica de Dondo*, escala 1:50 000, folhas 1196 e 1197. Maputo: MINAG.
- Grego, C. R., Oliveira, R., & Vieira, S. R. (2014). *Geoestatística aplicada a agricultura de precisão célica. Agricultura de precisão*, 74–83. <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/113646/1/4221.pdf>
- MAE (Ministério de Administração estatal). (2005). *Perfil do distrito do Dondo província de Sofala*. Província de Sofala. Maputo.
- Malone, B. P., Odgers, N. P., Stockmann, U., Minasny, B., & Mcbratney, A. B. (2011). *Digital mapping of soil classes and continuous soil properties*. 2011. In *European Journal of Soil Science* (vol. 62). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01370.x>
- Malone, B.P., Minasny, B., Mcbratney, A. (2017). *Using R for digital soil mapping*. Springer.
- Santos, Karoine Eduarda Lima, (2017). *Geoestatística e geoprocessamento aplicados á tomada de decisão agroambiental em um sistema de produção de leite a pasto intensivo*. Dissertação de mestrado – Programa de pós-graduação e área de concentração em ciências da engenharia ambiental –Escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo.
- Sousa, A.J. (2000). *Análise geoestatística de dados*. CVRM / Centro de Geosistemas.
- Sousa, A.J. (1989). *Geoestatística multivariada*. Laboratório de mineralogia e planejamento mineiro.
- Valladares, G. S. (2012). *Geoestatística no mapeamento digital de solos dos tabuleiros costeiros no litoral norte do estado do Ceará*. 67(6), 14– 21.
- Yamamoto, J. K., e Landim, P. M. (2013). *Geoestatística: conceitos e aplicações*. São Paulo: Oficina de Textos. Disponível em: https://repositorio.usp.br/directbitstream/c0b2cb71-7a23-4e0b-93c5-ca1c681c980c/2401176_compressed.pdf