

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**A UTILIZAÇÃO DE ESTATÍSTICA MULTIPONTO COMO PÓS
PROCESSAMENTO DA KRIGAGEM ORDINÁRIA E O SEU USO
PARA ESTIMATIVA DE INCERTEZA**

RAPHAEL MARTIN SALAROLI

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

Dissertação de Mestrado

Nº 905

COMISSÃO JULGADORA

Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

Dr. Eduardo Henrique de Moraes Takafuji

Dr. José Alberto Quintanilha

SÃO PAULO
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Serviço de Biblioteca e Documentação do IGc/USP

Ficha catalográfica gerada automaticamente com dados fornecidos pelo(a) autor(a)
via programa desenvolvido pela Seção Técnica de Informática do ICMC/USP

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de catalogação da publicação:
Sonia Regina Yole Guerra - CRB-8/4208 | Anderson de Santana - CRB-8/6658

Salaroli, Raphael Martin

A UTILIZAÇÃO DE ESTATÍSTICA MULTIPONTO COMO PÓS
PROCESSAMENTO DA KRIGAGEM ORDINÁRIA E O SEU USO
PARA ESTIMATIVA DE INCERTEZA / Raphael Martin
Salaroli; orientador Marcelo Monteiro da Rocha. --
São Paulo, 2023.
119 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação
em Recursos Minerais e Hidrogeologia) -- Instituto
de Geociências, Universidade de São Paulo, 2023.

1. Geoestatística. 2. FILTERSIM. 3. MPS. 4.
Simulação de múltiplos pontos. 5. Cálculo de
incerteza. I. Rocha, Marcelo Monteiro da, orient.
II. Título.

RESUMO

A suavização da krigagem atenua valores altos e baixos na estimativa de teores, podendo levar a subestimativa e superestimativa de blocos. Com o intuito de diminuir esse efeito de suavização, foi empregada a simulação de múltiplos pontos (MPS) utilizando como imagem de treinamento (TI) o resultado da krigagem. Inicialmente foi utilizado um depósito sintético de cobre nesta análise para permitir a comparação dos resultados da krigagem ordinária com e sem o pós-processamento com o depósito original e verificar se houve ganhos e se o uso da MPS como pós-processamento é viável para esta finalidade. Num segundo momento a técnica foi aplicada em um depósito real. Como a MPS gera diversas realizações, também foi comparado se estas diversas realizações podem ser utilizadas para estimar a incerteza da estimativa geoestatística e contrapor com a quantificação da incerteza calculada pela simulação sequencial gaussiana. Os resultados da MPS como pós-processamento, no depósito sintético, apresentaram resultados mais próximos ao depósito sintético, principalmente em faixas de teores mais baixas. No cálculo de incerteza da estimativa a MPS também apresentou um resultado mais assertivo à SGS. No depósito real os resultados da MPS como pós-processamento convergiram com o observado no depósito sintético. Os resultados da estimativa de incerteza também apresentaram valores muito baixos. Concluiu-se que o pós-processamento por MPS melhora, ainda que pouco significativamente, a estimativa da krigagem ordinária e que o cálculo de incertezas através das realizações da MPS não é ideal, uma vez que, se toda incerteza calculada for baixa, ela não irá auxiliar em tomadas de decisões.

INTRODUÇÃO

A krigagem é uma ferramenta que há muito tempo é utilizada na estimativa de teores para a avaliação de recursos minerais, uma vez que, com suas devidas inferências, é possível estimar a quantidade de minério numa região utilizando dados de amostras referenciadas no espaço. Apesar de ser muito útil e eficaz no seu objetivo, esse método geoestatístico possui algumas limitações, pois suas inferências apresentam suavização, subestimando valores altos e superestimando valores baixos (Yamamoto e Landim, 2013). Além disso, a

krigagem não possibilita o cálculo da incerteza da estimativa, sendo que para esta função são utilizadas simulações geoestatísticas, como Simulação Sequencial Gaussiana (SGS) e Simulação por Bandas Rotativas, por exemplo, que possibilita inferir incertezas a partir de suas diversas realizações (Rossi e Deutsch, 2014).

Já a estatística de múltiplos pontos (MPS) surgiu em 1993, através do SNESIM, primeiro algoritmo MPS, numa tentativa de modelar corpos complexos, que apresentavam geometria impossível de ser reproduzida pela krigagem, através de uma imagem de treinamento (TI) para extrair informações geológicas e estabelecer correlações (Guardiano e Srivastava, 1993). Esta metodologia apresentou sucesso em seu objetivo e mais algoritmos MPS foram propostos, sendo um deles o FILTERSIM (Zhang, 2006), que aceita dados categóricos e contínuos.

A partir dos problemas notados na krigagem, este trabalho tentará mostrar a viabilidade do uso da MPS como pós-processamento da krigagem, a fim de atenuar a suavização e, com o uso das diversas realizações geradas na MPS, entender, também, se o cálculo da incerteza com os dados gerados pelo método de múltiplos pontos gera resultados satisfatórios. Para tal, a TI, pré-requisito na MPS, foi o modelo de blocos gerado por estimativa na krigagem ordinária e espera-se que este modelo de bloco seja refinado pela MPS, que identifica padrões no modelo de blocos e os correlaciona com os dados condicionantes. Como o método MPS gera diversas realizações, estas foram utilizadas como base para calcular incerteza e confrontadas com a incerteza calculada pela SGS. Para auxiliar comparações, um depósito sintético foi utilizado e, num segundo momento, um depósito real, como estudo de caso.

CONCLUSÃO

Concluiu-se que o uso da MPS como pós-processamento da krigagem ordinária gera resultados mais assertivos, ainda que este ganho seja pequeno.

O uso da MPS para estimar as incertezas tem bons resultados no depósito sintético, porém com valores de incerteza bastante baixos. Isso também ocorreu

no caso real, indo contra o esperado, uma vez que este depósito possui menos amostras e maior heterogeneidade. Este cenário de baixas incertezas ocorre em função da baixa variabilidade entre as realizações MPS e não é ideal, uma vez que incertezas muito baixas e semelhantes não irão auxiliar na tomada de decisões.

Assim sendo, é possível dizer a dissertação mostrou a viabilidade do uso da MPS para pós-processamento da krigagem ordinária, porém para cálculo da incerteza a técnica apresentou resultados em geral baixos e, portanto, não ideais como apontado anteriormente. Estudos semelhantes devem ser realizados, utilizando depósitos sintéticos com maior espaçamento entre as amostras e, também, com algoritmos diferentes, com a finalidade de encontrar alguma configuração que permita obter ganhos mais significativos no pós-processamento e que gere incertezas mais representativas. Um possível algoritmo para esse uso seria o DeeSse (Straubhaar, et al., 2020), recentemente implementado no IsatisNeo® da Geovariances.

BIBLIOGRAFIA

ALTHOFF, F. BARBEY, P. BOULLIER, A. 2000. 2.8–3.0 Ga plutonism and deformation in the SE Amazonian craton: the Archaean granitoids of Marajoara (Carajás Mineral Province, Brazil). *Precambrian Research*, v. 104, n. 3-4, p. 187-206. [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-9268\(00\)00103-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-9268(00)00103-0)

ANDRADE, M. M. P. 2018. Classificação de recursos minerais por meio de simulação condicional e intervalo de confiança da média aplicada ao sulfeto disseminado do corpo de minério Sequeirinho, depósito Sossego, Província Mineral de Carajás. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.44.2019.tde-10102019-142319>

ARMSTRONG, M. 1998. *Basic linear geostatistics*. Springer Science & Business Media.

BULMER, M. G. 1979. *Principles of statistics*. Courier Corporation.

- CAERS, J. 2011. Modeling uncertainty in the earth sciences. John Wiley & Sons.
<https://doi.org/10.1002/9781119995920>
- CAERS, J; ZHANG, T. 2004. Multiple-point geostatistics: a quantitative vehicle for integrating geologic analogs into multiple reservoir models.
<https://doi.org/10.1306/M80924C18>
- CHILÈS, J., DELFINER, P. 2012. Geostatistics: modeling spatial uncertainty. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118136188>
- CORTES, A. 2017. Comparison of Two Multivariate Grade Simulation Approaches on an Iron Oxide Copper-Gold Deposit. Geostatistics Valencia 2016, p. 151-166. https://doi.org/10.1007/978-3-319-46819-8_10
- DALL'AGNOL, R., SOUZA, Z.S., ALTHOFF, F. J., BARROS, C. E. M., LEITE, A. A. S., JORGE JOÃO, X. S. 1997. General aspects of the granitogenesis of the Carajás metallogenic province. In: II International Symposium on Granite and Associated Mineralizations, Extended abstract sand program. Salvador. p. 135-161.
- DALL'AGNOL, R., COSTI, H. T., LEITE, A. D. S., DE MAGALHÃES, M. S., TEIXEIRA, N. P. 1999. Rapakivi granites from Brazil and adjacent areas. Precambrian Research, v. 95, n. 1-2, p. 9-39. [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(98\)00125-9](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00125-9)
- DAVIS, J.C. 2002. Statistics and data analysis in geology. New York: Willey & Sons.
- DIMITRAKOPOULOS, Roussos. 1998. Conditional simulation algorithms for modelling orebody uncertainty in open pit optimisation. International journal of surface mining, reclamation and environment, v. 12, n. 4, p. 173-179.
<https://doi.org/10.1080/09208118908944041>
- DELHOMME, J. 1979. "Spatial variability and uncertainty in groundwater flow parameters: A geostatistical approach. "Water Resources Research 15.2, p269-280. <https://doi.org/10.1029/WR015i002p00269>

DEUTSCH, C.V. & JOURNEL, A.G. 1992. GSLib: Geostatistical software library and user's guide. New York: OxfordUniversity Press, 340 p.

ESTEVIÃO JÚNIOR, J. 2019. Avaliação de incerteza associada à Krigagem de variáveis indicadoras e à modelagem de grade shell em depósito de ouro. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. 2019. ESTEVIÃO JÚNIOR, João. Avaliação de incerteza associada à Krigagem de variáveis indicadoras e à modelagem de grade shell em depósito de ouro. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. <https://doi.org/10.11606/D.44.2020.tde-13022020-151348>

GOOVAERTS, P. 1997. Geostatistics for Natural Resources Evaluation. Oxford University Press, USA. <https://doi.org/10.1023/A:1007530422454>

GUARDIANO, F.B.; SRIVASTAVA, R. M. 1993. Multivariate geostatistics: beyond bivariate moments. In: Geostatistics Troia'92. Springer, Dordrecht, p. 133-144. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1739-5_12

JOURNEL, A.G.; 1989. Fundamentals of geostatistics in five lessons. Washington, DC: American Geophysical Union. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(90\)90060-7](https://doi.org/10.1016/0098-3004(90)90060-7)

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C.J. 1978. Mining geostatistics. London: Academic press.

MARIETHOZ, G.; CAERS, J. 2015. Multiple-point geostatistics: stochastic modeling with training images. John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781118662953>

MATHERON, G. 1963. Principles of geostatistics. Economic geology, v. 58, n. 8, p. 1246-1266. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.58.8.1246>

MATHERON, G. 1971. The Theory of Regionalized Variables and Its Applications. Ecole des Mines, Fontainebleau, France.

MONTEIRO, L. V. S. Xavier, R. P., de Carvalho, E. R., Hitzman, M. W., Johnson, C. A., de Souza Filho, C. R., & Torresi, I. 2008. Spatial and temporal zoning of

hydrothermal alteration and mineralization in the Sossego iron oxide–copper–gold deposit, Carajás Mineral Province, Brazil: paragenesis and stable isotope constraints. *Mineralium Deposita*, v. 43, n. 2, p. 129-159.

<https://doi.org/10.1007/s00126-006-0121-3>

MORETO, C. P. N. Monteiro, L.S.V. Xavier, R.P. Creaser, R.A. DuFrane, S.A. Tassinari, C.C.G., Sato, K. Kemp, A.I.S. Amaral, W.S. 2015. Neoproterozoic and Paleoproterozoic iron oxide-copper-gold events at the Sossego deposit, Carajás Province, Brazil: Re-Os and U-Pb geochronological evidence. *Economic Geology*, v. 110, n. 3, p. 809-835.

<https://doi.org/10.2113/econgeo.110.3.809>

OLEA, R.A. 1974. Optimal contour mapping using universal kriging. *Journal of Geophysical Research*, v. 79, n. 5, p. 695-702.

<https://doi.org/10.1029/JB079i005p00695>

REMY, N.; BOUCHER, A.; WU, J. 2009. Applied geostatistics with SGeMS: A user's guide. Cambridge University Press.

<https://doi.org/10.1017/CBO9781139150019>

ROSSI, M.E., Deutsch, C.V. 2014. Mineral resource estimation. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5717-5>

SANTOS, J.O.S. 2003. Geotectônica dos escudos das Guianas e Brasil Central. *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil*, v. 4, p. 169-226.

STRAUBHAAR, J. 2020. DeeSse user's guide. Neuchâtel, Switzerland: The Centre for Hydrogeology and Geothermics (CHYN), University of Neuchâtel.

SPIEGEL, M. R.; SCHILLER, John J.; SRINIVASAN, R. Alu. 2013. Probability and statistics: Schaum's outlines. McGraw-Hill.

TAHMASEBI, P.; HEZARKHANI, A.; SAHIMI, M. 2012. Multiple-point geostatistical modeling based on the cross-correlation functions. *Computational Geosciences*, v. 16, n. 3, p. 779-797. <https://doi.org/10.1007/s10596-012-9287-1>

- TAHMASEBI, P.; SAHIMI, M. 2013 Cross-correlation function for accurate reconstruction of heterogeneous media. *Physical review letters*, v. 110, n. 7, p. 078002. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.078002>
- TAHMASEBI, P. 2018. Multiple point statistics: a review. In: *Handbook of Mathematical Geosciences*. Springer, Cham, p. 613-643. https://doi.org/10.1007/978-3-319-78999-6_30
- TAKAFUJI, E.H.M. 2015. Estudo comparativo entre a Simulação Sequencial Gaussiana e a Simulação Baseada em Wavelets aplicado a quantificação de minério de Cu em um depósito sintético. Diss. Universidade de São Paulo. <https://www.doi.org/10.11606/D.44.2015.tde-22092015-145130>
- TAKAFUJI, E.H.M., ROCHA, M.M., RAMOS, G.Z.; SILVA, L.A.U . 2017. Simulação estocástica aplicada a um banco de dados sintético de cobre. *GEOLOGIA USP. SÉRIE CIENTÍFICA*, v. 17, p. 247-256. <https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v17-432>
- YAMAMOTO, J.K., 2001. Análise geoestatística. Avaliação e classificação de reservas minerais. São Paulo, Edusp.
- YAMAMOTO, J. K. 2020. Estatística, Análise e Interpolação de Dados Geoespaciais: 50 Scripts em R. São Paulo: Oficina de Textos.
- YAMAMOTO, J. K, LANDIM, P.M.B. 2013. Geoestatística: conceitos e aplicações. Oficina de textos.
- YAMAMOTO, J. K., LI, CHAO. 2009. Comparação de métodos para teste de bigaussianidade. *Geociências*, v. 28, n. 2, p. 121-128.
- ZHANG, T. 2006. Filter-based training pattern classification for spatial pattern simulation. Tese de Doutorado. Stanford University.
- ZHANG, T., SWITZER, P., JOURNEL, A. 2006. Filter-based classification of training image patterns for spatial simulation. *Mathematical Geology*, v. 38, n. 1, p. 63-80. <https://doi.org/10.1007/s11004-005-9004-x>