

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/108

Modelagem Geoestatística de Parâmetros Geotécnicos do Solo de Um Aeroporto

Lucas Michael Luzzi

Aluno de mestrado, UFPR, Curitiba, Brasil, lucasluzzi0@gmail.com

Vitor Pereira Faro

Diretor Solution, Curitiba, Brasil, vitor@solution-ipd.com

RESUMO: A krigagem é uma técnica estatística utilizada na interpolação de dados espaciais criada para fazer a avaliação e quantificação de recursos minerais do solo. Seu uso pode ser aplicado à Geotecnia para a modelagem da resistência do terreno. Neste artigo, a krigagem será aplicada em um projeto de expansão de um aeroporto, onde a precisão na estimativa de características do solo é crucial para garantir a segurança e durabilidade das estruturas. Nesse cenário, é necessário determinar a resistência do solo por meio de pontos de sondagem. No entanto, a obtenção de informações sobre todo o espaço é inviável devido à limitação de recursos. Com isso, é necessário estimar parâmetros em regiões do terreno não amostradas. É nesse contexto que a krigagem se torna uma ferramenta valiosa pois permite estimar valores em locais não amostrados. A krigagem é um método de interpolação que leva em conta a correlação espacial entre os dados e as amostras disponíveis. Foi feita uma campanha de investigação geotécnica do solo do aeroporto composto por 51 furos de sondagem SPT com espaçamento médio de 200 metros. O processo de krigagem foi feito com a utilização da linguagem de programação R. Os resultados foram apresentados na forma de mapas discretizados em quadrados de 30 m e 60 m que ajudaram a entender as regiões do terreno com maiores e menores resistências, bem como a confiabilidade, dada pelo mapa de percentil 5%.

PALAVRAS-CHAVE: Krigagem, Geoestatística, SPT, Variabilidade do solo.

ABSTRACT: Kriging is a statistical technique used for the interpolation of spatial data created for the assessment and quantification of mineral resources in the soil. Its application can extend to Geotechnics for modeling soil strength. In this article, kriging will be applied to an airport expansion project, where precision in estimating soil characteristics is crucial to ensure the safety and durability of structures. In this context, it is necessary to determine soil strength through drilling points. However, obtaining information about the entire area is unfeasible due to resource limitations. Therefore, it is necessary to estimate parameters in unsampled regions of the terrain. It is in this context that kriging becomes a valuable tool, as it allows for the estimation of values in unsampled locations. Kriging is an interpolation method that takes into account the spatial correlation between the data and the available samples. A geotechnical investigation campaign of the airport soil was conducted, consisting of 51 SPT boreholes with an average spacing of 200 meters. The kriging process was carried out using the R programming language. The results were presented in the form of maps discretized into 30 m and 60 m squares, which helped to understand the regions of the terrain with higher and lower strengths, as well as the reliability, given by the 5th percentile map.

KEYWORDS: Kriging, Geostatistics, SPT, Soil variability.

1 INTRODUÇÃO

Segundo Diggle & Ribeiro Jr. (2007) o termo geoestatística foi cunhado pelo francês Georges Matherón para designar o conjunto de técnicas de predição espacial no contexto da indústria de mineração.

Frequentemente na geotecnia, o engenheiro precisa fazer predições espaciais para saber um parâmetro de resistência ou índice físico do solo em um ponto do terreno que não foi feita a medição. O que ele dispõe é a medição em outros pontos. Então o engenheiro precisa, a partir de alguns pontos conhecidos, estimar ou

inferir o valor do parâmetro em outros pontos desconhecidos. A ferramenta a ser utilizada para resolver esse problema é a interpolação.

A geoestatística tem seu uso consagrado em muitas áreas do conhecimento, como mineração, planejamento urbano, epidemiologia e agronomia, porém na geotecnia seu uso ainda é muito incipiente e se limita a trabalhos acadêmicos, como Olavo (2009), Sturaro (1994) e Lacasse & Nadim (1996).

A partir do modelo geoestatístico do solo obtido, é possível realizar dimensionamento ou verificação de segurança de estruturas. Alguns trabalhos realizaram dimensionamentos geotécnicos considerando o solo como um campo aleatório. O conceito de um campo aleatório é definido por Baecher (2003) como um conjunto de realizações de uma variável aleatória $z(x)$, observada em diferentes pontos no espaço. O conceito de krigagem também parte desse princípio, mas além disso assume a hipótese de que esse conjunto de observações segue uma distribuição gaussiana multivariada.

O motivo pelo qual a krigagem faz essas suposições é para que se possam fazer previsões da variável de interesse em pontos em que essa variável não foi medida, a partir do conhecimento dessa variável em alguns pontos, que são os pontos nos quais foram coletadas amostras ou nos quais foram realizados ensaios de campo.

Entre os trabalhos que empregaram conceitos de campos aleatórios e geoestatística para realizar o dimensionamento de estruturas geotécnicas estão: Fenton *et. al.* (2005) em contenções, Propescu *et. al.* (2005) em recalques sob fundações e Griffiths & Fenton (2004) em estabilidade de taludes.

Nesses trabalhos, o solo foi discretizado em uma malha de pequenas dimensões, para que fosse calculado com o método dos elementos finitos. O presente artigo, por outro lado, utiliza uma escala maior e discretiza o terreno em uma malha de 30 por 30 metros, isso ocorre porque a distância média entre os furos de sondagem do terreno analisado é de 200 metros.

3 ANÁLISE EXPLORATÓRIA DOS DADOS

O primeiro passo para analisar os dados é avaliar as estatísticas descritivas dos dados, isso é feito mediante o emprego de histogramas de frequências, gráficos de dispersão e os pontos plotados sobre uma imagem de satélite. O objetivo é entender a estrutura e as características dos dados para decidir qual é o método de modelagem mais adequado.

A análise exploratória dos dados será mostrada, como um exemplo, para a profundidade de 13 m. Para a realização desses procedimentos, é necessário que os pontos estejam georreferenciados, preferencialmente utilizando a projeção UTM (Universal Transversa de Mercator). Os pontos em que foram medidos o índice de resistência SPT, projetados em uma imagem de satélite do terreno do aeroporto são exibidos na Figura 1 que também mostra a região de interesse sobre a qual os valores de SPT serão interpolados.

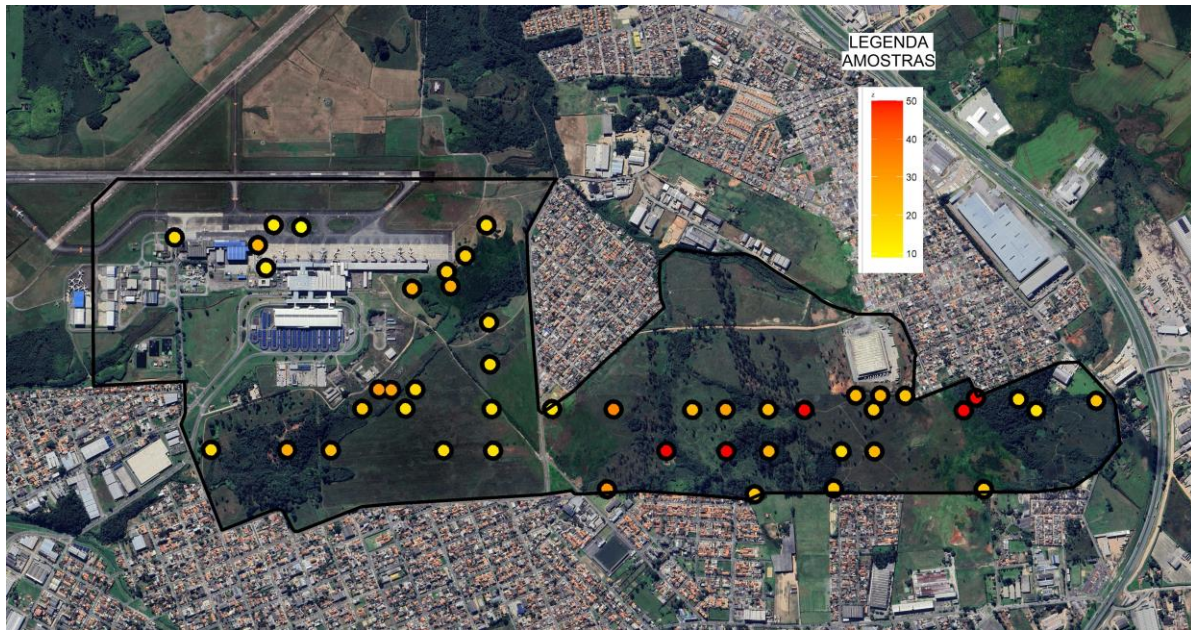


Figura 1 - Resultados de SPT na profundidade de 13 m

Nesta etapa, os dados ainda são tratados como variáveis aleatórias independentes, ou seja, a posição dos dados ainda não é levada em conta. Pela análise dos dados de SPT organizados na forma de um histograma de frequências, exibido na Figura 2, é possível verificar que os dados seguem aproximadamente uma distribuição gaussiana e embora ocorra valores distantes da média, não se caracterizam como outliers.

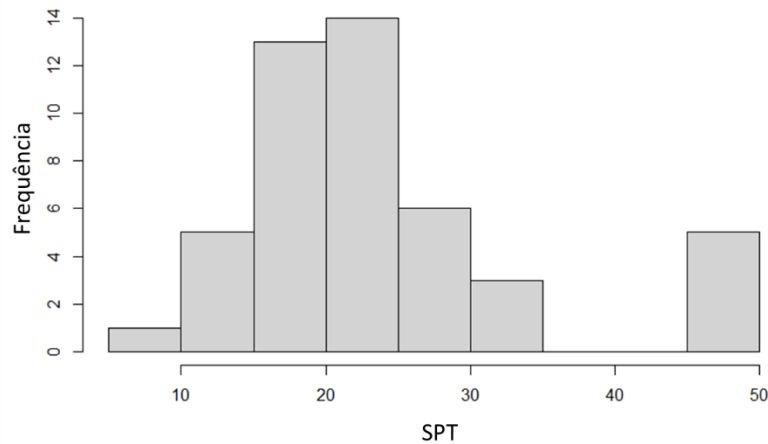


Figura 2 - Histograma de frequência dos valores de SPT na profundidade 13 m.

Para verificar se há uma tendência nos dados é utilizada a Figura 3, por meio da avaliação do gráfico de dispersão do SPT em relação às coordenadas X e em relação à coordenada Y. Observa-se em ambas as imagens, que não há uma tendência importante nos dados. Caso fosse verificado que há uma tendência, o processo de modelagem envolveria a inclusão de parâmetros de regressão.

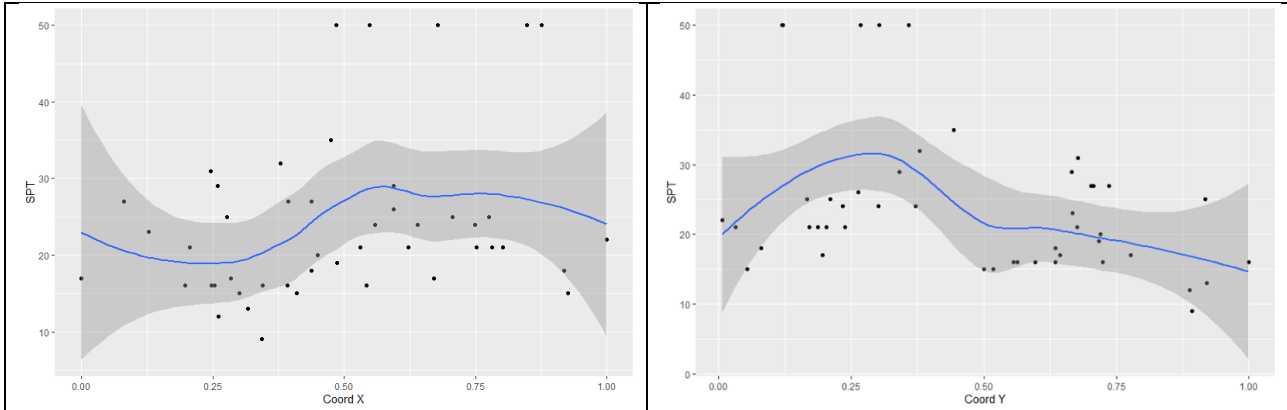


Figura 3 - Relação entre SPT e coordenadas X e Y

4 INTERPOLAÇÃO POR KRIGAGEM

Se os valores da variável de interesse estivessem distribuídos de forma completamente aleatória no espaço, a geoestatística não geraria efeito e as ferramentas para fazer previsões espaciais seriam apenas aquelas próprias da estatística convencional, não-espacial. Mas quando há alguma estruturação nos dados, valores mais semelhantes tendem a estar mais próximos, esse fenômeno é conhecido como continuidade espacial. A ferramenta que mede o grau de continuidade espacial e que é essencial para a realização da interpolação por krigagem é o variograma.

O variograma é realizado em duas etapas, a primeira é o variograma experimental. Consiste no conjunto de pontos que mede o grau de diferença entre duas amostras em função da distância que as separa. O variograma experimental é obtido a partir dos dados pela Equação (1).

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [z(x+h) - z(x)]^2 \quad (1)$$

Onde:

$\gamma(h)$: Variância entre pares de pontos distanciados de h;

h: distância entre pares de pontos;

n: Número de pares de pontos para cada distância h;

$z(x)$: Valor da variável a ser interpolada na posição x;

$z(x+h)$: Valor da variável a ser interpolada na posição x+h.

O variograma teórico não é obtido a partir dos dados, ele é modelado de modo a se ajustar ao variograma experimental. É uma curva monotônica gerada por uma expressão matemática cujos parâmetros são definidos pelo processo de maximização de verossimilhança, realizado pelo R. Os variogramas experimental e teórico, para a profundidade de 13 m são exibidos na Figura 4.

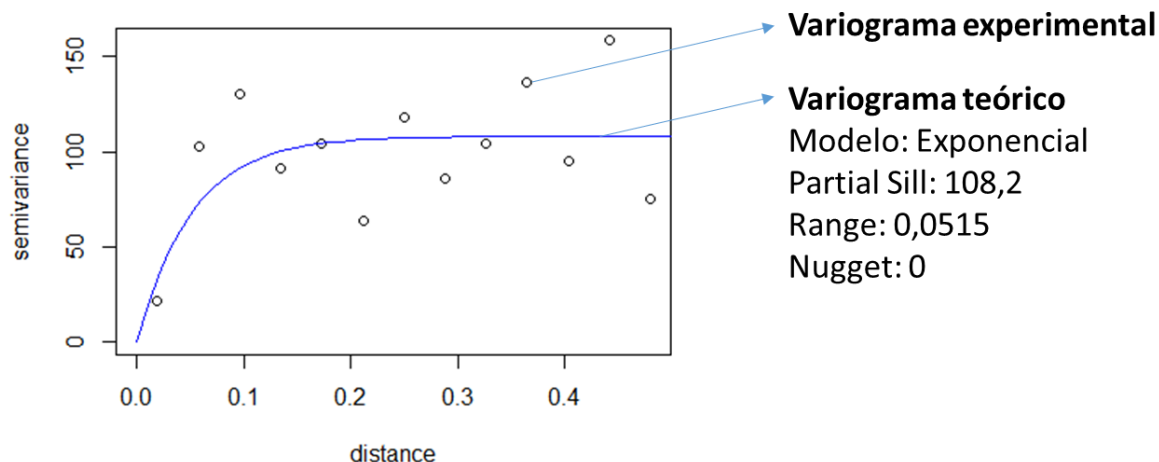


Figura 4 - Variograma para a profundidade de 13 m.

Os parâmetros do variograma teórico definem o formato da curva. Os parâmetros do variograma são o modelo, o partial sill, o range e o nugget. Esses parâmetros foram definidos pelo GeoR, que é uma biblioteca de algoritmos especializados em modelagem geoestatística. O método de ajuste utilizado no GeoR é a maximização da verossimilhança, mas também podem ser definidos pela minimização do erro quadrado ponderado (Weighted Least Squares), ou por ajuste manual.

Os mapas de valores médios para a camada de 1 m, exibidos na Figura 5, foram discretizados em uma malha de 30 m por 30 m, já os mapas de percentil foram discretizados em uma malha de 60 m por 60 m, isso porque o processo de obtenção deste último é mais intensivo computacionalmente. Ele é feito por amostragem da distribuição condicionada, em que cada quadrado é amostrado 1000 vezes.

Como os cálculos para obter os valores de percentil são feitos por amostragem, semelhante ao que é feito em uma Simulação de Monte Carlo, a transição dos mapas de percentil não é tão suave quanto o mapa de médias, que é obtido por meio de um cálculo único. A medida em que o número de simulações aumenta, a transição vai ficando cada vez mais suave.



Figura 5 – Mapa de valores médios obtidos pela interpolação por krigagem.

A seguir são mostrados os mapas de krigagem do SPT para todas as profundidades, até os 15 m. Para as profundidades de 2, 3, 6, 7, 8, 9 e 11 m não foi detectada autocorrelação espacial nos dados, então os mapas de krigagem ficariam como um valor único dado pela estatística clássica. O mapa da esquerda são os valores médios, o mapa da direita são os percentis de 5%, que são os valores que possuem uma probabilidade de 5% de que o valor real seja inferior.

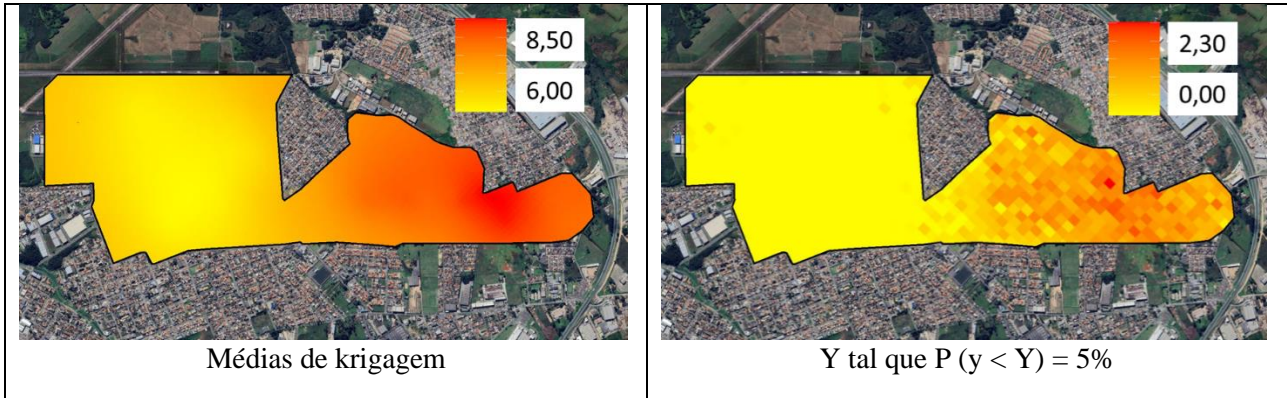


Figura 6 - Krigagem para a camada de 4 metros

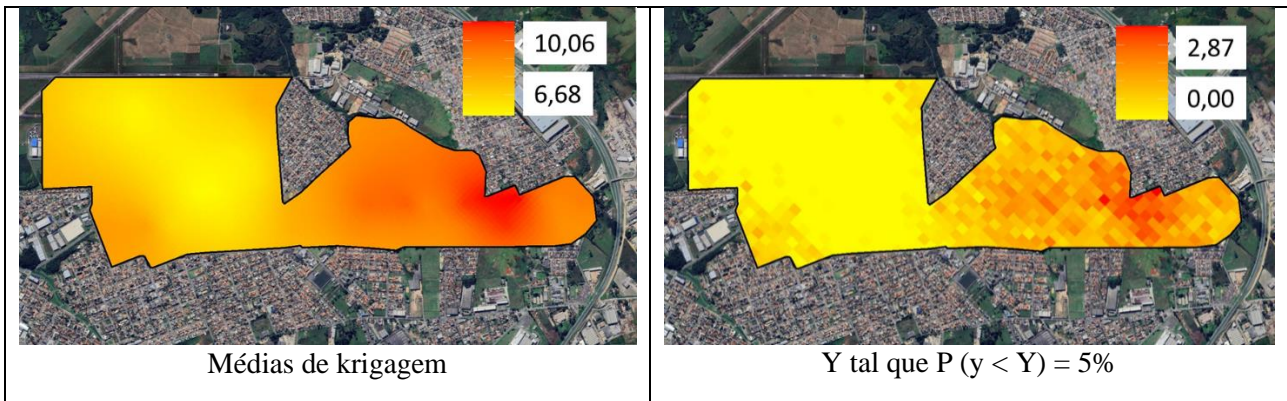


Figura 7 - Krigagem para a camada de 5 metros

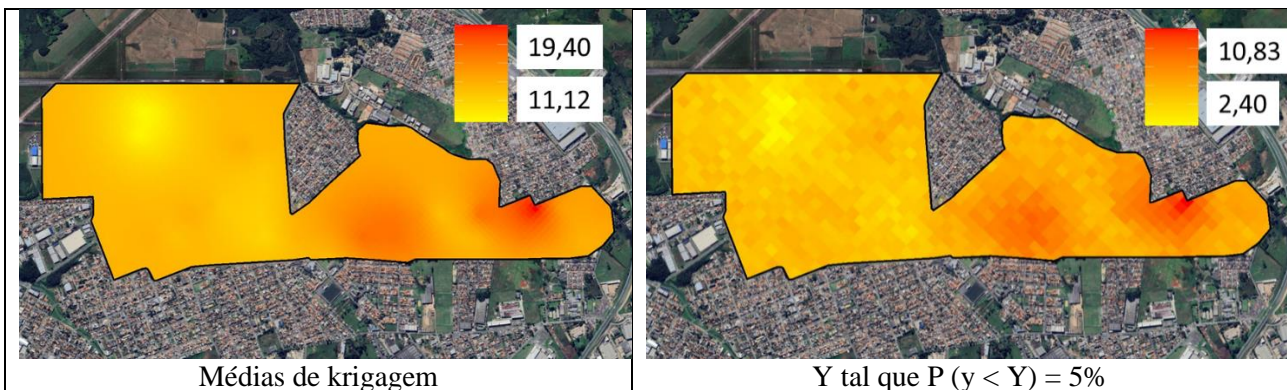


Figura 8 - Krigagem para a camada de 10 metros

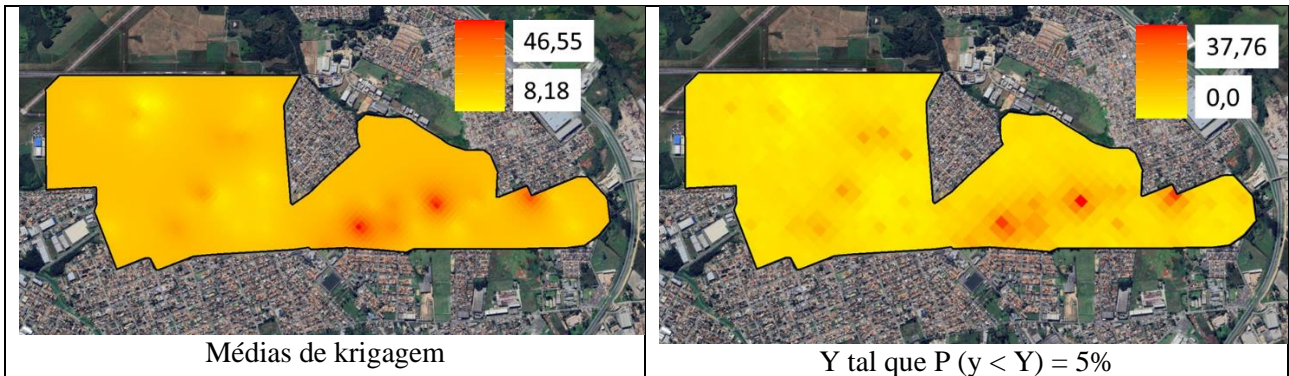


Figura 9 - Krigagem para a camada de 12 metros

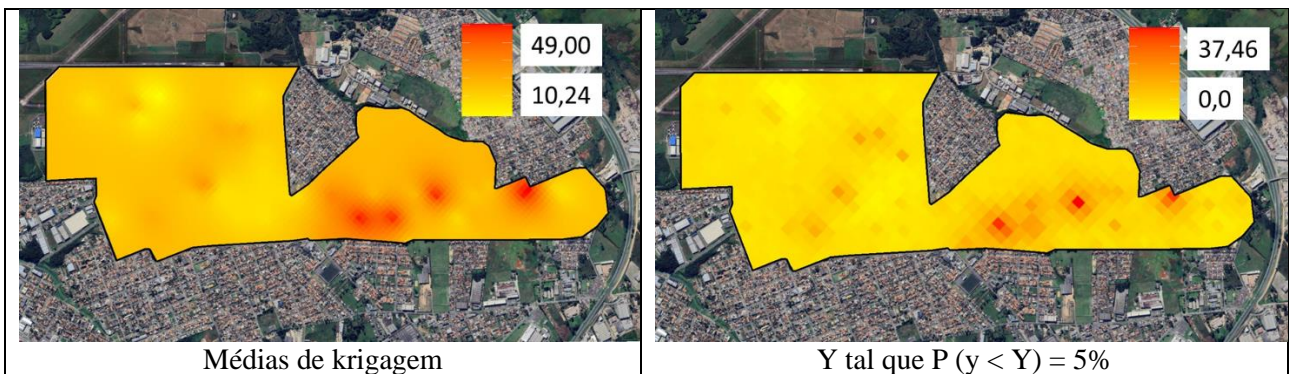


Figura 10 - Krigagem para a camada de 13 metros

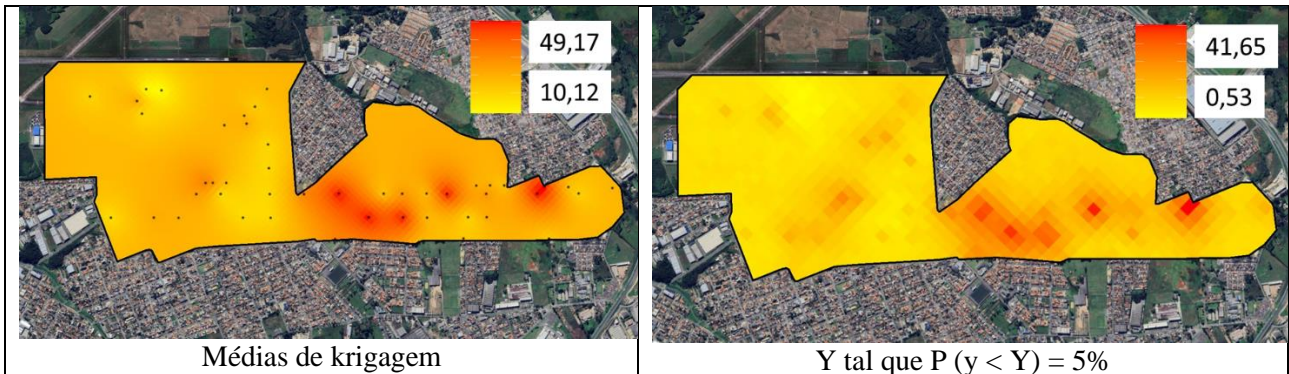


Figura 11 - Krigagem para a camada de 14 metros

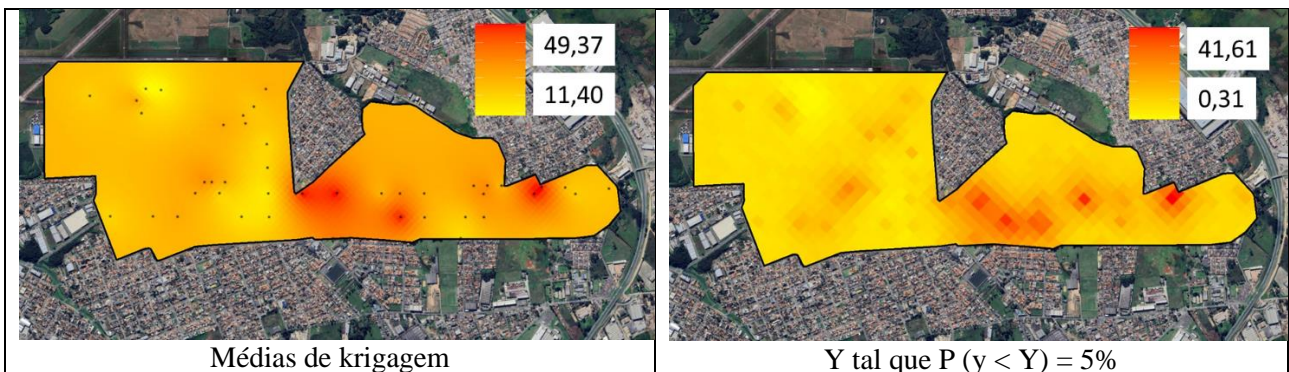


Figura 12 - Krigagem para a camada de 15 metros

5 CONCLUSÕES

Os mapas de krigagem ficaram coerentes entre as diferentes profundidades, pois as regiões ficaram aproximadamente coincidentes. Isso ajuda a detectar regiões mais críticas do terreno. Porém é importante destacar que o gráfico de médias de krigagem possui uma variabilidade menor que os dados amostrais. Essa redução na variabilidade se dá pelo efeito de suavização gerado pela interpolação de krigagem, que é uma espécie de média móvel ponderada.

É importante também destacar que esses dois mapas apresentados são semelhantes porque o valor médio equivale ao percentil de 50%. Então os valores médios são aqueles que possuem 50% de se obter um valor inferior enquanto que o percentil de 5% são aqueles que possuem 5% de se obter um valor inferior.

O percentil de 5% possui a mesma definição do fck do concreto. Esse conceito é importante porque a norma brasileira de fundações NBR 6122 (ABNT, 2019) está buscando definir a resistência das fundações utilizando também um conceito probabilístico do percentil de 5%, denominando a capacidade de carga das estacas como carga característica.

A modelagem bidimensional utilizada neste trabalho possui limitações pois não leva em conta a influência de dados na direção vertical ou sub-vertical. Essa limitação pode ser superada por meio de variogramas que levam em conta a continuidade espacial nas três dimensões e da discretização do terreno em blocos chamados de voxels. Com isso o modelo fica mais representativo e fiel à realidade pois leva em conta a estrutura de continuidade espacial tridimensional, assim como o terreno que está sendo modelado é tridimensional. O autor deste artigo está realizando a modelagem geoestatística tridimensional de parâmetros de resistência do solo em sua tese de mestrado pela UFPR.

Outra limitação é a consideração de que todo o terreno do aeroporto, que possui área de aproximadamente 4 km², faz parte de uma mesma população com estacionariedade estatística, isto é, o variograma é o mesmo em todo o terreno. Uma modelagem mais precisa teria que subdividir o terreno em sub-áreas, mas isso dependeria de uma amostragem mais densa, para que os variogramas pudessem ser modelados corretamente.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Universidade Federal do Paraná pela realização do mestrado em Geotecnia, à Capes pela concessão da Bolsa de Mestrado, à empresa IGeo Engenharia Geotécnica por ceder os dados de SPT e ao meu orientadores, Vitor Pereira Faro e Wagner Hugo Bonat.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2019). NBR 6122. *Projeto e execução de fundações*. Rio de Janeiro.
- Baecher, G. B., Christian, J. T. (2003) *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*, Wiley, Inglaterra. 605 p.
- Diggle, P., Ribeiro Jr., P.J. (2007), *Model-based Geostatistics*, Springer, Inglaterra, 2007. 129 p.
- Fenton, G.A., Griffiths, D.V., Williams, M.B. (2005) Reliability of traditional retaining wall design. *Geotechnique*. 55(1): 55-62.
- Griffiths, D. V., Fenton, G. A. (2004) Probabilistic analysis of underground pillar stability. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, ASCE 130(5): 507-518.
- Lacasse, S., Nadim, F. (1996) Uncertainties in characterising soil properties. *Uncertainty in the Geologic Environment: From Theory to Practice*. ASCE 58: 49-75.
- Olavo, L.H.F. (2009) *Avaliação da variabilidade espacial do solo através dos gráficos de cravação de estacas: Estudo de caso*. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, UFPR.
- Propescu, R., Deodatis, G., Nobahar, A. (2005) Effects of random heterogeneity of soil properties on bearing capacity. *Probabilistic Engineering Mechanics*. Vol. 20: 324-341.
- Sturaro, J. R. (1994) *Mapeamento geoestatístico de propriedades geológico-geotécnicas obtidas de sondagens de simples reconhecimento*. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos / USP, 183 p.