



Análise da malha de sondagens realizadas para caracterização do solo – Uma aplicação geoestatística na região de Suape/PE

Denise Itajahy Sasaki Gomes Venturi
DsC, UFPE, Pernambuco, Brasil, sasaki.denise@gmail.com

Roberto Quental Coutinho
Prof. DsC, UFPE, Pernambuco, Brasil, rqc@ufpe.br

RESUMO O dimensionamento de fundações é, muitas vezes, realizado apenas com base nos dados das sondagens à percussão, sendo estas as investigações geotécnicas mais comuns no Brasil. Contudo, como muitas vezes a área a ser avaliada é extensa, recorre-se à métodos de extrapolação dos resultados das sondagens para obtenção de valores em pontos não investigados. Este trabalho irá apresentar os resultados de uma análise geoestatística realizada na região de Suape/PE para predição da camada impenetrável ao trépano. Os estudos foram realizados em uma área de aproximadamente 370.000 m², onde foram realizadas 264 sondagens à percussão com SPT. O resultado da análise geoestatística por meio da krigagem ordinária forneceu, como resultado, um mapa de superfície indicativo da elevação impenetrável ao trépano, para toda a região em estudo, possibilitando a obtenção de valores para toda a região. Como resultado adicional, a partir da validação dos resultados com pontos investigados (validação cruzada), houve a geração de um mapa com indicativo das regiões em que ou há deficiência de amostras ou há grande variabilidade nos dados das amostras, o que demandaria novas investigações para confirmação dos resultados.

PALAVRAS-CHAVE: investigações geotécnicas, sondagens, spt, geoestatística, krigagem.

ABSTRACT: The dimensioning of foundations is often carried out only based on data from percussion soundings, these being the most common geotechnical investigations in Brazil. However, as the area to be evaluated is often extensive, methods of extrapolation of the survey results are used to obtain values at points not investigated. This work will present the results of a geostatistical analysis carried out in the region of Suape/PE to predict the trephine impenetrable layer. The studies were carried out in an area of approximately 370,000 m², where 264 percussion probes were carried out with SPT. The result of the geostatistical analysis through ordinary kriging provided, as a result, a surface map indicative of the elevation impenetrable to the trephine, for the entire region under study, making it possible to obtain values for the entire region. As an additional result, based on the validation of the results with investigated points (cross-validation), a map was generated with an indication of the regions where either there is a lack of samples or there is great variability in the sample data, which would require further investigations to confirmation of results.

KEYWORDS: geotechnical investigations, soundings, spt, geostatistics, kriging.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.





1 Introdução

Fundações por estacas são caracterizadas por suportarem cargas elevadas a partir do alcance e distribuição das cargas às camadas mais profundas do solo. O dimensionamento de fundações no Brasil é, por vezes, realizado apenas com base nos dados das sondagens à percussão com SPT (do inglês *Standard Penetration Test*). Há nas literaturas técnicas diversos métodos semiempíricos para previsão da capacidade de carga e comprimento de fundações em estacas, considerando os dados do NSPT e da estratigrafia do solo, o que torna fundamental o conhecimento do perfil de solo nas regiões de interesse.

Devido ao alto custo e aos recursos limitados, as investigações do solo são realizadas em número limitado e em locais selecionados. Conforme apontado por Webster e Oliver (2007), as investigações dos solos nas áreas de interesse são realizadas em relação a centímetros (ou metros) de diâmetro e, neste cenário, estas investigações podem ser consideradas como pontuais. Ainda segundo os autores, as amostras são realizadas separadas por distâncias relativamente largas e, ainda assim, estas amostras são utilizadas para representar as regiões integralmente, sem vieses.

Em locais com existência de variabilidade de determinados atributos de solos, limitadas investigações geotécnicas e a consideração de investigações pontuais para caracterização integral de uma região podem não fornecer dados suficientes para uma tomada de decisões mais assertiva. As ferramentas e/ou métodos de interpolação podem ser empregados para a previsão dos atributos de interesses em pontos não investigados.

De acordo com Webster e Oliver (2007), muitas tentativas de previsão espacial eram basicamente matemáticas, baseadas na geometria das amostras realizadas e considerando a variação determinística e não o erro atrelado à previsão. Neste contexto, as análises geoestatísticas, como a krigagem, surgem como alternativa para geração de resultados baseados em médias ponderadas de dados.

Em uma determinada região no município de Ipojuca, no estado de Pernambuco, as sondagens à percussão indicaram a presença de uma superfície impenetrável ao trépano, em profundidades com grande variação e relativamente superficiais em relação à cota de implantação de um dado empreendimento no local. Posteriormente, com a realização de sondagens rotativas, esta camada impenetrável foi identificada como o topo do maciço rochoso.

Devido ao porte e carga das estruturas as suas fundações foram avaliadas entre estacas do tipo hélice do tipo raiz e, neste cenário, a identificação da profundidade do topo do maciço rochoso foi um dos fatores determinantes na definição do tipo de estaca a ser utilizado em determinada área do empreendimento.

Este trabalho teve como objetivo a análise comparativa da estimativa do topo do maciço rochoso da região referenciada, sendo este topo do maciço rochoso obtido a partir da interpolação euclidiana pelo método do inverso do quadrado da distância (IDW, do inglês *Inverse Distance Weighted*) e a partir da análise geoestatística por krigagem ordinária. Como resultados, foram gerados mapas hipsométricos da camada representativa deste topo do maciço rochoso, a partir do qual foram geradas curvas de nível apenas para comparação dos resultados.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



Realização:



Avenida Rebouças, 353, Sala 74 A
Cerqueira César, São Paulo/SP, 05401-900
Telefone: (11) 3052-1284
E-mail: abef@abef.org.br

Organização:



Avenida T-9, 2310 - Ed. Inove Intelligent Place
Sala B701, Jardim América, Goiânia/GO, 74255-220
E-mail: secretaria@qeeventos.com.br
Site: www.qeeventos.com.br

2 Metodologia

2.1 Área de Estudo

Este estudo foi realizado em uma área de aproximadamente 850 m x 600 m, em uma região de Suape, no município de Ipojuca, em Pernambuco. A área de estudo contou com 263 investigações geotécnicas tipo sondagens com medição de SPT (do inglês *Standard Penetration Test*), realizadas entre os anos de 2007 e 2009. As sondagens foram realizadas em uma malha, dispostas em torno de 40 m x 40 m (Figura 1), podendo esta disposição das amostras ser considerada como regular e sistemática, sem agrupamento de pontos em possíveis áreas de interesse (Yamamoto e Landin, 2015).

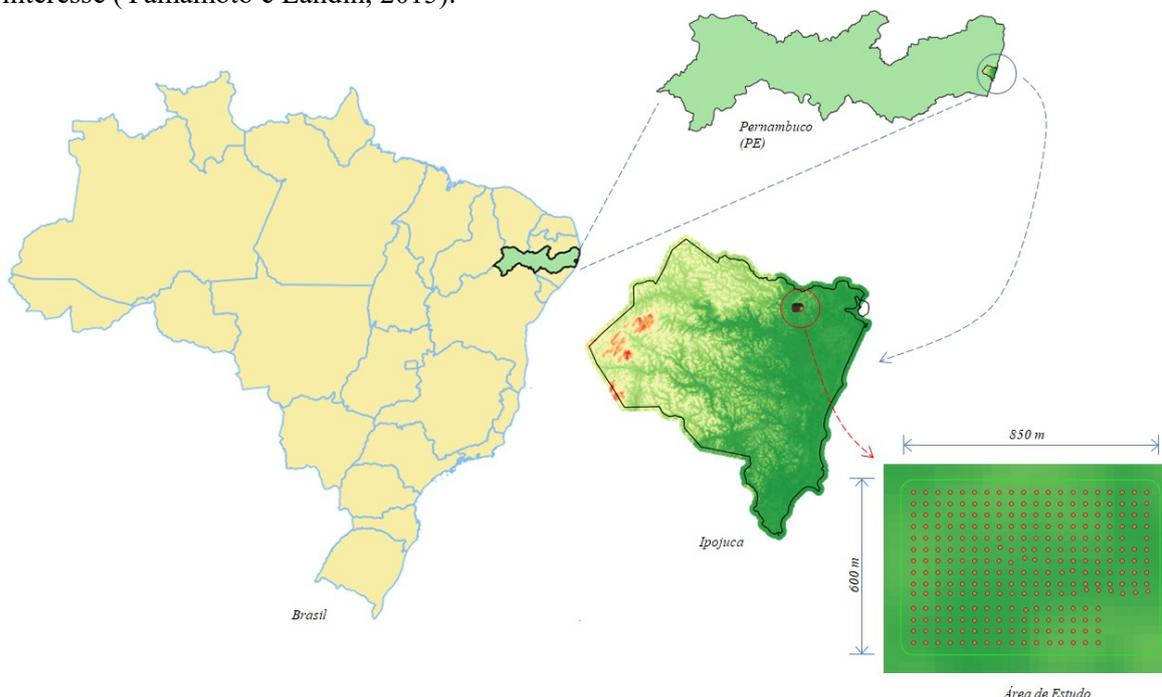


Figura 1. Localização da área de estudo.

As sondagens realizadas apresentaram uma camada impenetrável ao trépano variando entre -8,7 m a 22,5 m (representando uma variação de 31,5 m na área em estudo). A partir do resultado de sondagens à percussão realizados na região, este impenetrável ao trépano foi caracterizado como o topo do maciço rochoso.

Os dados e coordenadas dos pontos amostrais foram extraídas dos relatórios das investigações realizadas, cujas coordenadas de localização dos pontos foram apresentadas no sistema de coordenadas projetadas UTM (*Universal Transversa de Mercator*), Zona 23 sul, *Datum* de referência SAD 69 (*South American Datum*).

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



2.2 Materiais e Métodos

A etapa inicial deste estudo consistiu na seleção e preparação dos dados a serem utilizados nas análises. Foram selecionadas 263 sondagens, sem repetições, distribuídas em malha retangular praticamente uniforme, no interior da área de estudo.

Dentro da área de estudo as sondagens foram agrupadas em duas malhas regulares, referenciados como Malha 1 e Malha 2. A Malha 1 contemplou as 263 sondagens, espaçadas entre si a 40 m (para norte e para leste). A Malha 2, por sua vez, foi composta por apenas 65 sondagens dentre as 263 existentes, espaçadas entre si a aproximadamente 80 m (para norte e para leste).

O processamento e análise dos dados foram realizados no QGIS1, um software para sistema de informações geográficas (SIG ou GIS, do inglês *Geographic Information System*), gratuito e de código aberto. A interpolação pelo inverso do quadrado da distância (IDW) foi realizada com o recurso Interpolação IDW, enquanto as análises geoestatísticas foram realizadas com apoio do complemento *Smart-Map*. Os dados de entradas foram as coordenadas dos pontos de investigações e o valor da elevação do impenetrável ao trépano, sendo este último a variável de interesse das interpolações.

Por meio da interpolação IDW, os pontos amostrais espalhados espacialmente dentro de um raio de busca são contabilizados em um valor médio, sendo este valor médio obtido a partir da aplicação de um peso, que é o inverso da distância. Ou seja, a influência de um ponto em relação ao outro decresce com o aumento da distância entre estes pontos.

O cálculo do IDW é dado pela fórmula (Melo et al, 2003):

$$Z(x_0) = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2} x_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^2}} \quad (1)$$

em que x_0 é um ponto não amostrado, n é o número de amostras, x_i é o valor do atributo no i -ésimo ponto de amostragem e d_i é a distância euclidiana entre o i -ésimo ponto de vizinhança e o ponto amostrado.

A krigagem ordinária é definida, segundo Yamamoto e Landim (2013), como um método local de estimativa a partir do qual os pontos não amostrados são resultantes da combinação linear dos valores encontrados na vizinhança próxima, considerando um estimador dado por:

$$Z_{KO}^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad (2)$$

¹ Disponível em: www.qgis.org



em que x_0 é um ponto não amostrado, n são os valores obtidos nos pontos adjacentes e λ_i são os pesos associados aos n dados.

Ainda segundo os autores (Yamamoto e Landim, 2013) os pesos são calculados considerando amostras não enviesadas e variância mínima, com a variância calculada a partir do semivariograma.

Parte dos dados das sondagens apresentadas compõem o estudo de Venturi e Coutinho (2018).

3 Resultados e Discussão

As análises foram realizadas com duas malhas de sondagens, cujas quantidades de pontos e valores máximos, mínimos e médios seguem apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados da Malha 1 e Malha 2.

	Malha 1	Malha 2
Pontos	263	65
Valor Mínimo (m)	-8.668	-5.49
Valor Máximo (m)	22.514	21.689
Valor Média (m)	8.384449	9.365508

A primeira malha, denominada Malha 1 contou com 263 sondagens, com elevação do material impenetrável ao trépano variando entre -8,668 m a 22.514 m. A segunda malha, denominada Malha 2, contou com 65 sondagens, com elevação do material impenetrável ao trépano variando entre -5,49 m a 21,689 m.

A Figura 2 apresenta o resultado da análise por krigagem ordinária, em forma de um mapa hipsométrico, para a Malha 1. Os pontos de sondagens participantes da análise bem como as curvas de nível geradas (com distâncias de 2,0 m entre curvas) seguem também representados na referida figura.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



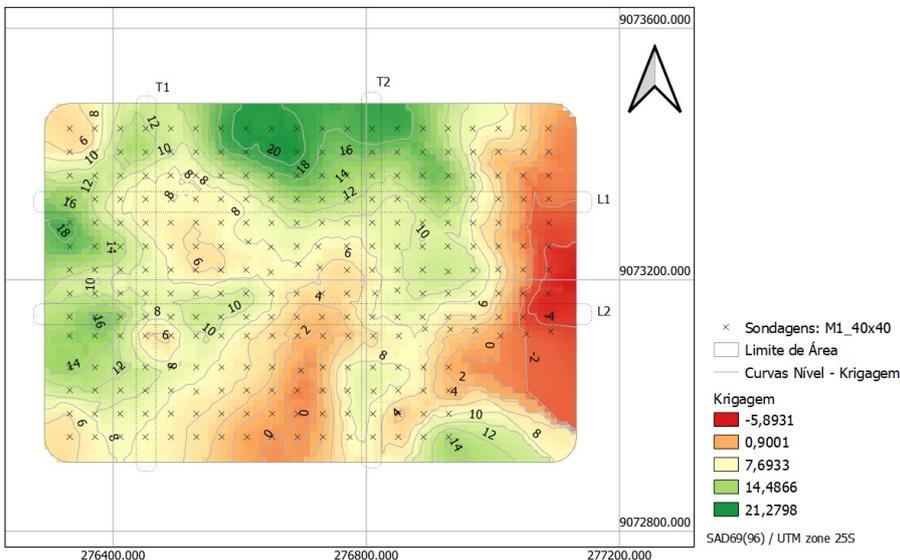


Figura 2 – Resultado da análise por krigagem: Malha 1 (40 m x 40 m)

A Figura 3 apresenta o resultado da análise por IDW, em forma de um mapa hipsométrico, para a Malha 1. Os pontos de sondagens participantes da análise bem como as curvas de nível geradas (com distâncias de 2,0 m entre curvas) seguem também representados na referida figura.

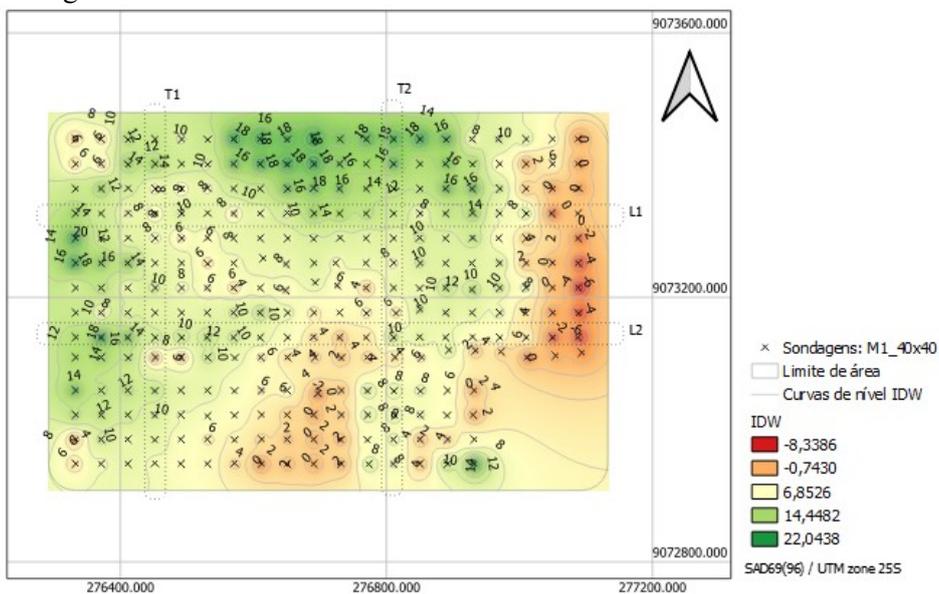


Figura 3 – Resultado da análise por IDW: Malha 1 (40 m x 40 m)

A Tabela 2 apresenta os valores máximos e mínimos amostrados e resultantes da análise por krigagem ordinária e por IDW, além dos valores amostrados, para a Malha 1. Pode ser verificada a tendência de suavização dos resultados, isto é, o não alcance dos valores máximos e mínimos da elevação do topo do maciço rochoso, para os resultados por krigagem ordinária. Este efeito de suavização de resultados fica bem nítido ao analisar o mapa hipsométrico e as

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



curvas de nível apresentadas na Figura 2, em comparação ao mesmo mapa hipsométrico e curvas de nível gerados pela análise IDW, com resultados menos suavizados, apresentados na Figura 3.

Tabela 2 – Dados da Malha 1

	Valores amostrados	Krigagem Ordinária	IDW
Valor Mínimo (m)	-8.668	-5,8931	-8,3386
Valor Máximo (m)	22.514	21,2798	22,0438

A Figura 4 apresenta os perfis longitudinais (L1 e L2) e transversais (T1 e T2) elaborados a partir dos resultados da análise por krigagem ordinária e pela IDW. Nestes perfis, pode ser verificada a suavização dos resultados por krigagem, assim como a “passagem forçada” pelos pontos amostrais nos resultados de IDW. Apesar das discrepâncias relacionadas a valores de picos e próximos aos pontos amostrados, pode ser verificada a proximidade nos resultados para estas duas análises.

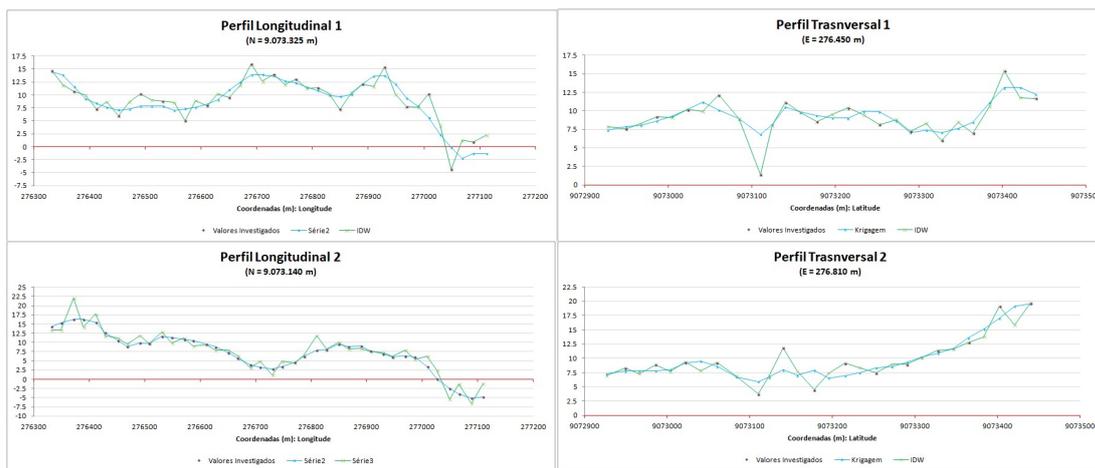


Figura 4 – Perfis longitudinais e transversais: Malha 1 (40 m x 40 m)

A Figura 5 apresenta o resultado da análise por krigagem ordinária, em forma de um mapa hipsométrico, para a Malha 2. Os pontos de sondagens participantes da análise bem como as curvas de nível geradas (com distâncias de 2,0 m entre curvas) seguem também representados na referida figura.

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.



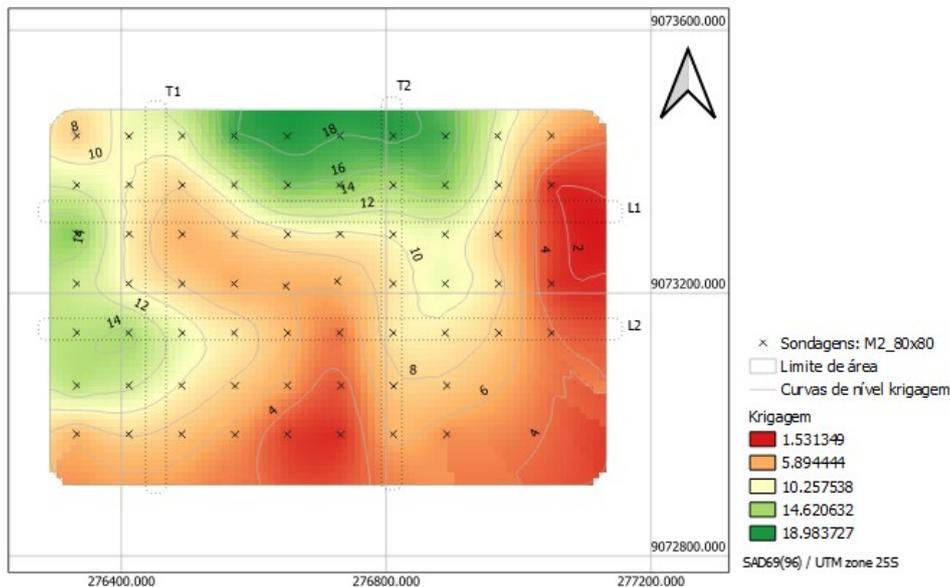


Figura 5 – Resultado da análise por krigagem: Malha 2 (80 m x 80 m)

A Figura 6 apresenta o resultado da análise por IDW, em forma de um mapa hipsométrico, para a Malha 2. Os pontos de sondagens participantes da análise bem como as curvas de nível geradas (com distâncias de 2,0 m entre curvas) seguem também representados na referida figura. Os valores máximos e mínimos para os pontos amostrais e para as análises de krigagem ordinária e IDW seguem apresentados na Tabela 2.

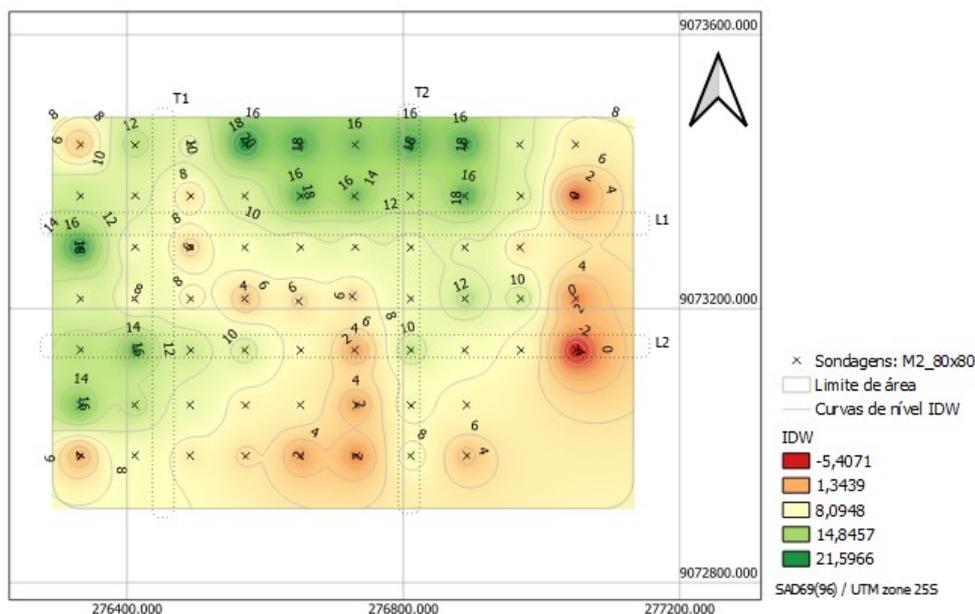


Figura 6 – Resultado da análise por IDW: Malha 2 (80 m x 80 m)

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.



A Tabela 3 apresenta os valores máximos e mínimos amostrados e resultantes da análise por krigagem ordinária e por IDW, além dos valores amostrados, para a Malha 2.

Tabela 3 – Dados da Malha 2

	Valores amostrados	Krigagem Ordinária	IDW
Valor Mínimo (m)	-5,49	1,5313	-5,4071
Valor Máximo (m)	21,689	18,9837	21,5966

A Figura 7 apresenta os perfis longitudinais (L1 e L2) e transversais (T1 e T2) indicados na Figura 5 (resultados da análise da krigagem para a Malha 2) Figura 6 (resultados da análise do IDW para a Malha 2). Assim como para a Malha 1, os perfis da Malha 2 apresentaram trechos com comportamentos semelhantes, com tendência à suavização dos resultados para krigagem ordinária.

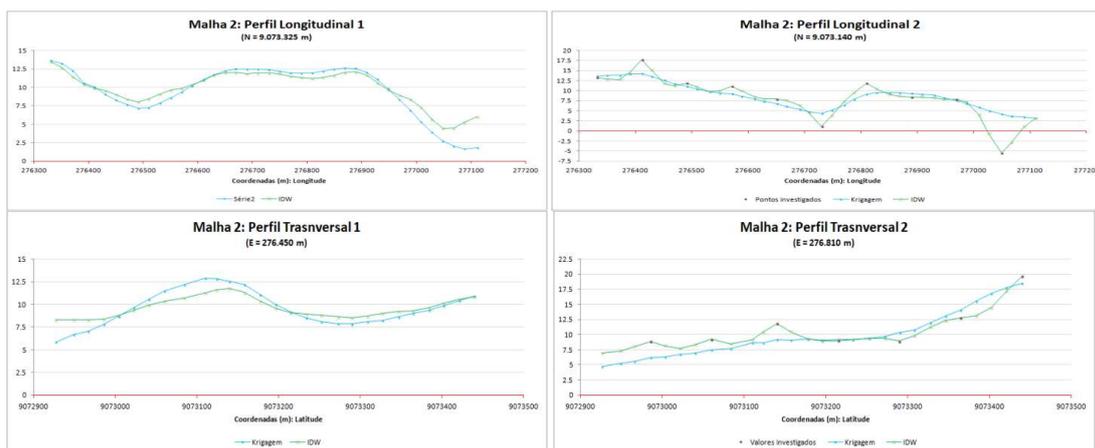


Figura 7 – Perfis longitudinais e transversais: Malha 2 (80 m x 80 m)

Apesar de conter menos pontos amostrais, a Malha 2 apresentou resultados relativamente próximos aos valores da Malha 1. Contudo, comparando os mapas hipsométricos gerados (Figura 2 e Figura 3 para a Malha 1 e Figura 5 e Figura 6 para a Malha 2) pode-se verificar que os resultados relacionados à Malha 1 podem ser classificados como mais refinados, apresentando uma distribuição mais suave e maior delimitação dos valores interpolados no espaço físico.

3 Conclusões

Os resultados das duas análises (krigagem ordinária e inverso do quadrado da distancia) mostraram-se eficientes na construção de uma superfície representativa do maciço rochoso, dada a regularidade da malha de investigações (sondagens) realizadas. Estas análises permitem uma melhor análise da variabilidade espacial do fenômeno em estudo.

A análise por krigagem ordinária apresentou resultados suavizados relacionados à geração da superfície do maciço rochoso, quando comparada esta superfície com a superfície gerada pelo resultado da análise do inverso do quadrado da distancia (IDW).

Aponte a câmera do seu smartphone para o QR Code ao lado e salve o evento na sua agenda.





A grande vantagem na utilização da krigagem ordinária consiste na estimativa do erro associado, a partir da análise de validação cruzada. Neste contexto, esta análise possibilita a verificação de regiões com erro associado acima de algum limite determinado, o que serviria como um indicativo de necessidade de realização de investigações adicionais nesta área, para uma decisão mais assertiva.

Este estudo mostrou, ainda, que há, disponíveis no mercado, softwares de uso livre (gratuitos) que possibilitam a realização de análises poderosas para obtenção de valores não investigados de solo, que irão facilitar a tomada de decisões mais assertivas pelas equipes de engenharia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Mello, C. R., Lima, J. M., Silva, A. M., Mello, J. M. e Oliveira, M. S. **Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas**. R. Bras. Ci. Solo. V. 27, pp. 925-933. 2003.

Silva, R. A. **A comparative analysis between the Geostatistics and Machine Learning methods for mineral resource estimation**. International Journal of Geoscience, Engineering and Technology, vol. 2 pp. 14-22. 2020

Venturi, D. I. S. G, Coutinho, R. Q. **Análise da capacidade de carga de fundações profundas e uma visão geoestatística da variabilidade do perfil de solo / maciço rochoso em uma área de Suape-PE**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Recife, 2018.

Webster, R. e Oliver, M. A. **Geostatistics for Environmental Scientists**. 2ª Ed. John Wiley & Sons, Ltd. 2007.

Yamamoto, J.K., e Landim, P.M.B., **Geoestatística: conceitos e aplicações**. Oficina de textos. 2015.

Aponte a câmera do seu
smartphone para o
QR Code ao lado e salve o
evento na sua agenda.

