

10º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE KRIGAGEM COM TENDÊNCIA PARA AUXÍLIO EM PROJETO DE INÍCIO DE POÇO DE PETRÓLEO

AUTORES:

PEDRO HENRIQUE MATIAS SILVA¹, CHRISTIANO AUGUSTO FERRÁRIO VÁRADY FILHO¹, JOÃO PAULO LIMA SANTOS², EDUARDO TOLEDO DE LIMA JÚNIOR², RAFAEL DIAS³, FÁBIO SAWADA CUTRIM⁴

INSTITUIÇÃO:

¹LCCV/UFAL, ²UFAL, ³CENPES/PETROBRAS, ⁴POÇOS/CTPS/PETROBRAS

APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE KRIGAGEM COM TENDÊNCIA PARA AUXÍLIO EM PROJETO DE INÍCIO DE POÇO DE PETRÓLEO

Abstract

In early oil well projects, geotechnical characterization is of fundamental importance in the study of the axial load capacity of the soil and its implications on the design of the conductive lining. In this sense, the characterization develops numerical models based on soil data from surface investigations, providing greater safety for the next stages of drilling, laying and cementing of the surface coating. Due to the complexity and operational cost, soil data are generally limited, especially in offshore environments, so that the choice of characteristic values is based on subjective judgment and the accumulated experience of the designer. For conductive liner design, a numerical soil model should be adopted as representative. Thus, it is fundamental that the chosen model represents the spatial continuity of the evaluated soil data, associated to the natural phenomenon of its formation. Classical statistics, although quantitative evaluations are made, cannot use spatial information associated with the values to model. Within geostatistics, the variogram technique provides the construction of a model that represents the variance of the data with the distance from a point of interest, allowing the spatial estimation of its representative values. In addition, the kriging technique has great importance for its optimizing character enabling the achievement of calculated values with greater impartiality. The combination of these techniques can guarantee interesting results for applications in well start-up projects. The present work aims at the application of geostatistical methods, especially the construction of variograms and kriging methods with tendency from CPT (cone penetration test) test data. The results point to kriging techniques with tendency as good tools for applications in early well projects, considering their optimizing character through the spatiality of the phenomenon and the mapping of the uncertainties involved.

Introdução

O desafio de produção em águas cada vez mais profundas, exige maior complexidade e robustez aos projetos de poços de petróleo. Para a fase de início de poço, a investigação sobre a distribuição espacial de parâmetros de solo é de suma importância, e um dos interesses está em caracterizá-lo geotécnicamente, a fim de avaliar sua capacidade de carga axial conforme regulamentação API-RP-2A (2011).

Segundo Lacasse *et al.* (2007), os solos naturalmente apresentam propriedades variáveis devido ao próprio processo de formação, o que gera incertezas em suas características mecânicas. Vários trabalhos e estratégias têm sido propostos no intuito de desenvolver modelos numéricos para inferir parâmetros de solo numa localização de interesse não conhecida levando-se em conta a continuidade espacial, associada ao fenômeno natural de sua formação conforme visto em DNV-RP-C207 (2012).

A estatística clássica, embora faça avaliações quantitativas, não consegue descrever informações espaciais associadas aos valores. Nesse aspecto, a geoestatística surge como opção e por meio do variograma propõe uma função para descrever quantitativamente a variância de determinado fenômeno no espaço. Sua análise permite a identificar, qualificar e compreender a variação espacial do fenômeno estudado a partir de dados amostrais aparentemente aleatórios e independentes.

Os preditores geoestatísticos por krigagem utilizam as informações da vizinhança amostrada para incorporar a dependência espacial de um processo estocástico, aperfeiçoando assim, as previsões, sem gerar vieses e com mínima variância. A literatura apresenta diversos tipos de

krigagens, com maior maiores aplicações para a krigagem ordinária, a qual considera a média flutuante por toda a área, e krigagem com tendência, para quando se detecta tendência nos dados.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo aplicar duas técnicas de krigagem com tendência em confronto com a de krigagem ordinária sobre três conjuntos amostrais de resistência não drenada para a geração de superfícies de ajuste que representem a distribuição contínua desse parâmetro em solos *offshore*. Pretende-se a partir de validação cruzada avaliar os resíduos obtidos para cada uma das três técnicas para as três profundidades avaliadas.

Metodologia

O cálculo de parâmetros de solo pode, ao invés de levar em consideração dados de um único ensaio CPT, utilizar vários resultados de ensaios correlacionados com suas respectivas geolocalizações. A utilização da técnica de krigagem possibilitará estimativas sem vieses e com a menor variância possível.

Segundo Matheron (1963), o ponto de partida para o desenvolvimento da geoestatística ocorreu a partir da incapacidade da estatística clássica em considerar o aspecto espacial de um fenômeno, que constitui a feição mais importante num estudo geológico.

O elemento básico da geoestatística é a variável regionalizada, cuja variação caracteriza o fenômeno espacial que a originou. Estas variáveis possuem características casuais e estruturadas, ou seja, podem assumir localmente qualquer valor segundo uma função de probabilidade e globalmente possuem uma estruturação que pode ser tratada por uma função espacial, Journel & Huijbregts (1978).

As variáveis regionalizadas são baseadas nas definições de processo aleatório e estacionariedade dos dados. Em um processo aleatório, o valor Z de uma propriedade em certo ponto x , $Z(x)$, está incluso em um intervalo infinito de possibilidades, mas que pode ser correlacionado espacialmente em alguma escala. Nesse sentido, valores da propriedade Z_i obtidos para pontos específicos x_i são denominados como um processo aleatório de uma variável realizada nos respectivos pontos. Como os fenômenos de formação do solo apresentam continuidade natural mesmo com variabilidades de acordo com sua direção, introduz-se o conceito de estacionariedade, que fundamenta os processos geoestatísticos e permite assumir que existe certo grau mensurável de variação em locais próximos.

De maneira geral, o preceito pode ser representado como os momentos de primeira e segunda ordem. A Equação 1 aponta o momento de primeira ordem (ou esperança matemática) E dada no ponto x para a variável Z , que está definida na Equação 2. Nessas, μ é a média do fenômeno e ϵ é a variação aleatória natural baseada na localização.

$$E\{Z(x)\} = \mu \quad (1) \quad Z(x) = \mu + \epsilon(x) \quad (2)$$

Para que exista a estacionariedade, Matheron (1963) propôs a minimização do erro, de modo que sua variância deveria ser nula. O semi-variograma é definido como:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E\{|Z(x) - Z(x+h)|^2\}. \quad (3)$$

O variograma teórico é apenas uma das ferramentas possíveis. Em outro aspecto, o variograma experimental é estimado a partir dos dados realizados em uma região e, geralmente, é computado usando a fórmula do Método dos Momentos, conforme descrita por Matheron (1965):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2 \cdot m(h)} \sum_{j=1}^{m(h)} \{Z(x_j) - Z(x_j + h)\}^2 \quad (4)$$

com $m(h)$ como o número de comparações (pares) internos ao domínio de comprimento (*lag*) h . Com o incremento de h , consegue-se calcular valores do variograma em função da distância. As combinações de pontos, então, dependem do *lag* usado e das direções tomadas.

Outra opção de construção de variograma consiste no desenvolvimento dos chamados variogramas robustos, os quais apresentam-se como mais precisos quando na presença de *outliers*, conforme tratado por Cressie & Hawkins (1980) e Dowd (1984).

O ajuste de uma curva descreve as principais características da sequência enquanto reduz as flutuações pontuais (ou resíduos). A curva deve apresentar uma expressão matemática capaz de descrever o processo aleatório com a mudança dos *lags* e garantir variâncias positivas nas estimativas. Nesse aspecto, o ajuste esférico, conforme Equação 5, tem maiores aplicações na literatura.

$$\gamma = \begin{cases} C_0 + C \cdot \left\{ \frac{3h}{2r} - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{h}{r} \right)^3 \right\}, & 0 \leq |h| \leq r \\ -C_0 + C, & |h| > r \\ 0, & |h| = 0 \end{cases} \quad (5)$$

Feita a modelagem do variograma, a estimativa por krigagem é o passo seguinte. A nomenclatura krigagem é um termo genérico para um conjunto de métodos de ajustes usando mínimos quadrados para prover as melhores estimativas lineares sem vieses (*Best Linear Unbiased Estimative* - BLUE), objetivando a menor variância possível. A krigagem ordinária, conforme estabelecida por Matheron (1963), é uma das técnicas mais simples de implementação e apresenta bons resultados para diversas situações. O sistema de equações está apresentado na Equação 6.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N \lambda_i \gamma(x_i - x_j) + \psi(x_0) = \gamma(x_j - x_0) \\ \sum_{i=1}^N \lambda_i = 1 \end{cases} \quad (6)$$

Para os casos em que se detecta tendência nos dados, a metodologia da técnica de krigagem é distinta. Tendência consiste na manutenção de um certo comportamento (valor médio de parâmetro, gradiente constante/linear etc.) associado a uma direção específica. No caso das camadas geológicas, a tendência consiste na representação da deriva da respectiva camada. Matheron (1969) desenvolveu a técnica de Krigagem Universal para levar em consideração a presença de tendências.

É um método similar ao da krigagem ordinária, aplicado quando a variável regionalizada não é estacionária, mas apresenta uma tendência e seus resíduos contêm a hipótese intrínseca, o que indica uma média não constante e, conseqüentemente, um variograma que não viabiliza a modelagem precisa da estrutura de correlação espacial dos dados considerados.

Uma variável regionalizada não estacionária pode ser considerada como constituída por dois componentes: i) a tendência, que consiste no valor médio esperado desta variável dentro de certa vizinhança e que varia sistematicamente; e, ii) o resíduo, que é a diferença entre os valores reais e o valor do deslocamento causado pela tendência.

Nestes casos, a krigagem é executada sobre os resíduos para que se possa descrever a estrutura da variação sem tendência. De forma mais direta, se a variável regionalizada representar um processo não estacionário, trabalha-se sobre a estacionariedade residual da variável. Na krigagem

universal, o ajuste local é feito mediante um polinômio de ordem “n” em função das coordenadas dos pontos estimados. A mudança para representação de tendências é representada conforme Equação 7

$$Z(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \beta_k f_k(x) + \epsilon(x) \quad (7)$$

com k funções f_i conhecidas e coeficientes β_i a serem calculados. Um exemplo consiste em modelar uma tendência como um plano inclinado:

$$Z(x) = \beta_0 + \beta_1 x + \beta_2 x + \epsilon(x) \quad (8)$$

Existem críticas com relação à aplicação da krigagem universal, pois embora seja matematicamente correta, surgem dificuldades para separar o fenômeno em duas componentes., uma tendência determinística e uma flutuação aleatória baseada apenas na diferença entre distâncias.

A krigagem dos resíduos é uma opção para os casos de variáveis não estacionárias, cuja deriva pode ser filtrada por uma superfície polinomial de baixo grau ajustada ao conjunto de dados. Segundo Neuman & Jacobson (1984), a estimativa por krigagem dos resíduos consiste em estimar os resíduos e então somá-los à deriva, representada pela superfície de tendência obtida pelo ajuste polinomial.

Para análise dos resultados, a validação cruzada, também conhecida como cokrigagem, provê um meio de escolher, entre diversos métodos, o que melhor se enquadra na amostra. A técnica consiste em, para uma amostra com N pontos, realizar a krigagem usando $N - 1$ pontos, estimar o valor do N -ésimo ponto e calcular o valor do resíduo entre valores calculado e real. O processo deve ser realizado com todos os pontos.

Para dados de resistência não drenada advindos de 9 furos geotécnicos realizados em solo considerado homogêneo, conforme Tabela 1, seguiu-se metodologia supracitada a fim de estimar a disposição espacial dessa variável no plano de cota avaliado a partir de uma discretização das localizações em uma malha de 100x100 e posterior validação cruzada para quantificar as incertezas envolvidas. Conforme política de segurança de informação da empresa, os dados foram descaracterizados. A rotina foi implementada na linguagem computacional *Python*.

Tabela 1. Dados utilizados.

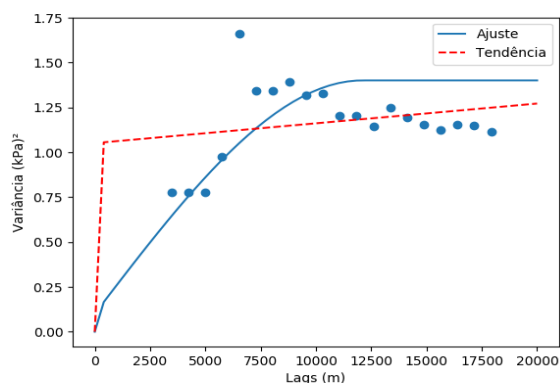
Dados de resistência não drenada por furo				
X (m)	Y (m)	Z(u) (kPa)		
		10m	20m	30m
637500	7610300	17.46	33.63	47.70
635000	7615300	17.45	33.39	53.22
642000	7601300	15.93	27.44	42.11
636000	7603300	18.44	35.17	50.76
649000	7606300	16.50	33.21	48.85
650000	7615300	16.88	35.38	53.34
641000	7604300	16.81	35.17	44.14
632000	7610300	16.76	32.36	47.76
644000	7609300	17.79	32.86	48.48

FONTE: Autor (2019).

Resultados e Discussão

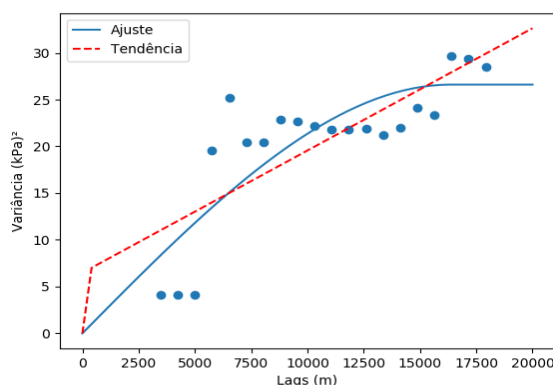
Os variogramas gerados seguiram metodologia de Matheron, a partir de 20 intervalos de lags e podem ser visualizados, para as profundidades de 10 e 30 metros, nas Figuras 1 e 2, respectivamente.

Figura 1 – Variograma para a profundidade de 10m



Fonte: Autor (2019).

Figura 2 – Variograma para a profundidade de 30m

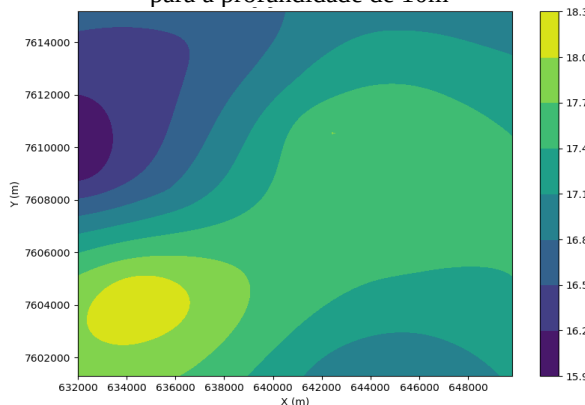


Fonte: Autor (2019).

O variograma para a profundidade de 30 metros possibilita a visualização de uma tendência nos dados, indicando uma não estacionariedade dos valores de resistência não drenada nesta profundidade, o que aponta para a predição por uma das técnicas de krigagem com tendência. Por outro lado, para a profundidade de 10 metros, os dados parecem estabilizar em um patamar teórico próximo de 1,15 kPa², o que permite aplicação da técnica de krigagem ordinária.

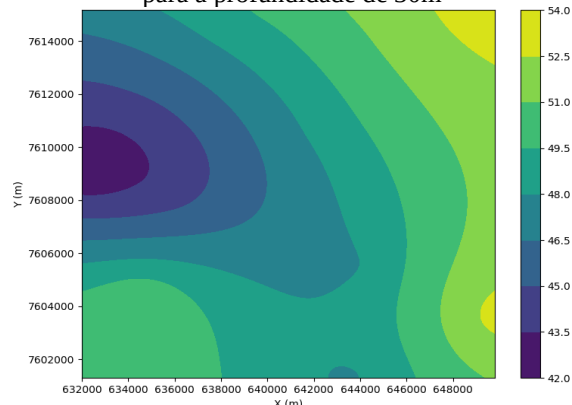
Prosseguiu-se com aplicação das krigagens ordinária, universal e dos resíduos e validação cruzada para as profundidades de 10, 20 e 30 metros, conforme resultados a seguir:

Figura 3 – Estimativa por krigagem ordinária (kPa) para a profundidade de 10m



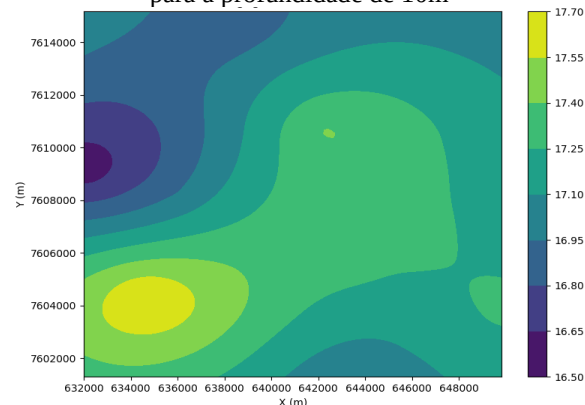
Fonte: Autor (2019).

Figura 4 – Estimativa por krigagem ordinária (kPa) para a profundidade de 30m



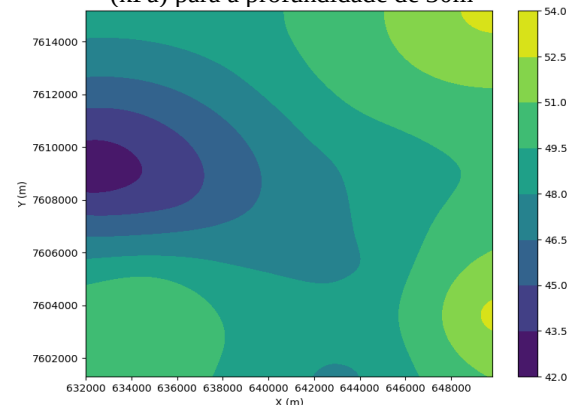
Fonte: Autor (2019).

Figura 5 – Estimativa por krigagem dos resíduos (kPa) para a profundidade de 10m



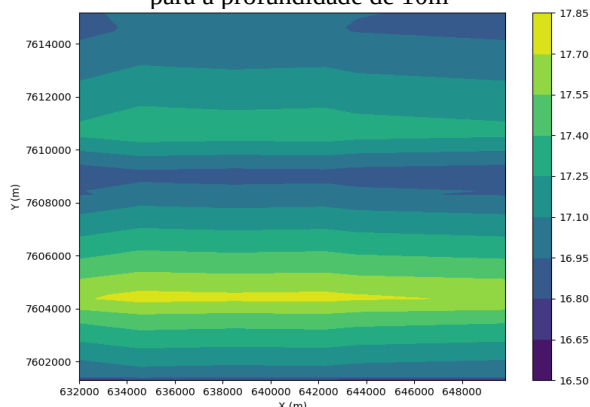
Fonte: Autor (2019).

Figura 6 – Estimativa por krigagem dos resíduos (kPa) para a profundidade de 30m



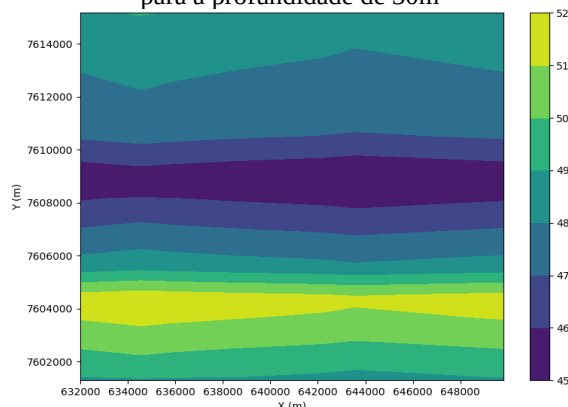
Fonte: Autor (2019).

Figura 7 – Estimativa por krigagem universal (kPa) para a profundidade de 10m



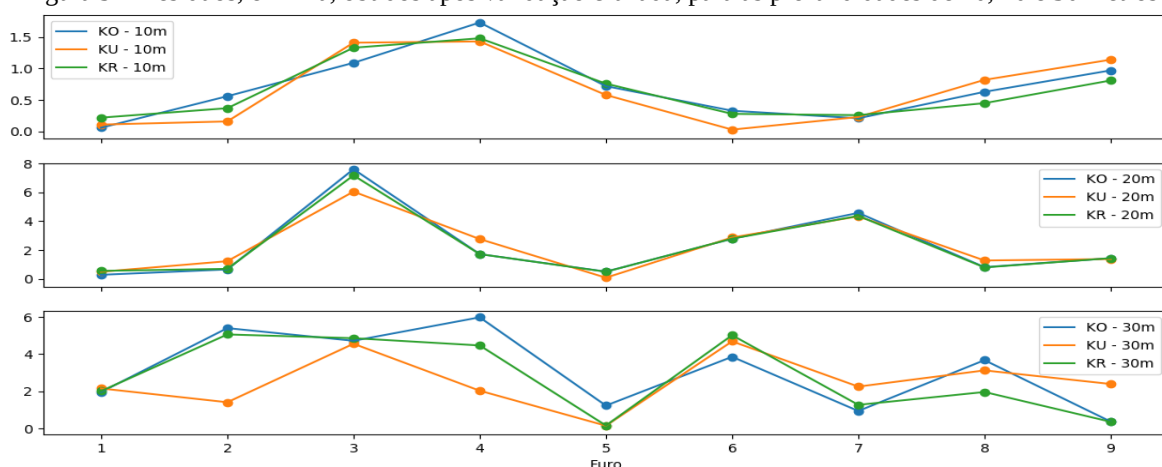
Fonte: Autor (2019).

Figura 8 – Estimativa por krigagem universal (kPa) para a profundidade de 30m



Fonte: Autor (2019).

Figura 9 – Resíduos, em kPa, obtidos após validação cruzada, para as profundidades de 10, 20 e 30 metros



Fonte: Autor (2019).

Dos resultados obtidos para as distribuições espaciais da resistência não drenada na mesma cota de profundidade, pode-se visualizar duas formas distintas de distribuição, de forma que a técnica de krigagem universal difere das demais.

As krigagens ordinária e dos resíduos apresentam a mesma amplitude de variação da resistência e contornos semelhantes, divergindo basicamente num maior achatamento para as formas da krigagem dos resíduos. Por outro lado, os resultados de krigagem universal apresentaram comportamento periódico. Tais comportamentos advêm das características das técnicas, cabendo destacar:

1. A krigagem universal apresenta estimativas sobre a deriva e sobre os resíduos ao mesmo tempo, ou seja, há um ajuste da tendência cada vez que a krigagem é efetuada num ponto, não ajustando uma superfície global ao conjunto de dados. Além disso, a variância da técnica inclui tanto a estimativa devido à tendência como a dos resíduos;
2. A krigagem dos resíduos assume que não haveria erro nessa operação com posterior correção pela adição da tendência;
3. A krigagem ordinária é um caso especial da krigagem universal quando não ocorre uma mudança constante na tendência.

Na Figura 9, a proximidade entre os valores obtidos pelas três técnicas utilizadas implica na não diferenciação entre a escolha de uma técnica em relação a outra. Ainda sobre, vale ressaltar que:

- A proximidade relativa entre os resultados indica uma melhoria relativa na precisão quando se insere um modelo mais complexo (no caso, com modelagem de deriva);
- Os dados recebidos não passaram por nenhum processo de preenchimento, interpolação ou qualquer método para eliminação dos ruídos (além da descaracterização supracitada). Dessa forma, a técnica ainda precisou lidar com os ruídos encontrados nos dados. Ao fazer a modelagem da deriva, a maior parte dos ruídos é encontrado nos resíduos;
- O resíduo máximo de krigagem dos resíduos pode ser utilizado como margem de erro da estimativa fornecendo um intervalo de confiança;
- Embora as quantificações de incerteza indiquem a melhor técnica, a escolha deve levar em consideração o conhecimento geológico e geotécnico e a experiência acumulada, de modo que as técnicas geoestatísticas auxiliem o processo de tomada de decisão, oferecendo embasamento técnico para tal.

Conclusões

Os resultados corroboram o uso de técnicas geoestatísticas como estimadores de parâmetros geotécnicos. Nesse sentido, ressalta-se que as variâncias encontradas nos dados sugerem a necessidade de mais informações para satisfação das condições de estacionariedade e da hipótese intrínseca.

Dentro desse contexto, a aquisição de dados mostra-se como um importante processo de análise de dados. A modelagem de incertezas, por mais flexível que seja, traz riscos associados a aplicação das ferramentas numéricas e posterior estimativa dos dados. A influência das incertezas mostra-se significativa principalmente na modelagem de tendências lineares a partir dos dados encontrados. Uma possível forma de contornar a variabilidade encontrada nas tendências consiste no uso de uma modelagem mais robusta e.g. quadrática e/ou transcendental.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer à empresa Petrobras pelo apoio técnico e financeiro despendidos para realização desse trabalho.

Referências Bibliográficas

- API, R. GEO. "Geotechnical and foundation design considerations". Em: American Petroleum Institute, Washington, DC, USA Google Scholar (2011)
- LACASSE, S.; NADIM, F.; RAHIM, A.; GUTTORMSEN, T. R. et al. "Statistical description of characteristic soil properties". Em: *Offshore Technology Conference. Offshore Technology Conference*. 2007.
- VERITAS, D. N. "DNV-RP-C207: Statistical Representation of Soil Data". Em: Det Norske Veritas: Høvik, Norway (2012)
- MATHERON, G. "Principles of geostatistics". Em: *Economic geology* 58.8 (1963), pp. 1246-1266 (ver pp. 19, 65, 67, 74)
- JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. *Mining geostatistics*. Vol. 600. Academic press London, 1978 (ver p. 65).
- MATHERON, G. *Les variables régionalisées et leur estimation: une application de la théorie des fonctions aléatoires aux sciences de la nature*. Masson et CIE, 1965 (ver p. 67).
- CRESSIE, N.; HAWKINS, D. M. "Robust estimation of the variogram: I". Em: *Journal of the International Association for Mathematical Geology* 12.2 (1980), pp. 115_125 (ver pp. 19, 70).
- DOWD, P. "The variogram and kriging: robust and resistant estimators". Em: *Geostatistics for natural resources characterization*. Springer, 1984, pp. 91_106 (ver pp. 19, 71).
- MATHERON, G. "Le krigeage universel". Em: (1969) (ver p. 75).
- NEUMAN S. P.; JACOBSON, E. A. "Analysis of nonintrinsic spatial variability by residual kriging with an application to regional groundwater levels". *Mathematical Geology*. v. 16 n. 5, p. 499-521, 1984.