

15 + 4105

Geoestatística Aplicada à Modelagem do Lençol Freático a Partir de Dados do Nível Estático: O Caso da Porção Nordeste de Fortaleza (CE)

Applied Geostatistics on Modelling of the Water Table Based on Static Groundwater Level Data: The Case of the Northeastern Area of Fortaleza County, State of Ceara, Northeastern Brazil

Geoestadística Aplicada en la Modelación de la Manta Freática con Basis en Datos de Nível Estático: Estudio en la Región Nordeste de Fortaleza/CE, Nordeste de Brasil

Helano Regis da Nóbrega Fonteles, Jorge Kazuo Yamamoto,
Marcelo Monteiro da Rocha, Nilson Gandolfi

Resumo. No presente trabalho, são abordadas técnicas geoestatísticas de estimativa na modelagem da superfície freática realizada a partir de uma base de dados de sondagens de simples reconhecimento em uma área de 44 km² situada na porção nordeste do município de Fortaleza, Ceará. O quadro litoestratigráfico é representado pelos sedimentos terciário-quaternários da Formação Barreiras, Paleodunas, Dunas e Aluviões. Como etapa preliminar, os resultados da análise de regressão linear mostraram correlação significativa entre as variáveis cota topográfica e cota do nível estático, o que justificou o emprego do estimador cokrigagem heterotópica (CoK), além da validação do modelo de correção regionalização linear. Estimativas por krigagem ordinária (KO) foram confrontadas com as obtidas por cokrigagem, permitindo verificar que, embora o emprego da cokrigagem para co-estimar valores de nível estático em áreas não amostradas tenha sido satisfatório, a KO mostrou-se como estimador mais robusto e os resultados alcançados foram mais realísticos. A superfície freática foi então modelada a partir dos resultados alcançados com a KO.

Palavras-chave: geoestatística, nível estático, lençol freático, krigagem ordinária, cokrigagem, município de Fortaleza.

Abstract. In this paper the application of geostatistical techniques on static groundwater level data is discussed. The study area appears as a rectangle with 44 km² and it is located at the northeastern sector of Fortaleza County. The lithostratigraphical setting comprises the argillaceous sand of the Barreiras Formation, the sandy Ancient Dunes, the sandy Dunes and the Alluvium. The preliminary results achieved with the linear regression analysis showed a significant dependency relation between elevation point data and static groundwater level data. Such results supported the heterotopic cokriging assessment of these data bases and posterior comparison with the ordinary kriging estimates. Indeed the ordinary kriging estimator yielded the most reliable results due to the stability of the equation systems and spatial dependency of the data. The modelled water table surface was based on that ordinary kriging estimates.

Key words: geostatistics, static groundwater level, water table surface, ordinary kriging, cokriging, Fortaleza county.

Resumen. Este artículo trata de la aplicación de técnicas geoestadísticas en datos de nível freático. La región de estudio comprende una área de 44 km² la cual está situada en el nordeste de ciudad de Fortaleza, Estado de Ceará. Las unidades geológicas son representadas por las arenas argilosas de la Formación Barreiras, Paleodunas arenosas, Dunas arenosas y los sedimentos aluvionares. Los resultados previos obtenidos con la regresión linear mostraron una relación de dependencia significativa

Helano Regis da Nóbrega Fonteles, M.Sc., Consultor de Empresas e Analista Ambiental, Departamento Nacional de Produção Mineral - 21° DS/PI, Avenida Odilon Araújo 1500, Piçarra, Teresina, PI, Brasil. e-mail: helano.fonteles@dnpm.gov.br.

Jorge Kazuo Yamamoto, Doutor, Professor Titular, Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Rua do Lago 562, 05508-080 São Paulo, SP, Brasil. e-mail: jkyamamoto@usp.br.

Marcelo Monteiro da Rocha, Doutor, Professor Doutor, Departamento de Geologia Sedimentar e Ambiental, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, Rua do Lago 562, 05508-080 São Paulo, SP, Brasil. e-mail: mmrocha@usp.br.

Nilson Gandolfi, Doutor, Professor Titular Aposentado, Departamento de Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Rua Trabalhador San-carlense 400, 13566-590 São Carlos-SP. e-mail: ngandolfi@uol.com.br.

Recebido em 17/2/2006; Aceitação final em 27/10/2006; Discussões até 27/4/2007.

entre los datos de elevación y los datos de nivel estático. Este análisis suportó la avaliación por cokrigeage heterotopica de aquellos bases de datos y posterior comparación con los valores estimados de krigeage ordinária. En verdad, el estimador krigeage ordinária presentaron resultados más confiables debido a la estabilidad de lo sistema de ecuaciones y la dependencia espacial de los datos. La superficie freática modelada fue barsada en la aquellas estimativas por krigeage ordinária.

Palabras clave: geoestadística, nivel estático, manta freática, krigeage ordinária, cokrigeage, ciudad de Fortaleza.

1. Introdução

A Geoestatística foi concebida em meados do século XX para resolver problemas na estimativa de teores de ouro nas minas do Rand, África do Sul, por Krige e Sichel. Sua conceituação formal é creditada a G. Matheron que na década de 60, do mesmo século, publicou a Teoria das Variáveis Regionalizadas. Apesar de outros métodos de estimativa não estatísticos serem utilizados como o Inverso da Potência da Distância - IPD (David, 1977), os da Geoestatística apresentam a vantagem do cálculo das variâncias de estimativa ou de krigagem. Com a necessidade de se associar as estimativas ao conhecimento geológico os esforços dos pesquisadores foram direcionados, para os problemas de quantificação e avaliação de recursos/reservas minerais. Por outro lado, Journel & Huijbregts (1978) e Myers (1982) relatam que problemas de variabilidade espacial em outros campos científicos, tais como: a Meteorologia, as Ciências Florestais, a Hidrogeologia etc. passaram a ser alvo de pesquisas de aplicação das ferramentas geoestatísticas, como observado nos trabalhos de Mackean & Rosenbaum (1990), Sturaro (1988) e Kitanidis & Shen (1996).

Deste modo, o presente artigo resulta do tratamento de dados de nível estático com técnicas geoestatísticas pretendendo-se atingir os seguintes objetivos: 1) análise da variabilidade espacial dos dados de nível estático com procedimentos de análise exploratória e de estimativa (krigagem ordinária e cokrigagem); 2) comparação e avaliação dos resultados alcançados.

2. Materiais e Métodos

Os dados de nível estático compõem uma base de dados maior, compilada por Fonteles (2003), formada pela descrição de 126 sondagens de simples reconhecimento disponíveis na área de estudo. Além disso, na área de estudo foram levantados os dados de elevação do terreno pois, como se sabe, estes apresentam uma boa correlação com os dados de nível estático. Estes dados foram armazenados em um sistema de gerenciador de banco de dados relacional com estrutura de formulário (Microsoft® Access 2000®). Este aplicativo foi utilizado no gerenciamento dos dados e informações geológico-geotécnico disponíveis (descrição de solos, SPT, procedimentos executivos das sondagens etc.). Destaca-se que estes dados foram adequados às diferentes exigências dos diversos programas de computador utilizados.

Para o processamento das análises estatísticas/geoestatísticas e saídas gráficas foi utilizado o aplicativo computacional Sistema GeoVisual 2.1 de Yamamoto (2002).

A análise geoestatística realizada baseou-se nos preceitos da Teoria das Variáveis Regionalizadas de Matheron (1965) e foram utilizadas, ainda, a validação cruzada para aferir o ajuste do modelo teórico de variograma, as técnicas de estimativa por krigagem ordinária e cokrigagem, além do cálculo das variâncias de estimativa, conforme recomendado por David (1977), Myers (1982), Isaaks & Srivastava (1989), Valente (1989), Wackernagel (1998) e Yamamoto (2000).

3. Caracterização Geomorfológica e Geológica da Área de Estudo

A área de pesquisa é representada por um polígono de 44 km², situado na porção nordeste do município de Fortaleza, Ceará (Fig. 1).

Na área, ocorrem dois domínios geomorfológicos distintos cuja delimitação em escala regional foi proposta por Souza (1988). Estes são representados pelos Tabuleiros Pré-litorâneos, constituídos pelos sedimentos terciário-quaternários da Formação Barreiras e a Planície Litorânea, que comporta os sedimentos arenosos quaternários das Dunas e Praias e os sedimentos pleistocênicos das Paleodunas.

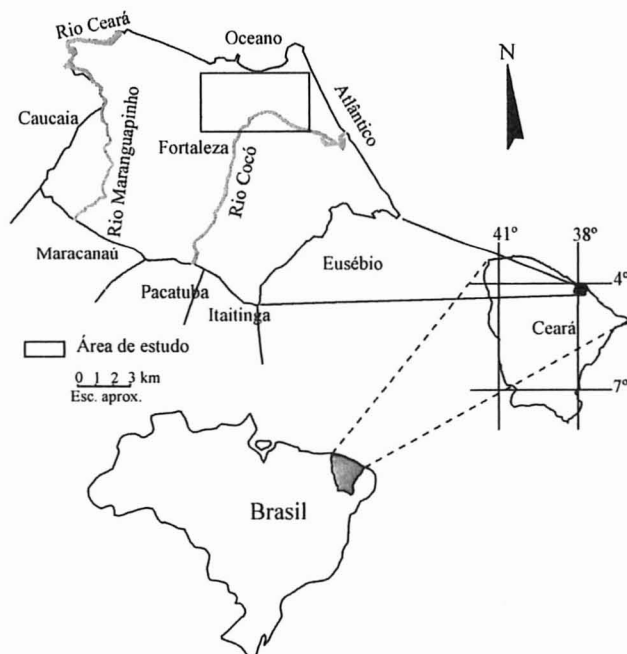


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo.

O domínio dos Tabuleiros Pré-litorâneos ocorre à retaguarda da Planície Litorânea. O substrato geológico, de acordo com Cavalcanti *et al.* (1998), é representado por quatro unidades geológicas a saber: a Formação Barreiras (TQb), Paleodunas (Qpd), Dunas (Qd) e Aluviões (Qa) como ilustra a Fig. 2.

A Formação Barreiras (TQb) é composta por sedimentos areno-argilosos, consolidados a inconsolidados, com coloração avermelhada, creme ou amarelada, mal selecionados, de granulação variando de fina a média, com níveis conglomeráticos e lateríticos. A matriz é argilosa, predominando o tipo caolinítico.

Os aluviões (Qa) são representados pela carga sedimentar de rios ativos e de planícies de inundação, composta por areias mal selecionadas cuja granulometria varia de média a grossa. Nas planícies de inundação, o sedimento é essencialmente silto-argiloso com alguma areia e muita matéria orgânica.

A unidade Dunas (Qd) é constituída por grandes depósitos eólicos formados a partir da remoção da face de praia pela deflação eólica. São compostas por areias esbranquiçadas, bem selecionadas, de granulometria fina a média, quartzosas, com grãos foscas e arredondados.

Na Fig. 2, as paleodunas não puderam ser representadas devido a limitações de escala e à expressiva escassez de afloramentos na área investigada, bem como uma caracterização geológico-geotécnica mais precisa a partir das informações de sondagens com SPT.

3. Análise Estatística

Os dados analisados de nível estático compõem uma amostra com 110 pontos de dados, cuja distribuição espacial é mostrada na Fig. 3. Os dados de elevação do terreno são compostos por 1059 pontos de dados coletados sobre a região de estudo. As estatísticas descritivas para as variáveis nível estático e elevação do terreno encontram-se na

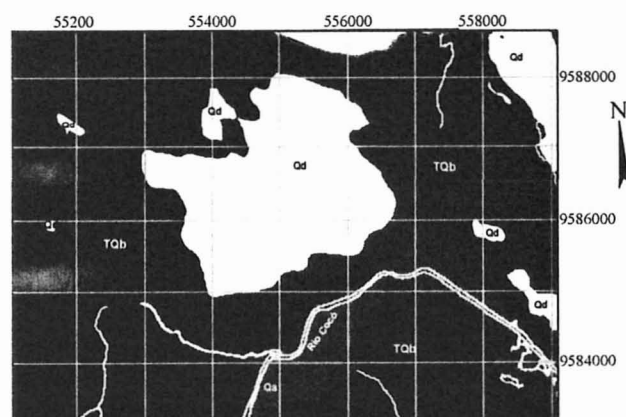


Figura 2 - Mapa geológico da área de estudo que corresponde à porção nordeste do município de Fortaleza (CE) segundo Fonteles (2003). A drenagem principal corresponde ao rio Cocó. As unidades litológicas identificadas são: TQb - Formação Barreiras; Qd - Dunas e Qa - sedimentos aluvionares.

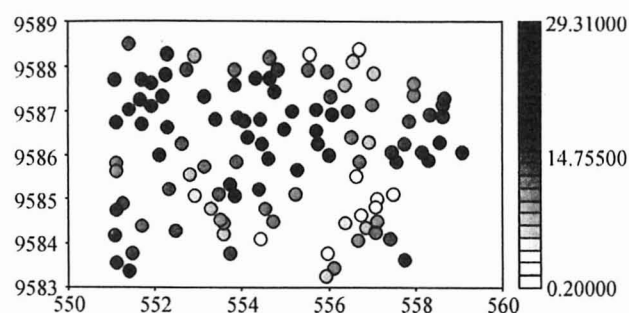


Figura 3 - Mapa de pontos de dados utilizados na estimativa da profundidade do nível estático (m).

Tabela 1. Na Fig. 4 apresentam-se os histogramas das distribuições de frequência destas duas variáveis.

A distribuição dos dados de nível estático é levemente assimétrica, com pequena assimetria positiva. Da mesma forma, a distribuição dos dados de elevação do terreno apresenta assimetria positiva.

4. Estatística Bivariada

A elaboração da análise estatística bivariada, através da análise de regressão por mínimos quadrados, representa etapa preliminar ao procedimento de estimativa por cokrigagem. Na verdade, as variáveis primária e secundária devem estar correlacionadas, para que a cokrigagem possa ser aplicada. A exemplo do observado por Sturaro (1994), foi investigada uma relação de dependência entre as variáveis cotas altimétrica e do nível estático (Fig. 5). Pode-se observar nesta figura que existe dependência linear entre as variáveis e que a dispersão da nuvem é relativamente pequena. Destaca-se, ainda, que o coeficiente de correlação de Pearson é igual a 0,88 e que caso não existisse uma relação de dependência entre as variáveis, a estimativa por cokrigagem não seria possível.

A regressão pelos mínimos quadrados forneceu a seguinte equação entre o nível estático e a cota do terreno:

$$NE = 1,095 + 0,697Z \quad (1)$$

Tabela 1 - Estatísticas descritivas para as variáveis nível estático e elevação do terreno.

Estatística	Nível estático	Elevação do terreno
Número de dados	110	1059
Média	13,304	17,222
Desvio padrão	6,133	10,796
Coefficiente de variação	0,461	0,627
Máximo	29,310	63,000
Quartil superior	17,563	21,367
Mediana	13,000	16,996
Quartil inferior	9,288	10,497
Mínimo	0,200	1,000

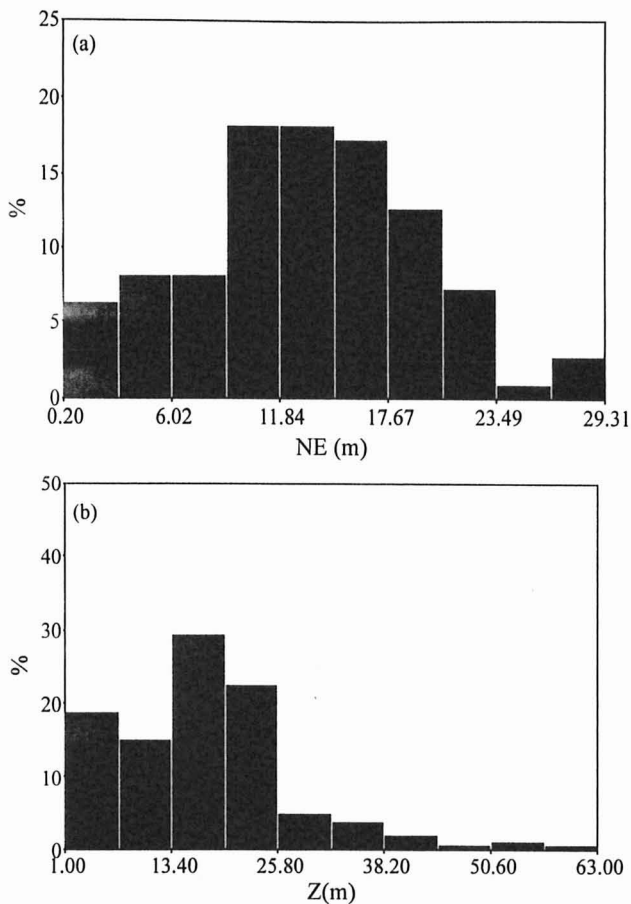


Figura 4 - Histogramas das distribuições de frequência dos dados de nível estático (NE(m)) e dos dados de elevação do terreno (Z(m)).

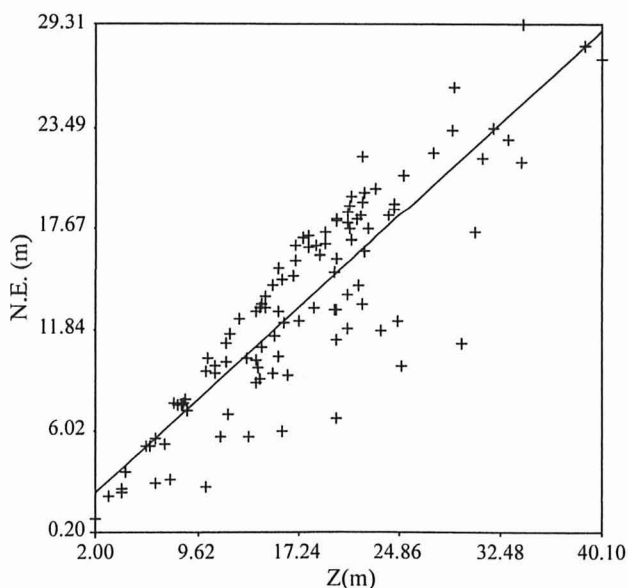


Figura 5 - Diagrama de dispersão dos dados cota do nível estático e cota altimétrica.

5. Análise Exploratória

A análise exploratória foi realizada conforme o sugerido em Yamamoto (2001). Inicialmente o variograma experimental foi calculado para quatro direções. Verificada a existência de anisotropia, os variogramas experimentais foram recalculados para duas direções perpendiculares entre si. Para as estimativas por cokrigagem foram calculados os variogramas experimentais para a variável secundária, além dos variogramas experimentais cruzados das cotas do nível estático (primária) e altimétrica (secundária). Calculados os variogramas experimentais, ajustaram-se os modelos teóricos de variogramas, conforme pode ser observado nas Figs. de 6 a 8.

Como preceituado por Isaacs & Srivastava (1989), o modelo de correlogramação linear foi validado, mostrando que os modelos dos variogramas ajustados são representativos da variável regionalizada estudada. Os parâmetros do modelo verificados foram o efeito pepita e a variância espacial. Como mostram as matrizes a seguir, as condições de positividade definida foram atendidas.

• Efeito Pepita

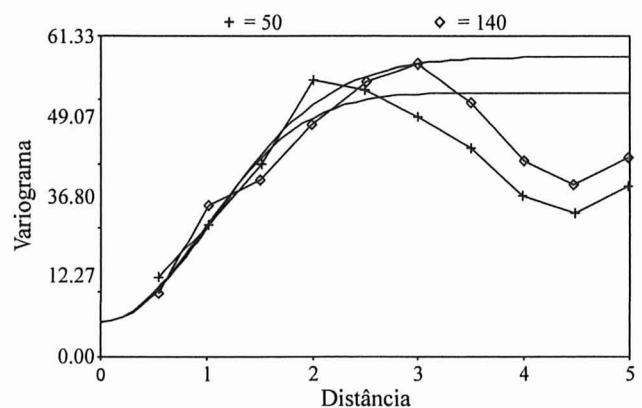
$$\begin{vmatrix} 6,50 & 1,80 \\ 1,80 & 0,50 \end{vmatrix} > 0$$

• Primeira estrutura

$$\begin{vmatrix} 43,97 & 55,00 \\ 55,00 & 131,50 \end{vmatrix} > 0$$

• Segunda estrutura

$$\begin{vmatrix} 6,50 & 6,30 \\ 6,30 & 6,50 \end{vmatrix} > 0$$



1ª. Estrutura:

Efeito Pepita: 6,5
Modelo: Gaussiano
Variância Espacial: 43,97
Amplitude Máxima: 2,51
Amplitude Mínima: 2,33

2ª. Estrutura:

Modelo: Gaussiano
Variância Espacial: 6,5
Amplitude Máxima: 3,4
Amplitude Mínima: -

Figura 6 - Variogramas experimentais para o nível estático e o modelo ajustado.

6. Validação Cruzada

A validação cruzada foi utilizada com dois intuitos: aferir o ajuste do modelo teórico ao variograma experimental e definir os parâmetros da vizinhança de busca a serem utilizados nas estimativas.

Os critérios utilizados foram a divisão da vizinhança em quadrantes, com a busca de dois pontos por quadrante e no mínimo três pontos de dados para a estimativa. O coeficiente de correlação calculado foi de 0,848, na estimativa

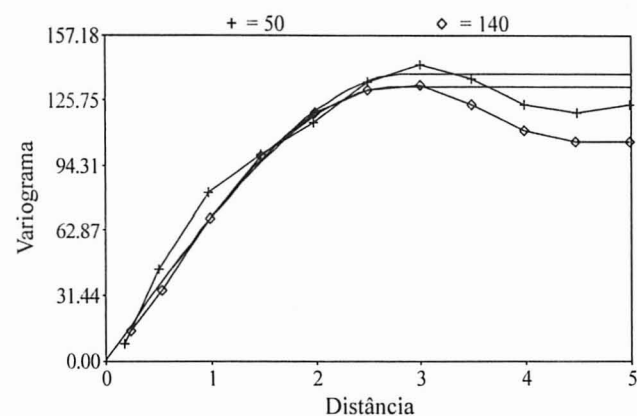


Figura 7 - Variogramas experimentais para a cota altimétrica e o modelo ajustado.

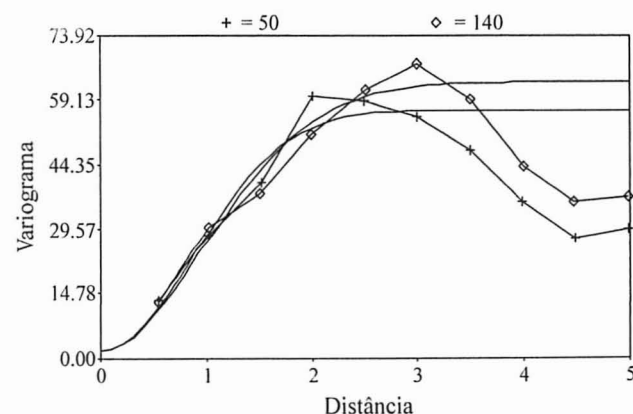


Figura 8 - Variogramas cruzados experimentais e o modelo ajustado.

de 108 pontos. A nuvem de dispersão entre os valores estimados e os valores amostrados, em torno da reta 1:1, é pequena e ligeiramente enviesada devido ao efeito de suavização da krigagem ordinária, em que os valores baixos são superestimados e os valores altos são subestimados (Fig. 9). Na verdade, o efeito de suavização é inerente ao processo de estimativa através da fórmula da média ponderada (krigagem simples, krigagem ordinária, cokrigagem ordinária etc.) e será maior quanto maior for a variabilidade dos pontos de dados.

7. Estimativa por Krigagem Ordinária

As estimativas por krigagem ordinária foram realizadas para a variável cota do nível estático com o objetivo de comparar os resultados da aplicação deste estimador com os obtidos por cokrigagem. A malha de estimativa apresenta espaçamento de 250 por 250 m, o que possibilitou a estimativa de 601 pontos dentro da fronteira convexa. Os parâmetros de vizinhança foram aqueles definidos na validação cruzada. O mapa de estimativas por krigagem ordinária é apresentado na Fig. 10 e o respectivo mapa de desvios de interpolação na Fig. 11.

Segundo Yamamoto (2000), a variância de krigagem baseia-se no semivariograma ponderado em todo o domínio de estimativa, daí decorre a incompatibilidade do desvio estimado localmente com a estimativa realizada. Além disso, o referido autor demonstra que a variância de krigagem é dependente apenas da disposição espacial dos dados, como relatado anteriormente por Journel & Rossi (1989).

A variância de interpolação proposta por Yamamoto (2000) incorpora relações de dependência com os dados espacialmente distribuídos e com o modelo de variograma. Devido a estes atributos, as estimativas associadas têm uma

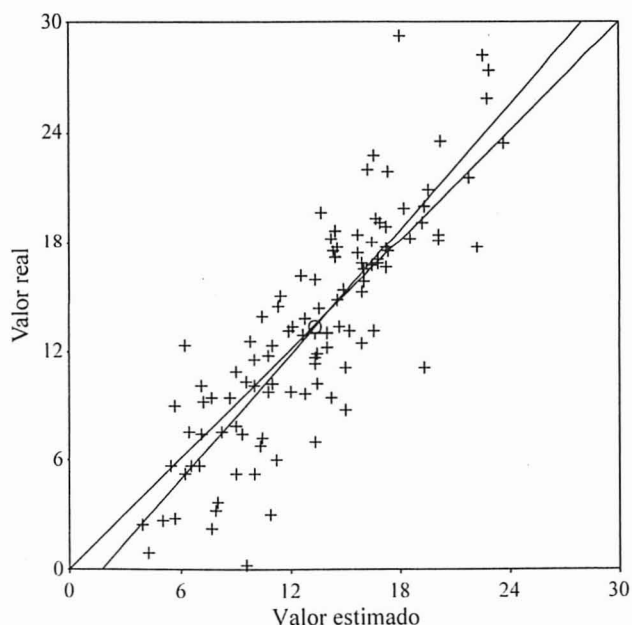


Figura 9 - Diagrama de dispersão dos valores reais contra os valores estimados, obtidos pelo algoritmo da validação cruzada.

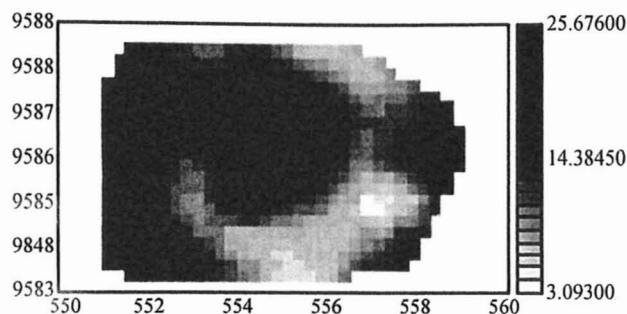


Figura 10 - Mapa imagem da krigagem ordinária da superfície freática

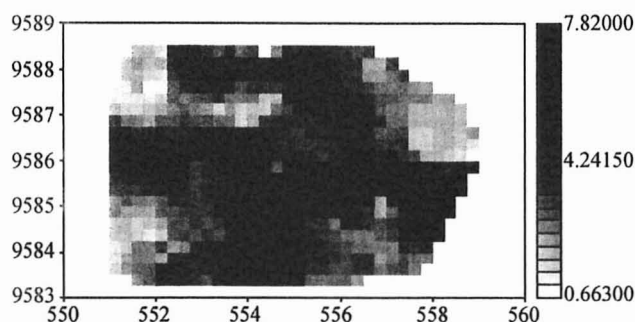


Figura 11 - Mapa dos valores de desvio de interpolação obtidos a partir da estimativa por krigagem ordinária.

medida de exatidão mais confiável. A Fig. 11 mostra as regiões com as maiores incertezas, as quais não estão associadas necessariamente às regiões de borda, como acontece com a variância de krigagem.

8. Mapas de Probabilidade Condicional do Nível Estático

Como forma de construir mapas de probabilidade de ocorrência do nível estático, considerando um ou mais níveis de corte, obtidos geralmente por krigagem por indicadora (Journel, 1983 e Deutsch & Journel, 1992), utilizou-se o procedimento de Journel & Rao (1996) que baseia-se na construção de funções de distribuição de frequência acumuladas condicionais (fdfac) locais da variável em questão com o uso dos pesos do sistema de krigagem ordinária de cada realização desta variável.

O procedimento consistiu na interpretação da estimativa por krigagem ordinária, do ponto de vista probabilístico, como a estimativa da esperança condicional, ou seja, uma estimativa do tipo E. Journel & Rao (1996) interpretam os pesos calculados como probabilidades condicionais. Para tal, precisa-se garantir que, não apenas, os pesos da krigagem ordinária sejam todos positivos, como também somem um. Se pesos negativos forem calculados, por exemplo, devido ao efeito tela (*screen effect*), eles devem ser corrigidos para serem todos positivos. Journel & Rao (op. cit.) propõem, para a eliminação dos pesos negativos, que uma constante positiva igual ao módulo do maior peso negativo, seja somada a todos os ponderadores. Após a

correção, os pesos devem ser normalizados para que voltem a somar um. Posteriormente, pode-se construir a função de distribuição acumulada condicional para qualquer ponto do domínio, ordenando os n dados amostrais da vizinhança em ordem crescente:

$$z(x_1) \leq z(x_2) \leq \dots \leq z(x_n)$$

A função de distribuição acumulada condicional é modelada como:

$$F(x_0, z_\alpha) = \sum_{i=1}^{\alpha} \lambda_i$$

Esta função, derivada dos pesos da krigagem ordinária apresenta dois parâmetros importantes: a média que é a própria estimativa da krigagem ordinária e a variância que é dada pela própria variância de interpolação (Yamamoto, 2000).

Deste modo, três níveis de corte representados pelos quartis inferior (q_{25}), superior (q_{75}) e mediana (q_{50}), conforme as estatísticas ilustradas na Tabela 1, foram utilizados como referências, o que permitiu a obtenção de mapas de probabilidade condicional de ocorrência da cota do nível estático (Figs. 12 a 14).

Os mapas de probabilidade indicam com precisão as regiões com as maiores cotas na superfície freática.

9. Estimativa por Cokrigagem

Visando aproveitar a grande quantidade de informações provenientes da base cartográfica, aplicou-se o algo-

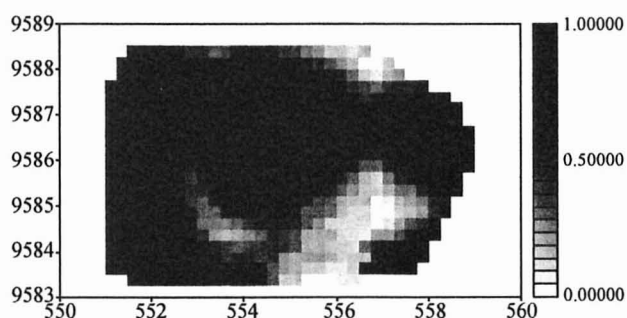


Figura 12 - Mapa de probabilidade de ocorrência da cota do nível estático ser igual ou superior a 9,288 (q_{25}).

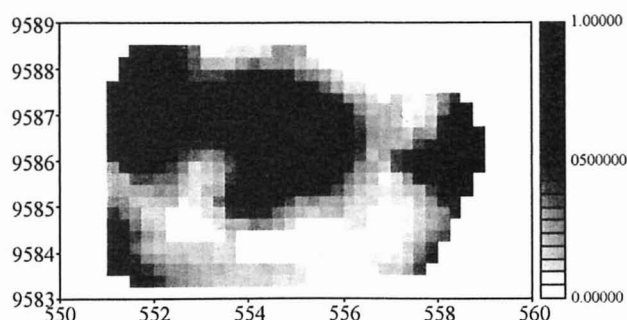


Figura 13 - Mapa de probabilidade de ocorrência da cota do nível estático ser igual ou superior a 13,00 (mediana).

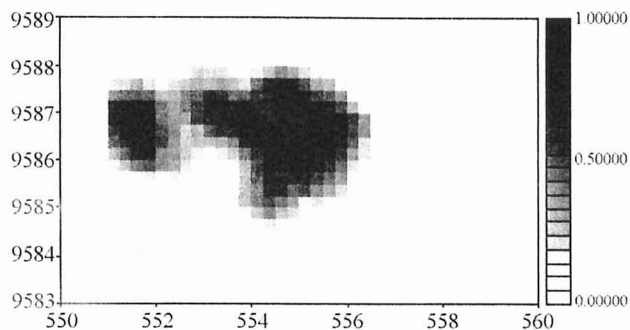


Figura 14 - Mapa de probabilidade de ocorrência da cota do nível estático ser igual ou superior a 17,563 (q_{γ}).

ritmo da cokrigagem para a co-estimativa da variável cota do nível estático. Para tal, a abordagem de estimativa com heterotopia parcial foi trabalhada, possibilitando a extrapolação para áreas além da fronteira (Wackernagel, 1998). Esta extrapolação é teoricamente salvaguardada pela correlação obtida dos dados analisados. As condições de vizinhança local e da malha para a co-estimativa foram as mesmas da krigagem ordinária.

O mapa com os resultados obtidos pela cokrigagem encontra-se representado na Fig. 15 e o mapa com os desvios de cokrigagem é ilustrado pela Fig. 16.

É interessante observar o mapa de desvios de cokrigagem (Fig. 16), o qual apresenta padrão regular sempre em torno dos pontos de dados. O padrão é praticamente o mesmo, independentemente dos valores nesses pontos (al-

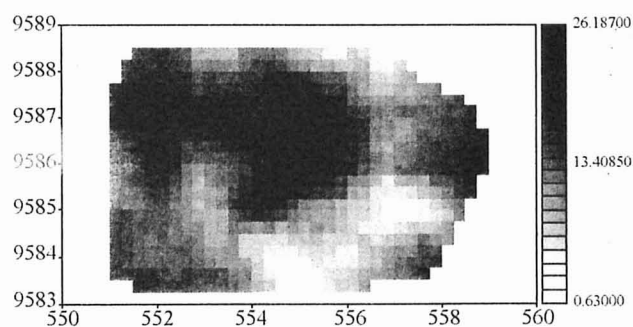


Figura 15 - Mapa de estimativas por cokrigagem ordinária da cota do nível estático.

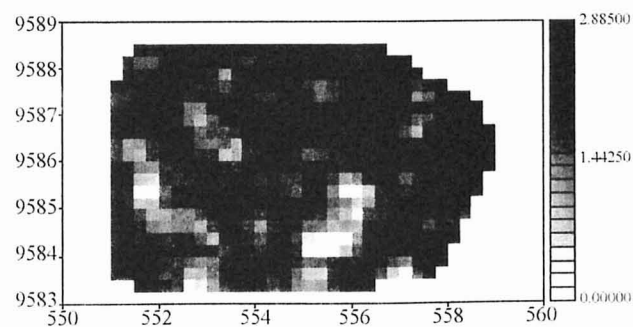


Figura 16 - Mapa dos desvios de cokrigagem ordinária da variável cota do nível estático.

tos ou baixos), pois a variância de krigagem só depende dos semivariogramas diretos e cruzados.

9. Discussão dos Resultados

A análise dos variogramas experimentais indica a presença de anisotropia mista na área de estudo, igualmente, não foi evidenciada alguma tendência sistemática (deriva) na variabilidade espacial da área.

Procedeu-se a estimativa das realizações da variável cota do nível estático mediante a aplicação do estimador krigagem ordinária (Fig. 10). As estimativas obtidas com este algoritmo foram bastante satisfatórias, visto que se encontram dentro do intervalo dos dados originais (Fig. 4).

O procedimento de Journel & Rao (1996) para a elaboração de mapas de probabilidade condicional de ocorrência do nível estático apresenta a grande vantagem de solução de um único sistema de equações de krigagem ordinária para a obtenção da função de distribuição frequência acumulada condicional (fdfac) local. Devido ao fato de se fazer uso dos pesos obtidos na resolução do sistema de krigagem, não há perda de exatidão local na construção das fdfac's locais.

A utilização de três níveis de cortes representados pelos quartis das estatísticas descritivas é justificada pela natureza da variável, ou seja, a sazonalidade intrínseca da variabilidade do nível freático no setor nordeste do município de Fortaleza. Pode-se interpretar que as variações mais significativas ocorrem nas faixas compreendidas entre o primeiro e o terceiro quartil. Contudo, salienta-se que as interpretações aqui apresentadas não têm respaldo experimental. De fato, não foram realizadas medições em poços tubulares como forma de acompanhamento e teste das estimativas.

O mapa de probabilidade condicional relativa ao terceiro quartil (Fig. 14) revela a correlação geológica da ocorrência do nível estático com as dunas situadas na porção central na área de estudo (Fig. 2). O quadro litológico da cidade de Fortaleza é bem caracterizado pela compartimentação topográfica/geomorfológica existente. Isso revela que a correlação estatística previamente investigada satisfaz parcialmente a hipótese de dependência espacial entre os dados altimétricos e estáticos.

No processo de interpolação, as estimativas por cokrigagem não foram melhores que aquelas obtidas com o uso da krigagem ordinária (Fig. 15). Na verdade, ambas estão correlacionadas como seria de se esperar devido à correlação linear observada inicialmente (Fig. 17). A grande vantagem da técnica de cokrigagem é a da possibilidade de explorar a relação de dependência espacial entre as variáveis investigadas, favorecendo a extrapolação para áreas externas à fronteira convexa. No entanto, tal vantagem não foi evidenciada com o processamento das estimativas.

O mapa de desvios de cokrigagem (Fig. 16) revela que esta medida de covariância de estimativa caracteriza-se

pela mesma ineficiência da variância de krigagem ordinária. Os valores mais altos de desvios estão associados às áreas em que a variável primária (cota do nível estático) não foi amostrada.

10. Conclusões

Com a aplicação da estimativa por cokrigagem de dados de cota do nível estático, buscou-se incrementar a predição desta variável, valendo-se da correlação significativa com a variável cota topográfica. A aparente vantagem da relação de dependência entre as variáveis estudadas não implicou em incremento significativo na estimativa por cokrigagem da cota do nível estático, quando comparada com aquela realizada com o uso da krigagem ordinária conforme pode ser observado na Fig. 17.

A modelagem por cokrigagem demandou, praticamente, mais do dobro do tempo na variografia exploratória e nas correções do modelo de correlogramização linear.

À semelhança do que já havia sido reportado por Journel & Rossi (1989) e Yamamoto (2000) quanto à variância de krigagem, a variância de cokrigagem não fornece medida eficiente na avaliação da exatidão das estimativas e, assim sendo, apresenta-se como indicador da configuração espacial dos dados (Fig. 16).

Os mapas de probabilidade condicional têm a vantagem de permitir a avaliação da estimativa sem a necessidade de consulta adicional ao mapa de desvios de interpolação. Além disso, o algoritmo permite interação simples e eficiente, de modo que, facilmente, um novo cenário pode ser analisado em função do valor do nível de corte adotado. A questão da observação do nível estático é particularmente importante para a escavação de obras subterrâneas

e/ou para a locação de elementos estruturais de fundações escavadas.

Referências

- Cavalcanti, V.M.M.; Sena, R.B.; Ribeiro, J.A.P.; Colares, J.Q.S. & Gomes, F.E.M. (1998) Plano Diretor de Mineração para a Região Metropolitana de Fortaleza. Série Difusão Tecnológica 7. DNPM/CPRM, Brasília, 191 p.
- David, M. (1977) Geostatistical Ore Reserve Estimation. Developments in Geomathematics 2. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 364 p.
- Deutsch, C.V. & Journel, A.G. (1992) GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide. Oxford University Press, New York, 340 p.
- Fonteles, H.R.N. (2003) Caracterização Geotécnica do Subsolo da Porção Nordeste do Município de Fortaleza (CE) com Base em Geoestatística. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 135 p.
- Isaaks, E.H. & Srivastava, R.M. (1989) An Introduction to Applied Geostatistics. Oxford University Press, New York, 561 p.
- Journel, A.G. & Huijbregts, C.J. (1978) Mining Geostatistics. Academic Press, London, 600 p.
- Journel, A.G. (1983) Nonparametric estimation of spatial distributions. Journal of the International Association of Mathematical Geology, v.15:3, p. 445-468.
- Journel, A.G. & Rao, S.E. (1996) Deriving conditional distributions from ordinary kriging. Stanford Center of Reservoir Forecasting, Report #9, Stanford, 25 p.
- Journel, A.G. & Rossi, M.E. (1989) When do we need a trend model in kriging? Mathematical Geology, v. 21:7, p. 715-739.
- Kitanidis, P.K. & Shen, K.F. (1996) Geostatistical interpolation of chemical concentration. Advances in Water Research, v. 19:6, p. 369-378.
- MacKean, R.A.N. & Rosenbaum, M.S. (1990) Geostatistical characterization of the SPT. Proc. 6th Int. Congress Int. Assoc. Eng. Geol., Amsterdam, p. 317-322.
- Matheron, G. (1965) Les Variables Regionalisées et leur Estimation. Masson et C^{ie} Éditeurs, Paris, 300 p.
- Myers, D.E. (1982) Matrix formulation of co-kriging. Mathematical Geology, v. 14:3, p. 249-257.
- Souza, M.J.N. (1988) Contribuição ao estudo das unidades morfo-estruturais do Estado do Ceará. Revista de Geologia v. 1:1, p. 73-91.
- Sturaro, J.R. (1988) Estudo do Comportamento Espacial de Variáveis Geológicas e Hidrogeológicas da Área Urbana de Ribeirão Preto-SP. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 124 p.
- Sturaro, J.R. (1994) Mapeamento Geoestatístico de Propriedades Geológico-Geotécnicas Obtidas de Sondagens de Simples Reconhecimento. Tese de Doutorado,

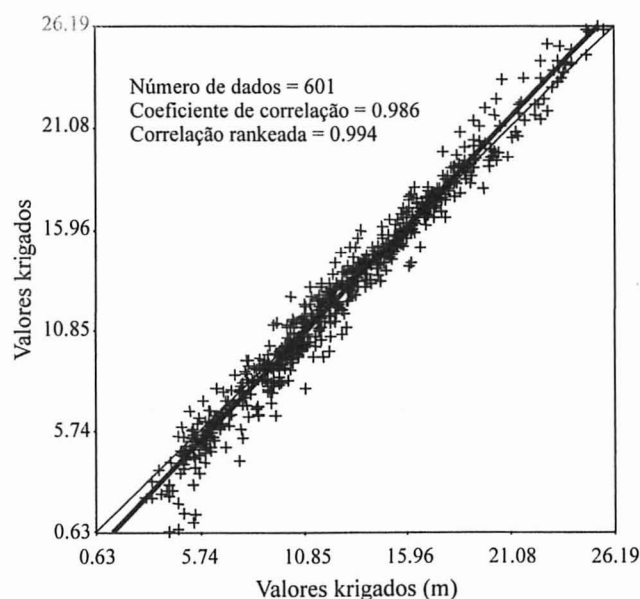


Figura 17 - Diagrama de dispersão das estimativas da cota do nível estático por krigagem ordinária contra as estimativas por cokrigagem.

- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 183 p.
- Valente, J.M.G.P. (1989) Geomatematica - Lições de Geoestatística 4, 2ª ed. Editora da Fundação Gorceix, Ouro Preto, p. 715-1062.
- Wackernagel, H. (1998) Multivariate Geostatistics: An Introduction with Examples, 2ª ed. Springer-Verlag, Berlin, 291 p.
- Yamamoto, J.K. (2000) An alternative measure of the reliability of ordinary kriging estimates. *Mathematical Geology*, v. 32:4, p. 489-509.
- Yamamoto J.K. (2001) Análise geoestatística. Yamamoto J.K. (ed.) Avaliação e Classificação de Reservas Minerais, 1ª ed. EDUSP, São Paulo, p. 69-91.
- Yamamoto, J.K. (2002) Geovisual 2.1 - Manual do Usuário. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Direitos reservados a Jorge Kazuo Yamamoto, São Paulo, 77 p.