



**Análise da Variabilidade Espacial da Piezometria em Aquífero Livre:
Estudo de Caso na Sub-Bacia da Cabeceira do Rio Coxim, Mato Grosso do Sul**
Spatial Variability Analysis of the Piezometric Levels the Groundwater:
Case Study in the Sub-Basin of the Coxim River, Mato Grosso do Sul

Ciomara de Souza Miranda; Antonio Conceição Paranhos Filho & Giancarlo Lastoria

*Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia,
Cidade Universitária, 79070900, Campo Grande, MS, Brasil*

E-mails: ciomara.miranda@gmail.com; antonio.paranhos@pq.cnpq.br; lastoria@nin.ufms.br

Recebido em: 10/11/2015 Aprovado em: 13/12/2015

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2016_1_69_75

Resumo

O presente trabalho tem o objetivo de reconhecer a superfície piezométrica do aquífero livre da Sub-Bacia Cabeceira do Rio Coxim, localizada na porção central do Município de São Gabriel do Oeste, Mato Grosso do Sul, caracterizada pelo uso agrícola intensivo. Essa informação da piezometria das águas subterrâneas é necessária para a exploração de forma otimizada e sustentável do meio. Foram coletado em campo dados do nível estático de 22 poços e a altitude, o resultado da subtração desses dois dados caracteriza a piezometria. O modelo matemático de ajuste ao semivariograma teórico foi o esférico. Apurou-se, ainda, por validação cruzada a exatidão do modelo esférico proposto. Averiguou-se a existência de uma forte dependência espacial, um alcance de 16,5 km e uma superestimação da superfície da água subterrânea de 10% na krigagem, considerado um erro aceitável para a interpolação dos dados. A partir dos parâmetros dos modelos ajustados, gerou-se o mapas da superfície piezométrica pelo método da krigagem. Observou-se que a geoestatística na análise de dados ambientais, destacando nesse trabalho, o estudo voltado aos recursos hídricos.

Palavras-chave: Geoestatística; Krigagem; Semivariograma

Abstract

The information about the piezometric surface of groundwater is necessary for an optimized and sustainable exploitation. This study aims to analyze the spatial variability of the piezometry in a system of free aquifers. The study area is comprehends the sub-basin of the Coxim River, located at the central portion of São Gabriel do Oeste Municipality, Mato Grosso do Sul, characterized by the intense agricultural use. Piezometric data from 22 wells were analyzed and the theoretic semivariogram was adjusted by the spherical model. The cross validation was used to measure the exactness of the spherical model proposed. It was checked the existence of a strong spatial dependence, a reach of 16,5 Km and an overestimation of the groundwater surface of 10% on the kriging, an error considered acceptable for the interpolation of the data.

Keywords: Geostatistics; Kriging; Semivariogram

1 Introdução

A compreensão do comportamento da água subterrânea obtida através da observação da superfície piezométrica é essencial para se tomar qualquer decisão na gestão de uma dada bacia hidrográfica, pois determina o fluxo da água nos aquíferos (Reghunath *et al.*, 2005). A identificação da piezometria é realizada por parâmetros coletados em campo seguida da modelagem.

A modelagem de variáveis ambientais requer, na maioria das vezes, a estimativa de valores não amostrados, sendo necessário o emprego de métodos de interpolação. O método de krigagem foi desenvolvido pelo engenheiro de minas sul-africano Daniel G. Krige que, ao trabalhar com dados de concentração de ouro, concluiu que somente a informação dada pela variância não seria suficiente para explicar o fenômeno em estudo (Landim, 2003).

Assim sendo, deve-se levar em consideração a distância entre as observações. A partir daí surge o conceito da geoestatística, que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial (Lourenço, 2002).

O princípio da krigagem é estimar valores não conhecidos obtidos por meio da combinação de valores amostrados adjacentes àquele que se deseja obter, levando-se em consideração, no modelo, a estrutura de variação espacial. Isto pressupõe a existência de correlação entre os dados, exigindo saber até onde espacialmente esta correlação importa (Isaaks & Srivastava, 1989). Através do semivariograma encontram-se os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto (Porto *et al.*, 2011).

A krigagem apresenta-se como uma ferramenta importante em diversos estudos, como no trabalho de Ribeiro *et al.* (2011) que utilizam a krigagem para a interpolação dos dados do nível estático na aquisição da distância do nível da água subterrânea, parâmetro do método de avaliação da vulnerabilidade do aquífero GOD (Foster & Hirata, 1988).

De acordo Demir *et al.* (2009) e Zhou *et al.* (2011) a geoestatística apresenta-se como uma importante ferramenta nos estudos de recursos hídricos.

Bogaert (1996) e Pokrajac *et al.* (2003) relatam a aplicação da krigagem na avaliação

da dependência espacial e temporal de vários parâmetros. Theodossiou & Latinopoulos (2007) interpolaram, por krigagem, os níveis das águas subterrâneas em uma bacia hidrográfica do norte da Grécia e utilizaram a validação cruzada para estimar a exatidão dos valores interpolados.

Na investigação da dependência espacial é necessário conhecer o semivariograma por este ser o responsável pela representação desta dependência, definida como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores das amostras que estão separadas por certa distância entre elas (Miranda, 2005). De acordo Landim (2003), a obtenção do semivariograma dos dados reais, ou mesmo dos resíduos, é de fundamental importância nos estudos da geoestatísticos e faz parte da chamada análise estrutural.

A análise espacial pode ser aplicada à compreensão de diversos fenômenos, como agricultura de precisão, imagens de satélite ou digitais, aplicações geofísicas, em agronomia, em mineração e em geologia, hidrogeologia, estudos ecológicos de comunidades de plantas, dentre outros.

No Município de São Gabriel do Oeste, estado do Mato Grosso do Sul, a escassez de dados piezométricos é uma realidade, assim como em muitos outros municípios brasileiros. Esses dados são importantes parâmetros de análise para a obtenção de melhorias no uso e aproveitamento dos recursos hídricos.

Desse modo, pretende-se neste trabalho realizar uma análise estrutural para descrever a variabilidade espacial da piezometria baseada na função do semivariograma, com o intuito de efetuar uma estimativa de valores em locais não amostrados. Para o alcance do objetivo proposto foi utilizado a krigagem, por ser uma operação que leva em consideração a correlação entre amostras vizinhas, obtendo estimativas, sem tendência e variância mínima.

2 Materiais e Métodos

2.1 Área de Estudo

A área de estudo compreende a Sub-Bacia do Rio Coxim, a qual possui 15.642 hectares. Localiza-

se na porção central do Município de São Gabriel do Oeste, e desempenha atividade socioeconômica relevante para o Município, uma vez que ganha destaque na produção agrícola e por abrigar um assentamento com aproximadamente 130 famílias.

2.2 Obtenção dos Dados de Piezometria

Os dados utilizados na integração da piezometria foram obtidos em campanha de campo, sendo que a amostragem dos 22 poços foi realizada no período de seca (mês de setembro) de maneira aleatória. Esses poços estão localizados no interior das propriedades rurais. Com o auxílio de um GPS diferencial foram aferidas as altitudes geométricas dos poços e levantados os seus dados de posicionamento. Como as altitudes geométricas são referidas ao elipsóide, foi necessário transformá-las para altitudes ortométricas, referidas ao nível médio do mar. Entretanto, para a realização desse processo é indispensável o conhecimento da ondulação geoidal (N).

Assim, após o processamento dos dados coletados em campo no *software* Ashtech Solutions

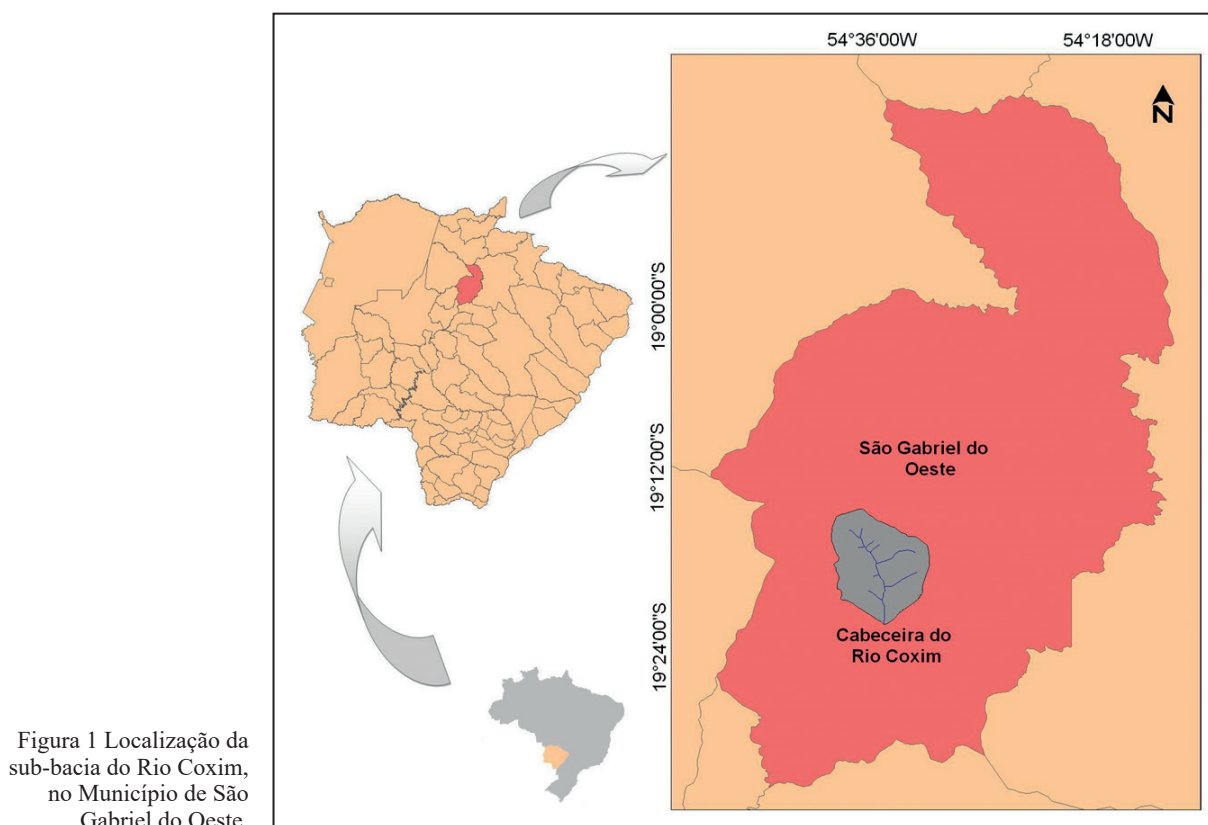
(Thales Navigation, 2002), as altitudes foram então corrigidas para os valores ortométricos (H) através do modelo de ondulação geoidal (IBGE, 2010), no qual a altura ortométrica (H) é o resultado da subtração entre a altura elipsoidal e a ondulação geoidal (N).

Utilizando uma sonda elétrica identificou-se o nível estático dos poços selecionados. Assim, o resultado da subtração da altitude ortométrica e o nível estático é a piezometria, dado de entrada na krigagem a fim de se obter o mapeamento.

2.3 Análise Estatística

A geoestatística não se refere a um tipo especial ou mesmo excluído da estatística, mas pode ser considerada uma extensão que trata de cada parâmetro, não apenas pelo seu valor, mas também sua posição espacial, expressa por um sistema de coordenadas, considerando a dependência espacial das observações em pontos referenciados (Lima *et al.*, 2006).

Portanto, é uma técnica de manipulação de dados espacialmente distribuídos, tais como



granulometria do solo, distribuição da poluição no ambiente e nível piezométrico das águas subterrâneas (Delgado *et al.*, 2010; Gokalp *et al.*, 2010). Seu uso tem como finalidade a modelagem de certo fenômeno através da utilização de abordagens probabilísticas fundamentadas em métodos estatísticos para mapeamento de dados distribuídos no espaço.

Os dados piezométricos foram analisados em cinco etapas. Primeiramente identificou-se a condição da normalidade dos dados através do teste de Kolmogorov-Smirnov com uso do *software* BioEstat 5.0 (Ayres *et al.*, 2007). Para a verificação da hipótese de normalidade são utilizados testes gráficos e analíticos. O método analítico proposto é o Kolmogorov-Smirnov, o qual consiste na comparação das frequências acumuladas observadas e as calculadas pela distribuição normal.

No segundo passo, avaliou-se a estatística descritiva a fim de se observar algumas características do conjunto de dados, como média aritmética, mediana, desvio padrão, assimetria, mínimos e máximos. A terceira etapa considerou o modelo que melhor se enquadrasse na descrição do semivariograma a fim de se observar a dependência espacial entre as observações vizinhas no *software* GS+ (Robertson, 1998). Em seguida, realizou-se a validação cruzada para verificar a exatidão do modelo. A última etapa foi a interpolação com o uso da krigagem para estimar a superfície piezométrica do aquífero utilizando o *software* Geomatica Focus (PCI, 2003).

A análise estrutural é obtida, em geral, por meio do semivariograma (Guerra, 1988). Os parâmetros observados no semivariograma e utilizados para a integração da krigagem são: o efeito pepita (C_0), sendo o valor da função do semivariograma na origem, representando o valor da descontinuidade; a semivariância estrutural (C), que representa a diferença entre o patamar e o efeito pepita; o patamar ($C + C_0$), que indica o ponto a partir do qual as amostras tornam-se independentes por causa da distância que as separam; e o alcance (a), sendo a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes, refletindo o grau de homogeneização (Isaaks & Srivastava, 1989).

O estimador da função semivariância proposto por Matheron (1963) para variáveis regionalizadas com distribuição normal de probabilidade é apresentado na equação 1

$$y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) + Z(x_i + h)]^2 \quad (1)$$

Onde: $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i + h)$ indica a magnitude da variável e são separados por uma distância h e x_i , uma posição espacial da variável Z .

O semivariograma teórico, isto é, o modelo matemático que descreve o semivariograma experimental é ajustado pelo método de mínimos quadrados, entre os modelos exponencial, esférico e gaussiano.

A escolha dos modelos leva em consideração três parâmetros: o coeficiente de determinação (r^2), que indica quantos dos pontos do semivariograma experimental encontram-se na curva do modelo teórico, (Robertson, 1998); a soma dos quadrado dos erros (RSS), a qual determina o ajuste do modelo teórico ao semivariograma experimental, sendo que quanto menor o valor de RSS, melhor o ajuste (Zimmerman & Zimmerman, 1991); e o grau de dependência espacial pelo Índice de Dependência Espacial (IDE) proposto por Zimback (2001).

O IDE utiliza a relação entre a semivariância estrutural e o patamar. Quando seu valor for menor que 25% a correlação é considerada fraca; entre 25 e 75% é moderada; e maior que 75% possui forte correlação (Zimback, 2001)

A veracidade do modelo na interpolação foi testada através da técnica de validação cruzada, a qual se baseia em comparar valores reais com os do resultado de interpolação, o que permite avaliar se o modelo escolhido na interpolação garante previsão precisa (Leuangthong *et al.*, 2004). Para Landim (2003), a validação cruzada é uma importante técnica para ponderar o ajuste do semivariograma, porém não comprova que o modelo escolhido é o mais correto nem inteiramente correto.

3 Resultados e Discussões

A aplicação do teste Kolmogorov-Smirnov revelou, ao nível de 95% de probabilidade, que os dados analisados apresentam distribuição normal, havendo simetria uma vez que o coeficiente de assimetria é próximo do zero, implicando valores de média e mediana semelhantes. Com isso verificou

aplicabilidade da krigagem, por supor que os dados apresentam distribuição normal de frequências, uma vez que a técnica utiliza valores médios para as estimativas (Porto *et al.*, 2011).

Destaca-se que, além da normalidade, os dados satisfazem a condição de estacionaridade, havendo a existência da ocorrência do efeito proporcional em que a média e a variância sejam constantes na área de estudo. Para isso, a variável deve apresentar certa homogeneidade em suas características estatísticas e as correlações presentes nela permaneçam para as mesmas distâncias, levando-se em conta a escala (Bettini, 2007).

Os resultados da estatística descritiva são mostrados na Tabela 1. Verifica-se que as medidas de tendência central são próximas entre si e que a diferença entre o valor máximo e mínimo resulta na variação de cota piezométrica de 116 metros.

Média Aritimética	Mediana	Desvio Padrão	Assimetria	Mínimo	Máximo
676.90	674.33	30.20	0.69	626.07	742.16

Tabela 1 Análise estatística dos conjuntos de dados analisados da piezometria.

O modelo de ajuste ao semivariograma é o esférico, obtendo-se valores do efeito pepita (C_0), semivariância estrutural (C), patamar (a) e coeficiente de determinação (r^2) (Figura 2). Por meio do semivariograma é possível descrever, tanto qualitativa como quantitativamente, a variação espacial e obter os parâmetros que determinam a krigagem.

Apreciou-se o semivariograma omnidirecional, levando em consideração, assim, o caso de isotropia na medição da superfície do nível do lençol freático do aquífero (Ahmadi & Sedghamiz, 2007). Na elaboração do semivariograma levou-se em consideração um ângulo de 0° e tolerância angular de 90° , e adotou-se um espaçamento de 80% em relação à máxima distância de separação entre os dados, com tolerância de 9,5%, cerca de 1,0 km.

A garantia da estacionaridade é verificada com a existência do patamar (Vieira & Lombardi Neto, 1995). O efeito pepita obtido, demonstra boa continuidade entre valores vizinhos. O alcance de aproximadamente 16.5 km indica que todos os vizinhos, localizados dentro de um círculo com este raio, são semelhantes uns aos outros e podem ser utilizados na estimativa de valores para qualquer ponto entre eles.

A dependência espacial é classificada como forte por atingir um IDE de 100%, o que se justifica o uso da técnica de interpolação empregada. Os valores obtidos, com o uso da krigagem são não tendenciosos e com a mínima variância na categoria dos estimadores lineares (Montebeller *et al.*, 2007). Ainda segundo Bettini (2007), nos pontos observados a krigagem é exata.

O produto final, após aplicação da krigagem, apresenta-se em arquivo em formato raster, visualizado sob a forma de mapa temático, facilitando a interpretação dos resultados estatísticos (Figura 3).

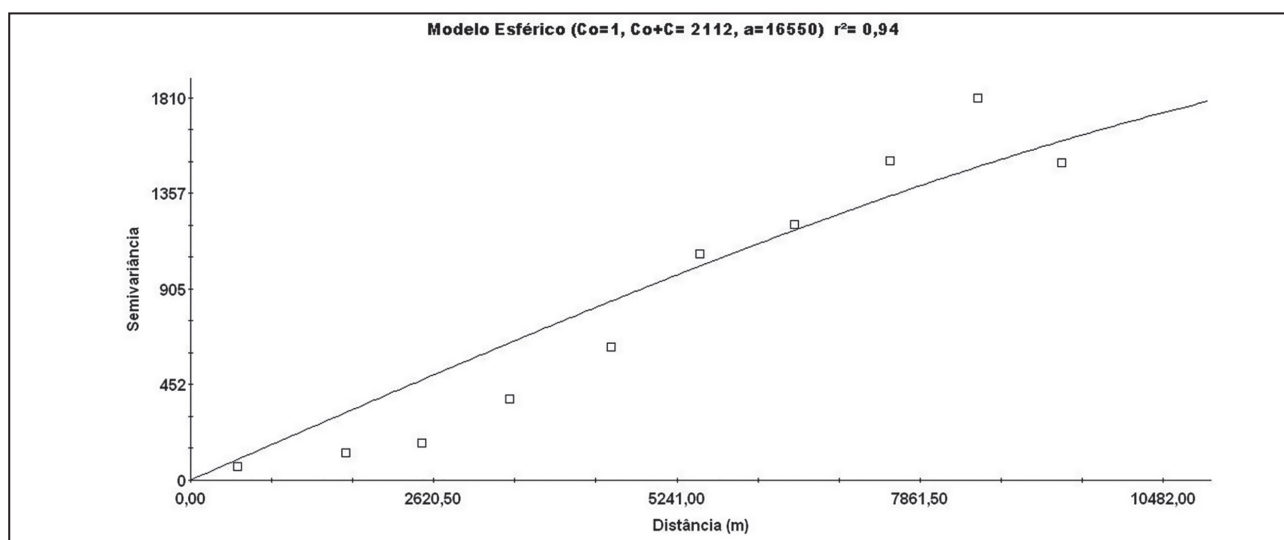


Figura 2 Semivariograma ajustado ao modelo esférico, com os dados da área de estudo.

Ao se avaliar o modelo digital da superfície piezométrica, percebe-se que a direção do fluxo da água subterrânea é preferencialmente na direção norte para o sul, seguindo tendência central. Outra observação é que a água do aquífero cursa toda a área da sub-bacia para abastecer a região sul da mesma, onde se localiza a malha urbana do Município de São Gabriel do Oeste. Portanto, destaca-se a importância de se controlar as atividades potencialmente poluidoras na Sub-Bacia do Rio Coxim, pois, em caso de contaminação, o fluxo do recurso hídrico subterrâneo irá atingir as regiões de captação urbana.

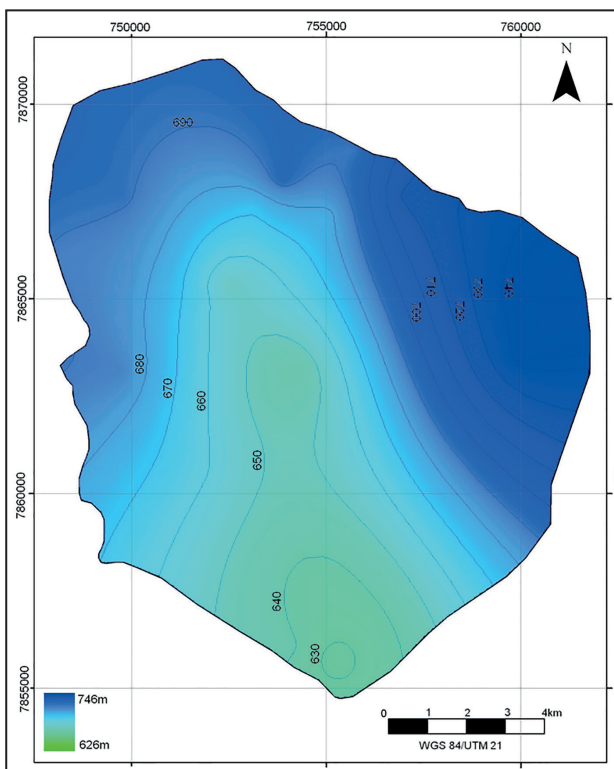


Figura 3 Mapa da piezometria da sub-bacia do rio Coxim, Mato Grosso do Sul.

Como resultado da validação cruzada, tem-se o coeficiente de regressão (R^2) de 0,85, indicando a proporção de simetria entre a reta de 45°, pontilhada no gráfico, e a obtida pelos valores estimados versus reais da piezometria. Já o coeficiente angular é igual a 1,12, sendo que para um ajuste perfeito esse coeficiente deve ser igual a 1.

Com o resultado alcançado enfatiza-se o papel da geoestatística na gestão e sustentabilidade dos recursos hídricos regionais. A verificação do ajuste adequado do modelo para a interpolação por meio da validação cruzada é visualizada na Figura 4.

Verifica-se que para os 22 pontos de controle o erro médio quadrático é de 12 metros e uma superestimação da superfície da água subterrânea em 10%, sendo esses erros aceitáveis para o Padrão de Exatidão Cartográfica na escala trabalhada de 1:100.00 (Brasil, 1984).

4 Conclusão e Recomendações

Verificou-se, por meio da análise do semivariograma, que é viável a aplicação da krigagem na elaboração do modelo da piezometria. Através da interpretação do mapa de piezometria pode-se concluir que, o fluxo da água subterrânea percorre toda a sub-bacia e tem direção de N-S com tendência central, e a variação de cota piezométrica de 116 metros. Portanto na área de estudo são necessárias práticas de conservação para garantir a qualidade dos recursos hídricos subterrâneos.

A avaliação do semivariograma é a base para o estudo de variabilidade espacial. A dependência

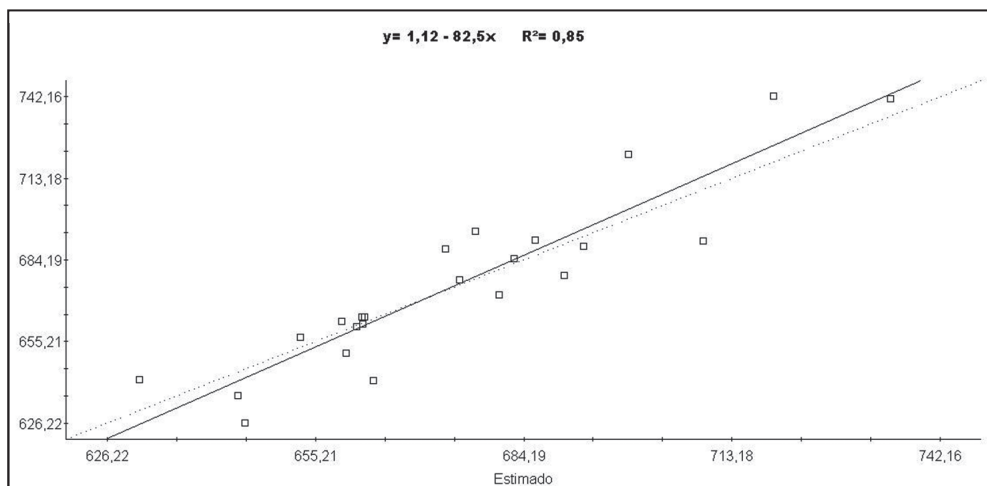


Figura 4 Gráfico de validação cruzada referente ao modelo esférico proposto para os dados da área estudada.

espacial foi classificada como forte, validando a aplicação da krigagem na interpolação dos dados que foi superestimado em 10%, erro aceitável, o que convalida a aplicação da krigagem na interpolação dos dados e destaca a importância da modelagem do semivariograma na utilização da interpolação. Por meio dos programas computacionais específicos é possível verificar o resultado da interpolação em mapa, o que auxilia na interpretação dos dados.

O trabalho demonstra a importância da integração de um Sistema de Informações Geográficas (SIG) com procedimentos geoestatísticos na interpolação de dados espacialmente distribuídos, consolidando-se como uma ferramenta para a gestão dos recursos hídricos.

5 Agradecimentos

Os autores agradecem à CAPES pela bolsa de mestrado de CSM e ao CNPq pela PQ2 de ACPF - Processo 305300/2012-1.

6 Referências

- Ahmadi, S. H. & Sedghamiz, A. 2007. Geostatistical Analysis of Spatial and Temporal Variations of Groundwater Level. *Environ Monit Assess*, 129: 277-294.
- Ayres, M.; Ayres Junior, M.; Ayres, D.L. & Santos, A.S. 2007. BioEstat 5.0. Aplicações estatísticas nas áreas das ciências biológicas e médicas. Belém: Sociedade Civil Mamirauá/ CNPq, 380p.
- Bettini, C. 2007. Conceitos básicos de Geoestatística. In: Meirelles, M.S.P.; Câmara, G. & Almeida, C.M. (eds.). *Geomática: modelos e aplicações ambientais*. Brasília: Embrapa, p. 193-234.
- Bogaert, P. 1996. Comparison of kriging techniques in a space-time context. *Mathematical Geology*, 28: 73-86.
- BRASIL. Decreto nº 89.817, de 20 de Junho de 1984. Estabelece as Instruções Regulamentadoras das Normas Técnicas da Cartográfica Nacional. Diário Oficial da União de 27 de Jul de 1984.
- Delgado, C.; Pacheco, J.; Cabrea, A.; Baltlori, E.; Orellana, R. & Baustista, F. 2010. Quality of groundwater for irrigation in tropical karst environment; the case of Yucatan, Mexico. *Agricultural Water Management*, 97: 1423-1433.
- Demir, Y.; Ers Ahin, S.; Guler, M.; Cemek, B.; Gunal, H. & Arslan H. 2009. Spatial variability of depth and salinity of groundwater under irrigated ustifluents in the Middle Black Sea Region of Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 158: 279-294.
- Hirata, F. 1988. Groundwater pollution risk assessment: a methodology using available data. WHO-PAHO-CEPIS, Lima.
- Gokalp, Z.; Basaran, M.; Uzun, O. & Serin, Y. 2010. Spatial analysis of some physical soil properties in a saline and alkaline grassland soil of Kayseri, Turkey. *African Journal of Agricultural Research*, 5(10):1127-1137.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. MAPGEO2010 - Sistema de Interpolação de Ondulação Geoidal, software versão 1.0.
- Isaaks, E.H. & Srivastava, R.M. 1989. *An introduction to applied*

- geostatistics*. New York: Oxford University Press, 561 p.
- Landim, P.M.B.A. 2003. Análise estatística de dados geológicos. 2ª. ed. revisada e ampliada – São Paulo: Editora UNESP.
- Leuangthong, O.; McLennan, J. A. & Deutsch, C.V. 2004. Minimum acceptance criteria for geostatistical realizations. *Natural Resources Research*, 13: 131-141.
- Matheron, G. 1963. Principles of geostatistics. *Econ. Geol.*, 58:1246-1266.
- Miranda, J.I. 2005. Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 425p.
- Montebeller, C.A.; Ceddia, M.B.; Carvalho, D.F.; Vieira, S.R. & Franco, E.M. 2007. Variabilidade espacial do potencial erosivo das chuvas no Estado do Rio de Janeiro. *Engenharia Agrícola*, 27(2): 426-435.
- Landim, P.M.P. 2003. *Análise estatística de dados geológicos*. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 253 p.
- Lima, J.S.S; Silva J.T.O; Oliveira, R.B; Almeida, V.S. & Vanzo, F.L. 2006. Estudo da viabilidade de métodos geoestatísticos na mensuração da variabilidade espacial da dureza da madeira de Paraju (*Manilkara* sp). *Revista Árvore*, 30(4): 651-657.
- Lourenço, W.R. 2002. *Modelagem geoestatística por geoprocessamento em uma área da baixada santista*. Programa de pós graduação do Instituto de Geociência e Ciência Exata, Rio Claro. Tese Doutorado, 213p.
- Pokrajac, D.; Hoskinson, R.L. & Obradović, Z. 2003. Modeling spatial-temporal data with a short observation history. *Knowledge and Information Systems*, 86: 368-386.
- Porto, A.L; Soares, J.A. & Monteiro, V.E.D. 2011. Otimização da malha de amostragem de compostos orgânicos voláteis no solo através de Krigagem. *Águas Subterrâneas*, 25 (1):57-73.
- Reghunath, R.; Sreedhara Murthy, T.R. & Raghavan, B.R. 2005. Time series analysis to monitor and assess water resources: A moving average approach. *Environmental Monitoring and Assessment*, 109: 65-72.
- Ribeiro, M.D.; Rocha, W.F. & Garcia, A.J.V. 2011. Vulnerabilidade Natural À Contaminação dos Aquíferos a Sub-bacia do Rio Siriri, Sergipe. *Águas Subterrâneas*, 25(1): 91-102.
- Robertson, G.P.1998. *GS+ geostatistics for the environmental sciences: GS+ users guide*. Plainwell, Gamma Design Software, 152p.
- Thales Navigation. 2002. *Ashtech Solutions 2.60*. Santa Clara – USA. CD-ROM
- Theodossiou, N. & Latinopoulos, P. 2007. Evaluation and optimisation of groundwater observation networks using the Kriging methodology. *Environmental Modelling & Software*, 21(7): 991-1000.
- Vieira, S.R. & Lombardi Neto, F. 1995. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo. *Bragantia*, 54(2): 405-412.
- Zhou, Z.; Zhang, G.; Yan, M. & Wang, J. 2011. Spatial variability of the shallow groundwater level and its chemistry characteristics in the low plain around the Bohai Sea, North China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 184: 3697-3710.
- Zimback, C.R.L. 2001. *Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade*. (Livro-Docência em Levantamento do Solo e Fotopedologia) – Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 114p.
- Zimmerman, D.L. & Zimmerman, M.B. 1991. A comparison of spatial semivariogram estimators and corresponding ordinary kriging predictors. *Technometrics*, 33: 77-91.