

SUPERFÍCIE HIDROSTÁTICA DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

*Marcos Nóbrega II¹; Gerson Flôres Nascimento²; Francisco de Assis Matos de Abreu³;
Francisco de Assis dos Reis Barbosa⁴*

Resumo - O objetivo deste trabalho foi a aplicação da teoria das variáveis regionalizáveis no estudo da condutividade elétrica de águas subterrâneas de 141 poços, sendo 84 amostras de poços amazonas e 57 amostras em poços tubulares, no perímetro urbano de Porto Velho no Estado de Rondônia – Brasil. A descrição estatística dos dados de condutividade elétrica foi realizada com a utilização de planilha eletrônica Microsoft Excel, posteriormente foi utilizada a ferramenta de krigagem ordinária para estimação da superfície hidrostática e identificação da variação da salinidade nas águas estudadas. Muito embora os valores médios da condutividade elétrica tenham se enquadrado em uma faixa aceitável, o trabalho permitiu identificar uma acentuada variação de condutividade elétrica nas águas estudadas; além disso, a estimação por krigagem permitiu a identificação da distribuição das concentrações desta condutividade na área de estudo.

Palavras-Chave - Condutividade elétrica, águas subterrâneas, Porto Velho.

HYDROSTATIC SURFACE OF GROUNDWATER

Abstract – The objective of this work was the application of the theory of regionalised variables in the study of electrical conductivity of groundwater from 141 wells, of which 84 samples dug wells and 57 samples in wells, in urban Porto Velho in Rondônia – Brazil. Statistical description data of electrical conductivity was performed using Microsoft Excel spreadsheet subsequently tool was used to estimate the kriging surface hydrostatic and identification of their salinity waters studied. Although the mean values of conductivity have is framed in an acceptable range, the work identified a sharp change in electrical conductivity waters studied, also kriging estimation led to the identification of the distribution of conductivity concentrations in this area of study.

Keywords –. Electrical conductivity, Groundwater, Porto Velho.

INTRODUÇÃO

No contexto da qualidade da água, em geral, ela contém vários componentes, alguns provenientes do próprio ambiente natural ou foram introduzidos a partir de ações antrópicas, a caracterização de uma água é feita por diversos parâmetros, os quais representam as suas características físicas, químicas e biológicas. Esses parâmetros são indicadores da qualidade da água e constituem impurezas quando não cumprem os valores estabelecidos para determinado uso. Neste trabalho foram utilizadas medidas de condutividade elétrica (CE), coletadas em 141 poços no município de Porto Velho, sendo 57 amostras de poços tubulares e 84 em poços amazonas.

Além das informações sobre o comportamento da condutividade elétrica da água que servem para a determinação de sua qualidade quanto à salinidade, existem outras informações que são relevantes do ponto de vista da qualidade associada ao custo de tratamento, por exemplo, quando existe interesse em identificar a direção e a quantidade alterada do teor de um determinado parâmetro, quando comparado a certo limite estabelecido. Neste caso, a metodologia geoestatística

¹ CPRM - Serviço Geológico do Brasil, marcos.nobrega@cprm.org.br

² UNIR – Universidade Federal de Rondônia, geronfn@unir.br

³ UFPA – Universidade Federal do Pará, famatos@ufpa.br

⁴ CPRM - Serviço Geológico do Brasil, fracisco.reis@cprm.gov.br

ou teoria das variáveis regionalizadas (LANDIM, 2003), é uma ferramenta adequada para a referida discussão. Similarmente a diversas cidades brasileiras, as informações quantitativas resultantes da aplicação de métodos geoestatísticos também contribuirão positivamente para a gestão de recursos hídricos subterrâneos da cidade de Porto Velho, no Estado de Rondônia.

Na cidade Porto Velho que não possui rede coletora de esgoto, existe a cultura de captar água subterrânea a partir de poços amazonas, com maior frequência nos bairros periféricos, tendo em vista que aproximadamente metade da população não tem acesso à água tratada com regularidade.

O perímetro urbano da cidade de Porto Velho é constituído por uma associação de sedimentos fluviais e colúvio-aluviais fortemente heterogênea com intercalações de sedimentos arenosos, argilosos e siltosos, denominados de Formação Jaciparaná, de idade pleistocênica (CAMPOS, 1998). O referido aquífero é do tipo livre a confinado, com superfície freática situada entre 1 a 5 metros de profundidade, segundo Campos e Morais (1999 apud ADAMY, 2010, p.99).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho foi a aplicação da metodologia geoestatística no estudo do comportamento espacial da condutividade hidráulica e da carga hidráulica de águas subterrâneas da área urbana da sede do município de Porto Velho – RO, no período de alta pluviosidade do ano de 2012.

Condutividade elétrica - CE

A condutividade elétrica expressa à capacidade de condução de corrente elétrica de sais dissolvidos e ionizados presentes na água, pode ser utilizado como parâmetro de avaliação de qualidade. Neste caso, a condutividade também fornece uma indicação aceitável das modificações na composição da água, especialmente na sua concentração mineral, mas não fornece nenhuma indicação das quantidades relativas dos vários componentes que existem na água (SOUZA *et al.*, 2012).

Geoestatística

A Geoestatística é uma aplicação da teoria das variáveis regionalizadas para estimar processos ou fenômenos geológicos no espaço. Se uma variável distribuída no espaço apresentar uma estrutura espacial de correlação, então é dita regionalizada (CALVETE e RAIMIRÉZ, 1990).

Para quantificação da incerteza implícita ao fenômeno hidrogeológico, a partir da Geoestatística, foi elaborado um conjunto de técnicas probabilísticas (KITANIDIS, 1997) que permite detectar e modelar padrões da dependência espacial de atributos bem como avaliar o risco associado. Esta abordagem não paramétrica mostra-se particularmente eficaz na avaliação do estado de poluição do meio hídrico subterrâneo onde é comum a ocorrência de valores anômalos. A confecção de mapas de risco assim construídos são muito úteis nas tomadas de decisão de planejamento e gestão em recursos hídricos.

As técnicas geoestatísticas podem ser utilizadas para descrever e modelizar padrões espaciais, para prever valores em locais não amostrados a partir de amostras vizinhas, para obter a incerteza associada a um valor estimado em locais não amostrados e para otimizar malhas de amostragem (ANDRIOTTI, 2004).

Com base na metodologia geoestatística realiza-se a análise da estrutura e da dependência espacial, a partir da forma do semivariograma com seus respectivos parâmetros (C =variância espacial, C_0 =efeito pepita, $C + C_0$ =patamar, A =alcance). Tanto a estrutura quanto a dependência espacial entre os valores observados podem ser expressas pela relação

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} \cdot \text{Var} [Z(x+h) - Z(x)] \quad (1)$$

onde a função $\gamma(h)$ é definida como semivariograma ou função intrínseca (ISAACS e ISRIVASTAVA, 1989).

Para Journel e Huijbregts (1978), uma estimativa para $\gamma(h)$ definido na relação (1) é dada por $\hat{\gamma}(h)$:

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

Onde: $\hat{\gamma}(h)$ é o valor estimado do semivariograma calculado na medida (intervalo) h ; $z(x_i)$ é o valor da variável regionalizada no ponto x_i ; $z(x_i+h)$ é o valor da variável regionalizada no ponto x_i+h e; $n(h)$ é o número de pares de valores separados entre si pela medida $|h|$ na direção desse vetor.

O grau de dependência espacial das variáveis, também pode ser classificado de acordo com Cambardella *et al.* (1994) e Guimarães (2004), no qual são considerados de forte dependência espacial os semivariogramas que têm efeito pepita menor ou igual a 25% do patamar $[[C_0/(C_0+C)] \leq 0.25]$, de moderado quando têm efeito pepita entre 25% e 75% do patamar $[0.25 < [C_0/(C_0+C)] \leq 0.75]$, de fraca dependência espacial quando têm efeito pepita entre 75% e 100% do patamar $[0.75 \leq [C_0/(C_0+C)] < 1.00]$ e de independência espacial os que têm o efeito pepita igual a 100% do patamar $[[C_0/(C_0+C)] = 1.00]$.

O semivariograma serve para analisar o grau de dependência espacial entre amostras dentro de um campo experimental (SALVIANO, 1996); ele é definido a partir da variância das medidas feitas em amostras espaçadas no campo de determinada distância h .

Assim, um dos principais objetivos de um estudo variográfico é identificar qual semivariograma teórico melhor se ajusta ao semivariograma experimental, de tal modo que, a partir desse modelo teórico, possam ser feitas estimativas. O semivariograma com melhor ajuste é aquele que possui o melhor ajuste de dados à reta de 45° (valores reais versus estimados) obtido pela validação cruzada. A validação cruzada é o procedimento mediante o qual cada amostra é retirada do conjunto de dados e é feita uma *krigagem* para avaliar seu valor; o valor médio das diferenças será tão mais próximo de zero quanto melhor for a estimativa (ANDRIOTTI, 2004).

Na existência de dependência espacial, as estimativas dos pontos não observados podem ser obtidas pela técnica de *krigagem* (LANDIM, 2003).

Seja um ponto que se deseja estimar, sendo o valor real desconhecido representado por Z , de acordo com Isaacs & Srivastava (1989), Landim (2003) e Andriotti (2004), o valor estimado por *krigagem* (Z_k^*) é calculado com o uso de n amostras vizinhas localizadas, segundo coordenadas conhecidas, com valores $Z(x_1)$, $Z(x_2)$, $Z(x_3)$, ..., $Z(x_n)$, conforme combinação linear:

$$Z_k^* = \lambda_1 Z(x_1) + \dots + \lambda_n Z(x_n) \quad (3)$$

Onde Z_k^* é o estimador de *krigagem*, λ_i são os ponderadores (pesos atributos) a cada amostra i , $Z(x_i)$ são os dados experimentais e n é o número de amostras.

A *krigagem* se baseia numa série de técnicas de análise de regressão (sejam elas transformações lineares ou transformações não-lineares), procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo matemático prévio que leva em conta a dependência de variáveis

regionalizadas entre os dados distribuídos no espaço (LANDIM, 2003). Dentre os diversos tipos de *krigagem*, os mais utilizados *krigagem* simples, *krigagem* ordinária, *krigagem* universal e *krigagem* indicativa. A *krigagem* ordinária é uma técnica de estimativa linear para uma variável regionalizada que satisfaz à hipótese intrínseca, onde a média não é conhecida e é assumida a hipótese de quase-estacionariedade; sendo que essa técnica é utilizada quando a variável regionalizada é estacionária de segunda ordem (ISAKS e SRIVASTAVA, 1989, LANDIM, 2003; GUIMARÃES, 2004).

RECURSOS METODOLÓGICOS

Na Figura 1 consta a localização dos pontos amostrados para este trabalho, em coordenadas UTM e *datum* WGS-84.

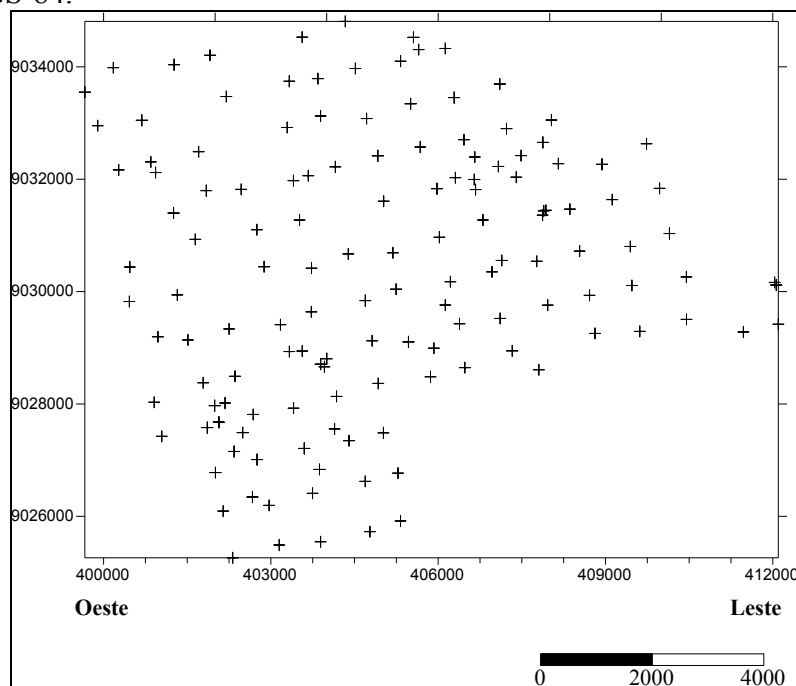


Figura 1 - Malha de coleta das amostras

Sobre os resultados numéricos das medidas de condutividade hidráulica e carga hidráulica - CH (diferença entre Cota e nível estático - NE, isto é, $CH = Cota - NE$), foram obtidas as informações descritivas sobre valores de mínimo, máximo, média, desvio padrão e coeficiente de variação (BUSSAB e MORETTIN, 2002; GOMES, 1990). Na descrição estatística dos dados foram utilizadas planilhas eletrônicas da *Microsoft Office Excel*.

Após comprovação da existência de dependência espacial, as estimativas dos pontos não observados foram obtidas pela técnica de *krigagem* ordinária e os resultados de Geoestatística foram obtidos a partir da utilização do *software* GS⁺ versão 9.0 (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2011).

RESULTADOS

Na Portaria N° 518 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2004) não consta referência sobre valores máximos ou mínimos de condutividade elétrica. No entanto, Champman e Kimstach (1998) estabelecem que a condutividade elétrica em águas doces deva variar de 10 a 1000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. De acordo com os dados da Tabela 1, os valores de condutividade elétrica estudados estão com os limites citados.

TABELA 1 – Descrição estatística das variáveis estudadas

Tipo de Poço	Estatísticas	Cota (m)	NE (m)	CH (m)	CE ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$)
Tubular	Mínimo	65	1	63.7	13
	Máximo	100	15.04	94.91	154
	Amplitude	35	14.04	31.21	141
	Média	86.04	6.62	79.41	104.93
	Desvio padrão	5.3618	3.7514	6.1087	68.3554
	Coeficiente de Variação (%)	6.23	56.67	7.69	65.14
Amazonas	Mínimo	59	0.02	58.4	9
	Máximo	104	16	102.9	190
	Amplitude	45	15.98	44.5	181
	Média	86.25	3.47	82.78	134.26
	Desvio padrão	6.4972	3.6065	6.6583	82.1877
	Coeficiente de Variação (%)	7.53	103.88	8.04	61.21

NE = nível estático, CH = carga hidráulica e CE = condutividade elétrica.

Os parâmetros dos semivariogramas ajustados estão dispostos na Tabela 2.

TABELA 2 – Parâmetros dos semivariogramas ajustados

Parâmetro - Poço	Modelo	Co	Co + C	a (m)	GDE	Classificação
CE - Tubular	Gaussiano	1340	4902	2702	0,273	Moderado
CH - Tubular	Esférico	7,10	40,91	2750	0,174	Forte
CE - Amazonas	Gaussiano	10	6938	1195	0,001	Forte
CH - Amazonas	Esférico	16,57	45,02	4880	0,368	Moderado

Co = efeito pepita, Co + C, = patamar, a = alcance, GDE = $\text{Co}/(\text{Co} + \text{C})$ = grau de dependência espacial.

A partir dos semivariogramas ajustados foram estimados os mapas da distribuição de condutividade elétrica e da carga hidráulica na área estudada, conforme as figuras a seguir:

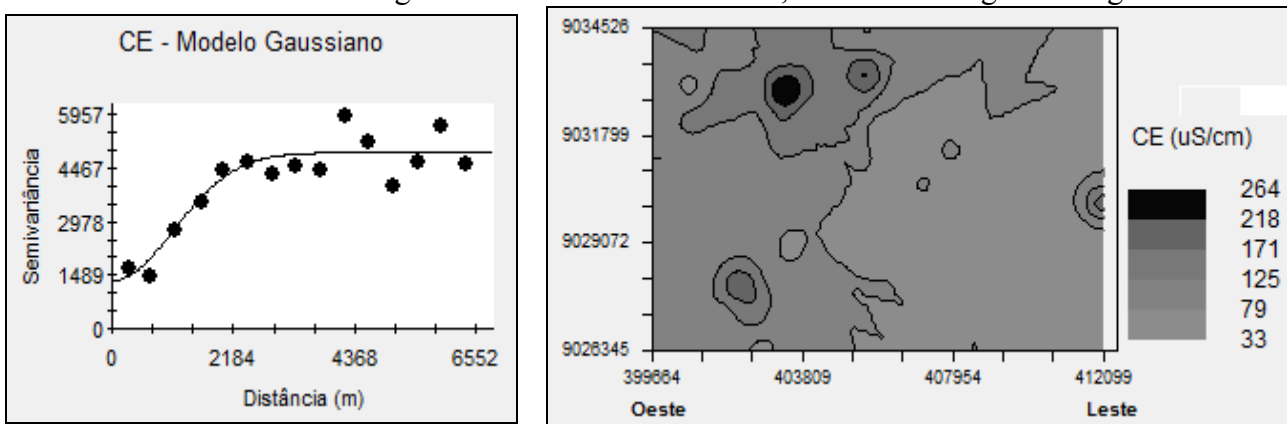


Figura 2 – Semivariograma e mapa de krigagem da condutividade elétrica para poços tubulares

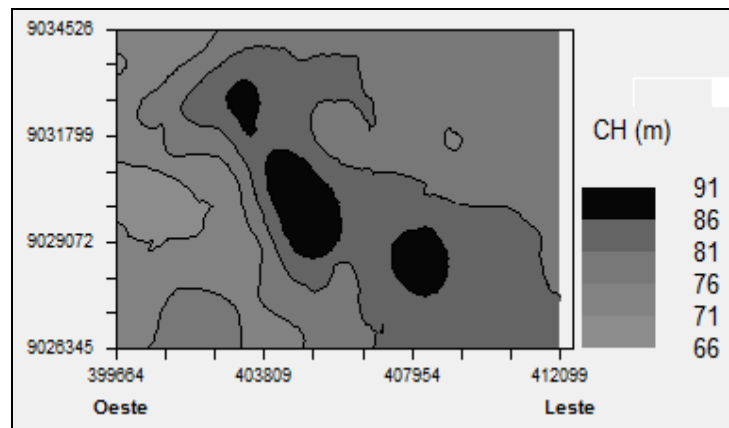
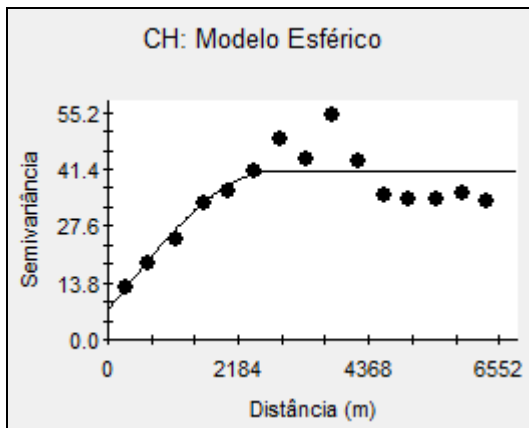


Figura 3 – Semivariograma e mapa de krigagem da carga hidráulica para poços tubulares

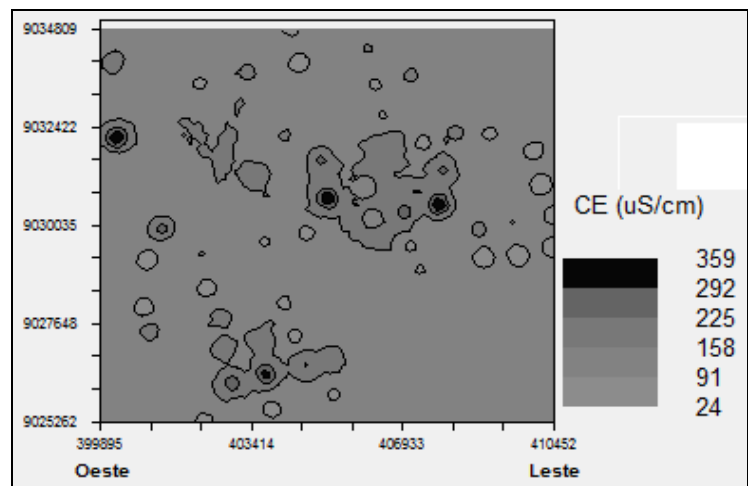
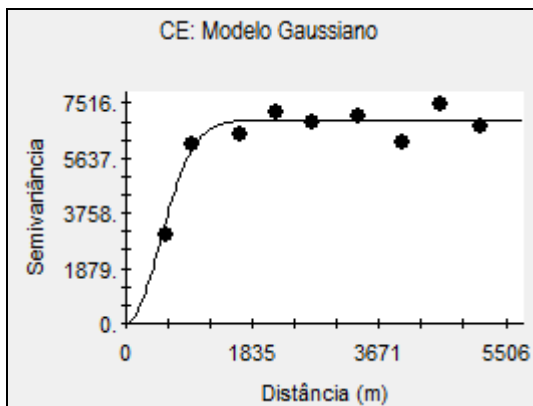


Figura 4 – Semivariograma e mapa de krigagem da condutividade elétrica para poços amazonas

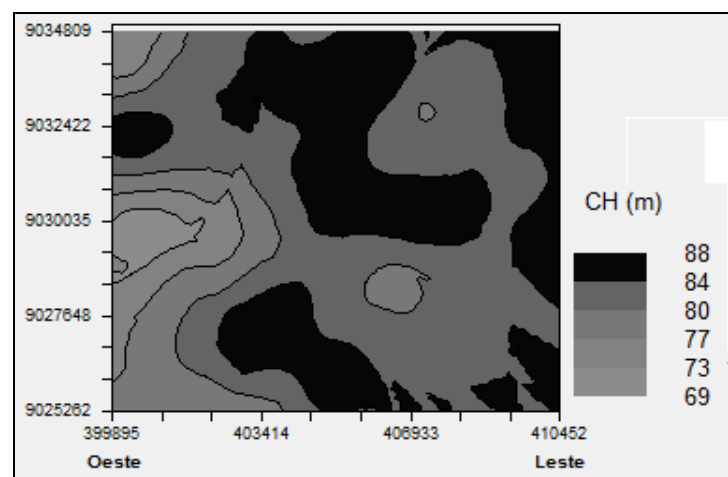
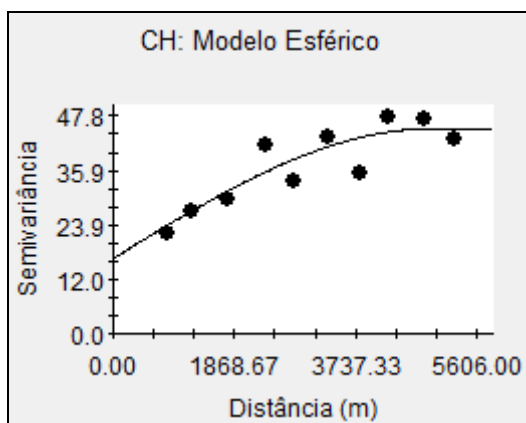


Figura 5 – Semivariograma e mapa de krigagem da carga hidráulica para poços amazonas

CONCLUSÕES

A pesquisa permitiu concluir que as águas subterrâneas analisadas possuem condutividade elétrica dentro de padrões aceitáveis, indiferentemente de serem coletadas de poços amazonas ou poços tubulares.

Com a teoria geoestatística foi possível observar que a distribuição da CE um fenômeno isotrópico, isto é, os semivariogramas construídos para as diferentes direções não apresentaram diferenças significativas e os modelos ajustados ofereceram segurança nas estimativas realizadas.

A análise geoestatística serviu para evidenciar a presença de forte dependência espacial da CE nos poços amazonas e contra moderada dependência espacial nos poços tubulares. A carga hidráulica dos poços tubulares apresentou forte relação espacial. A variável carga hidráulica permitiu a representação da superfície hidrostática e a variável condutividade elétrica permitiu a visualização da variação da salinidade das águas subterrâneas estudadas, considerando que a salinidade é linearmente correlacionável com a condutividade elétrica.

O estudo desse parâmetro deve ser replicado periodicamente para efeitos de construção de uma série de dados que sirva de referência numa escala temporal.

Os resultados provenientes da definição aleatória de uma malha para coleta de amostras servirá de subsídios para trabalhos que visem à definição de um plano amostral para aplicação de metodologia geoestatística em variáveis hidrogeológicas.

REFERÊNCIAS

- ADAMY, A. (2010). *Geodiversidade do Estado de Rondônia*. CPRM Porto Velho, 337 p.
- ANDRIOTTI J.L.S. (2004). *Fundamentos de Estatística e Geoestatística*. Editora da UNISINOS São Leopoldo, 165 p.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde (2004). Coordenação-Geral de Vigilância em Saúde Ambiental. Portaria MS Nº 518/2004. Brasília, 2004. Disponível em: <http://portal.saude.gov.br/portal/arquivos/pdf/portaria_518_2004.pdf>. Acesso em: Ago. 2009. 34p.
- BUSSAB, W.O.; MORETTIN, P.A. (2002). *Estatística básica*. Saraiva São Paulo, 526p.
- CALVETE, F.J.S.; RAMIRÉZ J.C. (1990). *Geoestadística: aplicaciones a la hidrología subterránea*. Centro Internacional de Métodos Numéricos em Ingeniería Barcelona, 484 p.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. (1994). Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Science Society of America Journal*, 58 (5), pp. 1501-1511.
- CAMPOS, J. C. V. (1998). Avaliação preliminar do potencial hidrogeológico da cidade de Porto Velho (RO). In Anais do X Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Curitiba, 1998, 10, *Anais eletrônicos...* Disponível em: < <http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2/index.php/asubterraneas/article/view/22238/14583> >. Acesso em: 02 mar 2012.

CHAMPMAN, D.; KIMSTACH, V. (1998) Selection of water quality variables. In: *CHAMPMAN, D. Water quality assessments: a guide to the use of biota, sediments and water in environmental monitoring*. UNESCO/WHO/UNEP, Cambridge, pp.59-126.

GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2011. GS⁺ Geoestatistical for the Environmental Science. Version 9.1 (build 2011). Michigan: Design Software.

GOMES, F.P.(1990). *Curso de estatística experimental*. Nobel São Paulo, 467 p.

GUIMARÃES, E.C. (2004). *Geoestatística Básica e Aplicada*. Editora da Universidade Federal de Uberlândia – MG, 76p.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. (1989). *Applied Geostatistics*. Oxford University Press New York, 561p.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. J. (1978). *Mining Geostatistics*. Academic Press London, 599 p.

KITANIDIS, P.K. (1997). *Introduction Geostatistics: Applications to Hydrology*. Cambridge University Press Cambridge England. 249 p.

LANDIM, P.M.B (2003). *Análise Estatística de Dados Geológicos*. Editora da UNESP São Paulo, 253 p.

SALVIANO, A. A. C. (1996). *Variabilidade de Atributos do Solo e de Crotalaria Juncea em Solo Degradado do Município De Piracicaba-Sp*. Piracicaba, 1996, 91p. Tese de doutorado. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo.

SOUZA, D.F.; PINTO, A.L.; MENDES, A.M.S.; OLIVEIRA, G.H. (2012). Classificação CONAMA das limitações de uso da água superficial da lagoa Maior, Três Lagoas/MS. *Revista Geonorte*, Edição Especial 3(4), pp.771-780.