

## **APLICAÇÃO DE GEOESTATÍSTICA PARA MODELOS CONCEITUAIS HIDROGEOLÓGICOS EM GERENCIAMENTO DE ÁREAS CONTAMINADAS**

*Caetano Pontes Costanzo<sup>1\*</sup>; Alexandre Campana Vidal<sup>2</sup>; Marina Marques Gimenez<sup>3</sup> & Simony Yumi Yaginuma Sakamoto<sup>4</sup>*

**Resumo** – Este trabalho objetiva elaborar um modelo geoestatístico que sirva de ferramenta para a validação do uso da condutividade hidráulica em função de cada litologia. Para isso, utilizou-se da comparação dos resultados de distribuição litológica e o comportamento do fluxo do lençol freático, gerados por um modelo geoestatístico. A base de dados utilizada refere-se a uma malha de 32 poços de monitoramento instalados em uma área contaminada, disponibilizada pela empresa Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda. O modelo geoestatístico foi elaborado através da técnica de krigagem por indicação, onde foram definidos três grupos litológicos principais: Areias, Cascalho e Argilas. A junção dos diferentes grupos em um único modelo foi realizada respeitando a descrição nos poços e mantendo a mesma proporção dos grupos de sedimentos. Os resultados indicaram uma evidente correlação entre o modelo sedimentar e o comportamento do nível estático. É possível observar que uma maior presença de arenitos em área predominantemente argilosa provoca o rebaixamento do nível d'água. Vale destacar que os resultados obtidos são independentes, sendo assim, a boa correlação entre as duas variáveis permite a atribuição de condutividade hidráulica para cada grupo litológico.

**Palavras-Chave** – Fluxo, Condutividade e Litologia.

## **THE APPLICATION OF GEOSTATISTICS IN HYDROLOGICAL CONCEPTUAL MODELS OF CONTAMINATED AREA MANAGEMENT**

**Abstract** – The aim of this work is to develop a geostatistical model to serve as a tool to validate the use of hydraulic conductivity as a function of each lithology. For this purpose, a comparison was made between the results of lithological distribution and the behavior of groundwater flow generated by a geostatistical model. The database used was provided by Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda., and refers to 32 monitoring wells installed in a contaminated area. The geostatistical model was developed using the "Krigagem" method where three main lithological groups were defined: Sand, Gravel and Clay. The combination of the different groups in one model was made honoring the wells description and maintaining the same proportion of each sediment group. The results indicated a clear correlation between the sediment model and the static water level behavior. It is possible to observe that a higher presence of sand in predominant clay area creates higher lowering of the water level. Note that the results obtained are independent from each other, thus the good correlation between this two varies allows the attribution of hydraulic conductivity to each lithology group.

**Keywords** – Flow, Conductivity and Lithology.

<sup>1</sup> Afiliação: UNICAMP, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia e Recursos Naturais, caetano.costanzo@gmail.com.

<sup>2</sup> Afiliação: UNICAMP, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia e Recursos Naturais, vidal@ige.unicamp.br.

<sup>3</sup> Afiliação: Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda., marina@walmambiental.com.br.

<sup>4</sup> Afiliação: Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda., simony@walmambiental.com.br.

## INTRODUÇÃO

A geração de modelos de subsuperfície para o tratamento de incerteza é pouco utilizada devido à grande variabilidade espacial de muitos parâmetros, como a condutividade hidráulica. O comportamento desta variável é de difícil previsão, sendo em muitos casos correlacionada com a litologia encontrada no terreno. Com isso, a determinação da melhor distribuição litológica resultará no melhor modelo geológico para ser aplicado em um simulador de fluxo.

Para avaliar a viabilidade em aplicar a atribuição de condutividade hidráulica para cada litologia, foi realizada a comparação do comportamento do fluxo, representado pelo mapa do nível d'água, e a distribuição das diferentes litologias. Isso para verificar se há alguma variação nas condições de fluxo relacionadas à variação litológica.

Para a realização da distribuição de litologia foi aplicado o método geoestatístico da krigagem por indicação.

Segundo Deutsch & Journel (1992), dentre as diferentes vertentes de estudos estatísticos existentes, a geoestatística é aquela que tem por objetivo analisar a variabilidade espacial ou temporal de determinado conjunto de dados. Esta ferramenta oferece a possibilidade para descrever a continuidade espacial, característica importante para diversos fenômenos naturais. Dessa forma, ela utiliza-se de técnicas de regressão linear clássicas, no entanto adaptadas, para aprimorar o desempenho no tratamento da variabilidade regional, Isaaks & Srivastava (1989).

A Krigagem por indicação, Journel (1984), serve para produzir a predição de valores sobre uma superfície ou volume e, sobretudo, para gerar modelos de incertezas locais para dados geográficos que compartilham uma base de informações. Esta técnica compreende um tipo não linear da krigagem que se utiliza da posição de valores dos dados para gerar uma distribuição local em vez de uma distribuição global das propriedades analisadas, Goovaerts (1997).

Assim, a geração de modelos geoestatísticos a partir de informações de poços de monitoramento instalados em áreas contaminadas, possibilita a simulação das possibilidades de configurações de litologias e nível d'água para caracterizar e aprimorar um determinado modelo conceitual de contaminação de um aquífero.

A base de dados utilizada refere-se às informações de 32 poços de monitoramento instalados em uma área contaminada, disponibilizada pela empresa Walm Engenharia e Tecnologia Ambiental Ltda. (Figura 1). Desta base de dados foram utilizadas as informações de litologia, nível d'água, carga hidráulica e cota do terreno.

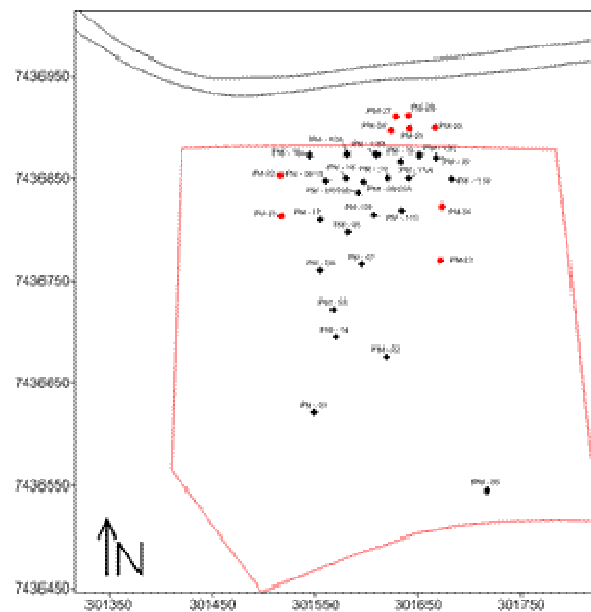


Figura 1 – Mapa do *site* contaminado com a localização dos poços de monitoramento utilizados neste trabalho.

## MÉTODO

A técnica da Krigagem por indicação estima a probabilidade de ocorrência de variáveis discretas, que no caso deste estudo, compreendem as descrições de litologias nos poços. Este método tem como etapa inicial a transformação binária dos dados. Desta maneira, são geradas as variáveis indicatrizes ( $I(x)$ ). Dado um conjunto  $A$  e o complementar  $A^c$ , no domínio  $D$ , onde há amostras  $x_i$  localizadas em  $A$  com  $i=1, \dots, n$ . A variável indicatriz  $I(x_i)$  é dada por:

$$I(x_i) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_i \in A \\ 0 & \text{se } x_i \in A^c \end{cases} \quad (1)$$

onde  $X$  é um conjunto do domínio  $A$  e  $X^c$  o conjunto complementar de  $X$ .

A condição conduz a um quadro onde os valores assumidos a cada conjunto e em cada ponto amostral pertençam a 0 ou 1. Posterior à definição das variáveis indicatrizes realizam-se procedimentos similares ao utilizado na krigagem ordinária, como a determinação do variograma experimental das indicatrizes e o ajuste do modelo variográfico. Para auxiliar a criação do modelo foi utilizado o software livre SGeMS – *Stanford Geostatistical Modeling Software*, Remy *et al.* (2004).

A krigagem por indicação foi aplicada para produzir a previsão de valores no espaço 3D. Esta estimativa foi realizada para uma malha composta por 52x53x30 blocos, com dimensões de 8,3x10,2x1m, referentes às posições “x”, “y” e “z” respectivamente.

Para a realização do modelo de distribuição dos diferentes tipos litológicos descritos, o material identificado foi agrupado em quatro grupos conforme a granulacão do sedimento e composição. Os quatro grupos foram definidos na Tabela 1, sendo eles:

- Sedimentos predominantemente arenosos;
- Sedimentos compostos por cascalhos;
- Sedimentos predominantemente argilosos;
- Material composto por concreto e asfalto.

Tabela 1 – Grupos associados aos sedimentos descritos

Sedimentos Arenosos	Aterro arenoso médio a grosso
	Solo arenoso médio a grosso
	Areia fina
	Solo arenoso fino a médio
	Areia argilosa
	Aterro areno-argiloso
	Aterro arenoso grosso
	Aterro arenoso
	Solo areno-siltoso
	Areia argilosa ou Areia pouco argilosa
	Silte arenoso ou Silte pouco arenoso
	Areia siltosa
Cascalho	Cascalho
Sedimentos Argilosos	Aterro argiloso pouco arenoso
	Solo argilo-arenoso
	Solo argiloso
	Silte argiloso
	Solo silto-arenoso
	Argila
	Aterro argilo-arenoso
	Aterro argiloso
	Silte pouco argiloso ou Silte argiloso
	Argila arenosa
	Argila siltosa
Concreto e Asfalto	Piso de concreto
	Asfalto
	Calçada de concreto

Após ajuste dos variogramas para cada litologia e a definição do raio de pesquisa, foi realizada a estimativa, gerando um modelo de distribuição limitado pela distribuição dos poços. Para evitar erros de estimativa, as células da malha fora da área de interesse foram consideradas nulas (cor cinza), como também em porções com baixa densidade de informação.

Foi executada a junção dos diferentes grupos litológicos em um único modelo, honrando a descrição nos poços, o modelo estimado mantém a mesma proporção dos grupos de sedimentos (Areias, Argilas e Cascalho) em relação à proporção obtida nos poços (Figura 2). Assim, mesmo com a extrapolação da estimativa para áreas sem informações de poços, a proporção entre os grupos se mantém semelhante à distribuição original encontrada nos poços.

Porém, vale destacar que em áreas sem a presença de poços há maior probabilidade de erro de estimativa, enquanto em áreas com presença de poços a distribuição dos sedimentos é melhor controlada.

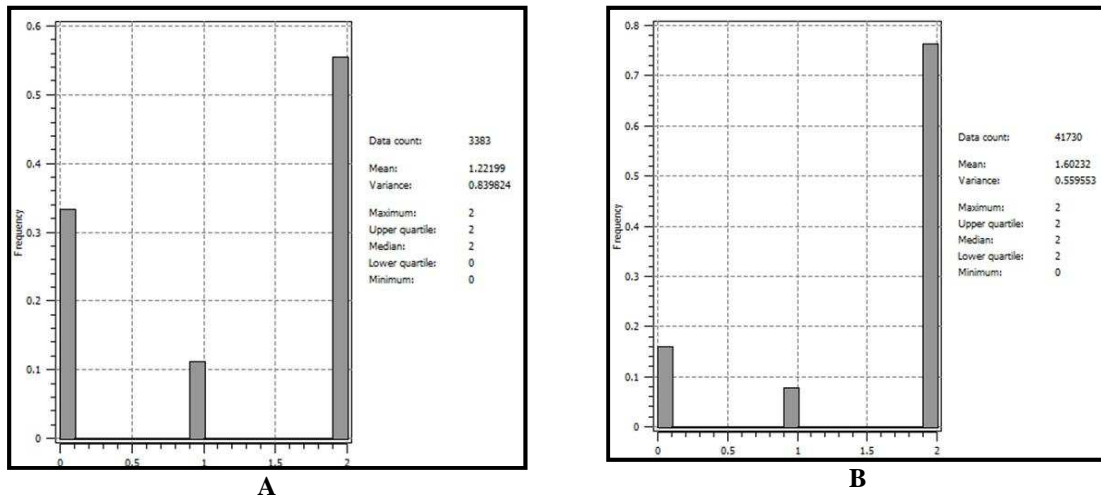


Figura 2 – Distribuição do volume referente a cada um dos grupos de sedimentos. A: volume referente aos poços e B: volume referente ao modelo gerado.

No modelo ainda foram incorporados dados de cota do terreno e nível d'água dos poços. Para essas variáveis foi utilizado a Krigagem Ordinária respeitando as mesmas dimensões da malha de interpolação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Cota do Terreno e Carga Hidráulica

Conforme pode ser visualizado na Figura 3, o terreno da área de estudo é uma superfície relativamente plana, com inclinação mais acentuada somente próxima à margem do rio situado a norte da área. Nesta mesma figura é possível observar que as maiores profundidades, a noroeste da área, indicam a direção principal do fluxo de água subterrânea. Nota-se que a profundidade mais baixa de carga hidráulica é de 686,5m, semelhante à cota altimétrica do rio, indicando uma situação de recarga do rio pelo fluxo do lençol freático local.

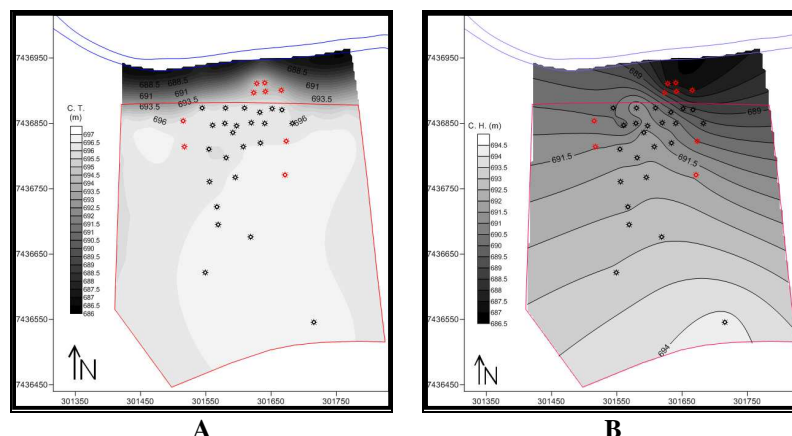


Figura 3 – A: mapa de cota do terreno. B: mapa de carga hidráulica do terreno.

## Distribuição Litológica

Os sedimentos arenosos representam 33,5% do volume descrito, sendo esses sedimentos posicionados próximo à superfície do terreno. Os sedimentos referentes a cascalho ocorrem em posição intermediária no registro dos poços, totalizando 11,5% do volume descrito. Já os sedimentos argilosos predominam nos intervalos de base do registro sedimentar e na porção norte, totalizando 55% do volume descrito nos poços.

Com relação aos materiais referentes a concreto e asfalto, estes correspondem a menos de 1%, sempre posicionados na superfície e com espessuras próximas a 20 cm. Devido a pouca representatividade volumétrica e por estarem sempre posicionados no topo do intervalo não saturado, as descrições referentes a esse material foram descartadas para a etapa de geração do modelo de distribuição de sedimentos. A Figura 4 apresenta a distribuição nos poços dos três principais grupos de sedimentos.

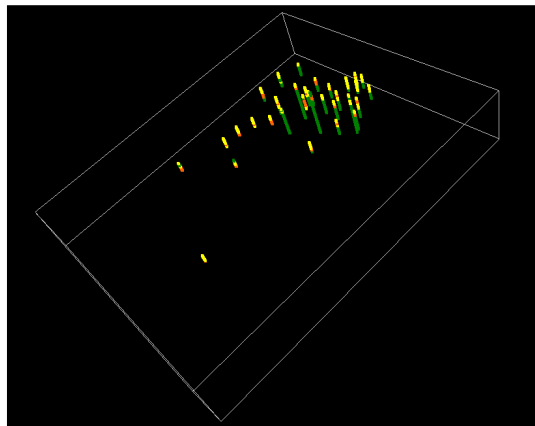
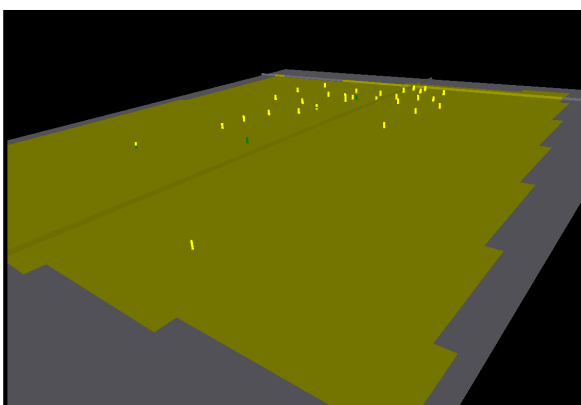
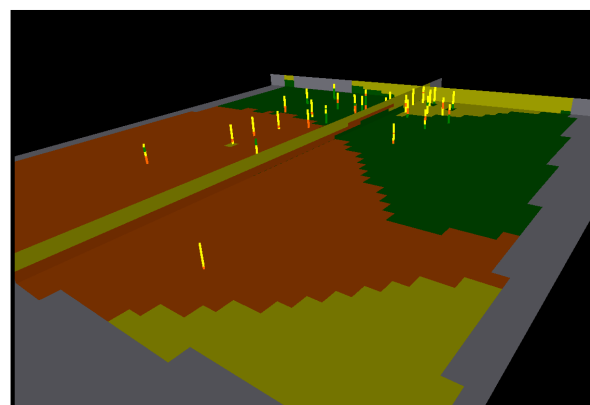


Figura 4 – Distribuição dos poços com a representação das principais litologias. Amarelo – sedimentos arenosos, laranja – cascalho, verde – sedimentos argilosos. O cubo representa o volume utilizado para a estimativa dos sedimentos.

Como esperado pela descrição dos poços, a espessura de aproximadamente 7m, referente às areias e cascalhos, é constante, próxima à superfície na maior parte da área, diminuindo em espessura em direção a borda norte. Essa constante espessura pode ainda ser comprovada na porção centro-norte. Entretanto os intervalos de cascalho predominam na porção leste da área. Na Figura 5 podem ser observadas as proporções de cada tipo de sedimento na superfície do terreno, a 5m de profundidade e numa porção mais profunda.



A



B

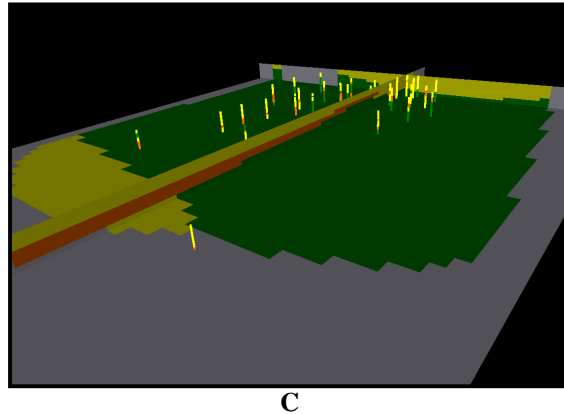
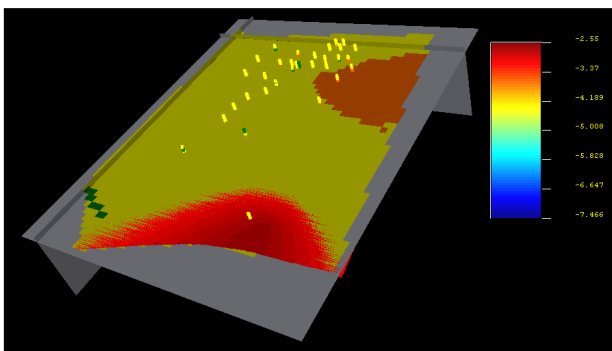


Figura 5 – A: Superfície do terreno, B: 5m de profundidade e C: Porção mais profunda. Amarelo – sedimentos arenosos, laranja – cascalho e verde – sedimentos argilosos.

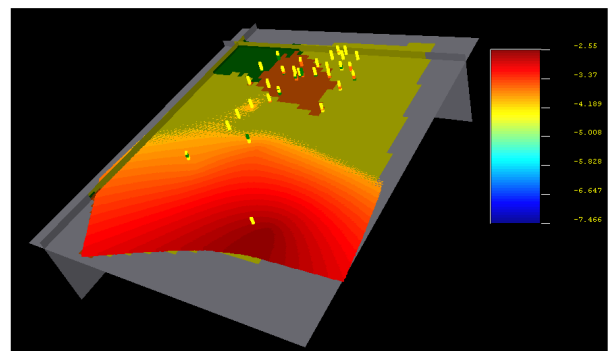
### Nível d'Água

Outra variável estimada foi o nível do lençol freático. A superfície representando a profundidade de ocorrência dessa variável foi interpolada e está presente na Figura 6. A variável apresenta as maiores profundidades do lençol freático em direção à borda norte, coerente com a posição de descarga junto ao rio.

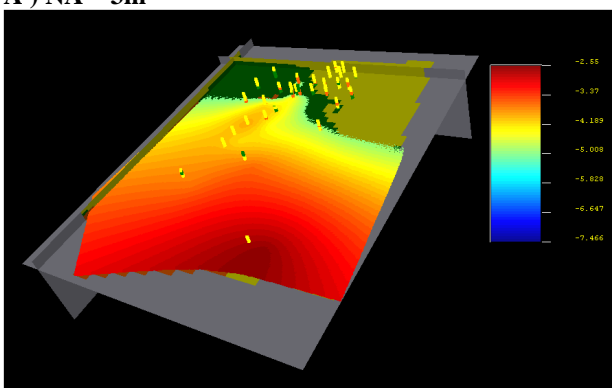
O nível estático encontrado nos poços apresenta variação máxima de profundidade de aproximadamente 5 metros, para a distância de 450 metros. Ao se observar as áreas de maior profundidade do nível do lençol freático, é possível constatar que o maior rebaixamento está associado à porção nordeste da área.



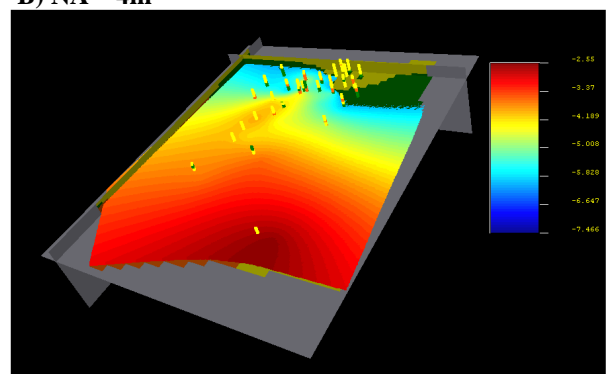
A) NA – 3m



B) NA – 4m



C) NA – 5m



D) NA – 6m

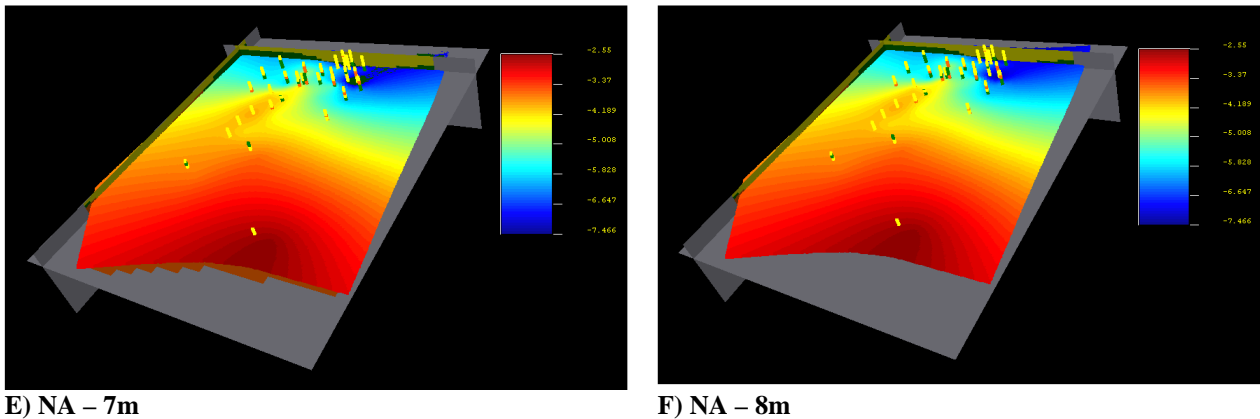


Figura 6 – Evolução do nível do lençol freático local.

## CONCLUSÃO

O modelo hidrogeológico elaborado por meio de técnicas geoestatísticas pode servir de base para uma simulação de fluxo e transporte de contaminantes, bem como auxiliar em tomadas de decisões em relação ao gerenciamento ambiental em áreas com problemas de contaminação.

A evidente correlação entre o modelo sedimentar e o comportamento do nível estático foi constatada ao analisar os dois resultados da modelagem geoestatística. O maior rebaixamento da borda nordeste da área é provocado pela presença maior de arenitos em área que predomina sedimentos argilosos. Com isso, a maior espessura de sedimentos arenosos presente nos poços localizados no limite nordeste pode estar em conexão com a drenagem do rio.

O mapa obtido do nível estático é independente da distribuição litológica. A boa correlação entre as duas variáveis permite a atribuição de condutividade hidráulica para cada grupo litológico. Caso contrário, as condições de fluxo poderiam estar relacionadas a outros fatores.

## REFERÊNCIAS

a) Livro

DEUTSCH, C. V. & JOURNEL, A. G. (1992). *Geostatistical Software Library and User's Guide*. Oxford University Press, 340p.

GOOVAERTS P. (1997). *Geostatistics for natural resources evaluation*. Oxford University Press, 483p.

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

JOURNEL, A.G. (1984). *The Place of Non-parametric geostatistics*. In: G. Verly et al. (Ed.). *Geostatistics for Natural Resources Characterization, Part I*. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, 307-335, 1984.

REMY, N., BOUCHER, A. WU, J. (2004). *Applied Geostatistics with SGeMS*. Cambridge University Press, 264p.