

# A GEOESTATÍSTICA NA ESPACIALIZAÇÃO DO COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE EM SOLOS: experimentação de técnicas de krigagem e simulação

GEOSTATISTICS ON THE SPATIALIZATION OF THE PERMEABILITY COEFFICIENT OF SOILS:  
EXPERIMENTATION OF KRIGING AND SIMULATION TECHNIQUES

RAFAEL MONIZ CAIXETA

Geólogo, UNESP – Rio Claro, SP

E-mail: rmonizcaixeta@gmail.com

ROBSON TEIXEIRA ROLLO

Geólogo, OKM – São José do Rio Preto, SP

Email: robson.teixeira.rollo@gmail.com

JOSÉ RICARDO STURARO

Professor Adjunto, UNESP – Rio Claro, SP

E-mail: sturaro@rc.unesp.br

## RESUMO ABSTRACT

A espacialização do coeficiente de permeabilidade em solos não é uma tarefa simples. Esta variável apresenta grande variabilidade superficialmente, em função de processos geológicos, pedogenéticos e biológicos atuantes. Em casos assim, as ferramentas geoestatísticas podem ser utilizadas para avaliar o comportamento da variável no local e estimá-la nos pontos desconhecidos da área. Neste trabalho, duas técnicas geoestatísticas foram utilizadas: a krigagem ordinária e a simulação sequencial indicativa. Elas foram aplicadas sobre os 64 valores do coeficiente de permeabilidade obtidos em uma área experimental por meio de ensaios pelo método dos cilindros concêntricos. Como resultados, a krigagem ordinária se mostrou uma técnica mais simples de ser aplicada e apresentou estimativas mais diretas, enquanto que a simulação sequencial indicativa proporcionou uma melhor visualização da variabilidade dos dados e a opção de analisar o coeficiente de permeabilidade em termos de probabilidades – muito útil para tomada de decisões (por exemplo, em casos de implementações de aterros). Com isso, foi observado que a krigagem ordinária compensou deficiências da simulação sequencial indicativa e vice-versa, de modo que as duas técnicas aliadas proporcionaram um amplo conhecimento do coeficiente de permeabilidade na área.

**Palavras-chave:** Geoestatística. Coeficiente de Permeabilidade. Krigagem ordinária. Simulação sequencial indicativa.

The spatialization of the permeability coefficient in soils is not a simple task. This variable presents a wide variability on the surface due to active geological, pedogenic and biological processes. In these cases, geostatistical tools can be used to investigate the behavior of the variable and estimate it at unknown places of the area. In this work, two geostatistical techniques were used: the ordinary kriging and the sequential indicator simulation. They were applied to 64 values of the permeability coefficient obtained at an experimental area using the double-ring method. As results, the ordinary kriging presented good estimates easily via simple procedures. The sequential indicator simulation provided a wide visualization of the data variability and the option to analyze the permeability coefficient in terms of probability – very useful in decision-making (e.g., landfills implementation). Thus, it was observed that the ordinary kriging helped with the deficiencies of the sequential indicator simulation and vice versa, so that the two techniques allied provided a broad knowledge of the permeability coefficient in the area.

**Keywords:** Geostatistics. Permeability coefficient. Ordinary kriging. Sequential indicator simulation.

## 1 INTRODUÇÃO

O coeficiente de permeabilidade é um parâmetro de grande importância para questões de contaminação de aquíferos em uma variedade de casos, como implantação de aterros, fossas sépticas, agricultura, entre outros.

Porém, a espacialização desta variável em solos é uma tarefa árdua, visto que está sujeita a vários processos geológicos, pedogenéticos e biológicos. As técnicas geoestatísticas podem ser aplicadas em casos assim para avaliar a correlação espacial e o grau de aleatoriedade da propagação dos valores de coeficiente de permeabilidade no espaço, estimando-os nos pontos desconhecidos da área.

Neste trabalho, foram utilizados dados provenientes dos ensaios de permeabilidade em 64

pontos de uma área experimental, realizados pelos dois primeiros autores em Rollo (2012) e Cai-xeta (2013). Os dados foram processados pelas técnicas geoestatísticas de krigagem ordinária e de simulação sequencial indicativa, sendo seus resultados avaliados e comparados de forma a caracterizar as vantagens e desvantagens destas técnicas na aplicação específica.

### 1.1 Área de estudos

A área de estudos consiste numa poligonal de 4050 m<sup>2</sup> e está situada na cidade de Rio Claro (SP), dentro do campus Bela Vista da UNESP, próxima ao seu limite leste, como representada na Figura 1.

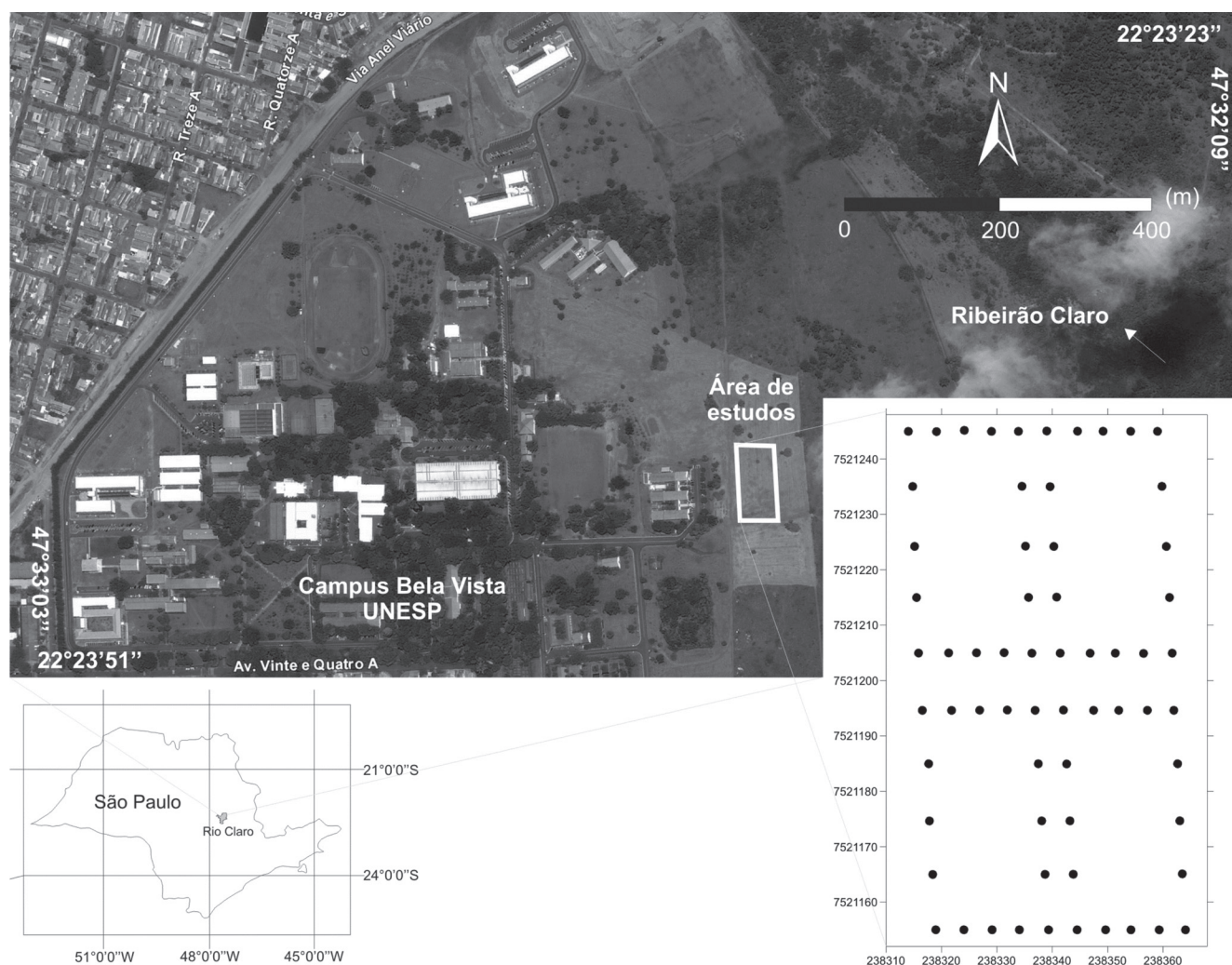


Figura 1 - Localização da área de estudos

A área é um flanco SW de um vale formado por um ribeirão cujo eixo tem a direção NW-SE. A altitude do local varia de 602 a 606 m e o gradiente médio desse flanco é de 7%. Ocorre sobre a área um solo coluvionar recoberto por gramíneas.

Foram definidos 64 pontos para ensaios dentro dos limites da área de estudos. Inicialmente foi elaborada uma malha cruzada, em seguida expandida no mesmo padrão para aumentar a sua resolução e capturar aspectos anisotrópicos.

Na direção NS, o espaçamento mínimo entre dois pontos adjacentes foi de 10 metros e o máximo de 40 metros. Já na direção EW, o espaçamento mínimo entre dois pontos adjacentes foi de 5 metros e o máximo de 20 metros. Foi definida uma maior concentração de pontos segundo EW devido à maior variação altimétrica nesta direção, enquanto que na direção NS essa variação foi bem menor.

## 1.2 Geologia local

Localmente, a área de estudos está localizada sobre um solo coluvionar derivado da Formação

Rio Claro (cenozóico da Bacia do Paraná), sobreposto a um solo argiloso da Formação Corumbataí (permiano da Bacia do Paraná). Nas proximidades ocorrem ainda diques e soleiras de diabásio de idade cretácea, que no entanto não estão presentes dentro área de estudos.

O solo é classificado como um latossolo arenoso, com 46-83% de partículas tamanho areia e 17-53% de partículas tamanho silte e argila. Ele apresenta coloração marrom avermelhada, com porções marrom escuras. Ocorre pouco consolidado, com mineralogia predominantemente composta por quartzo (com grãos subarredondados a arredondados) e argilominerais. No contato com a Formação Corumbataí ocorre uma camada conglomerática quartzosa de 20 cm de espessura.

O perfil de alteração elaborado a partir de um furo a trado dentro da área de estudos e dados de afloramentos próximos está representado na Figura 2.

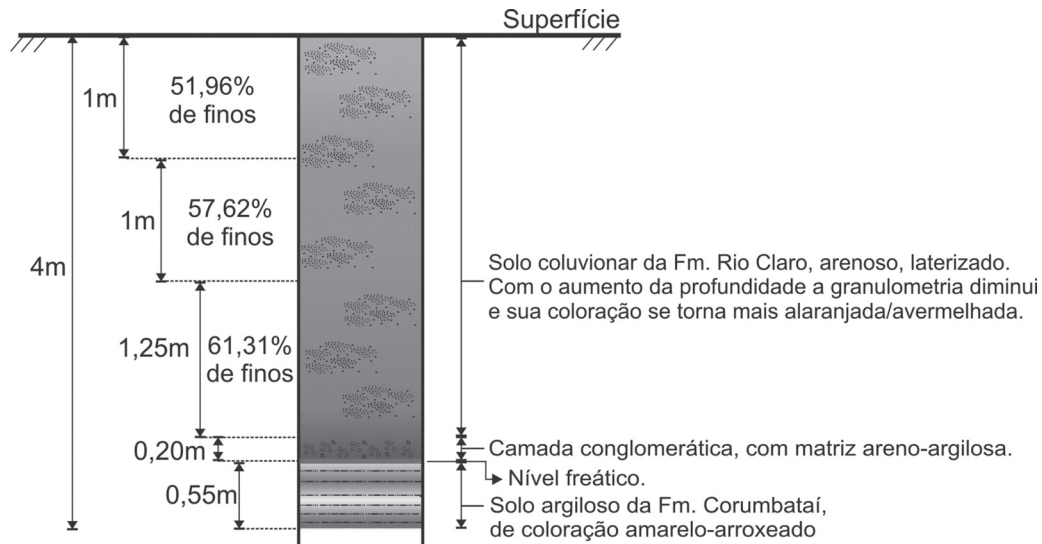


Figura 2 - Perfil de alteração do solo na área. (ROLLO, 2012)

## 2 MÉTODOS

### 2.1 Ensaios de permeabilidade

Para os ensaios foi utilizado o método dos cilindros concêntricos ou também conhecido como duplo anel (Figura 3). Este método é usado principalmente para medir a taxa de infiltração do

solo que, embora similar ao coeficiente de permeabilidade, não exige que o gradiente hidráulico seja igual a 1, ou seja, pode haver fluxo lateral da água (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2009). Apesar disso, este método foi escolhido por causa da disponibilidade do aparelho, pelo baixo custo do ensaio (já que apenas água é utilizada), pela simplicidade de seu

uso (possibilitando a aquisição de um grande número de dados – questão fundamental na análise geoestatística) e porque os valores mensurados ainda assim são próximos daqueles decorrentes de métodos laboratoriais mais precisos realizados com amostras indeformadas (FODOR et al., 2011).

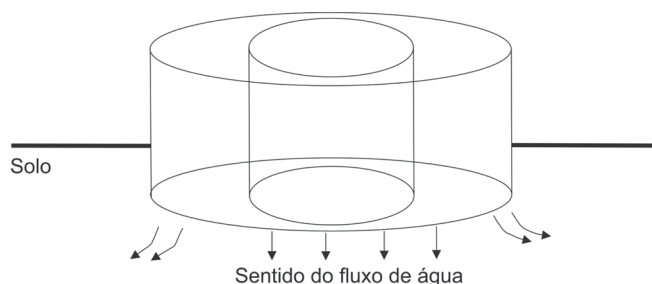


Figura 3 - Esquema do método dos cilindros concêntricos. (OLIVEIRA, 2002)

Os cilindros utilizados eram de ferro, ambos com 29 cm de altura. O cilindro maior apresentava 37 cm de diâmetro e o cilindro menor, de parede biselada, possuía 17 cm de diâmetro.

No local do ponto, o ensaio foi iniciado com a limpeza da vegetação superficial. Em seguida, a superfície do ponto foi umedecida para facilitar a colocação do cilindro maior. Firmado no chão de maneira que muito pouca ou nenhuma água extravase de dentro dele, o cilindro foi mantido com água até cerca da metade de sua capacidade durante dez minutos. Esse procedimento foi realizado para saturar a porção do solo abaixo do cilindro, de modo a tornar o fluxo de água laminar e contínuo.

Passado o tempo de saturação, foi cravado, concentricamente, o cilindro menor no interior do cilindro maior. É importante que este cilindro seja introduzido cerca de 5 cm no solo, por isso a parede biselada.

Feito isto, a régua de metal graduada em milímetros foi cravada no solo junto à lateral do cilindro interno. Foi colocada água no cilindro interno até próximo da superfície e anotado o nível na régua graduada. Nesse instante, foi acionado o cronômetro e após 5 minutos o novo valor do nível da água na régua foi anotado. A seguir, o cilindro interno foi preenchido até o mesmo nível inicial da primeira medida e o cronômetro foi acionado novamente, repetindo-se o procedimento. As medidas foram realizadas três vezes no

total e a média aritmética das variações do nível da água foi obtida para ser usada no cálculo final. Foi tomado o cuidado para que o cilindro externo estivesse sempre com água durante o ensaio e que durante as medidas este nível da água estivesse sempre abaixo do nível do cilindro interno.

Para os cálculos finais, várias formulações são propostas (FODOR et al., 2011). Nesta pesquisa, adotou-se o procedimento fornecido pela AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (2009), que consiste no cálculo do volume de água infiltrado pela área do anel interno durante a variação de tempo, segundo a fórmula (1).

$$K = v_{Cl} = \frac{\Delta V_{Cl}}{A_{Cl} \times \Delta t} = \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

K = coeficiente de permeabilidade (cm/s);

$v_{Cl}$  = velocidade de infiltração no cilindro interno (cm/s);

$\Delta V_{Cl}$  = volume de água infiltrado pelo cilindro interno durante o tempo t (cm<sup>3</sup>);

$A_{Cl}$  = área de solo dentro do cilindro menor (cm<sup>2</sup>);

$\Delta t$  = tempo decorrido na variação da coluna de água do anel interno (s);

$\Delta h$  = média aritmética da variação na altura da coluna de água do anel interno (cm);

## 2.2 Geoestatística

A geoestatística é uma associação entre a estatística e a configuração espacial dos dados, levando em conta a aleatoriedade representada pelas variações de ponto a ponto, bem como a correlação espacial entre os dados (GUERRA, 1988). As técnicas geoestatísticas utilizadas neste trabalho foram a krigagem ordinária e a simulação sequencial indicativa.

A krigagem ordinária é uma das técnicas geoestatísticas mais difundidas. Ela estima valores a partir da ponderação dos dados conhecidos da área, baseando-se na distância entre os pontos e no modelo de correlação variográfico interpretado para o conjunto de dados. No processo ela ainda tende a minimizar a variância do erro.

A simulação sequencial indicativa é uma técnica que estima inicialmente a probabilidade de um ponto da área estar contido dentro de determinados intervalos de valores, gerando um valor

simulado neste ponto a partir destas probabilidades. Seguindo uma ordem aleatória, esse processo é realizado na sequência para outro ponto, de modo que os valores simulados anteriormente se tornem condicionantes para as próximas estimativas. Dessa maneira, são gerados uma infinidade de mapas equiprováveis que reproduzem as condições iniciais, exibindo aproximadamente as mesmas características apresentadas pelo histograma e semivariograma amostrais.

Assim, as principais diferenças nos resultados entre as duas técnicas são de que a krigagem resulta num único mapa estimado enquanto a simulação gera diversos e que na simulação não ocorre o efeito de suavização como na krigagem, que diminui a variância espacial da variável, superestimando os valores menores e subestimando os valores maiores (GOOVAERTS, 1997).

### 2.3 Krigagem ordinária

Para a realização da krigagem ordinária, é necessário gerar inicialmente a função semivariograma. Esta função permite descrever quantitativamente a

variação espacial de um fenômeno regionalizado, sendo a medida da variância das diferenças nos valores da variável regionalizada entre pontos separados por uma distância  $h$  (YAMAMOTO, 2001), de modo que quanto menor a distância  $h$ , menor a variância e vice-versa.

Os pontos experimentais desta função são obtidos pela fórmula (2), para cada distância  $h$ , ao longo das linhas paralelas da malha.

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

Com o intuito de melhorar a interpolação dos dados na krigagem, este semivariograma é ajustado a modelos teóricos, por meio dos seus parâmetros principais: efeito pepita, alcance, soleira e contribuição (Figura 4). Há diversos modelos, sendo o modelo esférico o principal e mais comum; porém, outros como o exponencial, gaussiano e linear recebem também diversas aplicações. Para a modelagem, foi utilizado o software *Variowin* (PANNATIER, 1996).

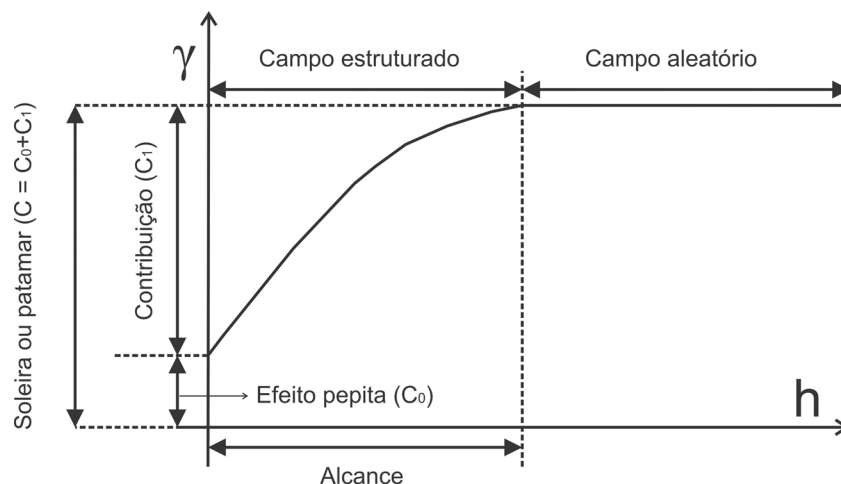


Figura 4 - Parâmetros da função semivariograma. (YAMAMOTO, 2001, adaptado)

Outra característica importante que pode ser revelada pelo semivariograma é a anisotropia. É comum os valores serem mais ou menos contínuos em determinada direção. O caso mais simples é a chamada anisotropia geométrica, que é definida no semivariograma quando a soleira se mantém constante em todas as direções e o alcance varia formando uma elipse num gráfico de

rosetas. Há também a anisotropia zonal, em que para um mesmo alcance há diferentes soleiras.

O próximo passo é realizar a krigagem ordinária dos dados, que foi executada no software Surfer 10 (GOLDEN SOFTWARE, 2011). O valor estimado ( $V^*$ ) é calculado a partir da soma ponderada de cada valor amostral, como representado na equação (3), na qual cada peso é definido a

partir da variação espacial das amostras, sendo a soma deles igual a 1.

$$V^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times S_i \quad (3)$$

Para a definição dos pesos, é construído um sistema de equações (4), elaborado segundo Landim (2003), no qual  $\gamma(S_1, S_n)$  é o valor obtido na ordenada do semivariograma modelado, que é relativo ao valor da abscissa igual à distância  $h$  entre os pontos 1 e  $n$ .  $\lambda$  é o peso de cada ponto amostrado para estimar o ponto  $x$  e  $\mu$  é o multiplicador de Lagrange, que é utilizado para dar estabilidade numérica sob a condição de não viés da krigagem ordinária.

$$\begin{bmatrix} \gamma(S_1, S_1) & \cdots & \gamma(S_1, S_n) & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma(S_n, S_1) & \cdots & \gamma(S_n, S_n) & 1 \\ 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(S_1, x) \\ \vdots \\ \gamma(S_n, x) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 2.4 Simulação sequencial indicativa

A simulação sequencial indicativa foi realizada por meio do pacote de softwares geoestatísticos GSLIB (DEUTSCH & JOURNAL, 1997). O procedimento realizado pelos programas consistiu inicialmente na codificação dos dados para indicadores. Para isso, os dados foram reunidos e ordenados crescentemente. Assim foram obtidos os seus 8-quantis, ou seja, os sete valores limites que determinam oito classes, com mesmo número de dados cada.

Esses valores são denominados limiares ( $z_k$ ) e delimitam as  $(k+1)$  classes de valores. Em seguida, para cada ponto  $u_n$ , foi construído um vetor  $i(u_n, z_k)$ , que recebeu um valor binário para cada limiar, segundo a equação (5).

$$i(u_n, z_k) = \begin{cases} 1, caso \leq z_k \\ 0, caso > z_k \end{cases} \quad (5)$$

É facultativo o número de classes no processo, mas é recomendado que esteja entre 5 e 15 (GOOVAERTS, 1997).

Com os dados codificados, foram derivadas as funções de distribuição acumulativa condicional – as CCDFs (*conditional cumulative distribution function*) – que descrevem a incerteza sobre os valores não amostrados em determinado ponto. Elas foram geradas a partir da krigagem indicativa em cada limiar  $z_k$ , que consistiu no mesmo procedimento da krigagem ordinária mas realizada na variável codificada. O valor estimado pela krigagem indicativa representou a probabilidade de que o valor no ponto fosse menor que o limiar em questão.

O próximo passo para a realização da simulação foi a modelagem da CCDF. A partir das probabilidades médias obtidas na krigagem de cada limiar, a função foi interpolada dentro de cada classe e extrapolada entre os valores mínimo e máximo. Foi atentado principalmente para a modelagem adequada das classes inferiores (*lower tail*) e superiores (*upper tail*), uma vez que elas definem as tendências para a ocorrência dos valores extremos na distribuição (DEUTSCH & JOURNAL, 1997). Os modelos utilizados nesse processo foram o linear, *power* e hiperbólico, selecionados de acordo com parte da função trabalhada e seu respectivo comportamento.

Como as CCDFs modeladas representavam a incerteza local e não do conjunto de localidades, para uma visão global do fenômeno na área e fiel ao conjunto de dados foi realizada a simulação sequencial indicativa.

Para esse processo, foi aplicada a mesma metodologia para definição da CCDF local, com a obtenção de um valor simulado da função em cada ponto da malha. A diferença foi que se definiu preliminarmente, de forma aleatória, a ordem que cada CCDF seria definida e a tornava condicionada aos dados amostrais vizinhos e aos valores simulados anteriormente. Após a realização em cada ponto da malha, repetiu-se todo o procedimento em uma ordem aleatória diferente, de modo a gerar outras imagens equiprováveis.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios de permeabilidade estão representados graficamente na Figura 5. É observado no mapa de pontos que os maiores valores predominam à leste da área. No histograma, uma característica importante é a forte assimetria dos dados, com uma concentração maior de valores baixos na distribuição.

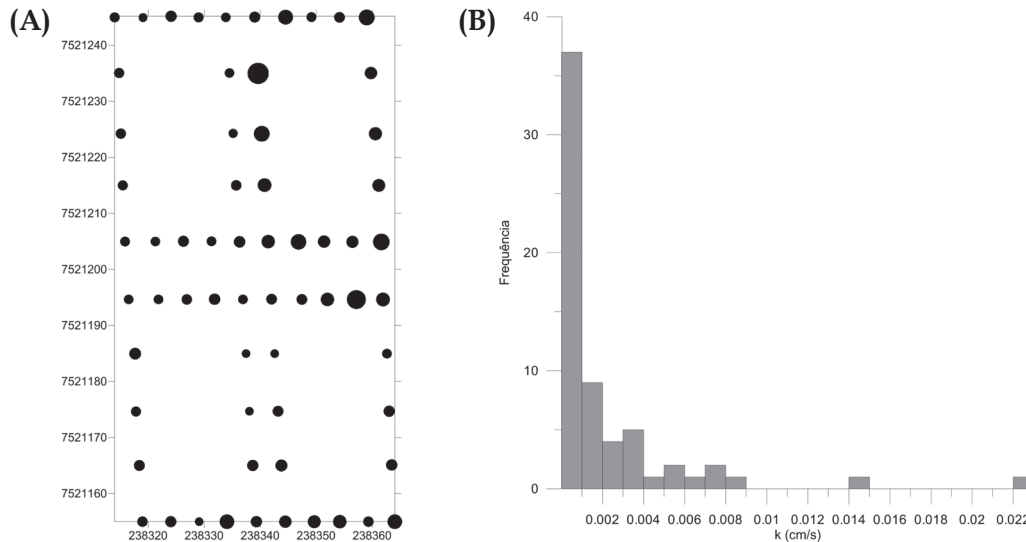


Figura 5 – Representações gráficas dos resultados dos ensaios de permeabilidade. (A) Mapa de pontos, com tamanho do ponto proporcional ao seu valor; (B) histograma

Desse conjunto de dados, foi inicialmente analisado o seu comportamento quanto a anisotropias. Como foi observada uma tendência para maiores variações numa direção próxima de EW, na qual a variação da cota altimétrica também foi maior, foi definido o eixo menor da elipse de anisotropia como sendo perpendicular às curvas de nível da área. Assim, por meio de curvas geradas a partir de imagens digitais SRTM (MIRANDA, 2005), os eixos de anisotropia foram definidos

como sendo N10W (eixo de maior continuidade) e N80E (eixo de menor continuidade).

Determinadas as direções preferenciais, foram elaborados os semivariogramas nestas duas direções para os dados originais usados na krigagem e também para os dados codificados usados na simulação. Foi interpretada uma anisotropia geométrica nos dois casos, tal como representado na Figura 6.

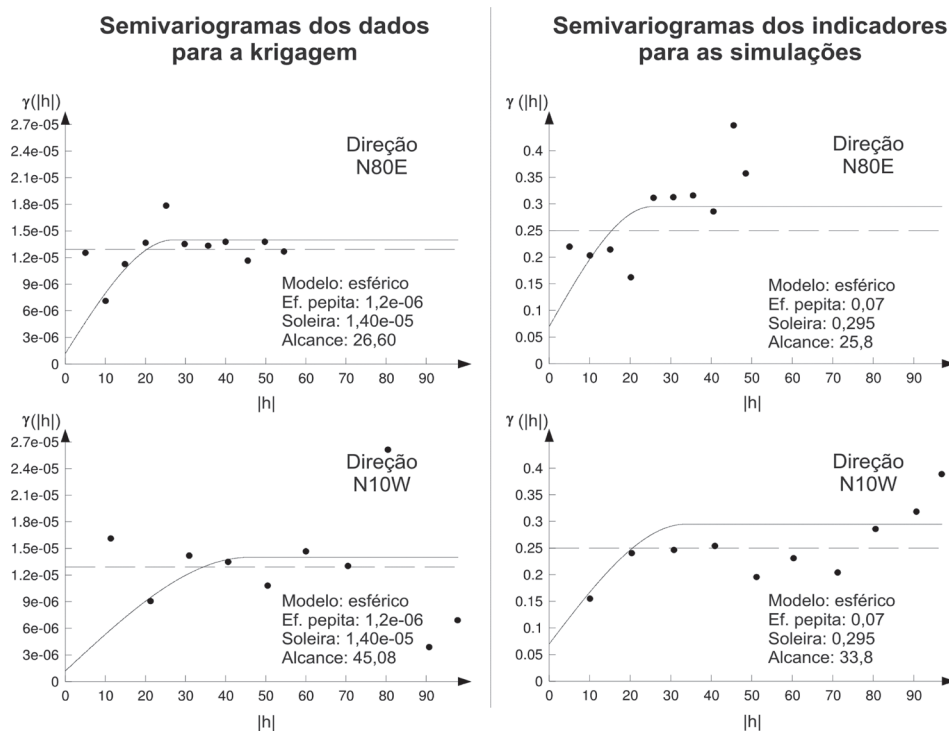
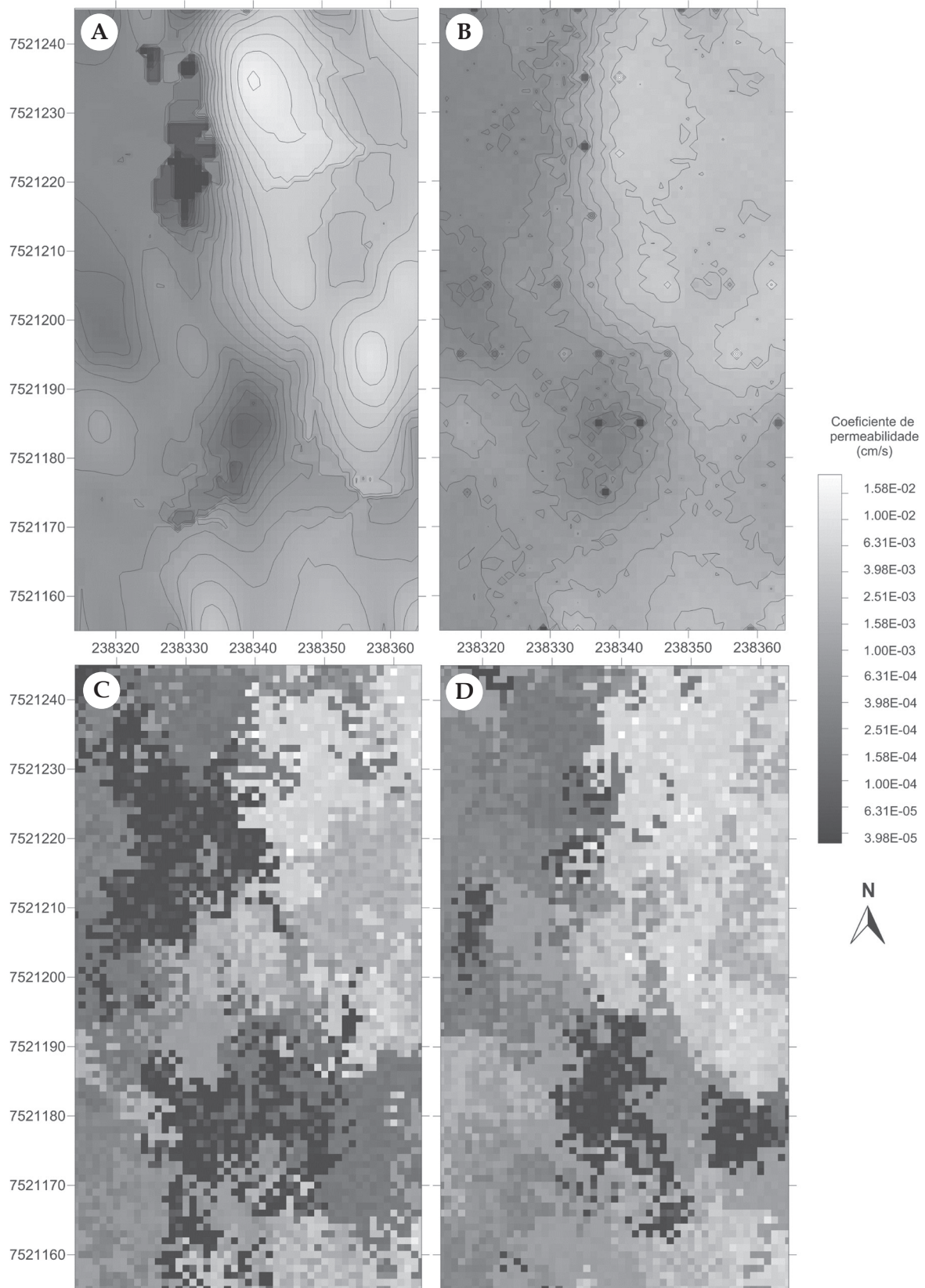


Figura 6 – Semivariogramas interpretados para o coeficiente de permeabilidade ao longo dos dois eixos de anisotropia

Foram então estimados pontos de metro em metro por meio da geoestatística, perfazendo toda

a área de estudos. Os resultados estão representados nos mapas na Figura 7.



**Figura 7** – Mapas gerados com a geoestatística: (A) por krigagem; (B) pela média das simulações; (C) por simulação – situação com valores mais baixos; (D) por simulação – situação com valores mais altos



O mapa gerado pela krigagem ordinária (Figura 7A) apresentou as estimativas com mínima variância dos dados, exibindo uma amplitude de valores entre  $5,00E-06$  e  $1,71E-02$  e linhas de isovalores bastante suavizadas.

Na simulação sequencial indicativa foram geradas 100 simulações, com valores entre  $3,33E-05$  e  $2,22E-02$ . O mapa referente à média de todas as simulações está representado na Figura 7B e define as regiões mais propensas a maiores e menores valores, apresentando aspecto semelhante ao mapa krigado, embora com linhas de isovalores muito menos suavizadas.

Considerando todas as simulações, as realizações com mais estimativas extremas foram representados nas Figuras 7C (mais valores baixos) e 7D (mais valores altos). A partir da comparação dessas imagens foi possível observar o grau de variabilidade do conjunto de dados.

Foi gerado também um mapa de probabilidade no processo de simulação. Para isso, foi escolhido um limite dentro da distribuição dos dados:  $10^{-4}$  cm/s, limite que determina maior potencial de utilização do local como camada de impermeabilização de laterais e fundo de aterro sustentável, quando o coeficiente de permeabilidade estiver abaixo desse limite (ALMEIDA & SCHALCH, 2007; ZUQUETTE, 1987).

Este mapa está representado na Figura 8 e, como pode ser observado, valores abaixo deste

limite são raros. Os locais mais favoráveis estão restritos às regiões que apresentam entre 50% e 75% de chances de serem viáveis para o caso específico. Dentre elas, a mais representativa se localiza no centro sul da área.

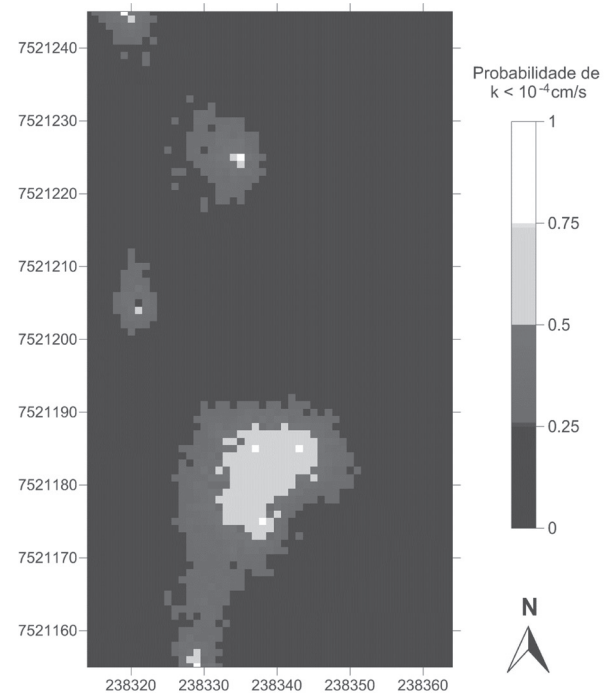


Figura 8 – Mapa de probabilidade do coeficiente de permeabilidade ser menor que  $10^{-4}$  cm/s

A dispersão das estimativas apresentou comportamento diferente nas duas técnicas geoestatísticas utilizadas, como representado na Figura 9.

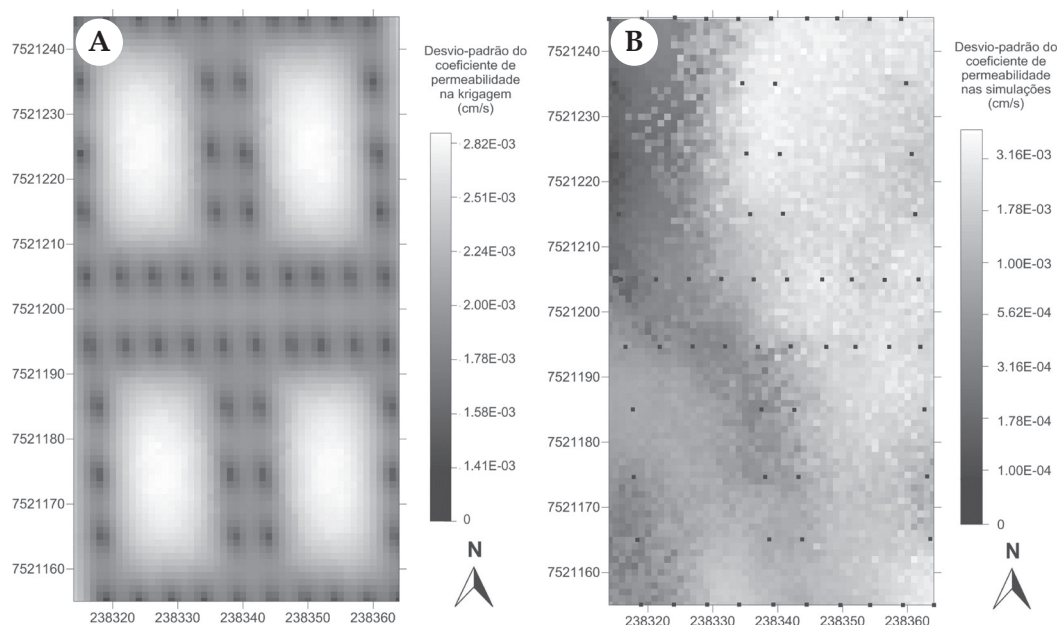


Figura 9 – Mapa dos desvios-padrão relativos: (A) à krigagem; (B) às simulações

Os desvios-padrão nos pontos estimados por krigagem (Figura 9A) variaram de  $1,41E-03$  a  $2,88E-03$ , apresentando dispersão mais alta nas regiões de onde os pontos ensaiados estão mais distantes. A razão disso é o caráter homoscedástico do desvio-padrão da krigagem que para seu cálculo não depende dos valores dos dados originais, mas apenas da configuração espacial expressa pelo semivariograma. Para considerar os valores amostrais no erro da krigagem, uma boa alternativa que pode ser utilizada é o cálculo da variância de interpolação, proposto por Yamamoto (2000).

Nos resultados de dispersão provenientes das simulações (Figura 9B) não foi apenas a presença de pontos ensaiados nas proximidades que determinou o valor do desvio-padrão. Tendo sido simulados 100 mapas, um mesmo ponto teve até 100 estimativas diferentes. Assim o desvio-padrão em cada ponto consistiu na dispersão destes valores em relação à média deles, alcançando desvios maiores em relação aos da krigagem - entre  $8,94E-05$  e  $4,36E-03$ .

Esses mapas possibilitam o reconhecimento das regiões com maiores incertezas nas estimativas, de modo que, havendo necessidade, permite o direcionamento de novos estudos para apenas algumas áreas específicas.

Para diminuir a dispersão e se obter melhores estimativas, a principal tarefa é a realização de mais ensaios na área. Porém, há ainda fatores relativos ao método de mensuração que podem afetar a dispersão dos resultados do coeficiente de permeabilidade.

De acordo com Lai & Ren (2007), na realização dos ensaios com os cilindros concêntricos em solos com coeficiente de permeabilidade bastante variável, foi observado que, em se aumentando o diâmetro do cilindro interno para ao menos 80 cm e o externo para 120 cm, a variação dos valores obtidos nos ensaios é minimizada significativamente devido à diminuição dos efeitos de divergência lateral. Por outro lado, dessa maneira os ensaios demandariam um suprimento de água bem maior, podendo tornar mais viável o uso de outros métodos de mensuração, como o permeâmetro de Guelph, por exemplo.

## 4 CONCLUSÕES

A geoestatística proporcionou uma boa espacialização do coeficiente de permeabilidade na área experimental. Ambas as técnicas utilizadas apresentaram resultados satisfatórios, com alguns destaques a serem feitos.

A krigagem ordinária se mostrou uma técnica mais simples e direta para a interpolação de dados. Porém, o efeito de suavização resultante nos mapas é marcante, mascarando uma parte da variabilidade dos dados em distribuições assimétricas, como a em questão.

A simulação sequencial indicativa requer um procedimento mais complexo para sua execução, mas permite a visualização de diversos cenários para a área, representando a variabilidade dos dados sem sofrer de efeitos de suavização. Porém, entre tantos cenários simulados, é difícil selecionar os mais adequados, problema que não ocorre na krigagem.

Uma ferramenta muito útil do processo de simulação foi o mapa de probabilidades gerado, que permitiu uma boa perspectiva para a tomada de decisão no caso do uso da área como camada de impermeabilização de aterro.

Assim sendo, as duas técnicas aliadas proporcionaram um conhecimento abrangente do coeficiente de permeabilidade na área, cada uma com vantagens específicas, sendo recomendadas para aplicações em outros locais.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA T.L. & SCHALCH V. 2007. Avaliação da movimentação de líquidos contaminantes percolados nos poros do solo em locais de disposição de resíduos sólidos. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE QUALIDADE AMBIENTAL, VI, Porto Alegre.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. 2009. D3385: Standard Test Method for Infiltration Rate of Soils in Field Using Double Ring Infiltrometer. West Conshohocken.
- CAIXETA R.M. 2013. *Simulação geoestatística aplicada sobre o coeficiente de permeabilidade de uma área próxima ao Ribeirão Claro, em Rio Claro/SP*. Trabalho

- de Conclusão do Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- DEUTSCH C.V. & Journel A.G. 1997. *GSLIB: Geostatistical software library and user's guide*. 2. ed. New York: Oxford University Press. 384p. (Applied Geostatistics Series).
- FODOR N., Sándor R., Orfanus T., Lichner L., Rajkai K. 2011. Evaluation method dependency of measured saturated hydraulic conductivity. *Geoderma*, v. 165, n. 1, p. 60-68.
- GOLDEN SOFTWARE. 2011. Surfer Version 10 – Surface Mapping System. Golden.
- GOOVAERTS P. 1997. *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. New York: Oxford University Press. 483p. (Applied Geostatistics Series).
- GUERRA P.A.G. 1988. *Geoestatística operacional*. Brasília: Ministério das Minas e Energia/ Departamento de Produção Mineral. 145p.
- LAI J. & Ren L. 2007. Assessing the size dependency of measured hydraulic conductivity using double-ring infiltrometers and numerical simulation. *Soil Science Society of America Journal*, v. 71, n. 6, p. 1667-1675.
- LANDIM P.M.B. 2003. *Análise estatística de dados geológicos*. 2. ed. São Paulo: UNESP. 253 p.
- MIRANDA E.E. (Coord.). 2005. *Brasil em Relevo*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite.
- Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 10 abr. 2013.
- OLIVEIRA L.A. 2002. *O Sistema Aquífero Bauru na Região de Araguari/MG: parâmetros dimensionais e propostas de gestão*. 121f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília.
- PANNATIER Y. 1996. *Variowin – Software for spatial data analysis in 2D*. New York: Springer-Verlag. 90p.
- ROLLO R.T. 2012. *Mapeamento geoestatístico da permeabilidade superficial no entorno do Ribeirão Claro e simulação da possibilidade de sua contaminação*. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Geologia) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro.
- YAMAMOTO J.K. 2000. An alternative measure of the reliability of ordinary kriging estimates. *Mathematical Geology*, v. 32, n. 4, p. 489-509.
- YAMAMOTO J.K. (Org.). 2001. *Avaliação e classificação de reservas minerais*. 1. ed. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo. 226 p.
- ZUQUETTE L.V. 1987. *Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras*. 673f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

