

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOESTATÍSTICA APLICADA AOS DADOS DE
POTENCIOMETRIA DO RESERVATÓRIO DE
TRÊS IRMÃOS, PEREIRA BARRETO - SP**

Debora Amato Lourenço

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha
Co-orientador: Dr. Claudio Benedito Baptista Leite

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2005/09)

SÃO PAULO
2005

TF
L892
DA.g

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC



30900018050

**Geoestatística Aplicada aos Dados de
Potenciometria do Reservatório de Três Irmãos,
Pereira Barreto - SP**

Débora Amato Lourenço

Monografia de Trabalho de Formatura



Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha
Prof. Dr. José Alberto Quintanilha
Prof. Dr. Ginaldo Ademar da Cruz Campanha

São Paulo

2005

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**GEOESTATÍSTICA APLICADA AOS DADOS DE POTENCIOMETRIA
DO RESERVATÓRIO DE TRÊS IRMÃOS, PEREIRA BARRETO - SP**

Debora Amato Lourenço



Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

Co-orientador: Dr. Cláudio Benedito Baptista Leite

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF – 2005 / 09)

SÃO PAULO
2005

TF
L892
DA.9

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS



Departamento de Geologia

Departamento de Geologia
Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo

REPOSIÇÃO DE TRABALHOS DE PÓS-GRADUAÇÃO
(1970-1971)

SÃO PAULO
1971

RESUMO

O trabalho aborda a análise geoestatística e a estimativa de dados potenciométricos por meio da krigagem ordinária e da krigagem com correção do efeito de suavização, objetivando a constatação do método que melhor reproduz o aquífero em Pereira Barreto – SP.

Os dados são provenientes do Reservatório de Três Irmãos, consistindo em 186 pontos georreferenciados com informações de potencimetria, medidas durante a instalação da barragem.

Na região, o aquífero é livre, sendo composto por aluviões e coluviões (depósitos Cenozóicos), solo de alteração de arenito e arenito (Bacia Bauru) e solo de alteração de basalto, tendo como substrato impermeável os basaltos da Formação Serra Geral.

A geoestatística é uma ferramenta que permite a estimativa de um fenômeno regionalizado, neste caso a potencimetria, em qualquer ponto de um domínio, com isto existe um aumento significativo das informações, o que melhora a confiabilidade da representação do aquífero.

A variável estudada apresentou semivariogramas não estacionários, interpretados como resultados de deriva regional, assim sendo optou-se pela retirada desta deriva por superfícies polinomiais de baixo grau (1 e 2) e trabalhar seus resíduos, diferenças entre os valores observados e a superfície ajustada.

Os resultados das duas superfícies mostraram que o polinômio de grau 1 foi mais adequado. Quanto aos valores estimados pelas duas krigagens, permitiram constatar que a krigagem com correção do efeito de suavização foi mais fiel na reprodução dos dados potenciométricos, uma vez que as variâncias foram incrementadas em relação à krigagem ordinária, melhorando a reprodução do semivariograma e do histograma das amostras.

ABSTRACT

The work deals with geostatistics analysis and the estimation of hydraulic head data using two methods: the ordinary kriging and of the kriging with correction of the smoothing effect, both methods were applied with in order to verify which one better reproduces the aquifer of Pereira Barreto – SP.

The data were draw from the Reservoir of Três Irmãos, and is composed of 186 sample points with hydraulic head information, measured during the installation of the dam.

The aquifer can be characterized as a free aquifer, and is composed of alluviums and colluviums (Cenozoic deposits), alteration soil of sandstone (derivated from the Bauru Basin) and alteration soil of basalt, having as impermeable substratum the basalts of the Formation "Serra Geral".

Geostatistics is a tool that allows the estimation of a regionalized phenomenon, in this case, the hydraulic head, at any point of a domain, resulting in a significant increase of information, which improves the trustworthiness of the representation of the aquifer.

The studied variable presented non stationary semivariograms, interpreted as the result of a regional drift, in that way to remove this drift polynomial surfaces of low degree (1 and 2) were computed and geostatistics was handle to its residues, differences between the observed values and the adjusted surface.

The results of the two surfaces showed that the polynomial of degree 1 is more appropriated. The values of the two kriging procedures showed that the one with correction of the smoothing effect is more faithful to reproduce the potentiometric data, once the variances were incremented, in relation to the ordinary kriging, improving the reproduction of the semivariogram and the histogram of the samples.

Agradecimentos

Ao professor Dr. Marcelo Monteiro da Rocha pela orientação e dedicação ao longo da realização do trabalho, e ao Dr. Claudio Benedito Baptista Leite pela amizade, paciência e conhecimento desprendidos a mim nestes meses de IPT, incluindo a iniciação no mundo da geoestatística.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) pelo suporte e liberação dos dados. Aos colegas de Laboratório de Física dos Solos (Zé, Tião, Vera, Norman, Reginaldo e Adão).

Ao professor Dr. Jorge Kazuo Yamamoto pelas valiosas sugestões e ao Jorge Watanabe pela revisão final da monografia.

Aos amigos de graduação Patrícia (Lameira), Rabiola (Diana), Rasgadera (Camila) – as “the 4”; Pika (Leandro), Vivi (Rafael), Grazi (Gobatto), Fuji (Maria), Satan (Leopoldo), Gorfo (Saulo), Merda (Artur), Fidida (Suzanne), Biva (Danilo), Perereka (Eduardo), Costela (Lelia), Pequinesa (Rosa), Broka (Vidyã), Minero (Weder) e Roça (Fernanda) por todos os momentos compartilhados ao longo dos 5 anos. Ao Chachá (Julio Cezar) e ao Jeytozzoh (Itamar) pelas horas de conversas, conselhos e amizade. À amiga Kacilda (Maria Elisa) pela revisão do abstract e por todas as fofocas, assuntos musicais e principalmente risadas nos dias de banco.

Ao pessoal da gráfica do Instituto por sempre terem me ajudado nos momentos de sufoco.

Aos meus pais Ângelo e Sonia pelo amor e força a mim transmitidos. A meu irmão Luis e a minha irmã Daniela, que me abriu as portas para as maravilhas geológicas.

Finalmente, a Sergio pelo amor incondicional, companheirismo e acima de tudo amizade.

Obrigada.

Sumário

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
Agradecimentos	iii
Sumário	iv
Lista de Figuras	vi
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	1
3 TRABALHOS PRÉVIOS NA REGIÃO EM ESTUDO	2
3.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA	2
3.1.1 Localização e Considerações sobre a Barragem de Três Irmãos	2
3.1.2 Geologia Regional	3
3.1.2.1 Bacia do Paraná	3
3.1.2.2 Bacia Bauru	4
3.1.2.3 Depósitos Cenozóicos	6
3.1.2.4 Características Hidrogeológicas	6
4 REVISÃO DA LITERATURA	7
4.1 POTENCIOMETRIA	7
4.2 ESTATÍSTICA DESCRITIVA	7
4.2.1 Média ou Esperança Matemática	7
4.2.2 Mediana	8
4.2.3 Moda	8
4.2.4 Variância e Desvio Padrão	8
4.2.5 Coeficiente de Variação	8
4.2.6 Curtose	8
4.2.7 Assimetria	8
4.3 GEOESTATÍSTICA	9
4.3.1 Hipótese Intrínseca ou Quase-estacionariedade	9
4.3.2 Teoria das Variáveis Regionalizadas	10
4.3.3 Variograma	10
4.3.4 Krigagem Ordinária	13
4.3.5 Validação Cruzada	14
4.3.6 Variância de Interpolação e Variância de Krigagem	14
4.3.7 Krigagem Ordinária para Situações com Tendência Regional	15
4.3.8 Krigagem com correção do efeito de suavização	16
4.3.9 Diagrama P-P	17
5 MATERIAIS E MÉTODOS	17
6 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	20
7 RESULTADOS OBTIDOS	20
7.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA	20
7.2 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA	21
7.2.1 Superfície de Tendência - Polinômio de Grau 1	23
7.2.2 Superfície de Tendência - Polinômio de Grau 2	25
7.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE VIZINHANÇA E KRIGAGEM	27
7.3.1 Dados de Resíduo Retirados pela Superfície Polinomial de Grau 1	27
7.3.2 Dados de Resíduo Retirados pela Superfície Polinomial de Grau 2	30

8 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS	34
8.1 KRIGAGEM ORDINÁRIA <i>VERSUS</i> KRIGAGEM COM CORREÇÃO DO EFEITO DE SUAVIZAÇÃO	34
8.1.1 Dados Estimados pela Superfície Polinomial de Grau 1	34
8.1.2 Dados Estimados pela Superfície Polinomial de Grau 2	38
8.2 POLINÔMIO DE GRAU 1 <i>VERSUS</i> POLINÔMIO DE GRAU 2	41
9 CONCLUSÕES	44
10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45

Lista de Figuras

<i>Figura 1 – Mapa de localização e acesso a área.</i>	2
<i>Figura 2 – Mapa geológico da região de Pereira Barreto (modificado de FERNANDES, 1998).</i>	3
<i>Figura 3 – Representação das propriedades de um variograma típico (YAMAMOTO, 2001).</i>	11
<i>Figura 4 – Parâmetros do variograma direcional (modificado de PANNATIER, 1994).</i>	12
<i>Figura 5 – Modelos de variogramas mais comuns na natureza (LEITE, 2005).</i>	13
<i>Figura 6 – Mapa de distribuição dos pontos de controle potenciométrico (modificado de Leite, 2005).</i>	18
<i>Figura 7 – Configuração da superfície potenciométrica em Abril de 1984.</i>	19
<i>Figura 8 – Histograma e estatísticas descritivas dos dados de potenciométrica.</i>	21
<i>Figura 9 – Curva acumulada de probabilidade aritmética.</i>	21
<i>Figura 10 – Variograma calculado em quatro direções.</i>	22
<i>Figura 11 – Variograma calculado nas direções de 45° e 135° apresentando deriva.</i>	23
<i>Figura 12 – Fronteira convexa com malha regular adotada.</i>	23
<i>Figura 13 – A) Mapa da superfície de tendência de grau 1 e B) mapa de resíduos.</i>	24
<i>Figura 14 – Variograma modelado e valores das propriedades utilizadas para seu ajuste.</i>	24
<i>Figura 15 – Diagrama de dispersão da validação cruzada.</i>	25
<i>Figura 16 – A) Mapa de tendência, polinômio de grau 2 e B) mapa de resíduos, polinômio de grau 2.</i>	26
<i>Figura 17 – Variograma modelado e parâmetros utilizados no seu ajuste.</i>	26
<i>Figura 18 – Validação cruzada dos resíduos de grau 2.</i>	27
<i>Figura 19 – Resultado das estimativas corrigidas e do cálculo de déficit de variância, pela rotina Crossordkrig2 do software GeoVisual ver. 2.2.</i>	27
<i>Figura 20 – Mapa potenciométrico estimado pela krigagem ordinária.</i>	28
<i>Figura 21 – Mapa potenciométrico estimado pela krigagem com correção do efeito de suavização.</i>	29
<i>Figura 22 – A) Mapa de desvio de interpolação e B) mapa de desvio de krigagem, obtidos pela rotina Crossordkrig2 do software GeoVisual ver. 2.2, migrado para o pacote Surfer 8.</i>	29
<i>Figura 23 – Histograma e estatísticas descritivas da potenciométrica obtidos pela krigagem ordinária.</i>	30
<i>Figura 24 – Histograma e estatísticas descritivas da potenciométrica obtidos pela krigagem com correção do efeito de suavização.</i>	30
<i>Figura 25 – Resultado das estimativas corrigidas e do cálculo de déficit de variância, pela rotina Crossordkrig2 do GeoVisual ver. 2.2, resíduos de grau 2.</i>	31
<i>Figura 26 – Mapa potenciométrico estimado pela krigagem ordinária, polinômio de grau 2.</i>	31
<i>Figura 27 – Mapa potenciométrico estimado pela krigagem com correção do efeito de suavização, polinômio de grau 2.</i>	32
<i>Figura 28 – A) Mapa de desvio de interpolação, grau2 e B) mapa de desvio de krigagem, grau2.</i>	33
<i>Figura 29 – Histograma e estatísticas descritivas da potenciométrica obtidos pela KO, polinômio de grau 2.</i>	33
<i>Figura 30 – Histograma e estatísticas descritivas da potenciométrica obtidos pela K_{CES}, polinômio de grau 2.</i>	33
<i>Figura 31 – Histograma de resíduos dos dados originais e suas estatísticas descritivas.</i>	34
<i>Figura 32 – Histograma e estatísticas descritivas dos resíduos estimados pela krigagem ordinária.</i>	34
<i>Figura 33 – Histograma e estatísticas descritivas dos resíduos estimados pela krigagem com correção do efeito de suavização.</i>	35

<i>Figura 34 – Variograma calculado a partir dos dados resultantes da krigagem ordinária. A linha cheia representa o ajuste do variograma de entrada da krigagem.</i>	35
<i>Figura 35 – Variograma calculado a partir dos dados resultantes da krigagem com correção do efeito de suavização. A linha cheia representa o ajuste do variograma de entrada da krigagem.</i>	36
<i>Figura 36 – Diagrama P-P, os pontos cheios representam os valores de resíduos estimados pela K_{CES} e pontos vazios os valores residuais estimados pela KO.</i>	36
<i>Figura 37 – Diagrama P-P, os pontos cheios representam os valores de potenciometria estimados pela K_{CES} e os triângulos vazios os valores estimados pela KO.</i>	37
<i>Figura 38 – Mapa potenciométrico com curvas obtidas manualmente, pela krigagem com correção do efeito de suavização e pela krigagem ordinária.</i>	37
<i>Figura 39 – Histograma de resíduos dos dados originais e suas estatísticas descritivas, polinômio de grau 2.</i>	38
<i>Figura 40 – Histograma e estatísticas descritivas dos resíduos estimados pela krigagem ordinária, polinômio de grau 2.</i>	38
<i>Figura 41 – Histograma e estatísticas descritivas dos resíduos estimados pela krigagem com correção do efeito de suavização, polinômio de grau 2.</i>	38
<i>Figura 42 – Variograma calculado a partir dos dados resultantes da krigagem ordinária, grau 2. A linha cheia representa o ajuste do variograma de entrada da krigagem.</i>	39
<i>Figura 43 – Variograma calculado a partir dos dados resultantes da krigagem com correção do efeito de suavização, grau 2. A linha cheia representa o ajuste do variograma de entrada da krigagem.</i>	39
<i>Figura 44 – Diagrama P-P, os pontos cheios representam os valores de resíduos estimados pela K_{CES} e os triângulos os valores estimados pela KO, através do polinômio de grau 2.</i>	40
<i>Figura 45 – Diagrama P-P, os pontos cheios representam os valores finais de potenciometria estimados pela K_{CES} e os triângulos os valores estimados pela KO, através do polinômio de grau 2.</i>	40
<i>Figura 46 – Mapa potenciométrico com curvas obtidas manualmente, pela krigagem com correção do efeito de suavização (grau 2) e pela krigagem ordinária (grau 2).</i>	41
<i>Figura 47 – Mapa potenciométrico comparando as curvas obtidas pela K_{CES} - polinômio de grau 1 e pela K_{CES} - polinômio de grau 2.</i>	42
<i>Figura 48 – Mapa mostrando os desvios de interpolação e as curvas potenciométricas interpretadas manualmente e estimadas pela K_{CES} - polinômio de grau 1.</i>	42
<i>Figura 49 – Superfície potenciométrica estimada pela K_{CES}, polinômio de grau 1.</i>	43

1 INTRODUÇÃO

Tomando como exemplo a construção de uma usina hidrelétrica, antes de sua implantação é necessária a realização de diversos estudos sobre os impactos que o enchimento do reservatório causará sobre o meio. Um deles é o efeito causado nos níveis potenciométricos do aquífero regional.

Para melhores resultados desse estudo, o número de dados sobre a potenciometria deve ser grande, o que gera um custo elevado, e mesmo assim o conhecimento de todos os pontos com valores potenciométricos não seria possível.

Uma vez que os parâmetros hidrogeológicos possuem alta variabilidade e são coletados como variáveis regionalizadas, onde não importa somente o seu valor mas também, a sua posição no espaço, a geoestatística pode ser utilizada para contornar tal problema, já que ela permite a estimativa dos valores de potenciometria em locais onde eles não são conhecidos, utilizando para isso os dados amostrais.

A geoestatística ainda possui a grande vantagem de fornecer uma incerteza (erro) associada a cada ponto estimado, permitindo assim a busca de soluções ou a interpretação da causa desse valor.

A ferramenta geoestatística mais utilizada para a estimativa de valores é a krigagem ordinária (KO) que possui apenas precisão local, causando o chamado efeito de suavização, onde valores máximos são subestimados e valores mínimos são superestimados.

Yamamoto (2005) propôs um procedimento de correção desse efeito, a krigagem com correção do efeito de suavização (K_{CES}), que visa reproduzir o histograma e o semivariograma (precisão global) sem a perda de precisão local.

Este trabalho aborda a aplicação da krigagem ordinária e da krigagem com correção do efeito de suavização aos dados de potenciometria, provenientes da região de Pereira Barreto – SP.

2 OBJETIVOS

São objetivos básicos deste trabalho, além do domínio e entendimento de técnicas básicas e avançadas de geoestatística, a realização da análise geoestatística e da estimativa dos dados de potenciometria da cidade de Pereira Barreto – SP, visando a geração de mapas potenciométricos através de dois métodos de estimativa: a krigagem ordinária e a krigagem com correção do efeito de suavização. Esses mapas foram utilizados para comparações com o mapa potenciométrico da região, interpretado manualmente, e para discussões sobre o método que melhor reproduz as condições naturais do aquífero.

3 TRABALHOS PRÉVIOS NA REGIÃO EM ESTUDO

3.1 CARACTERÍSTICAS DA ÁREA

3.1.1 LOCALIZAÇÃO E CONSIDERAÇÕES SOBRE A BARRAGEM DE TRÊS IRMÃOS

O local de estudo compreende a área urbana do município de Pereira Barreto localizado a aproximadamente 650 km da cidade de São Paulo, podendo ser acessado pela rodovia dos Bandeirantes (SP-348) até o quilômetro 168 (cidade de Cordeirópolis), seguida pela Washington Luiz (SP-310), ou ainda pela Castelo Branco (SP-280) até o quilômetro 210 (trevo da cidade de Botucatu), seguida pela Marechal Rondon (SP-300), Figura 1.

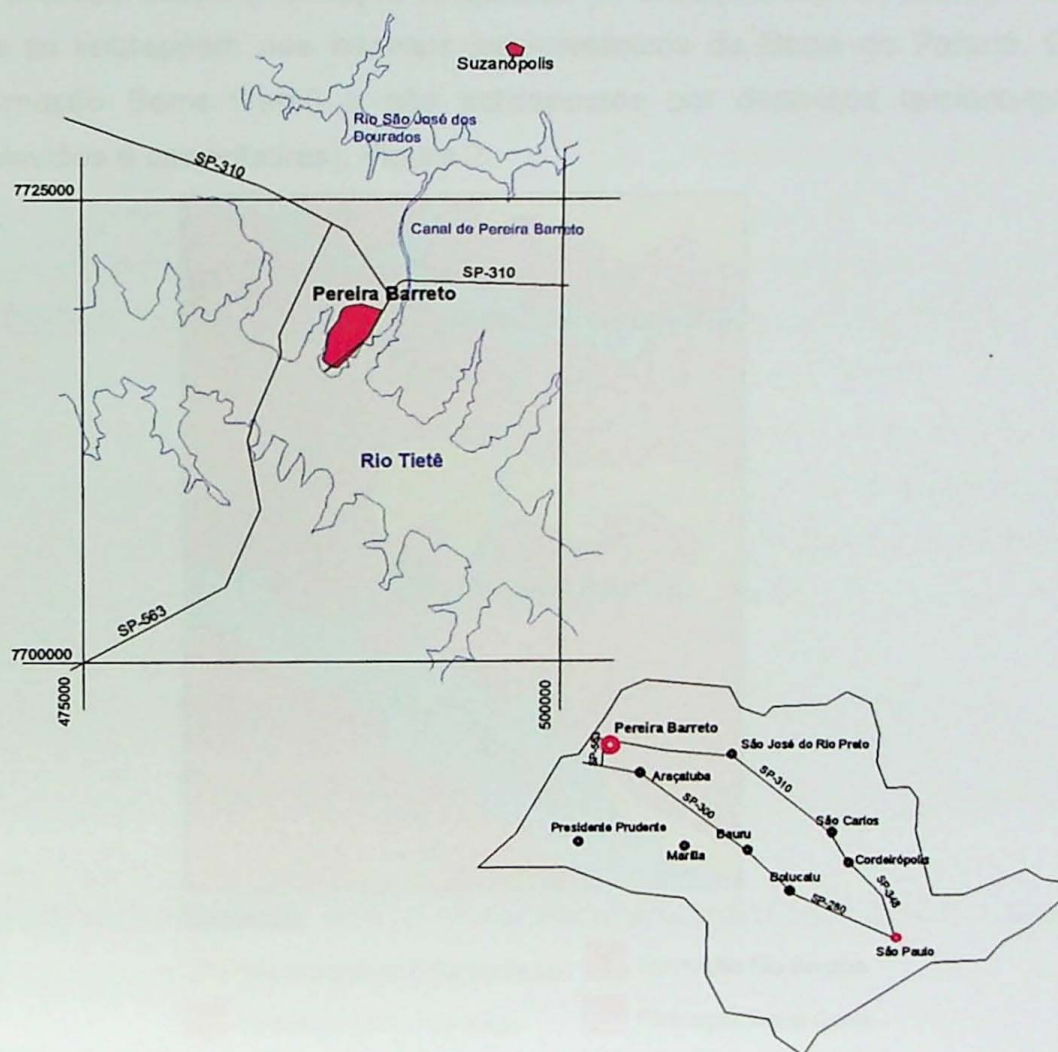


Figura 1 – Mapa de localização e acesso a área.

Pereira Barreto está situada na borda do Reservatório de Três Irmãos. Este possui cerca de 150km extensão, e foi formado no rio Tietê pela construção da barragem. Segundo Leite (2005), a área ocupada pelo reservatório é de aproximadamente 780 km², onde a cota normal do nível d'água junto à barragem é de 328m, com um volume de água de $13,8 \times 10^9$

km³, e com nível d'água do rio Tietê elevado em 47,2 m na barragem, e 3,5m imediatamente à jusante da barragem de Nova Avanhandava.

A barragem de Três Irmãos compreendeu o sexto barramento no rio Tietê, tendo sido construída pela CESP – Companhia Energética do Estado de São Paulo, para aproveitamento hidroelétrico. Sua inauguração se deu em 12/03/1991.

3.1.2 GEOLOGIA REGIONAL

Segundo dados do IPT (1989c) ocorrem na região em estudo sedimentos da Bacia Bauru, representados pelo Grupo Caiuá (Formação Rio Paraná e Formação Santo Anastácio) e Grupo Bauru (Formação Araçatuba e Formação Vale do Rio do Peixe). Estes sedimentos se sobrepõem aos basaltos juro-cretácicos da Bacia do Paraná, Grupo São Bento (Formação Serra Geral) e são sobrepostos por depósitos terciário-quadernários (colúvios, aluviões e cascalheiras), Figura 2.

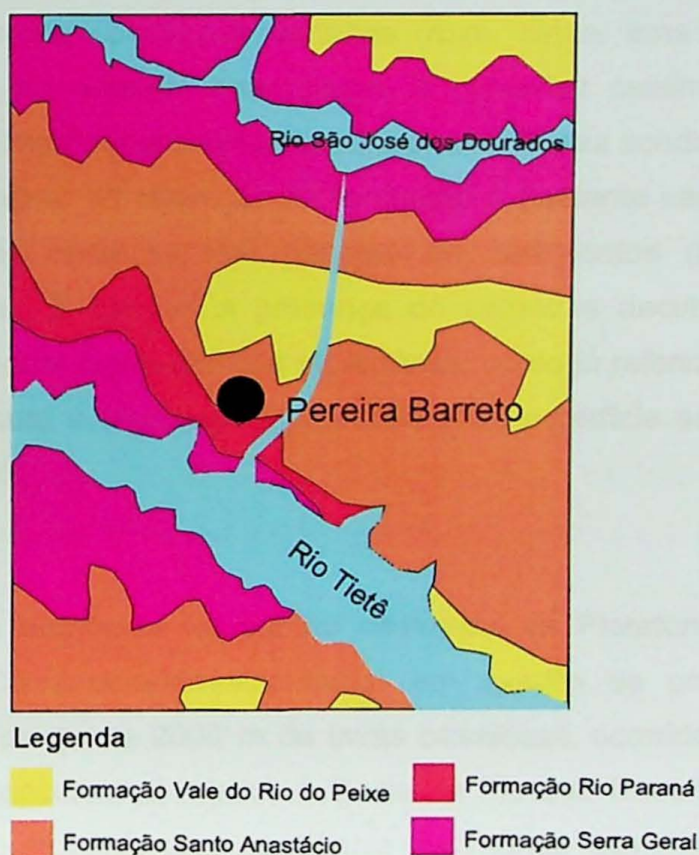


Figura 2 – Mapa geológico da região de Pereira Barreto (modificado de FERNANDES, 1998).

3.1.2.1 Bacia do Paraná

A área estudada situa-se na borda nordeste da Bacia Sedimentar do Paraná, unidade geotectônica desenvolvida sobre a Plataforma Sul-Americana, a partir do Neo-Ordociano/Siluviano (MILANI et al., 1994 *apud* LEITE, 2005).

Após longo período de estabilidade relativa, cujo apogeu no Permiano foi a deposição dos sedimentos do Subgrupo Irati, diferentes manifestações de tectonismo na

bacia estão registradas em rochas das formações Corumbataí (diques clásticos) e Pirambóia (injeções de areia e falhas de rejeito). Estas estruturas são o resultado de abalos sísmicos durante os estágios precursores da ruptura continental do Gondwana (FERNANDES & COIMBRA, 1993). Esse cenário influenciou em menor ou maior grau, a deposição dos sedimentos do Grupo São Bento (formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral) que encerram o ciclo da Bacia do Paraná (LEITE, 2005).

Grupo São Bento – Formação Serra Geral

A Formação Serra Geral aflora de forma restrita, junto à margem direita do reservatório, e é constituída por um conjunto de derrames basálticos toleíticos de espessuras variáveis (IPT, 1983). Quando são, essas rochas possuem coloração cinza clara, textura afanítica, estrutura maciça, e apresentam localmente vesículas e amígdalas. Contudo, a maior parte das descrições de sondagens realizadas pela Geosonda (1982b e 1987) e pela CESP (1982a, b e d, 1988) indicam que os basaltos estão alterados para uma argila siltosa, e apresenta colorações variadas (roxo, cinza, tons de amarelo, marrom), muitas fraturas, além de estarem intercalados a camadas centimétricas à métricas de brechas basálticas, de matriz areno-calcária ou arenosa. Essas sondagens mostraram ainda que a espessura do manto de alteração da formação é bastante variável, tendendo a nula ou mínima nas áreas onde se têm pacotes de sedimentos (formações superiores) relativamente espessos. É comum a presença de camadas decimétricas a métricas de brecha basáltica, de matriz areno-calcária ou arenosa, como já referido. Seu contato com as unidades da Bacia Bauru é discordante, marcado pela superfície erosiva Japi (ALMEIDA, 1964 *apud* LEITE, 2005).

3.1.2.2 Bacia Bauru

A Bacia Bauru formou-se na porção centro-sul da Plataforma Sul-Americana, no Cretáceo Superior (Coniaciano-Maastrichtiano) em evento de compensação isostática posterior ao acúmulo de quase 2000 m de lavas basálticas, ocorrido no Cretáceo Inferior, como parte do ciclo deposicional relativo à Bacia do Paraná. Desenvolveu-se como bacia continental interior, acumulando uma seqüência sedimentar essencialmente arenosa, que ocorre em área de cerca de 370.000 km² (FERNANDES & COIMBRA, 2000).

No contexto regional e tectônico ela é limitada pela Flexura de Goiânia, a nordeste; pelo Arco de Ponta Grossa e lineamentos associados, a sul-sudeste; pelo Arco de Assunção, a oeste; pela Antéclise de Rondonópolis, a norte-noroeste; e pela Serra do Mar, importante feição estrutural situada em toda a borda leste-sudeste de sua área de ocorrência (FERNANDES, 1992).

Na região de Pereira Barreto, as unidades aflorantes que pertencem a Bacia Bauru são as formações Rio Paraná e Santo Anastácio (Grupo Caiuá) e formações Araçatuba e Rio do Peixe (Grupo Bauru).

Grupo Caiuá

A Formação Rio Paraná ocorre apenas na cidade de Pereira Barreto, ao longo da margem direita do reservatório de Três Irmãos. Ela compreende arenitos marrom-avermelhados a arroxeados, finos a muito finos, quartzosos, bem selecionados e com grãos arredondados (LEITE, 2005). Apresenta notável laminação ou estratificação cruzada, formada pela alternância de bandas de espessura milimétrica a centimétrica, de boa seleção interna, gerada por queda de grãos (*grainfall*). Nela podem ocorrer feições de deslizamentos por gravidade, como lentes de fluxo de grãos (*grainflow*) (FERNANDES & COIMBRA, 2000). A unidade repousa diretamente sobre os basaltos da Formação Serra Geral em contato discordante. Lateralmente, ela passa de modo gradual para as formações Santo Anastácio e Goio Erê. Essa unidade é composta por depósitos de foresets de dunas, de até 10m de altura, associados a depósitos de interdunas essencialmente secas (FERNANDES, 1998; FERNANDES & COIMBRA, 2000).

Já a Formação Santo Anastácio ocorre margeando o reservatório, desde o vale do Ribeirão Água Fria (afluente do rio Tietê) para jusante, até a região de Pereira Barreto. Ela constitui-se de estratos tabulares de arenitos, de coloração marrom-arroxeadada, finos a muito finos, maciços, pobremente selecionados, com grãos sub-angulosos a sub-arredondados, foscos, encobertos por película de óxido de ferro, em uma matriz silto-argilosa. É comum a presença, junto ao contato com os basaltos, de nódulos e cimentação carbonática. Essa rocha pode apresentar raras intercalações de lamitos e argilitos além de estratificação plano-paralela e cruzada de baixo ângulo, mal definida (LEITE, 2005). Os arenitos são relacionados a depósitos de lençóis de areia acumulados em extensas planícies desérticas, os lamitos representariam depósitos de lagoas efêmeras (FERNANDES, 1998). Esta em contato transicional com as rochas das formações Rio Paraná e Vale do Rio do Peixe, com as quais se interdigitam.

Grupo Bauru

Adentrando pelos vales dos tributários do rio Tietê, a Formação Araçatuba, é a de maior ocorrência na área estudada. Ela repousa diretamente sobre basaltos da Formação Serra Geral e lateralmente interdigita-se com a Formação Vale do Rio do Peixe em contato plano (FERNANDES & COIMBRA, 2000). Constitui-se por uma sucessão de estratos tabulares essencialmente pelíticos, de aspecto maciço e de espessura centimétrica a decimétrica. As rochas predominantes são siltitos e arenitos muito finos, de coloração

esverdeada, geralmente com cimentação carbonática (ETCHEBEHERE et al., 1991, *apud* LEITE, 2005). Essa unidade foi depositada em região baixa e alagadiça, de águas salinas rasas e estagnadas (pantanal), sujeitas a períodos de exposição (FERNANDES & COIMBRA, 2000).

Por sua vez, a Formação Vale do Rio do Peixe, ocorre na região a leste-nordeste de Andradina, nas duas margens do reservatório, recobrando os sedimentos das formações Santo Anastácio e Araçatuba. Ela é constituída por arenitos estratificados, de espessuras decimétricas, com coloração de rosada a marrom, finos, com boa seleção, e estratificação cruzada de pequeno e médio porte, intercalados a lamitos arenosos, maciços ou com estratificação mal definida (LEITE, 2005). O ambiente deposicional consiste em depósitos essencialmente eólicos, acumulados em extensas áreas planas, na forma de lençóis de areia, com campos de dunas baixas, alternados com depósitos de loesse. Provavelmente os lamitos foram fixados em depressões, em corpos aquosos rasos e efêmeros criados em períodos de elevação do nível freático (FERNANDES & COIMBRA, 2000).

3.1.2.3 Depósitos Cenozóicos

São formados por depósitos aluvionares, coluvionares e eluvionares, cuja distribuição é governada pelos rios. Segundo Leite (2005) os colúvios são caracterizados por sedimentos areno-silto-argilosos, avermelhados, com linha de seixos na base. Na região de Pereira Barreto suas maiores espessuras (10 a 16,5 m) ocorrem junto aos vales.

3.1.2.4 Características Hidrogeológicas

Segundo a ABGE (1981) *apud* Leite (2005) um Sistema Aquífero pode ser entendido, como “espaço no interior do qual se consideram os movimentos de água subterrânea independentes das condições existentes fora de seus limites”.

O pacote composto por aluviões, coluviões, solo de alteração de arenito, arenito, solo de alteração de basalto, eventualmente sem uma ou outra dessas unidades, constitui o Sistema Aquífero Livre regional, tendo como substrato semi-impermeável a impermeável os basaltos da Formação Serra Geral. Esta última, por sua vez, constitui aquífero regional semiconfinado, com porosidade de fissuras.

De acordo com o IPT (1983), as espessuras médias do sistema aquífero livre na região situam-se entre 50 m e 150 m, com tendência de aumento a partir da calha do rio Tietê para os divisores norte e sul, ou seja, as espessuras estão condicionadas preferencialmente pela morfologia de superfície e secundariamente pelo topo rochoso basáltico.

As características hidrogeológicas, produtividade do aquífero e transmissividade indicam que as zonas mais permeáveis do sistema aquífero livre situam-se em áreas de domínio da Formação Santo Anastácio e da Formação Vale do Rio do Peixe (LEITE, 2005).

4 REVISÃO DA LITERATURA

4.1 POTENCIOMETRIA

A água se movimenta somente a partir da presença de um gradiente de potencial hidráulico, no sentido do maior para o menor potencial. Esse diferencial de potencial hidráulico reflete a perda de carga, ou seja, representa a dissipação de energia pela resistência do meio à passagem do fluido (LEITE, 2005).

O limite entre as zonas saturada e não-saturada do aquífero define uma superfície que representa o estado de energia em que se encontra a água nesta interface, superfície essa denominada por superfície potenciométrica do aquífero livre. A identificação de alguns pontos desta superfície permite a construção cartográfica dessa superfície por meio de linhas equipotenciais, permitindo o traçado de linhas de fluxo e divisores de águas subterrâneas (LEITE, 2005).

4.2 ESTATÍSTICA DESCRITIVA

Após a sistematização das informações geológicas, é necessária a realização da análise estatística, visando dentre outras coisas verificar a qual tipo de distribuição os dados se encaixam, a presença de valores anômalos e as estatísticas descritivas que a caracterizam. Essas estatísticas são: média, mediana e moda (medidas de tendência central), variância, desvio padrão e coeficiente de variação (medidas de dispersão em torno da média); curtose e assimetria (medidas de forma).

4.2.1 MÉDIA OU ESPERANÇA MATEMÁTICA

É uma medida de tendência central dos dados (BARROS, 2001), calculada como:

$$E[X] = \sum_{i=1}^n X_i P(X_i) \quad (1)$$

onde $E[X]$ é a esperança matemática, ou a média populacional;

X_i é a i -ésima observação da variável X ; e

$P(X_i)$ é a probabilidade associada à ocorrência da i -ésima variável.

Tratando-se de variáveis aleatórias independentes, onde a probabilidade de ocorrência de cada observação é a mesma, pode-se escrever:

$$E[X] = \bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (2)$$

onde \bar{X} corresponde a média amostral,

n ao número de observações de uma variável aleatória, e

X_i a i -ésima observação de uma variável aleatória.

4.2.2 MEDIANA

Corresponde ao valor que divide a distribuição em duas partes iguais (BARROS, 2001).

4.2.3 MODA

É a classe de valores que apresenta maior freqüência. Pode se representada como sendo o ponto médio da classe (BARROS, 2001).

4.2.4 VARIÂNCIA E DESVIO PADRÃO

A variância mede quanto os valores de uma distribuição distam da sua média (ROCHA, 1999). Ela é calculada como

$$\text{Var}[X] = S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (3)$$

onde $\text{Var}[X]$ e S^2 representam a variância.

O desvio padrão corresponde à raiz quadrada da variância, possuindo portanto, a mesma unidade que a variável.

4.2.5 COEFICIENTE DE VARIAÇÃO

É obtido pela divisão do desvio padrão pela média:

$$CV = \frac{S}{\bar{X}} \quad (4)$$

É um parâmetro adimensional muito utilizado pois permite a comparação da dispersão relativa de variáveis apresentadas em diferentes unidades (ROCHA, 1999).

4.2.6 CURTOSE

É a medida do grau de achatamento da distribuição em relação à distribuição normal (SPIEGEL, 1967). Ela pode ser classificada em leptocúrtica, platicúrtica e mesocúrtica.

4.2.7 ASSIMETRIA

É representada por um coeficiente que mede o grau de simetria da distribuição de freqüências em torno da média (BARROS, 2001):

$$CA = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{S^3} \quad (5)$$

O coeficiente de assimetria (CA) pode ser negativo, quando a cauda da distribuição estiver à esquerda da média, positivo quando a cauda estiver à direita, ou ainda nulo quando a distribuição for simétrica.

4.3 GEOESTATÍSTICA

Os estudos em geoestatística se iniciaram com Sichel, 1947, e depois em 1951 com Daniel G. Krige, que observou que os teores de ouro em uma mina na África da Sul variavam em função da distância entre as amostras (SAMPER & CARRERA, 1990). Doze anos depois Georges Matheron desenvolveu a Teoria das Variáveis Regionalizadas, definindo a geoestatística como a aplicação do formalismo matemático de funções aleatórias para o reconhecimento e predição dos fenômenos naturais (MATHERON, 1963 *apud* LEITE, 2005).

Segundo Chilés & Delfiner (1999) o objetivo dos estudos em geoestatística é a reconstrução de um fenômeno natural no espaço baseado em valores observados para um número limitado de pontos amostrais, ou seja, eles buscam resolver problemas nos quais valores desconhecidos são inferidos a partir de dados amostrais referenciados geograficamente.

A aplicação da geoestatística em predições de parâmetros hidrogeológicos remonta aos anos 70, com destaque para os estudos de Delhomme & De Marsily. Ainda hoje o enfoque geoestatístico das variáveis hidrogeológicas como funções aleatórias tem conduzido a uma revisão dos conceitos clássicos da hidrogeologia quantitativa (LEITE, 2005).

O principal resultado da análise geoestatística é o variograma experimental, ao qual ajusta-se um modelo matemático predefinido, que nada mais é que uma função contínua (função variograma). A partir do modelo teórico de variograma obtêm-se parâmetros para a montagem de um sistema linear (sistema de krigagem), cuja solução visa estabelecer os ponderadores que serão utilizados na estimativa por krigagem (ROCHA, 1999).

4.3.1 HIPÓTESE INTRÍNSECA OU QUASE-ESTACIONARIEDADE

Segundo Yamamoto (2001), a hipótese intrínseca pode ser definida como uma função intrínseca que descreve o comportamento da variável regionalizada no espaço e que essa função é uma característica intrínseca da regionalização.

Para que a geoestatística possa ser aplicada deve-se assumir, portanto, que as diferenças entre dois pontos amostrados devem ser as mesmas para todo o domínio, e que isto dependerá apenas da distância e da direção a ser analisada, ou seja o modelo teórico

de variograma ajustado ao variograma experimental deverá ser válido para qualquer ponto do domínio, desde que para uma mesma distância ao longo de uma mesma direção.

4.3.2 TEORIA DAS VARIÁVEIS REGIONALIZADAS

Para Yamamoto (2002) as variáveis regionalizadas foram introduzidas para descrever quantitativamente variações espaciais em corpos de minério e representam os valores de variáveis referenciadas geograficamente.

Segundo Kim (1990) as variáveis regionalizadas em sua maioria, apresentam um aspecto aleatório, consistindo de variações altamente irregulares e imprevisíveis, e um aspecto estruturado que reflete as características estruturais do fenômeno regionalizado (comportamento determinístico).

Em geologia, todas as observações quantitativas feitas em duas ou três dimensões (área ou volume respectivamente), sejam elas geoquímicas, geofísicas, sedimentológicas, hidrogeológicas etc., podem ser consideradas como exemplos de variáveis regionalizadas (YAMAMOTO, 2001)

Segundo Bubenicek & Haas (1969) as variáveis regionalizadas possuem características que os métodos estatísticos convencionais não são capazes de reconhecer:

- localização: as posições relativas das amostras e a suas distribuições espaciais exercem influência sobre a correlação espacial da variável regionalizada, ou seja, é a posição geográfica das amostras;
- suporte: corresponde à unidade amostral (pontual, volumétrica, etc);
- continuidade: para uma variável ser regionalizada, deve existir uma variância espacial ponto a ponto, variação esta que pode ser expressa matematicamente pelo variograma, ou seja, a pequenas distâncias a variância espacial terá pequenos valores, e a grandes distâncias a variância espacial terá valores altos;
- anisotropia: corresponde a diferenças de comportamento entre as diferentes direções estudadas.

4.3.3 VARIOGRAMA

O variograma é a ferramenta básica que permite descrever quantitativamente a variação no espaço de um fenômeno regionalizado (HUIJBREGTS, 1975 *apud* YAMAMOTO, 2001).

A função variograma é definida como sendo a média do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados por uma distância h , conforme a expressão:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i + h) - Z(x_i)]^2 \quad (6)$$

onde $2\gamma(h)$ é a função variograma;

n é o número de pares de pontos separados por uma distância h ;

$Z(x_i)$ é o valor da variável regionalizada no ponto x_i ; e

$Z(x_i+h)$ é o valor da variável regionalizada no ponto (x_i+h) .

A função semivariograma é a metade da função variograma expressa da seguinte forma:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x_i+h) - Z(x_i)]^2 \quad (7)$$

A representação gráfica da função variograma é o variograma. Ele possui algumas propriedades que descrevem o comportamento espacial das variáveis regionalizadas (Figura 3):

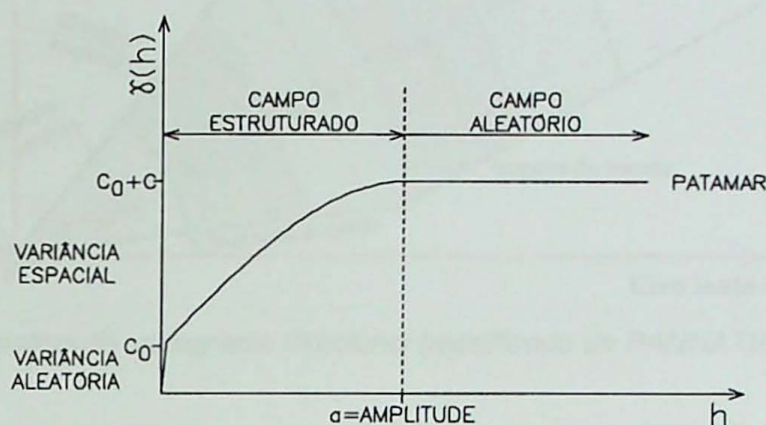


Figura 3 – Representação das propriedades de um variograma típico (YAMAMOTO, 2001).

- amplitude (α): é a distância a partir da qual as amostras passam a não possuir correlação espacial entre si, ou seja, as amostras entram no campo aleatório;
- efeito pepita ou variância aleatória (C_0): corresponde a uma descontinuidade próximo à origem.
- patamar ou sill (C_0+C): é o valor na qual a função variograma estabiliza-se.
- variância espacial: é a diferença entre o patamar e o efeito pepita.

Para o cálculo de variogramas experimentais deve-se fazer a comparação entre valores de amostras separadas por uma distância h . Esta comparação é direta se os pontos de dados estiverem distribuídos segundo uma malha regular. Entretanto, quando os pontos de dados estiverem dispersos, caracterizando uma malha irregular, deve-se fazer a pesquisa de amostras situadas a uma distância h , dentro de uma janela de pesquisa. Esta janela é definida, ao longo da direção do variograma, por um ângulo e por uma distância de tolerância (Figura 4). O ângulo de tolerância pode ser limitado levando-se em consideração a distância "percorrida" ao longo da direção, ou seja, quando a tolerância angular é estabelecida forma-se um triângulo (2D) ou um cone (3D) em torno da direção preferencial

do variograma. O problema é que senão houver uma limitação, a área do triângulo ou volume do cone tendem a crescer indefinidamente, englobando maior número de pontos. Para evitar isso, define-se a largura máxima, isto é, estabelece-se uma distância a partir da qual o triângulo ou cone ficam limitados a essa faixa (CONDE, 2000).

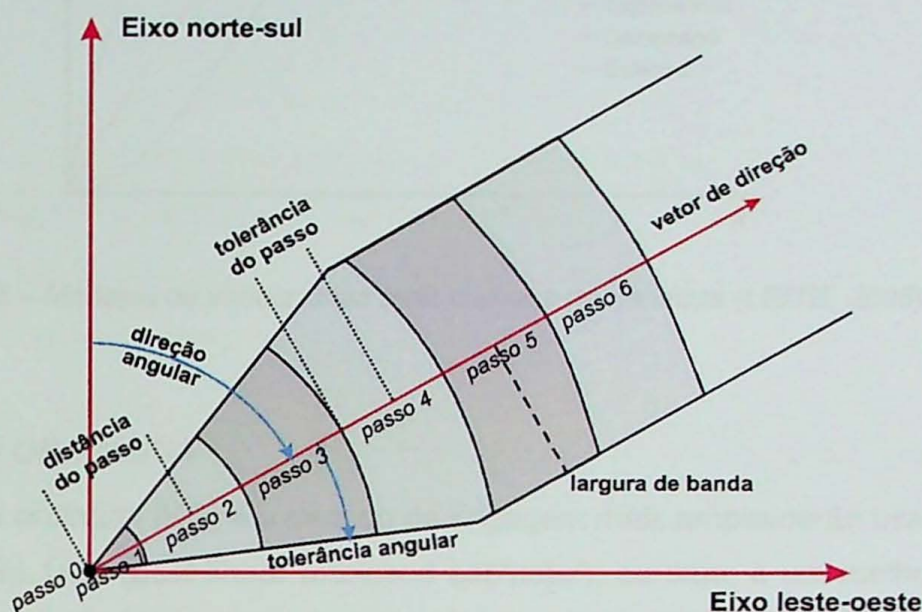


Figura 4 – Parâmetros do variograma direcional (modificado de PANNATIER, 1994).

Segundo Clark (1980) observa-se que à medida que as distâncias aumentam entre os pares de pontos, poucos pares entram no cálculo do variograma, implicando que pontos próximos à origem (pequenas distâncias) serão mais confiáveis do que aqueles a grandes distâncias. Além disso, se dois pontos são altamente correlatos, então a variância da distribuição das diferenças serão baixas, e vice-versa. A variância é portanto uma medida da influência das amostras sobre as áreas vizinhas.

Conforme descrito em Yamamoto (2001), a análise estrutural deve ser realizada tomando-se quatro direções iniciais de pesquisa: E-W, N-S, N45°E e N45°W, ou no sistema azimutal, segundo 0°, 45°, 90° e 135°.

Segundo Rocha (1999) a finalidade de realizar variogramas em várias direções de um domínio é detectar se há anisotropias. Ela pode ser expressa, de acordo com suas mudanças na amplitude e/ou no patamar ao longo de duas direções, em:

- anisotropia zonal: a amplitude é constante e o patamar varia;
- anisotropia geométrica: a amplitude varia, porém o patamar é constante;
- anisotropia mista: tanto a amplitude quanto o patamar variam.

Os modelos de variogramas mais comuns na natureza estão ilustrados na Figura 5.

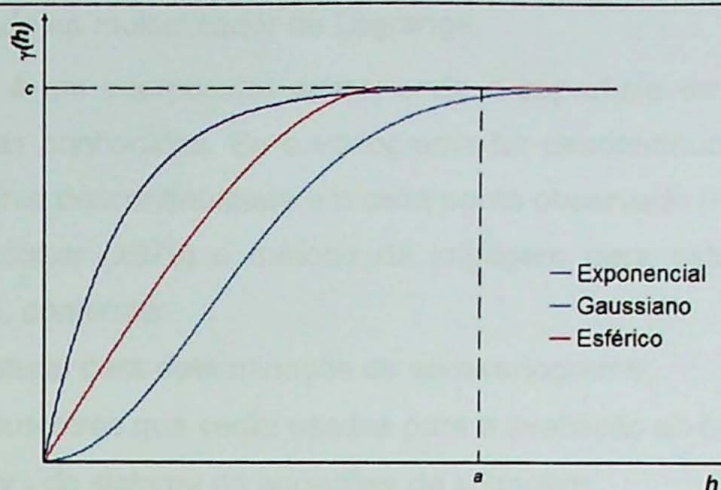


Figura 5 – Modelos de variogramas mais comuns na natureza (LEITE, 2005).

4.3.4 KRIGAGEM ORDINÁRIA

A krigagem ordinária (KO) é o método de krigagem mais amplamente usado.

Ela é um B.L.U.E. (**best linear unbiased estimator**), ou seja, é um melhor estimador linear não enviesado, que busca o melhor conjunto de ponderadores, de modo que a variância de krigagem seja a mínima possível (KITANIDIS, 1997).

De acordo com Wackernagel (1995) é possível estimar um valor desconhecido X_0 usando n dados de amostras de uma vizinhança x_i e combinando linearmente com os pesos λ_i através de:

$$Z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (8)$$

onde $Z(x_i)$ é o valor que a variável regionalizada assume num ponto vizinho ao que será estimado. A soma dos ponderadores ($\lambda_i, i = 1, n$) deve ser igual a 1.

Esses ponderadores são obtidos da resolução de um sistema linear de equações, denominado sistema de equações de krigagem ordinária, que garantidas as condições de não enviesamento é escrito da seguinte forma:

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \gamma(x_1, x_2) & \dots & \gamma(x_1, x_n) & 1 \\ \gamma(x_2, x_1) & \gamma(x_2, x_2) & \dots & \gamma(x_2, x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ \gamma(x_n, x_1) & \gamma(x_n, x_2) & \dots & \gamma(x_n, x_n) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_0, x_1) \\ \gamma(x_0, x_2) \\ \vdots \\ \gamma(x_0, x_n) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

onde $\gamma(x_n, x_n)$ é o valor da variância espacial entre as amostras;

$\gamma(x_0, x_n)$ é o valor da variância espacial das amostras em relação ao ponto estimado;

λ_n corresponde às incógnitas do sistema de krigagem, e serão os ponderadores do estimador;

μ corresponde ao multiplicador de Lagrange.

A krigagem é um interpolador exato, onde a superfície de contorno da estimativa reproduz as medidas conhecidas. Se o variograma for descontínuo na origem, o mapa de contorno possuirá uma descontinuidade em cada ponto observado (KITANIDIS, 1997).

Segundo Brooker (1979) o método da krigagem para estimativas geoestatísticas pode ser sumariado, conforme:

- análise estrutural para determinação do semivariograma;
- seleção de amostras que serão usadas para a avaliação do bloco, ou ponto;
- cálculo dos γ_s do sistema de equações de krigagem;
- solução do sistema de equações para conseguir os melhores ponderadores;
- uso destes resultados para calcular a estimativa do bloco e a variância de estimativa associada.

De acordo com Kitanidis (1997) uma das vantagens da krigagem é a de que os ponderadores não são selecionados com base em alguma regra arbitrária que pode ser aplicada em alguns casos, e em outros não, e sim no quanto a função varia no espaço, podendo assim os dados serem analisados de maneira sistemática e objetiva. Além disso, ela ainda permite a avaliação da magnitude do erro associado a cada nova estimativa.

4.3.5 VALIDAÇÃO CRUZADA

A validação cruzada consiste basicamente em estimar o valor de um ponto conhecido, eliminando-se o mesmo do conjunto de dados, a partir dos valores de pontos vizinhos próximos, selecionados segundo algum critério de busca. Esta técnica permite que se conheça para cada ponto o seu valor, o valor estimado, bem como as incertezas associadas (YAMAMOTO, 2002).

Ela permite aferir o modelo variográfico uma vez que os valores reais $Z(x)$ e os estimados $Z^*(x)$ são plotados num diagrama de dispersão, onde um bom ajuste corresponde àquele onde os pontos estão próximos à reta bissetriz, com um alto coeficiente de correlação. Além disso, é utilizada para a definição dos parâmetros de vizinhança local, como o número de pontos por setor e a distância máxima de busca por amostras vizinhas.

4.3.6 VARIÂNCIA DE INTERPOLAÇÃO E VARIÂNCIA DE KRIGAGEM

A variância de krigagem mede a configuração espacial dos dados e segundo Olea (1991) é independente dos valores dos pontos de dados usados para obter o estimador $Z^*(x_0)$. Ela é expressa da seguinte maneira:

$$\sigma_{KO}^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i \gamma(x_0, x_i) + \mu \quad (10)$$

onde σ_{KO}^2 é o valor da variância de krigagem;

λ_i é o ponderador do sistema de krigagem;

$\gamma(x_0, x_i)$ é igual ao valor da variância espacial das amostras em relação ao ponto estimado;

μ corresponde ao multiplicador de Lagrange.

Yamamoto (2000) propôs a variância de interpolação, que corresponde à propriedade de exatidão da krigagem ordinária. Ela usa diretamente a distância estrutural do variograma através do peso da krigagem ordinária λ_i , quanto mais influente o ponto de dado, maior o seu peso, sendo ainda proporcional à dispersão amostral. É expressa da seguinte maneira:

$$S_0^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i) - Z^*(x_0)]^2 \quad (11)$$

onde s_0^2 é o valor da variância de interpolação;

λ_i é o ponderador do sistema de krigagem;

$Z(x_i)$ é o valor que a variável regionalizada assume num ponto vizinho ao que será estimado;

$z^*(x_0)$ é o ponto estimado.

4.3.7 KRIGAGEM ORDINÁRIA PARA SITUAÇÕES COM TENDÊNCIA REGIONAL

Para a obtenção de um variograma, é suposto que a variável regionalizada tenha um comportamento francamente estacionário, onde os valores esperados, assim como sua covariância espacial, sejam os mesmos para uma determinada área. Assume-se portanto, que os valores dentro da área de interesse, não apresentam tendência que possam afetar os resultados (LANDIM et al, 2002).

Isso nem sempre acontece, pois existem situações em que a variável exibe uma variação sistemática, tornando necessária uma metodologia específica para a devida correção, pois se o modelo variográfico não for o correto, os erros associados às estimativas por krigagem tornam-se maiores (LANDIM et al, 2002).

Uma das metodologias utilizadas para a correção de tal situação é a retirada da deriva, evidenciada no variograma por uma tendência crescente, por uma superfície polinomial de grau 1.

Segundo Landim et al (2002) deve-se trabalhar com os resíduos dessa superfície, que são as diferenças entre as observações e as predições do modelo.

4.3.8 KRIGAGEM COM CORREÇÃO DO EFEITO DE SUAUIZAÇÃO

A krigagem ordinária garante aos valores estimados precisão local, porém ela não reproduz adequadamente o histograma e a variância espacial, dada pela função semivariograma (precisão global). Este problema é conhecido como “efeito de suavização da krigagem ordinária”, onde valores máximos são subestimados e valores mínimos são superestimados.

A busca pela precisão local com uma boa reprodução do histograma pelos métodos de krigagem, já foi estudada por diversos autores como Olea & Pawlowsky (1996) e Journel et al. (2000). Olea & Pawlowsky (1996) propuseram um procedimento chamado krigagem compensada, que produz estimativas compensadas, com propriedades intermediárias entre aquelas obtidas pela krigagem convencional e pelas simulações condicionais. Já Journel et al. (2000) citam uma solução baseada em um algoritmo de pós-processamento, porém com perda de precisão local do semivariograma.

Yamamoto (2005) mostrou que o efeito de suavização pode ser corrigido através da krigagem com correção do efeito de suavização, garantindo aos dados precisão local, com uma boa reprodução do histograma e do semivariograma, tendo como resultado um único mapa.

Sua metodologia foi derivada parcialmente daquela sugerida por Olea & Pawlowsky (1996) e consiste em 4 passos:

1) realização da validação cruzada para a obtenção do desvio de interpolação e do erro verdadeiro ($z_{KO}^*(x_0) - z(x_0)$) para cada ponto de dado. Estas variáveis serão transformadas na variável N_{s_0} , pela expressão:

$$N_{s_0} = \frac{\text{erro verdadeiro}}{S_0} \quad \text{com } s_0 \neq 0 \quad (12)$$

2) realização da krigagem ordinária para a determinação do número de desvios de interpolação (N_{s_0}) em todos os nós a serem corrigidos;

3) realização das estimativas de todos os nós pela krigagem ordinária, $z_{KO}^*(x_0)$, baseada no mesmo número de pontos vizinhos utilizados no passo 1;

4) executar um programa de pós-processamento para a correção das estimativas obtidas pela krigagem ordinária segundo a expressão:

$$z_{KO}^{**}(x_0) = z_{KO}^* + N_{s_0}(x_0) \times S_0 \quad (13)$$

Onde: N_{s_0} é o número de desvios de interpolação no nó x_0 .

O valor corrigido obtido pela expressão (13) deve ser checado para averiguar se ele esta entre os limites máximo e mínimo apresentado pelos dados na vizinhança definida para a estimativa.

Por fim, todas as estimativas corrigidas são computadas e sua média é calculada e comparada com a média amostral. Se elas forem diferentes, então uma constante k é calculada como a seguir:

$$K = E[z(x)] - E[z_{ko}^{**}(x)] \quad (14)$$

A adição da constante K a todas as estimativas corrigidas faz com que a média das estimativas corrigidas seja igual à média amostral sem mudanças na variância amostral, de acordo com a seguinte propriedade da variância ($\text{Var}[z(x)+K] = \text{Var}[z(x)]$).

4.3.9 DIAGRAMA P-P

O diagrama P-P analisa a proximidade entre duas bases de dados, comparando a probabilidade acumulada associada aos valores pertencentes aos dados de referência àquelas de uma base de dados amostral qualquer. Quanto mais próximo à reta de 45° (dados de referência) mais semelhantes os dados amostrais serão dos valores de referência.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados utilizados neste trabalho são resultados de um levantamento hidrogeológico realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) em convênio com a Companhia Energética de São Paulo (CESP), objetivando a avaliação do impacto do reservatório de Três Irmãos, associado à Usina Hidrelétrica de mesmo nome, sobre a superfície potenciométrica do aquífero livre.

Eles consistem em 186 pontos georreferenciados (Figura 6) com informações da cota do nível d'água (potenciometria), medidas em Abril de 1984, apresentado a seguinte configuração (Figura 7).

As informações de potenciometria foram tratadas no Sistema GeoVisual, versão 2.2 (YAMAMOTO, 2002), um software desenvolvido para a realização de análises estatísticas e geoestatísticas.

Na análise estatística foram calculados histogramas e curvas acumuladas em escala de probabilidades aritméticas, bem como as estatísticas descritivas dos dados e sua interpretação.

Já na análise geoestatística foram realizados os cálculos dos variogramas para a variável potenciometria em diversas direções, visando verificar a presença, ou não, de anisotropia. Uma vez detectada a anisotropia, os variogramas foram recalculados em duas direções e o modelo teórico de variograma ajustado.

Como os dados de potenciometria são não estacionários, ou seja, não possuem variância espacial finita, eles são tratados através de seus resíduos, como proposto por Deutsch & Journel (1992), pois a não estacionariedade dos dados se dá pela presença de uma tendência regional que pode ser retirada como uma superfície polinomial de baixo grau (no máximo grau 2).

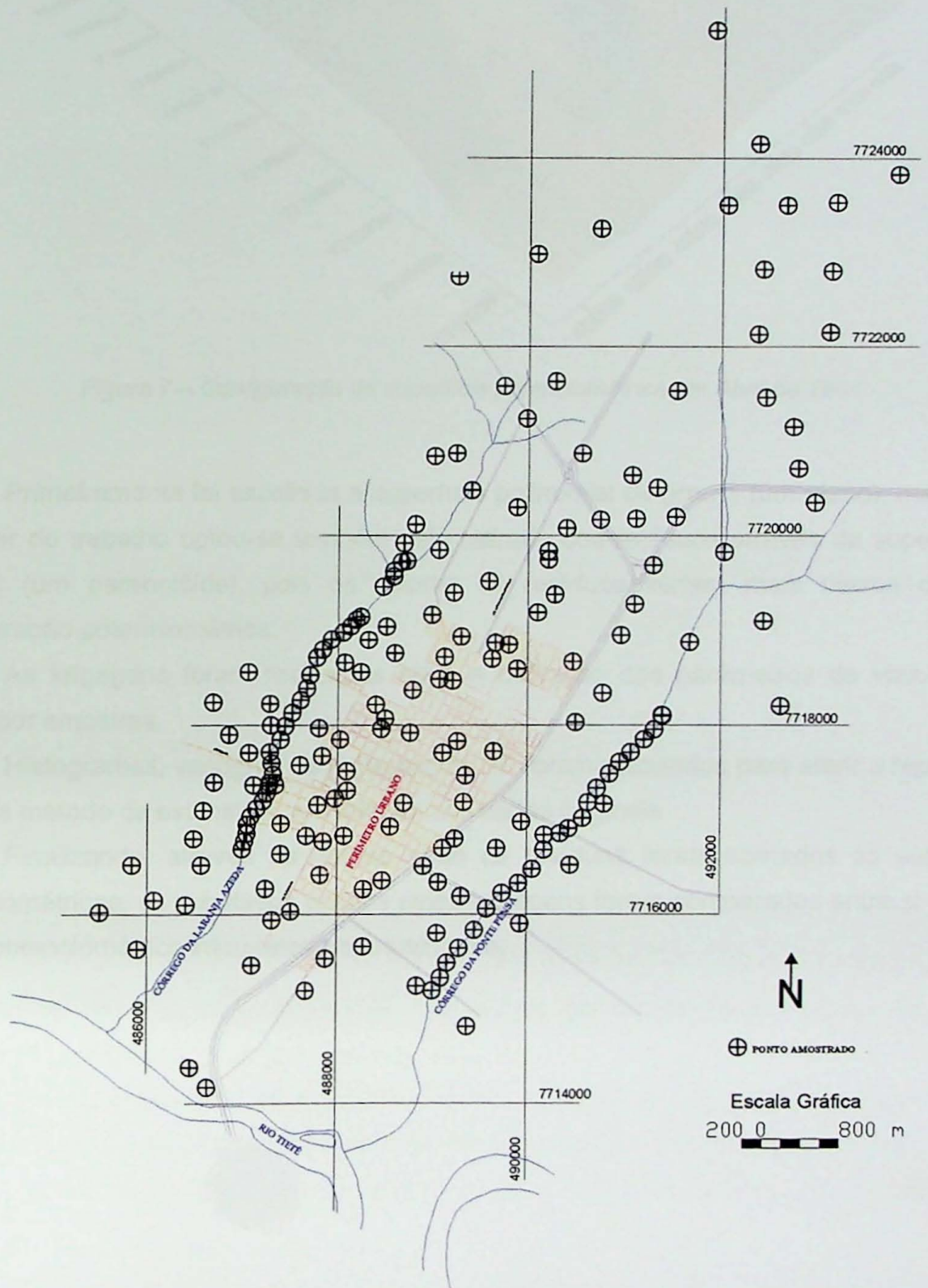


Figura 6 – Mapa de distribuição dos pontos de controle potenciométrico (modificado de Leite, 2005).

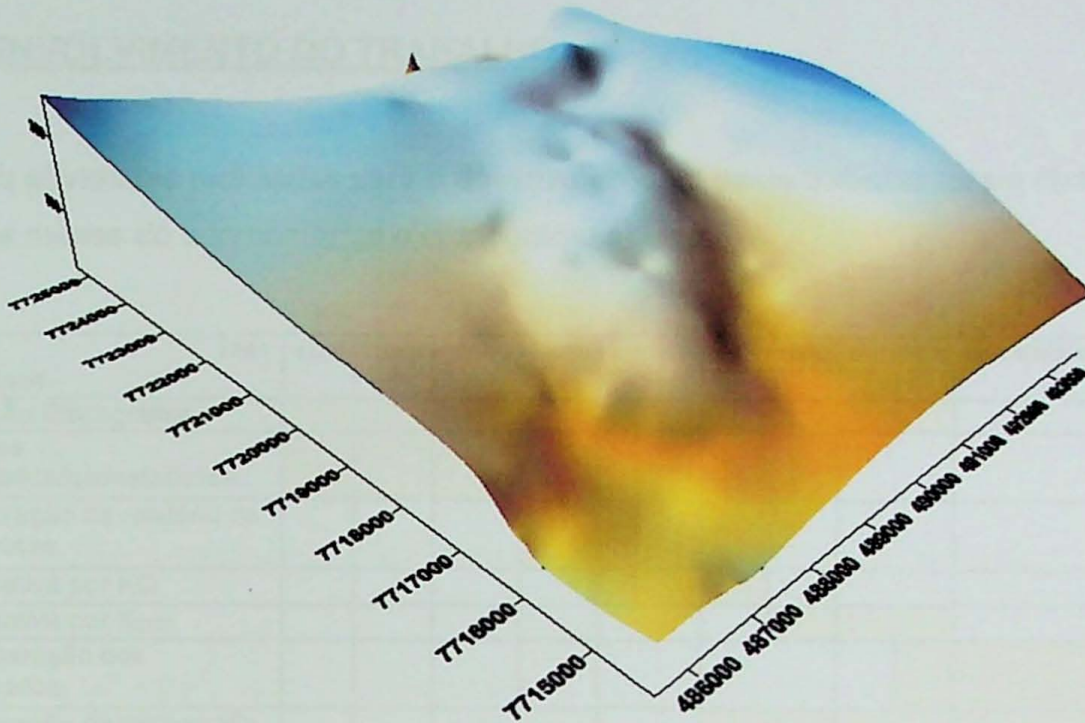


Figura 7 – Configuração da superfície potenciométrica em Abril de 1984.

Primeiramente foi escolhida a superfície polinomial de grau 1 (um plano), mas com o decorrer do trabalho optou-se também pela retirada dos resíduos através da superfície de grau 2 (um parabolóide), pois os valores de resíduos seriam mais baixos devido à configuração potenciométrica.

As krigagens foram realizadas após a definição dos parâmetros de vizinhança e busca por amostras.


Histogramas, variogramas e diagramas PP foram calculados para aferir a reprodução de cada método de estimativa, em relação aos dados originais.

Finalizando, através de mapas onde os resíduos foram somados às superfícies potenciométricas, os resultados obtidos pelas krigagens foram comparados entre si e com o mapa potenciométrico interpretado manualmente.

6 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

As atividades realizadas para o desenvolvimento deste trabalho foram distribuídas ao longo dos meses do ano conforme o cronograma abaixo:

Mês	abril	maio	junho	julho	agosto	setembro	outubro	novembro	dezembro
Atividade									
Revisão Bibliográfica									
Análise estatística/geoestatística									
Elaboração do relatório de progresso									
Estimativa por KO									
Estimativa por K_{CES}									
Comparação dos resultados									
Elaboração da monografia									
Defesa da monografia									

 Atividades realizadas

O projeto foi desenvolvido dentro dos prazos inicialmente estabelecidos seguindo o cronograma proposto. Os resultados foram obtidos sem dificuldades e são satisfatórios.

7 RESULTADOS OBTIDOS

7.1 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Pode-se observar no histograma da Figura 8 que a potenciometria apresenta assimetria levemente positiva (com cauda à direita) e valores de média e mediana próximos (323,498 e 320,000 respectivamente) denotando um comportamento próximo a uma distribuição simétrica, como já havia sido observado por Leite (2005). Pode-se notar ainda no histograma a presença de duas populações, que refletem a localização das amostras coletadas, em relação à topografia da área em questão, que compreende uma colina ampla de topo aplainado. Ainda à direita na figura, observamos as estatísticas descritivas dos dados.

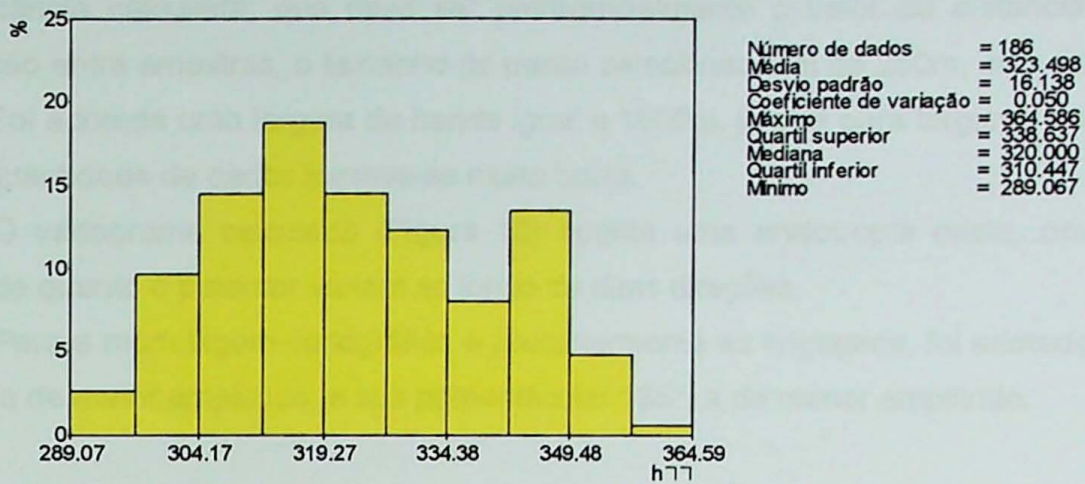


Figura 8 – Histograma e estatísticas descritivas dos dados de potenciometria.

A curva acumulada de probabilidade aritmética (Figura 9) corrobora com a interpretação do histograma, uma vez que apresenta um ponto de inflexão, o que indica a presença de duas populações distintas.

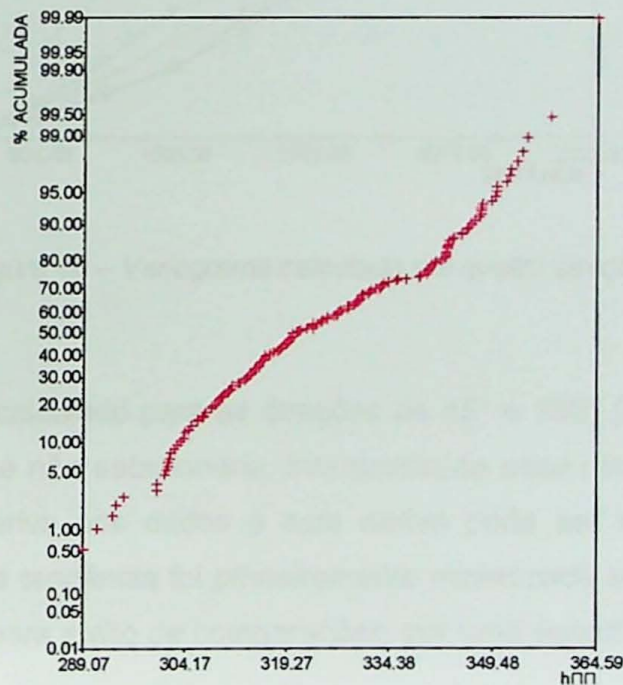


Figura 9 – Curva acumulada de probabilidade aritmética.

7.2 ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

Para a detecção de anisotropias, a análise geoestatística foi iniciada com a análise exploratória, onde o variograma é calculado em quatro direções (0°, 45°, 90° e 135°), com

tolerância angular de $22,5^\circ$. Para a definição dos pares de pontos que terão a semivariância calculada, que deve ser preferencialmente o valor da distância média de separação entre amostras, o tamanho do passo selecionado foi de 250m, com tolerância de 125m. Foi adotada uma largura de banda igual a 1500m, já que para larguras menores que esta a quantidade de dados tomava-se muito baixa.

O variograma calculado (Figura 10) aponta uma anisotropia mista, onde tanto a amplitude quanto o patamar variam ao longo de duas direções.

Para a modelagem variográfica e posteriormente as krigagens, foi adotada a direção de 45° , a de maior amplitude, e sua perpendicular 135° , a de menor amplitude.

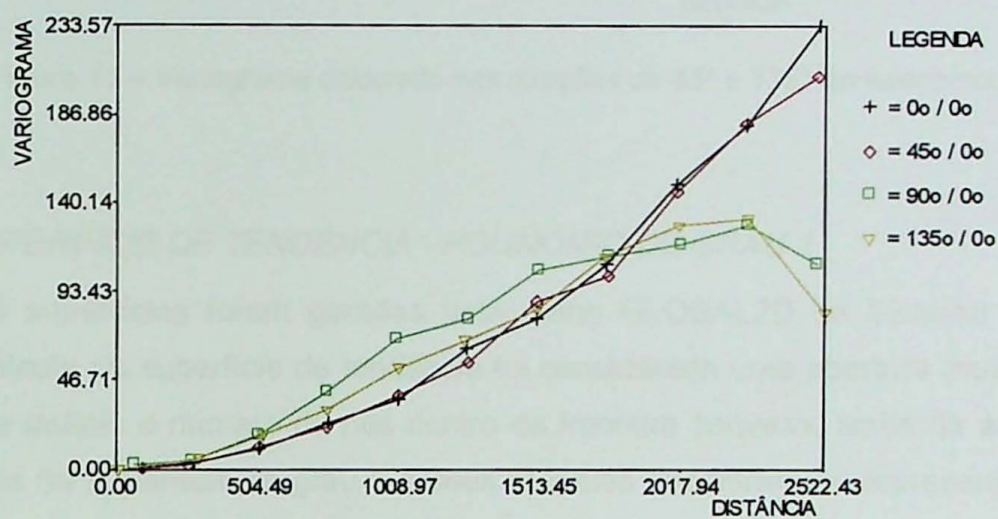


Figura 10 – Variograma calculado em quatro direções.

O variograma recalculado para as direções de 45° e 135° (Figura 11), mostra que a variável potenciometria é não estacionária. Interpretou-se essa não estacionariedade como sendo fruto de uma deriva nos dados e esta deriva pode ser representada como uma tendência regional. Essa tendência foi primeiramente minimizada através de uma superfície polinomial de grau 1, e para efeito de comparações, por uma superfície polinomial de grau 2.

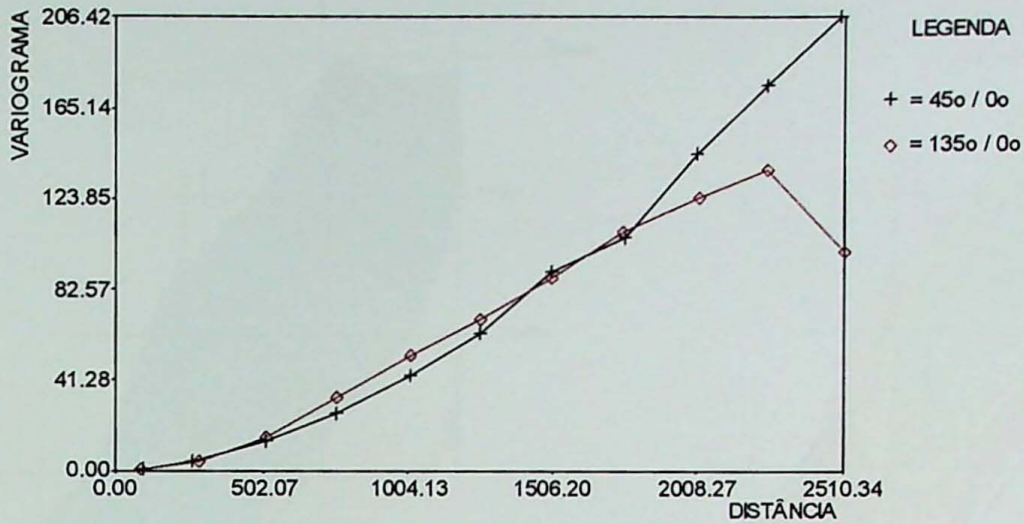


Figura 11 – Variograma calculado nas direções de 45° e 135° apresentando deriva.

7.2.1 SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA - POLINÔMIO DE GRAU 1

As superfícies foram geradas pela rotina GLOBAL2D do Sistema GeoVisual 2.2. Para o cálculo da superfície de tendência foi considerada uma abertura (malha) de 250m X 250m que definiu o número de nós dentro da fronteira convexa, limite da área (Figura 12). Os valores da superfície de grau 1 e seus resíduos encontram-se representados na Figura 13A e 13B

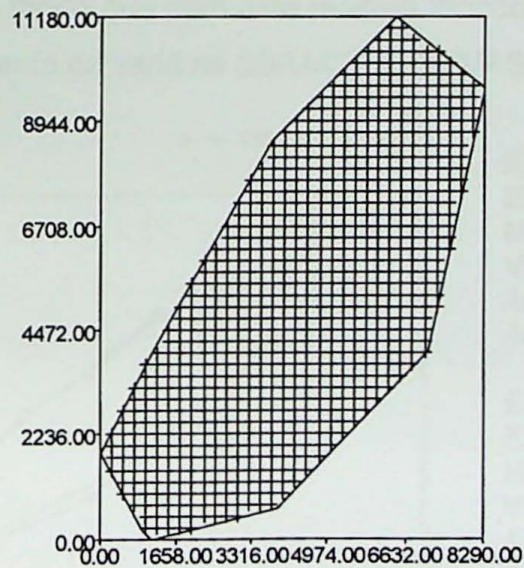


Figura 12 – Fronteira convexa com malha regular adotada.

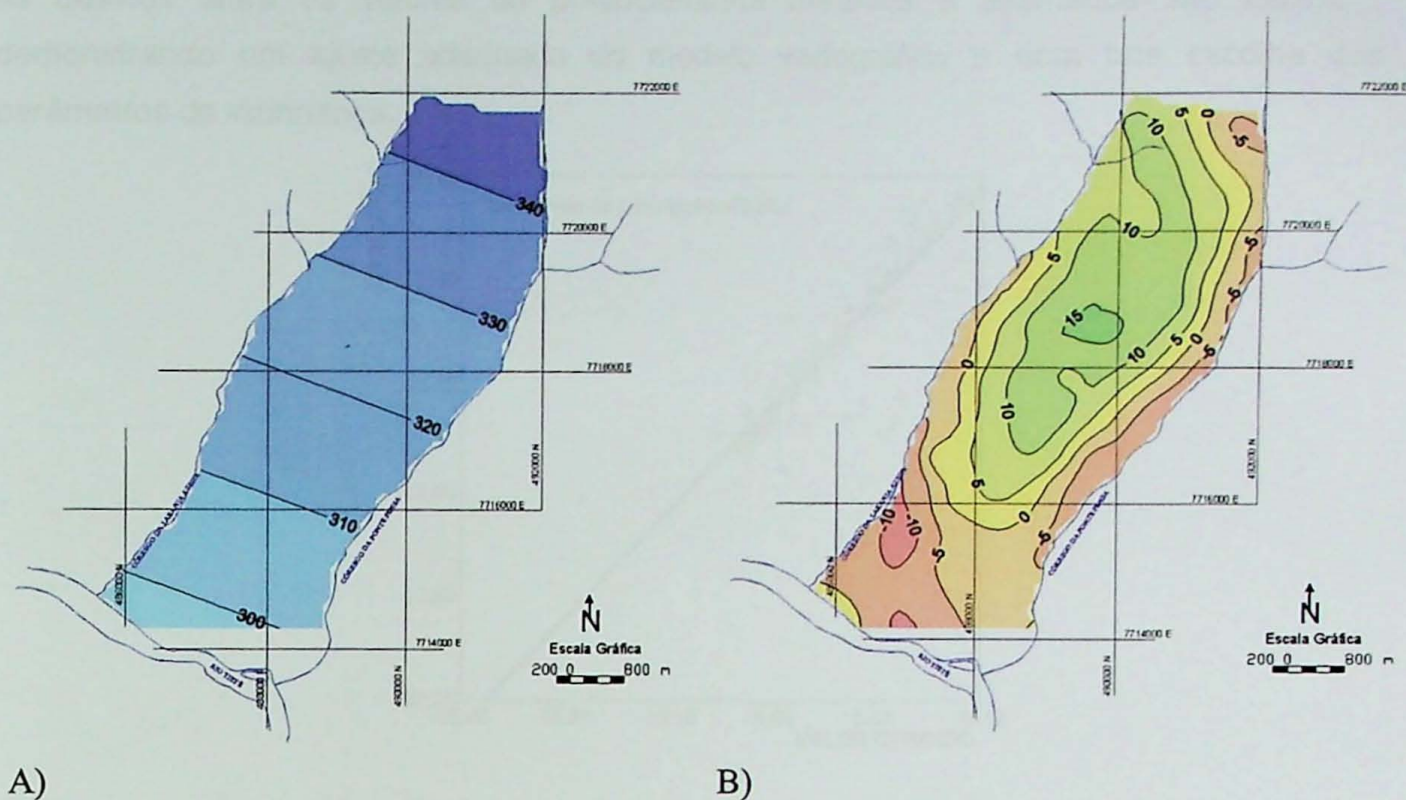


Figura 13 – A) Mapa da superfície de tendência de grau 1 e B) mapa de resíduos.

A partir dos valores dos resíduos foi calculado um novo variograma experimental com os mesmos parâmetros utilizados anteriormente, ou seja, direções 45° e 135° , largura de banda 1500m e passo 250m. A esse variograma experimental foi ajustado um modelo Gaussiano (Figura 14), de modo que com este modelo teórico possam ser feitas inferências em relação ao comportamento da variável (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

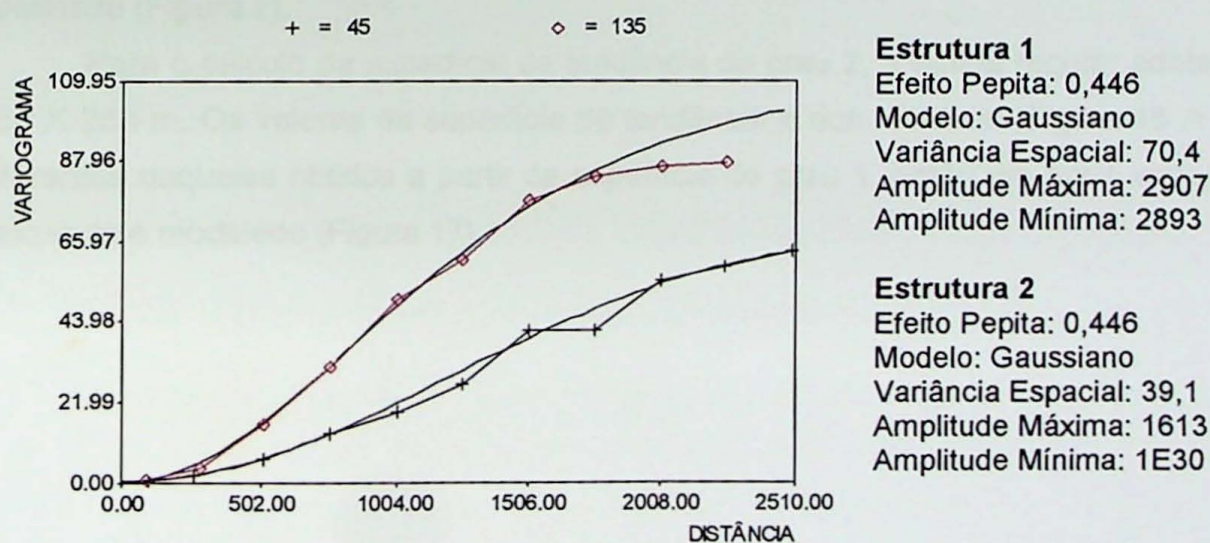


Figura 14 – Variograma modelado e valores das propriedades utilizadas para seu ajuste.

Para avaliar o ajuste do modelo teórico ao variograma experimental foi realizada a validação cruzada (Figura 15). Ela indicou um coeficiente de correlação de 0,904, ou seja,

os desvios entre os valores de potenciometria medidos e estimados são baixos, demonstrando um ajuste adequado do modelo variográfico e uma boa escolha dos parâmetros de vizinhança.

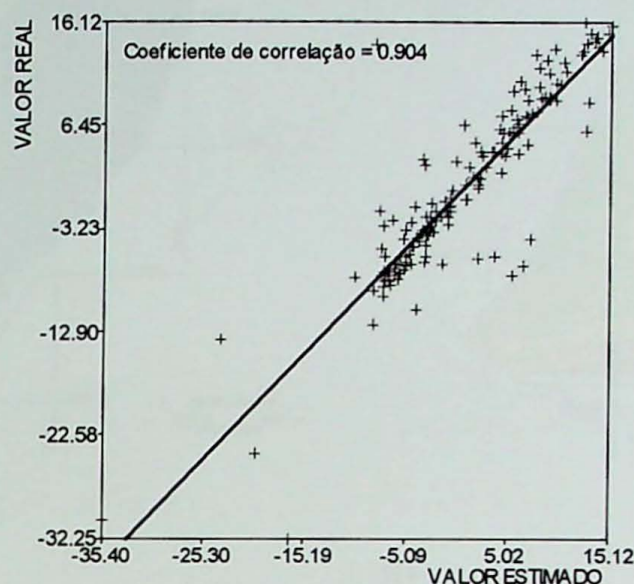


Figura 15 – Diagrama de dispersão da validação cruzada.

7.2.2 SUPERFÍCIE DE TENDÊNCIA - POLINÔMIO DE GRAU 2

Como a análise da superfície de tendência é uma técnica matemática que procura fornecer uma superfície que melhor se adapte a um dado conjunto de observações, optou-se também pela retirada da deriva espacial através de um polinômio de grau 2, uma vez que a superfície potenciométrica acompanha a topografia da área, uma colina ampla de topo aplainado (Figura 7).

Para o cálculo da superfície de tendência de grau 2, a malha regular adotada foi de 250 X 250 m. Os valores da superfície de tendência e dos resíduos (Figura 16 A e B) são diferentes daqueles obtidos a partir da superfície de grau 1, então um novo variograma foi calculado e modelado (Figura 17).

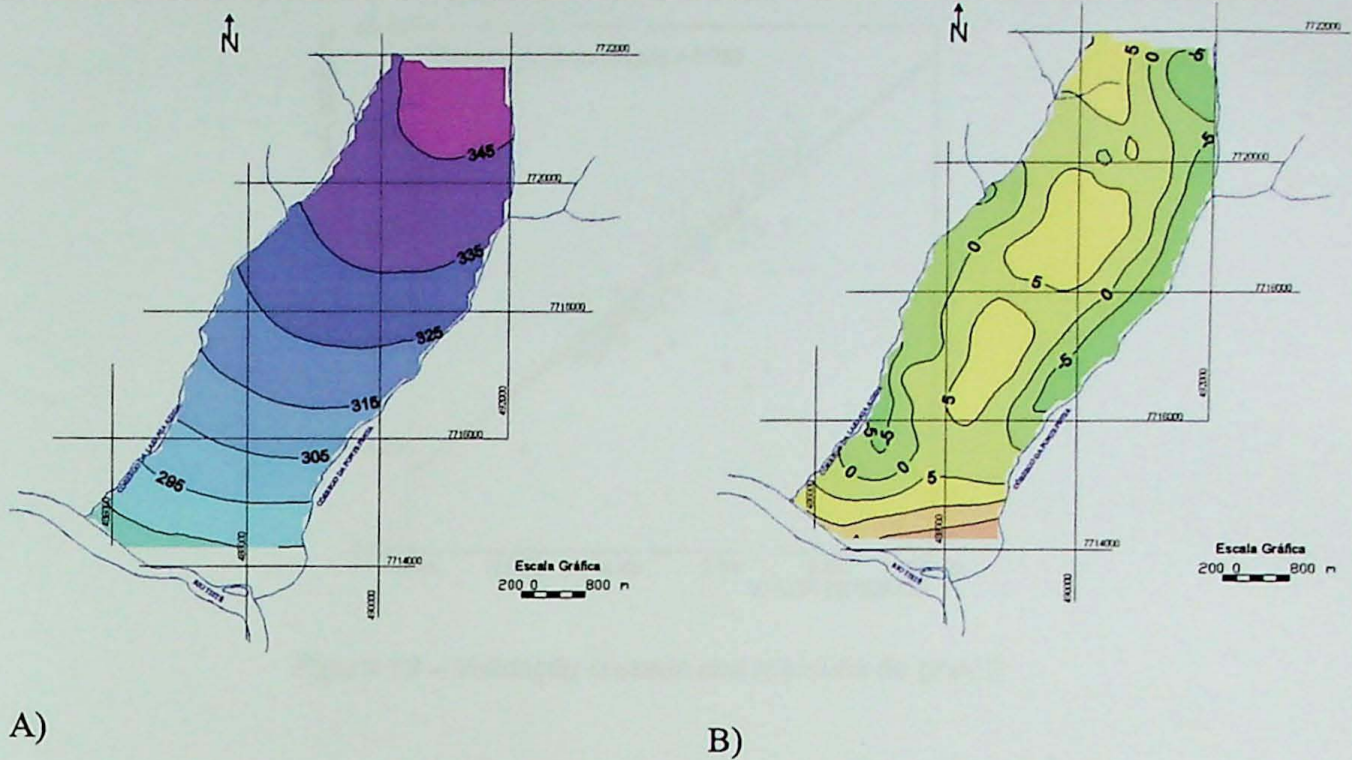


Figura 16 – A) Mapa de tendência, polinômio de grau 2 e B) mapa de resíduos, polinômio de grau 2.

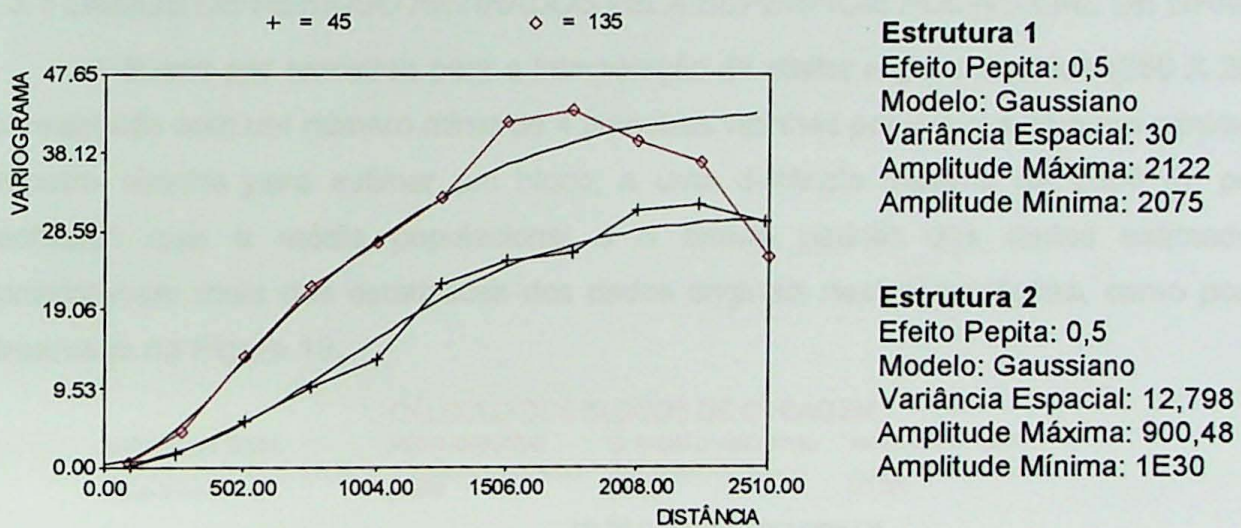


Figura 17 – Variograma modelado e parâmetros utilizados no seu ajuste.

A validação cruzada dos resíduos de grau 2 apontou um coeficiente de correlação igual a 0,752 (Figura 18), menor que o coeficiente dos resíduos de grau 1. Isto reflete o ajuste do modelo teórico ao variograma experimental, que é menos preciso nos resíduos de grau 2.

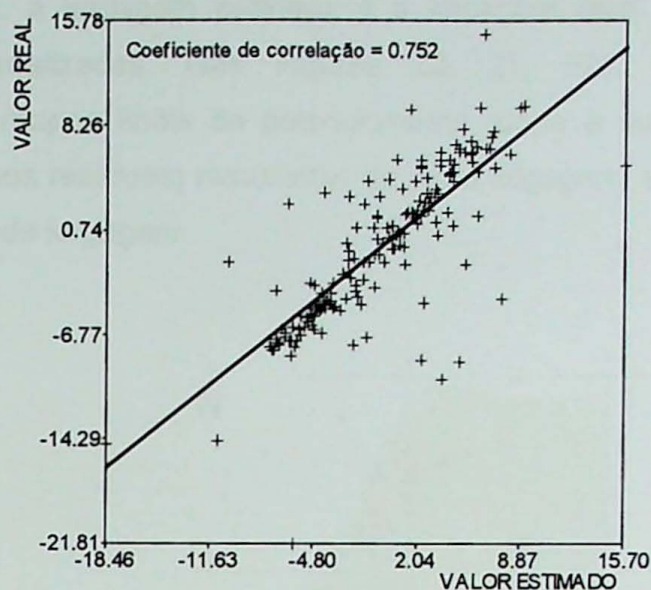


Figura 18 – Validação cruzada dos resíduos de grau 2.

7.3 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE VIZINHANÇA E KRIGAGEM

7.3.1 DADOS DE RESÍDUO RETIRADOS PELA SUPERFÍCIE POLINOMIAL DE GRAU 1

A busca por amostras para a interpolação da malha regular adotada (250 X 250 m), foi realizada com um número ótimo de 4 amostras vizinhas por bloco e com um mínimo de 1 amostra vizinha para estimar um bloco, a uma distância máxima de 2000 m, pois foi verificado que a média populacional e o desvio padrão dos dados estimados se aproximavam mais das estatísticas dos dados originais nestas condições, como pode ser observado na Figura 19.

CÁLCULO DOS BLOCOS DE CUBAGEM					
ARQUIVO DE SAÍDA	MÉDIA AMOSTRAL	D. PADRÃO, AMOSTRAL	VARIÂNCIA AMOSTRAL		
potenciometria.ko2	-0.000	8.793	77.322		
CÁLCULO DO DEFICIT DE VARIÂNCIA					
N. DADOS	VARIÂNCIA DO ZK0*	MEDIA DO S02	SOMA DE VARIÂNCIAS	% VAR. AMOST.	
725	51.918	40.966	92.894	120.127	
LIMITE CORRIGIDO					
VARIÂNCIA CORRIGIDA	VARIÂNCIA DO ZCORR**	FORA+/-3S0	< VMIN	> VMAX	< ZMIN > ZMAX
77.3168662453545	77.317	1	25	24	0 0
ESTATÍSTICAS DAS ESTIMATIVAS CORRIGIDAS					
FATOR ÓTIMO	MÉDIA	DESVIDO PADRÃO	COEF. DE VARIAÇÃO		
0.15	-0.000	8.793	.327099.636		
ESTATÍSTICAS DAS ESTIMATIVAS KO					
CONSTANTE K	MÉDIA	DESVIDO PADRÃO	COEF. DE VARIAÇÃO		
-0.195	0.219	7.205	32.898		

Figura 19 – Resultado das estimativas corrigidas e do cálculo de déficit de variância, pela rotina Crossordkrig2 do software GeoVisual ver. 2.2.

Na seqüência, a krigagem ordinária e a krigagem com correção do efeito de suavização foram realizadas. Nas Figuras 20, 21, 22A e 22B apresentam-se, respectivamente, os mapas finais de potenciometria (onde a superfície polinomial já foi novamente somada aos resíduos) resultantes de cada krigagem, e os mapas de desvio de interpolação e desvio de krigagem.

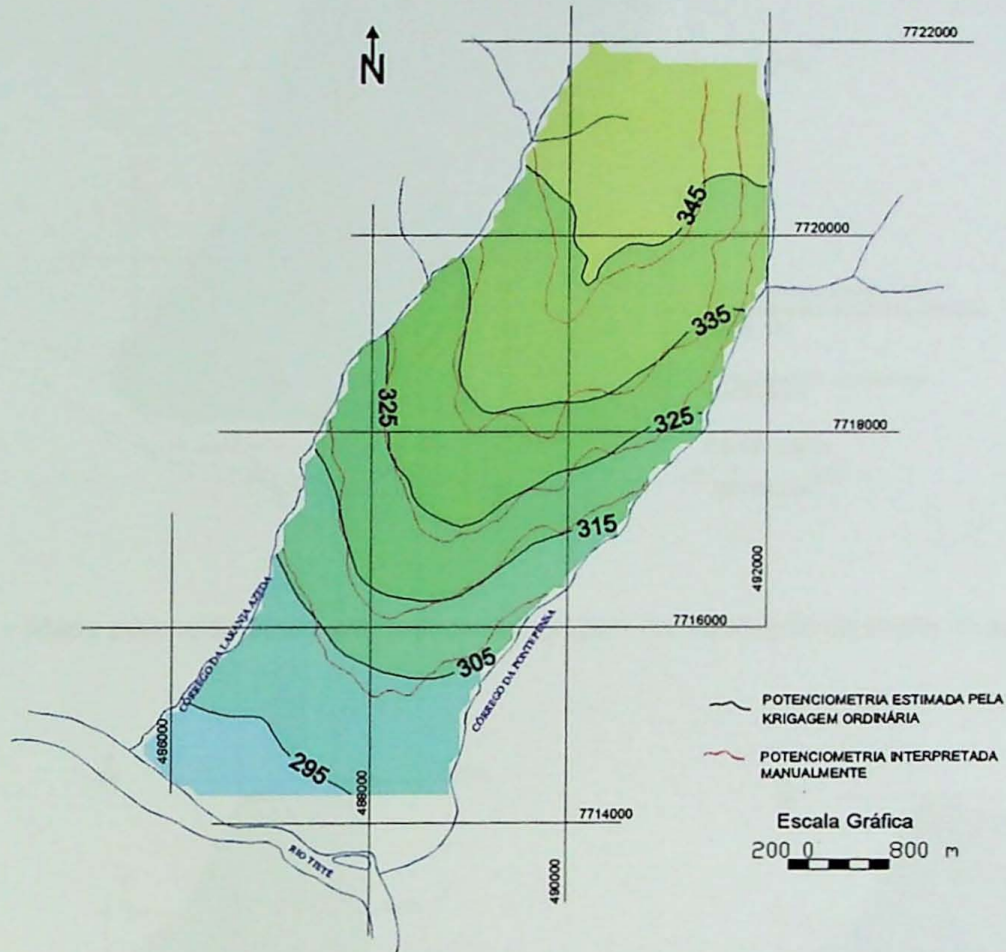


Figura 20 – Mapa potenciométrico estimado pela krigagem ordinária.

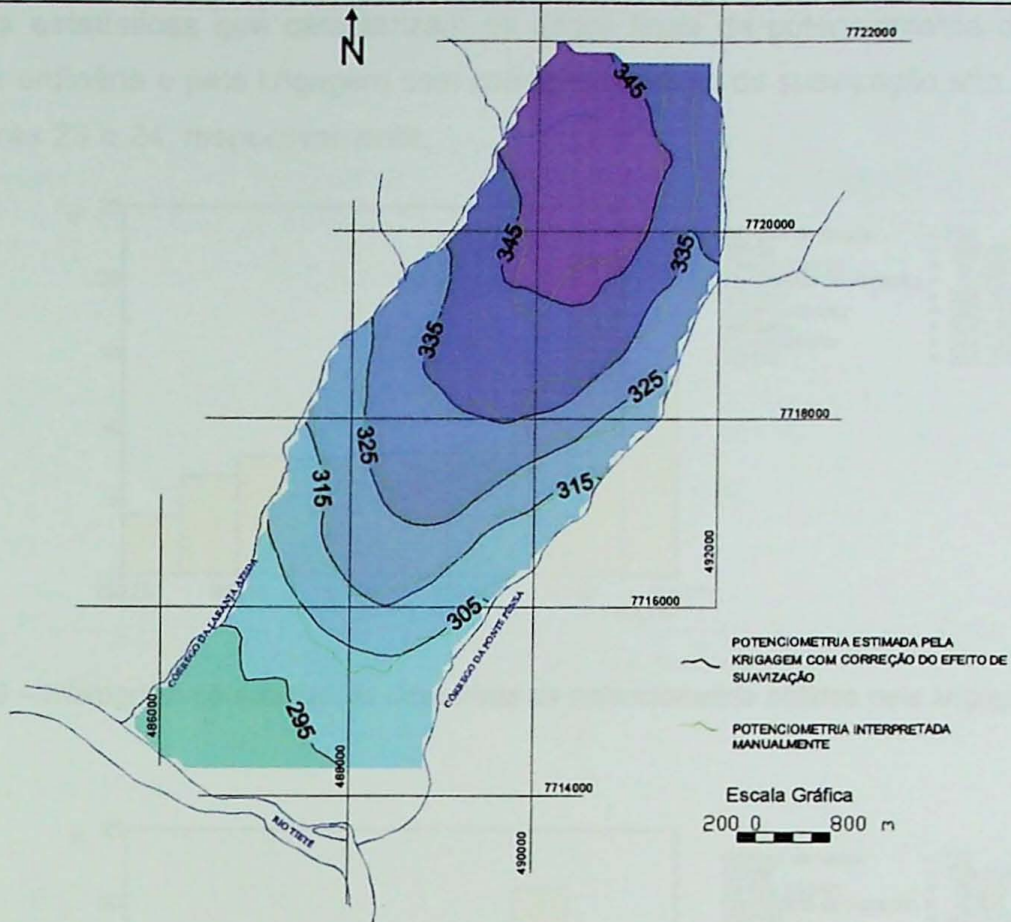
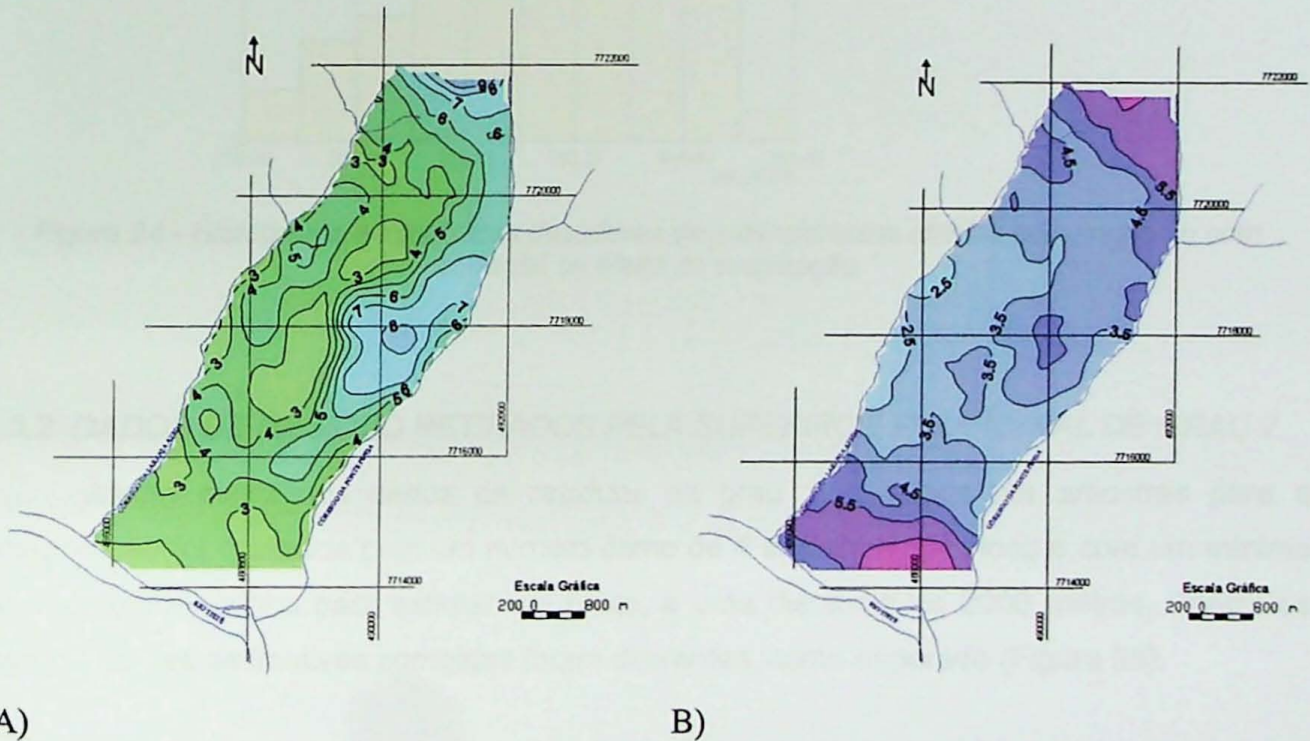


Figura 21 - Mapa potenciométrico estimado pela krigagem com correção do efeito de suavização.



A)

B)

Figura 22 – A) Mapa de desvio de interpolação e B) mapa de desvio de krigagem, obtidos pela rotina Crossordkrig2 do software GeoVisual ver. 2.2, migrado para o pacote Surfer 8.

As estatísticas que caracterizam os dados finais de potenciometria obtidos pela krigagem ordinária e pela krigagem com correção do efeito de suavização são apresentadas nas Figuras 23 e 24, respectivamente.

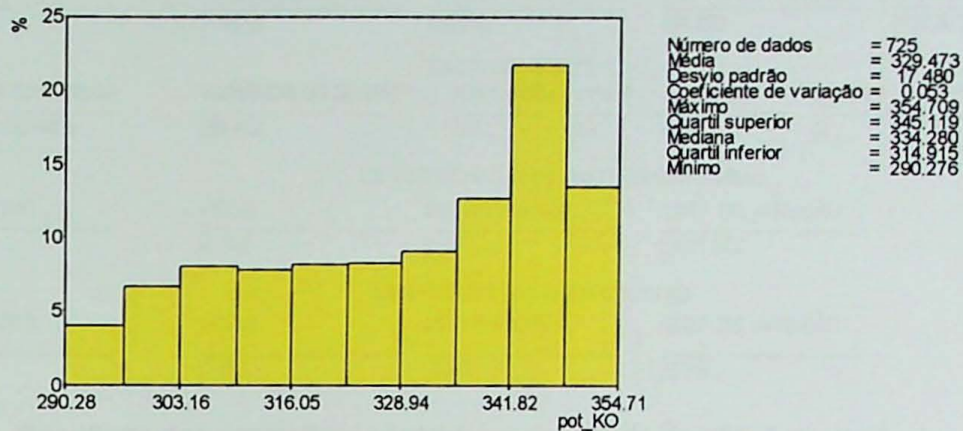


Figura 23 – Histograma e estatísticas descritivas da potenciometria obtidos pela krigagem ordinária.

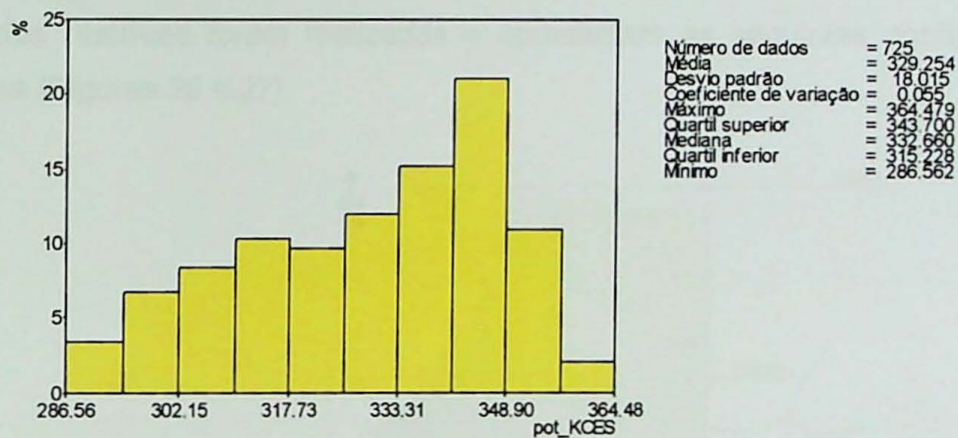


Figura 24 - Histograma e estatísticas descritivas da potenciometria obtidos pela krigagem com correção do efeito de suavização.

7.3.2 DADOS DE RESÍDUO RETIRADOS PELA SUPERFÍCIE POLINOMIAL DE GRAU 2

Assim como nos dados de resíduos de grau 1, a busca por amostras para a interpolação foi realizada com um número ótimo de 4 amostras por bloco e com um mínimo de 1 amostra vizinha para estimar um bloco, a uma distância de 2000 metros. Porém os resultados das estimativas corrigidas foram diferentes, como esperado (Figura 25).

CÁLCULO DOS BLOCOS DE CUBAGEM						
ARQUIVO DE SAÍDA	MÉDIA AMOSTRAL	D. PADRÃO. AMOSTRAL	VARIÂNCIA AMOSTRAL			
potenciometria.ko2	0.000	6.284	39.487			
CÁLCULO DO DEFICIT DE VARIANCIA						
N. DADOS	VARIÂNCIA DO ZK0*	MÉDIA DO S02	SOMA DE VARIÂNCIAS	% VAR. AMOST.		
725	15.013	39.215	54.229	137.333		
LIMITE CORRIGIDO						
VARIANCIA CORRIGIDA	VARIÂNCIA DO ZCORR**	FORA+/-3S0	< VMIN	> VMAX	< ZMIN	> ZMAX
39.5117009950209	39.412	13	13	43	0	0
ESTATÍSTICAS DAS ESTIMATIVAS CORRIGIDAS						
FATOR ÓTIMO	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	COEF. DE VARIACÃO			
0.06	0.002	6.278	2821.663			
ESTATÍSTICAS DAS ESTIMATIVAS K0						
CONSTANTE K	MÉDIA	DESVIO PADRÃO	COEF. DE VARIACÃO			
-1.417	1.051	3.875	3.685			

Figura 25 - Resultado das estimativas corrigidas e do cálculo de déficit de variância, pela rotina Crossordkrig2 do GeoVisual ver. 2.2, resíduos de grau 2.

Na seqüência, a krigagem ordinária e a krigagem com correção do efeito de suavização dos resíduos foram realizadas e apresentam as seguintes configurações de potenciometria (Figuras 26 e 27).

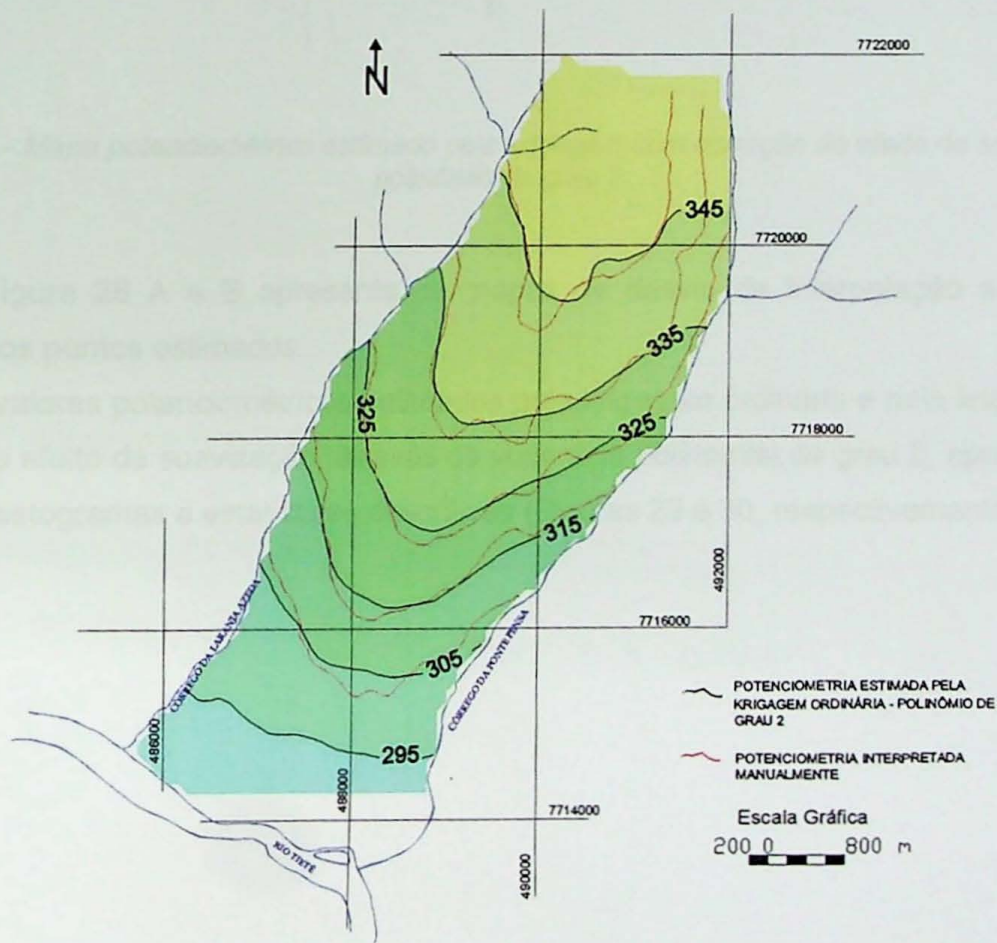


Figura 26 - Mapa potenciométrico estimado pela krigagem ordinária, polinômio de grau 2.

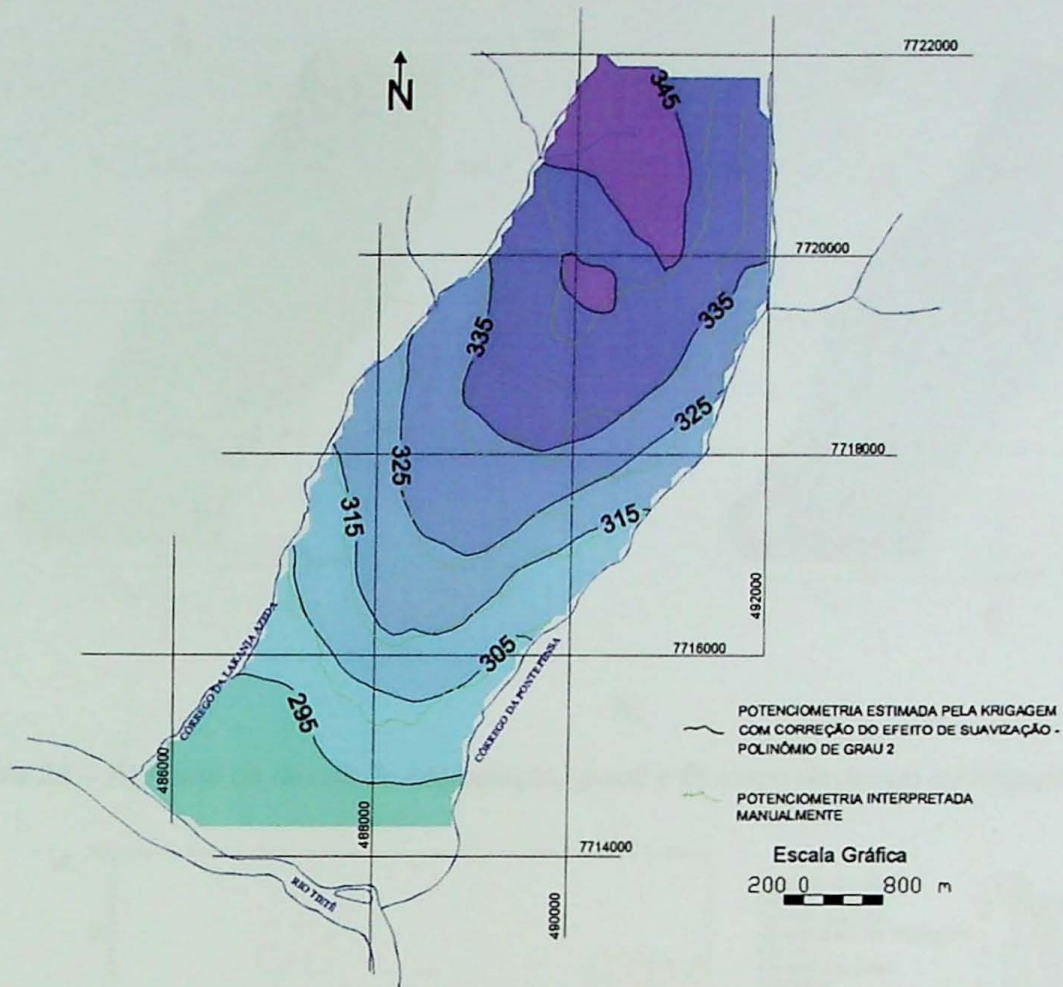
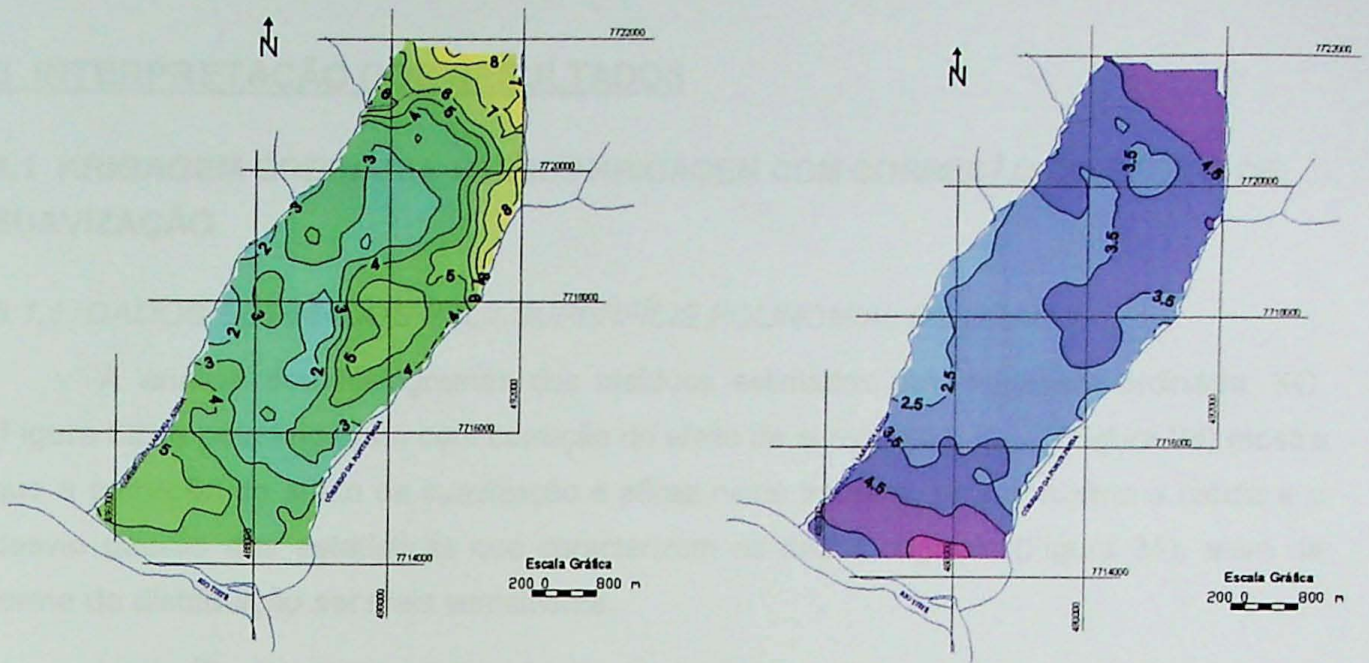


Figura 27 - Mapa potenciométrico estimado pela krigagem com correção do efeito de suavização, polinômio de grau 2.

A Figura 28 A e B apresenta os mapas de desvio de interpolação e de desvio krigagem dos pontos estimados.

Os valores potenciométricos estimados pela krigagem ordinária e pela krigagem com correção do efeito de suavização, através da superfície polinomial de grau 2, apresentam os seguintes histogramas e estatísticas descritivas (Figuras 29 e 30, respectivamente).



A)

B)

Figura 28 – A) Mapa de desvio de interpolação, grau2 e B) mapa de desvio de krigagem, grau2.

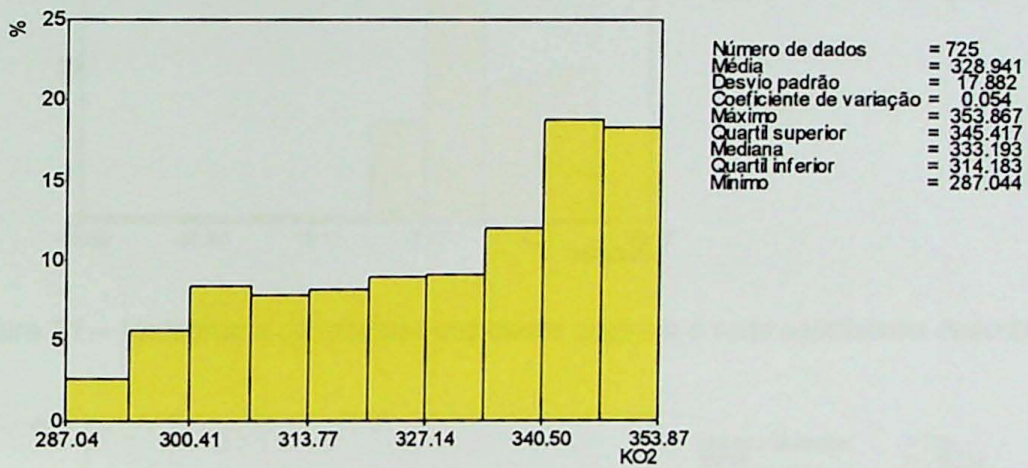


Figura 29 - Histograma e estatísticas descritivas da potenciometria obtidos pela KO, polinômio de grau 2.

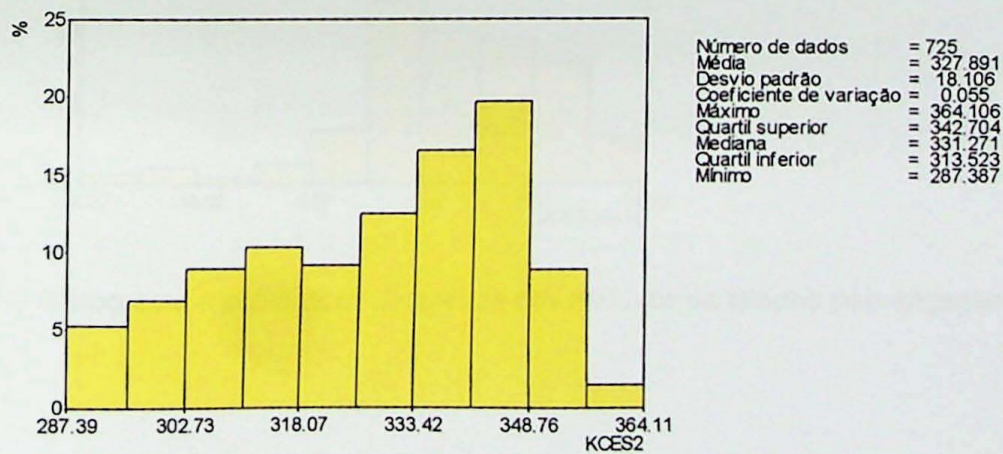


Figura 30 - Histograma e estatísticas descritivas da potenciometria obtidos pela KCES, polinômio de grau 2.

8 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

8.1 KRIGAGEM ORDINÁRIA VERSUS KRIGAGEM COM CORREÇÃO DO EFEITO DE SUAUIZAÇÃO

8.1.1 DADOS ESTIMADOS PELA SUPERFÍCIE POLINOMIAL DE GRAU 1

A análise dos histogramas dos resíduos estimados pela krigagem ordinária, KO, (Figura 32) e pela krigagem com correção do efeito de suavização, K_{CES}, (Figura 33) mostra que a correção do efeito de suavização é eficaz neste trabalho, pois aproxima a média e o desvio padrão das estatísticas que caracterizam os dados originais (Figura 31), além da forma da distribuição ser mais semelhante.

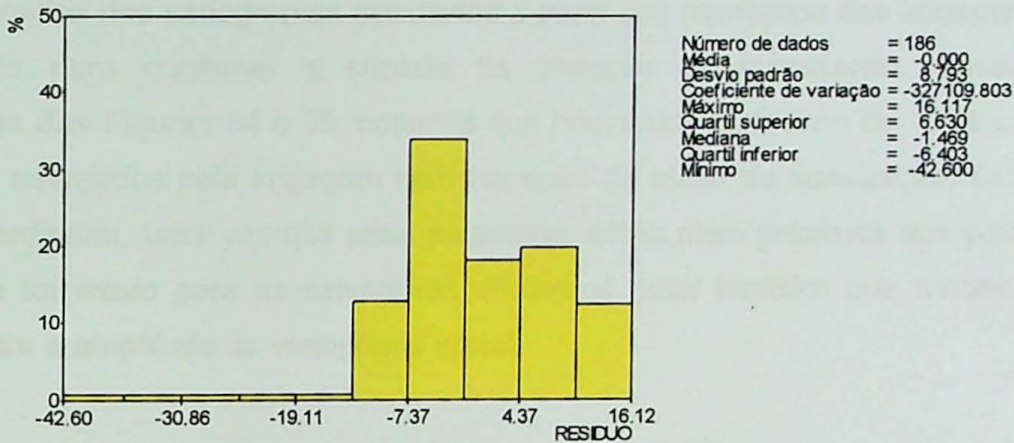


Figura 31 – Histograma de resíduos dos dados originais e suas estatísticas descritivas.

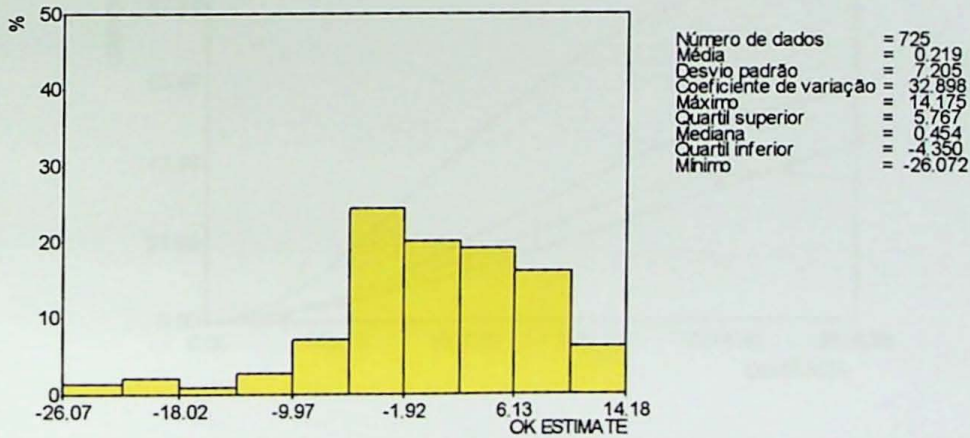


Figura 32 – Histograma e estatísticas descritivas dos resíduos estimados pela krigagem ordinária.

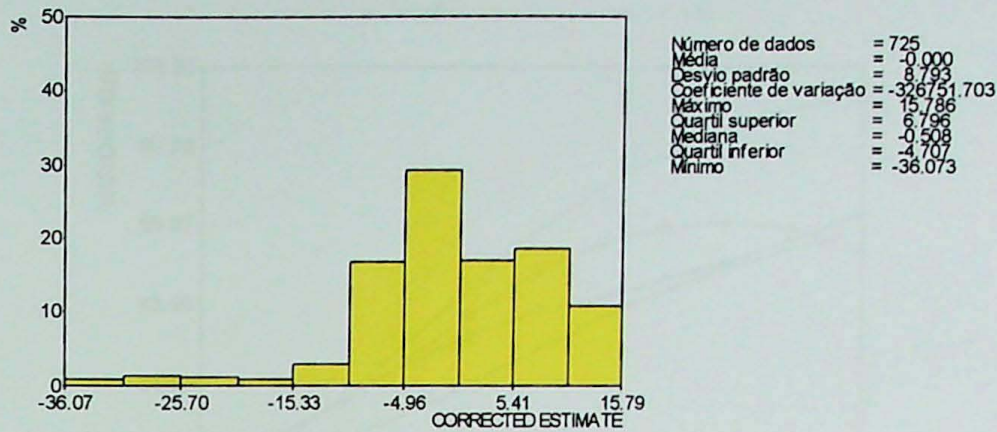


Figura 33 – Histograma e estatísticas descritivas dos resíduos estimados pela krigagem com correção do efeito de suavização.

A análise dos variogramas calculados a partir dos resultados das krigagens também foi utilizada para confirmar a eficácia da correção da suavização. Observando os variogramas das Figuras 34 e 35, notamos que houve um acréscimo de variância espacial nos dados estimados pela krigagem com correção do efeito de suavização, em relação à krigagem ordinária, uma vez que seus patamares estão mais próximos aos patamares do variograma fornecido para as estimativas. Podemos notar também que ambas krigagens reproduziram a amplitude do variograma inicial.

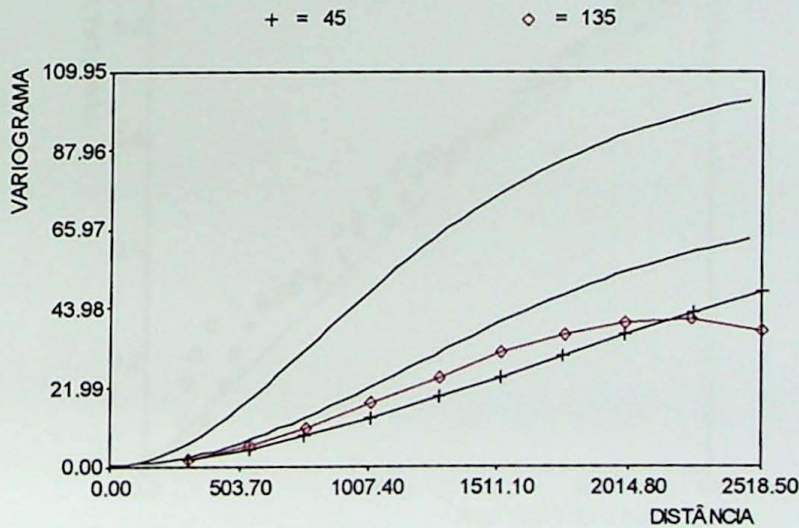


Figura 34 – Variograma calculado a partir dos dados resultantes da krigagem ordinária. A linha cheia representa o ajuste do variograma de entrada da krigagem.

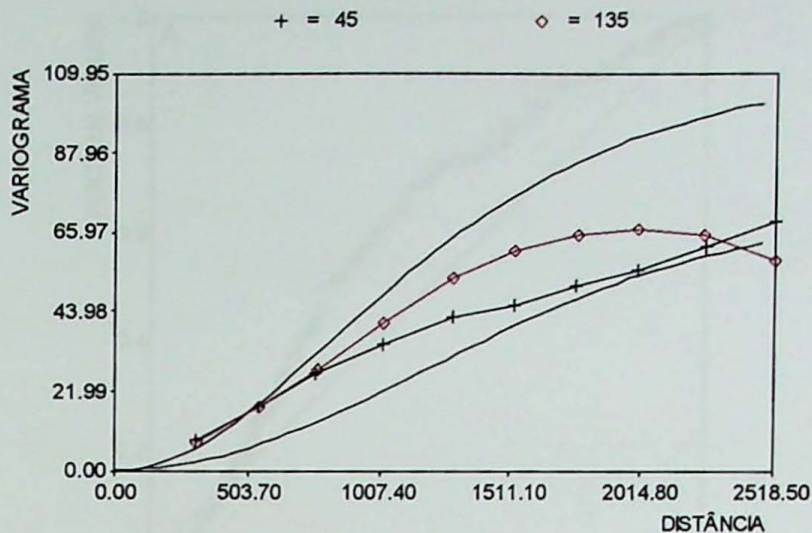


Figura 35 – Variograma calculado a partir dos dados resultantes da krigagem com correção do efeito de suavização. A linha cheia representa o ajuste do variograma de entrada da krigagem.

Pelas Figuras 36 e 37, que correspondem respectivamente, aos diagramas PP dos dados residuais e dos dados finais de potenciometria, podemos observar novamente que a krigagem com correção do efeito de suavização foi mais eficaz na reprodução dos valores originais.

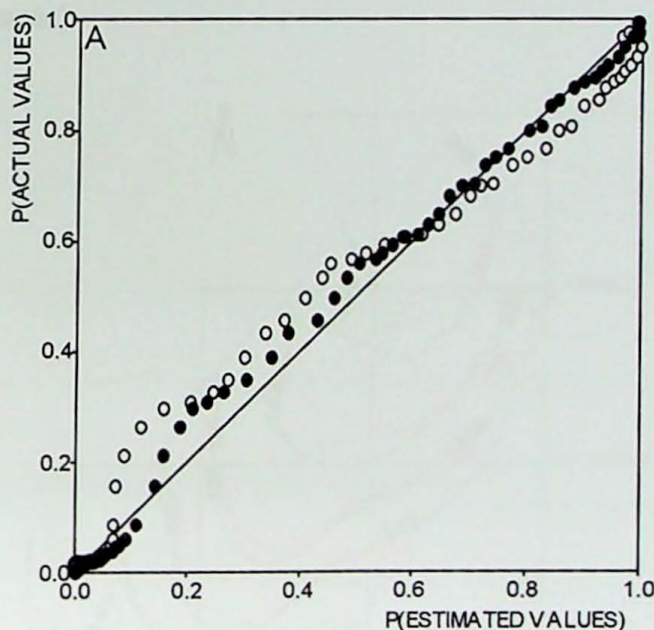


Figura 36 – Diagrama P-P, os pontos cheios representam os valores de resíduos estimados pela K_{CES} e pontos vazios os valores residuais estimados pela K_O .

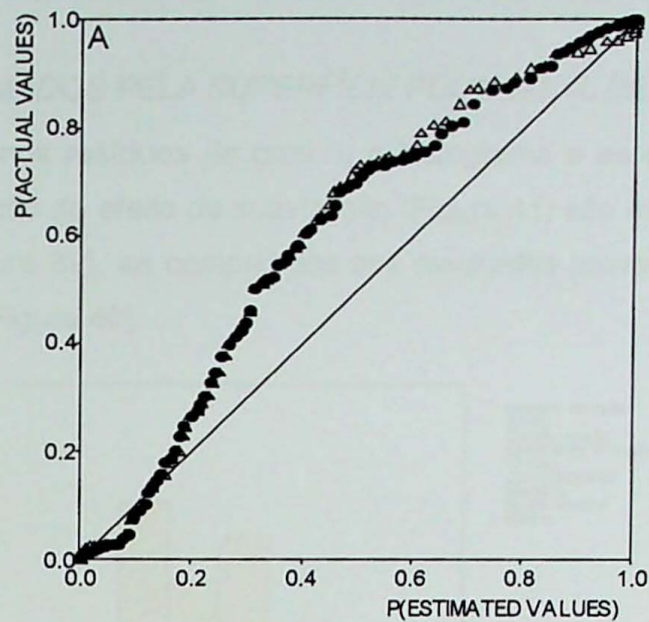


Figura 37 – Diagrama P-P, os pontos cheios representam os valores de potenciometria estimados pela K_{CES} e os triângulos vazios os valores estimados pela KO.

Observando-se as curvas potenciométricas obtidas pelos métodos de krigagem e a curva elaborada manualmente (Figura 38), a krigagem com correção do efeito de suavização é a que mais se aproxima da configuração regional do aquífero (curva interpretada manualmente).

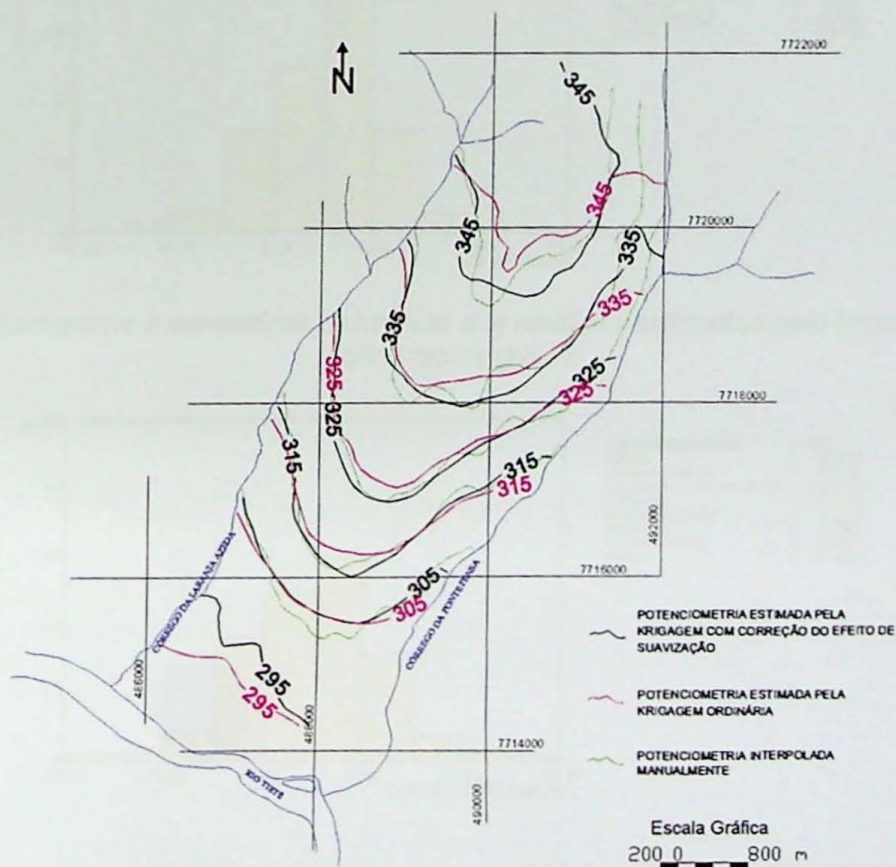


Figura 38 – Mapa potenciométrico com curvas obtidas manualmente, pela krigagem com correção do efeito de suavização e pela krigagem ordinária.

8.1.2 DADOS ESTIMADOS PELA SUPERFÍCIE POLINOMIAL DE GRAU 2

Assim como nos resíduos de grau 1, o histograma e as estatísticas descritivas da krigagem com correção do efeito de suavização (Figura 41) são mais próximos àqueles dos dados originais (Figura 39), se comparados aos resultados provenientes da estimativa por krigagem ordinária (Figura 40).

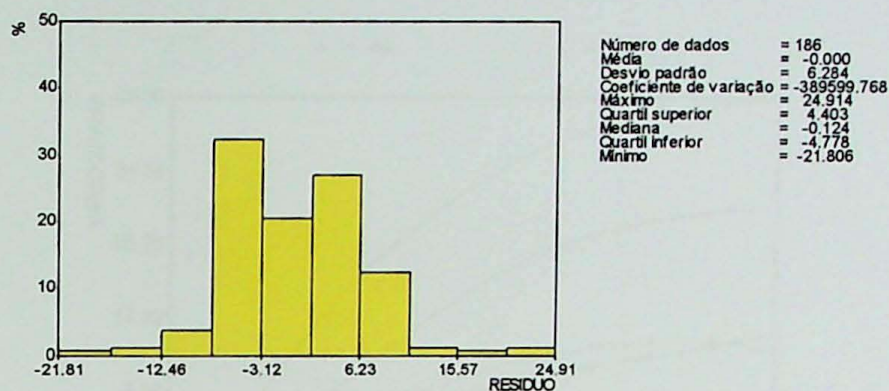


Figura 39 - Histograma de resíduos dos dados originais e suas estatísticas descritivas, polinômio de grau 2.

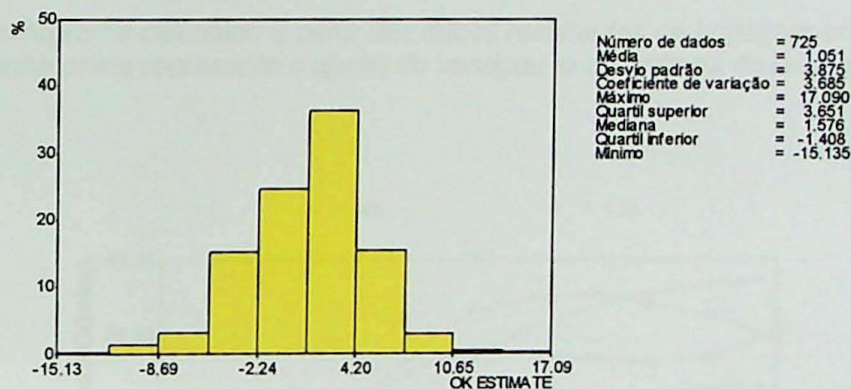


Figura 40 – Histograma e estatísticas descritivas dos resíduos estimados pela krigagem ordinária, polinômio de grau 2.

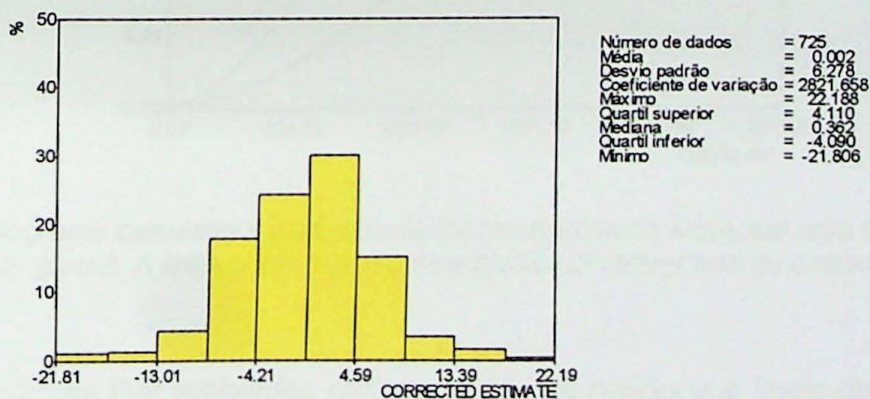


Figura 41 – Histograma e estatísticas descritivas dos resíduos estimados pela krigagem com correção do efeito de suavização, polinômio de grau 2.

Os variogramas calculados com os valores estimados pela KO e pela K_{CES} , polinômio de grau 2, também confirmam a eficácia da correção do efeito de suavização, pois os patamares apresentados pelo variograma da krigagem corrigida (Figura 42) estão mais próximos aos patamares do variograma calculado a partir dos dados originais, se comparados aos patamares da krigagem ordinária (Figura 41). Entretanto, os variogramas resultantes das estimativas não reproduzem adequadamente a amplitude do variograma inicial.

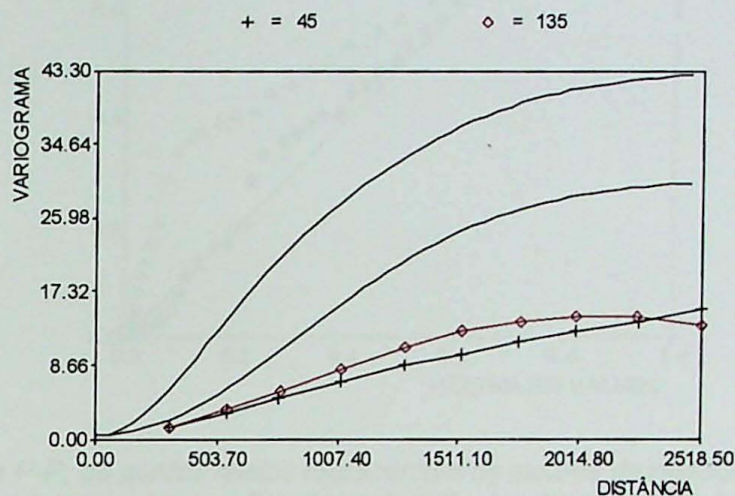


Figura 42 – Variograma calculado a partir dos dados resultantes da krigagem ordinária, grau 2. A linha cheia representa o ajuste do variograma de entrada da krigagem.

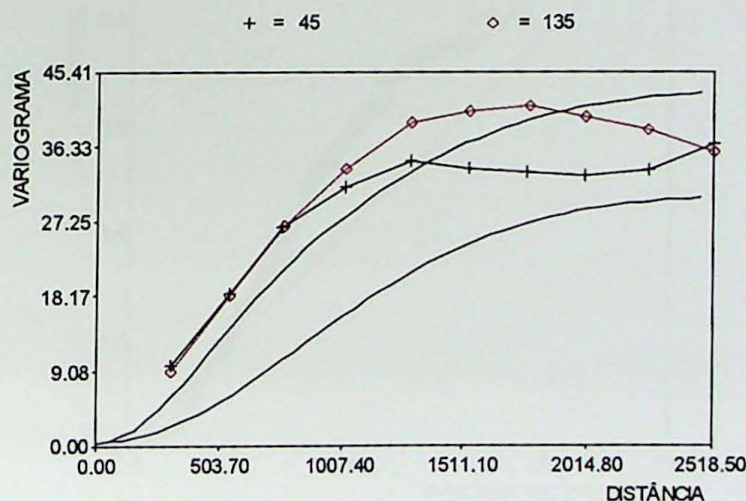


Figura 43 - Variograma calculado a partir dos dados resultantes da krigagem com correção do efeito de suavização, grau 2. A linha cheia representa o ajuste do variograma de entrada da krigagem.

Os diagramas P-P realizados com os dados de resíduos e finais de potenciometria, Figuras 44 e 45 respectivamente, obtidos através do polinômio de grau 2, mostram que os pontos estimados pela K_{CES} (pontos cheios) estão mais próximos da reta bissetriz, que

representa os dados originais, confirmando que a melhor estimativa foi aquela obtida pela K_{CES} .

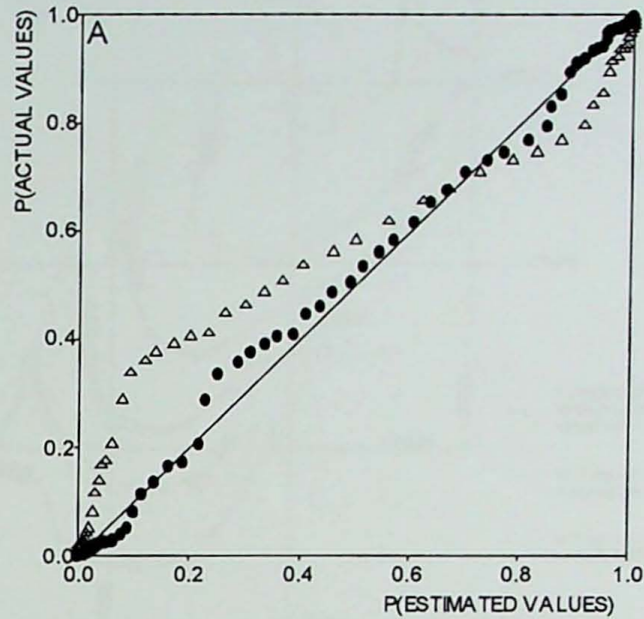


Figura 44 – Diagrama P-P, os pontos cheios representam os valores de resíduos estimados pela K_{CES} e os triângulos os valores estimados pela KO, através do polinômio de grau 2.

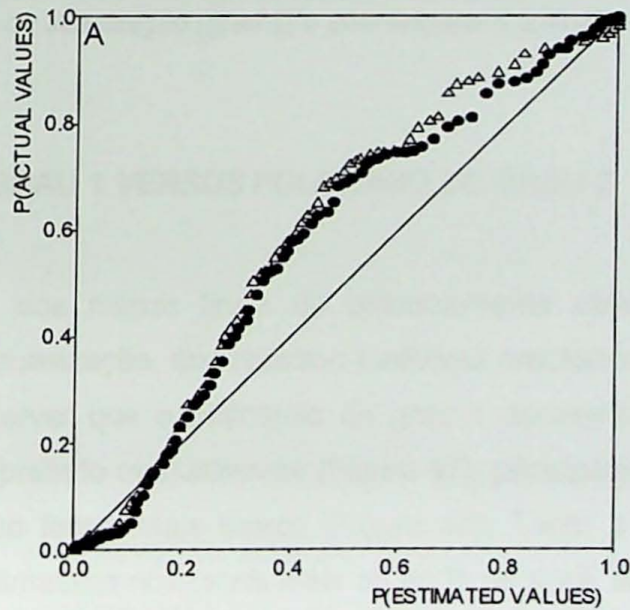


Figura 45 – Diagrama P-P, os pontos cheios representam os valores finais de potenciometria estimados pela K_{CES} e os triângulos os valores estimados pela KO, através do polinômio de grau 2.

As curvas potenciométricas obtidas pela KO e pela K_{CES} utilizando o polinômio de grau 2, em geral são parecidas (Figura 46). Contudo, nos locais mais próximos aos córregos, onde o número de informações originais é grande, as curvas que representam a krigagem corrigida estão mais próximas às curvas interpretadas manualmente.

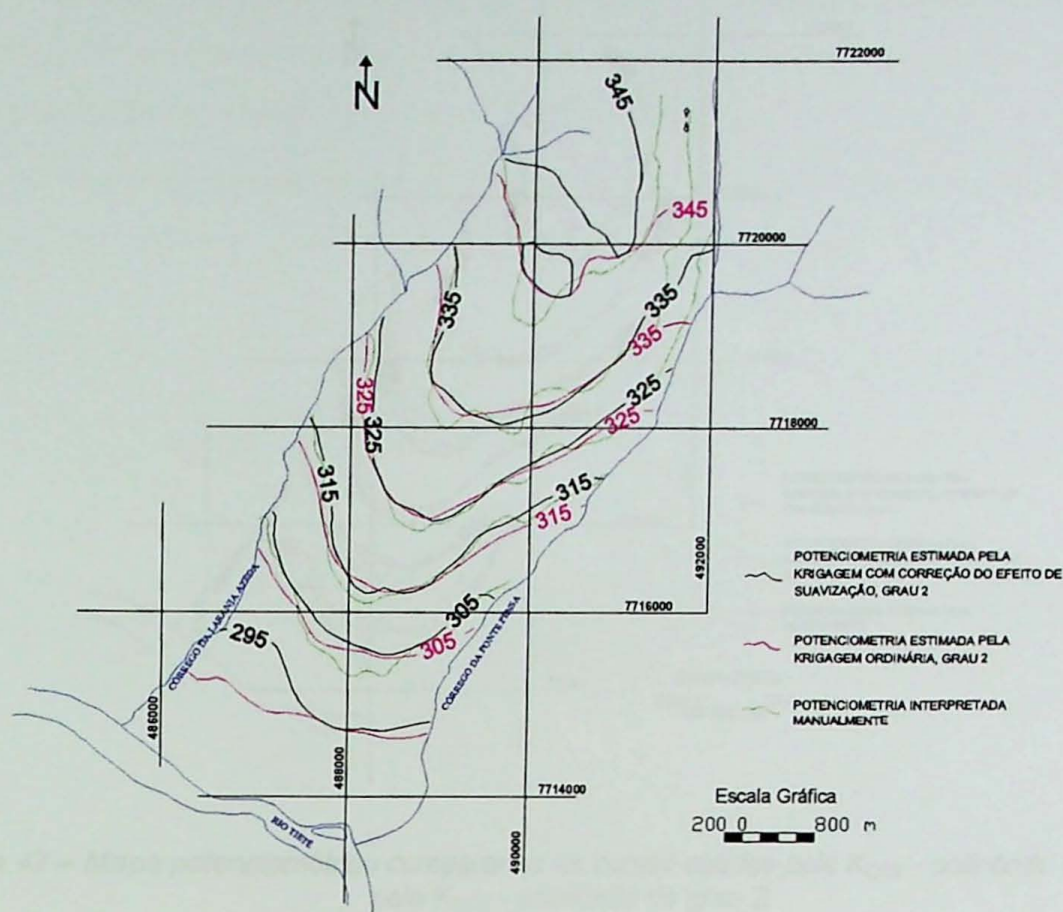
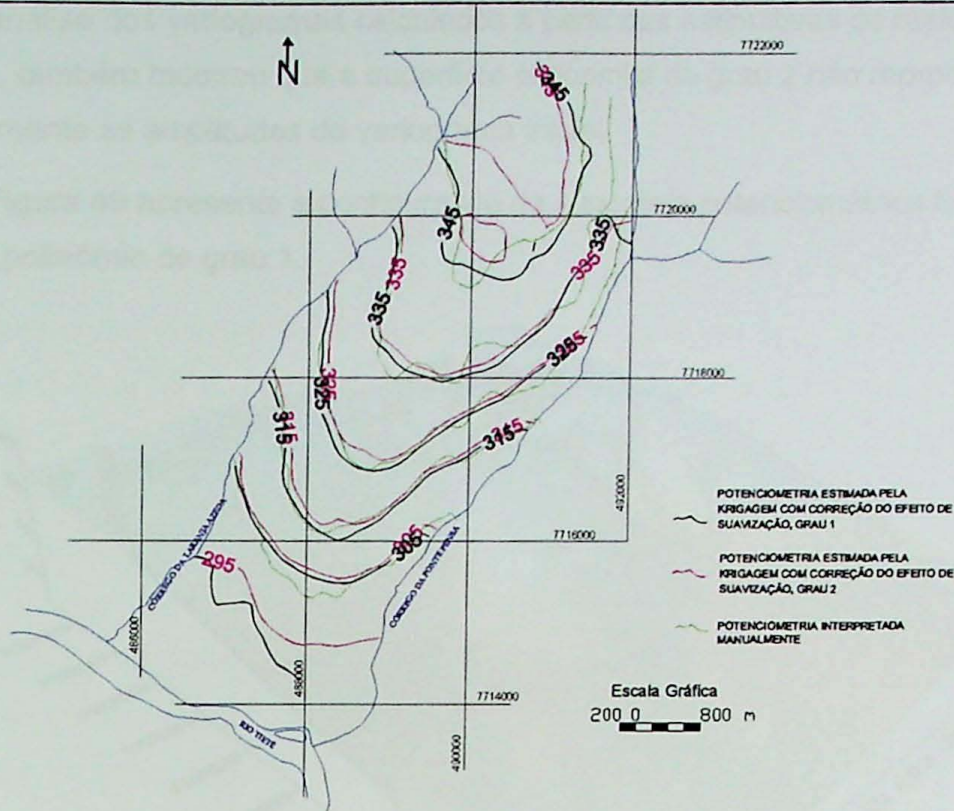


Figura 46 – Mapa potenciométrico com curvas obtidas manualmente, pela krigagem com correção do efeito de suavização (grau 2) e pela krigagem ordinária (grau 2).

8.2 POLINÔMIO DE GRAU 1 VERSUS POLINÔMIO DE GRAU 2

A comparação dos mapas finais de potenciometria obtidos pela krigagem com correção do efeito de suavização, que mostrou melhores resultados em relação à krigagem ordinária, permite observar que o polinômio de grau 1 apresenta curvas mais próximas àquelas do mapa interpretado manualmente (Figura 47), principalmente nos locais onde os desvios de interpolação foram mais baixos (Figura 48). Tanto a KO quanto a K_{CES} não apresentaram boas estimativas nos locais mais ao norte da área, devido o baixo número de amostras.



A análise dos variogramas calculados a partir das estimativas de resíduos por KO e por K_{CES} , também mostrou que a superfície polinomial de grau 2 não reproduziu adequadamente as amplitudes do variograma inicial.

A Figura 49 apresenta a configuração da superfície potenciométrica final, estimada pela K_{CES} , polinômio de grau 1.

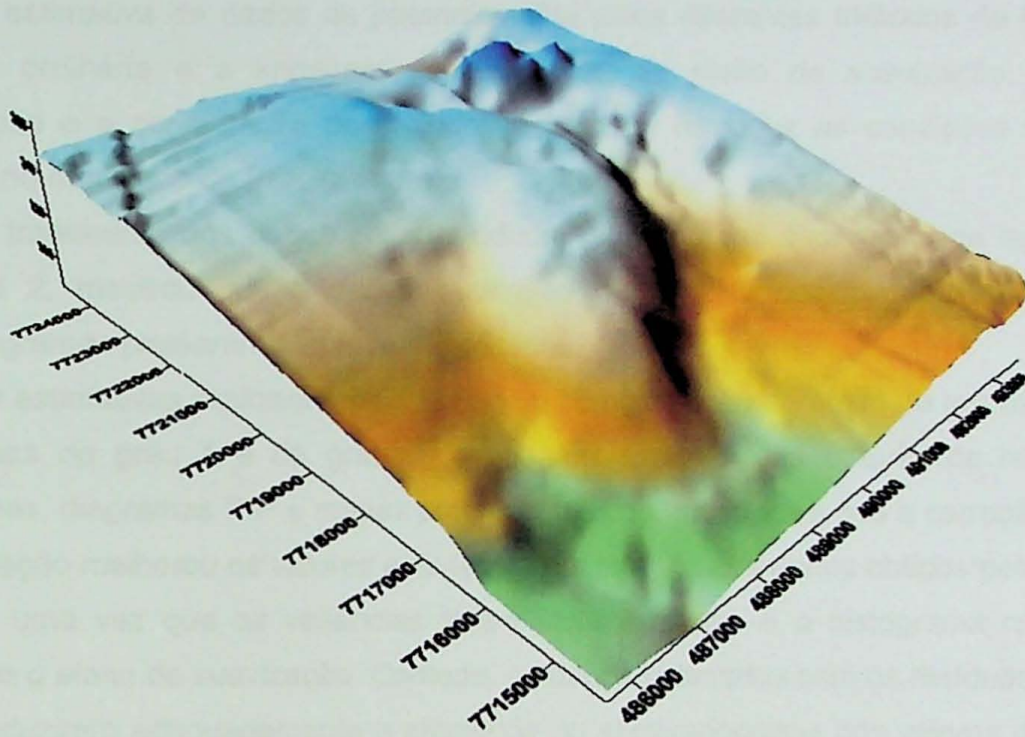


Figura 49 – Superfície potenciométrica estimada pela K_{CES} , polinômio de grau 1.

9 CONCLUSÕES

A estimativa de dados de potenciometria pelos diferentes métodos de krigagem: a krigagem ordinária e a krigagem com correção do efeito de suavização, permitiu a comparação e a constatação do método que melhor reproduz as condições naturais do aquífero, no município de Pereira Barreto.

O tratamento dos dados pelos resíduos, retirados das superfícies de tendência de grau 1 e 2, mostrou que a deriva tratava-se de uma tendência regional, já que os semivariogramas passaram a apresentar patamar.

As estimativas realizadas pela krigagem com correção do efeito de suavização, com os resíduos de grau 1 e de grau 2, e que foram analisadas através de histogramas, variogramas, diagramas P-P e mapas potenciométricos, mostraram que a correção do efeito de suavização melhorou os valores estimados, em relação aos dados obtidos pela krigagem ordinária, uma vez que as variâncias foram incrementadas e o histograma reproduzido, diminuindo o efeito de suavização. Contudo, os dados estimados com os resíduos de grau 2 não reproduziram adequadamente a amplitude no semivariograma dos valores de entrada, para a krigagem com correção do efeito de suavização. No caso da krigagem ordinária estas amplitudes são reproduzidas, porém as variâncias espaciais foram muito baixas destacando o efeito de suavização do método. Deste modo, os resultados obtidos para a superfície de grau 1 foram considerados mais adequados.

Acredita-se que as condições naturais do aquífero, no município de Pereira Barreto foram melhor reproduzidas pela krigagem com correção do efeito de suavização, através dos resíduos polinomiais de grau 1.

Finalizando, o uso da geoestatística possibilita à elaboração de mapas potenciométricos confiáveis, que poderão ser utilizados para os mais diversos fins, como a visualização de áreas suscetíveis à elevação do nível freático, analisando-se diferentes momentos na configuração da potenciometria do aquífero.

10 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barros G. de. 2001. Reavaliação Geoestatística dos Recursos/Reservas de Fosfato da Mina de Cajati, SP. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 108 p.
- Brooker P. I. 1979. Kriging. *Eng. & Min. J.*, **180**(9): 148-153.
- Bubeniceck L. & Haas A. 1969. Method of Calculation of the Iron Ore Reserves in the Lorraine Deposit. In: *The Decade of Digital Computing in the Mineral Industry*. The American Institute of Mining Metallurgical and Petroleum Engineers, New York, pp. 179-210.
- Chilès J. P. & Delfiner P. 1999. *Geostatistics: Modeling Spatial Uncertainty*. Berlin: Wiley-Interscience. 672 p.
- Clark I. 1980. The Semivariogram. In: *Geostatistics*. New York: McGraw Hill. 168 p.
- Companhia Energética do Estado de São Paulo – CESP. 1982a. Perfis de sondagem: SP-01/02 (Estação Elevatória – EE-05, Pereira Barreto; desenho CESP TI-PLR-06-105/AI-0784).
- Companhia Energética do Estado de São Paulo – CESP. 1982b. Perfis de sondagem: SP-05/06 (Estação Elevatória – EE-01, Pereira Barreto; desenho CESP TI-PLR-06-104/AI-0783).
- Companhia Energética do Estado de São Paulo – CESP. 1982d. Canal de Pereira Barreto – instalação dos sistemas de extensômetros de hastes SEE-01 e SEE-02. (Relatório nº CB-5 82).
- Companhia Energética do Estado de São Paulo – CESP. 1988. Perfis de sondagem: IPT-23 / Deep Souding 17 (Cemitério de Pereira Barreto), IPT-24 / Deep Souding 15 (Cemitério de Pereira Barreto), IPT-25 (Santa Casa de Pereira Barreto), IPT-26 (Pátio da Andrade Gutierrez, Pereira Barreto).
- Conde R. P. 2000. Geoestatística Aplicada a Avaliação de Reservas e Controle de Lavra na Mina de Cana Brava (GO). Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 162 p.

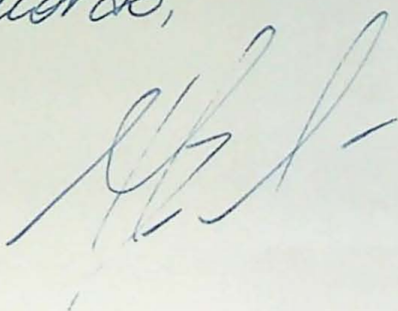
- Deutsch C. V & Journel A. G. 1992. *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. New York: Oxford University Press. 340 p.
- Fernandes L. A. 1992. A Cobertura Cretácea Suprabasáltica no Paraná e Pontal do Paranapanema (SP): os Grupos Bauru e Caiuá. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 129 p.
- Fernandes L. A. 1998. Estratigrafia e Evolução Geológica da Parte Oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil). Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 216 p.
- Fernandes L. A. & Coimbra A. M. 1993. Registros de Episódios Sísmicos na Parte Superior da Formação Rio do Rastro no Paraná, Brasil. In: Simpósio de Geologia do Sudeste, 3. Boletim de Resumos e Breves Comunicações Rio de Janeiro: SBG/UERJ, pp. 271–275.
- Fernandes L. A. & Coimbra A. M. 2000. Revisão Estratigráfica da Parte Oriental da Bacia Bauru. *Revista Brasileira de Geociências*, 30(4): 717-728.
- Geosonda. 1982b. Perfil geológico individual de sondagem: SP-01 a SP-12 (Captação d'água – Pereira Barreto; desenho CESP TI – PLR – 06-093/D – 1830).
- Geosonda. 1987. Perfil geológico individual de sondagem: SP-01 a SP-12, SR-01 a SR-11 e SRM-01 a SRM-45 (Estudo 06 – travessia do rio Tietê-Eixo Laranja Azeda).
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT. 1983. Avaliação do efeito do enchimento do lago da barragem de Três Irmãos sobre o nível piezométrico regional: primeira fase. São Paulo. 2 v. (Relatório nº 18.760).
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT. 1989c. Avaliação do efeito do enchimento do reservatório da barragem de Três Irmãos sobre o nível freático na área da cidade de Pereira Barreto - segunda fase. São Paulo. 2 v. (Relatório nº 27.789).
- Isaacs E. H. & Srivastava R. M. 1989. *Applied Geostatistics*. New York: Oxford University Press. 561 p.

- Journel A. G.; Kyriakidis P. C.; Mao S. 2000. Correcting the Smoothing Effect of Estimators: A Spectral Postprocessor. *Mathematical Geology*, **32**(7): 787-813.
- Kim Y. C 1990. *Introductory Geostatistics an Mine Planning*. Tucson: University of Arizona. 212 p.
- Kitanidis P. K. 1997. *Introduction to Geostatistics – Applications in Hydrogeology*. Cambridge: Cambridge University Press. 249 p.
- Landim P. M. B.; Sturaro J. R. ; Monteiro R. C. 2002. Krigagem Ordinária para Situações com Tendência Regionalizada. Texto Didático 07, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 12 p.
- Leite C. B. B. 2005. Avaliação do Impacto do Reservatório de Três Irmãos sobre a Superfície Potenciométrica do Aquífero Livre na Cidade de Pereira Barreto (SP) – uma Abordagem Numérica e Geoestatística. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 177 p.
- Olea R. A. 1991. *Geostatistical Glossary and Multilingual Dictionary*. New York: Oxford University Press. 177 p.
- Olea R. A. & Pawlowsky V. 1996. Compensating for Estimation Smoothing in Kriging. *Mathematical Geology*, **28**(4): 407-417.
- Pannatier Y. 1994. MS-WINDOWS Programs for Exploratory Variography and Variogram Modeling in 2D. In: *Statistics of Spatial Processes: Theory and Applications*. Bary. Italy.
- Rocha M. M. da. 1999. Estudo Comparativo entre os Métodos Computacionais de Avaliação de Reservas e Controle de Teores da Mina de Capanema, Santa Bárbara, MG. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 78 p.
- Rocha M. M. da. 2004. Análise do Impacto dos Métodos de Amostragem na Reprodução da Textura Geológica com Base em Diferentes Distribuições Estatísticas. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 148 p.

DOAÇÃO
IGC-USP
Data: *24/03/06*

- Royle A. G. 1980. Why Geostatistics? In: *Geostatistics*. New York: McGraw Hill. 168 p.
- Samper F. J. & Carrera J. 1996. *Geoestadística: Aplicaciones a la Hidrología Subterránea*. 2.ed. Barcelona: CIMNE. 484 p.
- Spiegel M. R. 1967. *Estatística*. São Paulo: McGraw Hill. 580 p.
- Yamamoto, J. K. 2000. An Alternative Measure of the Reliability of Ordinary Kriging Estimates. *Mathematical Geology*, **32**(4): 489-509.
- Yamamoto J. K. 2001. *Avaliação e Classificação de Reservas Minerais*. São Paulo: EDUSP, FAPESP, (Coleção Acadêmica, 38). 232 p.
- Yamamoto J. K. 2002. *II Curso de Geoestatística Aplicada*. São Paulo: USP/LIG/ABGE. 76 p.
- Yamamoto J. K. 2005. Correcting the Smoothing Effect of Ordinary Kriging Estimates. *Mathematical Geology*, **37**(1): 69-94.
- Wackernagel, H. 1995. *Multivariate Geostatistics: an Introduction with Applications*. Berlin: Springer. 256 p.

De acordo,



Debera Amato Lourenço

