

HELANO REGIS DA NÓBREGA FONTELES

CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DO SUBSOLO DA PORÇÃO
NORDESTE DO MUNICÍPIO DE FORTALEZA (CE) COM
BASE EM GEOESTATÍSTICA

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Geotecnia.

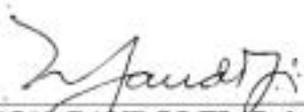
Orientador: Prof. Dr. Nilson Gandolfi

São Carlos
2003

FOLHA DE JULGAMENTO

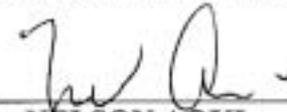
Candidato: Geólogo **HELANO REGIS DA NÓBREGA FONTELES**

Dissertação defendida e julgada em 10-10-2003 perante a Comissão Julgadora:



Prof. Tit. **NILSON GANDOLFI (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado



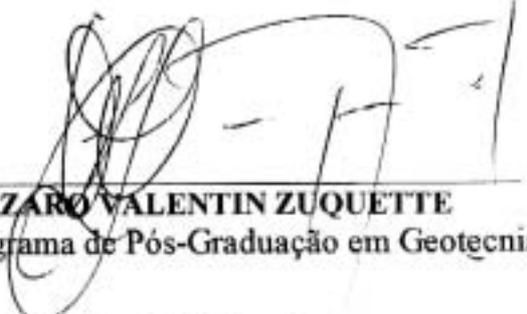
Prof. Dr. **NELSON AOKI**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP)

Aprovado

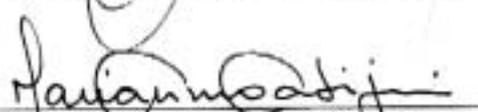


Prof. Tit. **JORGE KAZUO YAMAMOTO**
(Instituto de Geociências/USP)

Aprovado



Prof. Assoc. **LAZARO VALENTIN ZUQUETTE**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Geotecnia



Profa. Assoc. **MARIA DO CARMO CALLJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação da EESC

A todos, que na jornada empreendida para se atingir os objetivos, compreendem que a própria jornada faz parte destes.

AGRADECIMENTOS

Aproveito este espaço para apresentar meus agradecimentos às pessoas e instituições que tornaram possível a realização da presente dissertação. Agradeço:

Ao Pai Celeste, o Onipresente e Onisciente, pelos desafios e obstáculos encontrados no decorrer da minha vida que tanto propiciaram o meu crescimento pessoal e profissional.

À minha família, meus pais terrenos, Antônio Adauto Fonteles Filho e Zélia da Nóbrega Fonteles, por seu amor, carinho, dedicação e apoio incondicionais e; minha irmã Eveline Cinthia da Nóbrega Fonteles, pelo seu carinho e incentivo constantes.

À minha querida tia Maria Auxiliadora Fonteles Curado, mais do que uma tia e amiga, foi o meu anjo da guarda.

À Kaelly Virgínia de O. Saraiva, por seu amor, carinho, companheirismo, incentivo, e pela compreensão infinita nos meus momentos de ausência.

À D. Nina, Kelve e Klívia Saraiva, pelo carinho e apoio constantes no decorrer desta jornada.

Ao Programa de Pós-graduação em Geotecnia da EESC/USP, pela oportunidade oferecida.

Ao meu orientador, Nilson Gandolfi, pela orientação, apoio à proposta de trabalho e a amizade firmada.

Ao Dr. Antônio Nunes de Miranda, diretor técnico da GEONORTE - Engenharia de Solos e Fundações Ltda., pela gentil cessão dos dados de sondagens de simples reconhecimento com SPT e por me acolher nas dependências de sua empresa, dando as condições necessárias para o levantamento dos dados.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos concedida.

Ao Prof. Dr. Nelson Aoki do Departamento de Geotecnia da EESC/USP, pelas discussões sempre frutíferas, pelo incentivo constante e pela amizade construída.

Ao Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto do Instituto de Geociências da USP, pelo apoio, ensinamentos transmitidos e a assessoria prestada nos problemas de modelagem geoestatística.

Ao Prof. Marcelo Monteiro Rocha do Instituto de Geociências da USP, pelas discussões e valiosos conselhos prestados.

Aos geólogos da CPRM - *Residência de Fortaleza*, Jaime Quintas dos Santos Colares e Francisco Edson pelo apoio e ajuda na aquisição da base cartográfica de detalhe de Fortaleza e pelos ensinamentos quanto aos SIG's *ArcView* 3.1, *SPRING* 3.6.02 e *IDRISI32*.

Aos amigos, amigas e colegas do Departamento de Geotecnia, por terem se prestado como uma segunda família para mim, possibilitando a existência de um ambiente harmonioso de convivência e cientificamente bastante produtivo e irreverente.

*“Atinge-se a sabedoria quando suas ações
assemelham-se às da Natureza”*

Autor desconhecido

RESUMO

FONTELES, H.R.N. (2003). *Caracterização geotécnica do subsolo da porção nordeste do Município de Fortaleza (CE) com base em Geoestatística*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

O presente trabalho resulta da aplicação de técnicas geoestatística de análise da variabilidade espacial e de estimativas de dados de sondagem de simples reconhecimento com *Standard Penetration Test* (SPT) objetivando a caracterização geotécnica de uma área com 44km², situada na porção nordeste do Município de Fortaleza (CE). A caracterização geotécnica desta área compreendeu os seguintes processos: montagem de um banco de dados geotécnicos; aplicação de algoritmos de interpolação para elaboração do Modelo Digital de Terreno (MDT); a aplicação de técnicas geoestatísticas de cokrigagem e krigagem ordinária na elaboração do mapa de superfície freática; a construção de um modelo geológico 3D de superfície; o mapeamento de uma superfície do impenetrável ao amostrador do SPT, auxiliado por geoestatística; a modelagem geoestatística 3D dos dados do índice de resistência à penetração (N) do amostrador do SPT, o que possibilitou a estimativa em bancadas por krigagem ordinária de blocos, do referido índice em diversos níveis altimétricos do terreno. Os dados estimados das bancadas foram tratados no programa *ArcView 3.1* em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) na elaboração de mapas de uso sugerido de fundações, os quais derivam de uma reclassificação, com base em diversos limites de impenetrável ao SPT, dos dados estimados de N, que permitiu a identificação de áreas favoráveis ao uso de um número finito de elementos estruturais de fundação.

Palavras-chave: SPT; limites de impenetrável; Geoestatística; krigagem; mapeamento geotécnico; Fortaleza; Sistemas de Informações Geográficas.

ABSTRACT

FONTELES, H.R.N. (2003). *Geotechnical characterization based on geostatistics of a northeastern area on Fortaleza county, northeastern Brazil*. M.Sc. Dissertation. – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.

This work results from the application of geostatistical techniques on Standard Penetration Test (SPT) data to the geotechnical characterisation of an area with 44km² situated on the northeastern region of Fortaleza county, northeastern Brazil. The geotechnical characterization involved the following steps: the geotechnical databank development; the performance of the interpolation algorithms and application to the Digital Elevation Model (DEM); estimation and mapping the water table level with ordinary kriging and cokriging techniques; generation of a 3D surface geological model; geostatistical mapping the SPT maximum hard penetration surface; application of 3D geostatistical modeling techniques to SPT database providing bench estimates on blocks. The SPT estimated data were inserted and reclassified on the Geographical Information System based on the software ESRI *ArcView 3.1* in order to produce the suggested foundation maps with references to SPT penetration limits.

Keywords: SPT, penetration limits, Geostatistics; kriging; geotechnical mapping; Fortaleza; Geographical Information Systems.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

1 – INTRODUÇÃO.....	1
1.1 – CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	1
1.2 – OBJETIVOS.....	3
1.3 – ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	3
2 – FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CONCEITUAL.....	5
2.1 – SONDAgens DE SIMPLES RECONHECIMENTO COM SPT.....	5
2.1.1 – Considerações Iniciais.....	5
2.1.2 – Particularidades Acerca do SPT.....	6
2.1.3 – Equipamentos e Procedimentos de Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento.....	7
2.1.4 – Fatores Influentes no SPT.....	9
2.1.5 – A Utilização do SPT na Engenharia de Fundações.....	10
2.2 – ALGORITMOS DE INTERPOLAÇÃO.....	13
2.2.1 – Considerações Iniciais.....	13
2.2.2 – Análise de Superfícies de Tendência (Regressão Polinomial).....	15
2.2.3 – Triangulação com Interpolação Linear.....	16
2.2.4 – Inverso do Quadrado da Distância (IQD)	17
2.2.5 – Curvatura Mínima.....	18
2.3 – GEOESTATÍSTICA: VARIABILIDADE ESPACIAL E MÉTODOS DE ESTIMATIVA.....	19
2.3.1 – Fundamentos da Teoria das Variáveis Regionalizadas.....	19
2.3.2 – Características Qualitativas das Variáveis Regionalizadas.....	19
2.3.3 – Momentos e Estacionaridade.	20
2.3.4 – Análise Variográfica e Prática de Uso do Semivariograma.....	22
2.3.4.1 – O Semivariograma.....	21
2.3.4.2 – Parâmetros e Características Estruturais do Semivariograma.....	23
2.3.5 – Principais Modelos Variográficos.....	25
2.3.5.1 – Modelos com patamar.....	25
2.3.6 – Procedimentos de Estimativa por Krigagem.....	26
2.3.6.1 – Idéia Geral do Método de Estimativa.....	28
2.3.6.2 – Definição da Vizinhança Local.....	28
2.3.6.3 – Krigagem Ordinária (KO)	29
2.3.6.4 – Cokrigagem (CoK)	34
2.3.6.5 – Validação Cruzada.....	36
2.4 – Exemplos de Aplicação da Geoestatística no Mapeamento Geotécnico.....	36

3 – METODOLOGIA DE TRABALHO.....	44
3.1 – MÉTODO DE EXECUÇÃO DO TRABALHO.....	44
3.2 – MATERIAIS UTILIZADOS.....	46
3.2.1 – Bases Cartográficas.....	46
3.2.2 – Dados Geotécnicos Utilizados.....	46
3.3 – PREPARAÇÃO DO BANCO DE DADOS GEOTÉCNICOS.....	47
3.4 – PROGRAMAS COMPUTACIONAS UTILIZADOS.....	48
4 – CARACTERIZAÇÃO GERAL DE FORTALEZA.....	50
4.1 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	50
4.2 – ASPECTOS CLIMÁTICOS.....	50
4.3 – CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO.....	52
4.4 – CONTEXTO GEOLÓGICO.....	54
4.4.1 – Formação Barreiras.....	54
4.4.2 – Paleodunas.....	55
4.4.3 – Sedimentos Aluvionares.....	55
4.4.4 – Dunas.....	56
4.5 – CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA BÁSICA DE FORTALEZA.....	56
4.5.1 – Mapeamento Geotécnico Preliminar.....	56
4.5.2 – Prática de Fundações em Fortaleza.....	61
5 – RESULTADOS: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO.....	63
5.1 – MODELAGEM DIGITAL DE TERRENO.....	63
5.1.1 – Considerações Gerais.....	63
5.1.2 – Aplicação dos Algoritmos de Interpolação.....	64
5.1.2.1 – Análise de Superfícies de Tendência (Regressão Polinomial).....	64
5.1.2.2 – Triangulação com Interpolação Linear.....	65
5.1.2.3 – Inverso do Quadrado da Distância (IQD)	65
5.1.2.4 – Curvatura Mínima.....	66
5.1.2.5 – Krigagem Ordinária (KO)	68
5.1.3 – Análises Estatísticas Univariada e Multivariada.....	72
5.1.3.1 – Estatísticas Descritivas.....	72
5.1.3.3 – Análise de Correlação por Regressão.....	73
5.1.3.3 – Análise de Agrupamentos.....	76
5.1.4 – Discussão dos Resultados.....	77
5.2 – ESTIMATIVA DAS COTAS ALTIMÉTRICAS DO NÍVEL FREÁTICO.....	79
5.2.1 – Análise Estatística.....	79
5.2.1.1 – Estatísticas Descritivas.....	79
5.2.1.2 – Análise de Correlação por Regressão.....	80
5.2.2 – Avaliação Geoestatística.....	82
5.2.2.1 – Análise Variográfica Exploratória.....	82
5.2.2.2 – Estimativa por Krigagem Ordinária.....	84
5.2.2.3 – Estimativa por Cokrigagem Ordinária.....	86
5.2.2.4 – Discussão dos Resultados.....	87
5.3 – MODELO GEOLÓGICO DA ÁREA.....	91
5.3.1 – Modelo Geológico 3D de Superfície.....	91
5.3.2 – Mapeamento da Superfície Impenetrável ao SPT.....	94
5.4 – MODELAGEM GEOESTATÍSTICA TRIDIMENSIONAL.....	99
5.4.1 – Análise Estatística dos Dados de N do SPT.....	99
5.4.2 – Regularização dos Dados das Sondagens com SPT.....	101

5.4.3 - Análise Variográfica 3D dos Dados de N Regularizados.....	105
5.4.4 - Krigagem Ordinária 3D: O Modelo de "Jazida de N _{SPT} "	109
5.4.5 - Discussão dos Resultados.....	110
5.5 - MAPAS DE USO SUGERIDO DE FUNDAÇÕES.....	111
6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	121
6.1 - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	121
6.2 - CONCLUSÕES.....	123
6.3 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	125
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	127

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A Geoestatística ficou conhecida como um conjunto de métodos de estatística matemática caracterizado pela aplicação da, então, *Teoria das Variáveis Regionalizadas* concebida e desenvolvida pelo engenheiro politécnico Georges Matheron durante o período de 1957 a 1965, constituindo avançada abordagem matemática dos fenômenos naturais. Esta ciência, relativamente nova, desenvolveu-se a partir de trabalhos de mineração, do dimensionamento de jazidas e da estimativa e cálculo das reservas (VALENTE, 1989).

Os métodos de estimativas conhecidos genericamente por *Krigagem* ou *Krigeagem* foram desenvolvidos nos trabalhos estatísticos, pioneiros, do engenheiro de minas D.G. Krige e do estatístico H. S. Sichel nas minas de ouro de Witwatersrand (entre 1947 e 1960), bem como os de Wijs (1952/53), prospectando e explotando jazidas uraníferas, ambas situadas na África do Sul. O trabalho de G. Matheron foi fortemente influenciado pelas novas técnicas de estimativa por krigagem na consolidação da nova teoria (GUERRA, 1988).

Estimar, na Geoestatística, significa aplicar um algoritmo denominado *krigagem* com o qual é possível conhecer o valor de uma variável em uma posição não-amostrada, bem como obter medidas de erro e incertezas associadas (ROYLE, 1979). Atualmente duas medidas de variância de estimação podem ser utilizadas: a variância de krigagem ordinária (σ^2_{KO}) e a variância de interpolação (S^2) de YAMAMOTO (2000). Segundo este autor, esta última apresenta duas vantagens: os valores calculados são independentes dos seus posicionamentos e a possibilidade de constatação de efeito proporcional eventual existente.

A Geoestatística, enquanto ferramenta de investigação, parte de uma premissa básica da estatística clássica: são selecionadas amostras representativas de um todo, pois, teoricamente, não é possível conhecê-lo completamente devido às limitações dos métodos de análise e de custos operacionais. Os trabalhos de mapeamento geotécnico, de modo geral, são sustentados por esta premissa, também. Pode-se entender como um

“todo”, no processo de mapeamento geotécnico, por exemplo, uma área geográfica de dimensões estabelecidas onde a coleta de amostras de materiais inconsolidados é necessária para ensaios laboratoriais e sua interpretação culminando na geração de um mapa de materiais inconsolidados.

No caso de trabalho de investigação de áreas contaminadas, uma malha regular ou irregular de amostragem pode ser definida e implantada, visando a coleta de amostras de água e/ou solo para análise laboratorial, fornecendo dados a serem analisados segundo um método e a partir disso se obter as informações de interesse. Neste exemplo particular, a Geoestatística, além de se apresentar como uma ferramenta preditiva, poderá também ser orientativa no que diz respeito à geometria da malha de amostragem (MARANHÃO, 1989; HOULDING, 1994).

O trabalho de SANEJOUAND (1972), que resulta de uma compilação de várias cartas geotécnicas elaboradas na França, menciona a utilização de métodos matemáticos no tratamento de dados geotécnicos, citando a Análise por Superfícies de Tendência, técnica de modelagem bastante utilizada na décadas de 60 e 70 e as técnicas geoestatísticas de krigagem.

DEVEUGHELE & POLATERA (1979) apresentam um estudo geoestatístico tomando, como base de dados, as sondagens realizadas no calcário Marno na região de Saint Ouen em Paris. Para o mapeamento da superfície de topo do calcário, os autores aplicaram técnicas de variografia exploratória e da krigagem universal. De modo semelhante, ROSENBAUM (1987), utilizou técnicas de análise variográfica e de krigagem ordinária em dados de sondagem para estimar as espessuras das camadas Woolwich e Red da bacia sedimentar do Tâmesa em Londres.

Na elaboração de cartas geotécnicas, as sondagens vêm sendo utilizadas na obtenção de dados básicos do subsolo. A partir delas, pode-se extrair amostras e as mais diversas informações, tais como: composição textural dos solos (descrição tátil-visual), a profundidade do nível freático, além da realização de ensaios mecânicos com a obtenção do índice de resistência à penetração de um amostrador padronizado (*Standard Penetration Test* - SPT) quando em sondagens de simples reconhecimento. Exemplos da utilização de dados deste tipo de sondagem são representados pelos trabalhos de MACKEAN & ROSENBAUM (1990), STURARO (1994), XAVIER (1999) e TALAMINI NETO (2002).

1.2 - OBJETIVOS

Para o desenvolvimento do presente trabalho, o objetivo principal, estabelecido, foi o de avaliação da aplicabilidade de técnicas geoestatísticas de dados obtidos em sondagens de simples reconhecimento com SPT em uma área pertencente à porção nordeste do Município de Fortaleza, Ceará.

Decorrente deste objetivo maior, tentou-se buscar uma aplicação dos resultados, obtidos com a geoestatística, à construção de documentos cartográficos nos quais seja possível identificar áreas favoráveis ou com certa vocação à utilização de um número de elementos estruturais de fundação, baseado na interpretação dos valores de N^1 do SPT estimados, como limites de resistência do solo a um determinado elemento estrutural.

1.3 - ORGANIZAÇÃO E ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho está organizado nos seguintes capítulos restantes:

- No CAPÍTULO 2 - Fundamentação Teórica e Conceitual consta uma síntese expositiva do *Standard Penetration Test (SPT)*, na qual são descritos os equipamentos, os procedimentos de execução do ensaio, os fatores influentes nos valores de N e é relatado o emprego do SPT na Engenharia de Fundações brasileira. Como forma de subsidiar a construção do Modelo Digital de Terreno (MDT), os aspectos teóricos dos algoritmos de interpolação utilizados são apresentados. As bases teóricas e conceituais da Teoria das Variáveis Regionalizadas são expostas, bem como os procedimentos de análise variográfica exploratória, as técnicas de estimativa por Krigagem Ordinária e Cokrigagem. Como fechamento, é apresentado um breve relato de trabalhos, como exemplos de aplicação da Geoestatística no Mapeamento Geotécnico.

- No CAPÍTULO 3 - Metodologia de Trabalho, são listados os materiais (relatórios de sondagem e as bases cartográficas) e os programas utilizados na execução do trabalho; se expõe a estratégia de levantamento dos dados, a organização e gerenciamento destes através de um banco de dados elaborado no aplicativo *Microsoft® Access97* e como este forneceu as bases de dados utilizadas nas análises.

¹ Número de golpes necessários à cravação do amostrador padronizado no solo.

- No CAPÍTULO 4 - Caracterização Geral de Fortaleza, os aspectos climáticos, geomorfológicos, geológicos e geotécnicos da capital cearense são brevemente relatados.
- O CAPÍTULO 5 - Resultados: Apresentação e Discussão é constituído pelos produtos das análises empreendidas e pela discussão das informações e produtos cartográficos gerados. O Modelo Digital de Terreno (MDT) da área de pesquisa é apresentado, considerando os testes realizados com alguns algoritmos de interpolação e a seleção do algoritmo mais adequado na elaboração do MDT; escolha é reforçada pela interpretação dos resultados das análises estatísticas univariada e multivariada. A previsão de valores do nível freático por cokrigagem ordinária é apresentada e confrontada com os resultados de krigagem ordinária. A integração do MDT à interpretação dos dados geológicos é sintetizada por um modelo geológico 3D de superfície da área de estudo. Com uso da abordagem da krigagem ordinária de blocos, um modelo geoestatístico de uma “jazida de N do SPT” foi elaborado a partir da regularização dos dados das sondagens. Este capítulo é finalizado com a apresentação dos mapas de uso sugerido de fundações.
- No CAPÍTULO 6 - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros, são apontadas as considerações finais concernentes aos objetivos propostos inicialmente e aos resultados alcançados, bem como sugestões para trabalhos na linha de estudo e aplicação da geoestatística ao mapeamento geotécnico.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA E CONCEITUAL

2.1 - SONDAGENS DE SIMPLES RECONHECIMENTO COM SPT

2.1.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

As sondagens de simples reconhecimento se constituem de instrumento básico de investigação dos solos em Geologia de Engenharia e em Engenharia de Fundações. Sua simplicidade de execução e baixo custo associado são os principais atrativos para sua ampla utilização por parte de empresas de Geotecnia no Brasil, assim como em trabalhos acadêmicos. Neste tipo de sondagem é possível se obter uma classificação expedita dos solos amostrados por exame tátil-visual; uma caracterização da compacidade/consistência dos solos; um perfil estratigráfico; a profundidade do nível d'água no momento da execução da sondagem e; amostras para análises (QUARESMA *et al.*, 1998).

Os procedimentos de execução de sondagens a trado são padronizados segundo a norma NBR 9603 da ABNT. Segundo esta norma, o equipamento é constituído por hastes metálicas e por um amostrador que pode apresentar uma geometria convexa (trado concha) com uma abertura composta por lâminas cortantes ou por uma peça de geometria helicoidal.

O *Standard Penetration Test (SPT)*¹ ou ensaio de penetração padronizado é caracterizado pela cravação dinâmica de um amostrador com ponta em sapata cortante. O ensaio normalmente é executado concomitantemente ao avanço por trado a cada metro perfurado. O SPT foi desenvolvido para aquisição em campo de uma medida local de resistência do solo (N). Além da tomada desta medida, amostras podem ser coletadas. Conforme a norma NBR 6484 da ABNT, a amostragem é realizada a cada metro, bem como anotação do N. Eventualmente, o ensaio pode ser realizado em um intervalo menor ou maior, ficando a critério das necessidades do executante.

¹ Daqui em diante utilizar-se-á a abreviação "SPT" como referência ao ensaio de penetração padronizado.

Atualmente algumas empresas vêm utilizando, também, a medida de torque (SPT-T) para a obtenção de um parâmetro geotécnico indicativo da adesividade do solo às paredes do amostrador. Segundo QUARESMA *et al.* (1998), há uma tendência de substituição do SPT pelo SPT-T, devido ao maior número de parâmetros obtidos.

A aplicação foi apresentada primordialmente por RANZINE (1988) e incrementada posteriormente por RANZINE (1994) e ALONSO (1994). DÉCOURT (1998) apresenta uma ampla discussão a respeito das vantagens do SPT-T, da aplicabilidade e do significado dos resultados.

2.1.2 – PARTICULARIDADES ACERCA DO SPT

Segundo BELICANTA (1998), no final do século XIX, os meios de investigação dos solos se restringiam à abertura de poços, escavações de grande porte e à perfuração por circulação de água. Este último método apresentava claramente a sua ineficiência para o fim a que se destinava, como relatado por TERZAGHI & PECK (1962).

FLETCHER (1965 *apud* BELICANTA, 1998) e BROMS (1988 *apud* BELICANTA, *op. cit.*) relatam que Charles R. Gow havia desenvolvido um novo procedimento de sondagem que é caracterizado pela cravação de tubo de diâmetro interno nominal de 25,4mm por força de queda livre de um martelo, favorecendo a coleta de amostras de solo.

Em 1927, a Raymond Concrete Pile Co., juntamente com a The Gow Co. desenvolvem um amostrador bipartido com cabeça, corpo e sapata biselada com diâmetro externo de 51mm e diâmetro interno de 31, sendo estas medidas válidas também para a sapata (BELINCANTA, *op. cit.*). De acordo com TEXEIRA (1977 *apud* BELICANTA & CINTRA, 1998), o critério de cravação inicial de 15cm do comprimento do amostrador do tipo “Raymond” e de contagem do número de golpes para a cravação de 30cm restantes é creditado a H.A. Mohr. O critério do número de golpes passou ser utilizado como um índice de resistência à penetração dinâmica.

TERZAGHI & PECK (1962) fazem menção ao número de golpes contados na cravação de 30cm do amostrador como um método de avaliação do grau de compactidade dos solos. O procedimento de cravação do amostrador, considerando o martelo de 65kg caindo de uma altura de 75cm, é descrito por estes autores como um processo padrão (*standard*). Com esta apresentação do ensaio penetração dinâmica, o

mesmo ficou conhecido, na literatura de língua inglesa, como o *Standard Penetration Test (SPT)*.

Na norma NBR 6484, o amostrador adotado é o do tipo “Raymond” e considera como procedimentos executivos das sondagens de simples reconhecimento: a perfuração a trado, o avanço por lavagem e a realização do SPT.

BELICANTA (1998) apresenta um relato histórico detalhado do desenvolvimento do equipamento e procedimentos do SPT, bem como a evolução dos esforços de padronização e normatizações internacional e brasileira.

2.1.3 - EQUIPAMENTOS E PROCEDIMENTOS DE EXECUÇÃO DE SONDAJENS DE SIMPLES RECONHECIMENTO

Conforme a norma NBR 6484 e ABGE (1999), os equipamentos utilizados para a execução de sondagens de simples reconhecimento com SPT são: tripé com roldana, tubos de revestimento, sapata de revestimento, hastes de lavagem e penetração, amostrador padrão, martelo padronizado para cravação (65kg), cabeças de bater dos tubos de revestimento e das hastes de cravação, haste-guia do martelo, baldinho com válvula de pé, bomba d’água, trépano de lavagem, trados concha e helicoidal, medidor do nível d’água, fita métrica ou trena, recipientes para amostras e martelo de saca-tubos (Figura 2.1).

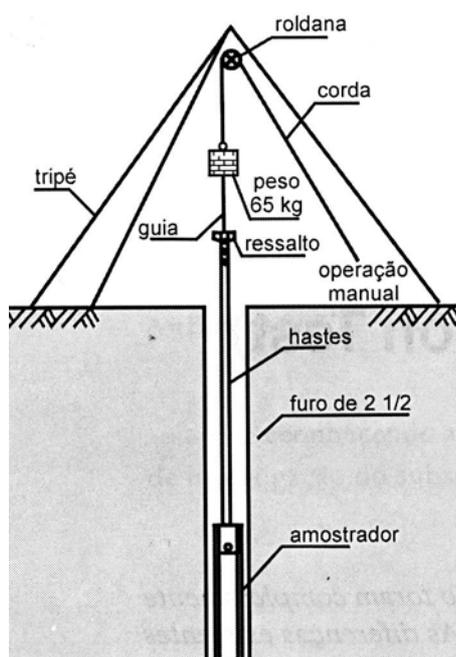


FIGURA 2.1 – Esquema ilustrativo do aparato de realização do SPT (Segundo SCHNAID, 2000).

Adicionalmente, ferramentas de oficina mecânica fazem parte do conjunto e são necessárias para a operação dos equipamentos. Especificações de medidas e materiais dos tubos, hastes e dos trados constam na referida norma.

Antes do início da execução, são necessárias as operações preliminares de limpeza do local, preparação do terreno e amarração de piquetes para o levantamento topográfico. O processo de perfuração é iniciado com uso do trado concha, seguindo com o uso do trado helicoidal quando não for mais possível prosseguir com o primeiro. A perfuração a trado é executada acima do nível freático. No caso deste ser atingido ou de condições de impenetrabilidade ao trado, o avanço é realizado mediante a utilização do trépano de lavagem com circulação de água, atendendo aos critérios apresentados na NBR 6484 e em ABGE (1999). Neste caso, faz-se obrigatório do uso dos tubos de revestimentos e em algumas situações mais particulares de instabilidade das paredes do furo, o emprego de lamas de estabilização.

A execução do SPT ocorre no transcorrer da sondagem a trado e/ou no avanço por lavagem. O SPT consiste na cravação do amostrador padronizado que recebe o impacto direto (golpe) de um martelo de 65 kg em queda livre a uma altura de 75 cm, marcada nas hastes-guias e sustentado por uma corda flexível encaixada com folga no sulco da roldana.

O processo de cravação do amostrador descrito anteriormente é repetido sucessivamente a cada metro, anotando-se os números de golpes necessários para a cravação do amostrador no solo para a penetração dos 45cm. Anotação dos números de golpes é realizada, separadamente, para cada segmento de 15cm cravado. O valor considerado como o índice de resistência à penetração (N ou N_{SPT}) é representado pelo número de golpes necessários à cravação dos 30cm finais do amostrador. No decorrer do ensaio, amostras de solo são recolhidas e acondicionadas devidamente.

Segundo ABGE (*op. cit.*), o material ensaiado será considerado impenetrável ao SPT, quando a penetração do amostrador for inferior a 5cm após 10 golpes consecutivos, sem computar os cinco golpes iniciais, ou quando o número de golpes for superior a 50 num mesmo ensaio. Como será discutido adiante, ver-se-á o limite de impenetrabilidade é condicionado pelo tipo de solução de elemento estrutural de fundação a ser utilizado, dentre outras restrições.

O SPT poderá ser dado como encerrado, quando atingido o impenetrável ou atingida a cota estabelecida pelo contratante do serviço. Caso o mesmo envolva

sondagem rotativa, o SPT poderá ser empregado posteriormente durante e após o avanço pela sonda rotativa, considerando as necessidades do projeto.

O ensaio por lavagem é realizado quando há interesse em dar prosseguimento à sondagem após atingir o impenetrável à percussão. O ensaio consiste na penetração do amostrador padrão junto ao avanço ao trépano de lavagem, por 30 min, anotando-se os avanços obtidos a cada 10 min. Por recomendação de ABGE (1999), material é considerado impenetrável ao trépano de lavagem quando o avanço do amostrador for inferior a 5cm/10 min nos três períodos consecutivos.

2.1.4 – FATORES INFLUENTES NO SPT

A grande facilidade de aquisição de equipamentos para a execução do SPT e seu baixo custo de operação em relação a outros ensaios de campo são contrastados pela gama de fatores envolvidos na execução propriamente dita da sondagem que, por conseqüência, acabam influenciando os valores de N. Os fatores são basicamente de duas ordens: material, representado pelos equipamentos e; humana, ou seja, as ações empreendidas pelos operadores do equipamento.

Os fatores intervenientes de ordem material foram extensivamente investigados por BELINCANTA (1998). Neste trabalho, o autor experimentou um conjunto de equipamentos e procedimentos, visando identificar que componentes e como estes contribuem no processo de transferência de energia mecânica geratriz do fenômeno de penetração do amostrador no solo.

Na pesquisa conduzida pelo referido autor, várias abordagens instrumentais foram empreendidas, tais como a utilização de mecanismos manuais e automáticos de alçamento e liberação do martelo, o uso de composição de hastes novas e usadas, a utilização de cabo de aço e cordas flexíveis, etc.

As principais observações acerca da eficiência do SPT, em função dos aparatos e procedimentos abordados, segundo BELINCANTA (1998) e BELINCANTA & CINTRA (1998) são:

- *o procedimento de cravação direta do amostrador sem a prévia perfuração por trado implica em valores de N mais altos do que aqueles obtidos em conformidade com o procedimento preconizado pela ABNT;*
- *o estado de conservação das hastes influenciam a eficiência, ou seja, composições mais antigas tendem a diminuir a eficiência;*

- a eficiência foi maior nos ensaios em que se utilizou acionamento da queda do martelo por gatilho em contraposição àqueles com acionamento manual;
- não foi constatada diferença significativa de eficiência nos ensaios em que se utilizou cabo de aço e corda, estando ambos em bom estado de conservação e;
- o uso ou não do coxim não se mostrou relevante do ponto de vista executivo e, portanto, pouco influencia a medida de eficiência do SPT.

BAILLOT & RIBEIRO JÚNIOR (1999) compararam os processos executivos e equipamentos de sondagens com SPT segundo as normas da ABNT e da ASTM, e observaram que, as falhas humanas inerentes ao processo de liberação manual, tais como a imprecisão da altura de soltura, podem constituir fatores influentes nos valores de N, à luz dos valores analisados obtidos com o mecanismo automático de alçamento e liberação do martelo.

Do exposto acima, percebe-se que os processos de automação do SPT implicam em atenuação de alguns fatores que eventualmente constituem fonte de erros nos valores de N. Além disso, conforme BELICANTA (1998) e BAILLOT & RIBEIRO JÚNIOR (1999), o estado de conservação dos equipamentos é fundamental para uma garantia de menor propagação de erros associados.

2.1.5 – A UTILIZAÇÃO DO SPT NA ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES

O baixo custo operacional e a relativa facilidade de execução, caracterizam o SPT como um dos ensaios de campo mais utilizados na definição de parâmetros geotécnicos em projeto de fundações (MILITISTSKY & SCHNAID, 1996). Apesar de todo o criticismo, válido, relacionado aos fatores influentes na execução do ensaio, correlações empíricas de N com os mais diversos parâmetros geotécnicos vêm sendo publicadas, acompanhadas pelas advertências explícitas de seus autores, alertando à aplicação estrita à área física ou à situação em que foram obtidas.

Os dados de N geralmente são tratados sob a óptica de duas classes de métodos: os indiretos e diretos (SCHNAID, 2000). Os métodos indiretos utilizam os dados na previsão de parâmetros constitutivos, representativos do comportamento do solo obtidos por correlação com resultados de ensaios de campo e/ou laboratório.

Nos métodos diretos, os dados são aplicados em formulações empíricas e/ou semi-empíricas com o intuito de prever um valor de tensão admissível ou o recalque de um elemento de fundação.

Como exemplo de formulação semi-empírica, menciona-se AOKI & VELLOSO (1975), os quais desenvolveram um método, assumindo que a carga admissível, para um elemento isolado, é representada pela soma das parcelas de resistência de ponta e da resistência lateral ao longo do fuste da fundação. Neste método, leva-se em consideração: os solos do perfil estratigráfico, valores de N para as resistências de ponta (R_p) e lateral (R_l) (obtidos por correlação com CPT) e coeficientes de correção relacionados ao tipo de elemento estrutural envolvido no cálculo.

Para a calibração destes coeficientes, CINTRA & AOKI (1999) comentam que os referidos autores utilizaram dados de 73 provas de carga provenientes de diversos Estados do Brasil, visando a aplicação em estacas Franki, metálicas e pré-moldadas. Outros métodos de estimativa de capacidade de carga são descritos e discutidos por ALONSO (1991), CINTRA & AOKI (*op. cit.*) e SCHNAID (2000).

Uma outra abordagem de aplicação dos dados de N do SPT em projetos e execução de fundações, consiste na interpretação dos valores de N como limites práticos de execução (Tabela 2.1). Assim, a justificativa para utilização de tais limites está relacionado ao conceito de “fundação”, que supostamente deveria incorporar as características estruturais e geotécnicas. Conforme CINTRA & AOKI (*op. cit.*), a definição empregada na norma NBR 6122/96 da ABNT trata do elemento estrutural (estaca, tubulão, etc.) como sendo a própria fundação, sem consideração implícita do elemento natural, ou seja, o material geológico.

AOKI & CINTRA (1996) consideram dois sistemas: o estrutural e o geotécnico. Segundo estes autores, os elementos estruturais são materiais fabricados em conformidade de padrões de controles tecnológicos e produtivos, o que implica no conhecimento dos parâmetros de resistência à ruptura e deformabilidade. O sistema geotécnico, por outro lado, é composto pelos materiais geológicos (solos e rochas) que apresentam, via de regra, geometrias tridimensionais irregulares e são geralmente heterogêneos em mineralogia e granulometria e com alguma anisotropia (principalmente solos residuais de rochas metamórficas). Tais materiais resultam da complexa superposição de processos geodinâmicos endógenos e exógenos que se desenvolveram no decorrer do tempo.

CINTRA & AOKI (1999) apresentam um conceito que abrange os conceitos de sistema estrutural e geotécnico, reconhecendo que o *elemento isolado de fundação*, constitui um único sistema composto pelo *elemento estrutural de fundação* e o *maciço de solo*, ou seja, o próprio material geológico que envolve o elemento estrutural.

O conceito de *sistema geotécnico*, evocado por AOKI & CINTRA (1996), culminou em outro, de fundamental importância para o entendimento do papel desempenhado pelo substrato geológico, o de *superfície resistente*. Em face à constatação de diferentes cotas de apoio de estacas cravadas, estes autores conceberam a idéia de uma *superfície resistente* ajustada a estas cotas, obtidas a partir das profundidades alcançadas na cravação do elemento estrutural de fundação. A variabilidade observada nos comprimentos das estacas significa que há valores individuais de carga admissível para o conjunto (cf. AOKI, 2002; Figura 2.2).

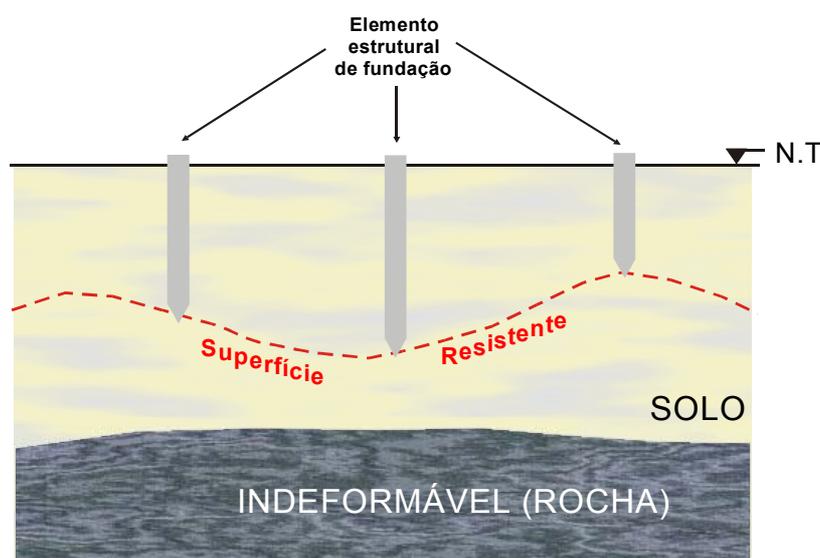


FIGURA 2.2 – Representação esquemática do papel desempenhado pelos materiais geológicos na forma de uma superfície resistência (Modificada de AOKI, 2002).

O conceito da *superfície resistente* pode ser expandido para outros elementos estruturais de fundação, levando em conta os limites executivos dos equipamentos utilizados, mais especificamente em relação à aplicação de valores de N do SPT, como se observa na Tabela 2.1. Assim, a hipótese de trabalho é: para cada elemento estrutural de fundação, em um estudo de variabilidade espacial do N, haverá uma superfície resistente ou impenetrável correspondente.

TABELA 2.1 – Limites de N para execução de alguns tipos de estacas/tubulões considerando a utilização de equipamentos convencionais sem adoção de recursos especiais (AOKI & CINTRA, 2003)

Elemento estrutural		Limite de N para o equipamento de execução	Observação
Estaca pré-moldada de concreto	$\varnothing < 30$ cm	$15 < N \leq 25$	Cuidado com tensão de compressão ou tração excessiva na cravação
	$\varnothing \geq 30$ cm	$25 < N \leq 35$	
Estaca de perfil metálico		$25 < N \leq 55$	Pode haver desvio na cravação
Estaca tubada (oca, ponta fechada)		$20 < N \leq 40$	Cuidado com pressão artesiana
Estaca Strauss		$10 < N \leq 25$	Nível d'água é limitante
Estaca	solos arenosos	$8 < N \leq 15$	Cuidado com a transição de camadas moles
Franki	solos argilosos	$20 < N \leq 40$	Cuidado com execução em argila mole
Estaca escavada com lama		$30 < N \leq 80$	Cuidado com a limpeza do fundo da cava, abastecimento de concreto e bota-fora
Tubulão	sob ar comprimido	$20 < N \leq 60$	Cuidado com o mal do mergulhador
	a céu aberto	$20 < N \leq 60$	Nível d'água é limitante
Estaca hélice contínua		$20 < N \leq 45$	Abastecimento de concreto, bota-fora
Estaca ômega		$20 < N \leq 40$	Abastecimento de concreto, solo mole
Estaca raiz		$N \geq 60$	Peculiaridades executivas, solo mole, penetra em rocha

ABGE (1999) recomenda, como limite de “impenetrável” ao SPT, o valor de $N = 50$ golpes (vide item 2.1.3). Contudo, na Tabela 2.1, AOKI & CINTRA (2003) apresentam, para cada elemento estrutural de fundação, um limite de “impenetrável” próprio e, portanto, sob o enfoque dos referidos autores, o critério de parada da sondagem com SPT pressupõe o tipo de solução estrutural a ser empregada.

Maior detalhamento acerca das particularidades construtivas de elementos estruturais podem ser consultadas na NBR 6122/96.

2.2 - ALGORITMOS DE INTERPOLAÇÃO

2.2.1 - CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Dados distribuídos em um espaço dimensional \mathfrak{R}^2 podem estar posicionados de duas maneiras a saber: aleatoriamente, sem um arranjo geométrico preferencial ou; em uma malha com espaçamento regular, geometria definida e com origem georreferenciada ou arbitrária.

Segundo YAMAMOTO (1998), os dados dispostos espacialmente podem ser submetidos a processos determinísticos de interpolação (triangulação com interpolação

linear, inverso ponderado da distância, curvatura mínima, etc.) ou probabilísticos (estimadores krigagem).

No caso de dados distribuídos irregularmente, pode-se recorrer a duas técnicas: *triangulação* ou *reticulação*. No processo de triangulação, os pontos são conectados através de triângulos e entre eles os valores são interpolados linearmente. Com este procedimento, curvas de contorno (isolinhas) derivadas do padrão original de disposição dos dados, são traçadas. Não ocorre extrapolação e as estimativas limitam-se à área resultante da soma das áreas dos triângulos (YAMAMOTO, 1998).

O processo de reticulação é caracterizado pelo estabelecimento de uma malha regular sobre a área estudada. Os valores a serem estimados são representados pelos nós formados com a nova malha estabelecida. Muitos algoritmos e métodos de interpolação (inverso ponderado da distância, curvatura mínima, etc.) são operados com base neste procedimento para que a estimativa seja possível.

Quanto ao caráter das estimativas, estas podem ser:

- **Global:** em que se considera todos os pontos da área, permitindo interpolar o valor da função em qualquer ponto dentro do domínio dos dados originais. Os métodos que têm este caráter são: análise por superfícies de tendência (regressão polinomial) e funções multiquádricas;
- **Local:** as estimativas são realizadas em uma vizinhança próxima, de modo que a mudança de um valor dentro desta vizinhança pode alterar substancialmente a estimativa. Os métodos que possuem esta característica são: curvatura mínima, krigagem, inverso ponderado da distância, funções de base radial, etc.

As aplicações de algoritmos de interpolação vêm crescendo a cada ano, com o avanço tecnológico e científico na engenharia de microcomputadores e linguagens de programação, com o objetivo de incrementar o processo interpretativo de fenômenos naturais (campos geofísicos, concentrações de teores geoquímicos, etc.) ou induzidos pelo homem (e.g.: concentração de elementos químicos em áreas contaminadas) e mesmo para fins de engenharia, segundo FELGUEIRAS (2002), a exemplo da análise de corte-aterro de estrada e barragens.

Uma destas aplicações, e talvez a mais usual, seja a de representação em três dimensões (espaço dimensional \mathbb{R}^3 , ou simplesmente 3D) da conformação topográfica

do terreno com a elaboração de um Modelo Digital de Terreno – MDT² (PAUNCZ & JOHNSON, 1976). Atualmente, a oferta de diversos algoritmos em programas comerciais ou de uso acadêmico para utilização requer que se proceda em uma avaliação dos resultados de tais métodos de interpolação, como forma de escolher e fazer uso do mais adequado.

Conforme observado em AMORIM (2003), a escolha do algoritmo mais adequado tem fortes implicações para a elaboração de uma carta de declividades do terreno, às demais cartas geotécnicas derivadas e de zoneamento geoambiental.

No presente trabalho (Capítulo 5, item 5.3), a aplicação do MDT visa dar suporte, como elemento geométrico, ao modelo geológico 3D de superfície.

2.2.2 - ANÁLISE DE SUPERFÍCIES DE TENDÊNCIA (REGRESSÃO POLINOMIAL)

A Análise de Superfícies de Tendência, também conhecida como Regressão Polinomial, trabalha com o ajuste por mínimos quadrados de polinômios ortogonais (dados regularmente distribuídos) e não-ortogonais (dados irregularmente distribuídos). Estes, geralmente, são utilizados em uma modelagem preliminar para a verificação, e remoção, se necessário for, de uma tendência sistemática nos dados atribuída a causas naturais (no caso de variáveis geológicas ou meteorológicas) e para o tratamento dos resíduos (componente aleatória da variabilidade do parâmetro estudado) em separado, conforme LANDIM (1997).

AGTERBERG (1974) ressalta que se os resíduos forem autocorrelacionados, ou seja, espacialmente dependentes, estes podem ser tratados estatisticamente ou por métodos geoestatísticos, baseados nas propriedades de variância mínima e estacionaridade.

A formulação polinomial geral para o ajuste de uma superfície a dados irregularmente distribuídos é dada pela seguinte equação:

$$z^*(x,y) = (a_0 + a_1x + a_2y + a_3x^2 + a_4xy + a_5y^2 + \dots + a_ny^n) + r(x,y) \quad (2.1)$$

onde:

$z^*(x,y)$ valor do nó a ser calculado;

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$ são coeficientes a serem calculados;

$r(x,y)$ representa os resíduos derivados do ajuste por mínimos quadrados;

² FELGUEIRAS (2002) adota a definição de *Modelo Numérico de Terreno (MNT)*. No presente texto, as definições de MNT e MDT foram consideradas conceitualmente equivalentes.

O produto gerado é uma superfície ajustada aos dados originalmente distribuídos, em conformidade com o grau do polinômio previamente escolhido (Tabela 2.2).

TABELA 2.2 – Exemplos de funções polinomiais

Grau do polinômio	Equação	Superfície obtida	Nºmínimo de pontos
1	$z^* = a + bx + cy$	linear	3
2	$z^* = a + bx + cy + dx^2 + exy + fy^2$	quadrática	6
3	$z^* = a + bx + cy + dx^2 + exy + fy^2 + gx^3 + hx^2y + ixy^2 + jy^3$	cúbica	10
4	$z^* = a + bx + cy + dx^2 + exy + fy^2 + gx^3 + hx^2y + ixy^2 + jy^3 + kx^4 + lx^3y + nx^2y^2 + ozy^3 + py^4$	quártica	15

Na etapa de análise de dados, outras funções de grau superior a 4 podem ser aplicadas, mas deve-se levar a conta as implicações interpretativas do ajuste e do pós-processamento dos resíduos. Segundo LANDIM (1997), a regressão polinomial tem sido utilizada na remoção da tendência sistemática ou deriva em dados espacialmente distribuídos para, numa etapa posterior, tratar os resíduos com técnicas geoestatísticas.

2.2.3 – TRIANGULAÇÃO COM INTERPOLAÇÃO LINEAR

Este algoritmo opera com a triangulação de Delaunay, em que triângulos são criados, sem que nenhum deles possa vir a interceptar outro, a partir da ligação dos pontos, formando uma rede triangular irregular. Os nós da nova malha são superpostos a esta rede triangular e são calculados por interpolação linear com a resolução de um polinômio de grau 1 (ajuste a uma superfície plana) que representa cada triângulo, obtendo-se assim o valor do nó localizado neste triângulo (SAMESHIMA & YAMAMOTO, 1996).

A triangulação com interpolação linear é um algoritmo bastante útil em situações com dados irregularmente distribuídos. A triangulação sem a interpolação linear é também empregada, embora a superfície gerada é composta por um mosaico dos triângulos, que resulta na perda da qualidade estética do modelo. Contudo, possui a grande vantagem de tratar-se de um método exato, significando que os dados são honrados. A rede triangular compõe uma fronteira convexa para os dados, por consequência não ocorre extrapolação (GOLDEN Software Inc., 1999).

2.2.4 – INVERSO DO QUADRADO DA DISTÂNCIA (IQD)

O algoritmo de Inverso da Distância Ponderada (IDP), proposto por SHEPARD³ (1968 *apud* YAMAMOTO, 1998), constitui-se de uma técnica de cálculo de uma média móvel local ponderada pelo inverso da distância. A aplicação do IDP fundamenta-se na hipótese de continuidade espacial dos valores da variável altimétrica nos pontos de uma dada superfície, ou seja, as variações na superfície do terreno são graduais. O IDP é utilizado como peso para cada ponto tomado no processo de interpolação. Um valor desconhecido $z^*(x,y)$ é calculado através da seguinte equação:

$$z^*(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^n \lambda_i z_i}{\sum_{i=1}^n \lambda_i} \quad (2.2)$$

em que:

z_i é o i -ésimo ponto com coordenadas (x_i, y_i) e;

$\lambda_i = 1/d_i^P$ é o i -ésimo peso do ponto de dado com coordenadas (x_i, y_i) ;

$d_i = \sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2}$ é a *distância euclidiana* entre os pontos da vizinhança local e o ponto a ser estimado $z^*(x,y)$ e P é a potência utilizada.

Os critérios de vizinhança local podem ser os mesmos aplicados na krigagem (vizinhos mais próximos) ou podem ser estabelecidos a partir de um raio de busca.

De acordo com SAMESHIMA & YAMAMOTO (1996) e YAMAMOTO (1998), a aplicação de potências superiores ou igual a 3 resulta em áreas bastante suavizadas até planas, enquanto que a potência 2 (quadrado) destacam anomalias locais, a qual é recomendada por estes autores como o método (Inverso do Quadrado da Distância - IQD) mais adequado para a modelagem de superfícies topográficas.

Um artefato de padrão geométrico caracterizado por uma concentricidade das curvas em torno de um ponto ou mais pontos agrupados, conhecido como “olho-de-boi”, pode ser gerado no processo de interpolação. Alguns programas (*e.g.*: *Surfer*) utilizam um fator de suavização e um elipsóide de busca que incorpora a anisotropia eventualmente presente nos dados como forma de minimizar a presença de tal artefato.

ÖZDAMAR *et al.* (1999) comentam que o efeito de pontos muito próximos é incrementado com o aumento da potência utilizada na interpolação. Segundo estes autores, o IQD pode ser considerado um método exato quando a soma dos pesos da

³ SHEPARD, D. (1968). A two dimensional interpolation function for irregularly spaced data. In: American Association for Computing Machinery National Conference, 23, 1968. *Proceedings...*p.517-524.

estimativa é igual a um e quando o valor do nó estimado da grade coincide com o valor observado.

2.2.5 – CURVATURA MÍNIMA

O algoritmo de Curvatura Mínima é caracterizado pela modelagem de superfícies suavizadas que resultam do processo iterativo de resolução de uma equação diferencial, de modo que os dados originais possam ser honrados na medida do possível. Contudo, não se trata de um algoritmo de interpolação exato, significando que nem sempre todos os nós estimados terão resíduo nulo. A finalidade matemática do método, conforme WESSEL & BERCOVICI (1998) e ÖZDAMAR *et al.* (1999), é a de manter a curvatura quadrática em um mínimo.

O algoritmo instrui a aplicação sucessiva de uma equação visando a suavização dos valores da malha. Cada aplicação é considerada como uma iteração. Estes valores serão repetidamente recalculados até que atinjam um valor máximo residual e/ou o número máximo de iterações (a critério do usuário) seja alcançado, o que confere um caráter recursivo ao algoritmo. O processamento do algoritmo é realizado em quatro passos (GOLDEN Software Inc., 1999) descritos a seguir:

- I. Os dados são inicialmente ajustados (regressão por mínimos quadrados) a uma superfície plana do tipo $z(x,y) = Ax + By + C$;
- II. Os valores $z_i(x,y)$ da superfície plana são subtraídos dos valores dos dados originais, obtendo-se os resíduos;
- III. Os valores residuais são interpolados utilizando a solução de uma equação biarmônica diferencial com tensão:

$$(1-T_i)\nabla^2(\nabla^2z) - (T_i)\nabla^2z = 0 \quad (2.3)$$

em que:

T_i é a tensão interna e;
 ∇^2 é o operador laplaciano.

- IV. Os valores interpolados são adicionados aos valores obtidos pela regressão planar, o que possibilita a obtenção da superfície.

A finalidade do método é a de manter a(s) curvatura(s) da superfície em um mínimo, para isto são usados como parâmetros de controle, as tensões interna (T_i) e de borda (T_b). Isto significa que o acréscimo nos valores das tensões (no Surfer, os valores padronizados são: $T_i = 0$ e $T_b = 0$), implicam na mudança do curvamento da superfície. O fator de relaxamento está relacionado ao processo de convergência da solução

numérica. Quanto maior o valor deste fator, mais rápido o algoritmo opera com uma convergência pouco provável. Valores próximos de zero, ao contrário, resultam em um tempo maior de computação com convergência certa (GOLDEN Software Inc., 1999).

2.3 - GEOESTATÍSTICA: VARIABILIDADE ESPACIAL E MÉTODOS DE ESTIMATIVA

2.3.1 - FUNDAMENTOS DA TEORIA DAS VARIÁVEIS REGIONALIZADAS

MATHERON (1963) enfatiza que, face aos resultados encontrados por D. G. Krige e H. S. Sichel na resolução de problemas de estimativa de teores de minério, ficou patente que estatística clássica ou convencional era inábil em considerar o aspecto espacial inerente ao fenômeno natural da mineralização ou outro qualquer.

Como o teor do minério é regido por um fenômeno geológico natural da mineralização, algumas porções do corpo mineralizado são relativamente mais ricas que outras, daí conclui-se que as amostras têm um certo grau de dependência espacial.

As *Variáveis Regionalizadas (VR's)*, ao contrário das *Variáveis Aleatórias (VA's)*, têm condicionantes espaciais que caracterizam o fenômeno natural estudado. Ressalte-se, no entanto, que a Teoria das Variáveis Regionalizadas se trata de uma abordagem estocástica de variáveis que representam fenômenos naturais. Segundo JOURNEL & HUIJBREGTS (1978), formalmente, uma variável regionalizada é definida simplesmente como uma função $f(x)$ que assume um valor definido em todo ponto x de coordenadas $(x_i, x_j, x_k, \dots, x_n)$ em um espaço \mathfrak{R}^n , em que $n=1,2,3$.

2.3.2 - CARACTERÍSTICAS QUALITATIVAS DAS VARIÁVEIS REGIONALIZADAS

As variáveis regionalizadas apresentam certas características qualitativas ou atributos que representam ou dão uma medida da componente espacial no sentido da sua definição apresentada no item anterior, quais sejam a *localização*, *continuidade* e *anisotropia*, conforme detalhado a seguir (cf. MATHERON, 1965):

- **Localização:** Como exposto anteriormente, uma variável regionalizada representa uma realização com posicionamento espacial definido, portanto esta é localizada e as variações inerentes ocorrem dentro de um *campo geométrico* ou seja, o espaço geométrico no qual se observa a tendência de se tomar valores espacialmente

correlacionados. Os critérios de adoção do campo geométrico são baseados em certas condições físicas da variável regionalizada, tais como uma aceitável homogeneidade. Além do campo geométrico, a variável regionalizada apresenta um *suporte geométrico* geralmente considerado como um volume que comporta variabilidade espacial identificada. A mudança de suporte, ou seja, das características geométricas deste, poderá ser interpretada como a transformação em uma nova variável regionalizada que tem semelhanças com a precedente, não obstante não seja idêntica.

- **Continuidade:** Esta característica pode ser expressa através de uma flutuação mais ou menos importante dentre os valores de observações vizinhas. Tal flutuação reflete, por outro lado, um certo grau de dependência ou independência espacial dentre os valores. Por exemplo, nos depósitos estratiformes, a continuidade da espessura de um determinado estrato mineralizado pode ser avaliada pelas flutuações dos valores observados em furos de sondagem. Em termos estatísticos, sejam consideradas duas observações $x(z_i)$ e $x(z_{i+h})$, a continuidade é, então, atestada quando $[f(x(z_i)) - f(x(z_{i+h}))]^2$ tende a zero.
- **Anisotropia:** A anisotropia está relacionada a uma direção preferencial ao longo da qual os valores não variam bruscamente, enquanto na direção perpendicular o mesmo não se observa. Este fenômeno é também conhecido como *zonalidade*. Tal característica é essencial para a interpretação do semivariograma experimental, como será visto adiante.

2.3.3 – MOMENTOS E ESTACIONARIDADE

Seja a FA $Z(x)$ para todo o conjunto de k pontos no \mathfrak{R}^n (n – espaço dimensional), x_1, x_2, \dots, x_k chamados de pontos de suporte em que corresponde a uma componente vetorial k da variável aleatória (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978):

$$\{Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_k)\}.$$

Essa VA vetorial é caracterizada pela função de distribuição da variável k ,

$$F_{x_1, x_2, \dots, x_k}(z_1, z_2, \dots, z_k) = Prob[Z(x_1) < z_1, \dots, Z(x_k) < z_k].$$

Supondo que os processos regionalizados assumam uma condição de estacionaridade, ou seja, que duas VR's $Z_1(x)$ e $Z_2(x)$ não são distintas, então os

momentos de primeira e segunda ordens são suficientes para representar esta condição.

- *Momento de primeira ordem: o valor esperado de $Z(x)$, ou simplesmente esperança matemática, é idêntico para todo $Z(x)$, ou seja:*

$$E[Z(x)] = m \tag{2.4}$$

- *Momentos de segunda ordem:*

i) *a variância ou mais precisamente a variância a priori de $Z(x)$ em relação a m é dada por:*

$$Var[Z(x)] = E\{[Z(x) - m(x)]^2\} \tag{2.5}$$

ii) *duas VR's $Z(x_1)$ e $Z(x_2)$ têm variâncias nos pontos x_1 e x_2 , e então elas também têm uma covariância que é uma função dos dois pontos x_1 e x_2 expressa como*

$$C(h) = \Lambda[Z(x_1), Z(x_2)] = E\{[Z(x_1) - m(x_1)][Z(x_2) - m(x_2)]\} \tag{2.6}$$

iii) *Variograma. A função variograma é definida como a variância do incremento $[Z(x_1) - Z(x_2)]$, sendo representada por*

$$2\gamma(x_1, x_2) = Var[Z(x_1) - Z(x_2)] \tag{2.7}$$

- *Hipóteses de estacionaridade: Uma vez estabelecidas as funções que descrevem a dependência espacial simultânea dos pontos x_1 e x_2 , muitas realizações dos pares de VR's $[Z(x_1), Z(x_2)]$ deverão estar disponíveis para que qualquer inferência estatística seja possível. Deste modo, pode-se considerar que os pontos x_1 e x_2 estão separados entre si por um vetor h , então cada par de dados $[z(x_1), z(x_2)]$ pode ser admitido como uma diferente realização do par de VR's $[Z(x_1), Z(x_2)]$.*

✓ *Estacionaridade sensu stricto: é reconhecida quando suas propriedades estatísticas não variam com a ação de translação do vetor h . Isto significa que as VR's $[Z(x_1), Z(x_2)]$ têm as mesmas estatísticas para qualquer h .*

✓ *Estacionaridade de 2ª Ordem: uma FA é dita estacionária de 2ª ordem quando:*

i) *a esperança matemática $E[Z(x)]$ existe e não depende da distância de separação h , assim,*

$$E[Z(x)] = m, \quad \forall x; \tag{2.8}$$

ii) *para cada par de VR's $[Z(x_i), Z(x_{i+h})]$ a covariância existe e só depende da distância de separação h ,*

$$C(h) = E[Z(x_{i+h}) \cdot Z(x_i)] - m^2, \quad \forall x; \tag{2.9}$$

iii) *como foi constatada a estacionaridade da covariância, então o mesmo se aplica à função variograma, e deste modo as relações estabelecidas são:*

$$Var[Z(x)] = E\{[Z(x) - m]^2\} = C(0), \quad \forall x; \tag{2.10}$$

$$\gamma(h) = \frac{1}{2}E\{[Z(x_{i+h}) - Z(x)]^2\} = C(0) - C(h), \quad \forall x. \quad (2.11)$$

✓ *Hipótese intrínseca: Uma FA $Z(x)$ é reconhecida como intrínseca quando*

i) a esperança matemática existe e não depende do ponto de suporte x ,

$$E[Z(x)] = m, \quad \forall x;$$

ii) para todos os vetores h o incremento $[Z(x_{i+h}) - Z(x)]$ tem uma variância finita a qual não depende de x ,

$$\text{Var}[Z(x_{i+h}) - Z(x)] = E\{[Z(x_{i+h}) - Z(x)]^2\} = 2\gamma(h), \quad \forall x.$$

2.3.4 - ANÁLISE VARIOGRÁFICA E PRÁTICA DE USO DO SEMIVARIOGRAMA

2.3.4.1 - O Semivariograma

Em termos práticos do estudo das mineralizações e a distribuição dos teores no corpo de minério, conforme MATHERON (1963, 1965), o semivariograma é definido como uma curva que representa o grau de continuidade da mineralização. Teoricamente, seja considerada uma observação $z(x)$ tomada no ponto x do campo geométrico V por uma VR definida em um dado suporte geométrico v (considerado geralmente pontual). O semivariograma $\gamma(h)$ ou *lei de dispersão* é definido para um argumento vetorial h pela expressão:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2V} \iiint_V [Z(x+h) - Z(x)]^2 dV \quad (2.12)$$

Esta equação proposta para o semivariograma, inicialmente, como empírica, constitui-se na realidade no momento de inércia medido em diagrama de dispersão entre os valores de $Z(x+h)$ versus $Z(x)$ como mostrado por JOURNEL (1983) e ilustrado na Figura 2.3. A distância d_i entre o i -ésimo ponto (x_i, y_i) e a reta ideal é:

$$d_i = |x_i - y_i| \cos 45^\circ \quad (2.13)$$

elevando a distância ao quadrado tem-se:

$$d_i^2 = \frac{1}{2}(x_i - y_i)^2 \quad (2.14)$$

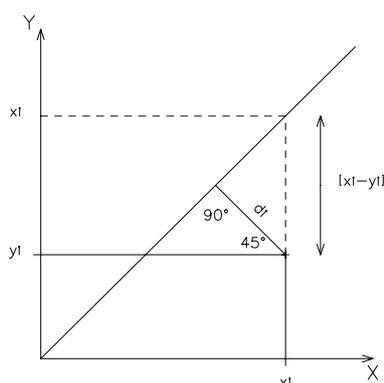


FIGURA 2.3 - Representação do par de pontos (x_i, y_i) no diagrama de dispersão (JOURNEL, 1989 *apud* YAMAMOTO, 2001).

Seja n pares de pontos em um diagrama de dispersão, o momento de inércia em torno da reta de 45° a ser calculado, é expresso por

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n d_i^2 \tag{2.15}$$

ou

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{1}{2} (x_i - y_i)^2 = \frac{1}{2n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2 \tag{2.16}$$

ou para o caso de duas realizações separadas por uma distância h a equação 2.16 assume a seguinte forma:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [(z(x_i) - z(x_{i+h}))]^2 \tag{2.17}$$

Quanto maior a dispersão, maior será o momento de inércia e menor a correlação. Se não houver dispersão - em que todos os n pares caem sobre a reta 45° - o momento de inércia é zero e o coeficiente de correlação é igual a 1 (máxima correlação).

A análise variográfica exploratória é um procedimento de investigação, e análise espacial de dados muito versátil com uma abordagem bastante completa. Entretanto, como observado em RENDU (1978), CRESSIE & HAWKINS (1980) e ROTH (1998), as estimativas por estimadores lineares são dependentes da função de distribuição da VR.

2.3.4.2 - Parâmetros e Características Estruturais do Semivariograma

O semivariograma apresenta feições estruturais e parâmetros que descrevem a variabilidade espacial, a continuidade da VR analisada e a variância existente ou não devido à aleatoriedade local ou erros de amostragem ou análise. Estas características são ilustradas na Figura 2.4 e em seguida descritas (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989; GOOVAERTS, 1997).

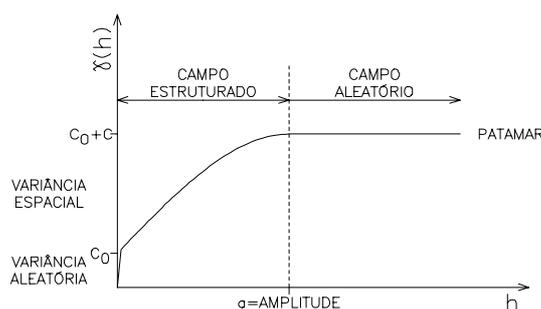


FIGURA 2.4 – Ilustração de um semivariograma hipotético (conforme YAMAMOTO, 2001)

- ✓ *Amplitude variográfica (a)*: representa uma medida de aumento da variabilidade, até um determinado nível, com o incremento de distância entre os pares analisados. A distância até onde é atingido este nível é denominada amplitude variográfica. A medida de *a* representa o alcance máximo em que é reconhecida a correlação espacial entre duas observações, dentro de um mesmo campo geométrico;
- ✓ *Patamar (C)*: representa o nível de variabilidade onde o semivariograma se estabiliza. Este patamar deve ser teoricamente igual a variância estimada *a priori*, ou seja, a variância populacional. Na literatura de língua inglesa é conhecido como *sill*;
- ✓ *Efeito pepita (C0)*: representa variações locais de pequena escala, gerada por erros de amostragem e/ou análise, o que marca uma descontinuidade na origem do semivariograma;
- ✓ *Variância espacial*: é dada pela diferença entre a variância *a priori* e o efeito pepita;
- ✓ *Anisotropia*: um fenômeno é dito anisotrópico quando seu padrão de variabilidade espacial muda com a direção. Esta característica do fenômeno é observada quando são confeccionados semivariogramas ao longo de direções perpendiculares, denominados de *semivariogramas direcionais*. Existem três tipos básicos de anisotropia, quais sejam: *geométrica*, *zonal* e *mista* (Figura 2.4).

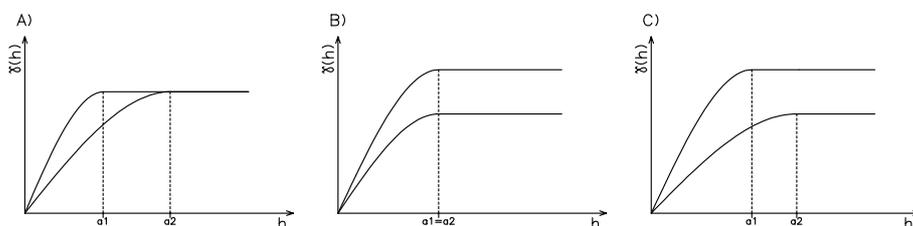


FIGURA 2.4 – Esquemas ilustrativos dos modelos de anisotropia: A) *geométrica*; B) *zonal* e: C) *mista*. (YAMAMOTO, 2001).

Na prática da análise variográfica exploratória, JOURNEL & HUIJBREGTS (1978) enfatizam que a consistência e robustez do semivariograma experimental (desde que

haja autocorrelação) dependerão do número de pares de amostras. Estes autores recomendam utilizar, no mínimo, 30 a 50 pares de amostras para cada ponto do semivariograma.

Quando os pontos de dados estão distribuídos em uma malha regular, a variografia dos pares, separados por uma distância h , é realizada diretamente. Contudo, como quase sempre se observa, os dados se apresentam dispersamente distribuídos no espaço amostral, sendo então necessário realizar uma pesquisa de amostras situadas a uma distância h , através de uma janela de pesquisa.

A técnica de variografia direcional consiste em calcular a variância espacial segundo um ângulo de azimute tomado no sentido horário. Esta janela é definida, ao longo da direção do semivariograma, por um ângulo e uma distância de tolerância, conforme ilustrado pela Figura 2.6 (DEUTSCH & JOURNAL, 1992). O ângulo de tolerância representa uma abertura na direção da variografia exploratória, em que são rastreados os pontos de dados situados adiante. Associado a este ângulo, pode-se adotar uma distância de tolerância que visa restringir a área de rastreamento, pois se tal não é feito, esta crescerá e abrangerá uma parte do campo geométrico, eventualmente, indesejada.

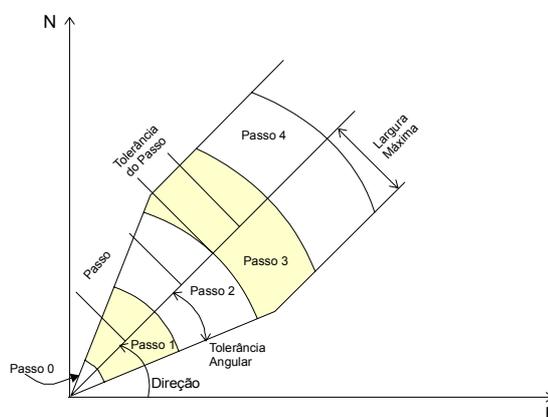


FIGURA 2.6 – Ilustração das medidas de tolerância (*ângulo e distância*) utilizadas na variografia direcional exploratória (YAMAMOTO, 2001).

2.3.5 – PRINCIPAIS MODELOS VARIOGRÁFICOS

Segundo JOURNAL & HUIJBREGTS (1978) e WACKERNAGEL (1998) são utilizadas funções teóricas que funcionarão para a modelagem dos semivariogramas, por ajuste, atendendo à condição de “positiva definida”, o que representa um sistema estruturado e que deverá possuir uma solução única e estável para o sistema de equações.

2.3.5.1 – Modelos com patamar

A função variograma nestes modelos cresce com o incremento da distância h até atingir um patamar (*sill*) onde a função se estabiliza. Teoricamente, este patamar deve ser igual à variância da população. A Figura 2.7 ilustra os principais modelos deste grupo e em seguida são apresentados os modelos matemáticos.

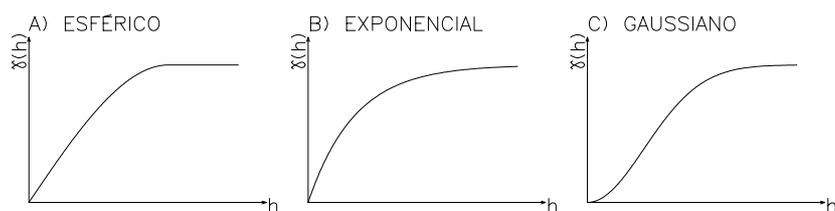


FIGURA 2.7 – Principais modelos variográficos com patamar (YAMAMOTO, 2001)

❖ *Modelo Esférico (de Matheron)*

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[\frac{3}{2} \left(\frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right] \text{ para } h < a \quad (2.18)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C, \text{ para } h \geq a \quad (2.19)$$

em que C é o patamar e a representa a amplitude variográfica. Nos ajustes deste modelo, constata-se, geralmente, que a tangente na origem atinge o patamar a uma distância de $2/3$ da amplitude variográfica a .

❖ *Modelo Exponencial (de Formery)*

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{h}{a} \right) \right) \right] \quad (2.20)$$

onde C é a assíntota desta função, enquanto a amplitude a corresponde a 3 vezes a distância, onde a tangente na origem atinge o patamar.

❖ *Modelo Gaussiano (Parabólico)*

$$\gamma(h) = C_0 + C \left[1 - \exp \left(- \left(\frac{h}{a} \right)^2 \right) \right] \quad (2.21)$$

Este modelo, cuja função tem comportamento parabólico na origem, apresenta larga amplitude variográfica a e patamar C semelhante aos modelos exponenciais. São representativos de fenômenos naturais com elevada continuidade espacial. Como contraste, destaca-se o modelo aleatório (Figura 2.8) caracterizado pelo *efeito pepita puro* e representa fenômenos naturais de elevada aleatoriedade. Nos outros modelos, o efeito pepita é somado e reconhecido como uma constante C_0 .

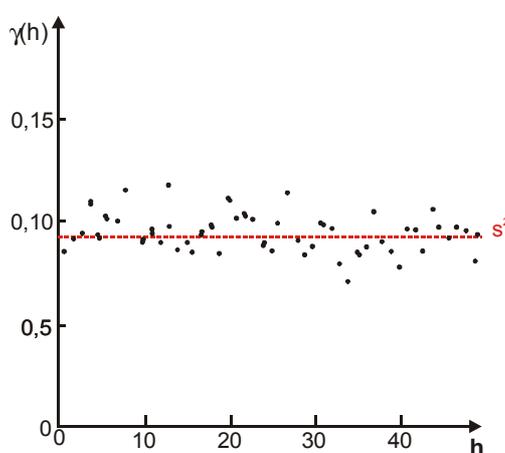


FIGURA 2.8 – Efeito pepita puro, o que caracteriza forte componente aleatória (Modificada de JOURNAL & HUIJBREGTS, 1978)

De acordo com JOURNAL & HUIJBREGTS (1978) o termo “efeito pepita” foi utilizado para descrever a probabilidade de se extrair uma pepita de ouro com um furo de sondagem. Em termos de VR’s, sejam duas amostras de sondagem que estão muito próximas entre si e que têm teores $Z(x_i)$ e $Z(x_{i+h})$ as quais diferenciam entre si pelo fato de uma delas conter a pepita e a outra não. Os supracitados autores comentam que, na prática, o efeito pepita também é função do espaçamento da malha amostral.

Quanto à dependência espacial das realizações de uma variável regionalizada, o efeito pepita puro denota ausência de correlação espacial.

2.3.6 – PROCEDIMENTOS DE ESTIMATIVA POR KRIGAGEM

2.3.6.1 – Idéia Geral do Método de Estimativa

De acordo com JOURNEL (1977), a proposta de estimativa de teor de um bloco de minério que culminou nos procedimentos conhecidos, atualmente, genericamente como *krigagem*⁴ surgiu dos trabalhos do engenheiro de minas sul-africano Danie G. Krige no começo da década de 1950, quando o mesmo sugeriu um procedimento de regressão para atribuir um peso a cada amostra de teor conhecido, sendo o estimador do teor do bloco uma combinação linear dos teores conhecidos dentro de uma vizinhança móvel. Conforme explica DAVID (1988), com esta técnica, Krige obteve respostas rápidas e práticas a respeito de mudança de suporte geométrico na recuperação da tonelagem ou o impacto de uma incerteza no patamar da variância.

JOURNEL (*op. cit.*) ressalta que a elaboração de um estimador por minimização de uma norma quadrática não é algo novo. O que é de fato novo, é a sua aplicação em campos variados tais como a estimativa de teores de minério, levantamentos florestais, mapeamento, meteorologia, etc.

2.3.6.2 – Definição da Vizinhança Local

Os estimadores lineares e não-lineares *krigagem*, ao contrário da análise de superfície de tendência, são métodos de interpolação para estimativas locais (YAMAMOTO, 1998). Faz-se necessária a definição dos pontos a serem utilizados na estimativa por interpolação. Os pontos selecionados, segundo critérios específicos descritos adiante, constituem a *vizinhança local* de estimativa. Estes pontos podem estar distribuídos, formando agrupamentos com arranjos aleatórios e/ou semi-regulares dentro de um raio de influência relacionado à amplitude modelada na etapa de análise variográfica exploratória (RIVOIRARD, 1987).

Os critérios de seleção de pontos visam garantir a pesquisa dos melhores pontos a serem interpolados, evitando assim algum vício sistemático que possa ser refletido em uma eventual sobrestimativa. Basicamente são aplicados três critérios, a saber: *i*) *n* pontos mais próximos; *n*/4 pontos mais próximos por quadrante e; *n*/8 pontos mais próximos por octante.

Buscando evitar uma estimativa viciada devido a uma seleção inadequada dos pontos na interpolação local, geralmente aplica-se o critério dos quadrantes, que

⁴ MATHERON (1965) cunhou o termo *krigeage* (*krigagem*) ao procedimento desenvolvido por D. G. Krige por ocasião do formalismo matemático da Teoria das Variáveis Regionalizadas.

baseia-se na subdivisão da região circundante ao ponto a ser estimado, em quatro setores, o que permite maiores chances de outros pontos de serem selecionados.

Do mesmo modo que no critério dos quadrantes, a área de influência é dividida em oito setores (octantes), dentro dos quais são selecionados $n/8$ pontos por octante mais próximos para serem interpolados. Pontos mais distantes podem, eventualmente, ser escolhidos e influenciar fortemente a estimativa. Normalmente nos programas de geoestatística, o critério mais utilizado é do quadrante, embora possa se empregar um raio de busca, baseado na medida de alcance do semivariograma experimental (YAMAMOTO, 2001).

No procedimento de estimativa por krigagem, uma grade ou malha reticulada é gerada geometricamente, formando nós que serão estimados. Em alguns casos, a malha é reticulada tomando como limites os extremos das coordenadas dos dados. Por outro lado, pode-se optar por um polígono convexo de área mínima que engloba os dados, referenciado por YAMAMOTO (1997, 2001) como *fronteira convexa*.

2.3.6.3 – Krigagem Ordinária (KO)

Dentre os estimadores que compõem o “conjunto krigagem” a krigagem ordinária é o mais utilizado. À semelhança do estimador krigagem simples, a KO adota uma condição de estacionaridade local de segunda ordem, mas com a aparente vantagem de não se conhecer a média m . A krigagem ordinária foi e tem sido bastante empregada na estimativa pontual e na estimativa de blocos, mais especificamente no caso de recursos minerais (DAVID, 1977; BROOKER, 1979; 1991).

Como apontado por RENDU (1979), a *krigagem* trata-se de uma combinação linear de pesos e amostras mais próximas para o caso dos dados se adequarem a uma distribuição normal com média e variância conhecidas. Para o caso de uma distribuição log-normal, o mais adequado é combinação log-linear dos ponderadores, utilizando um estimador krigagem log-normal.

A estimativa $z^*(x_0)$ de $z(x_0)$ consiste na solução de um sistema linear de equações que resulta na combinação linear dos pesos λ_i , ótimos, com os valores pertencentes à vizinhança local estabelecida (CRESSIE, 1993). Como o estimador KO admite uma condição de não-viés, então:

$$E[Z^*(x_0)] - E[Z(x_0)] = 0$$

Assim como $E[Z^*(x_0)] = m$, a condição de estacionaridade de segunda ordem é admitida, então:

$$E[Z^*(x_0)] = E\left[\lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i)\right] \Rightarrow m = \lambda_0 + \sum_{i=1}^n \lambda_i m \quad (2.22)$$

Uma VR estacionária implica em uma mesma média m para $E[Z^*(x_0)]$ e $E[Z(x_0)]$, por força da seguinte condição de não-viés

$$\lambda_0 = 0 \quad \text{e} \quad \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (2.23)$$

Entretanto, como a média m não é conhecida, a condição, expressa pela equação 2.23, tem que ser rigidamente satisfeita (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978).

A estimativa $z^*(x_0)$ de $z(x_0)$ é dada por

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(x_i) \quad (2.24)$$

A minimização da variância do erro da estimação baseia-se na premissa de estimativa do melhor conjunto de ponderadores para que a condição de não-viés seja mantida. Sendo assim, a variância de estimativa é

$$\sigma_E^2 = C(0) - 2 \sum_i \lambda_i C(x_0 - x_i) + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j) \quad (2.25)$$

com a seguinte restrição:

$$\sum_j \lambda_j = 1 \quad \text{ou} \quad \sum_j \lambda_j - 1 = 0$$

O procedimento de minimização da variância relacionada ao estimador KO, envolve um incremento ao sistema linear de equações para que as n incógnitas relacionadas ao sistema de n equações dêem uma solução única e estável ao sistema. Segundo ISAAKS & SRIVASTAVA (1989), este incremento é representado pela introdução do *operador de Lagrange* (μ). A variância de estimativa é, então, reescrita como

$$L(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, \mu) = C(0) - 2 \sum_i \lambda_i C(x_0 - x_i) + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j) - 2\mu \left(\sum_j \lambda_j - 1 \right) \quad (2.26)$$

em que $L(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n, \mu)$ é o lagrangiano; μ é o multiplicador de Lagrange.

Conforme ISAAKS & SRIVASTAVA (1989), para minimizar o lagrangiano, faz-se cada uma das derivadas parciais $\partial L/\partial \lambda_i$ iguais a zero:

$$\frac{\partial L}{\partial \lambda_i} = -2C(x_o - x_i) + 2 \sum_j \lambda_j C(x_i - x_j) - 2\mu = 0, \text{ para } i=1,2,\dots,n \quad (2.27)$$

e reduzindo $\partial L/\partial \mu$ a zero:

$$\frac{\partial L}{\partial \mu} = \sum_j \lambda_j - 1 = 0 \quad (2.28)$$

Com a minimização da variância do erro, em concordância com a condição de não-viés, isto resulta no sistema de equações de krigagem:

$$\begin{cases} \sum_j \lambda_j \gamma(x_i - x_j) + \mu = \gamma(x_o - x_i) & \text{para } i=1,2,\dots,n \\ \sum_j \lambda_j = 1 \end{cases} \quad (2.29)$$

O sistema de equações de krigagem escrito em termos da função semivariograma é representado como:

$$\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \gamma_{12} & \cdots & \gamma_{1n} & 1 \\ \gamma_{21} & \gamma_{22} & \cdots & \gamma_{2n} & 1 \\ \vdots & \cdots & \bullet & \cdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \gamma_{n2} & \cdots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & 1 & \cdots & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \gamma_{20} \\ \vdots \\ \gamma_{n0} \\ 1 \end{bmatrix}$$

A variância de estimativa ou de krigagem ordinária (σ_{KO}^2), conforme segue:

$$\sigma_{KO}^2 = C(0) - 2 \sum_i \lambda_i C(x_o - x_i) + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j) \quad (2.30)$$

o termo $\sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j)$ pode ser derivado do primeiro conjunto de equações (2.29), conforme ISAAKS & SRIVASTAVA (1989)

$$\sum_j \lambda_j C(x_i - x_j) - \mu = C(x_o - x_i) \quad \text{para } i=1,2,\dots,n \quad (2.31)$$

escrevendo as n equações para $i=1,2,\dots,n$ e somando:

$$\sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j) - \mu \sum_i \lambda_i = \sum_i \lambda_i C(x_o - x_i) \quad (2.32)$$

e lembrando que $\sum_i \lambda_i = 1$, tem-se:

$$\sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j C(x_i - x_j) = \sum_i \lambda_i C(x_o - x_i) + \mu \quad (2.33)$$

substituindo este resultado na expressão da variância de krigagem ordinária, tem-se:

$$\sigma_{KO}^2 = C(0) - \sum_i \lambda_i C(x_o - x_i) + \mu \quad (2.34)$$

A variância de krigagem ordinária em termos da função semivariograma torna-se:

$$\sigma_{KO}^2 = \sum_i \lambda_i \gamma(x_o - x_i) + \mu \quad (2.35)$$

Problemas relacionados à robustez de estimadores lineares como a krigagem ordinária foram discutidos por CRESSIE & HAWKINS (1980) e BARDOSSY (1988) em vista da presença de tendência sistemática ou valores anômalos. A robustez é compreendida como uma característica de insensibilidade dos estimadores quando do tratamento de dados anômalos. Deste modo, a correta abordagem do fenômeno regionalizado (escolha do estimador e modelagem do semivariograma experimental) são vitais para minimização da variância de estimativa.

O estimador KO é de longe o mais utilizado quando se emprega um procedimento de interpolação de dados cuja média não é conhecida, não obstante a estacionaridade seja admitida. JOURNEL & ROSSI (1989) abordam o assunto quando da comparação da krigagem ordinária (KO) com a krigagem universal (KU) (chamada por estes autores de *krigagem com modelo de tendência - KT*). Os supramencionados concluem que a variância de KO apenas fornece uma medida da configuração espacial dos dados.

Segundo YAMAMOTO (2000), a variância de KO depende diretamente do semivariograma o qual trabalha globalmente, e daí decorre uma incompatibilidade do erro estimado localmente com a estimativa realizada. Deste modo, este autor propõe uma medida denominada por *variância de interpolação* da estimativa por KO, que é expressa por

$$S_o^2 = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i) - Z^*(x_0)]^2 \quad (2.36)$$

Segundo YAMAMOTO (2000), a variância de interpolação permite reconhecimento do efeito proporcional devido ao elevado grau de assimetria de curvas de distribuição de frequência dos dados, o que corrobora com o relatado por GOOVAERTS (1997).

Como a variância de krigagem trata-se em essência de uma variância, valores negativos são admissíveis para a estimativa a $z^*(x_0)$ devido a valores negativos dos pesos, não obstante estes têm que ser submetidos a um fator de correção. DEUTSCH

(1996) alerta para o fato que os pesos negativos quando interpretados como probabilidades para elaboração de uma *função de distribuição acumulada condicional (fdac)* local, não têm significado físico. Este autor propõe um algoritmo de correção dos pesos negativos, recalculando-os para valor zero, enquanto os valores diferentes de zero são submetidos a uma transformação de modo que a soma deles seja igual a 1 (um), com garantia da condição de não-viés.

Assim como a variância de KO, a variância de interpolação proposta por YAMAMOTO (2000) é acometida da mesma eventualidade. O mesmo considerou algumas propostas de correção de pesos negativos, dentre elas a de DEUTSCH (*op. cit.*). O referido autor adotou o modelo de JOURNAL & RAO (1996), em que o módulo do maior peso negativo é adicionado aos valores de todos os pesos. Valores negativos implicam em extrapolação na faixa de dados e podendo acarretar em problemas de estabilidade algébrica das matrizes (*e.g.*: matrizes singulares) de estimativa.

Até o presente momento, todo o aparato teórico da krigagem ordinária apresentado está relacionado ao estudo de fenômenos que podem ser estudados em espaço \mathbb{R}^2 . A prática de estimativa, a partir de uma base de dados distribuídos em um plano, constitui o escopo de aplicação da *krigagem pontual*. Porém, com a necessidade de calcular recursos e reservas dos jazimentos minerais foi, igualmente, necessário o desenvolvimento de algoritmos passíveis de operar no espaço em três dimensões, fornecendo assim um modelo geoestatístico da jazida a ser eventualmente lavrada. A extensão da krigagem ao caso tridimensional é conhecida como *krigagem de bloco*, visando, em primeira análise, a discretização do corpo mineralizado em painéis ou bancadas e estas, por sua vez, em blocos que podem constituir as unidades de lavra.

Conforme GUERRA (1988) e YAMAMOTO (2001), a aplicação da técnica, em mineração, visa a estimativa do teor médio dos blocos utilizando o artifício da discretização em bancadas tomando-se, por base, condições de suporte para os dados de entrada na interpolação, tais como o espaçamento médio entre as amostras e a dimensão do bloco (Figura 2.9).

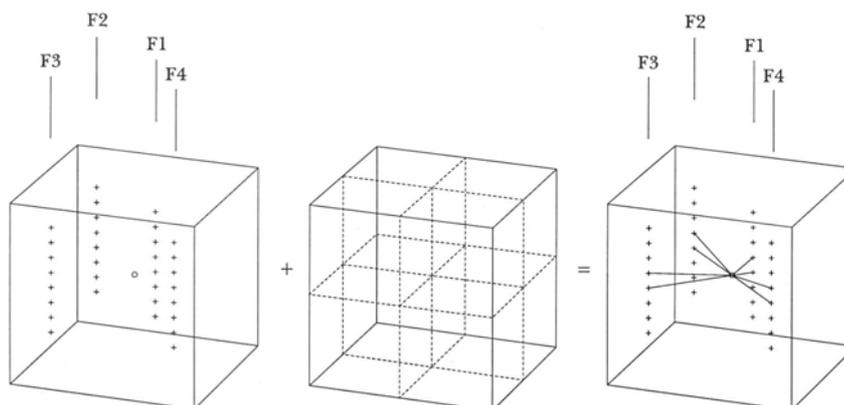


FIGURA 2.9 – Vizinhança local de um ponto a ser estimado no processo de krigagem de blocos (Segundo YAMAMOTO, 2001).

2.3.6.4 – Cokrigagem (CoK)

Segundo JOURNAL & HUIJBREGTS (1978), BOUFASSA & ARMSTRONG (1989), PAN *et al.* (1993) e RIVOIRARD (1994), há certas situações em que uma variável não é amostrada suficientemente e por esta razão as estimativas podem apresentar uma certa imprecisão. A precisão da estimativa desta variável subamostrada (primária) pode ser melhorada considerando correlações espaciais entre essa variável e outras melhor amostradas (secundárias). As estimativas utilizando esta correlação são feitas por *Cokrigagem (CoK)*.

Embora, teoricamente, não existam grandes diferenças entre a krigagem e a cokrigagem, esta última foi durante algum tempo pouco utilizada devido à complexidade computacional da notação matemática e, também, às dificuldades na modelagem da variância cruzada ou dos semivariogramas cruzados (MYERS, 1982; PAN *et al.* 1993). Atualmente, como alguns programas e bibliotecas de algoritmos em geoestatística mais acessíveis (*e.g.*: *Sistema GeoVisual 2.1* de YAMAMOTO (2002) e *GSLIB* de DEUTSCH & JOURNAL, 1992) e programas que compõem Sistemas de Informações Geográficas (SIG) (*e.g.*: IDRISI32) dispõem dos algoritmos, as complexidades inerentes às notações algébricas e processamentos computacionais foram mais facilmente superadas.

A cokrigagem pode ser compreendida como um algoritmo de estimativa multivariada quando se trabalha com K variáveis correlacionadas a uma variável primária. Para uma regionalização caracterizada por um conjunto de K VR's espacialmente correlacionadas ($Z_k(x)$, $k = 1, 2, \dots, K$), a estacionaridade de primeira e segunda ordens são

- ✓ $E[Z_k(x_i)] = m_k(x), \quad \forall x;$
- ✓ $E[Z_{k'}(x_{i+h}). Z_k(x_i)] - m_{k'}(x).m_k(x) = C_{k'k}(h)$, variância cruzada;
- ✓ $E[Z_{k'}(x_{i+h}) - Z_k(x_i)][Z_k(x_{i+h}) - Z_k(x_i)] = 2\gamma_{k'k}(h)$, variograma cruzado.

O valor médio de uma VR em um ponto $Z_k(x_0)$ situado em um suporte $V_{k0}(x_0)$ é dado por

$$Z_{V_{k0}} = \frac{1}{V_{k0}} \int_{V_{k0}(x_0)} Z_{k_0}(x) dx \quad (2.37)$$

O estimador $Z^*_{V_{k0}}$ é uma combinação linear de todos os valores disponíveis de todas as K variáveis na correionalização

$$Z^*_{V_{k0}} = \sum_{k=1}^K \sum_{i_k=1}^{n_k} \lambda_{i_k} z(x_{i_k}) \quad (2.38)$$

A condição de não-viés, $E[Z_{V_{k0}} - Z^*_{V_{k0}}] = 0$ é expressa pelas condições K

$$\sum_{i_{k_0}=1}^{n_{k_0}} \lambda_{i_{k_0}} = 1 \quad \text{e} \quad \sum_{i_k=1}^{n_k} \lambda_{i_k} = 0, \quad \forall k \neq k_0$$

A condição de não-viés pode não ser satisfeita se $n_{k_0} = 0$. Isto significa que o sistema de CoK requer pelo menos um valor experimental da variável primária Z_{k_0} .

De acordo com GOOVAERTS (1997) e WACKERNAGEL (1998), a realização de estimativas por cokrigagem pode ser procedida em duas abordagens: por *cokrigagem isotópica* e *cokrigagem heterotópica*. Na cokrigagem isotópica, os pontos de amostragem da variável primária coincidem com os da variável secundária. No caso heterotópico, os pontos de amostragem não coincidem. Um caso intermediário de heterotopia parcial pode ser constatado quando os pontos de amostragem das variáveis correlacionadas coincidem parcialmente.

A realização da coestimativas não depende somente da obtenção do semivariograma cruzado experimental e dos semivariogramas experimentais individuais das VR's estudadas. Uma etapa necessária, senão vital, consiste na verificação do modelo de correionalização linear, em que são checados os determinantes dos valores dos efeitos pepita e de patamar dos semivariogramas e do semivariograma cruzado.

O modelo é verificado e aceito quando são atendidas as condições de positividade definida. Tais condições, não sendo atendidas, resultam em instabilidade no sistema de equações de cokrigagem, com a possibilidade de surgir problemas de

singularidade nas matrizes. Em ISAACS & SRIVASTAVA (1989) consta um tratamento detalhado das questões relacionadas à validação do modelo de correionalização linear.

A minimização da variância $\sigma^2_{V_{k_0}} = E\{[Z_{V_{k_0}} - Z^*_{V_{k_0}}]^2\}$ sob K condições de não-viés resulta num sistema de equações lineares denominado de *sistema de cokrigagem*:

$$\begin{cases} \sum_{i_k=1}^K \sum_{j_k=1}^{n_k} \lambda_{jk'} \bar{C}_{k'k}(x_{i_k}, x_{j_k}) - \mu_k = \bar{C}_{k_0k}(x_i - x_0), & \forall i_k = 1, \dots, n_k, \forall k = 1, \dots, K, \\ \sum_{j_{k_0}=1}^{n_{k_0}} \lambda_{j_{k_0}} = 1, \quad \sum_{j_k=1}^{n_k} \lambda_{j_k} = 0, & \forall k \neq k_0 \end{cases} \quad (2.39)$$

A variância de estimativa minimizada ou *variância de cokrigagem ordinária* (σ^2_{Cok}) pode ser então escrita como

$$\sigma^2_{Cok} = \bar{C}_{k,k'}(V_k, V_{k'}) + \mu_k - \sum_{k=1}^K \sum_{i_k=1}^{n_k} \lambda_{i_k} \bar{C}_{k_0k}(V_{k_0}, v_{i_k}) \quad (2.40)$$

2.3.6.5 – Validação Cruzada

Segundo YAMAMOTO (2001), a *validação cruzada* é uma técnica semelhante à de *jackknifing*, a qual consiste em realizar estimativas sucessivas, removendo em cada processo de estimativa um ou mais pontos do conjunto amostral. Na análise variográfica, o procedimento é realizado considerando a remoção sistemática de um ou mais amostras do conjunto de dados.

Na estimativa por krigagem, o processo consiste em estimar um ponto conhecido utilizando critérios de vizinhança local e confrontar o valor estimado com o valor real conhecido. Com esta técnica é possível avaliar o quanto o semivariograma experimental representa a variabilidade espacial do fenômeno regionalizado em estudo. Permite, também, uma avaliação dos critérios de busca da definição da vizinhança local utilizada na estimativa. As particularidades desta técnica podem ser consultadas em JOURNAL & HUIJBREGTS (1978), ISAACS & SRIVASTAVA (1989), VALENTE (1989) e GOOVAERTS (1997).

2.4 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DA GEOESTATÍSTICA NO MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

SANEJOUAND (1972) faz menção a um trabalho de M. Arnould & M. Vantroys publicado em 1970 nos anais do 1º congresso da *International Association of Engineering Geology* em que os mesmos realizam um teste com uso de “cartografia automática” na

região da vila nova de Érvy em Paris. SANEJOUAND (*op. cit.*) comenta que os autores fizeram uso do método de interpolação por krigagem para delimitação dos domínios geotécnicos. Em vista da data da publicação e considerando que a década de 70 marcou o início da aplicação da geoestatística em outras áreas do conhecimento (diferentes da mineração), pode-se considerar o trabalho dos supracitados autores como uma das primeiras contribuições da geoestatística ao mapeamento geotécnico.

A despeito desta publicação pioneira, SANEJOUAND (1972) tece seus comentários quanto à utilização de métodos matemáticos (*e.g.*: análise de superfícies de tendência) e estatísticos como instrumentos de avaliação dos dados geotécnicos de campo, considerando os fenômenos de variabilidade devido a variações não-aleatórias no espaço das propriedades geotécnicas das rochas. O autor frisa que a aplicação de *métodos estatísticos clássicos* a dados geotécnicos deve ser realizada com discernimento.

DEVEUGHELE & POLATERA (1979) realizam um estudo geoestatístico tomando, como base de dados, as sondagens realizadas no calcário Marno na região de Saint Ouen em Paris. Os autores citam trabalhos de G. Matheron como infra-estrutura teórica do trabalho e aplicam técnicas de variografia exploratória e da krigagem universal. A utilização da krigagem universal ao invés da krigagem simples ou ordinária, é justificada pela tendência regional observada nos dados. Um dos objetivos do trabalho consistiu na elaboração de um mapa de contorno do topo do calcário Marno, cujas curvas foram traçadas manualmente em uma malha regularizada a partir da disposição espacial dos dados originais.

O produto principal representado pelo mapa de contorno é ilustrado pela Figura 2.10, na qual estão delineados as linhas de contorno de mesma profundidade do topo do calcário e o mapa de variância de krigagem das estimativas.

No contexto de análise de dados do índice de resistência à penetração do amostrador padrão (N_{SPT}), STURARO (1994) e STURARO & LANDIM (1996) apresentam estimativas de N a partir de 720 sondagens locadas no sítio urbano da cidade de Bauru-SP. A metodologia de coleta de dados empregada pelos autores baseou-se no levantamento dos relatórios de sondagens junto às empresas atuantes na região. Os dados e informações levantadas foram: os índices N_{SPT} a cada metro sondado, profundidade do nível freático, a profundidade do impenetrável ao amostrador padrão e uma descrição resumida da geologia dos materiais sondados. Todos os relatórios foram codificados em planilhas e depois georreferenciados em

cartas topográficas na escala de 1:10.000, visando o tratamento nos programas de geoestatística.



FIGURA 2.10 – Mapa de contorno com isolinhas de mesma profundidade do topo rochoso do calcário Marno (esquerda) e o mapa de variância de krigagem. (Modificada de DEVEUGHELE & POLATERA, 1979).

A análise variográfica exploratória revelou que existe forte anisotropia zonal considerando as direções N-S e E-W para as janelas de pesquisa. Os autores procederam, então, em uma variografia omnidirecional, e assim estabelecer um modelo experimental ajustável ao modelo esférico considerado (Figura 2.11).

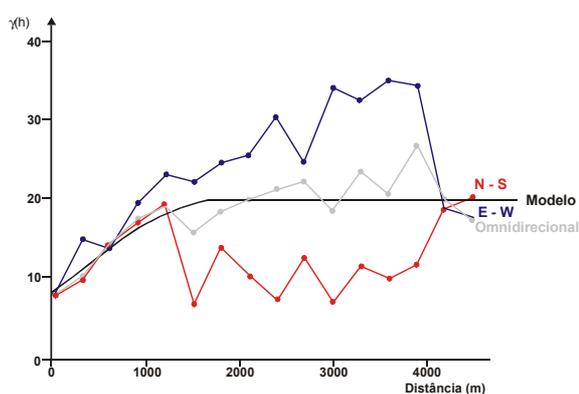


FIGURA 2.11 – Semivariogramas experimentais ajustados para a área urbana de Bauru-SP (Modificada de STURARO, 1994).

O modelo variográfico experimental omnidirecional ajustado pelos autores foi o esférico cujos parâmetros estruturais são:

- ✓ Efeito pepita (C_0): 8
- ✓ Patamar (C_1): 12

- ✓ Amplitude variográfica: 1800m
- ✓ Função: $\gamma(h) = 8 + 12Es_{f1800}$

O mapa de estimativas por krigagem ordinária e o respectivo mapa dos desvios-padrão das estimativas, com base no SVE omnidirecional (para todas direções) calibrado, são apresentados na Figura 2.12.

FOLLE *et al.* (2001) procederam na modelagem geoestatística de dados de N_{SPT} na região de Passo Fundo, situada no planalto médio central do Estado do Rio Grande do Sul. O processo de modelagem destes autores é bastante semelhante ao empregado por STURARO (1994) e, do mesmo modo como observado nos dados deste autor, os dados de FOLLE *et al.* (*op. cit.*) apresentam forte assimetria positiva. A Figura 2.13 representa um dos SVE's modelados para a região em questão.

FOLLE *et al.* (*op. cit.*) realizaram estimativas por krigagem ordinária para diversos intervalos de profundidades. O mapa de estimativa por krigagem ordinária, correspondente ao semivariograma modelado, apresentado na Figura 2.13 é representado pela Figura 2.13.

Outro exemplo de quantificação da variabilidade do subsolo pôde ser retratado no trabalho de TALAMINI NETO (2002), em que o autor buscou conhecer os condicionantes de ocupação do espaço subterrâneo como uma alternativa ao espaço urbano superficial já exaurido pelas demandas sociais na cidade de Curitiba/PR.

Da mesma maneira que STURARO (1994), os procedimentos padrões da geoestatística de análise variográfica e estimativas por krigagem ordinária foram executados. A base de dados se constituiu de 373 sondagens que foram convertidas em formulários para compor um banco de dados; pontos de afloramento e; 245 dados de poços profundos locados na área de pesquisa, além da base cartográfica necessária para a composição dos produtos finais. A unidade geológica de interesse é a Formação Guabirota a qual é composta por argilas rijas e sobreadensadas com intercalações de sedimentos arcosianos.

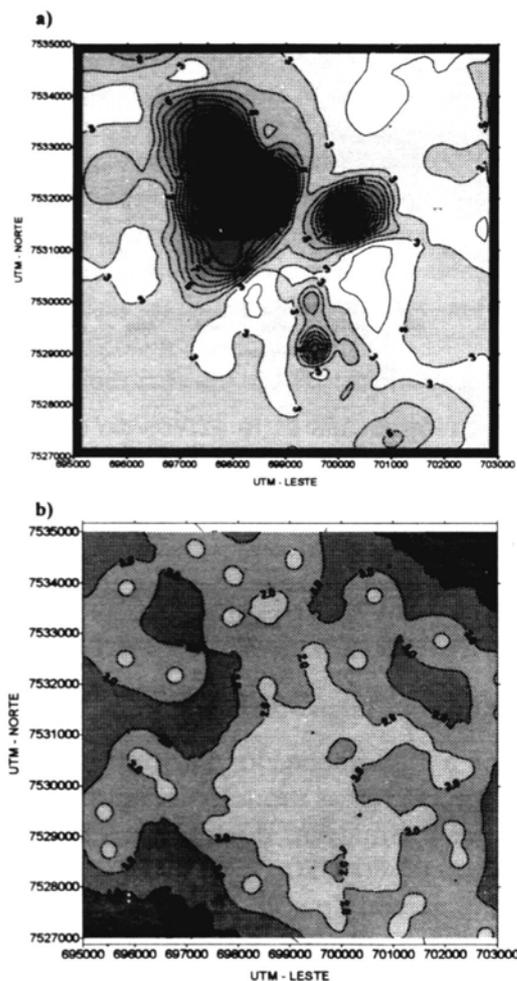


FIGURA 2.12 – Mapa do SPT estimado por krigagem ordinária (a) e, mapa dos desvio-padrões das estimativa (b) (Segundo STURARO & LANDIM, 1996).

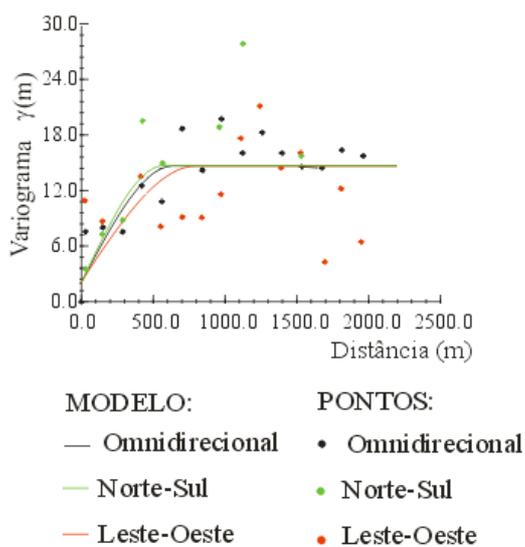


FIGURA 2.13 – Modelo variográfico ajustado para os dados de SPT nas direções de maior e menor continuidades para a faixa de profundidade entre 1 e 5m (Segundo FOLLE *et al.*, 2001).

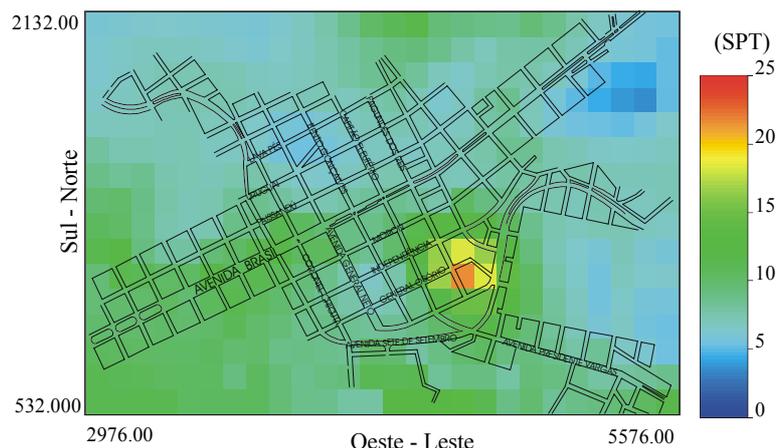


FIGURA 2.14 – Mapa de krigagem ordinária dos dados de SPT para a faixa de profundidade compreendida entre 1 e 5 metros (Segundo FOLLE *et al.* 2001).

A análise variográfica foi realizada segundo a direção N60W a qual representa a direção de maior continuidade da variável profundidade do topo da Formação Guabirota. O semivariograma ajustado é exibido na Figura 2.15.

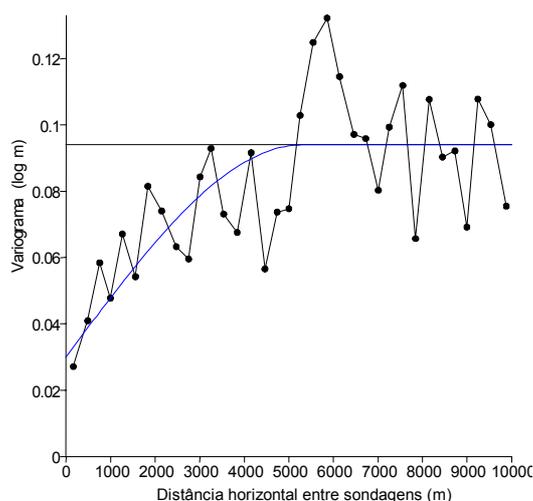


FIGURA 2.15 – Semivariograma modelado segundo um modelo esférico considerando o logaritmo dos valores de profundidade da Formação Guabirota (TALAMINI NETO 2002).

Decorrente da análise variográfica as estimativas por KO e erros associados são apresentados respectivamente nas Figuras 2.16 e 2.17. O trabalho de TALAMINI NETO (2002) visou a elaboração de uma carta orientativa para execução de obras subterrâneas, baseada em um mapa geológico e nas cartas de isovalores geradas com a aplicação de geoestatística.

JAKSA (1995) realizou estudos de quantificação da variabilidade espacial da resistência ao cisalhamento não-drenado (S_u) de uma argila rija sobreadensada conhecida na região da cidade de Adelaide, Austrália como *Argila Keswick*. Os dados

de S_u foram obtidos por correlação através de ensaios de cone elétrico (*Cone Penetration Test - CPT*), através do qual se obtém medidas de resistência de ponta (q_c) e atrito lateral (f_s) em uma extensiva campanha de campo. Os ensaios de campo foram realizados em dois locais escolhidos pelos autores: *South Parklands* e *Keswick*.

O estudo da variabilidade dos valores de S_u foi levado a cabo em duas escalas de investigação, conforme o referido autor: pequena e grande escalas. A variabilidade em pequena escala foi avaliada nestes dois locais investigados. Com o intuito de evitar erros experimentais associados às medidas de q_c e $f_{s,r}$, os autores optaram por utilizar um único operador e somente uma instrumentação de CPT, seguindo normas técnicas australianas e internacionais.

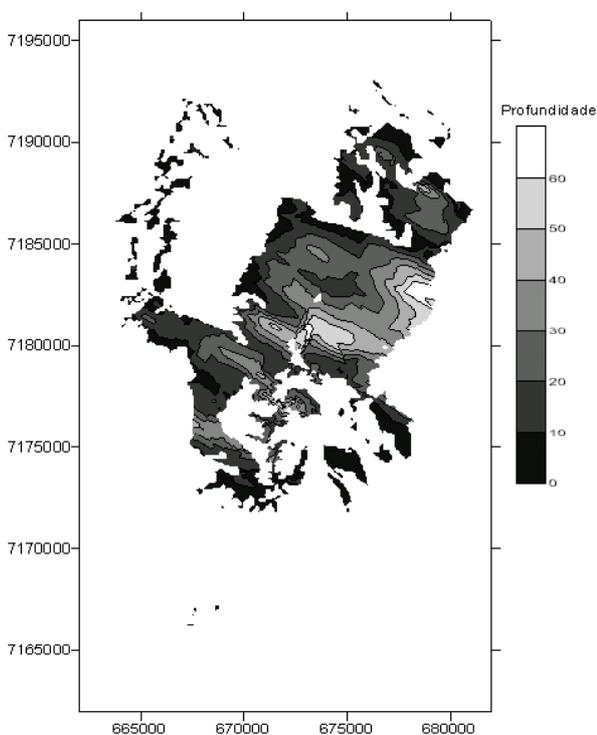


FIGURA 2.16 - Carta de isovalores de profundidade da Formação Guabirota (TALAMINI NETO, 2002).

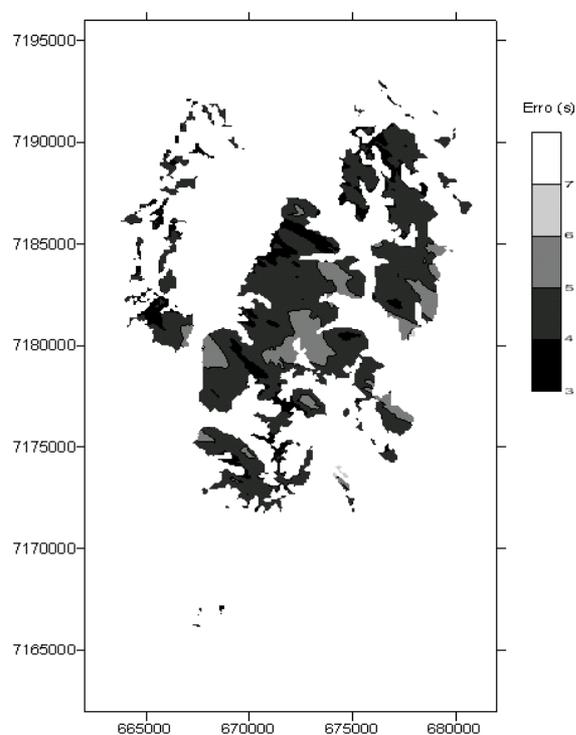


Figura 2.17 - Carta de isovalores de erro de estimativa para a profundidade da Formação Guabirota (TALAMINI NETO, 2002).

A análise em grande escala envolveu a mancha urbana de Adelaide. O banco de dados dos autores foi acrescido de outros dados e informações gerados por outras campanhas de investigação na área investigada.

A análise geoestatística em pequena escala envolveu uma variografia ao longo perfil de resistência de ponta, cujos valores foram ajustados a uma superfície de tendência quadrática e os resíduos resultantes foram modelados através do SVE, como

ilustrado pela Figura 2.18. O modelo ajustado foi um esférico, cuja equação é $\gamma(y) = 0,0018 + 0,0231Esf_{330}$.

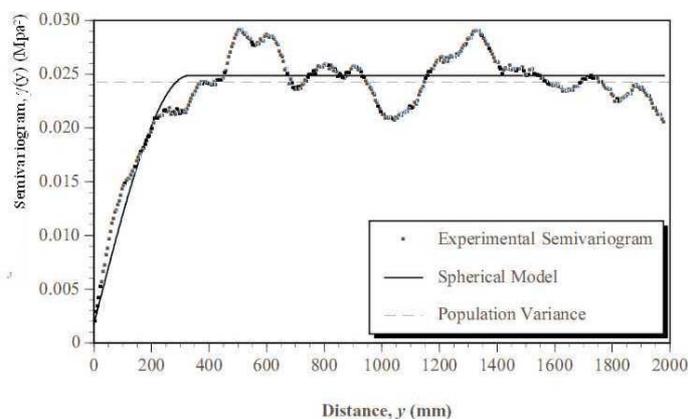


FIGURA 2.18 – Semivariograma experimental dos resíduos de q_{cr} tomados a partir do ensaio CPT C8 em *South Parklands*. (JAKSA, 1995).

Além da análise variográfica ao longo do perfil de q_{cr} , os autores procederam, a investigação da variabilidade no plano horizontal convencional. Este procedimento foi aplicado também em *Keswick*. Como forma de adotar um modelo único para a área investigada, JAKSA (1995) lançou mão da técnica de mesclagem de modelos. Com este ovo modelo composto, foi possível a realização das estimativas por krigagem ordinária e a determinação dos desvios de estimativa associados, conforme mostra a Figura 2.19.

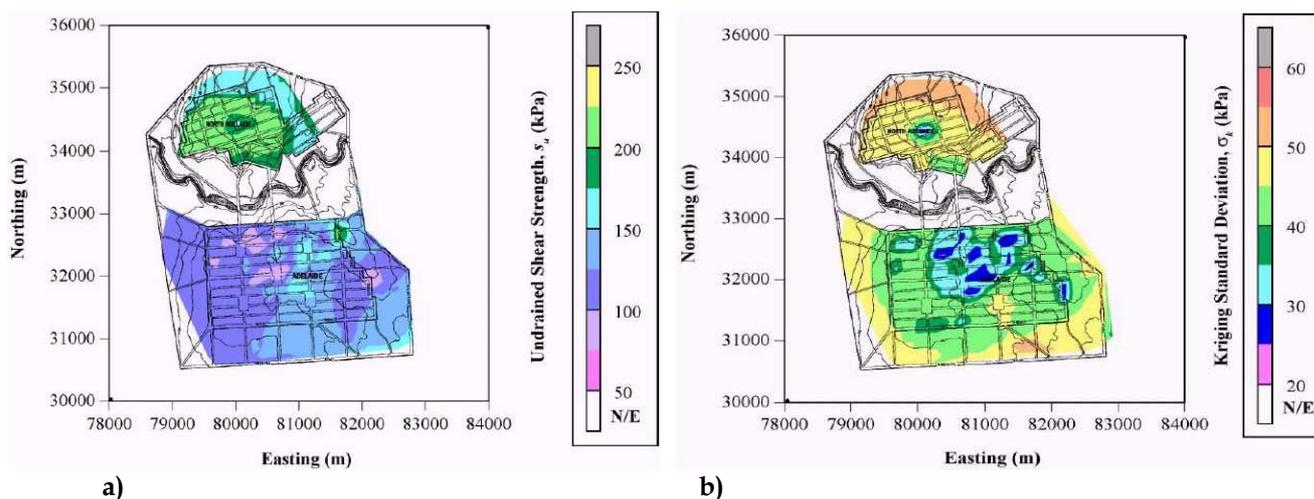


FIGURA 2.19 – Estimativa da variabilidade espacial de S_u da argila *Keswick* à profundidade de 3 metros, por krigagem ordinária: a) mapa de estimativas e; b) Mapa de desvios-padrão. (Segundo JAKSA, 1995).

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA DE TRABALHO

3.1 – MÉTODO DE EXECUÇÃO DO TRABALHO

Para a realização do presente trabalho, deu-se o encaminhamento de um conjunto de etapas, cumpridas em seqüência que favoreceu a execução da pesquisa, descritas a seguir:

- ✓ **Revisão bibliográfica:** esta etapa consistiu do levantamento, leitura e análise crítica de relatórios técnicos, dissertações, teses, artigos publicados em reuniões científicas (simpósios, congressos, etc.) e em periódicos nacionais e internacionais que tratam de aspectos teóricos e práticos (exemplos de aplicação em geotecnia, mineração e, mais especificamente, no mapeamento geotécnico) da geoestatística, além das obras de referência de geotecnia e geoestatística. O levantamento bibliográfico, na verdade, foi uma atividade constante ao longo do desenvolvimento da pesquisa, permitindo a formação e atualização das bases teóricas e conceituais que nortearam a pesquisa;
- ✓ **Levantamento das bases cartográficas e dos dados:** Tratou-se da obtenção, junto ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM e ao Instituto de Planejamento do Ceará (IPLANCE), das bases cartográficas em meio digital em duas escalas diferentes. Os dados geotécnicos foram obtidos em consulta a relatórios de sondagem para obras geotécnicas realizadas dentro do polígono de pesquisa;
- ✓ **Montagem do banco de dados:** Os dados dos relatórios de sondagem foram compilados, organizados e estruturados em forma de um banco de dados operacional no aplicativo Microsoft Access'97. Esta etapa foi essencial para a viabilidade da pesquisa, uma vez que as consultas ao banco de dados forneceram as bases de dados utilizadas para as análises realizadas.
- ✓ **Análise dos dados:** Nesta etapa, foram realizadas as análises estatísticas, geoestatísticas e aplicação de algoritmos de interpolação para o tratamento de dados topográficos, do nível freático e de N do SPT;
- ✓ **Redação do texto da dissertação e preparação dos documentos cartográficos:** Etapa final do trabalho que tratou da redação da dissertação, na qual constam os capítulos constituídos pela síntese elaborada com a revisão bibliográfica, por informações gerais da cidade de Fortaleza e, principalmente, pela apresentação e discussão dos resultados. Os mapas de uso sugerido de fundações compõem uma série de documentos cartográficos que integram as informações obtidas.

A Figura 3.1 ilustra, de modo esquemático, os procedimentos e materiais utilizados na realização da pesquisa.

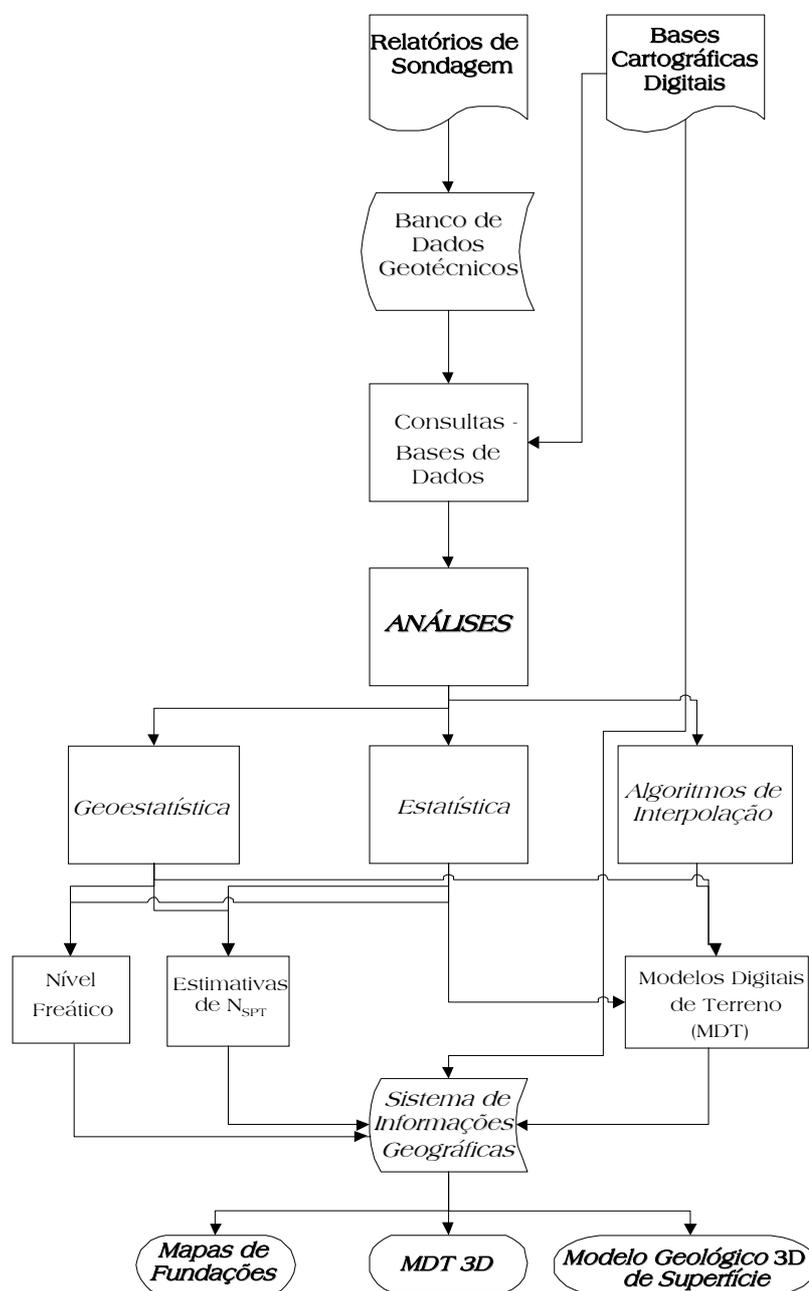


FIGURA 3.1 – Fluxograma executivo dos procedimentos realizados nas etapas de obtenção e armazenamento dos dados, análises e apresentação dos resultados.

3.2 – MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 – BASES CARTOGRÁFICAS

No presente trabalho, foram utilizadas bases cartográficas disponíveis em meio digital que muito facilitaram a montagem do banco de dados geotécnicos e as análises estatísticas e geoestatísticas. Os mapas utilizados estavam nos formatos **.dwg* e **.dxf* da *Autodesk*[®] Inc.. A base principal foi elaborada em 1998 pelo Instituto de Planejamento do Ceará (IPLANCE), e está apresentada na escala de 1:25.000, contendo o arruamento, nomes das ruas e avenidas e principais logradouros públicos, bem como a representação dos principais rios e lagoas da Cidade de Fortaleza. No entanto, esta base não estava georreferenciada e para o devido cadastramento das sondagens, foi necessário fazê-lo.

A outra base cartográfica foi gerada com o convênio firmado entre Prefeitura Municipal de Fortaleza (PMF), Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) e Companhia de Energética do Ceará (COELCE) para fins de cadastro urbano na escala de 1:2.000 e georreferenciada, que foi extensivamente utilizada para a elaboração do modelo digital de terreno, bem como para obtenção das cotas de boca das sondagens visando as estimativas por cokrigagem do nível estático e para elaboração das cartas de uso sugerido de fundações. Contudo, observou-se que a base elaborada pelo IPLANCE, mesmo após o georreferenciamento efetuado com base na grade de coordenadas, apresentava erros de posicionamento geográfico, o qual foi corrigido com o auxílio da base de detalhe e com uso de um receptor GPS. Assim, foi possível obter as coordenadas UTM em mapa das sondagens, possibilitando a alimentação do banco de dados.

3.2.2 – DADOS GEOTÉCNICOS UTILIZADOS

Os dados utilizados na presente dissertação foram cedidos pela empresa GEONORTE – Engenharia de Solos e Fundações Ltda., com sede em Fortaleza, na forma de relatórios de sondagem. Foram consultados 126 (cento e vinte e seis) relatórios de sondagens de simples reconhecimento com SPT, nos quais constavam o posicionamento das sondagens (croquis), o endereço do serviço ou obra para qual estavam sendo realizadas as sondagens, data, perfil estratigráfico do solo com a descrição táctil-visual e caracterização geotécnica de cada camada sondada, com

medidas de topo e base das camadas, os resultados do SPT para cada metro, a medida da profundidade do nível estático e data respectiva e informações relativas à realização do ensaio de lavagem e colocação de revestimento para garantir a integridade das paredes do furo, entre outras. Os critérios de escolha das sondagens foram:

- *A locação de três sondagens (em média) ou cinco (no máximo) por quilômetro quadrado;*
- *Sondagens que apresentavam valores $N \geq 50$ golpes;*
- *Sondagens com o perfil estratigráfico geologicamente mais heterogêneo.*

O critério de locação de três sondagens por quilômetro quadrado nem sempre foi respeitado, admitindo-se assim cinco sondagens como número máximo, por algumas porções da área investigada não possuir sondagens executadas ou por constituir áreas não inadequadas à construção de prédios. Na seleção das sondagens, as sugestões para a definição da profundidade do impenetrável da ABGE (1999) foram adotadas, levando-se em consideração os aspectos quanto à penetrabilidade de estacas pré-moldadas e tubos Franki relatados por CINTRA & AOKI (1999) e AOKI & CINTRA (2003).

Ressalta-se que outras empresas de geotecnia na Cidade de Fortaleza foram consultadas quanto à cessão de dados de sondagem mas, lamentavelmente, não manifestaram apoio ao presente trabalho e, por conseguinte, não disponibilizaram seus dados.

3.3 - PREPARAÇÃO DO BANCO DE DADOS GEOTÉCNICOS

Após a etapa de seleção e coleta das sondagens, as quais podem ser consideradas, em particular, como um banco de dados analógico em formulário, foi necessária a elaboração de um banco de dados em meio digital para o devido armazenamento de todos os dados constantes nas fichas de sondagem, visando fornecer as bases de dados necessárias para a realização das análises estatísticas e geoestatísticas. O programa selecionado como Sistema Gerenciador de Banco de Dados Relacional foi o *Microsoft® Access97* para *Windows* da *Microsoft® Corp.* (1997) por possuir interface interativa e recursos adequados às rotinas de análises processadas.

Conforme mostra a Figura 3.1, o Banco de Dados de Sondagens SPT é composto por várias *tabelas* que armazenam todos os dados presentes nos relatórios de sondagens selecionados. Os dados de cada camada de solo foram armazenados como

- *Surfer 7 for Windows* da *Golden Software Inc.* – aplicativo em que estão disponíveis os algoritmos de interpolação utilizados na modelagem dos dados de topografia e obtenção das diferentes bases de dados de saída para elaboração do MDT e do modelo geológico 3D de superfície;
- *Statistica'99* da *StatSoft Inc.* – pacote computacional composto por diversos módulos integrados de análises estatísticas univariada (estatísticas descritivas e regressão linear) e multivariada (análise de agrupamentos);
- *Sistema GeoVisual 2.1* – conjunto de programas com o qual foi possível a realização de análises estatísticas e geoestatísticas (regularização da base de dados das sondagens, variografia exploratória, validação cruzada, krigagem ordinária e cokrigagem);
- *ArcView 3.1* e extensão *3D Analyst* do *Environmental Systems Research Institute Inc (ESRI)*. – aplicativo, em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizado na integração das informações obtidas nas etapas de análises para a elaboração do MDT, do modelo geológico 3D de superfície e dos mapas de uso sugerido de fundações.

CAPÍTULO 4

CARACTERIZAÇÃO GERAL DE FORTALEZA

4.1 - LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo do presente projeto de pesquisa situa-se na porção nordeste do Município de Fortaleza, Ceará, sendo representada por um retângulo com 8 km de comprimento com direção E-O e 5,5 km de largura (Figura 4.1), perfazendo 44 km². Os limites geográficos são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Coordenadas limites da área de estudo

Ponto	Latitude (S)	Longitude (W.Gr)
A	3 ^o 43' 17,3"	38 ^o 32' 24,9"
B	3 ^o 43' 16,9"	38 ^o 28' 4,5"
C	3 ^o 46' 15"	38 ^o 32' 24,9"
D	3 ^o 46' 15"	38 ^o 28' 4,5"

4.2 - ASPECTOS CLIMÁTICOS

Segundo BEZERRA (1997), o regime térmico de Fortaleza é caracterizado por médias anuais situadas entre 23 e 29,7^oC com atenuações provocadas pela intervenção da massa de ar Convergência Intertropical (CIT). Segundo a classificação climatológica de Köppen, Fortaleza, por se tratar de uma cidade litorânea, apresenta clima do tipo Aw', tratando-se de um clima quente com regime pluviométrico tropical e deficiência hídrica moderada a baixa.

O Estado do Ceará, como outros estados do Nordeste do Brasil, não apresenta as quatro estações definidas, mas somente duas estações pluviométricas. A estação chuvosa inicia-se no mês de janeiro estendendo-se até julho com pico em abril, enquanto em agosto se instala a estação seca, que caracteriza-se por médias mensais quase nulas (Tabela 4.2).

O sentido dos ventos em Fortaleza é predominantemente sudeste para noroeste em quase em todo decorrer do ano; em alguns momentos da estação chuvosa, estes mudam de sentido. A umidade relativa, nos meses de pico chuvoso, é 87%, enquanto,

nos meses de início da estação seca, valores de 72% podem ser constatados (MORAIS, 1984).

Tabela 3.2 - Dados de pluviométricos mensais do período de 1976 a 2002

	Jan.	Fev	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez	Total
Média	108,4	201,0	340,6	355,5	190,3	157,9	86,3	30,6	23,8	13,8	11,6	37,7	1557,4
Máx.	256,4	463,4	765,1	817,5	403,6	593,6	253,7	130,0	165,7	50,0	39,7	210,1	2836,0
Min.	7,6	47,6	104,4	100,9	53,3	12,4	1,8	0,0	0,0	0,0	0,6	1,9	955,2

FONTE: Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos - FUNCEME/SRH

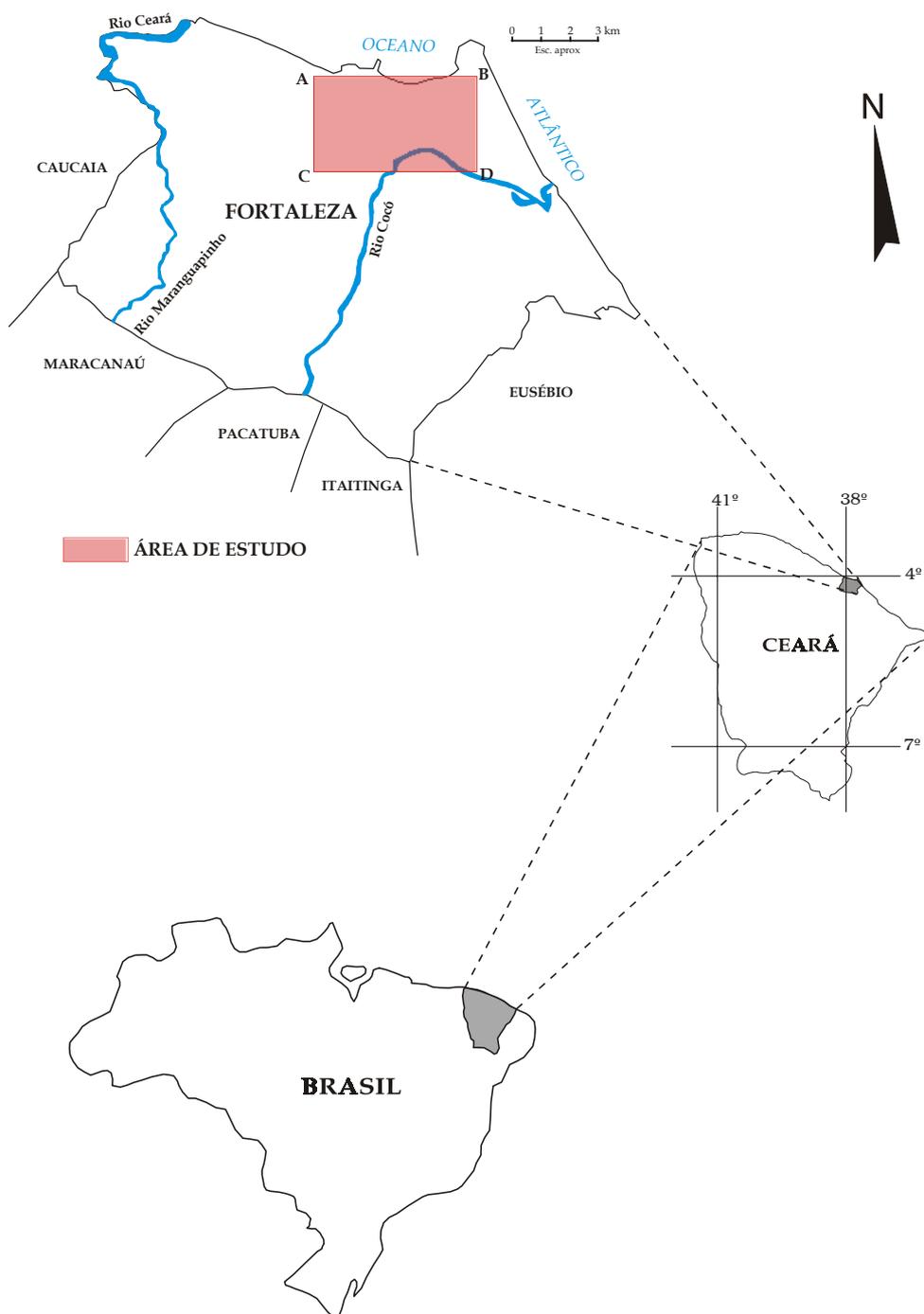


FIGURA 4.1 - Mapa ilustrativo de situação e localização da área de estudo

4.3 – CONTEXTO GEOMORFOLÓGICO

A área de estudo é compartimentada em duas unidades de relevo, a saber: *Glacis Pré-litorâneos* e *Planície Litorânea*. A primeira unidade comporta duas sub-unidades: os Interflúvios Tabuliformes, individualizados pela incipiente incisão da rede de drenagem, com topos planos e de pouca convexidade, com cotas topográficas baixas e com suave inclinação em direção ao mar. É constituído pelos sedimentos terciário-quadernários da Formação Barreiras com recobrimento vegetal secundário de porte arbóreo-arbustivo. Os principais interflúvios são delimitados pelo alto curso do Rio Cocó com uma Planície Fluvial que apresenta oferta hídrica considerável nos períodos de cheia (Figura 4.2).



FIGURA 4.2 – Vista parcial do rio Cocó e respectiva planície de inundação. Notar que existe uma trave de um campo improvisado de futebol (centro da foto), indicando que na maior parte do ano, este trecho do rio fica seco.

A Planície Litorânea ocorre bordejando os limites da costa em que se desenvolvem os sistemas de Praia, Flúvio-marinho e Eólicos (dunas). Os sistemas de praia são governados pelos regimes de onda e marés, os quais são governados pelo regime de ventos e pelos mecanismos de circulação oceânica, respectivamente. No Município de Fortaleza, o sentido preferencial do *trend* de ondas é sudeste para noroeste. O sistema flúvio-marinho ocorrente na área em estudo é representado pelos médio e baixo cursos rio Cocó (porção centro-leste), onde se observa a influência marinha evidenciada pela presença de vegetação de mangue. Trata-se de um sistema de complexo equilíbrio ambiental e, de fragilidade ecológica pronunciada por ser interface para sistemas costeiros e continentais.

Os campos de dunas, enquadrados na Planície Litorânea, segundo SOUZA (1988) e BRANDÃO (1998), constituem a forma de relevo com cotas superiores de 50m e são eventualmente interrompidos pelas planícies fluvial e flúvio-marinha do citado rio. Os campos de dunas apresentam duas gerações de dunas, uma mais recente e susceptível à dinâmica eólica, sendo conhecidas como dunas móveis e; uma outra geração, mais antiga, denominadas de dunas fixas, as quais apresentam uma cobertura vegetal de porte expressivo (Figuras 4.3 e 4.4).



FIGURA 4.3 - Duna com vegetação fixadora situada próxima à planície do Rio Cocó.



FIGURA 4.4 - Vista aérea da foz do Rio Cocó, com destaque ao campo de dunas situado na margem leste (Fonte: CD-ROM *Fortaleza 2.0 - Guia Digital*, 2001).

4.4 - CONTEXTO GEOLÓGICO

4.4.1 – FORMAÇÃO BARREIRAS

Segundo MORAIS (1984) e BRASIL (1998), os materiais da Formação Barreiras são compostos por sedimentos areno-argilosos, consolidados a inconsolidados, com coloração avermelhada, creme ou amarelada, mal selecionados, de granulação variando de fina a média, com níveis conglomeráticos e lateríticos. A matriz é argilosa, predominando o tipo caolinítico. Localmente, o grãos podem estar cimentados. A estruturação é incipiente, representada, algumas vezes, por uma estratificação plano-paralela discreta. Em porções localizadas, notadamente nos níveis cascalhosos, pode-se observar uma fraca estratificação paralela e/ou cruzada. A mineralogia dos clastos é constituída essencialmente por cristais de quartzo e, mais raramente, de feldspato e lateritas (Figuras 4.5 e 4.6).

BIGARELLA (1975 *apud* COLARES, 1996) admitiu como condição paleoambiental de deposição dos sedimentos da Formação Barreiras, um sistema essencialmente continental em que prevaleceram condições climáticas semi-áridas, com incremento de chuvas esporádicas e violentas. A forma de deposição seria em leques aluviais coalescentes nos sopés das vertentes mais ou menos íngremes, quando de uma época de regressão marinha. A idade atribuída pelo referido autor, é miocênica superior a pleistocênica. Os sedimentos desta unidade encontram-se à retaguarda das paleodunas e dos campos de dunas.



FIGURA 4.5 – Afloramento da Formação Barreiras próximo ao Km 1 da BR-116.



FIGURA 4.6 – Afloramento da Formação Barreiras. Destaque para um nódulo laterítico, que ocorre geralmente associados em níveis de seixos nesta unidade geológica.

4.4.2 - PALEODUNAS

As paleodunas ocorrem, segundo BRASIL (1998), como uma faixa mais ou menos contínua ao longo da costa cearense, repousando discordantemente sobre os sedimentos da Formação Barreiras e, em grande parte, cobertas pelas dunas móveis ou recentes. São compostas por areias bem selecionadas, de granulometria fina a média, por vezes siltosa, com tons amarelados, alaranjados e acinzentados, de composição quartzosa e/ou quartzo-feldspática.

Na área estudada, os afloramentos são virtualmente inexistentes, devido à intensa urbanização das áreas mais propícias a uma identificação positiva. Por outro lado, tais afloramentos podem ser facilmente confundidos com os da Formação Barreiras. O critério de distinção é o grau de coesão, que nos sedimentos desta formação é mais pronunciado.

4.4.3 - SEDIMENTOS ALUVIONARES

São representados, principalmente, por aluviões da calha e por sedimentos da planície de inundação do rio Cocó, os quais são compostos por areias mal selecionadas cuja granulometria varia de média a grossa. Nas planícies de inundação, o sedimento é essencialmente silto-argiloso com alguma areia e muita matéria orgânica (BRASIL, 1998).

Além de aluviões e de depósito de planícies de inundação, ocorrem também, depósitos flúvio-marinhos que são compostos por depósitos de areia, cascalhos, siltes, argilas com ou sem matéria orgânica, como produtos da interação dos processos costeiros e fluviais.

4.4.4 - DUNAS

As dunas constituem grandes depósitos eólicos formados a partir da remoção da face de praia pela deflação eólica. Distribuem-se como um cordão contínuo, disposto paralelamente à linha de costa, com uma largura média de 2-3 km e espessuras atingindo 30m. São compostas por areias de cor branca, bem selecionadas de granulometria fina a média, quartzosas, com grãos foscos e arredondados. Algumas delas encerram em si, níveis de minerais pesados. As dunas geralmente estão assentadas diretamente sobre os sedimentos da Formação Barreiras e sua continuidade é interrompida pelas planícies flúvio-marinhas dos rios Cocó e Ceará, este último situado no extremo oeste de Fortaleza (BRANDÃO, 1998).

4.5 - CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA BÁSICA DE FORTALEZA

4.5.1 - MAPEAMENTO GEOTÉCNICO PRELIMINAR

COLARES (1996) apresentou um conjunto de documentos cartográficos resultantes do mapeamento geotécnico preliminar da Região Metropolitana de Fortaleza, que objetivou a individualização de unidades geotécnicas, como substrato para atividades de uso e ocupação do meio físico. Sintetizou o estudo na forma de uma Carta de Zoneamento Geotécnico Preliminar, elaborada com o processo de superposição dos mapas de substrato rochoso, de materiais inconsolidados e da carta de declividades. Para a identificação das unidades, o referido autor utilizou um sistema de codificação por dígitos (Tabela 4.3 e Figura 4.7).

As unidades geotécnicas definidas, como mostrado na Figura 4.5, foram interpretadas quanto às suas potencialidades frente a um número finito de formas de uso e ocupação do meio físico, quais sejam: disposição de resíduos urbanos e cemitérios, fundações, potencialidade à ocorrência de eventos desastrosos, disposição de águas servidas residenciais e condições de escavabilidade. Os resultados são apresentados na Tabela 4.4 (COLARES, 1996).

TABELA 4.3 – Atributos do Zoneamento Geotécnico Preliminar de Fortaleza (Modificada de COLARES, 1996)

1 - 2 - 3 - 4 - 5

Origem	Textura	Substrato rochoso associado	Espessura dos materiais inconsolidados (m)	Classes de declividades (%)
1. Residual	1. Areia fina a média	1. Complexos gnáissico-migmatítico e	1. < 0,5	1. 0 - 2
2. Coluvial	2. Areia siltosa	3. gnáissico-granítico	2. 0,5 - 10,0	2. 2 - 5
3. Aluvial	3. Areia argilosa		3. 1,0 - 5,0	3. 5 - 10
4. Eólico (dunas e paleodunas)	4. Areia argilo-siltosa	2. Granitos	4. 2,0 - 3,0	4. 10 - 20
	5. Argila arenosa	3. Formação Barreiras	5. 3,0 - 5,0	5. > 20
	6. Seixos e/ou blocos		6. 5,0 - 10,0	
			7. 10,0 - 15,0	

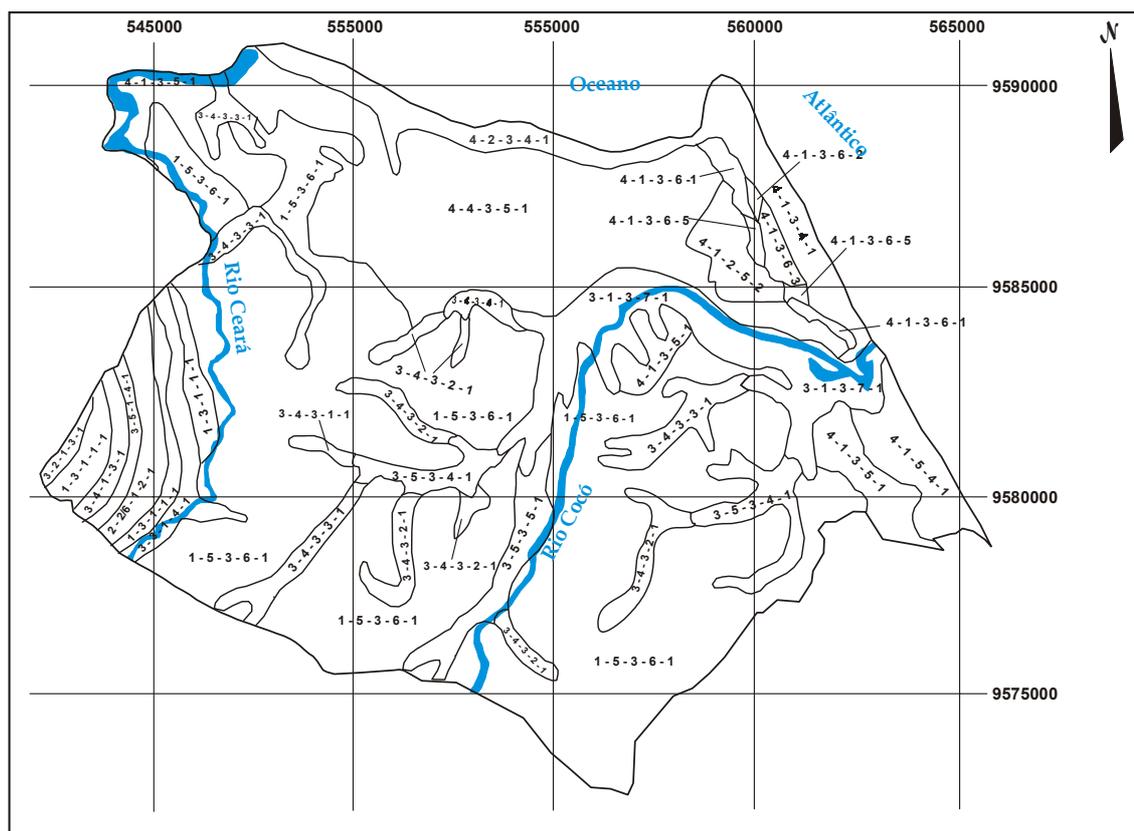


FIGURA 4.7 – Mapa de zoneamento geotécnico preliminar de Fortaleza, escala (Modificada de COLARES, 1996, escala aproximada 1:192300)

➤ *Disposição de resíduos urbanos e cemitérios*

- ❖ *Favorável*: totalidade dos atributos apresentam características geológico-geotécnicas compatíveis com a forma de ocupação e pelo menos dois atributos de importância secundária são admitidos na classe moderada e as soluções de engenharia não implicam em custos onerosos;
- ❖ *Moderada*: 80% dos atributos apresentam características geológico-geotécnicas favoráveis e moderadas, mas considerando a possibilidade de ocorrência de impactos ambientais negativos, motivando a implantação de soluções tecnológicas onerosas e/ou complexas;
- ❖ *Restritiva*: Apenas 20% dos atributos classificam a unidade como favorável ou moderada definindo-a como um área cuja ocupação exigirá cuidado e recursos tecnológicos onerosos podendo inviabilizar a ação interveniente, além de resultar em impactos negativos e a possibilidade de deflagração de evento desastroso.

➤ *Fundações*

Esta forma de ocupação do meio físico foi analisada adotando o critério de profundidade de ocorrência de valores de $N \geq 30$ golpes. COLARES (1996) fixou este valor por considerar que a maioria das obras civis estão apoiadas em níveis que apresentam tal valor.

➤ *Potencialidade à ocorrência de eventos perigosos*

Os seguintes eventos foram considerados por apresentarem maiores potencialidades de ocorrência na cidade de Fortaleza:

1. Movimentos de dunas
2. Movimentos de massas
3. Erosão continental
4. Inundações

➤ *Disposição de águas servidas residenciais*

Na análise das unidades geotécnicas, a questão da implantação de uma infra-estrutura de saneamento básico foi considerada, levando em conta a utilização equipamentos de uso eficiente e baixo custo para a disposição de águas servidas. As categorias utilizadas na identificação da vocação das unidades quanto a esta forma de ocupação foram:

- 0 – Inadequadas
- 1 – Fossas sépticas
- 2 – Tanques sépticos com drenos laterais e profundidade máxima de 1 metro.

➤ *Condições de Escavabilidade*

Com a finalidade de orientar a execução de obras civis que necessitam de uma etapa de escavação do sítio, as unidades geotécnicas foram avaliadas quanto à escavabilidade de acordo com as seguintes condições:

❖ Quanto aos equipamentos a serem utilizados

1. Manuais (picaretas, enxadas, etc.)
2. Mecânicos (retroescavadeiras e similares)
3. Explosivos
 - I - Sem escoramento
 - II - Com escoramento

❖ Quanto à profundidade que pode ser atingida com o equipamento

- a) < 2m
- b) < 5m
- c) < 10m

TABELA 4.4 - Potencialidades das unidades geotécnicas frente à demanda das formas de uso e ocupação consideradas na cidade de Fortaleza (Modificada de COLARES, 1996)

Formas de ocupação Unidade	Disposição de resíduos urbanos e cemitérios	Fundações (N _{SPT} > 30)	Eventos perigosos	Disposição de águas servidas em residências	Condições de escavabilidade
1-3-2-1-1	F	> 0,5	3	2	3aI
1-5-3-6-1	F	> 10	3	1	1cII
3-4-3-2-1	R	> 10	4	0	1aI
3-5-3-4-1	R	> 10	4	0	1bII
3-1-3-7-1	R	> 15	4	0	1cII
3-3-3-3-1	R	> 10	4	0	1aI
3-2-3-2-1	R	> 10	4	0	1aI
3-4-3-3-1	R	> 10	4	0	1aI
4-1-3-6-1	R	> 12	1	2	1cII
4-1-3-5-1	R	> 10	1	2	1bII
4-1-3-4-1	R	> 10	1 e 3	2	1bII
4-4-3-5-1	R	> 10	1	2	1bII
2-2/6-1-2-1	F	> 1	3	1	1aI
4-1-3-6-2	R	> 12	1	2	1cII
4-4-3-5-2	R	> 10	1	2	1bII
4-1-3-6-3	R	> 12	1	2	1cII
4-1-3-6-5	R	> 12	2	2	1cII

Mesmo considerando a escala (1:100.000) em que COLARES (1996) propôs o zoneamento geotécnico geral da Região Metropolitana de Fortaleza, muitas informações de interesse podem ser acessadas.

No que diz respeito à seleção de áreas para construção de aterros, todas unidades, com exceção da unidade 2-2/6-1-2-1, possuem sérias restrições devido, basicamente, à intensa ocupação do espaço. Por esta razão, o aterro de resíduos sólidos de Fortaleza foi construído no município de Caucaia situado ao oeste da capital. Em um período anterior, a função de aterro sanitário, em Fortaleza, era exercida por um “lixão” conhecido como o aterro do Jangurussu (atualmente desativado), que se tornou uma fonte ativa de contaminação para as águas subterrâneas e superficiais, no caso do rio Cocó.

No que trata da execução de fundações, se observa que ocorre uma forte vocação das unidades geotécnicas a servirem de suporte a elementos estruturais indiretos diversos, apesar de muitos destes apresentarem limites de impenetrabilidade distintos, conforme mostram AOKI & CINTRA (2003) e, assim estas informações devem ser consideradas com muitas ressalvas.

Na Tabela 4.4, se observa que 35% das unidades estão relacionadas com problemas decorridos de inundações que ocorrem nas épocas de estações chuvosas rigorosas. Tais unidades estão associadas às planícies de inundação dos rios Ceará e Cocó, que apesar da legislação ambiental vigente, há populações ribeirinhas que vivem à mercê das variáveis climáticas e hidrológicas.

Eventos de erosão continental ocorrem em 24% das unidades delimitadas e estão igualmente relacionados às épocas de estações chuvosas mais intensas que favorecem o aumento da vazão dos rios. Apenas uma unidade apresenta a possibilidade de ocorrência de evento de movimento de massa, que está relacionada a uma duna com intensa ocupação irregular urbana por parte de população de baixa renda. No entanto, 41% das unidades geotécnicas são acometidas por eventos de migração de dunas, que pode ser favorecida pela remoção da vegetação fixadora decorrente do processo de ocupação desordenada das áreas compreendidas por estas unidades.

As condições de disposição de águas servidas, listadas na Tabela 4.3, mostram como a coleta dos sistemas de esgoto residenciais ainda ocorre. Contudo, em um programa de implantação infra-estrutura de saneamento básico no Município de Fortaleza (Projeto SANEAR), executado pelo governo do Estado do Ceará com auxílio verba federal, visa, em uma etapa preliminar, integrar as fossas residenciais à tubulação da rede de esgoto projetada para posterior encaminhamento a uma estação de tratamento de esgotos.

De acordo com o que consta na Tabela 4.4, os materiais geológicos apresentam boa escavabilidade, com exceção da unidade 1-3-2-1-1 cujo substrato rochoso é granítico e que necessita do uso de explosivos. De maneira geral, os trabalhos de implantação de obras civis, não necessitam de aparato pesado para remoção dos materiais, a não ser que seja necessária a retirada de grandes volumes em curto intervalo de tempo.

4.5.2 - PRÁTICA DE FUNDAÇÕES EM FORTALEZA

Segundo MOURA (1997), nas décadas de 50/60, os prédios construídos limitavam-se a apenas três ou quatro andares e o conhecimento da capacidade de suporte dos solos baseava-se na experiência dos construtores, os quais utilizavam um valor básico de 100kPa. As fundações utilizadas na época eram, na grande maioria, diretas.

Na década de 70, com o aumento expressivo da pressão da ocupação do meio físico, a construção de edificações com oito andares tornou-se acentuada e o projeto de fundações tomava como referência de cálculo as formulações semi-empíricas baseadas em sondagens com SPT. Nesta década, as empresas passaram a utilizar estacas pré-moldadas e metálicas para atingir profundidades de suporte acima de 12m. No entanto, o uso de estacas metálicas entrou em declínio a partir da década de 80, em virtude da elevação dos preços dos produtos, que eram adquiridos como sucata de trilhos ferroviários. Apesar do uso de estacas como elementos estruturais de fundação profunda, segundo GUSMÃO FILHO (1982), muitos edifícios com 6 andares utilizam fundações diretas em areias de dunas ou de praias com $N_{SPT} = 8$.

MOURA (1997) relata que, na década de 90, o desenvolvimento da cidade e a crescente especulação imobiliária elevaram o preço do metro quadrado de terreno, o que motivou a construção de prédios com 16 andares, incluindo as grandes edificações comerciais, alguns destes com subsolos com 2 pavimentos no subsolo.

Com o crescimento vertical se intensificando e a utilização dos trilhos, como estacas a custos cada vez mais proibitivos, outras soluções construtivas alternativas como estacas Franki e estacas raiz, passaram a fazer parte das rotinas de projeto e execução por parte das empresas atuantes em Fortaleza (Figura 4.8).



FIGURA 4.8 – Vista de parte do litoral norte de Fortaleza, em que se observa forte concentração de grandes edifícios residenciais, alguns comerciais e hotéis de luxo (Fonte: CD-ROM *Fortaleza 2.0 – Guia Digital* 2001).

CAPÍTULO 5

RESULTADOS: APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO

5.1 - MODELAGEM DIGITAL DE TERRENO

5.1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

Para a finalidade de construção do Modelo Digital de Terreno (MDT) da área em estudo, se procedeu em alguns testes de algoritmos de interpolação. A base de dados altimétricos originais consta de 622.004 pontos de coordenadas $z_i(x,y)$, obtidos com a conversão dos nós das polilinhas digitalizadas da base cartográfica na escala de 1:2.000 em uma planilha de dados. Para converter estes nós em pontos, utilizou-se o programa *Dxf2xyz* 1.3 com o qual foi possível obter a base de dados.

Como maneira de conduzir os testes, optou-se por uma malha regular representativa e menos densamente amostrada, com espaçamento de 75m, obtida a partir da aplicação do algoritmo Vizinheiro Mais Próximo, que consiste na valoração do nó da malha com a tomada do valor do ponto mais próximo (Figura 5.1).

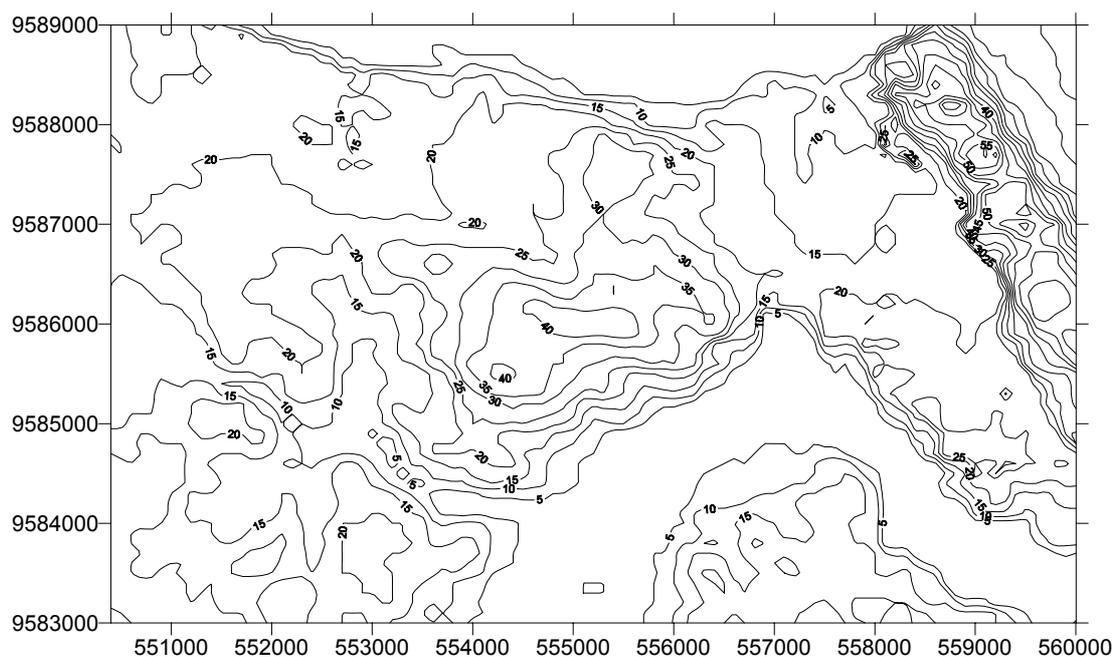


FIGURA 5.1 - Mapa topográfico utilizado como amostra da base cartográfica no processo de testes dos algoritmos de interpolação (Escala aproximada 1 : 71430).

É possível observar que, mesmo utilizando um método que não aplica uma formulação matemática de interpolação da malha representativa, pequenos artefatos aparecem devido à base de dados originais obtida de uma base cartográfica em escala de detalhe (1:2.000) em que o arruamento e calçadas são representadas por curvas de nível.

Os resultados alcançados com a aplicação dos métodos de interpolação selecionados foram confrontados com os dados do MDT-base através de análises estatísticas univariada e multivariada. A análise estatística univariada consistiu na comparação das estatísticas descritivas representativas de cada modelo gerado, sendo comparadas com as do MDT-base e; na verificação de correlação por regressão linear. Com técnicas da Estatística Multivariada, mais especificamente com a técnica de Agrupamento Hierárquico, foi possível obter os graus de similaridade entre os resultados dos modelos, inclusive o MDT-base, em conjunto.

A malha de saída (modelo gerado) apresenta um espaçamento de 100m, resultando em 5917 nós estimados. Para execução das análises por Regressão Polinomial, Triangulação como Interpolação Linear, Inverso do Quadrado da Distância e Curvatura Mínima, foi utilizado o aplicativo *Surfer 7 for Windows* da GOLDEN Software Inc. (1999); para a interpolação por krigagem ordinária, o *Sistema GeoVisual 2.1* de YAMAMOTO (2002) e o programa *Statistica '99 Edition for Windows* da StatSoft Inc., na Análise de Agrupamentos conforme MANLY (1994) e BROWN (1998) .

5.1.2 – APLICAÇÃO DE ALGORITMOS DE INTERPOLAÇÃO

5.1.2.1 – Análise de Superfícies de Tendência (Regressão Polinomial)

Para a análise dos dados altimétricos, procedeu-se à tentativa de ajuste a uma superfície polinomial de grau 2 (superfície parabólica) que foi interrompida devido à ocorrência de um problema de singularidade na matriz dos coeficientes do sistemas de equações. O programa utilizado na modelagem acusou esta falha de inconsistência dos dados, causada, possivelmente, pelo grande número de pontos colineares presentes na base de dados, já que os mesmos estão dispostos em uma malha regular. Por outro lado, a singularidade pode ocorrer por ocasião da inversão da matriz dos dados de coordenadas na operação de obtenção dos coeficientes dos termos do polinômio.

Problemas algébricos similares haviam sido relatados por LANDIM (1997) e YAMAMOTO (1998) e ambos sugerem uma transformação das coordenadas UTM, já

que as mesmas são da ordem centenas de milhares de metros (coordenada leste) e dezenas de milhões (coordenada norte), o que inviabiliza o cálculo das matrizes no caso, exclusivo, de ajuste a superfícies de grau igual ou superior a 2.

A transformação não foi aplicada em virtude dos problemas matemáticos anteriormente relatados do método e por não convir à finalidade principal desta parte do trabalho, que é, a partir da mesma base de dados altimétricos, testar alguns algoritmos de interpolação acessíveis em termos de pacotes computacionais e avaliar os resultados.

As considerações aqui tecidas não invalidam a aplicação da análise de superfícies de tendência em outras situações, devendo, tais considerações, ser entendidas como única e exclusivamente concernentes às tentativas de modelagem dos dados altimétricos da base cartográfica desta dissertação.

5.1.2.2 – Triangulação com Interpolação Linear

Para os testes, talvez este método não fosse um dos candidatos mais adequados – por ser mais apropriado a dados irregularmente distribuídos, mas considerou-se a facilidade computacional, o rápido processamento e seu emprego regular na construção de superfícies topográficas. O aplicativo *Surfer 7 for Windows* (chamado apenas de *Surfer* daqui em diante) apresenta a possibilidade de utilização de elipsóide de anisotropia, cuja razão, adotada neste trabalho, é unitária com ângulo de busca nulo (Figura 5.2).

5.1.2.3 – Inverso do Quadrado da Distância (IQD)

Segundo CARUSO & QUARTA (1998), as principais vantagens do IQD são o seu fácil entendimento matemático e processamento computacional simples, o que o torna aplicável a vários propósitos. Estes comentam, como uma limitação do método, a impossibilidade de extrapolação dos dados além dos limites numéricos. Tal afirmação é bastante discutível, pois há situações em que dados interpolados, além da fronteira convexa (extrapolação geométrica), poderiam fornecer uma previsão irreal ou viciada pelo incremento da distância e de difícil interpretação. Assim sendo, a limitação apontada por estes autores pode ser entendida como um ponto positivo do algoritmo, o que garante um menor nível de incertezas associadas às estimativas.

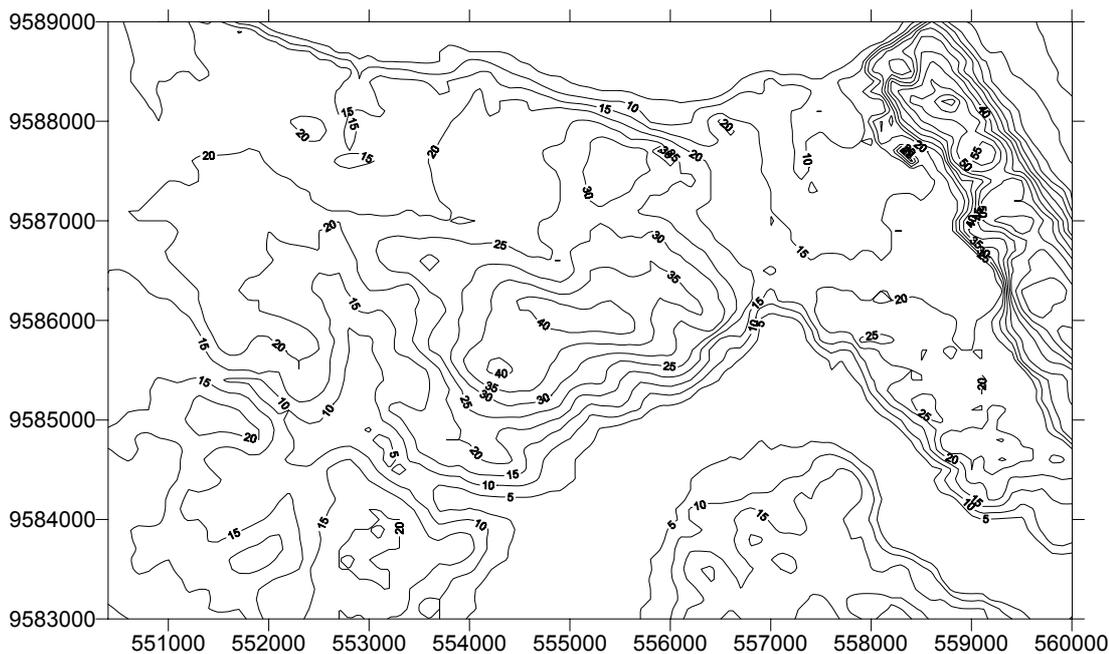


FIGURA 5.2 – Mapa topográfico elaborado com o emprego do algoritmo de Triangulação com Interpolação Linear (Escala aproximada 1 : 71430).

Para a construção do MDT, considerou-se a variabilidade espacial isotrópica (razão de anisotropia = 1 e ângulo de busca nulo) e não se atribuiu qualquer valor ao fator de suavização ($\delta = 0$) como mostra a Figura 5.3. Neste MDT, um artefato em forma de cruz (observar no círculo pontilhado) foi gerado devido à concentração de pontos de, praticamente, mesma cota topográfica, ressaltando uma falha do método diante de situações em que se necessita interpolar pontos pertencentes a uma superfície relativamente plana.

5.1.2.4 – Curvatura Mínima

A aplicação deste algoritmo para elaboração do MDT da área pesquisada envolveu testes considerando a variação nos cinco parâmetros que governam a resolução numérica da eq. (2.3) (número de iterações, valor residual máximo e tensão interna tensão de borda (T_b) e o fator de relaxamento, vide item 2.2.5, Capítulo 2).

Para efeito da realização da modelagem, o número máximo de iterações, o valor máximo do resíduo e o fator de relaxamento permaneceram constantes. Aceitou-se a recomendação de GOLDEN Software Inc. (1999) de se considerar o número máximo de iterações como sendo o dobro de nós da malha (10.000 pontos) o que resulta em 20.000 iterações. O valor máximo do resíduo foi obtido segundo a formulação abaixo:

$$\text{Valor máximo residual} = 0.001(Z_{\text{máx}} - Z_{\text{mín}})$$

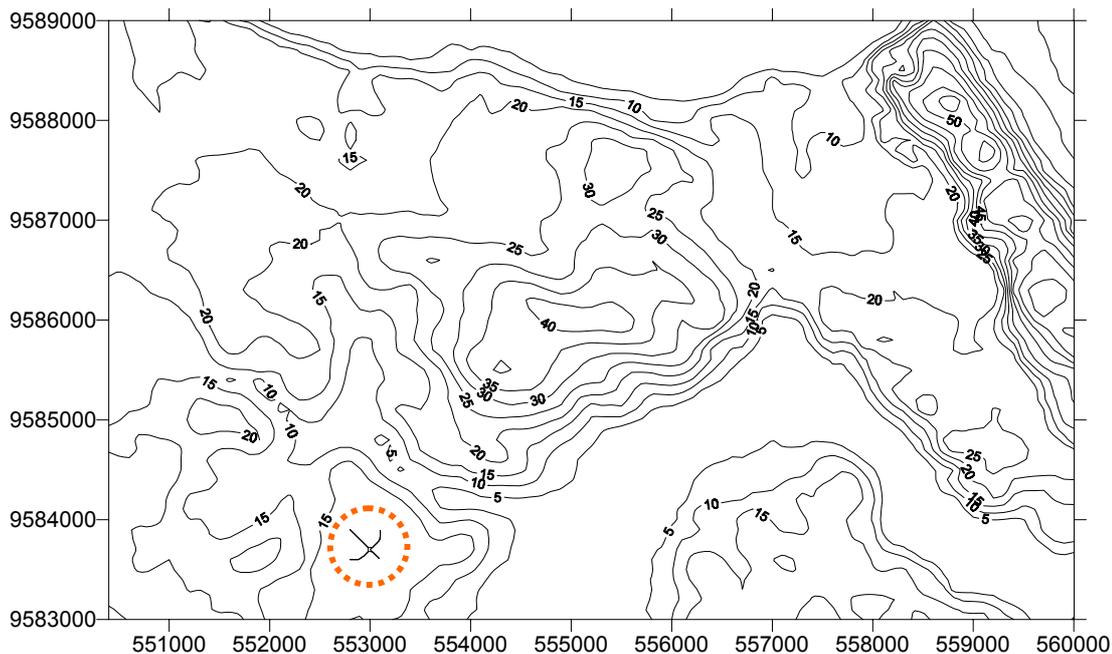


FIGURA 5.3 - Mapa topográfico elaborado com o auxílio do algoritmo do Inverso do Quadrado da Distância (IQD) (Escala aproximada 1 : 71430).

Os valores máximo e mínimo altimétricos são 64m e 1m, e deste modo o valor máximo residual é 0,063m. A elaboração de um MDT por este método implica em convergência da solução, o que foi considerado como motivação à adoção do valor 0,1 para o fator de relaxamento.

Devido ao *modus operandi* bastante particularizado deste algoritmo, alguns testes específicos foram realizados, visando se obter maior conhecimento da importância dos parâmetros no processo de modelagem da superfície. Uma malha com espaçamento de 250m obtida da base cartográfica foi utilizada como base-teste de dados. A utilização do valor nulo para T_i e T_b favoreceu a extrapolação com estimativas negativas nas bordas do modelo, bem como a formação artefatos nas porções centrais. Por outro lado, a aplicação do valor unitário a T_b com $T_i = 0$ propiciou a supressão das isolinhas negativas.

Estes testes preliminares foram repetidos com os dados da malha com espaçamento de 75m, observando-se, em primeira análise, que estimativas negativas não foram calculadas considerando condições de $T_b = 0$ e $T_i = 0$. Isto é devido ao tamanho da base de dados (mais de 10.000 pontos), conferindo uma maior precisão ao algoritmo (Figura 5.4).

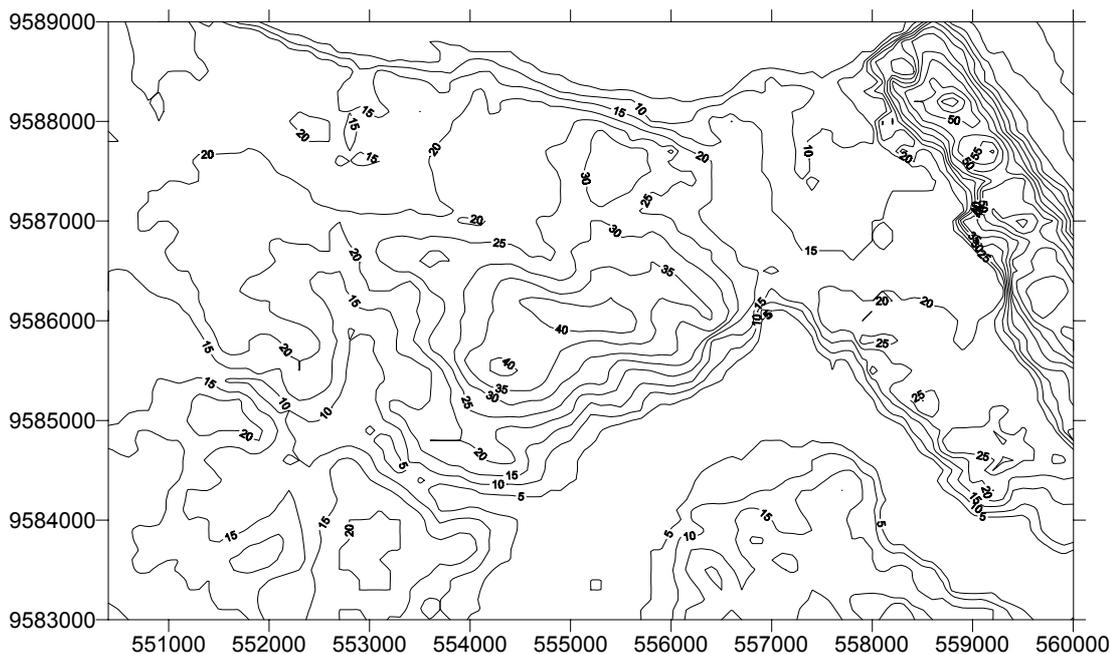


FIGURA 5.4 – Mapa topográfico obtido com a aplicação algoritmo de Curvatura Mínima, com condições de $T_i = 0$ e $T_b = 0$ (Escala aproximada 1 : 71430).

5.1.2.5 – Krigagem Ordinária

A krigagem, como conjunto de técnicas geoestatísticas de estimativa por regressão generalizada, é considerada como um método de interpolação com uma vantagem, em relação aos outros métodos, a de obtenção do mapa de variância de krigagem e/ou de interpolação, conforme YAMAMOTO (2000). Como os aspectos teóricos e práticos da Geoestatística foram abordados mais extensivamente no capítulo referente à Fundamentação Teórica e Conceitual, maior detalhamento pode ser encontrado no citado capítulo.

A aplicação da krigagem ordinária se deu inicialmente com a análise variográfica exploratória, com a qual investigou-se direções preferenciais de variabilidade espacial nos dados de altimetria. Foram modeladas duas direções de variabilidade, não obstante o modelo esférico ajustado consta de uma única estrutura, considerando-se um semi-variograma experimental isotrópico e passo de 680m, o qual é ilustrado pela Figura 5.5 e representado pela a seguinte equação:

$$\begin{cases} \gamma(h) = 154 \left[1,5 \left(\frac{h}{3,24} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{3,24} \right)^3 \right] & \text{para } h < 3,24 \text{ km} \\ \gamma(h) = 154 & \text{para } h \geq 3,24 \text{ km} \end{cases} \quad (5.1)$$

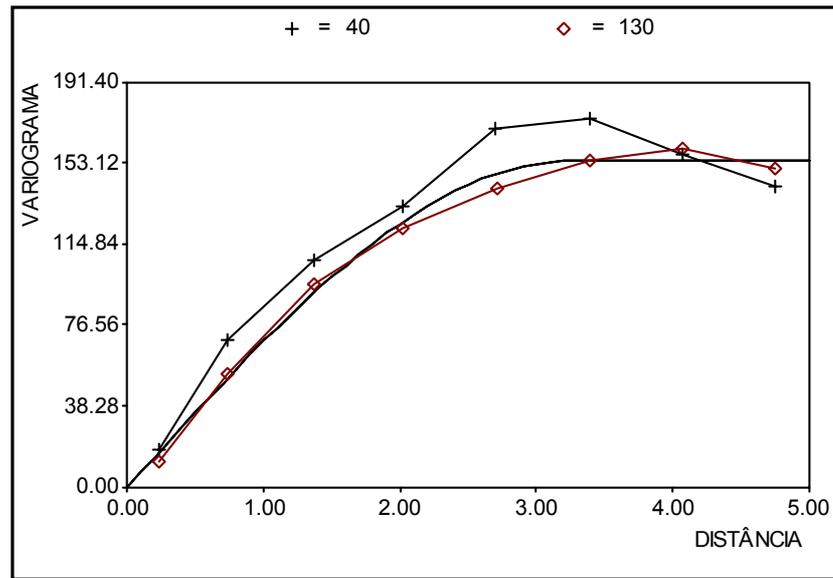


FIGURA 5.5 – Semi-variograma experimental ajustado a um modelo esférico com duas direções indicadas pela legenda (acima do gráfico). A distância está em quilômetros.

Como já foi explicado no Capítulo 2, a técnica de Validação Cruzada permite conhecer o erro verdadeiro (*valor estimado – valor real*), como apresentado na Figura 5.6. As condições de vizinhança local adotadas foram: a divisão da área em quadrantes (com um ponto cada) e distância máxima de busca de 250m.

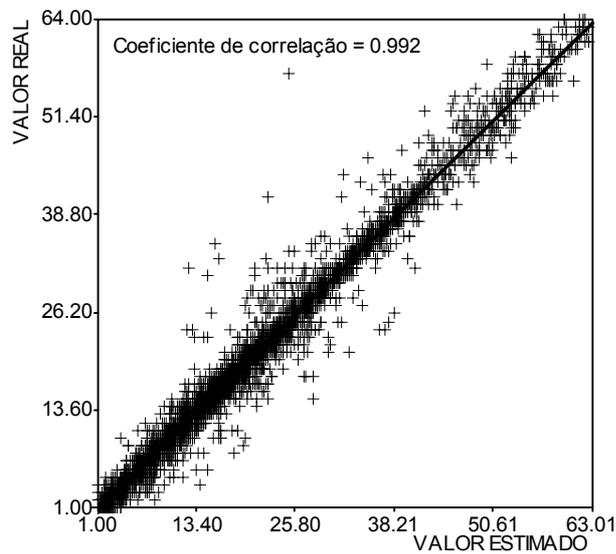


FIGURA 5.6 – Diagrama de dispersão representando o resultado da validação cruzada.

Na Figura 5.6, percebe-se que as estimativas realizadas se ajustam quase linearmente aos valores verdadeiros de cota altimétrica, significando que o modelo ajustado está coerente com a variabilidade espacial da topografia da área.

Com o processamento das estimativas (Figura 5.7), foi possível a obtenção dos mapas de variância de estimação acessíveis. As medidas consideradas no presente trabalho são: desvio de krigagem (medida tradicional) e a desvio de interpolação de YAMAMOTO (2000) (Figura 5.8 e 5.10). As condições de vizinhança local são as mesmas definidas na etapa de validação cruzada.

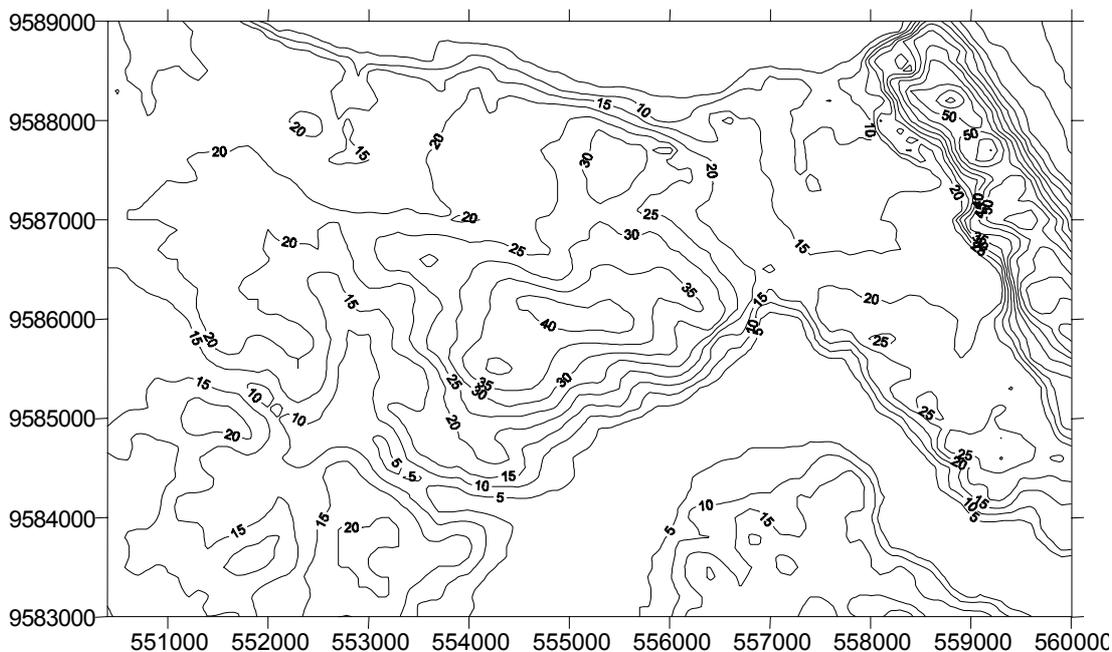


FIGURA 5.7 - Mapa topográfico elaborado com o auxílio do estimador krigagem ordinária (Escala aproximada 1 : 71430).

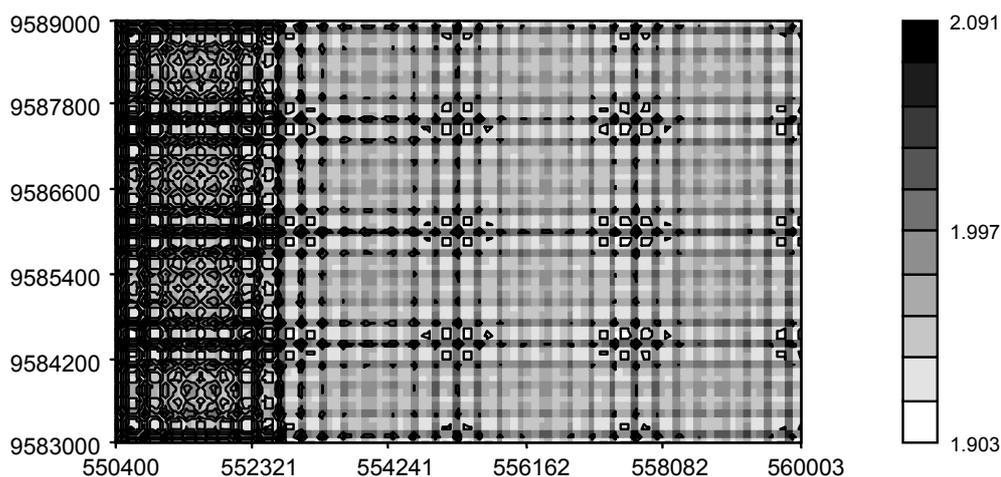


FIGURA 5.8 – Mapa de desvios de krigagem para as estimativas da cota altimétrica.

Na Figura 5.8, observa-se como a variância de krigagem é fortemente dependente do arranjo espacial dos dados, fato este relatado por JOURNAL & ROSSI (1989) e corroborado por YAMAMOTO (2000). Como as estimativas foram processadas em

uma malha regular e a boa aderência das estimativas aos valores reais (Figura 5.7) denotam baixos valores de variância de krigagem.

Com a superposição das Figuras 5.1 e 5.7, constata-se que nas áreas de altimetria mais elevada (extremo direito superior da Figura 5.9) não há ajuste perfeito das curvas interpoladas por krigagem às curvas obtidas originalmente pelo método do Vizinho Mais Próximo.

Conforme ilustra-se na Figura 5.10 (mapa de desvios de interpolação), tal medida apresenta os valores mais altos onde o ajuste, anteriormente mencionado, não ocorre. Notadamente, no extremo nordeste da área investigada, estes valores realçam a incompatibilidade de resultados da krigagem ordinária com o MDT-base.

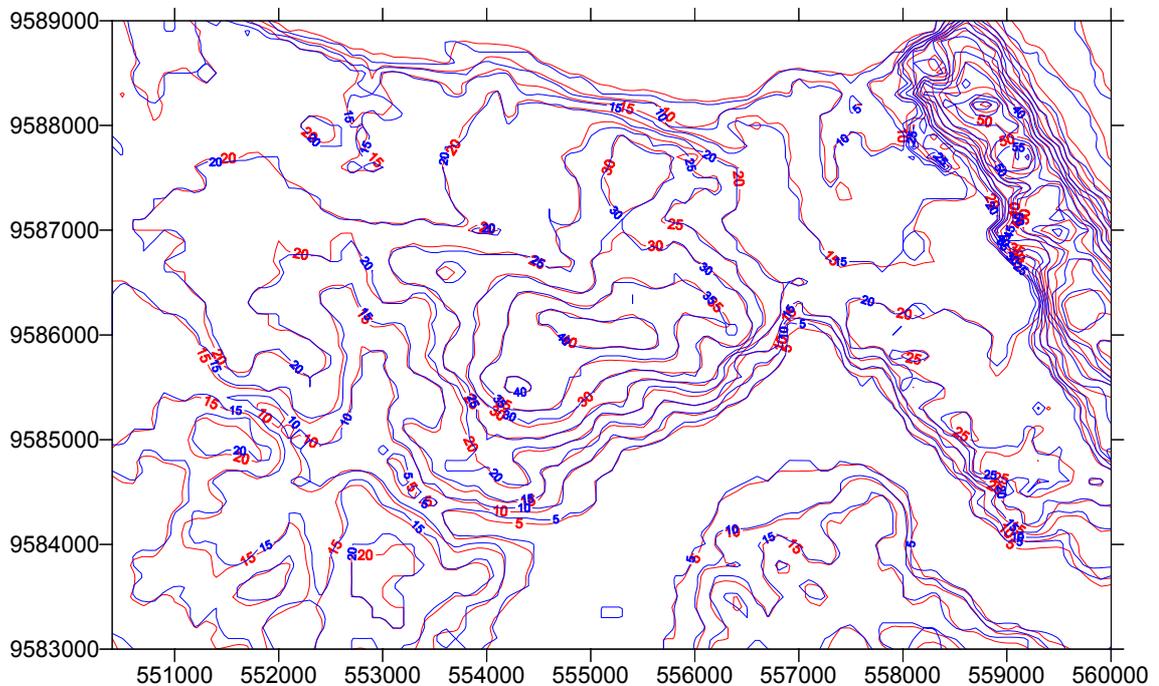


FIGURA 5.9 - Modelos digitais superpostos. As curvas em vermelho representam o MDT gerado com a aplicação da Krigagem Ordinária e as em azul representa o MDT-base (Escala aproximada 1 : 71430).

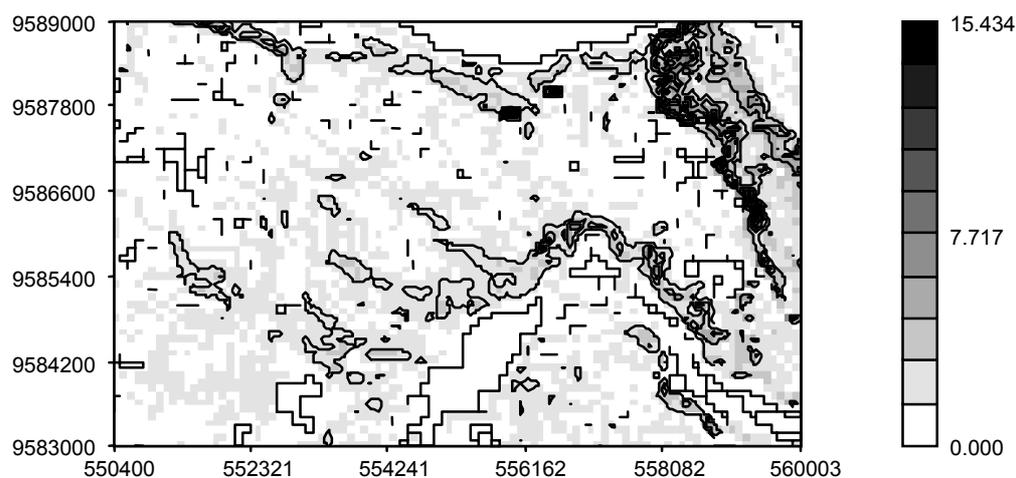


FIGURA 5.10 – Mapa de desvios de interpolação para as estimativas da cota altimétrica.

5.1.3 – ANÁLISES ESTATÍSTICAS UNIVARIADA E MULTIVARIADA

5.1.3.1 – Estatísticas Descritivas

No Capítulo 2 do presente trabalho, os fundamentos da Estatística não foram abordados, não obstante as obras de PAPOULIS (1965) e SPIEGEL (1994) foram referências básicas com suporte teórico às avaliações estatísticas realizadas. Com a observação das Figuras 5.11 e 5.12, constata-se que as estatísticas descritivas do MDT-base (Figura 5.1) foram reproduzidas fielmente nos resultados alcançados com os métodos de interpolação e o mesmo se aplica aos histogramas. Portanto, a reprodutibilidade dos resultados pode ser excluída como critério de seleção do(s) método(s) para a interpolação do MDT, a ser elaborado como produto final. Nestas figuras, uma leve assimetria revela-se, mas não interfere significativamente na diferença de valores entre os estimadores média aritmética e mediana da distribuição.

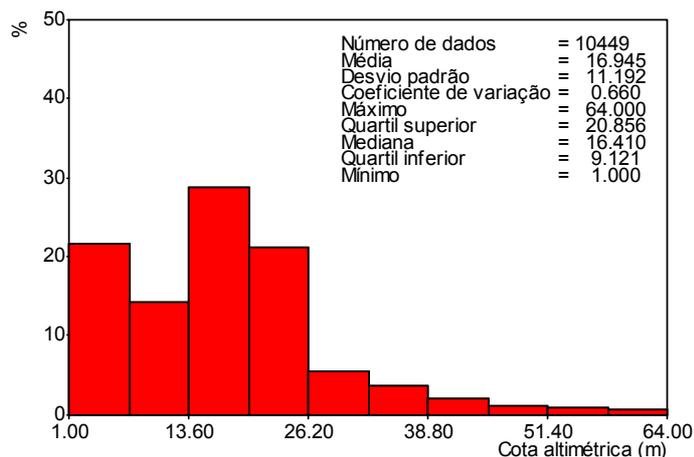


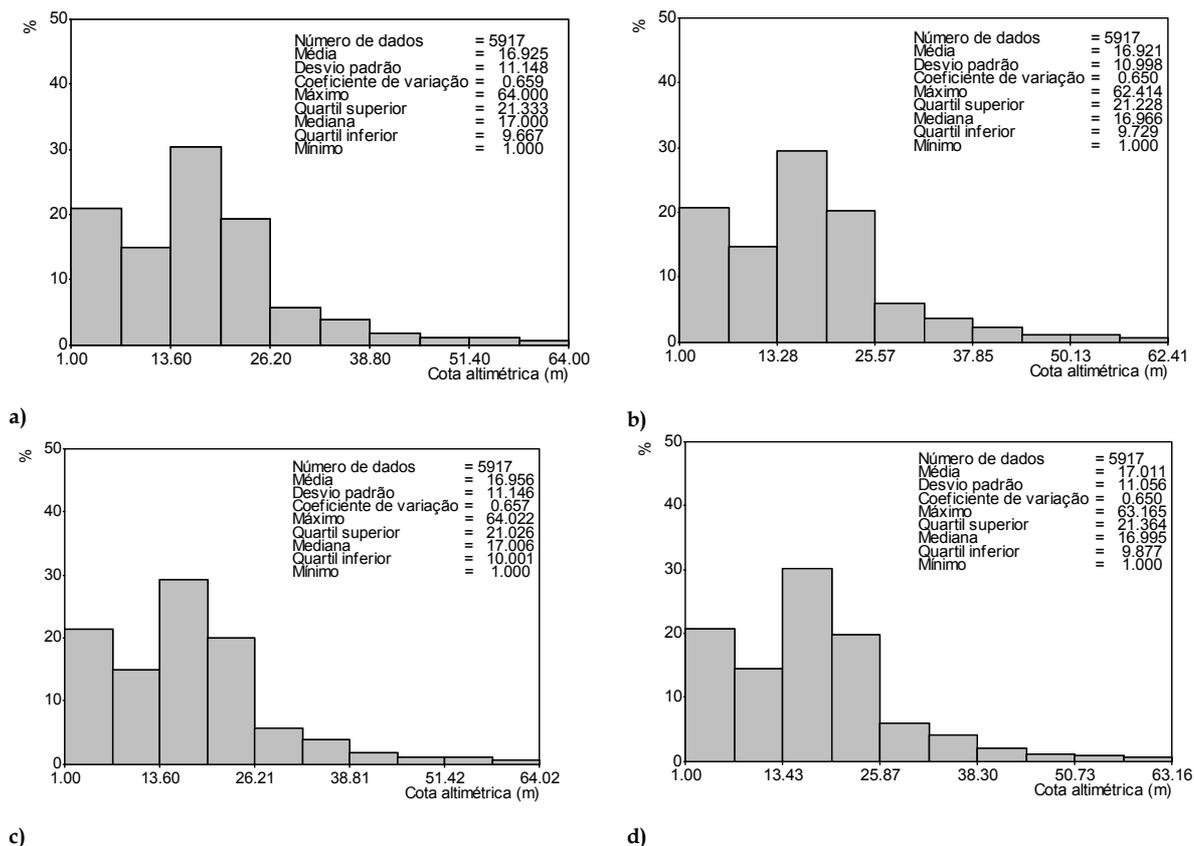
FIGURA 5.11 – Histograma de frequência simples dos dados do MDT-base utilizado nos testes dos métodos de interpolação.

5.1.3.2 – Análise de Correlação por Regressão

Assim como a reprodutibilidade dos resultados, parâmetros levantados por análise de correlação foram utilizados como critério de seleção do(s) método(s) de interpolação a ser(em) aplicado(s) na elaboração do MDT final. A Tabela 5.1 lista os parâmetros obtidos por regressão linear, assim como as Figuras 5.13 a 5.16 ilustram os gráficos das correlações obtidas.

TABELA 5.1 – Parâmetros da regressão linear para as correlações dos dados do MDT-base e dos resultados dos MDT interpolados

Algoritmo	Coeficiente de correlação de Pearson (r^2)	Desvio-padrão (s)
Triangulação com Interpolação linear	0,99687452	0,88087081
IQD	0,99637082	0,93627135
Curvatura Mínima	0,99638287	0,94735090
Krigagem Ordinária	0,98895564	1,63890952



c) **d)** FIGURA 5.12 – Histogramas de frequências simples dos dados dos MDT's interpolados utilizando os métodos investigados: a) Triangulação com Interpolação Linear; b) Inverso do Quadrado da Distância; c) Curvatura Mínima e; d) Krigagem Ordinária.

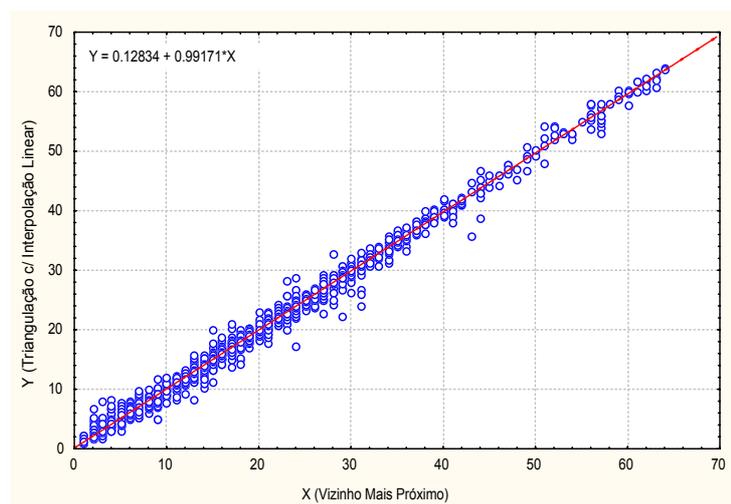


FIGURA 5.13 – Diagrama de correlação entre os valores do MDT-base os dados interpolados por Triangulação com Interpolação Linear.

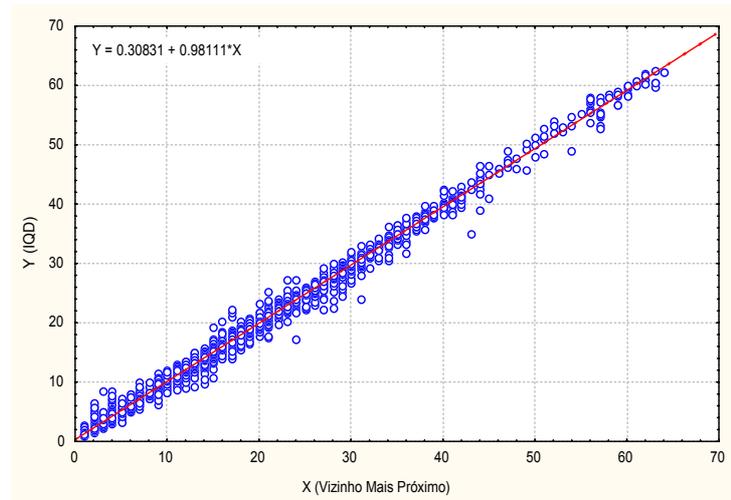


FIGURA 5.14 – Diagrama de correlação entre os valores do MDT-base os dados interpolados por IQD.

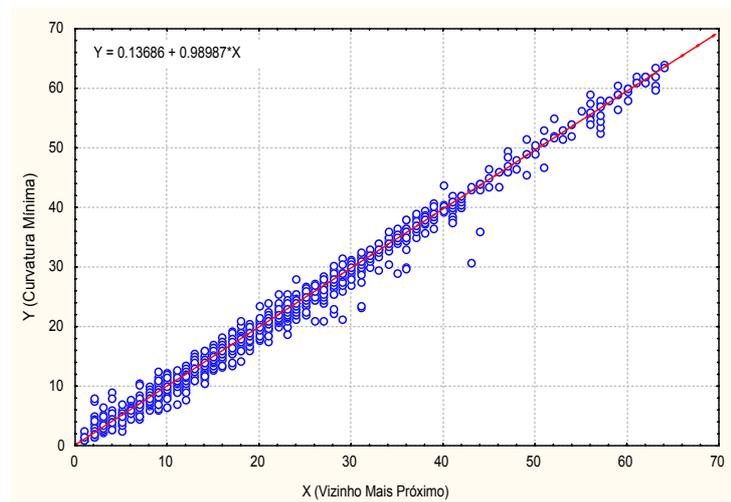


FIGURA 5.15 – Diagrama de correlação entre os valores do MDT-base os dados interpolados por Curvatura Mínima.

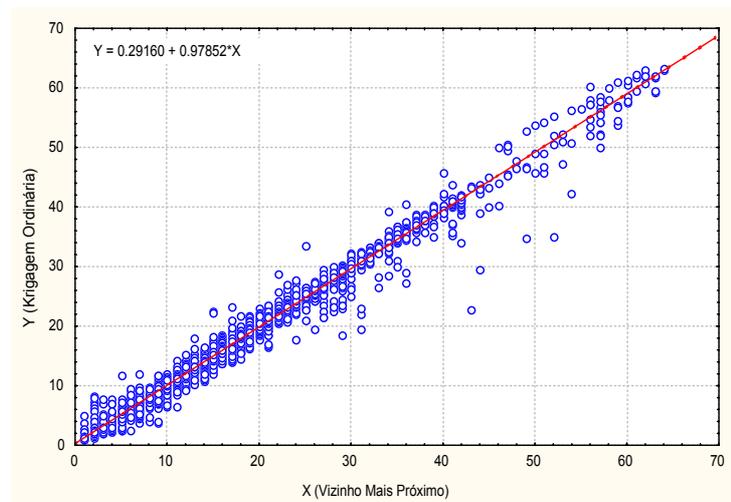


FIGURA 5.16 – Diagrama de correlação entre os valores do MDT-base os dados interpolados por Krigagem Ordinária.

Como mostra a tabela 5.1, os coeficientes de correlação são representados por valores muito próximos, com uma diferença de ordem prática quase desprezível. Contudo, os valores deste coeficiente e do desvio-padrão da regressão são o maior e menor, respectivamente, dentre os outros. A representação gráfica da medida de desvio pode ser observada na Figura 16, na qual pontos mais distantes da reta de regressão são mais evidentes.

Em contraste ao evidenciado com a krigagem ordinária, os melhores resultados de coeficiente de correlação e desvio-padrão da regressão foram conseguidos com a aplicação do algoritmo de Triangulação com Interpolação Linear. Assim sendo, preliminarmente, deduz-se que a krigagem ordinária é um forte candidato a ser excluído como método de interpolação mais adequado para a elaboração do MDT da área de estudo do presente trabalho.

5.1.3.3 – Análise de Agrupamentos

A análise de agrupamento trata-se um método de investigação da similaridade eventualmente existente entre variáveis e/ou casos (valores das variáveis). Como explicam MANLY (1994) e BROWN (1998), existem vários algoritmos disponíveis para a realização das análises. No presente trabalho, foi enfocada a técnica de agrupamento hierárquico, com a qual, variáveis ou casos são associados em agrupamento por critérios de similaridade. Deste modo, grupos similares são seletivamente separados. A representação gráfica destes agrupamentos é obtida com a elaboração de um *dendrograma* (Figura 5.17). Em certos casos, quando trabalha-se com um grande número de variáveis, a análise de agrupamento pode ser aplicada como uma ferramenta de identificação de associações redundantes entre as variáveis. Correlações previamente consideradas podem ser confirmadas, além de se constituir de uma etapa de pré-processamento para outras técnicas analíticas.

A abordagem hierárquica pode ser utilizada a partir de várias técnicas de agrupamento (ligação simples, ligação completa, agrupamento ponderado, etc.) cujos resultados são organizados por medidas de similaridade, dentre estas, a distância euclidiana, a distância generalizada D^2 de Mahalanobis, o coeficiente de correlação de Pearson (r^2), etc. (MANLY, *op. cit.*).

Utilizou-se o procedimento de agrupamento hierárquico na tentativa de observar uma relação de similaridade entre os resultados do possível candidato a ser utilizado

como algoritmo de interpolação do MDT final e os dados do MDT-base. Para isto, adotou-se o método da ligação simples como método de agrupamento e a distância euclidiana como medida de similaridade (ver equação empregada no algoritmo IQD).

A Figura 5.17 ilustra o dendrograma resultante dos procedimentos analíticos, mostrando graficamente relações de similaridade, sutilmente, observadas nas correlações por regressão linear. Nesta Figura, quatro agrupamentos foram formados, conforme listados na Tabela 5.2. O agrupamento 1 é o de maior similaridade, significando que, com estes algoritmos, foram alcançados resultados muito parecidos. A agrupamento 2 mostra que os resultados obtidos por Triangulação, IQD e Curvatura Mínima têm bastante similaridade.

Das duas relações apontadas claramente durante a análise de regressão linear, uma apenas foi confirmada: a Krigagem Ordinária (agrupamento 4) forneceu dados mais dissimilares de todos. Com este resultado, o estimador linear não-viesado krigagem ordinária foi descartado como método a ser aplicado na construção do MDT final.

TABELA 5.2 – Agrupamentos dos resultados obtidos com os algoritmos de interpolação na elaboração dos MDT's experimentais.

Nº do agrupamento	Agrupamento
1	Triag.- IQD
2	Triag.- IQD - Curv. Mín
3	Triag.- IQD - Curv. Mín- Viz. Mais Próx.
4	Triag.- IQD - Curv. Mín- Viz. Mais Próx - Krigagem

5.1.4 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Cinco algoritmos de interpolação foram selecionados para a realização de testes, tendo como objetivo selecionar um a ser utilizado na construção do MDT representativo da área pesquisada. De início, um deles (Regressão Polinomial) foi excluído por apresentar problemas numéricos decorrentes da elevada ordem de grandeza das coordenadas UTM. Assim, os testes foram encaminhados com os algoritmos restantes.

Em conformidade com os resultados obtidos, o estimador krigagem ordinária foi “desclassificado” pelas estimativas mais dissimilares em relação ao MDT-base. Mesmo sem efeito pepita, o histograma dos resultados apresenta-se sutilmente suavizado em relação aos valores mais altos. Apesar da aplicação da krigagem ordinária trazer

consigo a vantagem de se conhecer variância de estimativa, este estimador não foi desenvolvido para se trabalhar, necessariamente, com dados regularmente distribuídos, uma vez que a idéia é explorar o fenômeno regionalizado que nem sempre pode ser estudado se utilizando uma malha regular de amostragem.

O agrupamento 3 revela que há três algoritmos “tecnicamente empatados”, quais sejam: a Triangulação com Interpolação Linear, IQD e Curvatura Mínima. Um artefato em forma de cruz, foi criado com a aplicação do IQD relatado anteriormente, indica certa instabilidade algoritmo, o que pode ser entendido como um ponto negativo para a realização do MDT final. O algoritmo de Curvatura Mínima foi descartado devido a impossibilidade de aplicação no SIG utilizado nesta dissertação.

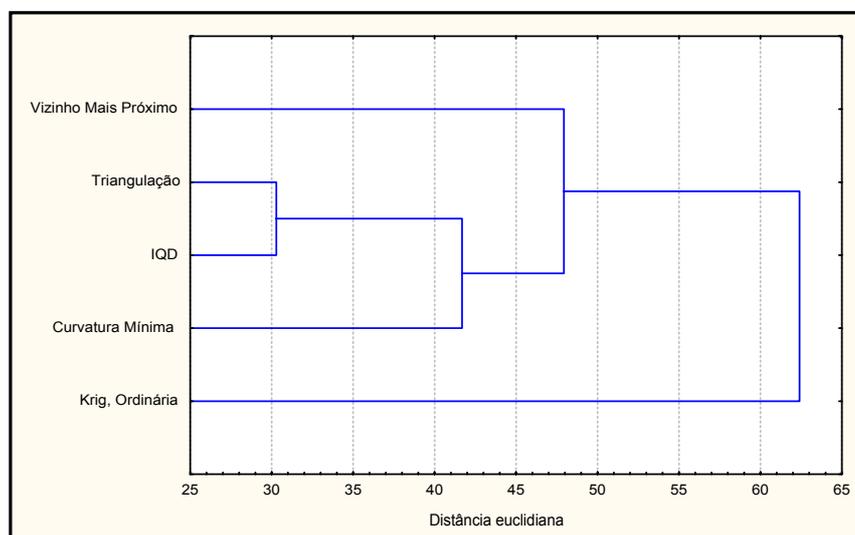


FIGURA 5.17 – Dendrograma dos resultados da aplicação dos algoritmos de interpolação.

Os resultados alcançados com o algoritmo Curvatura Mínima não o invalidam, mas levou-se em consideração a restrição relatada. Assim sendo, a Triangulação com Interpolação Linear foi selecionada para a elaboração do MDT, levando-se em conta que o mesmo apresentou o menor valor de desvio-padrão de regressão. A Figura 5.18 representa o MDT elaborado com o auxílio do programa ESRI *ArcView 3.1* e extensão *3D Analyst 1.0*, o qual dispõe de algoritmo de Triangulação semelhante.

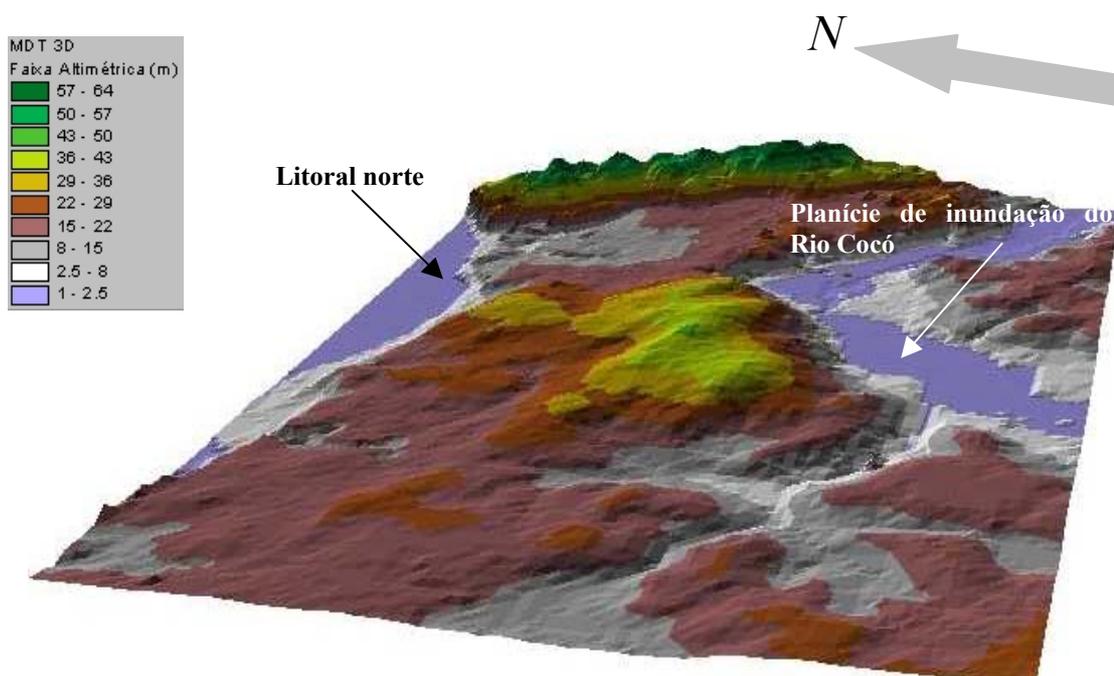


FIGURA 5.18 – Vista em perspectiva O-SO do modelo digital de terreno tridimensional da área de estudo gerado no aplicativo SIG ESRI *ArcView* 3.1 com exagero vertical de 7x.

O MDT elaborado, certamente, não retrata fielmente a paisagem atual desta parte da cidade, ou seja, as edificações e demais equipamentos urbanos não foram representados. Assim sendo, a intenção foi a de resgatar uma configuração topográfica do terreno mais próxima do que seria naturalmente.

5.2 – ESTIMATIVA DAS COTAS ALTIMÉTRICAS DO NÍVEL FREÁTICO

5.2.1 – ANÁLISE ESTATÍSTICA

5.2.2.1 – Estatísticas Descritivas

Para a realização das estimativas por métodos geoestatísticos, foi utilizada uma amostra de 110 dados, significando que nem sempre, quando na realização das sondagens, o nível freático foi alcançado (Figura 5.19). Na Figura 5.20a-b, são apresentados o histograma de frequência simples e a respectiva curva acumulada de probabilidade aritmética.

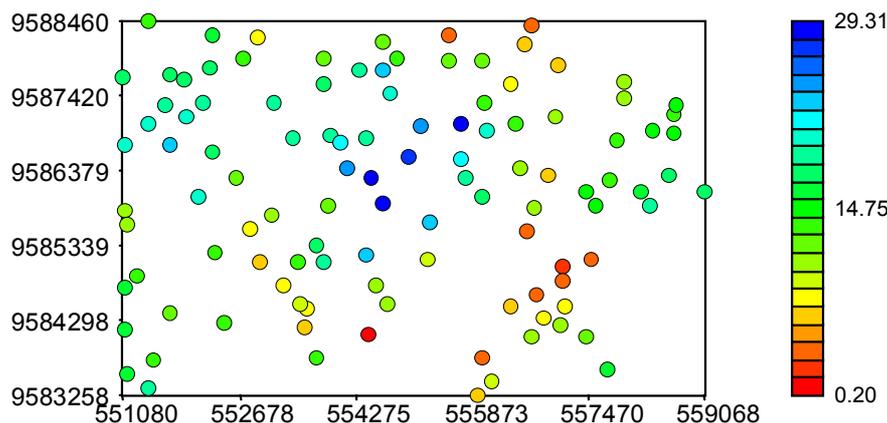


FIGURA 5.19 – Mapa de pontos de dados utilizados na estimativa da profundidade do nível freático (m).

A forma quase-linear da curva da função densidade de probabilidade (Figura 5.20b) indica que a distribuição amostral tem forte similaridade com uma curva de distribuição gaussiana e caracterizada por coeficientes de assimetria próximos de zero. No histograma de freqüências simples (Figura 5.20a), isto é atestado pela diferença irrelevante entre os valores de média e mediana, embora o coeficiente de variação seja 46%.

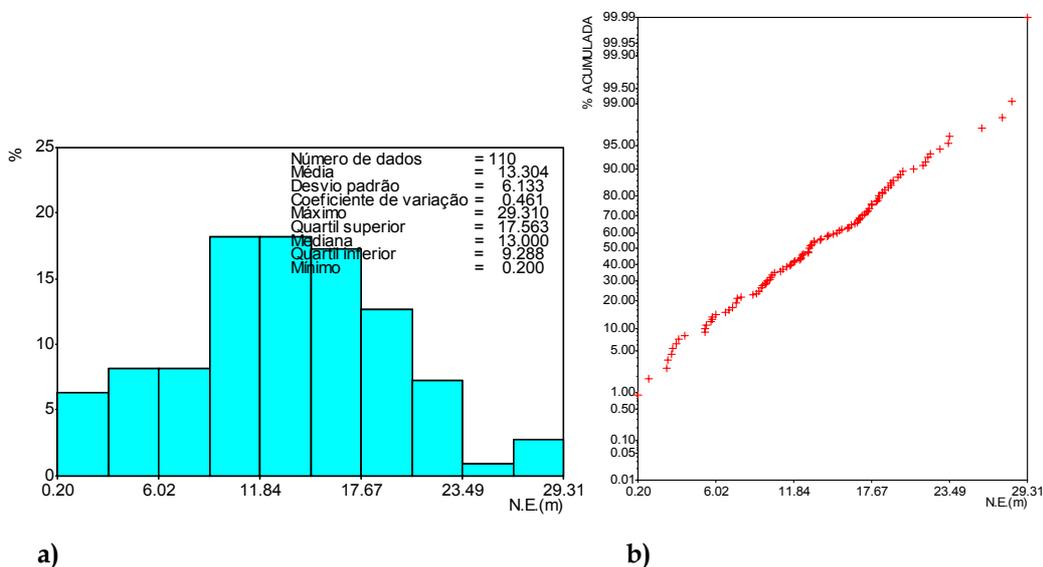


FIGURA 5.20 – Estatísticas descritivas. a) Histograma de freqüências simples e b) curva acumulada de probabilidade aritmética.

5.2.2.2 – Análise de Correlação por Regressão

A utilização da técnica de regressão por mínimos quadrados na análise de dependência entre duas variáveis se constitui de etapa básica inicial para o procedimento de estimativas por cokrigagem. A exemplo dos trabalhos de STURARO

(1994) e XAVIER (1999), uma relação de dependência entre as variáveis *cota altimétrica* e *cota do nível freático* foi investigada (Figura 5.21). O desvio-padrão da regressão obtido na análise de correlação é 2,9323. O procedimento de regressão linear é necessário para justificar a aplicação da técnica de cokrigagem, pois, no caso de inexistência de uma relação de dependência satisfatória, a utilização deste estimador é desnecessária.

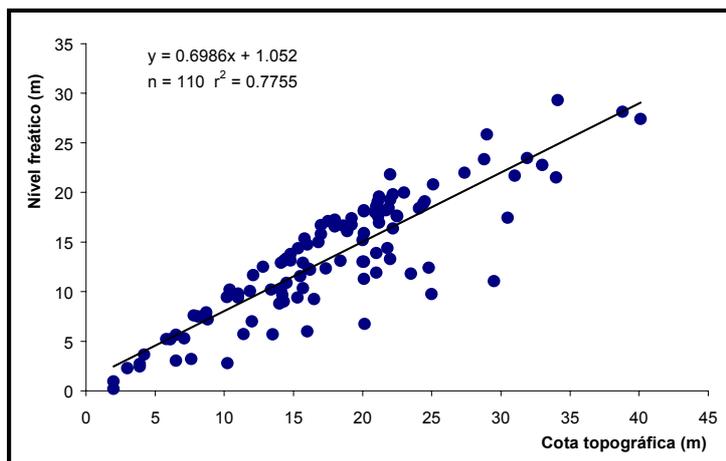


FIGURA 5.21 - Diagrama de correlação por regressão linear representando a relação de dependência entre as variáveis cota topográfica e cota do nível freático.

De modo igual ao que foi realizado para a elaboração do MDT, uma amostra da base de dados altimétricos foi extraída, a partir de malha de 250x250m², constituída por 1058 dados. Suas estatísticas descritivas são ilustradas pela Figura 5.22, em que se observa a reprodução das estatísticas da base de dados topográficos original.

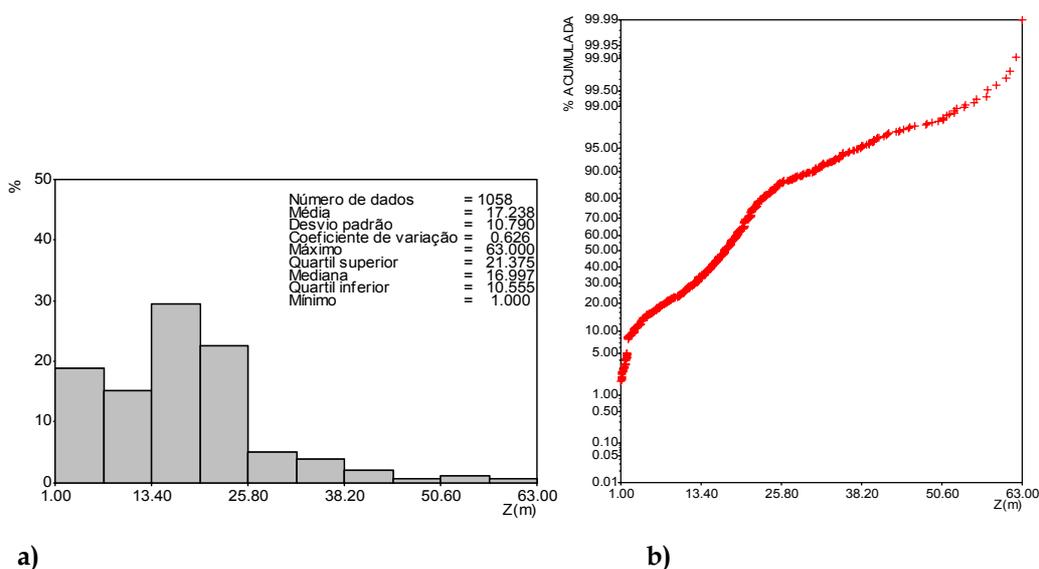


FIGURA 5.22- Histograma de frequências simples (a), a curva de distribuição acumulada (b) e estatísticas descritivas da variável secundária cota topográfica.

5.2.2 – AVALIAÇÃO GEOESTATÍSTICA

5.2.2.1 – Análise Variográfica Exploratória

A estratégia de análise da variabilidade espacial dos dados de cota do nível freático consistiu na elaboração de pares semivariogramas experimentais em duas direções perpendiculares visando identificar uma eventual anisotropia. No caso específico para a realização das estimativas por cokrigagem, foram pesquisados semi-variogramas cruzados considerando o par de variáveis cota topográfica/cota do nível freático e seus semivariogramas individuais.

Conforme se observa na Figura 5.21, não há tendência sistemática presente nos dados, deste modo os semivariogramas experimentais deverão se conformar à hipótese intrínseca, em que se considera a variância espacial finita e, por conseguinte, os modelos ajustados serão do tipo transicional. Como parâmetros da janela de pesquisa para os semi-variogramas experimentais, utilizou-se uma tolerância angular de 45° com largura de 3km. Os modelos ajustados constam de uma única estrutura isotrópica considerando as direções pesquisadas (Figuras 5.23 a 5.25).

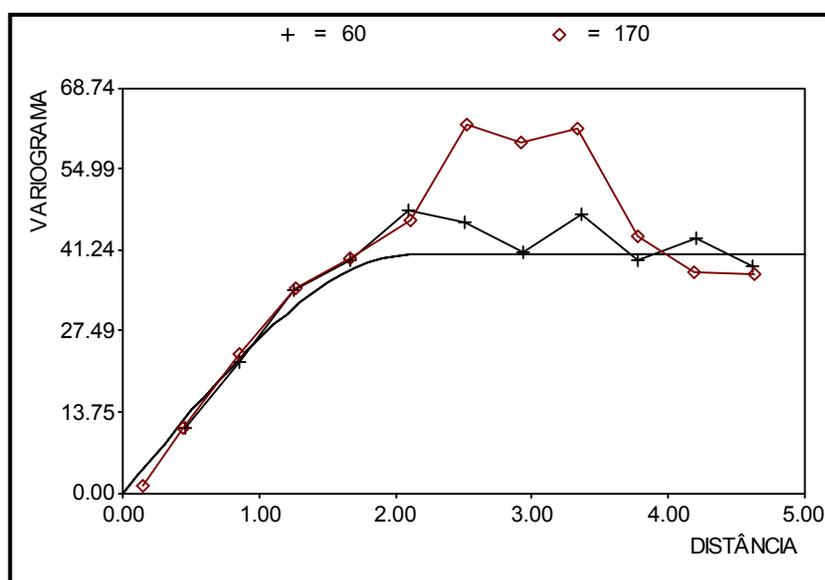


FIGURA 5.23 – Semi-variograma cruzado para as variáveis cota topográfica (m) e cota do nível freático (m). A distância está quilômetros.

O modelo esférico isotrópico ajustado é representado pela seguinte equação:

$$\begin{cases} \gamma(h) = 40,42 \left[1,5 \left(\frac{h}{2,13} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{2,13} \right)^3 \right] & \text{para } h < 2,13 \text{ km} \\ \gamma(h) = 40,42 & \text{para } h \geq 2,13 \text{ km} \end{cases} \quad (5.2)$$

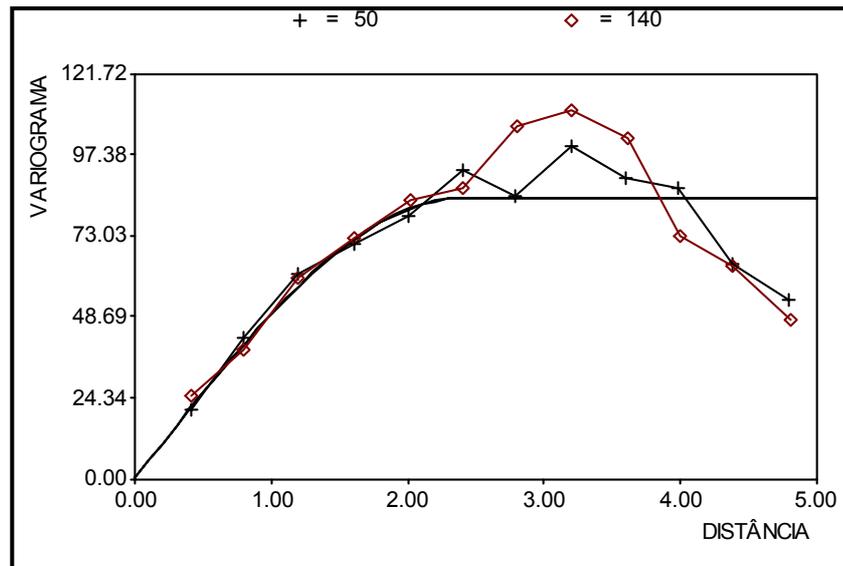


FIGURA 5.24 – Semivariograma experimental da variável cota topográfica. A distância está em quilômetros.

O modelo esférico isotrópico ajustado é representado pela seguinte equação:

$$\begin{cases} \gamma(h) = 0,4 + 84 \left[1,5 \left(\frac{h}{2,40} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{2,40} \right)^3 \right] & \text{para } h < 2,40 \text{ km} \\ \gamma(h) = 84,4 & \text{para } h \geq 2,40 \text{ km} \end{cases} \quad (5.3)$$

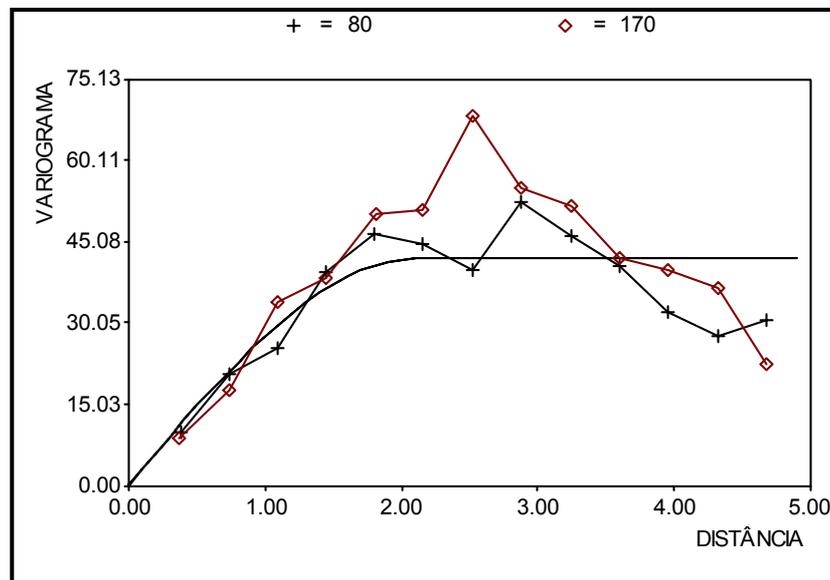


FIGURA 5.25 – Semivariograma experimental da cota do nível freático. A distância está em quilômetros.

O modelo esférico isotrópico ajustado é representado pela seguinte equação:

$$\begin{cases} \gamma(h) = 0,3 + 41,7 \left[1,5 \left(\frac{h}{2,10} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{2,10} \right)^3 \right] & \text{para } h < 2,10 \text{ km} \\ \gamma(h) = 42 & \text{para } h \geq 2,10 \text{ km} \end{cases} \quad (5.4)$$

Para que as estimativas por cokrigagem possam ser válidas, é necessário verificar o modelo de correionalização linear, que constitui uma etapa em que se testa os semi-variogramas experimentais ajustados. Os parâmetros dos modelos a ser verificados são os valores de efeito pepita e dos patamares. Como mostram as matrizes abaixo, as condições de positividade definida foram atendidas.

- *Efeito pepita*

$$\begin{pmatrix} 0,4 & 0 \\ 0 & 0,3 \end{pmatrix} > 0$$

- *Estrutura*

$$\begin{pmatrix} 84 & 40,42 \\ 40,42 & 41,7 \end{pmatrix} > 0$$

5.2.2.2 – Estimativa por Krigagem Ordinária

As estimativas por krigagem ordinária foram realizadas para a variável cota do nível freático com o intuito de comparar os resultados da aplicação deste estimador com os obtidos por cokrigagem. Considerando que o programa *Sistema GeoVisual 2.1* opera com um algoritmo embutido de fronteira convexa, extrapolações além dela não foram possíveis. A malha de interpolação apresenta espaçamento de 100x100m², o que possibilitou a estimativa de 3614 pontos em uma área de 36,548km². Para definição da vizinhança local, adotou-se o critério dos quadrantes com um raio de busca de 1km (metade da amplitude variográfica). Estas condições foram consideradas, também, na etapa de validação cruzada (Figura 5.26). O mapa de estimativas por krigagem ordinária é apresentado na Figura 5.27 e o mapa de desvios de interpolação da estimativa pela Figura 5.28.

Em vista do observado na seção deste capítulo que tratou dos algoritmos de interpolação, mais especificamente no que se refere à aplicação da krigagem ordinária, foi mostrado que a variância de krigagem é fortemente dependente da disposição espacial dos dados, enquanto que a variância de interpolação de YAMAMOTO (2000) fornece uma medida mais representativa do fenômeno regionalizado estudado. Sendo,

por este motivo, a única medida a ser utilizada, daqui em diante, para mensurar a variância das estimativas de krigagem ordinária.

Na Figura 5.26, o coeficiente de correlação é da ordem de 85% e está indicada uma forte tendência com pouca aderência à reta de regressão. A validação cruzada foi realizada com a estimativa de 102 pontos dentre a amostra de 110. A validação cruzada é um ferramenta essencial na avaliação do modelo variográfico experimental ajustado. Considerando o tamanho da amostra, a Figura 5.27 mostra que os resultados da krigagem ordinária são bem aceitáveis.

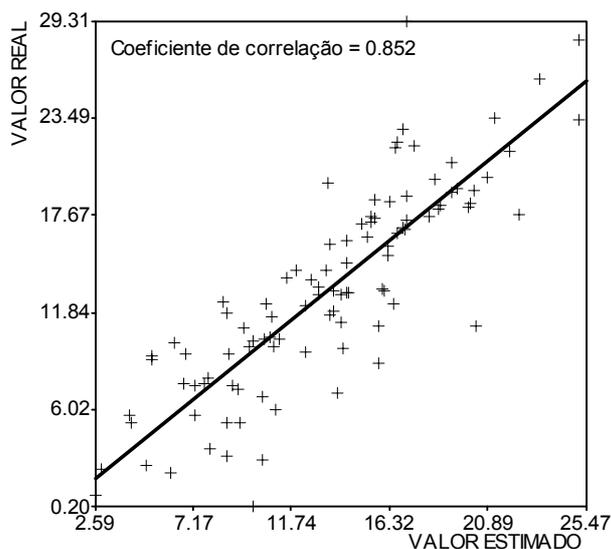


FIGURA 5.26 – Diagrama de validação cruzada na análise da variável cota do nível freático (m).

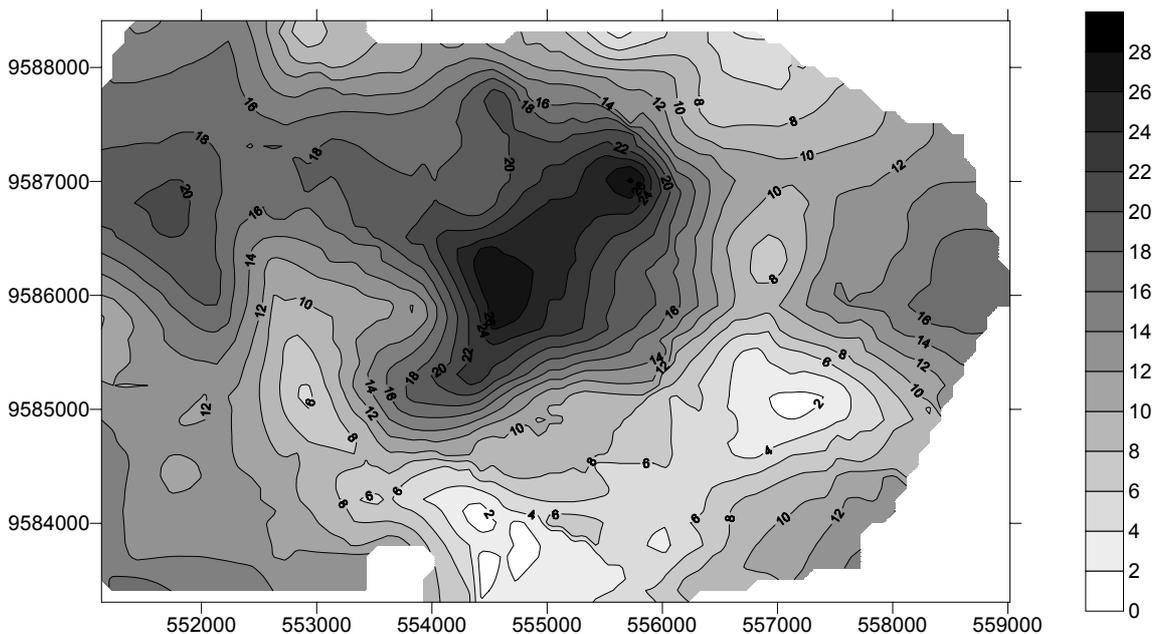


FIGURA 5.27 – Mapa de estimativas por krigagem ordinária da cota altimétrica do nível freático (m).

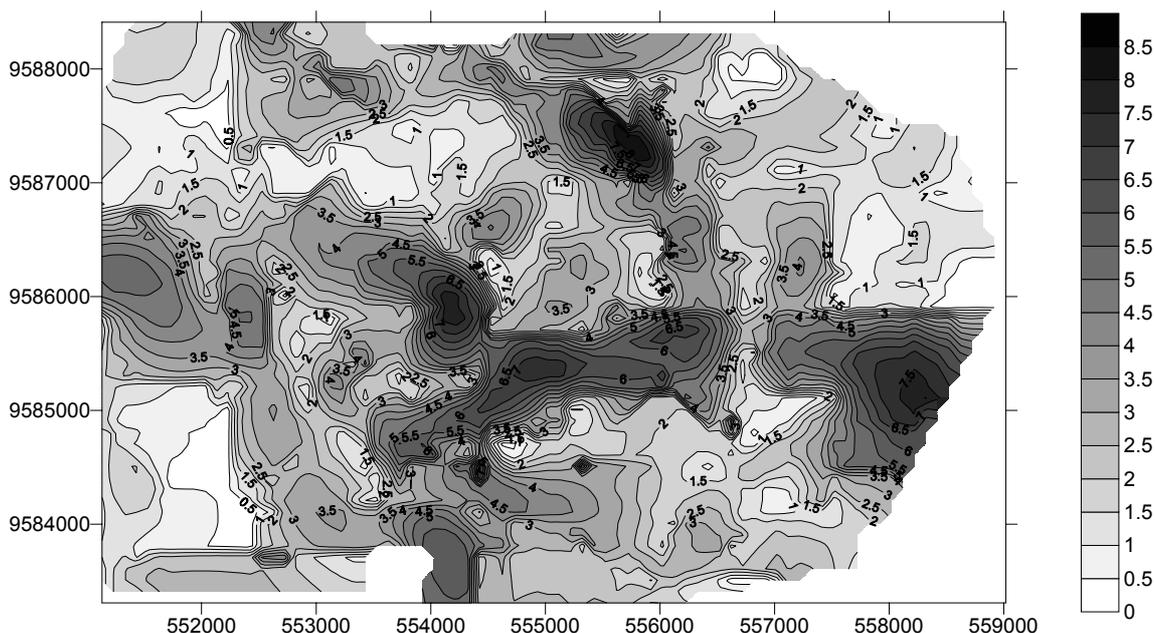


FIGURA 5.28 – Mapa de desvios de interpolação das estimativas por krigagem ordinária da cota altimétrica do nível freático (m).

Como forma de emular mapas de probabilidade de ocorrência do nível freático, considerando um ou mais níveis de corte, obtidos geralmente por krigagem indicativa múltipla (cf. JOURNAL, 1983; DEUTSCH & JOURNAL, 1992), utilizou-se o procedimento de JOURNAL & RAO (1996) implantado no *Sistema GeoVisual 2.1*, o qual baseia-se na construção de funções de distribuição acumuladas condicionadas (fdac) locais da variável em questão, com uso dos pesos de krigagem ordinária de cada realização desta variável. Deste modo, três níveis de corte representados pelos quartis inferior (q_{25}), superior (q_{75}) e a mediana (q_{50}), conforme as estatísticas ilustradas pela Figura 5.21, foram utilizados como referências, o que permitiu a obtenção de mapas de probabilidade condicionada de ocorrência da cota do nível freático ser igual ou superior ao valor do nível de corte (Figuras 5.29 a 5.31).

5.2.2.3 – Estimativa por Cokrigagem Ordinária

Com a aplicação do algoritmo de cokrigagem ordinária, para estimativa da cota do nível freático, objetivou-se tirar vantagem da utilização de dados secundários provenientes da base cartográfica. Para isto, a abordagem de estimativa com heterotopia parcial foi trabalhada, possibilitando a extrapolação para áreas além da fronteira. Esta extrapolação é salvaguardada pela correlação obtida dos dados de cota do nível freático com os dados de topografia. As condições de vizinhança local e da malha para interpolação foram as mesmas da krigagem ordinária (Figuras 5.32 e 5.33).

5.2.2.4 – Discussão dos Resultados

A adoção de semivariogramas isotrópicos, na etapa de modelagem, é devido à ausência de anisotropia zonal, o que significa que não foram constatadas diferentes direções de variabilidade para as variáveis em estudo. Igualmente, não foi evidenciada alguma tendência sistemática (deriva) e, deste modo, adotou-se uma função esférica, admitindo-se a hipótese intrínseca para os fenômenos regionalizados. Contudo, nos semivariogramas experimentais individuais, se observa que a variância espacial diminui a partir um determinado alcance, significando que a hipótese intrínseca é verificada para curtas distâncias.

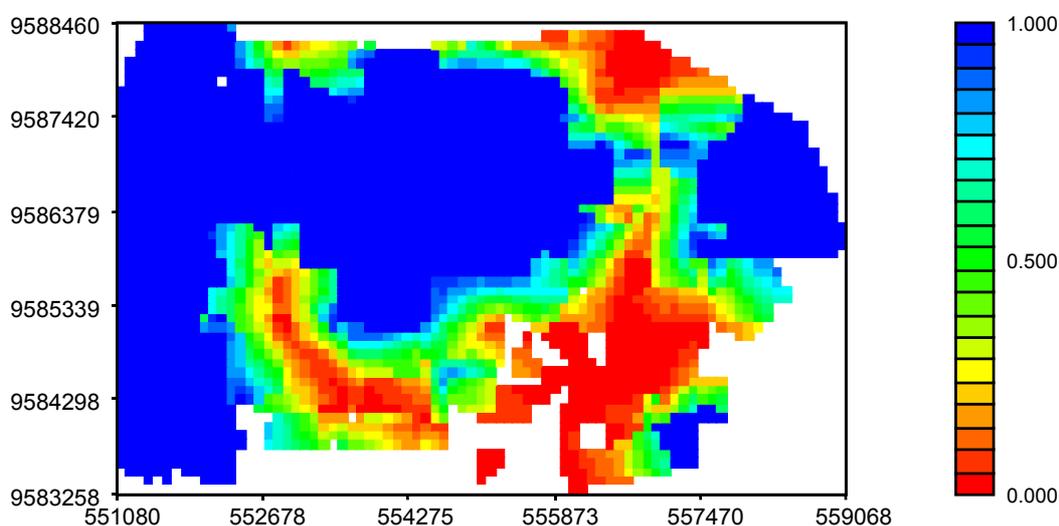


FIGURA 5.29 – Mapa de probabilidade de ocorrência da cota do nível freático ser igual ou superior a 9,29m (q₂₅).

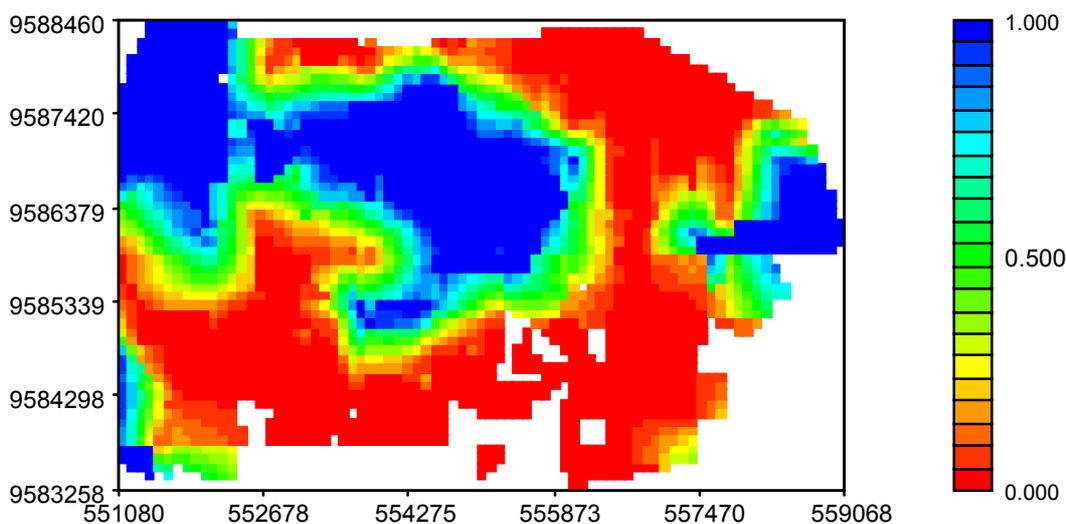


FIGURA 5.30 – Mapa de probabilidade de ocorrência da cota do nível freático ser igual ou superior a 13m (q₅₀).

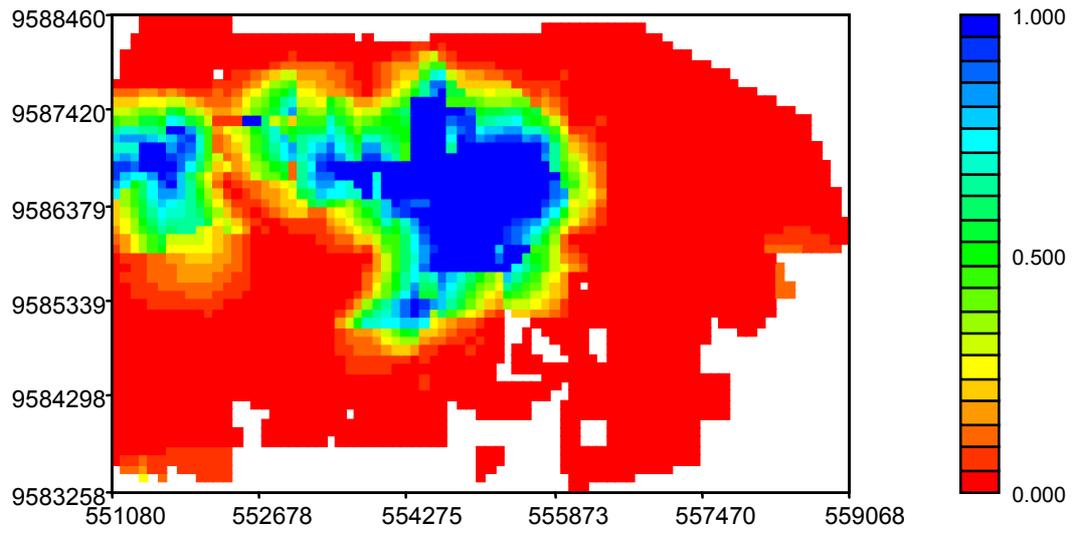


FIGURA 5.31 – Mapa de probabilidade de ocorrência da cota do nível freático ser igual ou superior a 17,56m (q_{75}).

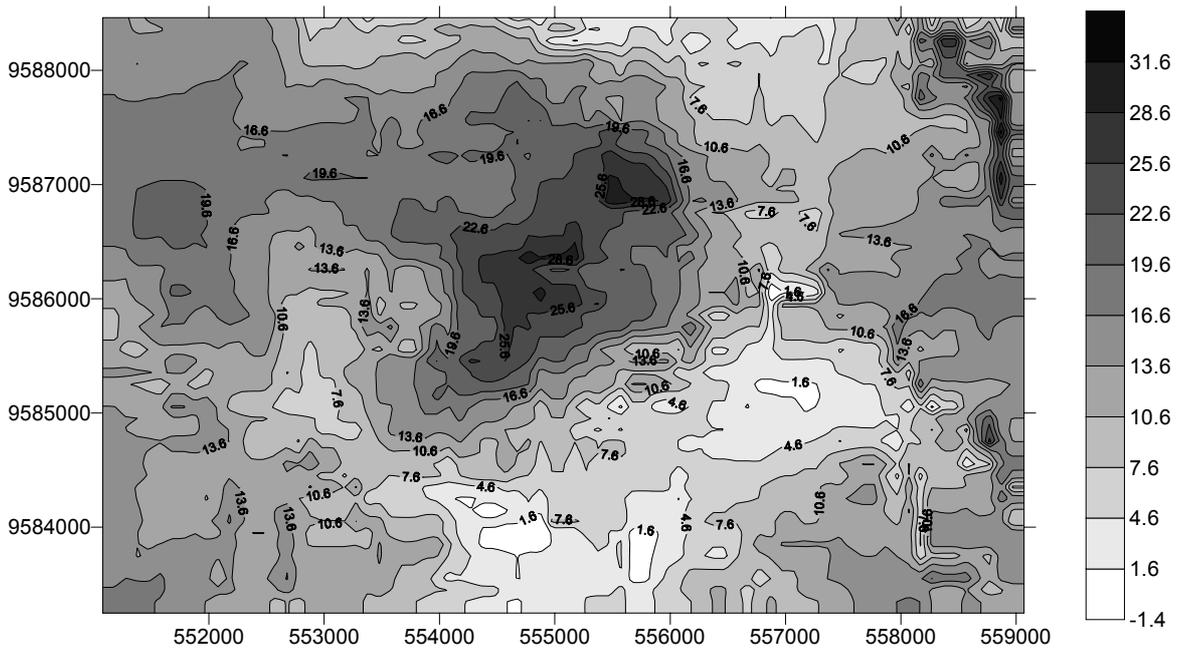


FIGURA 5.32 – Mapa de estimativas da cota do nível freático por cokrigagem (m).

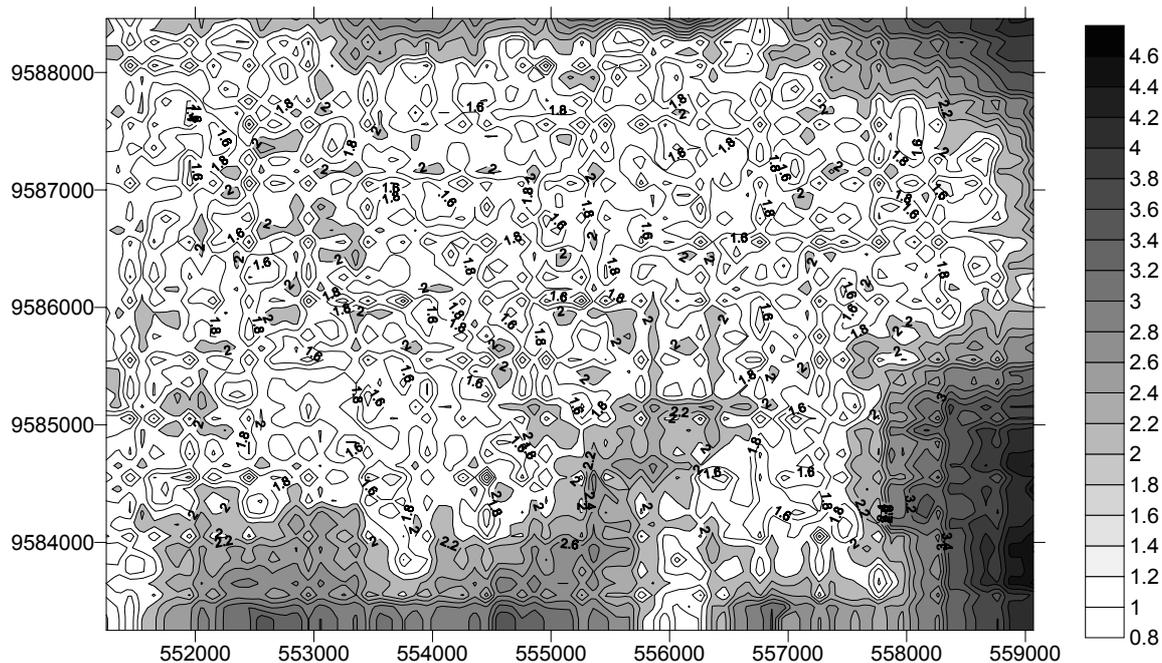


FIGURA 5.33 – Mapa de desvios de cokrigagem da cota do nível freático.

Procedeu-se à estimativa das realizações da variável cota do nível freático mediante a aplicação do estimador krigagem ordinária (Figura 5.28). As estimativas obtidas com este algoritmo foram bastante satisfatórias, visto que se encontram dentro do intervalo dos dados originais (Figura 5.21). Embora, alguma suavização nas estimativas seja observada, as previsões são consistentes com a base de dados original.

Como forma de complementar os resultados alcançados com a aplicação da krigagem ordinária, os mapas de probabilidade condicionada da cota do nível freático permitem enfocar as realizações da variável estudada em termos de probabilidade condicionada. Como o processo de estimativa por krigagem ordinária pode conduzir à obtenção de pesos negativos, a interpretação probabilística poderia perder sentido matemático, não obstante o algoritmo utilizado e implementado no *Sistema Geovisual 2.1* dispõe de dispositivos corretivos para esta eventualidade.

Utilizou-se, como níveis de corte, os três quartis da curva de probabilidade aritmética acumulada, mas outros valores de corte como os percentis podem ser utilizados, em conformidade com os interesses investigativos.

No processo de interpolação, as estimativas por cokrigagem ordinária não foram melhores que aquelas obtidas com uso da krigagem ordinária (Figura 5.31), uma vez que ocorreu extrapolação da amplitude dos dados da base de dados original. A grande vantagem da técnica de cokrigagem é a da possibilidade de explorar a relação de

dependência entre as variáveis investigadas, favorecendo a extrapolação para áreas externas à fronteira convexa. No entanto, tal vantagem não foi evidenciada com o processamento das estimativas.

Observou-se que os resultados da cokrigagem são muito sensíveis às mudanças nos parâmetros variográficos. O que indica que a variabilidade espacial das variáveis, quando tratadas como corregeionalizadas, é alta e que pode causar instabilidade numérica às matrizes das estimativas, decorrente da obtenção de alguns ponderadores negativos (Tabela 5.3).

TABELA 5.3 – Dados utilizados na estimativa da cota do nível freático no ponto de coordenadas 554821E/9583812N.

Ponto	Leste	Norte	Valor	Peso
1	555240	9585130	8,80	0,0713
2	554430	9584110	0,20	0,7523
3	553720	9583770	12,31	0,0065
4	556000	9583770	3,21	0,1700
5	554950	9584000	2,00	-0,0342
6	554700	9584000	4,97	-0,5146
7	554700	9583750	1,67	0,1623
8	554950	9583750	1,67	0,3865
$z^*(x)$				- 0,306
σ_{CoK}				2,6321
μ_P				-1,4343
μ_S				12,1996

$z^*(x)$ - valor estimado; σ_{CoK} - desvio de cokrigagem;
 μ_P e μ_S - multiplicadores de Lagrange das variáveis primária e secundária, respectivamente.

O mapa de desvios de cokrigagem (Figura 5.33) revela que esta medida de covariância de estimativa caracteriza-se pela mesma ineficiência da variância de krigagem ordinária. Os valores mais altos de desvios estão associados às áreas em que a variável primária (cota do nível freático) não foi amostrada. Portanto, a variância de cokrigagem não fornece uma medida eficiente na avaliação da exatidão das estimativas.

A base de dados de cota do nível estático foi abordada neste trabalho como uma série temporal pois, os dados foram coletados quando da execução das sondagens de simples reconhecimento com SPT em diferentes épocas no período de 1976 a 2001. Deste modo, a superfície freática obtida apenas consiste de uma idéia de como se comporta o nível freático estático na área estudada. Contudo, a correlação significativa encontrada (Figura 5.21) mostra que as informações eventualmente provenientes da interpretação desta superfície podem ser úteis e com caráter orientativo promissor.

5.3 – MODELO GEOLÓGICO DA ÁREA

5.3.1 – MODELO GEOLÓGICO 3D DE SUPERFÍCIE

Segundo HOULDING (1994), um modelo geológico representa o resultado da interpretação dos fenômenos endógenos e exógenos responsáveis pela formação e disposição espacial dos conjuntos litológicos (rochas e materiais inconsolidados) e feições estruturais (juntas e dobras, etc.).

A elaboração do modelo geológico da área de estudo compreendeu, somente, a representação em superfície das unidades litológicas no contexto urbano da Cidade de Fortaleza. Técnicas de sensoriamento remoto de imagens de satélite e de interpretação de aerofotos são praticamente inúteis ou, pelo menos, falíveis, por conta da urbanização intensa, encobrindo os afloramentos mais representativos. Um modelo geológico 3D de superfície é proposto como resultado da interpretação integrada de dados topográficos (MDT) e geológicos (descrição tátil-visual dos materiais geológicos amostrados constantes nos relatórios de sondagem), como exibido nas Figuras 5.35 e 5.36.

Para a elaboração do modelo, a integração dos dados foi realizada no módulo *3D Analyst 1.0* do programa *ArcView 3.1*, o qual possui ferramentas de navegação virtual por sobre o modelo, além da incrementação com planos de informação (*themes*) que eventualmente dispõem de informações hidrológicas, hidrogeológicas e urbanísticas, dentre outras.

Por força de limitação de escala, as Paleodunas não puderam ser representadas no modelo. Ademais, o reconhecimento em campo é difícil e, muitas vezes, pode ser confundida com a cobertura arenosa superior, típica da Formação Barreiras e, com mesma resposta ao SPT. A Tabela 5.4 apresenta, de forma sintética, as características geotécnicas das unidades geológicas ocorrentes na área de estudo. Conforme se observa em tal tabela e nas Figura 5.35 e 5.36, o quadro geológico não se caracteriza por associações litológicas complexas.

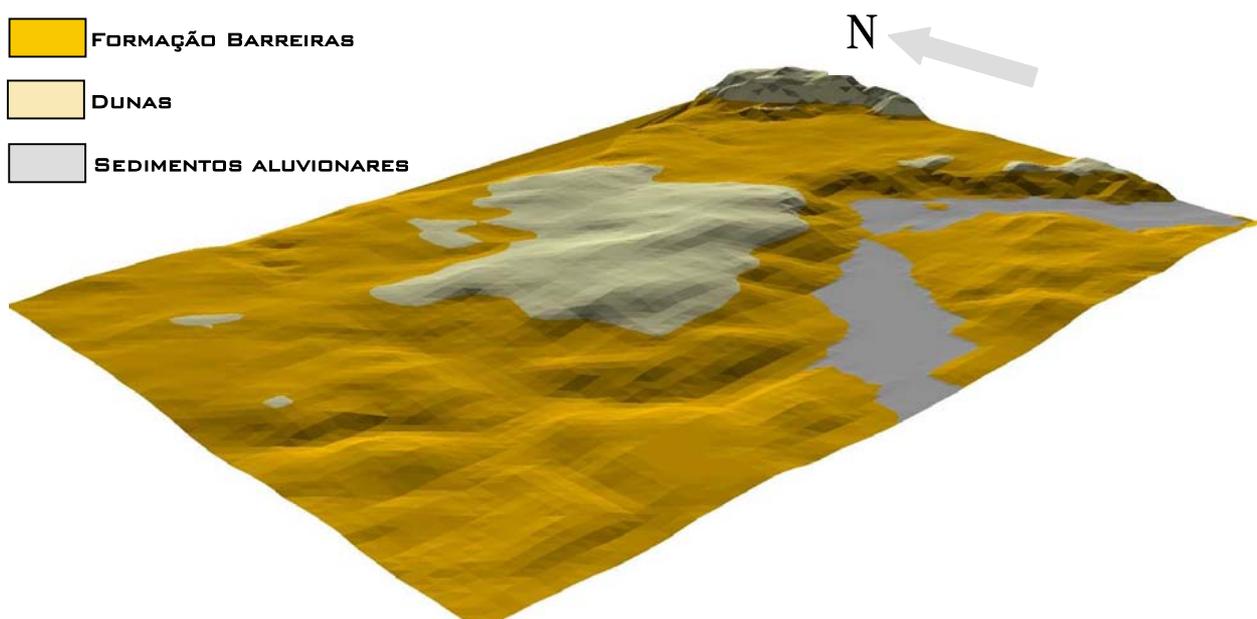
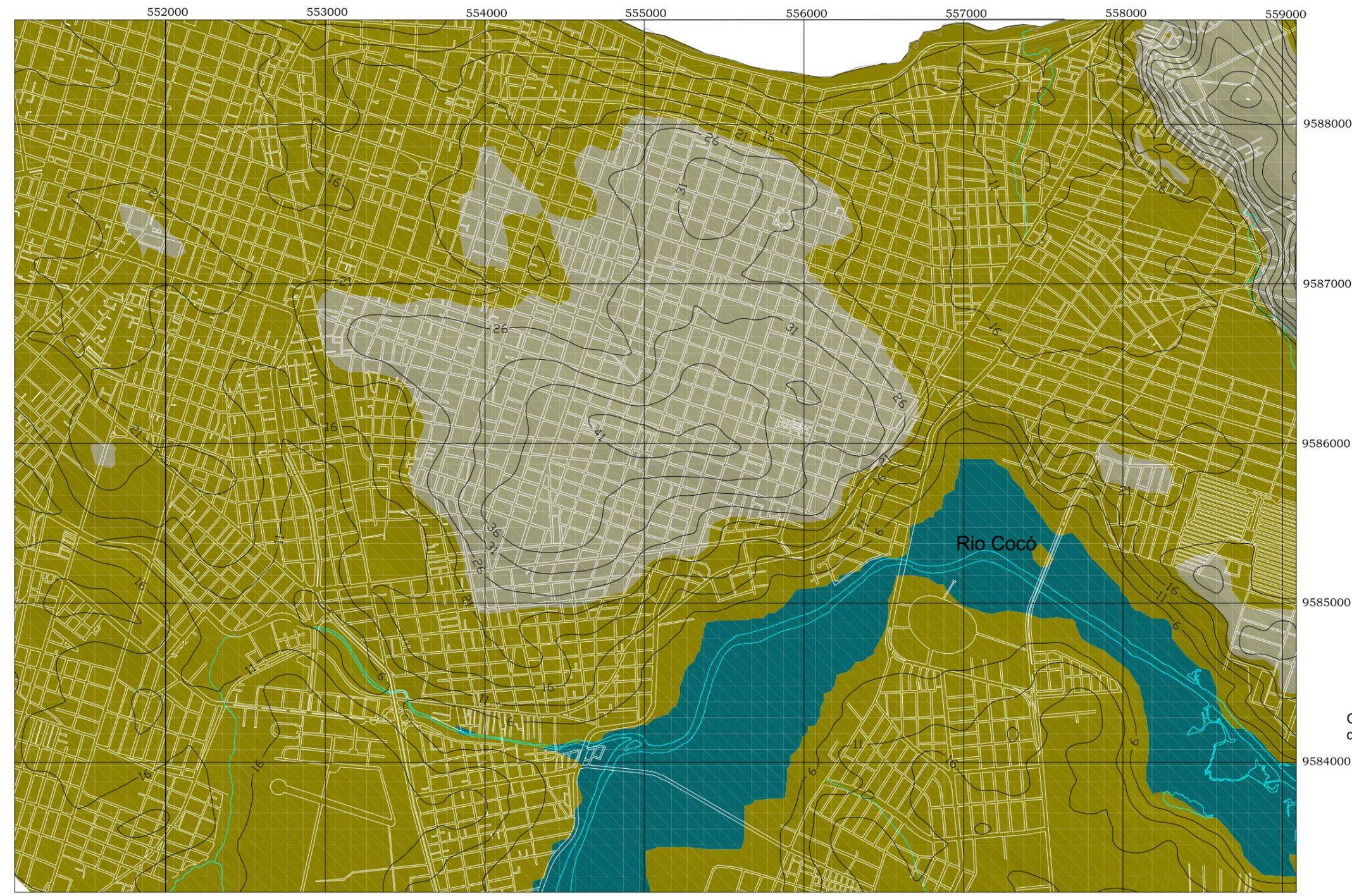


FIGURA 5.35 – Modelo geológico 3D de superfície interpretado da área de estudo.

TABELA 5.4 – Síntese das características geológico-geotécnicas das unidades litológicas presentes na área.

Unidade Geológica	Espessura máxima (m)	Descrição táctil-visual	Cor	Compacidade/Consistência	Faixa de variação do N
Dunas	27	Areia fina a média, areia siltosa, inconsolidada a parcialmente consolidada	Cinza, branco, amarelo	Fofa a medianamente compacta	1 - 11
Sedimentos aluvionares	1,5	Areia argilosa com matéria orgânica, areia silte-argilosa	Cinza escuro, amarelo, marrom	Fofa a compacta	2 - 30
Formação Barreiras	> 21,5	Areia argilosa, argila arenosa, argila siltosa com concreções lateríticos com ou sem níveis de seixos ou materiais brechosos associados	Amarelo, branco, vermelho, cinza, variegada	Fofa a muito compacta; mole a muito dura.	2 - 60*

* valores acima de 60 (sessenta) golpes foram codificados como 60.



Convenções Cartográficas

- Quadras
- Limite
- Drenagem
- Curvas de nível altimétrico

Legenda Geológica

- Dunas
- Formação Barreiras
- Sedimentos aluvionares

Obs.: A descrição geológico-geotécnica das unidades encontra-se na Tabela 5.4.

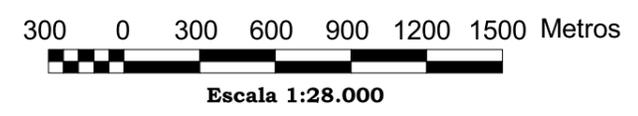


FIGURA 5.36 - Mapa geológico da área.

5.3.2 – Mapeamento da Superfície do Impenetrável ao SPT

A Formação Barreiras (Tabela 5.4) apresenta uma resposta ao SPT bastante variável, no entanto, os níveis lateríticos associados a materiais de granulometria mais grossa (seixos e/ou pedregulhos) desempenham importante função como materiais que dão suporte geológico aos elementos estruturais de fundação. Na consulta ao banco de dados geotécnicos, verificou-se que tais materiais apresentam valores de N acima de 50 (cinquenta) golpes. Em vista disso, procedeu-se em uma avaliação geoestatística da profundidade do impenetrável ao SPT, considerando valores de N acima referidos (Figura 5.37). Tal procedimento apresenta-se como uma ferramenta de mapeamento de uma superfície representativa dos lugares geométricos de impenetrabilidade ao amostrador do SPT.

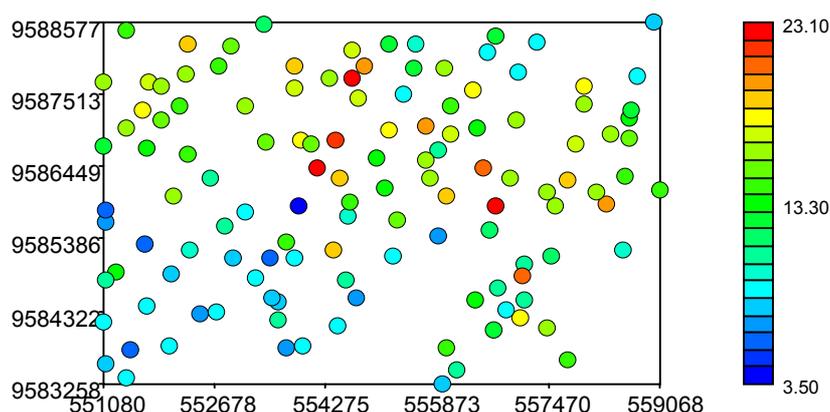


FIGURA 5.37 – Mapas de localização dos valores de profundidade ao impenetrável ao SPT.

Na Figura 5.38, o histograma de frequência simples e a curva de distribuição acumulada, exibe o comportamento estatístico da variável profundidade do impenetrável ao SPT, o qual tende a aproximar-se da distribuição de probabilidade gaussiana. Dado à pequena diferença entre os valores de média e mediana e o pequeno coeficiente de variação (34%), assumir-se-á que a variável em questão pode ser representada por uma função de distribuição normal.

Na análise variográfica, considerou-se uma janela de pesquisa com tolerância angular de 45° com largura de 1km, passo de 520m, com duas direções de busca. Conforme é mostrado na Figura 5.39, as direções que apresentam estruturação significativa são as de N60 e N150. No ajuste do modelo variográfico experimental, adotou-se uma estrutura esférica, o que permitiu observar forte continuidade na direção de N150.

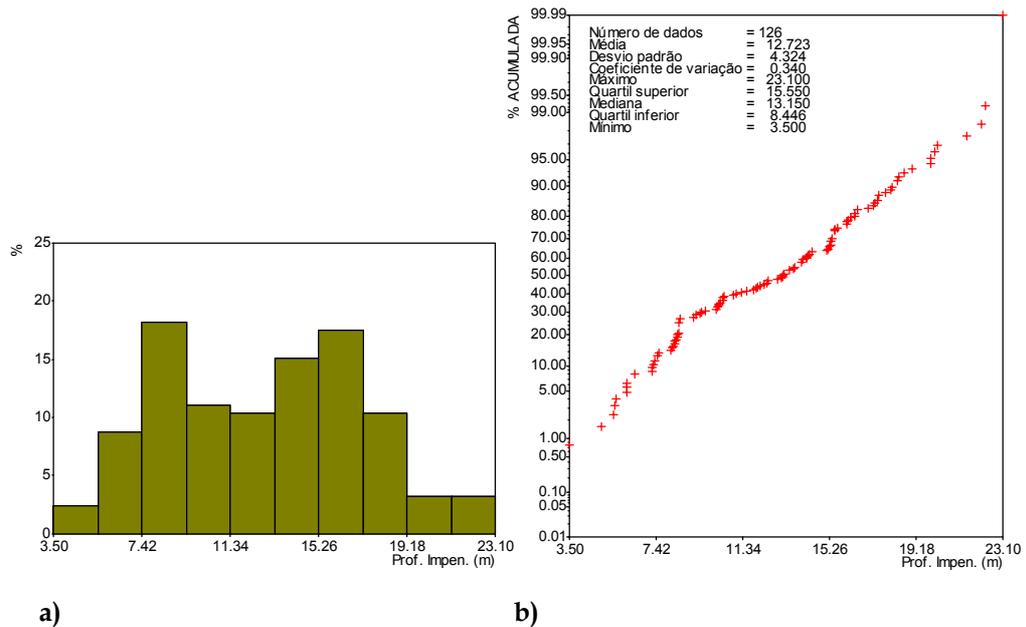


FIGURA 5.38 – Histograma de freqüências simples (a) e curva de distribuição acumulada (b) e estatísticas descritivas da profundidade do impenetrável ao SPT (N ≥ 50).

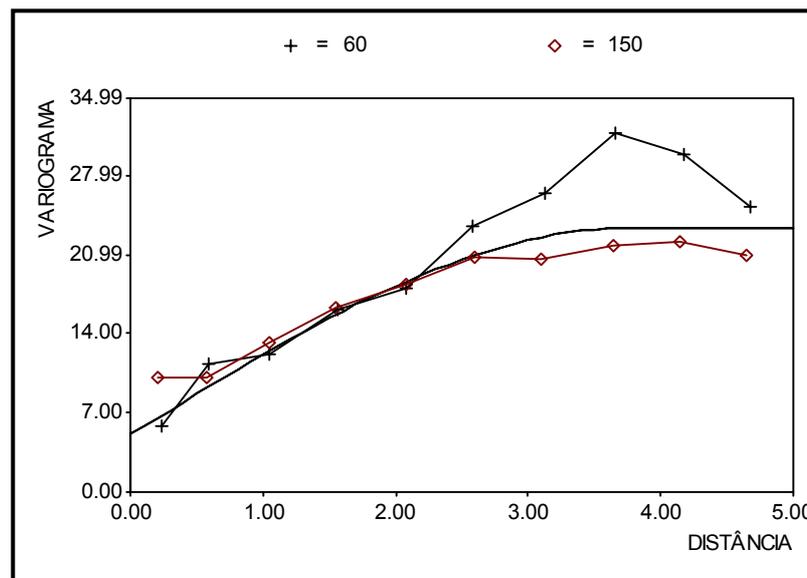


FIGURA 5.39 – Semivariograma experimental ajustado a um modelo esférico de estrutura única, para a variável impenetrável ao SPT. A distância está em quilômetros.

O modelo esférico ajustado na análise variográfica da variável profundidade do impenetrável ao SPT é representado pela seguinte equação:

$$\begin{cases} \gamma(h) = 8,5 + 18,37 \left[1,5 \left(\frac{h}{3,79} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{3,79} \right)^3 \right] & \text{para } h < 3,79 \text{ km} \\ \gamma(h) = 26,87 & \text{para } h \geq 3,79 \text{ km} \end{cases} \quad (5.5)$$

No diagrama de validação cruzada (Figura 5.40) observa-se que a dispersão é grande, indicando que as previsões realizadas em 80 pontos que o modelo variográfico ajustado não está considerando variações significativas nas realizações da variável em análise. Neste caso, pode-se aventar a hipótese de amostra ser representativa de duas populações diferentes, indicadas pela distribuição bimodal dos dados apresentados no histograma de frequências simples (Figura 5.38a). As condições de vizinhança local foram: discretização de elementos de 250x250m², raio de busca de 1km com 8 pontos no máximo e 4 no mínimo.

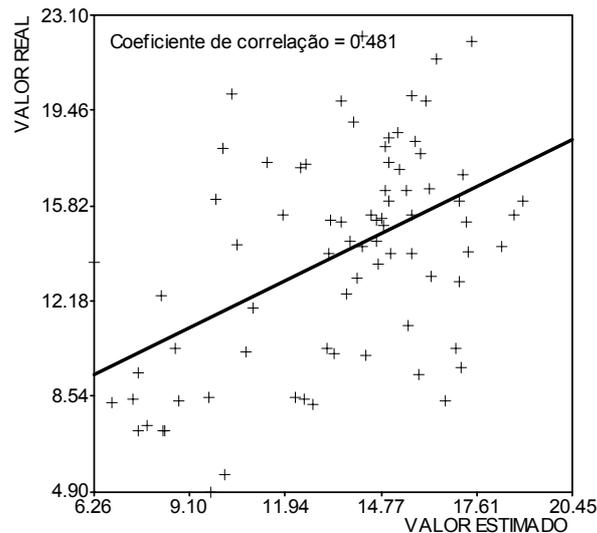


FIGURA 5.40 - Diagrama de dispersão da validação cruzada com 80 pontos para avaliação preliminar das estimativas da profundidade do impenetrável ao SPT.

Com a aplicação do modelo variográfico ajustado, obteve-se um mapa da superfície do impenetrável ao amostrador do SPT e outro apresentando os desvios de interpolação associados às estimativas (Figuras 5.41 e 5.42). Os espaços vazios presentes e o formato irregular dos mapas indicam que naquelas áreas não foi possível atender às condições de vizinhança local estabelecidas.

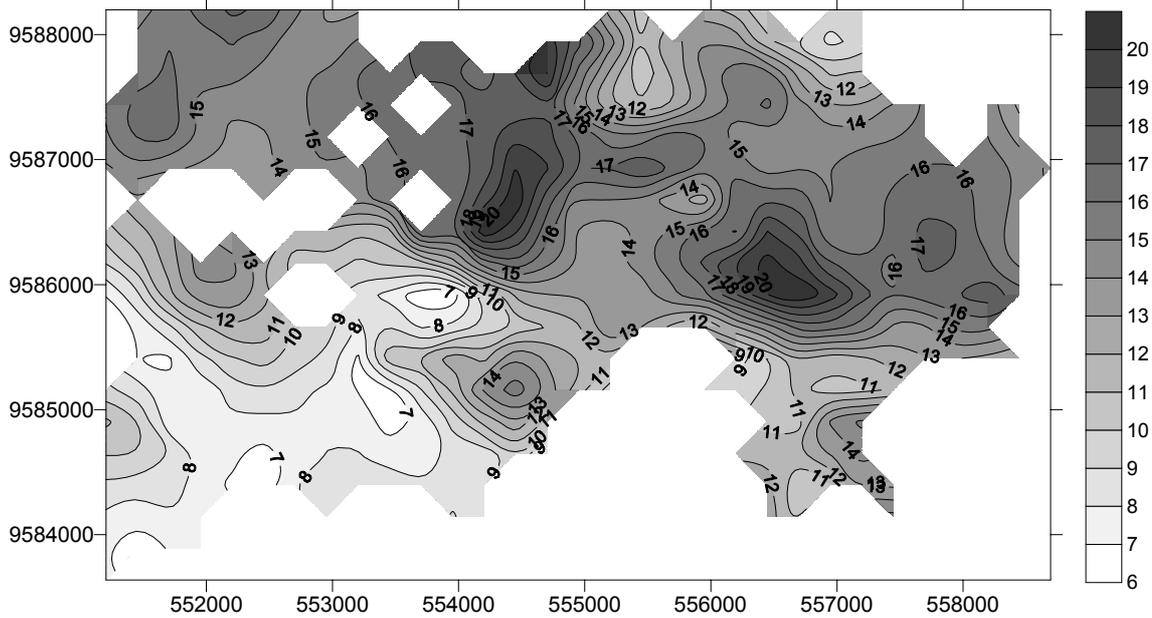


FIGURA 5.41 – Mapa da superfície impenetrável ao SPT obtido com a aplicação do estimador krigagem ordinária.

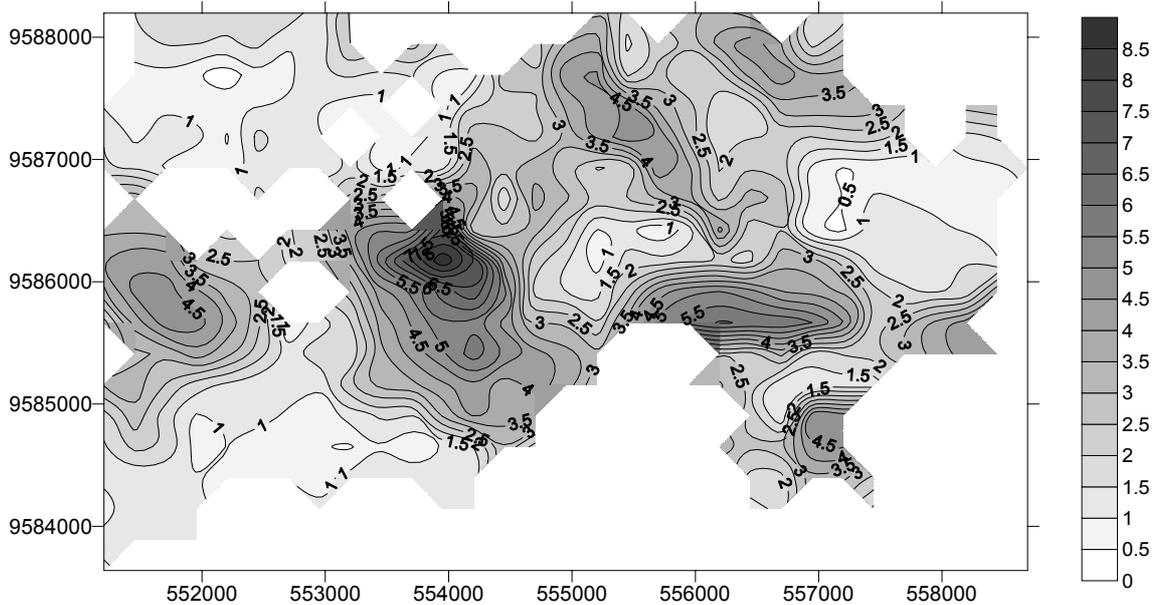


FIGURA 5.42 – Mapa dos desvios de interpolação das estimativas dos valores de profundidade do impenetrável ao SPT .

Como reforço às informações presentes nos mapas das Figuras 5.41 e 5.42, foram elaborados mapas de probabilidade de ocorrência de valores da profundidade do impenetrável ao SPT considerando os três quartis (q_{25} , q_{50} e q_{75}), da curva de distribuição acumulada (Figura 5.38b), como níveis de corte (Figuras 5.43, 5.44 e 5.45).

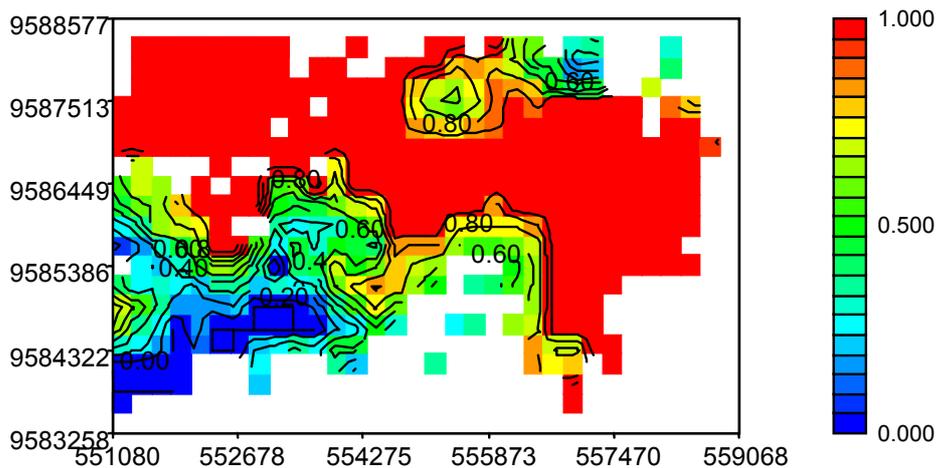


FIGURA 5.43 – Mapa de probabilidade condicionada da profundidade do impenetrável ao SPT ser igual ou superior a 8,5m (q_{25}).

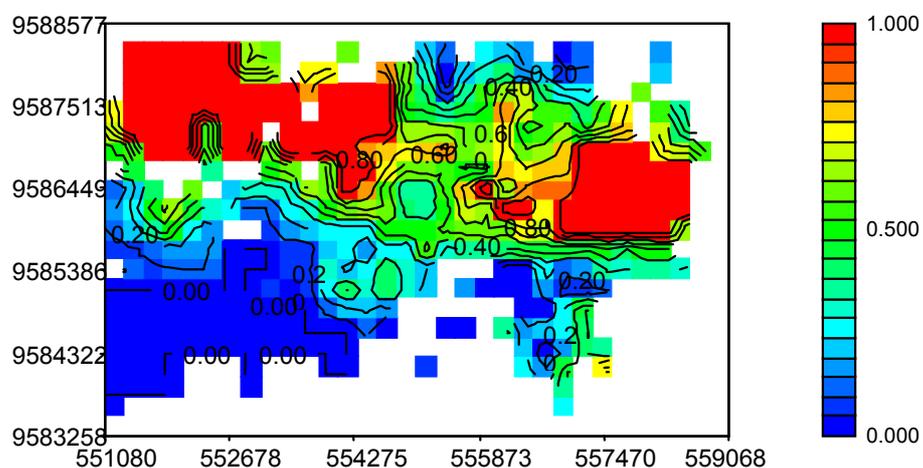


FIGURA 5.44 – Mapa de probabilidade condicionada da profundidade do impenetrável ao SPT ser igual ou superior a 13,15m (q_{50}).

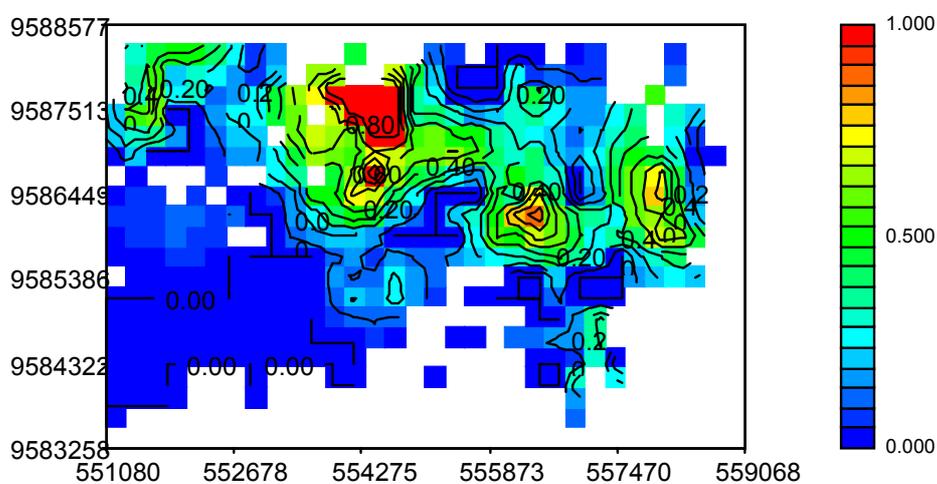


FIGURA 5.45 – Mapa de probabilidade condicionada da profundidade do impenetrável ao SPT ser igual ou superior a 15,55m (q_{75}).

O procedimento de JOURNAL & RAO (1996), na abordagem de cálculo dos pesos da krigagem ordinária na construção de uma *fidac* local, se constitui de uma ferramenta prática, permitindo, de forma rápida e objetiva, obter cenários da variabilidade da superfície impenetrável ao SPT em função de um valor para cada situação.

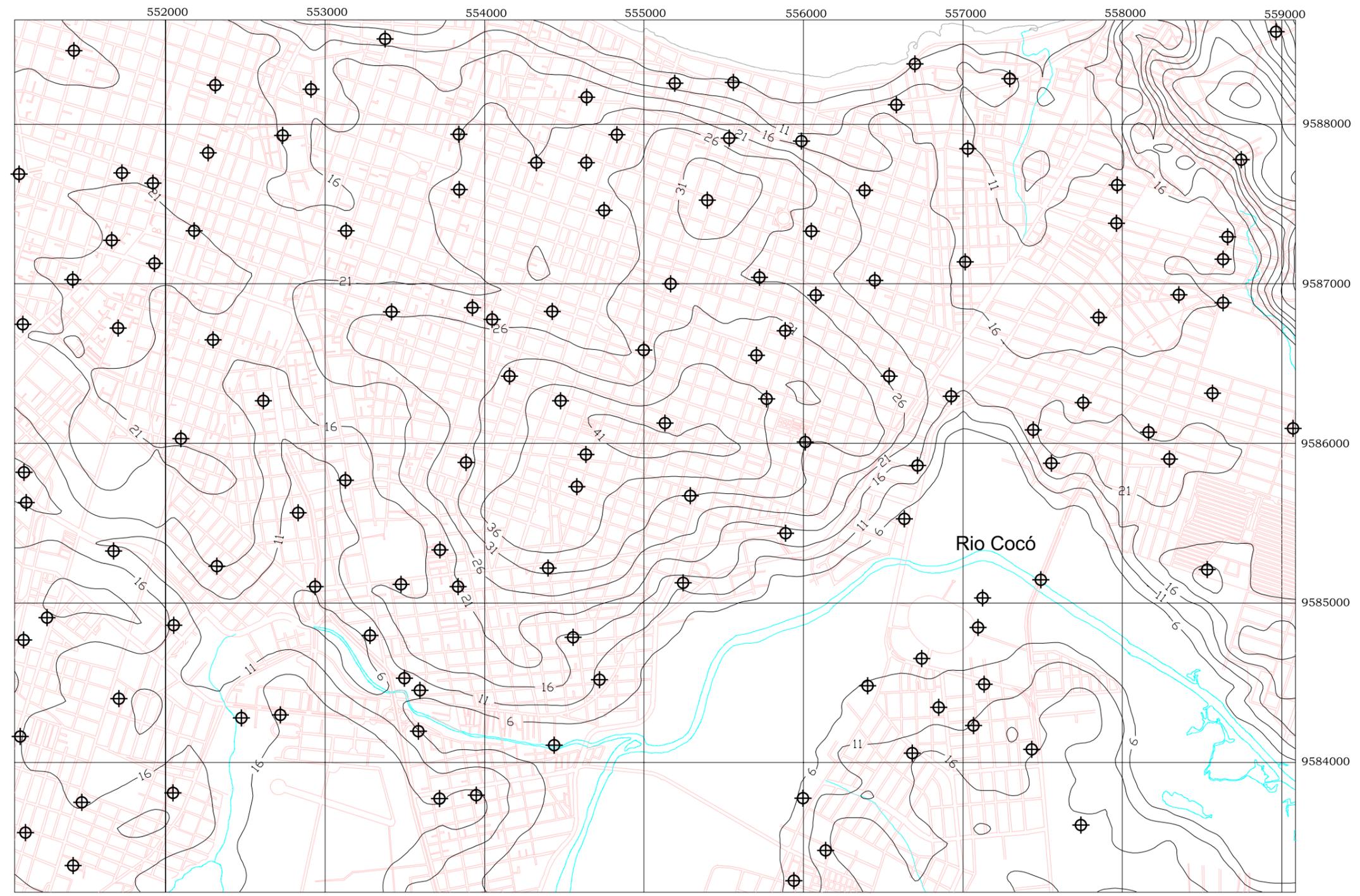
Os mapas da superfície impenetrável ao SPT com $N \geq 50$, pode ser considerado como um mapa do impenetrável a um determinado elemento estrutural, no caso, a superfície impenetrável a estacas metálicas ou a superfície de apoio da base de tubulões.

5.4 - MODELAGEM GEOESTATÍSTICA TRIDIMENSIONAL

5.4.1 - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS DE N DO SPT

Como etapa preliminar ao processamento das estimativas por krigagem de blocos, a análise estatística foi realizada considerando todos os valores de N, representativos do SPT em todas as sondagens armazenadas no banco de dados elaborado. A amostra consta de 1711 dados, obtidos a partir das 126 sondagens (Figura 5.46) , sendo que valores de N acima de 60 golpes foram codificados como 60, em conformidade com o discutido por AOKI & CINTRA (1999) e CINTRA & AOKI (1999) e em concordância com os limites de aplicabilidade do N em função de elementos estruturais de fundação por estacas e/ou tubulões, segundo AOKI & CINTRA (2003, vide Tabela 2.1) .

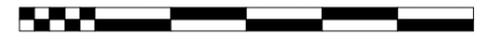
Na Figura 5.47, estão ilustradas as estatísticas descritivas, nas quais se constata uma forte assimetria positiva, com $C.V = 1,065$. FERRON (2000) comenta que na aplicação de técnicas geoestatísticas de estimativa, valores deste coeficiente, superiores a 1,20, estão relacionados a amostras com distribuição log-normal. Para o processamento das estimativas por krigagem ordinária de blocos (krigagem ordinária 3D), assumir-se-á a hipótese de normalidade com forte assimetria da função de distribuição dos dados.



Convenções Cartográficas

-  Quadras
-  Limite
-  Drenagem
-  Curvas de nível altimétrico
-  Sondagens

300 0 300 600 900 1200 1500 Metros



Escala 1:28.000

FIGURA 5.46 - Mapa de localização das sondagens.

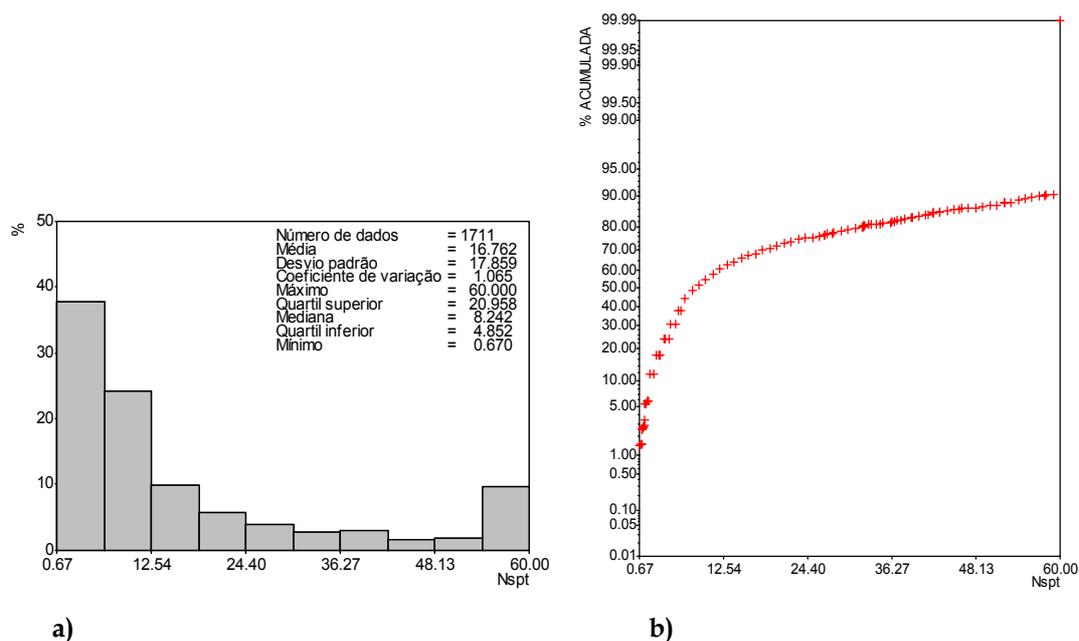


FIGURA 5.47 – Estatísticas descritivas dos dados de N do SPT: **a)** histograma de frequências simples e; **b)** curva de probabilidade aritmética acumulada

5.4.2 – REGULARIZAÇÃO DOS DADOS DAS SONDAGENS COM SPT

O procedimento de regularização consistiu na preparação da base de dados de N nas estimativas via krigagem ordinária 3D. A necessidade por se proceder a essa etapa é justificada pelo fato de que as sondagens com SPT estão posicionadas em diferentes cotas topográficas.

A regularização de furos de sondagem é uma etapa rotineira nos trabalhos de pesquisa e avaliação de recursos minerais (YAMAMOTO, 2001). No caso dos dados de N do SPT, a regularização foi realizada considerando a composição por bancadas, como geralmente se opta pela lavra de minério em uma cava a céu aberto. Deste modo, as formas de relevo da área de pesquisa foram discretizadas, altimetricamente, em bancadas, e assim tornando acessível cada nível topográfico, ou seja, cada bancada com as cotas de topo e base, conforme ilustra a Figura 5.48. O modelo conceitual assumido para se trabalhar com as estimativas de blocos é o de uma “jazida de N_{SPT}”, o que permitiu a interpolação em cada nível topográfico.

Na operação de discretização são levados em conta: a cota topográfica de cada furo de sondagem, o comprimento de cada furo, as coordenadas UTM, o azimuth e mergulho. Como as sondagens são verticais, então foram adotados azimuth 0 (zero) e mergulho de 90° (noventa graus). Como resultado, a base de dados original é

substituída por uma nova base de dados regularizada e adequada ao processamento das estimativas.

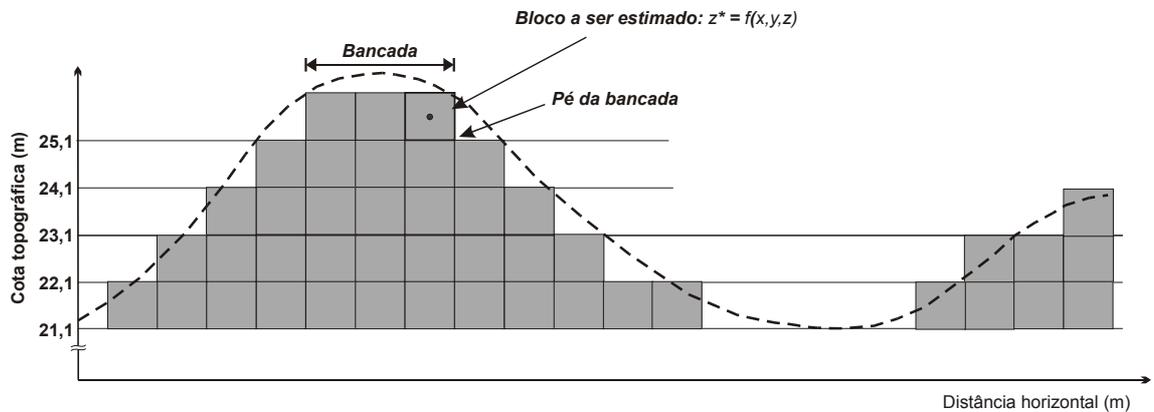


FIGURA 5.48 – Representação esquemática da disposição em perfil das bancadas em função do traçado do relevo.

Na presente dissertação, foi utilizado o módulo *Composite* do *Sistema GeoVisual 2.1*, em duas versões com algoritmos diferentes de cálculo/adoção dos valores regularizados para cada bancada. Um algoritmo, normalmente empregado, utiliza uma média ponderada do valor de N pelos intervalos da sondagem amostrados, sendo representada pela seguinte equação:

$$N_c = \frac{\sum_{i=1}^n N_i I_i}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad (5.6)$$

onde n é o número de trechos para compor o intervalo de trabalho, N_i , é o i -ésimo valor de N e I_i é o i -ésimo intervalo amostrado. Como exemplo do produto final da regularização, os dados regularizados da sondagem 006 é apresentada na forma da Figura 5.49.

O outro algoritmo, utilizado na presente dissertação, trabalha com o critério de adoção do valor de N da maior parcela do intervalo da sondagem representada na bancada em questão, como é mostrado na Figura 5.50.

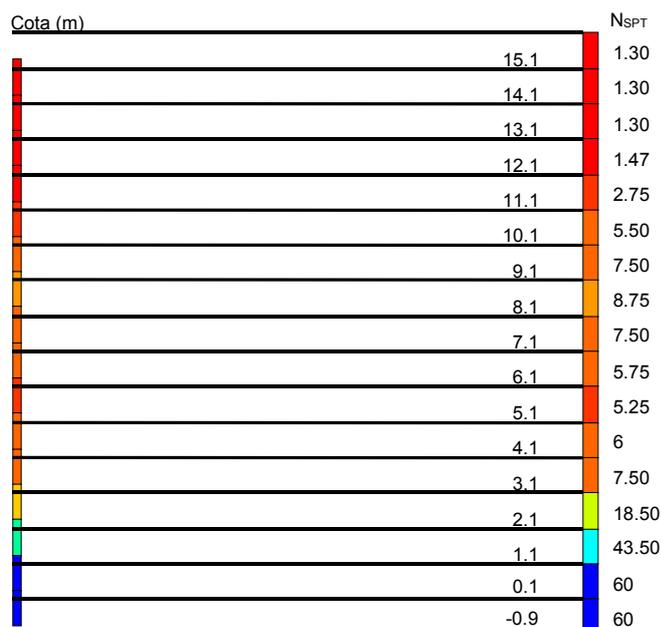


FIGURA 5.49 – Furo de sondagem 006 com dados de N regularizados utilizando o método de média ponderada.

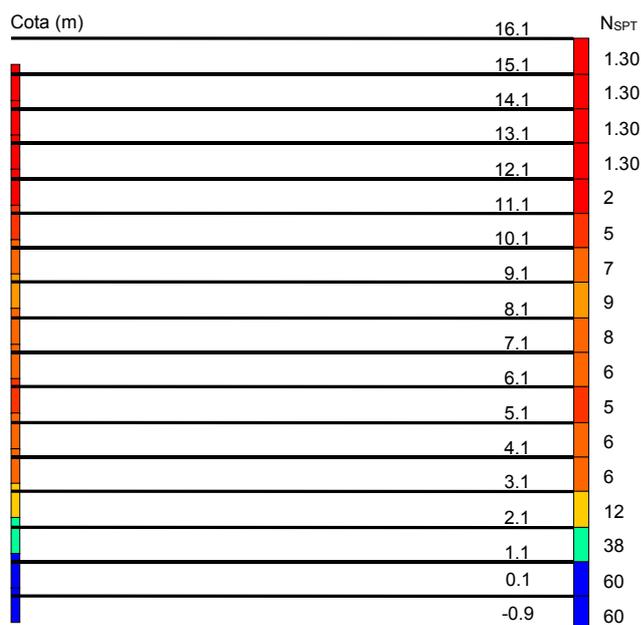


FIGURA 5.50 – Furo de sondagem 006 com dados regularizados sem a utilização da média ponderada.

A justificativa, para se utilizar dois métodos de regularização, foi amparada pela conjectura inicial de que os dados originais de N do SPT poderiam ser alterados substancialmente no processo de ponderação para a composição das bancadas e, por consequência, poderia constituir uma fonte de erro. Com a aceitação de tal suposição, foram realizadas duas operações de regularização, com os dois algoritmos.

Inicialmente, seriam computadas 57 (cinquenta e sete) bancadas mas, durante a execução das versões do programa *Composite* alguns erros relacionados à ausência de pontos, suficientes para estimativa, e ausência total de dados na bancada de cota 15,1m foram apresentados. Além disto, 9 (nove) bancadas apresentavam menos que cinco pontos de dados, o que contabiliza 47 (quarenta e sete) bancadas válidas para efeito de realização da validação cruzada e das estimativas. A solução adotada foi a de seccionamento da base regularizada em duas bases de dados altimetricamente distintas. Na Tabela 5.6, estão listadas os parâmetros utilizados nos dados regularizados.

Como critério analítico, foram analisadas as estatísticas descritivas dos dados de saída e observadas as diferenças (Figura 5.51). Nesta figura percebe-se que as diferenças não têm significado físico, mostrando que, em princípio, as bases de dados regularizados podem ser utilizadas. Entretanto, a base de dados regularizados sem a ponderação será tratada, por preservar os valores originais de N do SPT.

TABELA 5.6 – Parâmetros utilizados nos processos de regularização

Parâmetro	Base regularizada única	Base regularizada 1	Base regularizada 2
Cota máxima (m) *	39,10	37,10	14,10
Cota mínima (m)*	-16,90	16,10	-8,90
Bancadas	57	21	26

* base da bancada

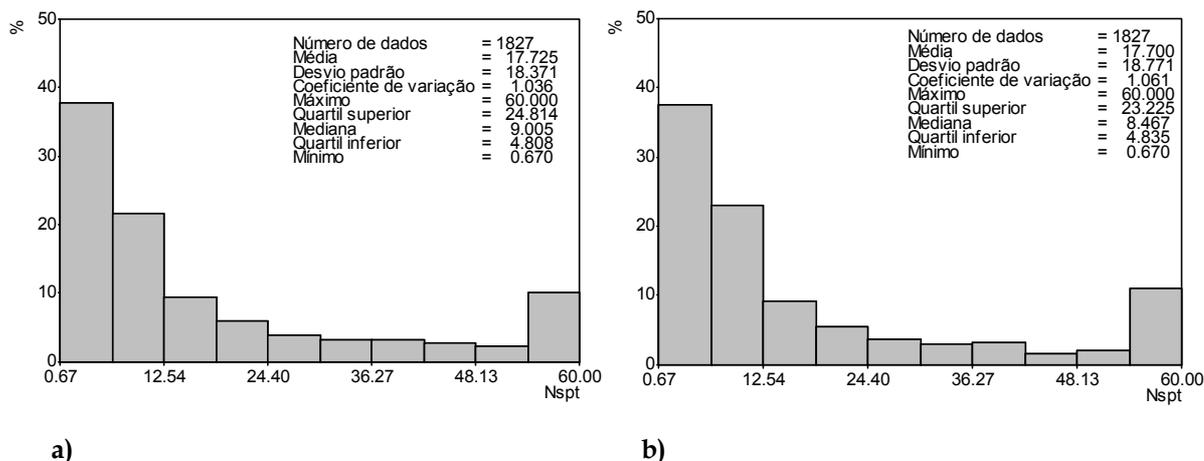


FIGURA 5.51 - Histogramas de freqüências simples dos dados regularizados: a) Com ponderação e b) Sem ponderação.

5.4.3 – ANÁLISE VARIOGRÁFICA 3D DOS DADOS REGULARIZADOS

O procedimento de análise variográfica 3D não é muito diferente do caso bidimensional. Os parâmetros de pesquisa a serem definidos são os mesmos. O que muda, de fato, é que, adicionalmente às duas direções horizontais de pesquisa, uma terceira direção vertical é pesquisada ao longo das sondagens, com o objetivo de quantificação da variabilidade dos valores de N. Os parâmetros da janela de pesquisa estão listados na Tabela 5.7.

TABELA 5.7 – Parâmetros da janela de pesquisa

Parâmetro	Semivariogramas horizontais	Semivariograma vertical
Passo (m)	450	0,5
Tolerância do passo (m)	150	0,25
Tolerância angular	90 ^o	5 ^o
Faixa de abertura (m)	2000	100

Na variografia horizontal, pares de semi-variogramas foram utilizados na pesquisa, observando-se que os mesmos eram isotrópicos e por esta razão, considerou-se um semivariograma experimental omnidirecional. Na etapa de análise variográfica exploratória 3D, foi constatado um problema, relacionado às ordens de grandeza das amplitudes dos semi-variogramas, e por esta razão, foi necessária a modelagem do semi-variograma vertical em separado. Isto possibilitou o levantamento dos parâmetros estruturais para a modelagem do semi-variograma 3D final (Figuras 5.52 e 5.53).

Na Figura 5.52, observa-se que há pronunciada tendência, contudo admite-se que o campo geométrico não foi suficientemente amostrado, com base na hipótese intrínseca para o fenômeno regionalizado na componente vertical.

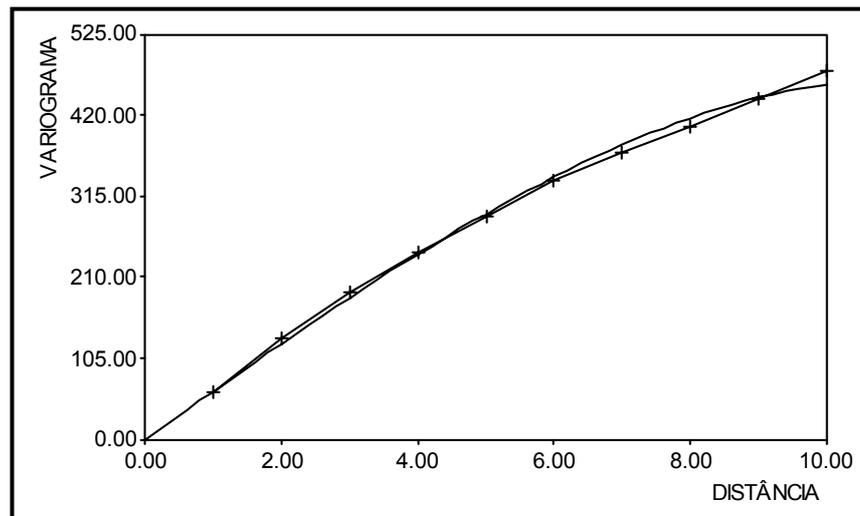


FIGURA 5.52 – Semivariograma experimental vertical ajustado a um modelo esférico. A distância está em metros.

O modelo esférico ajustado é representado pela seguinte equação:

$$\begin{cases} \gamma(h) = 468 \left[1,5 \left(\frac{h}{11,2} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{11,2} \right)^3 \right] & \text{para } h < 11,2m \\ \gamma(h) = 468 & \text{para } h \geq 11,2m \end{cases} \quad (5.7)$$

A Figura 5.52 exhibe o semivariograma 3D, em que se observa forte anisotropia zonal decorrente da tendência no semivariograma vertical. Com os parâmetros levantados à parte, foi possível ajustar um modelo esférico à componente vertical e, deste modo, ajustar um modelo esférico anisotrópico representado pela seguinte equação:

$$\gamma(h) = 243 + 99 \left[1,5 \left(\frac{h}{494} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{494} \right)^3 \right] + 468 \left[1,5 \left(\frac{h}{11,2} \right) - 0,5 \left(\frac{h}{11,2} \right)^3 \right] \quad (5.8)$$

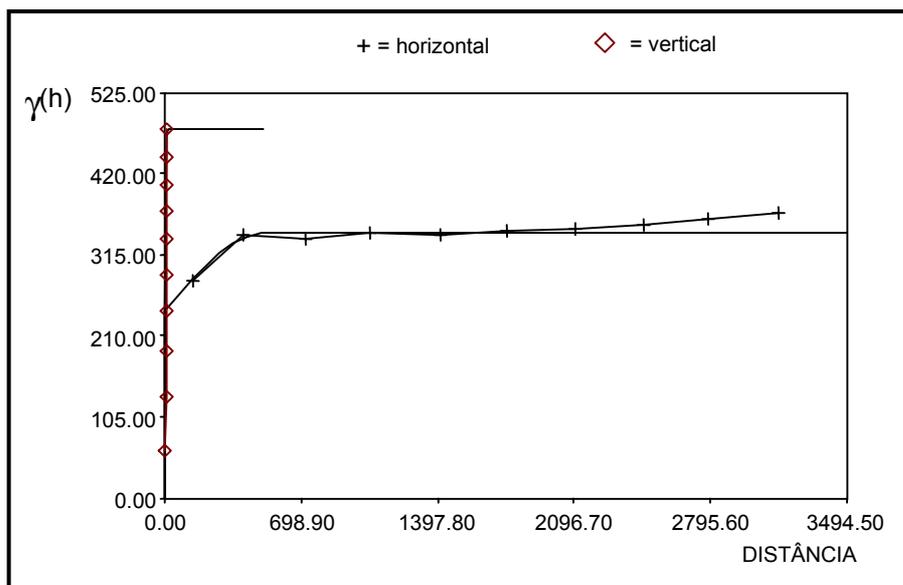


FIGURA 5.53– Semivariograma experimental ajustado a um modelo esférico anisotrópico. A distância está em metros.

A validação cruzada do modelo variográfico ajustado ocorreu em duas etapas em conformidade com as limitações encontradas na discretização das bancadas. Assim, a validação cruzada foi realizada para os dois conjuntos de bancadas, considerando os parâmetros apresentados na Tabela 5.4 (Figuras 5.54 e 5.55).

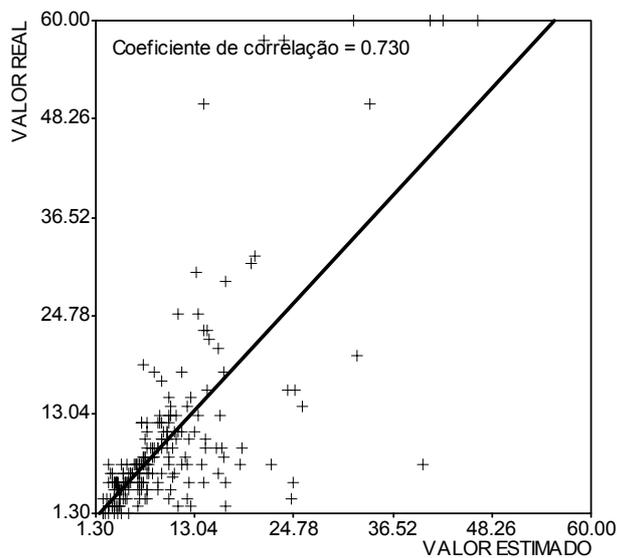


FIGURA 5.54 – Diagrama de dispersão da validação cruzada com 215 pontos das bancadas de cotas 37,10 a 16,10m.

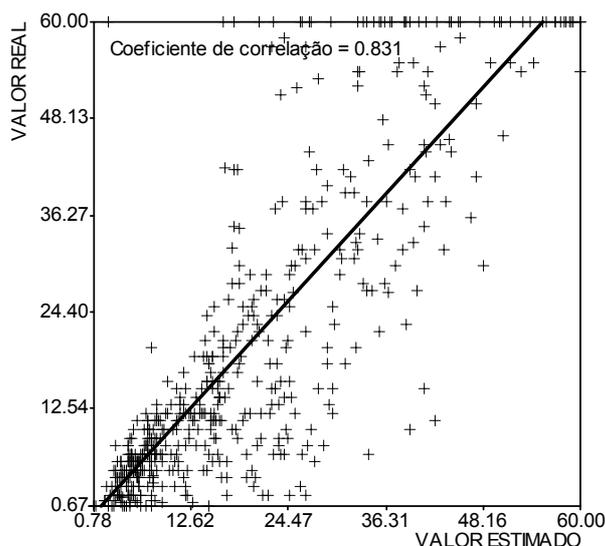


FIGURA 5.55 – Diagrama de dispersão da validação cruzada com 515 pontos das bancadas de cotas 14,10 a -8,90m.

YAMAMOTO & ROCHA (1996) recomendam, para o cálculo de recursos/reservas geológicas, que as dimensões dos blocos sejam no mínimo a metade da distância do espaçamento médio entre as amostras, garantindo assim a presença de pelos menos 1(um) ponto de amostragem na área de influência. No caso da análise exploratória mineira, esta limitação visa garantir uma variabilidade mínima nas estimativas e a continuidade da mineralização na modelagem da jazida.

O espaçamento médio entre as sondagens é aproximadamente 750m, e aplicando o sugerido pelos referidos autores, os blocos estimados apresentam um volume unitário de $350 \times 350 \times 1 \text{m}^3$. As condições de interpolação estabelecidas – sendo as mesmas para a krigagem ordinária 3D – na realização da validação cruzada foram: um ponto por setor com pelo menos quatro pontos ao todo e busca dos pontos mais próximos em um raio de influência de 450m.

A validação cruzada 3D, diferente daquela realizada em duas dimensões, é executada considerando os pontos de N do SPT selecionados em diversos níveis topográficos, considerando as definições de vizinhança local da interpolação (Tabela 5.8).

TABELA 5.8 – Dados utilizados na estimativa do N do SPT no ponto de coordenadas 554047E/9586776N, cota 14,10m.

Ponto	Leste	Norte	Cota (m)	N	Peso
1	554423	9586825	14,10	13	0,1886
2	553922	9586848	13,10	4	0,2863
3	554047	9586776	14,10	6	0,3349
4	554154	9586419	14,10	14	0,1902
<i>Valor real</i>					7,000
<i>z*(x)</i>					8,269
<i>Erro verdadeiro</i>					1,269
<i>S</i>					4,173
σ_{KO}					18,801
μ					53,421

z(x)* – valor estimado; *S* – desvio de interpolação;

σ_{KO} – desvio de krigagem ordinária; μ – multiplicador de Lagrange

5.4.4 – KRIGAGEM ORDINÁRIA 3D: O MODELO DE “JAZIDA DE N_{SPT} ”

A abordagem dos dados de N do SPT com a Krigagem Ordinária de Blocos é similar àquela utilizada na quantificação de recursos/reservas geológicas de um determinado minério. A diferença é, no caso da mineração, que o bloco discretizado corresponde a uma unidade de lavra, ou seja, um elemento geométrico que possui implicações técnicas e econômicas do ponto de extração e beneficiamento do minério de interesse. No caso dos dados de N do SPT, à semelhança ao realizado por PERES (1998), a aplicação visa o conhecimento da variabilidade de N a cada metro, considerando a topografia da área pesquisada.

Nesta parte do trabalho, objetivou-se a elaboração de um modelo “em jazida” do N na porção nordeste da Cidade de Fortaleza-CE como instrumento de quantificação da variabilidade do índice de resistência do solo do SPT em três dimensões. Com o modelo geoestatístico 3D, foi possível estimar valores de N por bancadas, além da geração dos mapas de desvios de interpolação associados. Conforme será mostrado na próxima seção do presente capítulo, a estimativa por bancada permitirá a elaboração dos mapas de uso sugerido de fundações. Com a adoção das condições de vizinhança local e discretização das bancadas, estimou-se 23.598 blocos.

Foi relatado anteriormente que, no processo de regularização dos dados de sondagem, uma bancada com cota de base de 15,1 m não dispunha de dado algum. Assim sendo, como realizado na etapa de validação cruzada, utilizou-se de dois conjuntos de bancadas, seccionando a “jazida de N_{SPT} ” em duas partes (Figuras 5.56 e 5.57).

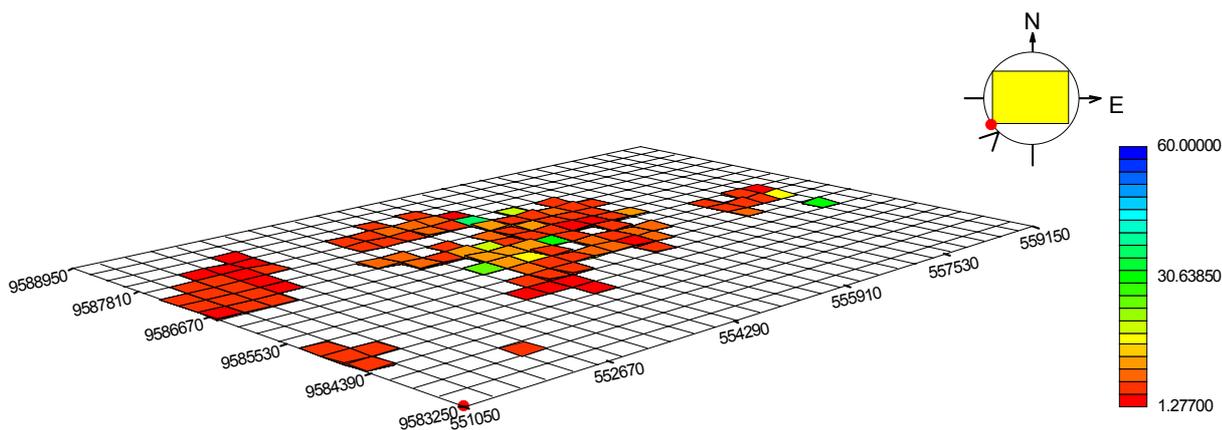


FIGURA 5.56 – Modelo de blocos estimados das bancadas de cotas 37,10 a 16,10m.

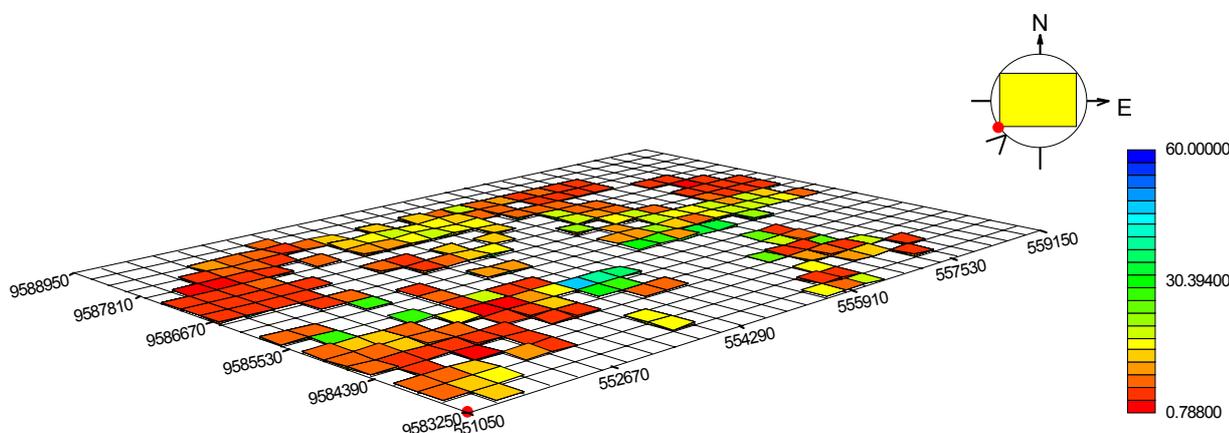


FIGURA 5.57 – Modelo de blocos estimados das bancadas de cotas 14,1 a -8,90m.

Conforme se observa nas Figuras 5.56 e 5.57, os blocos se apresentam como paralelepípedos muito achatados. Isto se deve à altura da bancada (1m) que é muito pequena em relação às dimensões planares, comprometendo a visualização do modelo de jazida de N.

5.4.5 – DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O modelo variográfico omnidirecional 3D ajustado apresenta elevado efeito pepita, o que, em primeira análise, contribuiria para a suavização dos dados estimados. Contudo, como pode-se observar nas Figuras 5.54 e 5.55, os valores de N previstos apresentam correlação significativa com os valores reais, indicando que o semi-variograma experimental ajustado é representativo da variabilidade dos dados de N.

Com a aceitação do modelo variográfico ajustado, procedeu-se às estimativas propriamente ditas. Nos resultados obtidos com a etapa de validação cruzada, constatou-se que as condições de vizinhança local, preestabelecidas, são válidas para o

cômputo das estimativas e, assim, possibilitam a obtenção de dados estimados para cada bancada. A discretização das bancadas em blocos menores poderia implicar em estimativas sem significado físico. Os valores de N estimados constituem uma base de dados de saída que foi utilizada para elaboração dos mapas de uso sugerido de fundações.

5.5 – MAPAS DE USO SUGERIDO DE FUNDAÇÕES

Os produtos cartográficos elaborados no presente trabalho têm forte orientação conceitual dos preceitos que norteiam o mapeamento geotécnico, cuja finalidade principal, segundo ZUQUETTE (1987), é a de orientação na exploração local, visando a redução de tempo e de custos operacionais iniciais. Contudo, sem se desvencilhar da premissa básica de que todo documento cartográfico geotécnico não deverá substituir procedimentos de de investigação direta (sondagens com SPT, CPT, poços de inspeção com coleta de amostras, etc.) de dados geotécnicos a serem utilizados em projetos de fundações.

Os mapas de uso sugerido de fundações resultam de uma idéia derivada do conceito de impenetrável ao amostrador do SPT, mas com extensão às soluções estruturais comumente utilizadas na Engenharia de Fundações, conforme AOKI & CINTRA (2003) na Tabela 2.1. A elaboração, propriamente dita, dos mapas foi baseada na aplicação dos limites de impenetrável de N para alguns elementos estruturais relatados na referida tabela. Assim, para cada elemento estrutural há uma faixa de N que representa a possibilidade de cravação da estaca e/ou de alcançar a cota de apoio da base de um tubulão.

Convém ressaltar que a abordagem empregada não considera o efeito de grupo, ou seja, as informações presentes nos mapas são somente aplicáveis ao elemento estrutural isolado.

As bases cartográficas, o mapa topográfico (MDT em planta), o mapa de cotas do nível freático foram integrados em ambiente SIG no programa *ArcView 3.1*. Neste programa, inicialmente, foram inseridas as bases de dados de saída da krigagem ordinária 3D, ou seja, os dados de N estimados por bancada. Como cada bancada representa um corte horizontal no terreno, e por conseguinte, um corte na jazida de N, as bancadas foram interpretadas como mapas do índice N com cotas topográficas

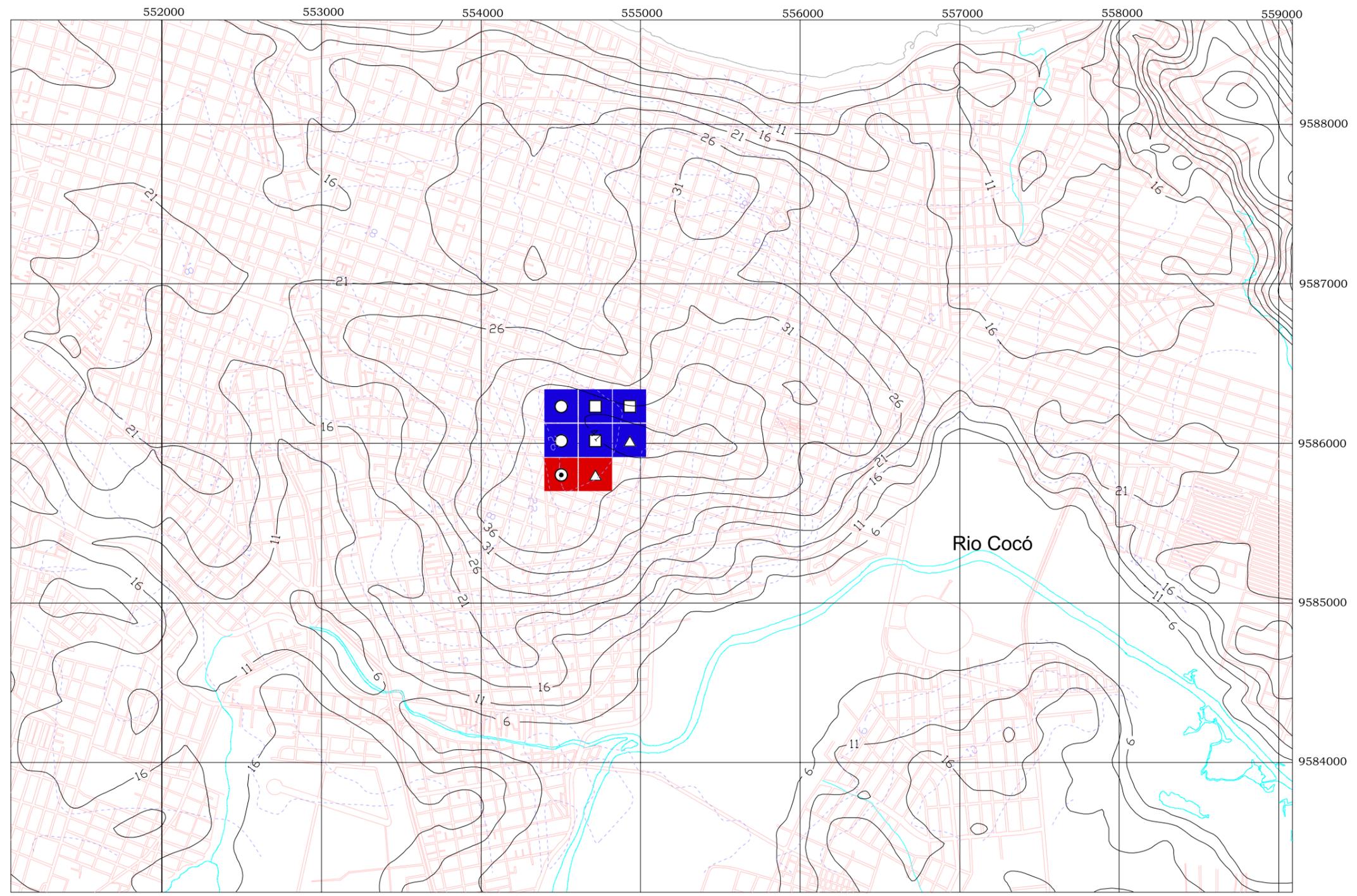
próprias, salientando-se que as cotas topográficas são relativas ao nível médio do mar em Fortaleza.

Os mapas foram elaborados tomando por base somente dados pertencentes a bancadas posicionadas a cada 5m. Como a bancada de cota 37,1m não apresentou número de dados estimados que justificasse a sua utilização, então, utilizou-se os dados da bancada situada a cinco metros imediatamente inferior, ou seja, a de cota 32,1m e assim por diante. As bancadas utilizadas na produção dos mapas foram as de cotas: 32,1; 27,1; 22,1; 17,1; 12,1; 7,1; 2,1 e -2,9 como ilustram as Figuras 5.58 a 5.65.

Os elementos estruturais abordados foram: estacas de concreto pré-moldadas com diâmetros superior e inferior a 30cm, estacas Strauss, estacas Franki em solos arenosos e estacas em perfil metálico. Em cada mapa, estão representados os intervalos de N correspondentes ao elemento estrutural recomendado. A adoção destes elementos, para representação em mapas, não partiu de qualquer critério construtivo ou da experiência local de utilização. Isto significa que os mapas podem ser modificados em função da tendência de projeto e/ou execução de fundações da região.

A representação de tantos elementos geométricos no mapa pode fazer com que a sua interpretação seja pouco prática, podendo causar ao consulente do mapa alguma falha de entendimento. Assim sendo, são listados a seguir alguns esclarecimentos:

- ☞ *Em cada mapa, os blocos estão situados no mesmo nível topográfico, ou seja, para se saber a que profundidade uma faixa de valores de N está posicionada, basta diminuir o valor da curva de nível topográfico do ponto pelo valor da cota topográfica à qual a faixa pertence;*
- ☞ *O nível freático está cotado em metros com relação ao nível médio dos mares;*
- ☞ *Os blocos de cor cinza ou vermelho em alguns mapas foram interpretados como “Sem aplicação”, indicando que os valores de N não têm aplicabilidade para os tipos de elementos estruturais de fundação considerados, o que denota uma baixa resistência do solo;*
- ☞ *A cada bloco está associada uma faixa de desvios de interpolação, que é representada por uma figura geométrica. Isto mostra que blocos com mesma faixa de valor de N podem possuir faixa de desvios de interpolação diferentes.*



Convenções Cartográficas

- Quadras
- Limite
- Drenagem
- Curvas de nível altimétrico
- Curvas isoaltimétricas do nível freático

Faixa de variação do N do SPT

- 8 - 15 (Estacas Franki em solos arenosos)
- 4 - 7 (Sem aplicação)

Desvios de Interpolação

- 7.503 - 8.031
- 6.226 - 7.503
- 2.106 - 6.226
- 1.454 - 2.106

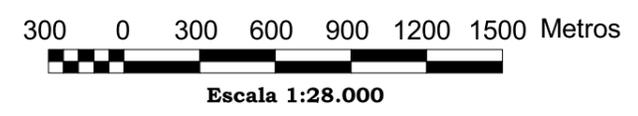
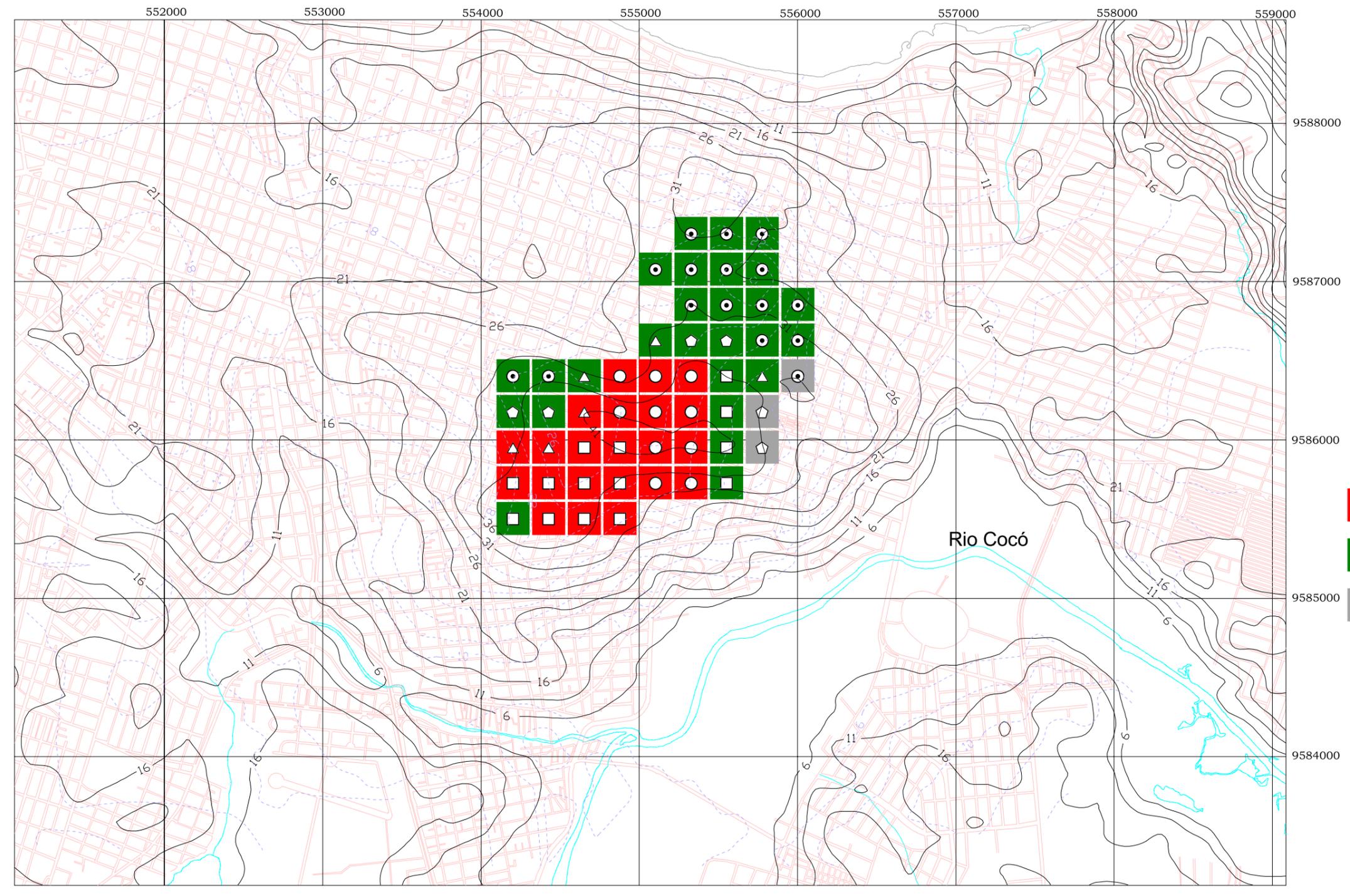


FIGURA 5.58 - Mapa de uso sugerido de fundações para cota de 32,1m.



Convenções Cartográficas

- Quadras
- Limite
- Drenagem
- Curvas de nível altimétrico
- Curvas isoaltimétricas do nível freático

Faixa de variação do N do SPT

- 15 - 25 (Estacas pré-moldadas com d <30cm)
- 8 - 15 (Estacas Franki em solos arenosos)
- 4 - 7 (Sem aplicação)

Desvios de Interpolação

- 17.311 - 23.342
- 12.309 - 17.311
- 6.14 - 12.309
- 3.297 - 6.14
- 0.963 - 3.297

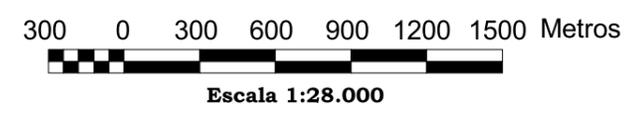
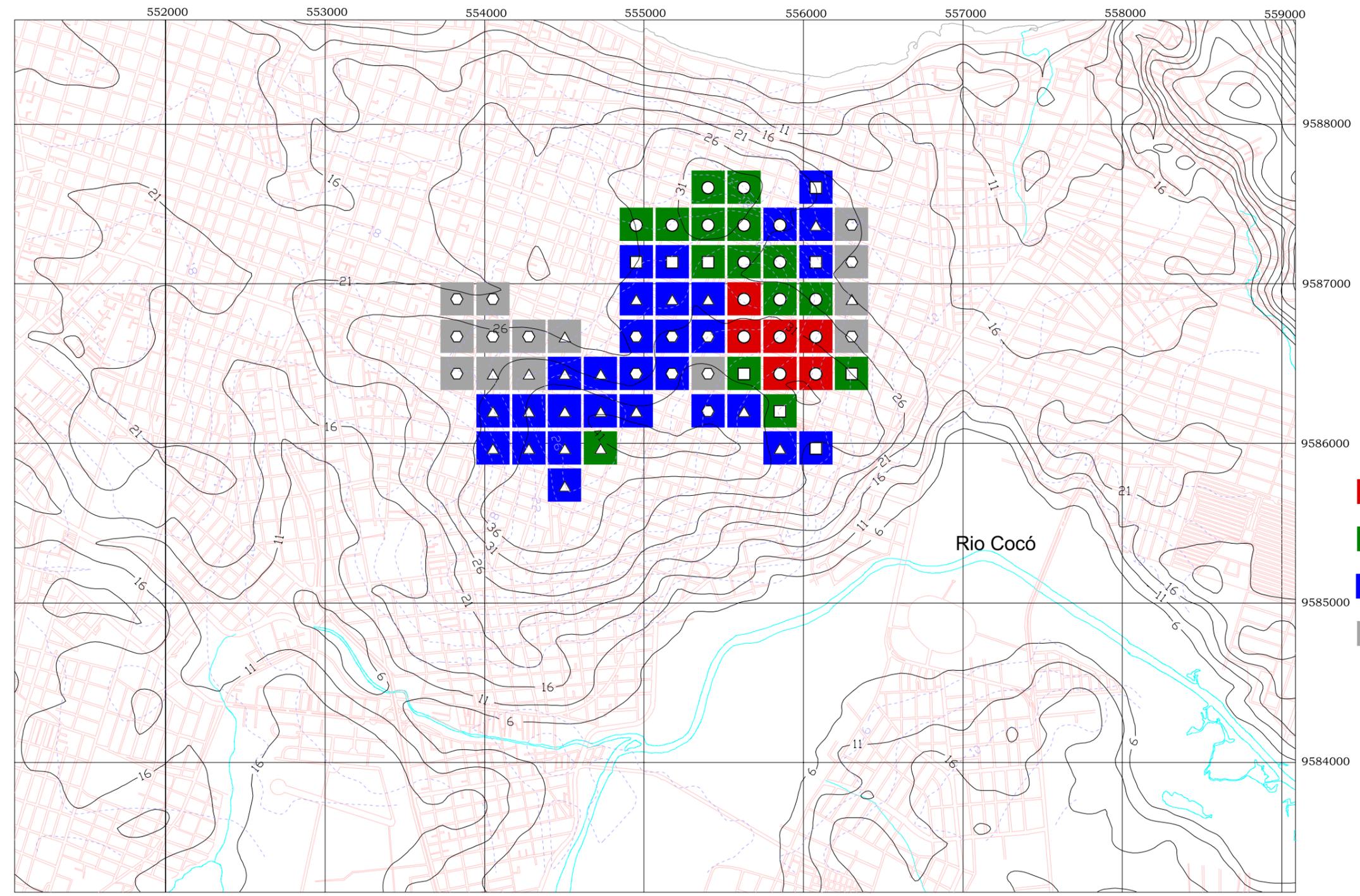


FIGURA 5.59 - Mapa de uso sugerido de fundações para cota de 27,1m.



Convenções Cartográficas

- Quadras
- Limite
- Drenagem
- Curvas de nível altimétrico
- Curvas isoaltimétricas do nível freático

Faixa de variação do N do SPT

- 25 - 35 (Estacas pré-moldadas com d >30cm)
- 15 - 25 (Estacas pré-moldadas com d <30cm)
- 8 - 15 (Estacas Franki em solos arenosos)
- 4 - 7 (Sem aplicação)

Desvios de Interpolação

- 14.943 - 24.066
- 7.331 - 14.943
- 3.435 - 7.331
- 1 - 3.435

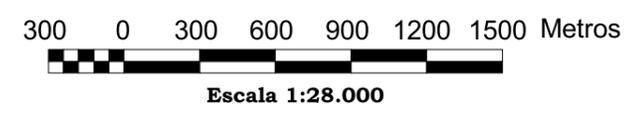
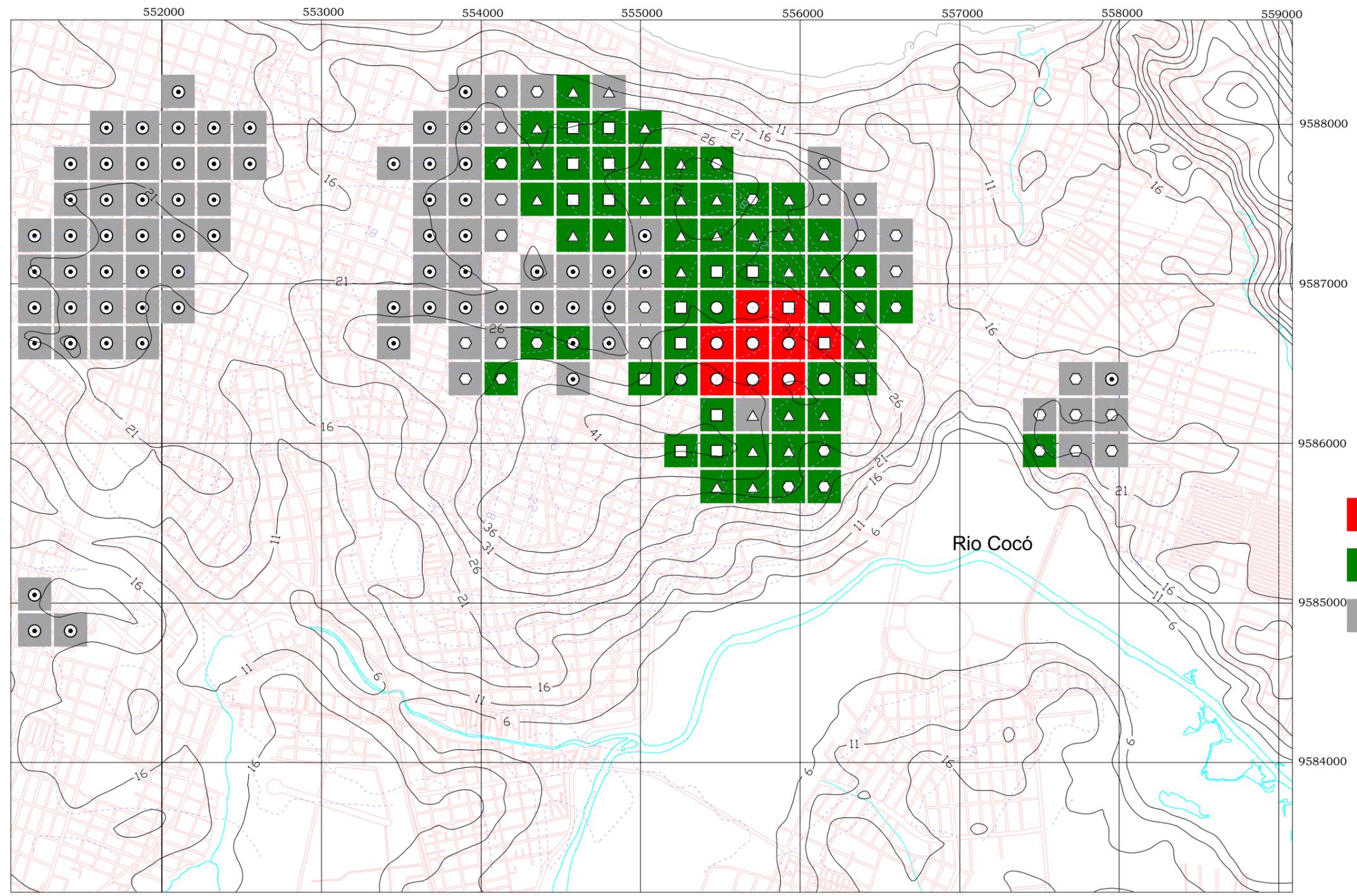


FIGURA 5.60 - Mapa de uso sugerido de fundações para cota de 22,1m.



Convenções Cartográficas

- Quadras
- Limite
- Drenagem
- Curvas de nível altimétrico
- Curvas isoaltimétricas do nível freático

Faixa de variação do N do SPT

- 15 - 25 (Estacas pré-moldadas com d < 30cm)
- 8 - 15 (Estacas Franki em solos arenosos)
- 2 - 7 (Sem aplicação)

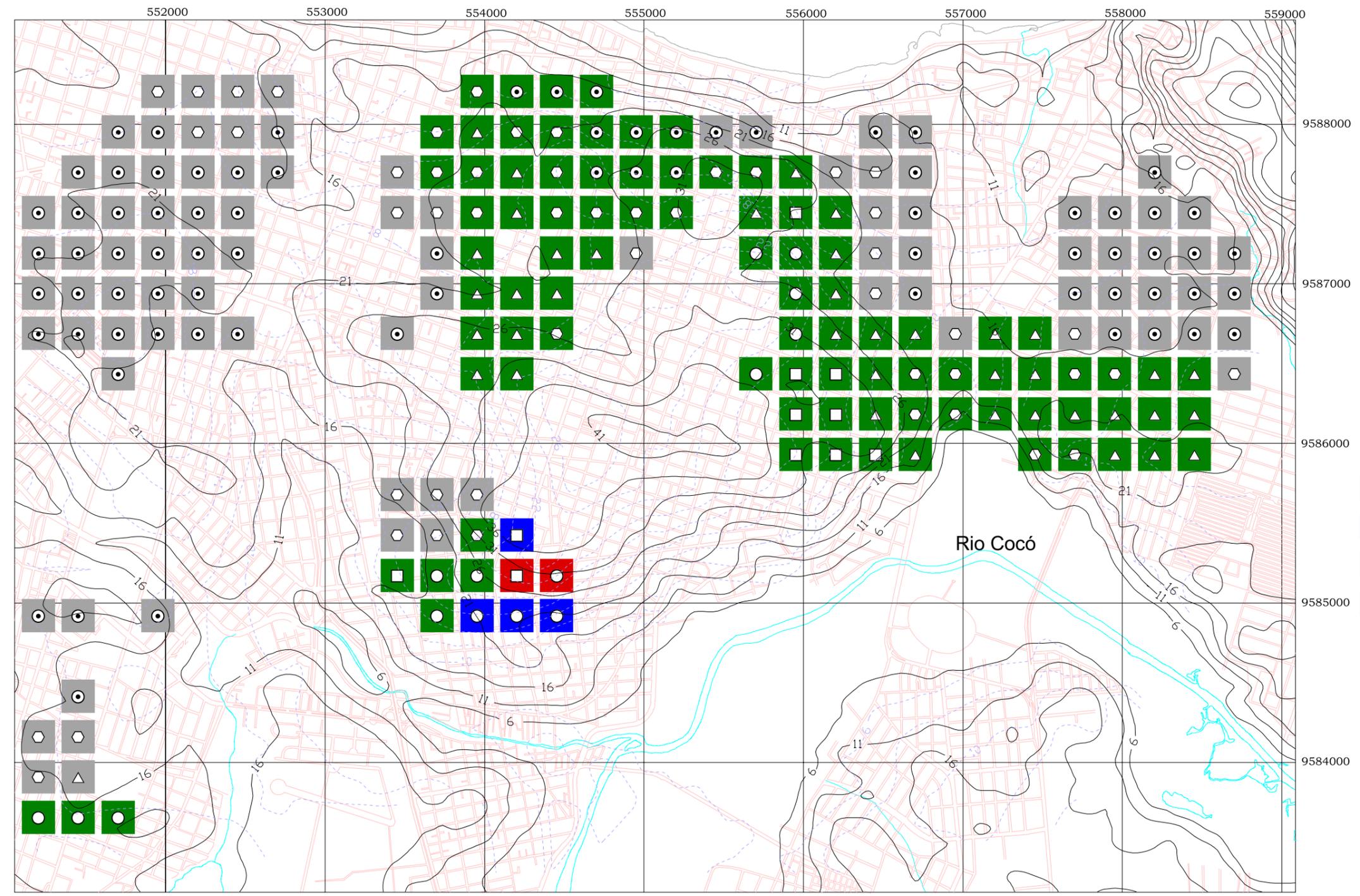
Desvios de Interpolação

- 14.247 - 22.689
- 7.745 - 14.247
- 4.375 - 7.745
- 2.127 - 4.375
- 0.618 - 2.127



Escala 1:28.000

FIGURA 5.61 - Mapa de uso sugerido de fundações para cota de 17,1m.



Convenções Cartográficas

- Quadras
- Limite
- Drenagem
- Curvas de nível altimétrico
- Curvas isoaltimétricas do nível freático

Faixa de variação do N do SPT

- 35 - 51 (Estacas perfil metálico)
- 25 - 35 (Estacas pré-moldadas com d >30cm)
- 10 - 25 (Estacas Strauss)
- 2 - 9 (Sem aplicação)

Desvios de Interpolação

- 14.95 - 26.932
- 8.883 - 14.95
- 5.543 - 8.883
- 3.075 - 5.543
- 0.552 - 3.075

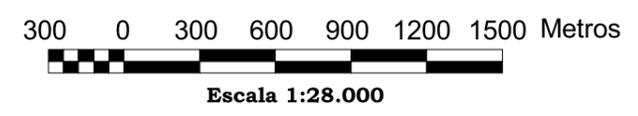


FIGURA 5.62 - Mapa de uso sugerido de fundações para cota de 12,1m.

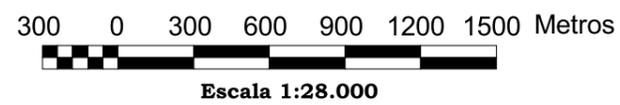
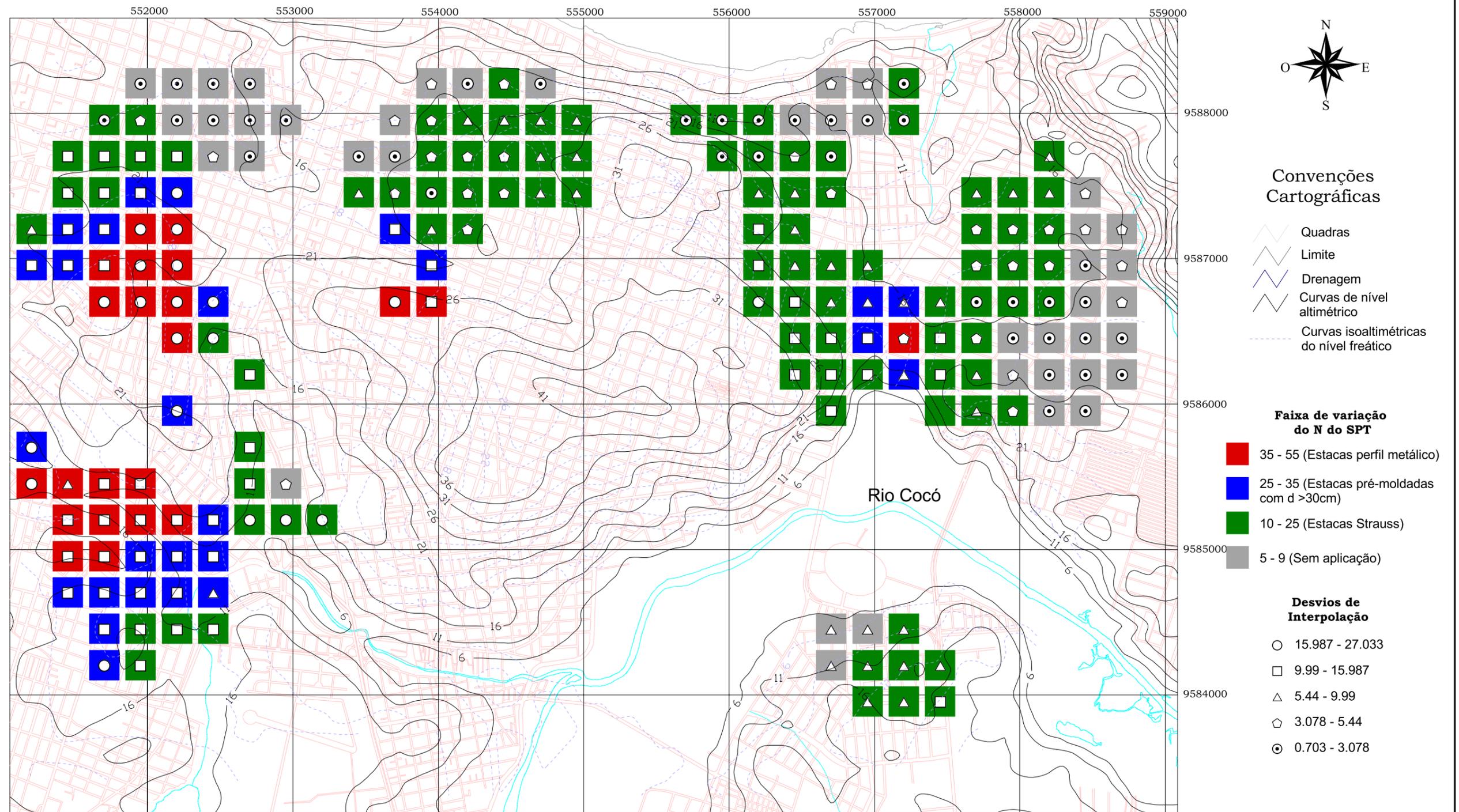
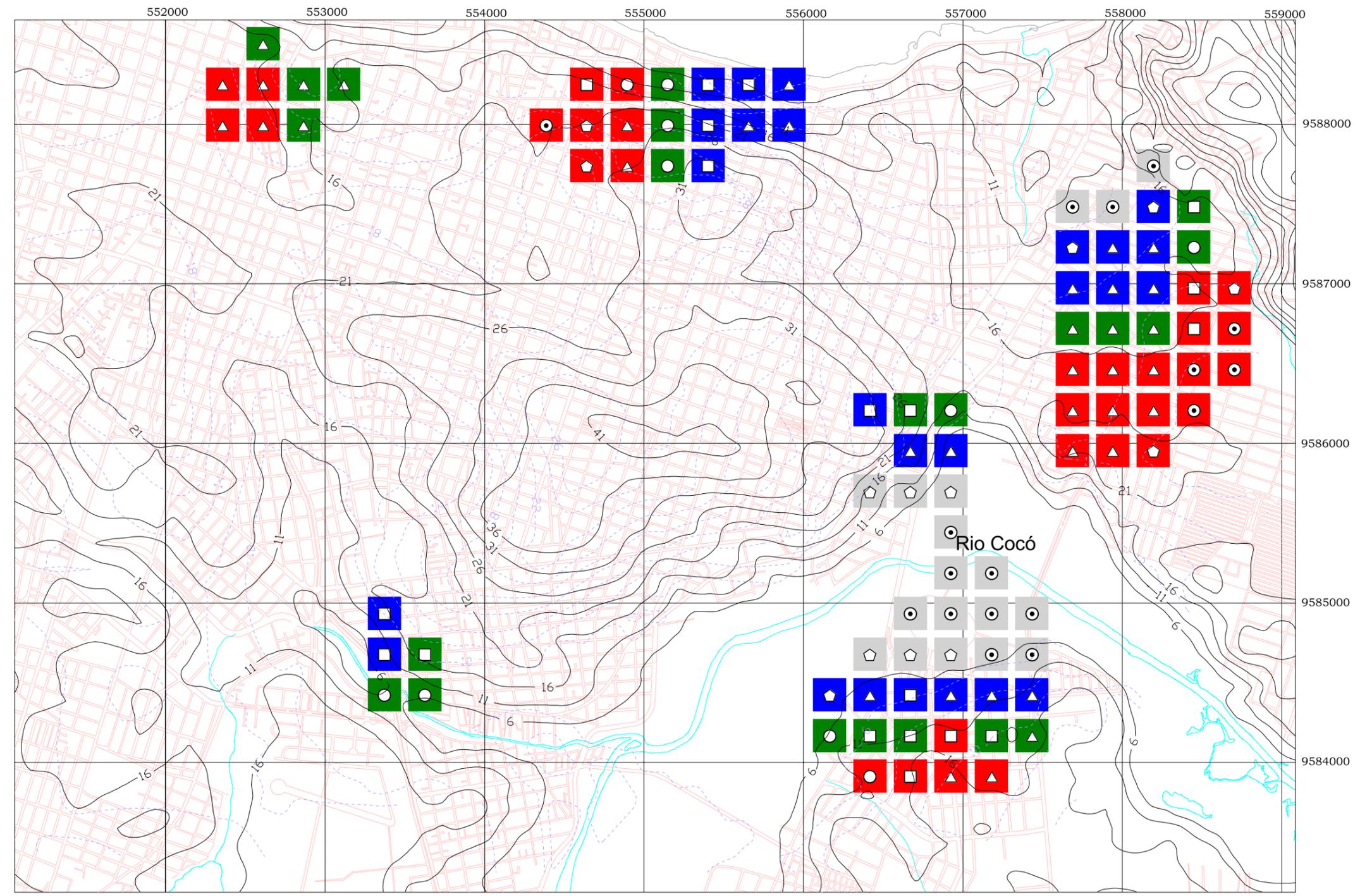


FIGURA 5.63 - Mapa de uso sugerido de fundações para cota de 7,1m.



Convenções Cartográficas

- Quadras
- Limite
- Drenagem
- Curvas de nível altimétrico
- Curvas isoaltimétricas do nível freático

Faixa de variação do N do SPT

- 36 - 58 (Estaca perfil metálico)
- 26 - 35 (Estacas pré-moldadas com d >30cm)
- 11 - 25 (Estacas Strauss)
- 2 - 10 (Sem aplicação)

Desvios de interpolação

- 18.966 - 24.449
- 14.848 - 18.966
- 10.134 - 14.848
- 5.62 - 10.134
- 1.809 - 5.62

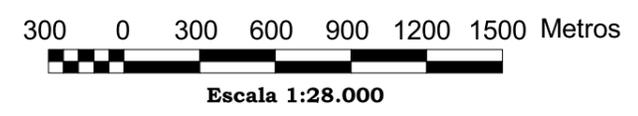
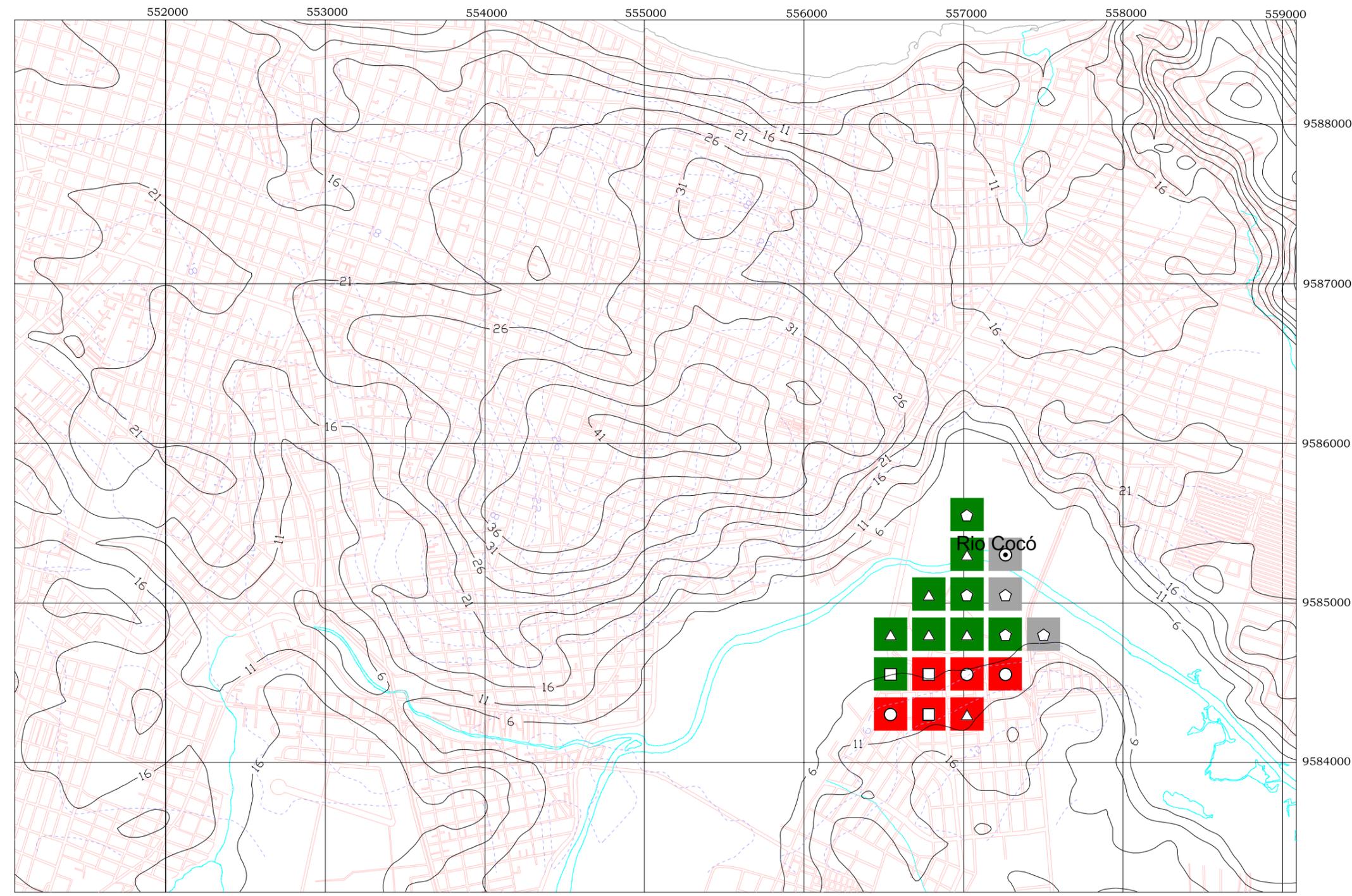


FIGURA 5.64 - Mapa de uso sugerido de fundações para cota de 2,1m.



Convenções Cartográficas

- Quadras
- Limite
- Drenagem
- Curvas de nível altimétrico
- Curvas isoaltimétricas do nível freático

Faixa de variação do N do SPT

- 25 - 35 (Estacas pré-moldadas com d >30cm)
- 10 - 25 (Estacas Strauss)
- 3 - 9 (Sem aplicação)

Desvios de Interpolação

- 16.555 - 18.314
- 14.118 - 16.555
- 10.733 - 14.118
- 6.214 - 10.733
- 2.398 - 6.214

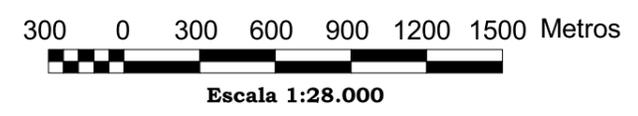


FIGURA 5.65 - Mapa de uso sugerido de fundações para cota de -2,9m.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 - CONSIDERAÇÕES FINAIS

O índice N do SPT é interpretado como uma medida de resistência do solo à cravação de um amostrador padronizado, e que é em grande parte condicionado pelas características geológicas dos materiais ensaiados. Considerou-se, também, que o índice N apresenta uma contraparte mecânica/humana que embute uma série de erros, o que lhe confere uma certa imprecisão, conforme estudado e discutido por BELINCANTA (1998), BELINCANTA & CINTRA (1999) e BAILLOT & RIBEIRO JÚNIOR (1999).

Levando em conta as deficiências do SPT, como ensaio de campo, as técnicas geoestatísticas foram aplicadas em três conjuntos de dados:

- *Dados topográficos (m)*
- *Cota topográfica do nível estático (m) e;*
- *Dados de N do SPT.*

No caso dos dados de topografia, não somente Geoestatística foi aplicada, mas também alguns algoritmos de interpolação, a saber: regressão polinomial, triangulação com interpolação linear, Inverso do Quadrado da Distância (IQD) e curvatura mínima. Buscou-se selecionar um, dentre estes métodos, para a construção do MDT, o qual deu substrato geométrico para o modelo geológico 3D de superfície.

A regressão polinomial, utilizada na Análise de Superfícies de Tendência, não foi aplicada devido a problemas de singularidade acusados, via mensagem de erro, pelo aplicativo utilizado (*Surfer 7 da Golden Software, Inc.*). Problemas estes relacionados à grande ordem das coordenadas UTM que no processamento do ajuste, podem fornecer valores além da capacidade computacional do algoritmo.

A escolha do algoritmo de triangulação com interpolação linear não invalida os resultados obtidos com os restantes (IQD, curvatura mínima e krigagem ordinária), pois a base de dados estava muito bem amostrada e o esperado é que não houvesse grandes discrepâncias. Com o estimador krigagem ordinária, por possuir uma medida

de desvio de estimativa associada, observou-se que nas cotas de altimetria mais elevada não se consegue um bom ajuste, fato este corroborado pelos altos valores de desvio de interpolação. A utilização da krigagem ordinária, para interpolação dos dados altimétricos permitiu constatar que o desvio de interpolação (s^2) proposto por YAMAMOTO (2000) se trata de uma medida de exatidão local muito eficiente.

Os dados de cota do nível estático foram tratados à luz da teoria da cokrigagem, objetivando-se incrementar a predição desta variável, valendo-se da correlação significativa com a variável cota topográfica. As estimativas por cokrigagem ordinária foram comparadas com outras obtidas por krigagem ordinária. A aparente vantagem da relação de dependência entre as variáveis estudadas não representou incremento significativo na estimativa por cokrigagem da cota do nível estático, quando comparada com aquela realizada com uso da krigagem ordinária. De fato, a modelagem por cokrigagem demandou, praticamente, mais do dobro do tempo na variografia e nas correções do modelo de correionalização linear, bem como também, no tempo de computação dos dados em relação à krigagem ordinária.

Salienta-se que os dados de cota do nível freático constituem uma série temporal e, portanto, à variável está associada uma incerteza não-sistemática condicionada por outras variáveis hidrológicas (pluviometria e escoamento superficial) e geológicas (fluxo subterrâneo e taxa de infiltração).

Na modelagem geológica, considerou-se a descrição táctil-visual dos materiais geológicos e medidas de topo e base, informações estas presentes nos relatórios de sondagem e armazenadas no banco de dados geotécnicos elaborado (Figura 3.2). A interpretação geológico-geotécnica baseou-se na modelagem geoestatística de dados de profundidade do impenetrável, considerando o $N \geq 50$ golpes, evidenciando que tais valores são característicos de níveis lateríticos, geralmente associados a seixos e/ou a materiais pedregulhosos. Estes níveis apresentam-se entremeados nas camadas da Formação Barreiras e são produtos dos processos deposicionais e geoquímicos recentes de alteração e relacionados, possivelmente, à sazonalidade do nível estático.

Uma aplicação mais ampla e complexa da Geoestatística consistiu na elaboração de um modelo em jazida para os dados de N do SPT, tridimensionalmente distribuídos. Superada a etapa de regularização da base de dados, procedeu-se à variografia 3D, validação cruzada e, finalmente, as estimativas. A discretização dos blocos foi baseada nas recomendações de DAVID (1977) e YAMAMOTO & ROCHA (1996), os quais relatam que quanto menor o tamanho do bloco, maior o desvio de

estimativa associado. Por outro lado, condições de vizinhança local mais flexíveis (*e.g.*: raio de influência maior, maior número de pontos na vizinhança, etc.) que aquelas estabelecidas no presente trabalho favorecem a computação de valores estimados irrealistas e que, eventualmente, não têm significado físico, não obstante não haja impedimento matemático.

Os mapas de uso sugerido de fundações resultam da interpretação dos dados de N estimados na modelagem geoestatística 3D como limites de impenetráveis para um número de soluções em elementos (isolados) estruturais de fundações, tomando-se por referência os limites apresentados por AOKI & CINTRA (2003). Como já ressaltado por ZUQUETTE (1987), os mapas apresentados, enquanto produtos de mapeamento geotécnico, têm caráter fortemente orientativo e exploratório e estão desprovidos da pretensão de substituir a informação passível de ser levantada diretamente com a execução de uma sondagem de simples reconhecimento. Nos mapas, não estão embutidas considerações acerca da viabilidade financeira de uma solução ou restrições construtivas de cada tipo de elemento estrutural.

Com a elaboração dos mapas, observou-se a potencialidade dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), mais especificamente nas possibilidades de constante atualização das informações inseridas em cada etapa analítica e organização de uma sólida forma de cadastro de novas sondagens, significando uma melhoria crescente nos processos de estimativa e nas informações derivadas. Deste modo, os mapas de uso sugerido de fundações podem ser compreendidos como documentos dinâmicos e sempre aptos a agregar novas informações geotécnicas.

6.2 - CONCLUSÕES

Na elaboração do MDT, foi necessário o teste de um conjunto de algoritmos de interpolação com o objetivo de se escolher um mais adequado. Ficou patente que, para uma maior representatividade das formas do terreno, a escolha do algoritmo mais adequado é fundamental. Por outro lado, cada base de dados topográficos traz peculiaridades relacionadas à distribuição dos pontos no espaço de tal modo que, quase sempre, serão necessários testes com os algoritmos de interpolação disponíveis. A escolha do algoritmo de triangulação, como método mais adequado de interpolação para área de pesquisa, não significa necessariamente que o será em outras situações.

A modelagem do nível freático, em função da cota topográfica, teve como por objetivo somar informações que pudessem auxiliar o eventual usuário dos mapas elaborados. Embora a técnica de cokrigagem ordinária não tenha apresentado melhores resultados que a de krigagem ordinária, foi possível perceber as muitas possibilidades de aplicação, que devem ser sempre amparadas por hipóteses de trabalho plausíveis e consistentes. Neste sentido, o autor tem plena consciência e ressalta as limitações da base de dados de profundidade do nível freático e dos papéis desempenhados por outras variáveis relacionadas.

O modelo geológico 3D de superfície elaborado apresenta uma forte limitação que é a falta de representação em profundidade das unidades geológicas presentes na área. Isto resultou da impossibilidade de elaboração de seções geológicas prejudicadas pela baixíssima razão de distância vertical/horizontal das sondagens.

No caso do modelo geoestatístico 3D, o espaçamento médio das sondagens não permitiu a estimativa de blocos menores que $350 \times 350 \times 1 \text{m}^3$. Deste modo, compreende-se que os métodos geoestatísticos foram utilizados “no limite” por conta do número restrito de sondagens. Buscando uma aproximação da discretização dos blocos com a estimativa de, pelo menos, um valor por quadra ($100 \times 100 \text{m}^2$) na malha urbana, o número de sondagens adequado teria que ser substancialmente maior. Ainda assim, a utilização da Geoestatística, como ferramental de análise da variabilidade espacial e de estimativa, mostrou-se bastante satisfatória, em vista do número bastante reduzido de sondagens.

O forte caráter assimétrico observado no histograma de frequências simples peculiar a dados de N (STURARO, 1994; XAVIER, 1999; TALAMINI NETO, 2002) chama atenção para a aplicabilidade do estimador krigagem ordinária. Assim como no trabalho de FERRON (2000), uma alternativa consistiria na aplicação do estimador krigagem log-normal.

Os mapas de uso sugerido de fundações gerados, com a utilização dos limites de impenetrável preconizados por AOKI & CINTRA (2003) se revestem de uma aplicação simples, facilmente atualizável e passível de ser melhorada.

6.3 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A Geoestatística tem assumido um papel de destaque nos trabalhos de mapeamento geotécnico e, em função disso, são apresentadas algumas sugestões para trabalhos futuros que venham adotar a mesma abordagem:

- ◆ Aplicação dos métodos geoestatísticos 2D e 3D em áreas de dimensões substancialmente reduzidas (*e.g.*: áreas não superiores a 10km²) com um número de sondagens maior, favorecendo a implantação de uma malha mais densa de amostragem e visando a geração de produtos cartográficos que possam fornecer informações mais exatas com menos incertezas associadas;
- ◆ Um enfoque mais consistente aos mapas de uso sugerido de fundações pode ser considerado no caso de modelagem geoestatística de dados obtidos com a aplicação de formulações semi-empíricas de estimativa de capacidade de carga, reforçadas por resultados de provas de carga já realizadas, permitindo construção de “uma jazida de capacidade de carga”;
- ◆ A sugestão para se trabalhar com áreas menores, também, é válida no caso da modelagem geológica, uma vez que as profundidades alcançadas pelas sondagens de simples reconhecimento são de poucas dezenas de metros. A elaboração de perfis geológico-geotécnicos pode ficar comprometida ou inviável se o espaçamento horizontal for superior a dezenas de metros;
- ◆ No caso de constatação de caráter fortemente assimétrico ou log-normal nos dados de N, sugere-se a aplicação da teoria de krigagem log-normal, em princípio, para buscar comparação com as estimativas obtidas por krigagem ordinária;
- ◆ Em vista do crescente número de programas em ambiente SIG em que estão sendo implantados, ou já estão disponíveis, módulos de modelagem geoestatística (*e.g.*: SPRING 3.6.03, ESRI ArcGIS 8.3, Idrisi32), recomenda-se que trabalhos futuros possam ser executados em programas com esta arquitetura, a fim de que outras informações geotécnicas possam ser incorporadas gradualmente, sem que seja necessário o manuseio de aplicativos diferentes e evitando a usual falta de interatividade entre os programas, dentre outras limitações;

- ◆ Na eventualidade de pesquisa de outras variáveis geotécnicas espacialmente dependentes e correlacionáveis, recomenda-se a aplicação e exploração das potencialidades do estimador cokrigagem ordinária.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGTERBERG, F.P. (1974). *Geomathematics: Mathematical Background and Geo-science Applications*. Developments in Geomathematics 1. Amsterdam. Elsevier Science Publishers.

ALONSO, U.R. (1991). *Previsão e Controle das Fundações: Uma Introdução ao Controle da Qualidade em Fundações*. São Paulo. Editora Edgard Blücher Ltda.

ALONSO, U.R. (1994). Correlação entre atrito lateral medido com o torque e o SPT. *Solos e Rochas*, v.17, n.3, p.191-194.

AMORIM, H.R. (2003). Estudo dos Atributos do Meio Físico com Base para o Zoneamento Geoambiental da Região de Influência do Reservatório da Usina Hidroelétrica de Caconde (SP), Escala 1:50.000, com Uso de Geoprocessamento. São Carlos. 170p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

AOKI, N. (2002). Novo conceito de carga admissível de fundação baseado em probabilidade de ruína. In: Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul, 3, 2002. Porto Alegre. ABMS, p.131-139.

AOKI, N. & VELLOSO, D.A. (1975). An approximate method to estimate the bearing capacity of piles. In: Congreso Panamericano de Mecánica de Suelos e de Ingenieria de Fundaciones, 5, 1975. Buenos Aires, ISSMFE, v.1, p.367-376.

AOKI, N. & CINTRA, J.C.A. (1996). Influência da variabilidade do maciço de solos no comprimento de estacas. In: Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia, 3, 1996. ABMS/ABEF, v.1, p.173-184.

AOKI, N. & CINTRA, J.C.A. (1999). The application of energy conservation Hamilton's principle to the determination of energy efficiency in SPT tests. In: NIYAMA & BEIM (Editors). *Application of Stress-Wave Theory to Piles*. Rotterdam. Balkema. p.457-460.

AOKI, N. & CINTRA, J.C.A. (2003). *Fundações*. São Carlos. Notas de Aulas (Disciplina SGS-404: Fundações). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA. (1999). *Manual de Sondagens*. 4ª Edição. São Paulo. Boletim nº 3.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1980). NBR 6484: *Execução de Sondagens de Simples Reconhecimento de Solos*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986). NBR 9603: *Sondagem a Trado*. Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1996). NBR 6122: *Projeto e Execução de Fundações*. Rio de Janeiro.

BAILLOT, R.T. & RIBEIRO JÚNIOR, A. (1999). Sondagem a percussão: Comparação entre processos disponíveis para ensaios SPT. *Solos e Rochas*. v.22, n.3, p.167-178.

BARDOSSY, A. (1988). Notes on the robustness of the kriging system. *Math. Geol.* v.20, n.3, p.189-202.

BELINCANTA, A. (1998). Avaliação dos Fatores Intervenientes no Índice de Resistência à Penetração do SPT. São Carlos. 141p. 2V. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BELINCANTA, A. & CINTRA, J.C.A. (1998). Fatores intervenientes em variantes do método ABNT para a execução do SPT. *Solos e Rochas*, v.21, n.3, p.119-133.

BOUFASSA, A. & ARMSTRONG, M. (1989). Comparison between different kriging estimators. *Math. Geol.*, v.21, n.3, p.331-345.

BRASIL. MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (1998). *Plano Diretor de Mineração para Região Metropolitana de Fortaleza*. Brasília. Série Difusão Tecnológica 7. DNPM-CPRM.

BRANDÃO, R.L. (1998). *Diagnóstico Geoambiental e os Principais Problemas de Ocupação do Meio Físico da Região Metropolitana de Fortaleza*. Fortaleza. Série Ordenamento Territorial Vol. 1. CPRM/MME.

BROOKER, P.I. (1979). Kriging. *Engineering & Mining Journal*, v.180, n.9. p.148-153.

BROOKER, P.I. (1991). *A Geostatistical Primer*. Singapore. World Scientific.

BROWN, C.E. (1998). *Applied Multivariate Statistics in Geohydrology and Related Sciences*. Berlin. Springer-Verlag.

CARUSO, C. & QUARTA, F. (1998). Interpolation methods comparison. *Comp. Math. Applic.* v.35, n.12, p.109-126.

CINTRA, J.C.A. & AOKI, N.(1999). *Carga Admissível em Fundações Profundas*. São Carlos. Projeto REENGE. EESC/USP.

COLARES, J.Q.S. (1996). Mapeamento Geotécnico Preliminar da Região Metropolitana de Fortaleza/CE - Escala 1:100.000. Rio Claro. 181p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

CRESSIE, N.C. & HAWKINS, D.M. (1980). Robust estimation of the variogram: I. *Math. Geol.*, v.12, n.2, p.115-125.

CRESSIE, N.A.C. (1993). *Statistics for Spatial Data*. Rev. Ed. New York. John Wiley & Sons Inc.

DAVID, M. (1977). *Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Developments in Geomathematics 2. Amsterdam. Elsevier Science Publishers.

DAVID, M. (1988). *Handbook of Applied Advanced Geostatistical Ore Reserve Estimation*. Developments in Geomathematics 6. New York. Elsevier Science Publishers.

DÉCOURT, L. (1998). A more rational utilisation of some old in situ tests. In: ROBERTSON & MAYNE (Eds.) *Geotechnical Site Characterisation*. Rotterdam. Balkema. p.913-918.

DEUTSCH, C.V. & JOURNAL, A.G. (1992). *GSLIB: Geostatistical Software Library and User's Guide*. New York. Oxford University Press.

DEUTSCH, C.V. (1996). Correcting for negative weights in ordinary kriging. *Computers & Geosciences*. n.7, p.765-773.

DEUVEUGHELE, M. & POLATERA, J.M.U. (1979). Utilisation de la théorie des variables régionalisées pour l'interprétation cartographique de données géotechniques dispersées. *Bull. IAEG*, n.19. p.296-302.

ESRI Inc. (1996). *Using ArcView® GIS*. Redlands. Copyright by Environment System Research Institute Inc.

ESRI Inc. (1997). *ArcView® 3D Analyst™*. Redlands. Copyright by Environment System Research Institute Inc.

FELGUEIRAS, C.A. (2002). Modelagem Numérica de Terreno. In: CÂMARA, G., DAVIS, C. & MONTEIRO, A.M.V. *Introdução à Ciência da Geoinformação*. Cap.7 Disponível em < <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/>>

FERRON, J.M.T.M. (2000). Avaliação Geoestatística do Depósito Estano-tungstanífero Relacionado ao Maciço Correias-Ribeirão Branco-SP. 111p. São Paulo. Dissertação (Mestrado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.

FOLLE, D., COSTA, J.F.C. & KOPPE, J.C. (2001). Geração de mapas de SPT: uma abordagem. In: INFOGEO 2001. Curitiba. 2001. *Anais...* ABMS/UFPR. CD-ROM. 10p.

GOLDEN® Software Inc. (1999). *Surfer® 7 - User's guide. Contouring and 3d Surface Mapping for Scientists and Engineers*. Golden. Copyright by Golden Software Inc.

GOOVAERTS, P. (1997). *Geostatistics for Natural Resources Evaluation*. Oxford. Oxford University Press.

GUERRA, P.A.G.(1988). *Geoestatística Operacional*. Brasília. DNPM-MME.

GUSMÃO FILHO, J.A. (1982). Prática de fundações nas capitais nordestinas. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, 7., Recife/Olinda, 1982. *Anais*. São Paulo, ABMS, v.7, p.189-205.

HOULDING, S.W. (1994). *3D Geoscience Modeling: Computer Techniques for Geological Characterisation*. Hong Kong. Springer-Verlag.

ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. (1989). *An Introduction to Applied Geostatistics*. New York. Oxford University Press.

JAKSA, M.B. (1995). The Influence of the Spatial Variability on the Geotechnical Design Properties of a Stiff, Overconsolidated Clay. Adelaide. 394p. PhD Thesis - Faculty of Engineering, University of Adelaide.

JOURNEL. A. G. (1977). Kriging in terms of projections. *Jour. Intern. Math. Geol.*, v.9, n.6, p.563-586.

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

JOURNEL. A. G. (1983). Nonparametric estimation of spatial distributions. *Jour. Intern. Assoc. Math. Geol.*, v.15, n.3, p.445-468.

JOURNEL. A. G. & ROSSI, M.E. (1989). When do we need a trend model in kriging? *Math. Geol.*, v. 21, n.7. p.715-739.

JOURNEL A.G. & RAO, S.E. (1996). Deriving conditional distributions from ordinary kriging. Stanford. Stanford Center of Reservoir Forecasting, Report #9. 25p.

LANDIM, P.M.B. (1997). *Análise Estatística de Dados Geológicos*. Rio Claro. Editora UNESP.

MACKEAN, R.A.N. & ROSENBAUM, M.S. (1990). Geostatistical characterization of the SPT. In: International IAEG Congress, 6. 1990. Amsterdam. *Proceedings...* Balkema. p.317-322.

MANLY, B.F.J. (1994). *Multivariate Statistical Methods: A Primer*. 2nd Edition. London. Chapman & Hall.

MARANHÃO, R.J.L. (1989). *Introdução à Pesquisa Mineral*. 4^a Edição. Fortaleza. Imprensa Universitária/BNB.

MATHERON, G. (1963). Principles of geostatistics. *Econ. Geol.*, v.58, p.1246-1266.

MATHERON, G. (1965). *Les Variables Régionalisées et leur Estimation*. Paris. Masson et Cie, Éditeurs.

MICROSOFT CORP. (1997). *Microsoft® Access97 - Guia do usuário*. São Paulo. Direitos reservados à Microsoft Corp.

MILITITISKY, J. & SCHNAID, F. (1996). Avaliação crítica do uso do SPT em fundações. In: Seminário de Engenharia em Fundações Especiais e Geotecnia, 3. São Paulo. ABMS/ABEF. CD-ROM. 14p.

MORAIS, J.B.A. (1984). Projeto Fortaleza: Hidrogeologia e Controle Tecnológico de Poços Tubulares no Município de Fortaleza-CE. Fortaleza. MME/CPRM. 85p.

MOURA, A.S. (1997). Caracterização Geotécnica para Projetos de Fundações de Edifícios em Fortaleza-CE. Brasília. 160p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Faculdade de Engenharia, Universidade de Brasília.

MYERS, D.E. (1982). Matrix formulation of co-kriging. *Math. Geol.*, v.14, n.3, p.249-257.

ÖZDAMAR, L., DEMIRHAN, M. & ÖZPINAR, A. (1999). A comparison of spatial interpolation methods and a fuzzy areal evaluation scheme in environmental site characterisation. *Comp. Environ. Urb. Syst.* v.23. p.399-422.

PAN, G., GAARD, D., MOSS, K. & HEINER, T. (1993). A comparison between cokriging and ordinary kriging: case study with a polymetallic deposit. *Math. Geol.*, v.25, n. 3, p.377-398.

PAPOULIS, A. (1965). *Probability, Random Variables and Stochastic Processes*. International Student Edition. Tokyo. McGraw-Hill Ltd.

PAUNCZ, I. & JOHNSON, K.R. (1976). Three-dimensional interpolation. In: MERRIAN, , D.F. (Ed.) *Recent Advances in Geomathematics: An International Symposium*. 1976. Sydney. *Proceedings...* p.135-155.

PERES, J.P. (1998). Geoestatística aplicada ao mapeamento do índice de resistência a penetração padronizado do solo (SPT). Rio Claro. 184p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

QUARESMA, A.R. *et al.* (1998). Investigações Geotécnicas. In: HACHICH, W. *et al.* *Fundações: Teoria e Prática*. São Paulo. Editora PINI. Cap.3, p.119-162.

RANZINE, S.M.T. (1988). SPTF. *Solos e Rochas*. v.11, n. único. p..29-30.

RANZINE, S.M.T. (1994). SPTF: 2ª Parte. *Solos e Rochas*. v.17, n. 3. p.189-190.

RENDU, J.M.M. (1979). Normal and lognormal estimation. *Math. Geol.*,v.11, n.4, p.407-422.

RIVOIRARD, J. (1987). Teacher's aide: Two keys parameters when choosing the kriging neighbourhood. *Math. Geol.*, v.19, n.8, p.851-856.

RIVOIRARD, J. (1994). *Disjunctive Kriging and Non-linear Geostatistics*. Oxford. Claredon Press.

ROSENBAUM, M.S. (1987). The use of stochastic models in the assessment of a geological database. *Quater. Jour. Eng. Geol.*, v.20, p.31-40.

ROTH, C. (1998). Is lognormal kriging suitable for local estimation? *Math. Geol.*, v.30, n.8, p.999-1009.

ROYLE, A.G. (1979). Why Geostatistics? *Engineering & Mining Journal*, v.180 n.5, p.92-101.

SAMESHIMA, R.H. & YAMAMOTO, J.K. (1996). Análise de malhas de amostragens e processos de interpolação na representação de superfícies topográficas por meio de MDT's. *Geociências*. v.15, n.1, p.67-92.

SANEJOUAND, R. (1972). *La Cartographie Géotechnique en France*. Paris. Ministère de L'Équipement et du Logement. DAFU. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées.

SCHNAID, F. (2000). *Ensaio de Campo e suas Aplicações à Engenharia de Fundações*. São Paulo. Editora Oficina de Textos.

SOUZA, M.J.N. (1988). Contribuição ao estudo das unidades morfo-estruturais do Estado do Ceará. *Rev. Geol.* v.1, n.1. p.73-91.

SPIEGEL, M.R. (1994). *Estatística*. 3ª Ed. São Paulo. Makron Books. (Coleção Schaum).

STATSOFT® Inc. (1999). *Statistica™'99 Edition – Quick Reference*. Tulsa. Copyright by Statsoft® Inc.

STURARO, J.R. (1988). Estudo do Comportamento Espacial de Variáveis Geológicas e Hidrogeológicas da Área Urbana de Ribeirão Preto-SP. São Carlos. 124p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

STURARO, J.R. (1994). Mapeamento Geoestatístico de Propriedades Geológico-Geotécnicas Obtidas de Sondagens de Simples Reconhecimento. São Carlos. 181p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

STURARO, J.R. & LANDIM, P.M.B.(1996). Mapeamento Geoestatístico de Ensaio de Penetração Padronizada (SPT). *Solos e Rochas*, v.19, n.1 p.3-14.

TALAMINI NETO, E. (2002). Caracterização Geotécnica do Subsolo de Curitiba para o Planejamento de Ocupação Subterrânea. São Carlos. 169p. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

TERZAGHI, K. & PECK, R. B. (1962). *Mecânica do Solos na Prática da Engenharia*. Trad. por Antônio J. da Costa Nunes e Maria de Lourdes C. Campello. Rio de Janeiro. Editora Ao Livro Técnico S.A.

VALENTE, J.M.G.P. (1989). *Geomatemática – Lições de Geoestatística*. 2ª Ed. Ouro Preto. 8v. Editora da Fundação Gorceix.

WACKERNAGEL, H. (1998). *Multivariate Geostatistics: An Introduction with Examples*. 2nd Edition. Berlin. Springer-Verlag.

WESSEL, P. & BERCOVICI, D. (1998). Interpolation with splines in tension: A Green's function approach. *Math. Geol.* v.30, n.1, p.77-93.

XAVIER, S.R. (1999). Estudo Geoestatístico do Subsolo da Usina Angra2, RJ. Rio de Janeiro. 243p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

YAMAMOTO, J.K. & ROCHA, M.M. (1997). Uma revisão das classificações de reservas minerais adotadas no Brasil e recomendações para o cálculo/classificação de reservas. *Rev. Bras. Geoc.*, v.26, n. 4. p.243-254.

YAMAMOTO, J.K. (1997). Convex_hull – A Pascal program for determining the convex hull for planar sets. *Computers & Geosciences*, v. 23, n.7. 725-738.

YAMAMOTO, J.K. (1998). A review of numerical methods for the interpolation for geological data. *An. Acad. Bras. Ciên.* v.70 n.1. p.91-116.

YAMAMOTO, J.K. (2000). An alternative measure of the reliability of ordinary kriging estimates. *Math. Geol.*, v.32, n.4. 489-509.

YAMAMOTO, J.K. (2001). *Avaliação e Classificação de Reservas Minerais*. São Paulo. EDUSP.

YAMAMOTO, J.K. (2002). *GeoVisual 2.1 – Manual do Usuário*. São Paulo. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. Direitos reservados a Jorge Kazuo Yamamoto.

ZUQUETTE, L.V. (1987). *Análise Crítica da Cartografia Geotécnica e Proposta Metodológica para Condições Brasileiras*. 673p. 3V. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.