



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

DANIEL FERMINO DA SILVA

**“MAPEAMENTO GEOESTATÍSTICO DOS PARÂMETROS
N_{SPT} E TORQUE MÁXIMO DE SOLOS EM PARTE DA BACIA
DO RIBEIRÃO CAMBEZINHO EM LONDRINA/PR”**

Londrina
2008

DANIEL FERMINO DA SILVA

**“MAPEAMENTO GEOESTATÍSTICO DOS PARÂMETROS
N_{SPT} E TORQUE MÁXIMO DE SOLOS EM PARTE DA BACIA
DO RIBEIRÃO CAMBEZINHO EM LONDRINA/PR”**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Gradual, Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Edificações e Saneamento.

Orientador: Prof. Dr. José Paulo P. Pinese

Londrina
2008

Silva, Daniel Fermino da

Mapeamento Geoestatístico dos Parâmetros N_{SPT} e Torque Máximo de Solos em Parte da Bacia do Ribeirão Cambezinho em Londrina/Pr/ Daniel Fermino da Silva – Londrina/Pr: 2008.

Orientador: Prof. Dr. José Paulo P. Pinese

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina

Bibliografia. f.

1.Mapeamento geotécnico; 2.Sondagens SPT-T; 3.Geoestatística.

DANIEL FERMINO DA SILVA

**“MAPEAMENTO GEOESTATÍSTICO DOS PARÂMETROS
N_{SPT} E TORQUE MÁXIMO DE SOLOS EM PARTE DA BACIA
DO RIBEIRÃO CAMBEZINHO EM LONDRINA/PR”**

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Paulo Peccinini Pinese –
Orientador
Universidade Estadual de Londrina/
Departamento de Ciências da Terra

Prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim
Universidade Estadual Paulista/
Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Profa. Dra. Miriam Gonçalves Miguel
Universidade de Campinas/
Faculdade de Engenharia Civil

Prof. Dr. Antônio Belincanta
Universidade Estadual de Maringá/
Departamento de Construção Civil

Londrina, 27 de junho de 2008.

*Dedico este trabalho à Queli e a
nossa Rebeca, fonte de minha
verdadeira alegria e realização.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar ao nosso Grande Criador, o Grande Arquiteto Do Universo, por me dar a oportunidade e capacidade para realizar este trabalho.

Agradeço a minha família, Queli e Rebeca, pela compreensão nas muitas horas ausentes para o desenvolvimento desta dissertação.

Agradeço aos meus pais, Teodoro e Neide, e a minha irmã, Kátia, pelo incentivo para prosseguir nos estudos.

Agradeço à nação brasileira, por me oferecer a oportunidade de, gratuitamente, fazer o mestrado em uma instituição de qualidade.

Agradeço à CAPES pela concessão de auxílio financeiro para realização desta pesquisa.

Agradeço ao Professor Doutor Geólogo José Paulo Peccinini Pinese, Universidade Estadual de Londrina/Departamento de Geociências, pela orientação na execução deste trabalho.

Agradeço as sugestões dos Professores Doutores, Geólogo Paulo Milton Barbosa Landim, Universidade Estadual Paulista (Rio Claro)/Instituto de Geologia, e Engenheira Civil Miriam Gonçalves Miguel, Universidade de Campinas/Faculdade de Engenharia Civil.

Agradeço às empresas Mecsolos Engenharia de Solos S/S, na pessoa do Professor Doutor Engenheiro Civil Carlos José Marques da Costa Branco, e Tecnicon Sondagem de Solos S/S LTDA, na pessoa do Engenheiro Civil Wilson Ubiali, pelo fornecimento das planilhas de sondagens realizadas por tais empresas na área urbana de Londrina/Pr utilizadas na execução deste estudo.

SILVA, Daniel Fermino da. **Mapeamento Geoestatístico dos Parâmetros NSPT e Torque Máximo em Solos de Parte da Bacia do Ribeirão Cambezinho em Londrina/Pr.** 2008. 204f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo não só o do mapeamento dos parâmetros geotécnicos de resistência à penetração do amostrador-padrão e de Torque Máximo do SPT-T (*Standard Penetration Test with Torque Measurement*), obtidos a partir de um banco de 238 sondagens realizadas na bacia hidrográfica do ribeirão Cambezinho, que compreende parte da zona urbana da cidade de Londrina/Pr, mas também de correlacionar estas variáveis qualitativamente a fatores tais como a topografia e pedologia. A área em estudo foi de aproximadamente 37 km². O perfil de solo da área de estudo se constitui de argila siltosa residual, proveniente do intemperismo atuante sobre as rochas basálticas da Formação Serra Geral. A camada de solo superficial possui alta porosidade e comportamentos laterítico e colapsível. Através de ferramentas da estatística descritiva e da estatística espacial, procederam-se a análise, a interpolação e a interpretação dos resultados das sondagens no que se refere ao Torque Máximo e ao N_{SPT}. Estes resultados foram geoprocessados e analisados juntamente com os fatores naturais anteriormente descritos através de mapas topográficos e pedológicos. A princípio, para a área urbana da bacia do ribeirão Cambezinho, não se detectou nenhuma correlação entre os índices de resistência do solo medidos no SPT-T e a pedologia ou topografia. Percebeu-se porém que o comportamento espacial da relação dos índices de resistência medidos no SPT-T, N_{SPT} e Torque Máximo, é semelhante ao observado na análise de sondagens isoladas, ou seja, resguardam uma proporção de aproximadamente 1, e que quanto maior o grau de intemperização sofrido pelo solo menor é a resistência que o mesmo apresenta.

Palavras-chave: Mapeamento geotécnico. Sondagens SPT-T. Geoestatística.

SILVA, Daniel Fermino da. **Geostatistic Mapping of parameters of N_{SPT} and Maximum Torque in Soils of Part of Cambezinho Creek Basin in Londrina/Paraná State.** 2008. 204p. Dissertation (Master's degree in Building and Sanitation Engineering) –Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2008.

ABSTRACT

This study has as its objective to map the resistance geotechnical parameters of N_{SPT} and Maximum Torque, obtained from a data bank of 238 field tests of SPT-T (Standard Penetration Test with Torque Measurement) done in the Cambezinho hydrographic creek basin, that comprehends part of urban zone of the city of Londrina/Pr and to correlate these variables to factors as topography and pedology. The experimental area has approximately 37 km². The geotechnical profile of the experimental area consists in a residual silty clay that originates from the intemperism acting on the basaltic rocks of the Serra Geral Formation. The superficial layer has a high porosity and lateritic and collapsible behavior. Through descriptive and spatial statistics tools were done the analysis, interpolation and the interpretation of the results of the field tests about the Maximum Torque and N_{SPT} measured. Then, the results were geoprocessed and analyzed along with the natural factors explained above through altimetric and pedologic maps. In an early analyses, it was not realized any relation among the SPT-T parameters and the pedology or topography, inside the urban zone of the Cambezinho creek basin. However, it was realized that the spacial behavior of the relation between the resistance parameters measured in the SPT-T, N_{SPT} and Maximum Torque, is the same as observed in the analyses of isolated tests field, which means that they are approximately equal, and as the bigger is the intemperization level that the soil has suffered the smaller is the resistance it reaches.

Keywords: Engineering geological mapping. Standard Penetration Test with Torque measurement. Geostatistic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Ocupação da bacia do ribeirão Cambezinho na década de 1970.....	25
Figura 2 – Ocupação da bacia do ribeirão Cambezinho na década de 1980.....	25
Figura 3 – Ocupação da bacia do ribeirão Cambezinho na década de 1990.....	26
Figura 4 – Vista geral de uma equipe de sondagem de simples reconhecimento com ensaio SPT, Belincanta (2004)	31
Figura 5 – Tubo de revestimento e um trépano, modificado de Belincanta (2004).....	33
Figura 6 – Trépano com circulação d'água, Belincanta (2004).....	33
Figura 7 – Procedimento de ensaio com uso de circulação d'água, moto-bomba e trépano, Belincanta (2004)	34
Figura 8 – Torquímetro utilizado em ensaios SPT-T, Belincanta (2004).....	35
Figura 9 – Torquímetro sendo utilizado juntamente com o restante dos equipamentos do ensaio SPT-T, Belincanta (2004)	36
Figura 10 – Exemplo de relatório de sondagem do tipo SPT	39
Figura 11 – Esquema de funcionamento de coordenadas planas, INPE (2005)	51
Figura 12 – Exemplo de projeção plana, Firkowski (2004).....	52
Figura 13 – Exemplo de projeção cônica, Firkowski (2004).....	52
Figura 14 – Exemplo de projeção cilíndrica, Firkowski (2004)	52
Figura 15 – Esquema de projeção cônica tangente, Dana (2006).....	53
Figura 16 – Esquema de projeção cônica tangente, Dana (2006).....	53
Figura 17 – Projeção cilíndrica, a) Transversa e, b) Obliqua, Dana (2006)	54
Figura 18 – Fusos UTM, seus principais elementos, e distorção de escala em diferentes regiões do fuso UTM, Firkowski (2004)	57
Figura 19 – Cilindro transverso de Mercator delimitando uma zona qualquer, IBGE (2005)	58
Figura 20 – Divisão de faixas dentro do sistema de projeção UTM, Duarte (2002)	58
Figura 21 – Detalhe dos fusos UTM no território do Brasil, Câmara <i>et al</i> (1996).....	59
Figura 22 – O planeta Terra segundo a projeção de Mercator, Duarte (2002)	60
Figura 23 – Mapa dos Estados Unidos utilizando três sistemas diferentes de projeção, Dana (2006)	61
Figura 24 – Representação da distância ortogonal para o cálculo do momento de inércia na determinação dos valores do variograma, Sturaro (1993)	69
Figura 25 – Exemplo esquemático de um variograma, Genevois e Oliveira (2001).....	70

Figura 26 – Parâmetros do variograma, modificado de Deutsch e Journel (1992).....	71
Figura 27 – Superfície variométrica, a) fenômeno isotrópico, b) fenômeno anisotrópico	74
Figura 28 – Exemplo de variograma com anisotropia geométrica	74
Figura 29 – Exemplo de Elipse de anisotropia, modificada de Neto e Celestino (2001)	75
Figura 30 – Exemplo de variograma esférico	77
Figura 31 – Exemplo de variograma gaussiano	77
Figura 32 – Exemplo de variograma exponencial	78
Figura 33 – Exemplo de variograma de potência, Journel e Huijbregts (1978)	79
Figura 34 – Exemplos de comportamento próximo à origem em variogramas, Journel e Huijbregts (1978).....	82
Figura 35 – Método esquemático de classificação geológica para solos residuais proposta por Vaz (2003).....	90
Figura 36 – Localização de Londrina dentro do estado do Paraná, dentro do país	97
Figura 37 – Classificação climática do estado do Paraná segundo o método de Köppen, IAPAR (2006).....	98
Figura 38 – Alturas médias precipitadas anuais no estado do Paraná entre 1976 a 1999, IAPAR (2000)	99
Figura 39 – Temperaturas médias anuais no estado do Paraná entre 1976 a 1999, IAPAR (2000)	100
Figura 40 – Classificação do tipo de intemperismo predominante através da pluviosidade média anual e temperatura média anual.....	100
Figura 41 – Mapa contendo as formações geológicas e os respectivos contatos litológicos e fraturamentos na região de Londrina, modificado de Mineropar (2006).....	102
Figura 42 – Isopacas das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, Piccirillo <i>et al.</i> (1988)	104
Figura 43 – Parte da Coluna Lito-Cronoestratigráfica da Bacia do Rio Paraná, Pinese (2002).....	105
Figura 44 – Variação dos Limites de Atterberg (LP, LL e IP) metro a metro, juntamente com a variação do teor de umidade (W), Teixeira <i>et al.</i> (2003)	106

Figura 45 – Variação da composição dos tipos de partículas do solo do CEEG, metro a metro, Teixeira <i>et al</i> (2003).....	107
Figura 46 – Divisão das camadas do subsolo da bacia do Cambezinho (área urbana) de acordo com os valores médios e medianos de N_{SPT}	114
Figura 47 – Divisão das camadas do subsolo da bacia do Cambezinho (área urbana) de acordo com os valores médios de Torque Máximo, Silva e Miguel (2007).....	115
Figura 48 – Histograma de frequência para a camada um da bacia do Cambezinho (área urbana) de acordo com os valores médios de N_{SPT}	116
Figura 49 – Histograma de frequência para a camada dois da bacia do Cambezinho (área urbana) de acordo com os valores médios de N_{SPT}	117
Figura 50 – Superfície variométrica da camada um da bacia do Cambezinho (área urbana).....	118
Figura 51 – Superfície variométrica da camada dois da bacia do Cambezinho	118
Figura 52 – Variograma global para a camada um da bacia do Cambezinho (área urbana).....	119
Figura 53 – Variograma global para a camada dois da bacia do Cambezinho (área urbana).....	119
Figura 54 – Imagem Quick-Bird (Google Earth) com locação dos pontos de sondagem utilizados neste trabalho, em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana).....	121
Figura 55 – Carta de resistência do solo à penetração do amostrador-padrão do SPT para a primeira camada (0m a 7m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana).....	122
Figura 56 – Carta dos desvios-padrão da resistência do solo à penetração do amostrador-padrão do SPT para a primeira camada (0m a 7m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana).....	123
Figura 57 – Carta de resistência do solo à penetração do amostrador-padrão do SPT para a segunda camada (8m a 17m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana).....	124
Figura 58 – Carta dos desvios-padrão da resistência do solo à penetração do amostrador-padrão do SPT para a segunda camada (8m a 17m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana).....	125

Figura 59 – Carta topográfica para parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana). Fonte: IBGE Carta Londrina Folha SF. 22-Y-D-III-4	126
Figura 60 – Carta de resistência do solo ao Torque Máximo medido no SPT-T para a camada 1 (0m a 6m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana), Silva e Miguel (2007).....	128
Figura 61 – Carta dos desvios-padrão da resistência do solo ao Torque Máximo medido no SPT-T para a camada 1 (0m a 6m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana), Silva e Miguel (2007).....	129
Figura 62 – Carta de resistência do solo ao Torque Máximo medido no SPT-T para a camada 2 (7m a 13m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana), Silva e Miguel (2007).....	130
Figura 63 – Carta dos desvios-padrão da resistência do solo ao Torque Máximo medido no SPT-T para a camada 2 (7m a 13m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana), Silva & Miguel (2007).....	131
Figura 64 – Carta de resistência do solo ao Torque Máximo medido no SPT-T para a camada 3 (14m a 20m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana), Silva e Miguel (2007).....	132
Figura 65 – Carta dos desvios-padrão da resistência do solo ao Torque Máximo medido no SPT-T para a camada 3 (14m a 20m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana), Silva e Miguel (2007).....	133
Figura 66 – Divisão de camadas, na condição não-saturada, segundo o comportamento geotécnico para a variável N_{SPT}	135
Figura 67 – Divisão de camadas, na condição saturada, segundo o comportamento geotécnico para a variável N_{SPT}	135
Figura 68 – Divisão de camadas, na condição não-saturada, segundo o comportamento geotécnico para a variável Torque Máximo	135
Figura 69 – Divisão de camadas, na condição saturada, segundo o comportamento geotécnico para a variável Torque Máximo	136
Figura 70 – Relação, em profundidade, da variável Torque Máximo com N_{SPT} para as condições saturada e não-saturada	137
Figura 71 – Histograma para a variável N_{SPT} para a camada um (0m a 15m) na condição não-saturado	138
Figura 72 – Histograma para a variável N_{SPT} para a camada dois (15m a 20m) na condição não-saturado	139

Figura 73 – Superfície variométrica para a variável N_{SPT} na condição não-saturado, para a camada um (0m a 15m).....	139
Figura 74 – Superfície variométrica para a variável N_{SPT} na condição não-saturado, para a camada com profundidade de 15m a 20m	140
Figura 75 – Variograma teórico global ajustado ao variograma experimental para a camada 0m a 15m.....	141
Figura 76 – Variograma experimental global para a camada 16m a 20m	141
Figura 77 – Carta para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para a camada com profundidade de 0,0m a 15,0m	143
Figura 78 – Carta dos desvios-padrão para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para a camada com profundidade de 0,0m a 15,0m.....	144
Figura 79 – Histograma para a variável N_{SPT} para a camada com profundidade entre 8m a 13m na condição saturada.....	146
Figura 80 – Histograma para a variável N_{SPT} para a camada com profundidade entre 14m a 20m na condição saturada.....	147
Figura 81 – Histograma para a variável N_{SPT} para a camada com profundidade maior que 21m na condição saturada	147
Figura 82 – Superfície variométrica para a variável N_{SPT} na condição saturada, para a camada de 8m a 13m	148
Figura 83 – Superfície variométrica para a variável N_{SPT} na condição saturada, para a camada de 14m a 20m	148
Figura 84 – Superfície variométrica para a variável N_{SPT} na condição saturada, para a camada com mais de 21m de profundidade.....	149
Figura 85 – Variograma teórico global para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada 8m a 13m	149
Figura 86 – Variograma teórico global para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada 14m a 20m	150
Figura 87 – Variograma teórico para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada maior que 21m.....	150
Figura 88 – Carta para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada com profundidade de 8,0m a 13,0m	152
Figura 89 – Carta dos desvios-padrão para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para a camada com profundidade de 0,0m a 15,0m.....	153

Figura 90 – Carta para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada com profundidade de 14,0m a 20,0m	155
Figura 91 – Carta dos desvios-padrão para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada com profundidade de 14,0m a 20,0m	156
Figura 92 – Carta para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada com profundidade maior de 21,0m.....	158
Figura 93 – Carta dos desvios-padrão para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada com profundidade maior de 21,0m.....	159
Figura 94 – Histograma para a variável Torque Máximo para a camada com profundidade entre 1,0m e 15,0m na condição não-saturada	161
Figura 95 – Histograma para a variável Torque Máximo para a camada com profundidade entre 16,0m e 20,0m na condição não-saturada	162
Figura 96 – Superfície variométrica para a variável Torque Máximo na condição não-saturada, para a camada de 1,0m a 15,0 m de profundidade	162
Figura 97 – Superfície variométrica para a variável Torque Máximo na condição não-saturada, para a camada de 16,0m a 20,0 m de profundidade.....	163
Figura 98 – Variograma teórico global para a variável Torque Máximo na condição não-saturada para a camada 1,0 m a 15,0 m	163
Figura 99 – Variograma teórico global para a variável Torque Máximo na condição não-saturada para a camada 16,0 m a 20,0 m	164
Figura 100 – Carta para a variável Torque Máximo na condição não-saturada para a camada com profundidade entre 0,0m e 15,0m.....	165
Figura 101 – Carta dos desvios-padrão para a variável Torque Máximo na condição não-saturada para a camada com profundidade entre 1,0m e 15,0m.....	166
Figura 102 – Carta para a variável Torque Máximo na condição não-saturada para a camada com profundidade entre 16,0m e 20,0m.....	168
Figura 103 – Carta do desvio-padrão para a variável Torque Máximo na condição não-saturada para a camada com profundidade entre 16,0m e 20,0m.....	169
Figura 104 – Histograma de frequência para a variável Torque Máximo para a camada com profundidade entre 8,0m e 10,0m.....	171
Figura 105 – Histograma de frequência para a variável Torque Máximo para a camada com profundidade entre 11,0m e 20,0m.....	171

Figura 106 – Histograma de frequência para a variável Torque Máximo para a camada com profundidade maior do que 21,0m.....	172
Figura 107 – Superfície variométrica para a variável Torque Máximo, na condição saturada, para a camada de 8,0m a 10,0 m de profundidade	172
Figura 108 – Superfície variométrica para a variável Torque Máximo, na condição saturada, para a camada de 11,0m a 20,0 m de profundidade	173
Figura 109 – Superfície variométrica para a variável Torque Máximo, na condição saturada, para a camada com profundidade maior que 21,0m.....	173
Figura 110 – Variograma teórico global para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada 8,0 m a 10,0 m.....	174
Figura 111 – Variogramas teóricos globais para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada 11,0 m a 20,0 m.....	174
Figura 112 – Variogramas teóricos globais para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada com mais de 21,0 m de profundidade.....	174
Figura 113 – Carta para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada com profundidade entre 8,0m e 10,0m.....	176
Figura 114 – Carta dos desvios-padrão para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada com profundidade entre 8,0m e 10,0m.....	177
Figura 115 – Carta para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada com profundidade entre 10,0m e 20,0m.....	179
Figura 116 – Carta dos desvios-padrão para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada com profundidade entre 10,0m e 20,0m.....	180
Figura 117 – Carta para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada com profundidade maior que 20,0m.....	182
Figura 118 – Carta dos desvios-padrão para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada com profundidade maior que 20,0m.....	183
Figura 119 – Distribuição das profundidades no qual foi detectado o nível freático nos furos de sondagem utilizados neste estudo	185
Figura 120 – Histograma de Frequência para a variável N_{SPT} para profundidade de 0,0m a 4,0m	187

Figura 121 – Superfície variométrica para a variável N_{SPT} na condição não-saturada, para a camada de 0,0m a 4,0 m de profundidade	188
Figura 122 – Variograma teórico global para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para a camada 0,0 m a 4,0 m de profundidade	188
Figura 123 – Carta para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para a camada com profundidade entre a 0,0m e 4,0m	190
Figura 124 – Carta dos desvios-padrão para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para a camada compreendida entre a 0,0m e 4,0m.....	191

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Crescimento da população urbana e rural de Londrina entre as décadas de 1950 e 2000, PML (2003a).....	24
Tabela 2 – Classificação do solo segundo a compacidade ou consistência de acordo com o N_{SPT} , extraída da NBR 6.484/2001	36
Tabela 3 – Influência do tipo de martelo, para composição de 14 m de comprimento, martelo com coxim de madeira e cabeça de bater de 3,6 kg. Belincanta (1998), <i>apud</i> Schnaid 2002, modificada.....	43
Tabela 4 – Influência decorrente do uso de coxim, para composição de 14 m de comprimento, martelo com pino guia e cabeça de bater de 3,6 kg. Belincanta (1998), <i>apud</i> Schnaid 2002, modificada	43
Tabela 5 – Influência decorrente da massa da cabeça de bater, para composição de 14 m de comprimento, martelo cilíndrico com coxim de madeira. Belincanta (1998), <i>apud</i> Schnaid 2002, modificada	44
Tabela 6 – Dados do SAD 69 necessários a definição do elipsóide de referencia, IBGE (2005) modificada	50
Tabela 7 – Resumo das principais características das projeções, Câmara <i>et al.</i> (1996)	55
Tabela 8 – Principais tipos de projeção, suas classificação, aplicações e características, Câmara <i>et al.</i> (1996)	55
Tabela 9 – Caracterização das Camadas do CEEG, Miguel <i>et al.</i> (2002).....	107
Tabela 10 – Estatísticas descritivas das camadas um e dois	116
Tabela 11 – Valores de parâmetros dos variogramas obtidos para as camadas um e dois	119
Tabela 12 – Novas considerações para realização das análises estatísticas.....	134
Tabela 13 – Estatísticas descritivas para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para as camadas com profundidades de 0m a 15m e 16m a 20m respectivamente	138
Tabela 14 – Valores de parâmetros dos variogramas teóricos obtidos para as camadas de 0m 15m e 16m a 20m de profundidade.....	141
Tabela 15 – Estatísticas descritivas para a variável N_{SPT} na condição saturada	146
Tabela 16 – Valores de parâmetros dos variogramas obtidos para as camadas com profundidade 8m a 13m, 14m a 20m, e maior que 21m.....	150

Tabela 17 – Estatísticas descritivas para a variável Torque Máximo na condição não-saturada para todas as camadas	161
Tabela 18 – Valores de parâmetros dos variogramas globais teóricos obtidos para as camadas com profundidade 1,0m a 15,0m, 16,0m a 20,0m, e maior que 21,0m	164
Tabela 19 – Estatísticas descritivas para a variável Torque Máximo na condição saturada para todas as camadas	170
Tabela 20 – Valores de parâmetros dos variogramas obtidos todas as camadas.....	175
Tabela 21 – Estatísticas descritivas para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para profundidade até 4,0m	186
Tabela 22 – Valores de parâmetros para o variograma global	189

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

SPT	<i>Standard Penetration Test</i>
SPT-T	<i>Standard Penetration Test with Torque Measurement</i>
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IAPAR	Instituto Agrônômico do Paraná
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{x} : média aritmética da amostra.

n : Número de componentes da amostra.

v_i : Valores assumidos pela variável em estudo.

a: alcance do variograma, verões quentes (classificação climática de Köppen).

p: Pressão de contato da uma sapata.

B: Largura da fundação.

C: Patamar menos o efeito pepita, Clima mesotérmico (classificação climática de Köppen),
Covariância.

d(i): Distância média dos pares para *lag* i do variograma k.

D: Profundidade da fundação.

D(k): Distância máxima relativa ao variograma k.

e : Valor constante (2,71828182846).

E: Módulo de Elasticidade do solo, Grau de Aleatoriedade.

f: sempre úmido (classificação climática de Köppen).

h: Distância entre pares amostram para cálculo do variograma.

IGF: Indicative Goodness of Fit

k: grau de achatamento.

N_{SPT} : Número de golpes necessários à penetração do amostrador-padrão do ensaio SPT em 30 centímetros de solo.

N: Número total de estimativas, Número de variogramas direcionais.

P(i): Número de pares para *lag* i do variograma k.

r : Erro médio cometido de um valor estimado por um valor medido.

s: coeficiente de recalque.

S: Desvio-padrão.

S^2 : Variância.

T: Torque.

Y: Probabilidade.

Z: Valor amostral em um ponto n.

Co: Efeito pepita.

$Cov\{ \}$: Covariância.

CV: Coeficiente de Variação.

TR: Torque Residual.

T_{\max} : Torque máximo.

\hat{V}_i : Valor estimado.

V_i : Valor medido.

$Var\{r(x_o)\}$: Variância do erro calculado

Neq: N equivalente.

SAD: *South America Datum*.

S_u : Resistência não-drenada.

UTM: Universo Transverso de Mercator.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	24
2 OBJETIVO	28
3 REVISÃO DE LITERATURA	29
3.1 SPT (<i>standard penetration test</i>)	29
3.1.1 Introdução	29
3.1.2 Histórico	29
3.1.3 Descrição dos Equipamentos do Ensaio SPT	30
3.1.4 Procedimentos de Ensaio	31
3.1.5 SPT-T (<i>standard penetration test – with torque measurement</i>)	34
3.1.6 Classificação do solo Segundo sua Compacidade ou Consistência à Penetração do Amostrador-Padrão	36
3.1.7 Aplicações dos Resultados obtidos com o Ensaio SPT	37
3.1.8 Críticas ao Ensaio SPT	40
3.1.8.1 Variações de energia no ensaio SPT, suas causas e conseqüências	40
3.1.8.1.1 Equipamentos	42
3.1.8.1.2 Operador	44
3.1.8.2 Condições do solo ensaiado	45
3.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA – SIG	46
3.2.1 Bancos de Dados	47
3.2.2 Vetores	48
3.2.3 Raster	48
3.2.4 Geodésia	49
3.2.4.1 A forma da superfície terrestre	49
3.2.4.2 Sistemas de coordenadas	50
3.2.4.3 Sistemas de projeção	51
3.2.4.4 O sistema de projeção <i>universal transverse mercator</i> (utm)	57
3.2.4.5 Escolha do tipo de projeção	60
3.3 FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS	61
3.3.1 Estatística básica	61
3.3.1.1 Média aritmética (\bar{x})	62

3.3.1.2 Mediana	62
3.3.1.3 Variância (s^2)	62
3.3.1.4 Coeficiente de variação	63
3.3.1.5 Coeficiente de assimetria	64
3.3.1.6 Coeficiente de curtose	64
3.3.1.7 Covariância	64
3.3.1.8 Distribuição normal ou de gauss	65
3.3.2 Estatística espacial ou geoestatística	66
3.3.2.1 Semivariograma	68
3.3.2.1.1 Parâmetros do variograma	70
3.3.2.1.1.1 A amplitude	71
3.3.2.1.1.2 O efeito pepita	71
3.3.2.1.1.3 Patamar	72
3.3.2.1.1.4 <i>Lag</i>	72
3.3.2.1.1.5 <i>Lag spacing</i>	73
3.3.2.1.1.6 Anisotropia	73
3.3.2.1.1.7 Abertura angular	75
3.3.2.1.1.8 Considerações gerais	76
3.3.2.1.2 Modelos variográficos teóricos	76
3.3.2.1.2.1 Modelo esférico	76
3.3.2.1.2.2 Modelo gaussiano	77
3.3.2.1.2.3 Modelo exponencial	78
3.3.2.1.2.4 Modelo de potência	79
3.3.2.1.3 Ajuste do variograma experimental ao teórico	80
3.3.2.1.4 Verificação da validade do variograma (teste da validação cruzada)	81
3.3.2.1.5 Análise estrutural	82
3.3.2.1.5.1 Comportamento próximo à origem	82
3.3.2.2 Krigagem	83
3.3.2.2.1 Fundamentação e desenvolvimento matemático do método de krigagem ordinária	83
3.4 O SOLO E O SUBSOLO	85
3.4.1 Processo de formação do solo	85
3.4.2 Laterização	86
3.4.3 Fatores que proporcionam rigidez temporária às argilas lateríticas	87

3.4.4 Métodos de classificação	88
3.4.4.1 Classificação dos solos	89
3.4.4.1.1 Classificação visual tátil	89
3.4.4.2 Classificação geológica	89
3.4.4.2.1 Classificação de solos residuais.....	89
3.4.4.2.1.1 Classificação de solos transportados	91
3.4.4.2.1.2 Classificação pedológica de solos residuais	92
3.5 MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS GEOTÉCNICOS	94
3.5.1 O mapeamento	95
3.5.2 Metodologia de obtenção dos mapas geotécnicos.....	95
4 O SOLO E O SUBSOLO DA REGIÃO DE LONDRINA/PR	97
4.1 FATORES INTERVENIENTES NA FORMAÇÃO DOS SOLOS – CLIMA.....	97
4.2 GEOLOGIA DA REGIÃO DE LONDRINA/PR	101
O solo e o subsolo da área urbana da cidade de londrina	103
4.3.1 Derrames Basálticos da Formação Serra Geral	103
4.3.2 O Solo da Região de Londrina	106
4.3.2.1 Características geotécnicas	106
4.3.2.2 Características pedológicas	108
5 MATERIAIS E MÉTODOS	110
5.1 CADASTRAMENTO DAS SONDAGENS	110
5.2 GEO-REFERENCIAMENTO DOS FUIROS DE SONDAGEM.....	111
Estatísticas descritivas	112
Estatísticas espaciais.....	112
Análise espacial	112
6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	114
6.1 N_{SPT} – EXTRATO NÃO-SATURADO	138
6.2 N_{SPT} – EXTRATO SATURADO	145
6.3 TORQUE MÁXIMO – EXTRATO NÃO-SATURADO.....	160
6.4 TORQUE MÁXIMO – EXTRATO SATURADO.....	170
6.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A TOPOGRAFIA DA BACIA DO CAMBEZINHO	184

6.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM AS FEIÇÕES NATURAIS DE DRENAGEM EXISTENTES NA BACIA DO CAMBEZINHO	184
6.7 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O LEVANTAMENTO PEDOLÓGICO DA BACIA DO CAMBEZINHO.....	186
7 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	193
REFERÊNCIAS	195
ANEXO.....	203

1 INTRODUÇÃO

No ano de 2006 a população mundial foi estimada em 6 bilhões de pessoas (U.S.CENSUS BUREAU, 2006). Braga *et al* (2002) estimam que a população mundial deve alcançar mais de 10 bilhões ainda este século. A maior parte da população atual habita os centros urbanos.

Há várias décadas vem ocorrendo no Brasil o fenômeno da transformação de uma população basicamente rural para uma população urbana. No caso da cidade Londrina, na região norte do estado do Paraná, ao se observar o crescimento da população que habita na área urbana, percebe-se que entre as décadas de 50 e 70 houve um grande êxodo rural, Tabela 1 (PML 2003a).

Tabela 1 – Crescimento da população urbana e rural de Londrina entre as décadas de 1950 e 2000, PML (2003a).

ANO	POPULAÇÃO URBANA		POPULAÇÃO RURAL	
	Número	%	Número	%
1950	34.230	47,93	37.182	52,07
1960	77.382	57,40	57.439	42,60
1970	163.528	71,69	64.573	28,31
1980	266.940	88,48	34.771	11,52
1991	366.676	94,00	23.424	6,00
1996	396.121	96,02	16.432	3,98
2000	433.369	96,93	13.696	3,07

Dentro da área urbana de Londrina, encontra-se a bacia do ribeirão Cambezinho, que vem sendo ocupada de maneira desordenada ao longo dos anos. As Figuras 1, 2 e 3 mostram a evolução da ocupação da citada bacia entre as décadas de 1970 e 1990. Os mapas foram produzidos de acordo com dados fornecidos pela Prefeitura Municipal de Londrina (PML 2003a).

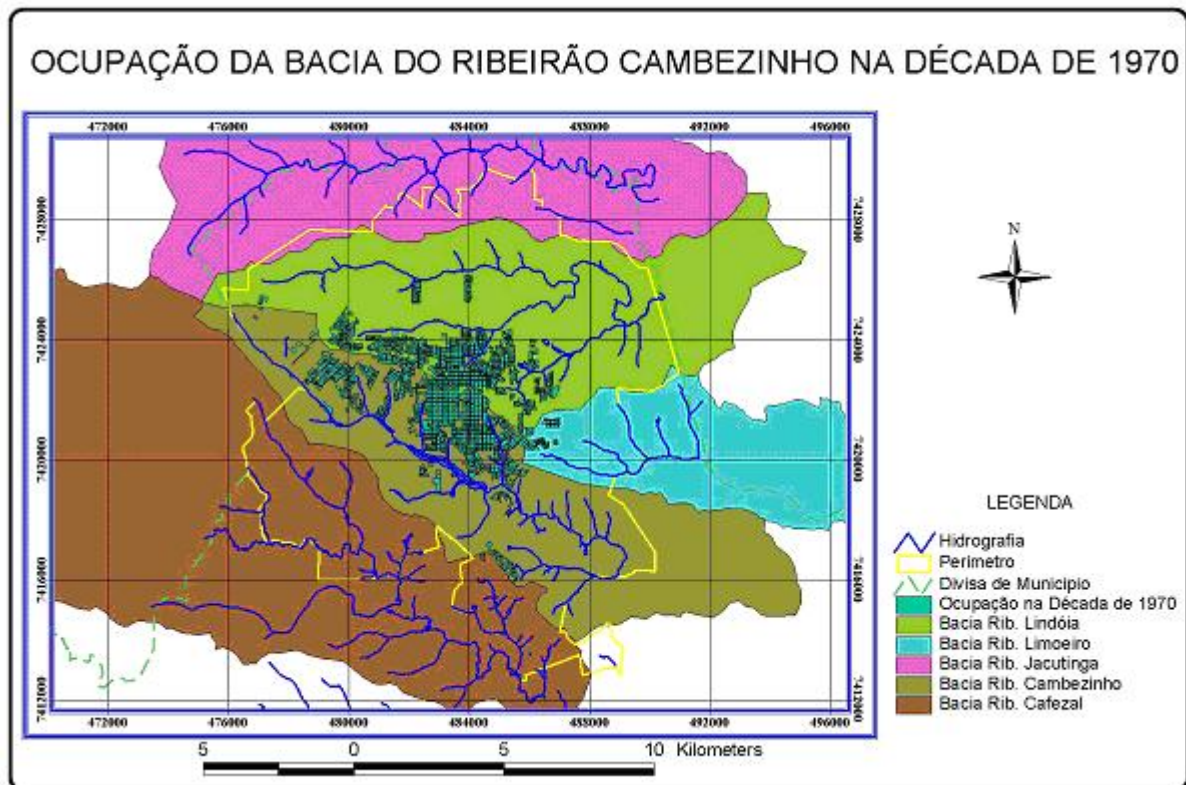


Figura 1 – Ocupação da bacia do ribeirão Cambezinho na década de 1970. Fonte dos dados: PML (2003a)

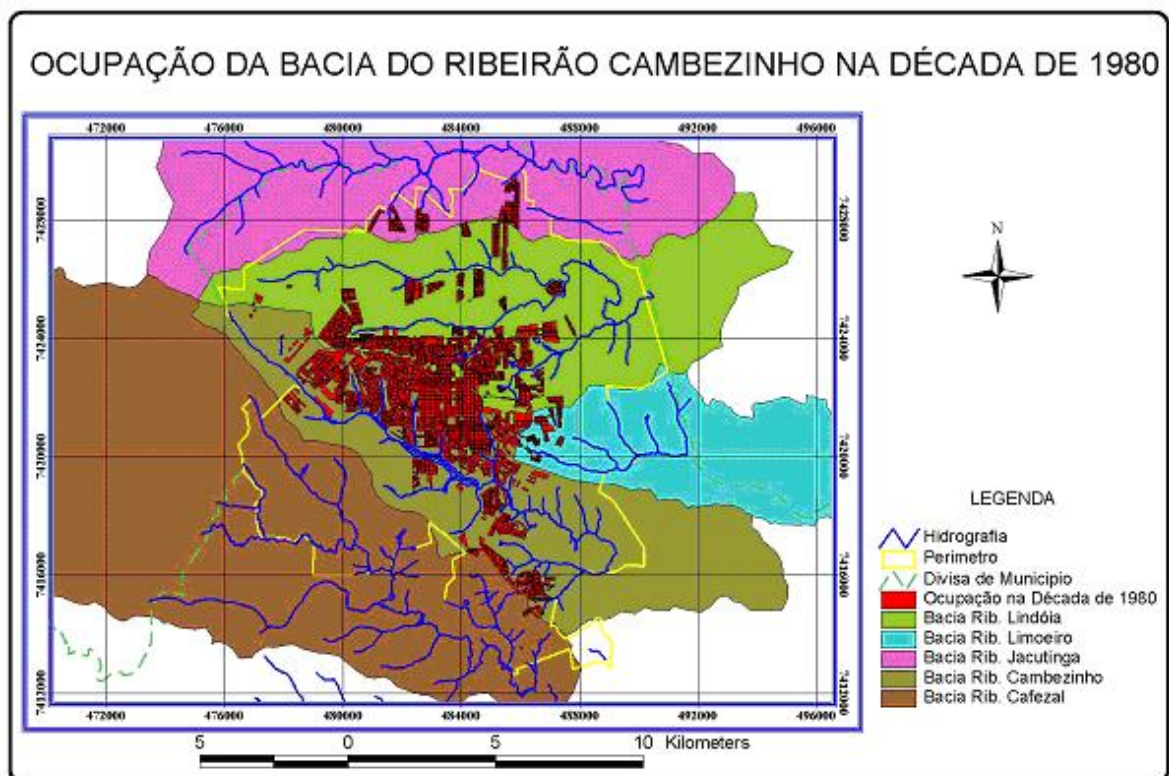


Figura 2 – Ocupação da bacia do ribeirão Cambezinho na década de 1980. Fonte dos dados: PML (2003a)

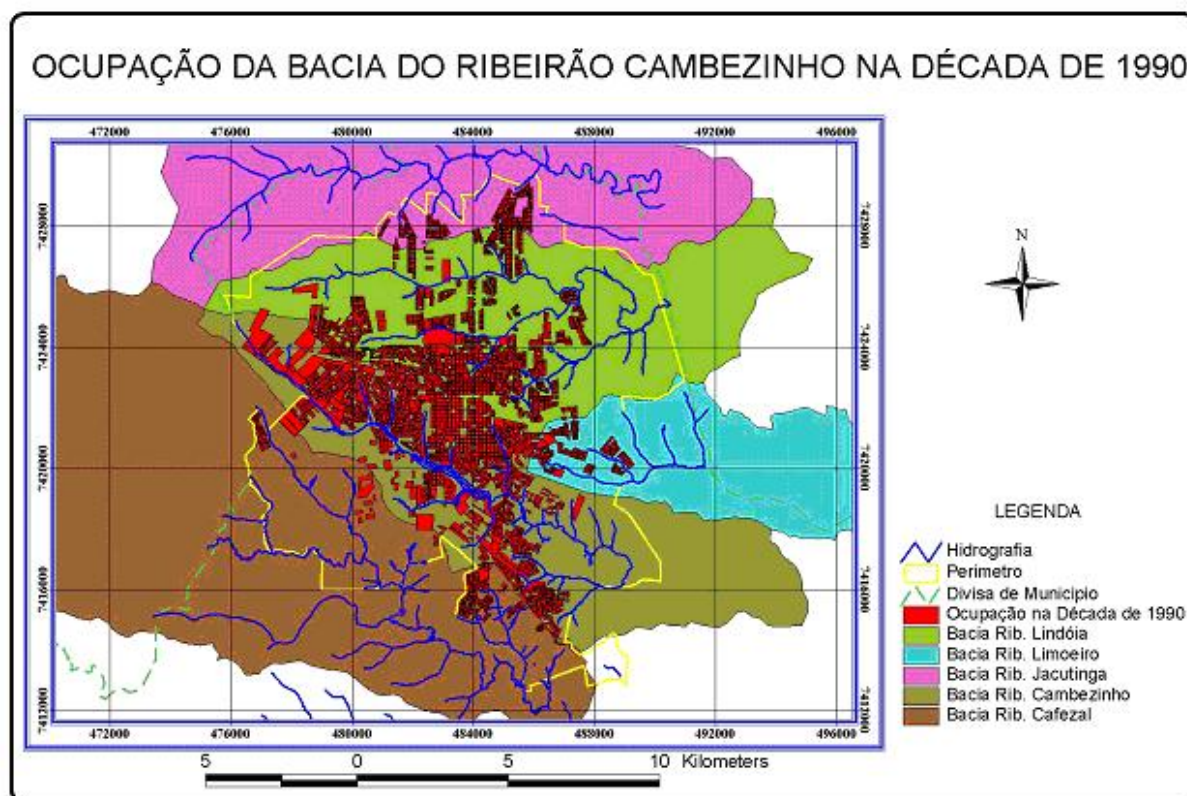


Figura 3 – Ocupação da bacia do ribeirão Cambezinho na década de 1990. Fonte dos dados: PML (2003a)

Como conseqüências do crescimento rápido e desordenado que as cidades de médio e grande porte têm experimentado, encontram-se a ocupação de áreas de risco geológico (áreas sujeitas a enchentes, deslizamentos, subsidências, colapsos, etc), as áreas de recarga de aquíferos, a instalação de áreas industriais em locais ambientalmente desfavoráveis entre outros. Este também é o caso de Londrina, e mais especificamente, da bacia do ribeirão Cambezinho.

Para o bom desenvolvimento urbano de uma cidade, o planejamento urbano deverá levar em conta as características geotécnicas do depósito sobre o qual a cidade se encontra. Tal procedimento tende a evitar grandes prejuízos e até mesmo salvar vidas, no entanto muitas vezes as decisões dentro do planejamento urbano são tomadas deixando-se de lado as análises técnicas ou mesmo o bom senso.

Na análise das potencialidades de ocupação de um local, geralmente são utilizados parâmetros geológico-geotécnicos, relacionados com fatores físicos da respectiva bacia hidrográfica, como topografia, proximidade às drenagens naturais e os tipos de solo (pedologia). Como exemplo destes parâmetros citam-se:

- Compressibilidade do solo.
- Tipos de solo e/ou rocha.
- Profundidade do aquífero freático.
- Profundidade do topo rochoso.
- Estratificação de camadas do subsolo.
- Coeficiente de permeabilidade do solo.

Com o objetivo de se amostrar o solo e estimar as características geomecânicas do mesmo, desenvolveu-se um ensaio de campo denominado SPT-T (*Standard Penetration Test – with Torque measurement*). Este tipo de ensaio permite a determinação das quatro primeiras características geotécnicas, e a estimativa das duas últimas.

Tendo em vista a heterogeneidade que o material solo apresenta, sua origem e os processos físico-químicos que o mesmo sofre, não é possível extrapolar os resultados de uma sondagem de solo, SPT-T por exemplo, para uma área com dimensões significativas. Como exemplo deste fato, a NBR 6.484 recomenda que a distância máxima entre um furo de sondagem SPT e outro não seja maior do que 100 metros.

Assim, o entendimento do comportamento geomecânico do solo e sua distribuição no espaço é de extrema importância no norteamto da ocupação de áreas. A espacialização do comportamento geomecânico do solo só é possível pelo uso de ferramentas tais como os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e a geoestatística. A primeira é responsável pela locação, gerenciamento e apresentação das informações georreferenciadas. A segunda oferece a possibilidade de se estimar, por meio da interpolação, o comportamento de determinados atributos entre pontos conhecidos. O mapeamento dos atributos geomecânicos que o solo apresenta pode ser denominado de mapeamento geotécnico.

Tendo o conhecimento, de modo espacializado, de determinadas propriedades do solo, pode-se gerenciar a ocupação de uma área, no sentido da economia na implantação de infra-estrutura, segurança, agilidade durante a execução da obra, entre outras vantagens.

2 OBJETIVO

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar possíveis relações entre a topografia, pedologia e os índices de resistência do solo N_{SPT} e Torque Máximo fornecidos pelo ensaio de campo SPT-T (*Standard Penetration Test with Torque Measurement*), no interior da bacia do ribeirão Cambezinho, na área urbana da cidade de Londrina/Pr, sendo esta área ocupada por edificações comerciais e residenciais. Uma vez constatada tais relações, buscar-se-á seu entendimento para elaboração de previsões de comportamento geotécnico, anterior às campanhas de sondagem, tendo-se como base as características topográficas e pedológicas da bacia.

O objetivo neste trabalho de interpretar a distribuição espacial de resistência do solo em relação à penetração do amostrador-padrão do SPT, bem como do Torque Máximo, baseia-se no fato de que o solo da região em estudo teve a mesma origem geológica (derrames basálticos – Formação Serra Geral), mas que o mesmo não ocorreu ou ocorre em relação aos processos pedogenéticos. Por isso optou-se por comparar as cartas de resistência estimada do solo com o mapa pedológico da área em estudo (Tagima & Terabe, 2005) – Anexo A.

Como passos para se alcançar o objetivo geral, os objetivos específicos deste trabalho se resumem em se verificar a relação espacial entre Torque e N_{SPT} , a relação entre Torque/ N_{SPT} e a profundidade, o comportamento do nível do freático em relação à topografia e sua profundidade de ocorrência, o comportamento variográfico dos índices do SPT-T, juntamente com as estimativas da confiabilidade dos resultados alcançados.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 SPT (*Standard Penetration Test*)

3.1.1 Introdução

No Brasil e no mundo, tornou-se corrente o uso do ensaio de campo SPT (*Standard Penetration Test*), em face dos benefícios que ele apresenta, como por exemplo facilidade de execução e economia (FERREIRA *et al.*, 1998). Schnaid (2002) acrescenta ainda qualidades como a simplicidade do equipamento e a “*obtenção de um valor numérico que pode ser relacionado com regras empíricas de projeto*”.

3.1.2 Histórico

De acordo com Fletcher (1965), *apud* Bortolucci (1983), a origem do ensaio de campo denominado de SPT surgiu nos Estados Unidos em 1902, através de Charles R. Gow (BROOMS; FLODIN, 1988). Gow desejoso de melhorar o processo de reconhecimento do subsolo, necessário às fundações, introduziu a “amostragem a seco”, pois até então as sondagens eram totalmente feitas com processos de circulação de água. O amostrador idealizado por Gow possuía um diâmetro de 25 mm, e era cravado no solo pela queda de um martelo de 50 kg. Nesse época ainda não se fazia a contagem do número de golpes necessários a cravação do amostrador-padrão. Tal procedimento foi introduzido mais tarde em 1927 por H.A. Mohr, utilizando uma massa de 65 kg com altura de queda de aproximadamente 76 cm. O índice de resistência a penetração do solo correspondia ao número de golpes necessários para a cravação de 30 cm do amostrador no solo, a partir do ponto em que o conjunto amostrador-hastes permanecesse estabilizado sob seu próprio peso (HVORSLEV, 1949, *apud* BORTOLUCCI, 1983,). Outras modificações foram sendo introduzidas no ensaio, até que em 1947 surge o amostrador Raymond, o qual é utilizado até

os dias de hoje. Com o passar do tempo, gradualmente o ensaio proposto por Gow e modificado por seus sucessores começou a ser utilizado em larga escala no mundo.

No Brasil ele foi introduzido pela Seção de Solos e Fundações do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT – SÃO PAULO), no final da década de 30. A princípio o IPT possuía seu próprio tipo de amostrador, denominado de “amostrador IPT”. Porém com o passar do tempo, o meio técnico sentiu a necessidade de padronização do ensaio, portanto esforços foram despendidos neste sentido. Ainda hoje, no Brasil e no mundo, este tipo de ensaio não se encontra padronizado, portanto caracterizando-se por significativas discrepâncias não só nos valores de ensaio, mas também nos valores obtidos através das correlações.

A Norma Brasileira da ABNT que rege o ensaio do SPT, é a NBR 6.484/2001, Solo – Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio.

3.1.3 Descrição dos Equipamentos do Ensaio SPT

O equipamento de ensaio do SPT se constitui principalmente de uma torre (tripé), hastes de 1m a 2m de comprimento e diâmetro nominal de 25 mm, martelo com massa igual a 65 kg, corda de sisal, tubo de revestimento, sistema perfuração com circulação de água, cabeça de bater, trados (concha e helicoidal) e um amostrador-padrão.

O torre, ou tripé, pode contar com levantamento manual ou motorizado do martelo. A Figura 4 mostra numa forma geral a torre e demais equipamentos.



Figura 4 – Vista geral de uma equipe de sondagem de simples reconhecimento com ensaio SPT, Belincanta (2004).

A NBR 6.484/2001 recomenda que o sistema de hastes seja de aço e que possua diâmetro interno igual a $23,4 \text{ mm} \pm 5,0 \text{ mm}$ e diâmetro externo igual a $33,4 \text{ mm} \pm 2,5 \text{ mm}$, com peso de 32 N/m . Todo o sistema de hastes deve estar bem encaixado e atarraxado por roscas e luvas em bom estado de conservação.

O martelo de 65 kg deve se constituir de um cilindro ou prisma de ferro, e na parte inferior um coxim de madeira dura, que segundo a NBR 6.484/2001 pode ser peroba rosa ou uma outra equivalente.

3.1.4 Procedimentos de Ensaio

O solo onde se está fazendo a sondagem por SPT é manualmente perfurado por um trado concha ou helicoidal manualmente até a profundidade de 1 m , sendo então revestido com um tubo metálico. O amostrador-padrão, conectado ao sistema de hastes é colocado na guia e suspenso numa cabeça de bater, sendo posicionado no furo de sondagem.

O martelo, conectado a uma haste guia, é suspenso pela corda de cisal, através de uma roldana, e então é solto em queda livre de uma altura de 75 cm, caindo sobre a cabeça de bater, levando o amostrador-padrão a penetrar no solo. O amostrador é cravado em 45 cm de solo, contando-se o número de golpes necessários para a cravação do amostrador-padrão em cada 15 cm. Desprezando-se o número de golpes necessários à cravação dos primeiros 15 cm, considerado como cravação inicial ou de assentamento, o número de golpes do martelo necessários para a penetração do amostrador-padrão, na seqüência, nos próximos 30 cm, é denominado de índice de resistência a penetração, N_{SPT} . Este número de golpes (N_{SPT}) reflete a resistência do solo à penetração do amostrador-padrão. O ensaio é repetido na seqüência, ao longo da profundidade, a cada metro de perfuração.

A partir de 1,00 m, o trado usado para a perfuração é o trado helicoidal. Porém em solos sem coesão, continua-se a escavação com o trado concha. Isto é feito até se alcançar a cota desejada na sondagem ou até uma camada impenetrável, como por exemplo rocha alterada ou a própria rocha.

O amostrador-padrão é tubular e de parede grossa, permitindo a retirada deformada de solo a cada metro de profundidade. As amostras recolhidas pelo amostrador são levadas para o laboratório para a análise visual-táctil, e quando de interesse, para a realização de ensaios de caracterização.

No caso de se atingir o lençol d'água subterrâneo, ou uma camada de solo que restrinja o avanço do trado helicoidal, substitui-se o processo de perfuração pela perfuração com circulação de água. A Figura 5 mostra o trépano de perfuração, recomendado na NBR 6.484/2001 e a parte dos tubos de circulação de água.

Este processo demanda também um conjunto moto-bomba e uma caixa de água com divisória para decantação dos sólidos trazidos pela circulação de água. A moto-bomba é conectada ao conjunto de hastes, injetando água dentro do furo de sondagem através do revestimento. Por sua vez o trépano é acionado em movimentos semi-rotativos e verticais para cima e para baixo desagregando o solo. A água injetada chega ao fundo do furo de sondagem e retorna à superfície trazendo os detritos provenientes da desagregação do solo. Esta água de lavagem que retorna à superfície é depositada na caixa de água, onde o material trazido por ela é decantado. Ao se atingir a próxima cota onde será determinado o valor de N_{SPT} , retira-se o trépano e então é inserido o amostrador-padrão repetindo-se o procedimento já descrito anteriormente, quando da realização do ensaio. As Figuras 5, 6 e 7 retratam sucintamente os equipamentos e processos descritos anteriormente.



Figura 5 – Tubo de circulação de água e trépano de perfuração recomendados pela NBR 6.484/2001, modificado de Belincanta (2004).



Figura 6 – Trépano com circulação d'água, Belincanta (2004).



Figura 7 – Procedimento de perfuração com uso de circulação d'água, moto-bomba e trépano, Belincanta (2004).

3.1.5 SPT-T (*Standard Penetration test – with Torque measurement*)

Foi sugerida por Ranzini (1988) a medição do Torque necessário para se vencer a aderência (atrito) do amostrador-padrão com o solo que o envolve, logo após a sua cravação no ensaio do SPT, obtendo com isto um parâmetro útil à estimativa da resistência lateral das fundações por estacas. O aparelho usado para tal é o torquímetro (Figura 8 e 9) juntamente com todo o restante do equipamento necessário ao SPT (Figura 4).

Após a cravação do amostrador-padrão no ensaio do N_{SPT} , acopla-se o torquímetro à haste, e então ele é girado manualmente movimentando, assim, todo o conjunto haste-amostrador. Faz-se a leitura do Torque Máximo e do Torque Residual necessário ao movimento rotacional, pois mesmo após a desestruturação do solo em torno do amostrador, ainda existe uma resistência residual por parte do solo. Peixoto (2001), *apud* Peixoto *et al* (2004), apresentou um torquímetro elétrico e um sistema de aquisição eletrônica de dados. Ferreira *et al* (1998), sugerem que a medida de torque no ensaio SPT, traz uma contribuição significativa, com vantagens na estimativa do atrito/adesão lateral no projeto de fundações por estacas.

Diversos autores têm estudado correlações entre os valores de N_{SPT} e T_{max} sendo que esta razão é chamada de índice de Torque Máximo (TR). Ao se observar que o valor de TR para a Bacia Sedimentar Terciária de São Paulo (seguramente uma das mais estudadas do país) era aproximadamente constante e de valor 1,2, alguns autores foram levados a fazer proposições. Primeiramente Décourt (1991b), *apud* Quaresma *et al* (1998), propôs que o valor de índice $TR = \frac{T}{N_{SPT}}$ igual a 1,2 seria constante. Assim este autor propôs o uso de conceito de Neq , definido por: $Neq = \frac{T}{1,2}$. Porém a medida que os estudos foram extrapolados além do citado depósito, verificou-se que esta relação pode ser menor ou até algumas vezes maior. Ver por exemplo os valores de Torque Máximo e N_{SPT} apresentados por Vessaro *et al* (2004).

Entretanto certo comportamento uniforme tem sido observado, por exemplo, de que TR tende a aumentar de acordo com o aumento da estruturação do solo. Peixoto *et al* (2004) relata que TR menor do que um sempre identifica solo colapsível, mas que diversos são os fatores que intervêm no valor de TR como geologia, o tamanho dos grãos, presença de matéria orgânica e alguns tipos de concreção.



Figura 8 – Torquímetro utilizado em ensaios SPT-T, Belincanta (2004).



Figura 9 – Torquímetro sendo utilizado logo após o ensaio SPT, Belincanta (2004).

3.1.6 Classificação do Solo Segundo sua Compacidade ou Consistência à Penetração do Amostrador-Padrão

O solo que está sendo penetrado pelo amostrador-padrão pode ser classificado segundo o número de N_{SPT} necessários ao amostrador para penetração referente ao ensaio SPT, como mostra a Tabela 2 extraída da NBR 6.484/2001.

Tabela 2 – Classificação do solo segundo a compacidade ou consistência de acordo com o N_{SPT} , extraída da NBR 6.484/2001

Areias	
Número de Golpes (N_{SPT})	Grau de Compacidade
0 – 4	Fofa
5 – 18	Pouco Compacta
9 – 18	Medianamente Compacta
19 – 40	Compacta
> 40	Muito Compacta
Argilas	
Número de Golpes (N_{SPT})	Grau de Consistência
0 – 2	Muito Mole
3 – 5	Mole
6 – 10	Média
11 – 19	Rija
> 19	Dura

3.1.7 Aplicações dos Resultados Obtidos com o Ensaio SPT

Sendo o ensaio geotécnico de campo mais popular do mundo, o SPT adquiriu diversas aplicações partindo de amostragem de solo para simples classificação visual-táctil, passando por estimativas de propriedades geomecânicas, até correlações com resultados de outros ensaios geotécnicos. Por conta desta grande popularidade, Schnaid (2002) alerta para a “*pouca racionalidade de alguns métodos de uso e interpretação*” dos resultados do ensaio.

Com um boletim simples gerado a partir de campanhas de sondagem podem-se obter informações geológicas e geotécnicas. Um exemplo de relatório de sondagem do tipo SPT-T é apresentado na Figura 10.

A partir de resultados de N_{SPT} , por exemplo, é possível por meio de correlações empíricas serem estimadas propriedades geomecânicas tais como módulo de deformabilidade em argilas (STROUD, 1998, *apud* QUARESMA *et al*, 1998), resistência não-drenada em argilas (DÉCOURT, 1989, *apud* QUARESMA *et al*, 1998), recalques de fundações diretas (por exemplo, BURLAND, BROOMS; DE MELLO, 1977, *apud* SCHNAID 2002) ou tensão admissível do solo para tubulões (ALONSO, 1983, *apud* CINTRA *et al*, 2003), conforme as equações a seguir, respectivamente.

$$E = (900 \text{ a } 1400)N_{SPT} \quad (01)$$

$$C_u = 12,5 \cdot N_{SPT} \quad (02)$$

$$\rho = \frac{s \cdot p}{N_{SPT}^{0,87} \cdot [1 + (0,4 + D/B)]} \quad (03)$$

$$\sigma_{adm} = \frac{N_{SPT}}{30} \quad (04)$$

onde:

E : Módulo de deformabilidade (kPa)

N_{SPT} : Número de golpes necessários à penetração do amostrador padrão em 30 cm de solo

C_u : Resistência não-drenada (kPa)

ρ : Recalque (mm)

s : Coeficiente de recalque (cm^3/kgf)

p : Pressão de contato (kgf/cm^2)

D : Profundidade da fundação (m)

B : Largura da fundação (m)

σ_{adm} : Tensão admissível do solo para base de tubulão (MPa)

Observando-se as equações apresentadas anteriormente se percebe que quanto maior o valor de N_{SPT} , maior será o valor do módulo de deformabilidade (E), da resistência não-drenada (Cu) e da tensão admissível em um solo qualquer para a base de um tubulão (σ_{adm}). Por outro lado, quanto menor for o valor do N_{SPT} em um solo, provavelmente maior será o recalque sofrido por uma fundação, se comparada com o mesmo elemento de fundação porém em outro solo com maiores valores de N_{SPT} . Assim os valores de N_{SPT} são indicativos de algumas propriedades geomecânicas de um solo, e provavelmente ao se comparar dois ou mais depósitos, o que apresentar valores maiores de N_{SPT} apresentará também melhor comportamento geomecânico.

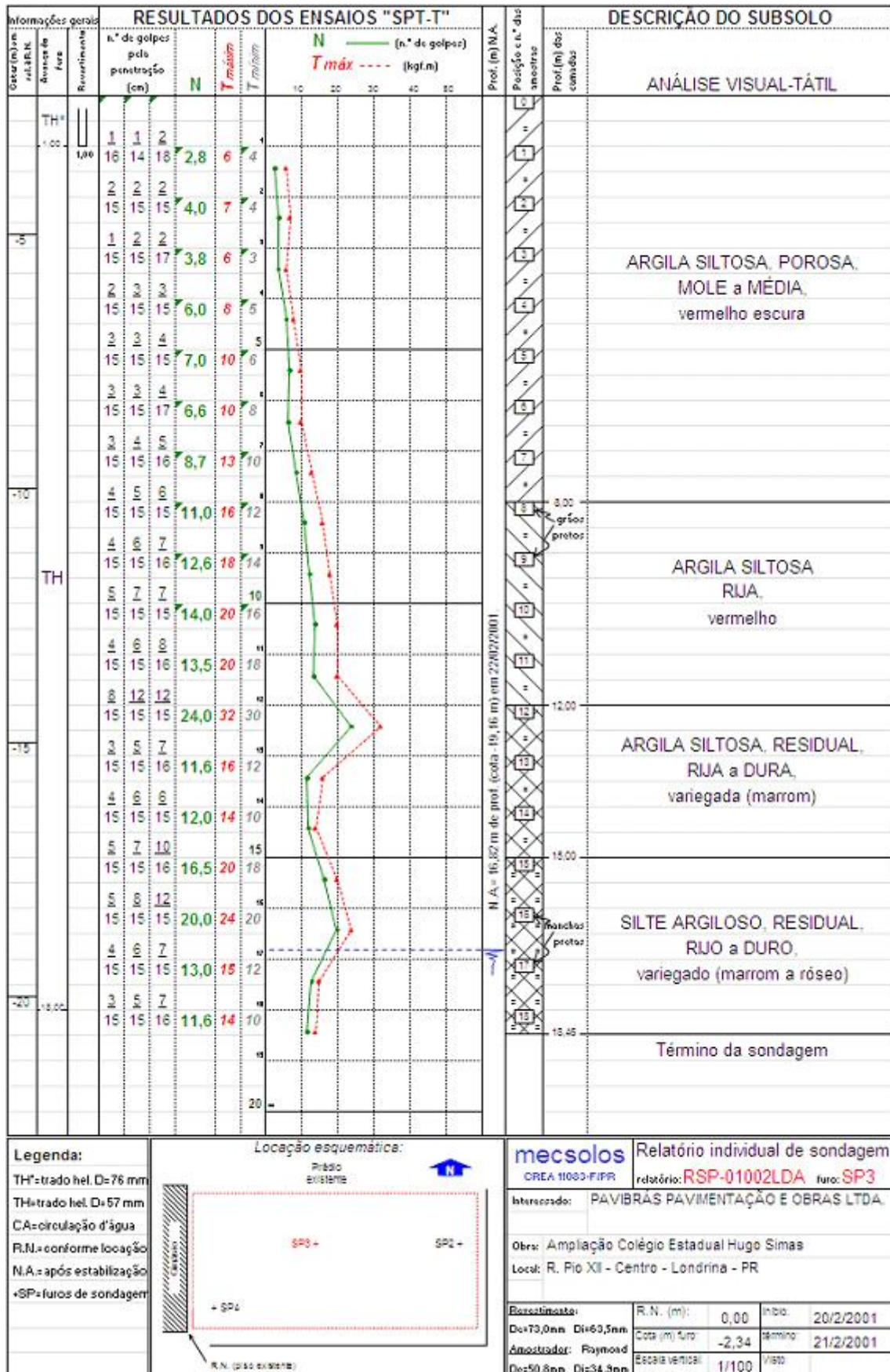


Figura 10 – Exemplo de relatório de sondagem do tipo SPT.

3.1.8 Críticas ao Ensaio SPT

3.1.8.1 Variações de energia no ensaio spt, suas causas e conseqüências

Um aspecto importante a ser analisado é a quantidade de energia transmitida pelo sistema ao conjunto hastes-amostrador. A energia potencial gravitacional do martelo é o produto de três grandezas sendo elas, a massa do martelo mais o coxim, altura de queda e aceleração local da gravidade. Para se determinar a aceleração local da gravidade em cada ponto seria necessário o uso de algum instrumento como o gravímetro, usado nas ciências geodésicas. Porém, para facilitar o cálculo, esta variável pode ser tomada como constante e de valor $9,81 \text{ m/s}^2$. Assim a energia potencial gravitacional do martelo seria aproximadamente 478,24 Joules no caso do SPT. Fairhurst (1961), *apud* Schmertmann e Palácios (1979), descreve que no caso do SPT, numa situação ideal o que acontece decorrente do impacto de dois materiais semelhantes é que a onda de compressão, proveniente do impacto do martelo sobre a cabeça de bater acoplada no topo do conjunto de hastes, viaja com a mesma velocidade em ambas as peças, descendo nas hastes e ascendendo no martelo, onde há também reflexão da onda de tensão ascendente nas hastes. Após a primeira onda de compressão nas hastes ocorre um tipo de reflexão de modo que uma onda sobe de volta até o topo da composição, no ponto de contato com o martelo, onde há também uma reflexão da onda de tensão ascendente na haste. Este processo continua até que as ondas de tensão se reduzam a zero. Schmertmann e Palácios (1979) comentam que a penetração ocorre de maneira praticamente instantânea, com 90 % dela se processando em menos do que 50 msec, e que impactos subseqüentes (repique) ocorrem tão tarde que não aumentam a penetração significativamente. Assim, segundo estes autores, as ondas que viajam pelas hastes indo e vindo após o impacto do martelo não produzem penetração adicional significativa.

Nem toda a energia potencial gravitacional gerada pelo sistema é transmitida ao conjunto hastes-amostrador sobre forma de energia dinâmica, isto por conta de perdas por atrito da corda de cisal, estado do sistema hastes-amostrador, etc. (BELINCANTA, 2004; SCHNAID, 2002).

Diversos autores têm estudado a diferença entre a quantidade de energia gerada e a quantidade de energia transmitida ao sistema de hastes, e mesmo ao amostrador. Em 1977 Kovacs *et al*, *apud* Belincanta (2004), apresentaram medidas de energia cinética do

martelo no instante do impacto, mostrando que a variação da citada energia pode aumentar o valor de N_{SPT} em até 3 vezes. Estes valores foram mais tarde confirmados por estudos feitos por Schmertmann e Palácios (1979).

Comprovado também é o fato de que o comprimento das hastes também influencia nos valores obtidos de N_{SPT} . Odebrecht *et al* (2004) relata um estudo a respeito da transferência de energia potencial gravitacional do martelo em três pontos diferentes: no coxim, no meio da composição de hastes e na ponta do amostrador. Através de análises experimentais e analíticas, em ensaios SPT realizados em câmaras de calibração, estes autores chegaram as seguintes conclusões:

- Quanto maior o comprimento do conjunto de hastes, maior será a energia transmitida ao amostrador-solo.
- A eficiência é diretamente proporcional a três fatores, sendo que o terceiro deles (η_3) é inversamente proporcional ao comprimento do conjunto de hastes.

Ainda com a perda de parte da energia potencial, uma parcela considerável é transmitida ao amostrador-padrão. Por causa de sua elevada energia de cravação, o ensaio SPT não é recomendado para solos moles. O SPT não é exatamente capaz de refletir o comportamento de solos moles, já que a estrutura de tais solos é demasiadamente sensível à energia empregada pelo ensaio.

Décourt (1989), *apud* Belincanta (2004), relata que segundo suas pesquisas, o valor de eficiência dos equipamentos de SPT brasileiro seriam de 72%. Desde então este o valor (ou exatos 70%) tem sido utilizados pelo meio técnico e acadêmico como valor de referência. Nos Estados Unidos e na Europa, por conta do acionamento automático do equipamento de SPT, a eficiência gira em torno de 60%. Quanto maior a eficiência de um determinado equipamento, menor será o número de golpes necessários para cravação do amostrador-padrão se comparado a outro equipamento de SPT com menor eficiência.

3.1.8.1.1 Equipamentos

Muitos são os problemas enfrentados pelos usuários dos resultados do ensaio SPT por falta de uma maior uniformidade e padronização do equipamento. Diversos são os fatores físicos capazes de alterar os resultados do SPT, como por exemplo:

- Uso ou ausência de coxim e cabeça de bater;
- Variação do diâmetro, razão da área projetada, rugosidade das paredes internas e externas, forma de corte da sapata e forma das aberturas de alívio do amostrador-padrão, Hvorslev (1949), *apud* Belincanta (1998).
- Acionamento com corda de cisal ou cabo de aço;
- Acionamento manual ou automático;
- Utilização ou não de roldana móvel;
- Variação do tipo de martelo utilizado;

Belincanta (1998) desenvolveu um trabalho pioneiro no Brasil analisando a influência das variantes do equipamento de SPT sobre os resultados do ensaio. Na Tabela 3 são apresentadas algumas de suas conclusões.

A Tabela 3 apresenta dados sobre a influência do tipo de martelo nos resultados. A composição de hastes era de 14 metros, com uso de martelo com coxim de madeira e cabeça de bater de 3,6 kg. Já a Tabela 4 retrata as eficiências medidas decorrentes do uso de coxim, para composição de 14 metros de comprimento, martelo com pino guia e cabeça de bater de 3,6 kg. Por fim a Tabela 5 retrata a influência decorrente da massa da cabeça de bater, para composição de 14 metros de comprimento e martelo cilíndrico com coxim de madeira.

Tabela 3 – Influência do tipo de martelo, para composição de 14 m de comprimento, martelo com coxim de madeira e cabeça de bater de 3,6 kg. Belincanta (1998), *apud* Schnaid 2002, modificada.

Equipamento	Estado da Composição	Eficiência das Energias							
		Acionamento Manual				Acionamento com Gatilho			
		Média (%)	Nº de casos	Desv. Pad. (%)	CV ¹ (%)	Média (%)	Nº de casos	Desv. Pad. (%)	CV ¹ (%)
Martelo cilíndrico com pino guia, acionamento com corda	Velha	69,4	178	3,59	5,2	75,5	195	2,95	3,9
	Nova	72,7	153	3,59	4,9	81,3	90	3,98	4,9
Martelo cilíndrico com pino guia, acionamento com cabo de aço	Velha	63,2	45	4,78	7,6	74,4	23	2,23	3,0
	Nova	73,9	54	3,43	4,6	83,2	26	2,52	3,0
Martelo cilíndrico vazado, acionamento com corda	Nova	66,5	50	3,74	5,6	74,2	39	5,30	7,1

¹: Coeficiente de Variação

Tabela 4 – Influência decorrente do uso de coxim, para composição de 14 m de comprimento, martelo com pino guia e cabeça de bater de 3,6 kg. Belincanta (1998), *apud* Schnaid 2002, modificada.

Sondagem	Uso de Coxim	Eficiência das Energias							
		Acionamento Manual				Acionamento com Gatilho			
		Média (%)	Nº de casos	Desv. Pad. (%)	CV ¹ (%)	Média (%)	Nº de casos	Desv. Pad. (%)	CV ¹ (%)
Local 1	Não	72,8	111	3,62	5,0	-	-	-	-
	Sim	71,0	104	3,56	5,0	-	-	-	-
Local 2	Não	-	-	-	-	76,1	9	4,54	6,0
	Sim	66,7	51	2,73	4,1	75,5	195	2,95	3,9

¹: Coeficiente de Variação

Tabela 5 – Influência decorrente da massa da cabeça de bater, para composição de 14m de comprimento, martelo cilíndrico com coxim de madeira. Belincanta (1998), *apud* Schnaid 2002, modificada.

Sondagem	Cabeça de bater	Eficiência das Energias							
		Acionamento Manual				Acionamento com Gatilho			
		Média (%)	Nº de casos	Desv. Pad. (%)	CV ¹ (%)	Média (%)	Nº de casos	Desv. Pad. (%)	CV ¹ (%)
Local 1	1,2	66,7	51	2,73	4,1	78,5	13	2,04	2,6
	3,6					75,5	195	2,95	3,9
	14,0					66,4	23	1,70	2,6

¹: Coeficiente de Variação

Percebe-se pelas Tabelas 3, 4 e 5 que fatores como condições da composição de hastes (velha ou nova), tipo do acionamento (manual ou com gatilho), uso ou não do coxim e massa da cabeça de bater influenciam na energia total transmitida ao amostrador-padrão e conseqüentemente no número de golpes lidos em determinado ensaio.

Outra crítica feita ao equipamento de SPT é o fato da área do amostrador-padrão em contato com o solo durante a execução do ensaio, variar desde 0cm² até 850cm², ou seja, ocorre uma alteração considerável de resistência ao atrito lateral do sistema amostrador-solo durante o ensaio (NILSSON, 2004).

Em alguns tipos de solo com baixa permeabilidade e que se encontram abaixo do aquífero freático, o equipamento do ensaio SPT pode demonstrar outra deficiência. Apesar do amostrador-padrão permitir que a água intersticial seja drenada durante a cravação, a área de influência do solo próximo ao amostrador é grande. Assim, ao se aplicar o golpe no amostrador, parte da carga vai para a água intersticial (já que ela não tem tempo suficiente para ser drenada), aumentando de forma irreal o valor do N_{SPT}, Nilsson (2004).

3.1.8.1.2 Operador

Outra causa responsável por grande variabilidade nos resultados de ensaios SPT é o fator humano, ou em outras palavras, o operador do equipamento. Imprecisões humanas e a falta de conhecimento e entendimento da responsabilidade a respeito do trabalho de sondagem e seus resultados, são apontados como alguns motivos da variabilidade proveniente do fator humano (MELLO, 1971).

3.1.8.2 Condições do Solo Ensaiado

O solo por si só pode possuir características que influenciam nos valores obtidos de N_{SPT} . Fletcher (1965) e Mohr (1966), *apud* Belincanta (1998) apresentam um breve relato destes fatores e sua influência.

- Limpeza do furo de sondagem: quando o processo de perfuração é realizado de forma não adequado ou utilizando ferramentas não adequadas, pode ocorrer a deposição de resíduos do solo escavado no fundo do furo, resíduos estes que podem alterar os valores medidos de N_{SPT} . Estes resíduos podem obstruir os orifícios e válvulas existentes na cabeça do amostrador aumentando assim a pressão interna do amostrador, aumentando de forma irreal o valor do N_{SPT} . Podem também reduzir o valor do N_{SPT} se depositados no fundo do furo, ou quando do enfraquecimento do solo junto ao ponto de ensaio
- Desequilíbrio Hidrostático: quando o furo de sondagem atinge o aquífero freático, e deste ponto em diante, é necessário manter a pressão hidrostática no interior da perfuração igual a que o terreno exerce nas paredes do furo. A não observação desta recomendação pode fazer com que as paredes do furo sejam instabilizadas, podendo haver desmoronamento.
- Presença de Pedregulhos e Seixos: a presença de pedregulhos ou seixos conduz a valores irreais de N_{SPT} , ainda quando o ensaio é realizado numa mesma camada de solo de comportamento homogêneo.
- Compacidade Relativa das Areias e Peso Próprio do Solo (decorrente do aumento da profundidade): o valor do N_{SPT} é alterado por conta da pressão geostática e da compacidade relativa das areias. Obviamente quanto mais densa a areia em ensaio, maior será o valor de N_{SPT} . Porém ao se manter o valor da compacidade relativa, o valor de N_{SPT} aumentará com o aumento da pressão geostática.

3.2 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA – SIG

A evolução da humanidade em seus meios de transporte, comunicação e outros incentivou e têm incentivado o desenvolvimento de maneiras mais rápidas e eficientes de obter e apresentar informações. Pode-se dizer que os sistemas de informação geográfica são frutos deste desenvolvimento e necessidade. Prandini *et al* (1995) relata que por volta de 1989 o termo SIG explodiu nos Estados Unidos, e desde então vem se espalhando pelo mundo, nas mais diversas áreas e aplicações.

Os sistemas de informação geográfica consistem da união e análise de várias informações, tais como:

- Bancos de dados;
- Vetores;
- Matrizes;
- *Raster* (por exemplo, uma cena de uma imagem de satélite).

Algumas definições de SIG, segundo alguns autores, são apresentadas a seguir:

Um caso especial de sistemas de informações, no qual o banco de dados consiste em informações sobre características distribuídas espacialmente, atividades ou eventos, os quais são definidos no espaço como pontos, linhas ou áreas. Os SIGs manipulam os dados acerca destes pontos, linhas e área para estabelecer perguntas ad hoc e análises. Dueker (1979), apud Silva (1999).

Um sistema para captura, armazenar, checar, manipular, analisar e exibir dados, os quais são espacialmente referenciados à Terra. DOE (Department of Environment, 1987), apud Silva (1999).

Um sistema que contém dados espacialmente referenciados que podem ser analisados e convertidos em informações para uso em conjunto específico de finalidades. A característica principal de um SIG é analisar dados para gerar novas informações. Parent (1988), apud Silva (1999).

Um meio que serve como um provedor de dados e/ou informações espaciais. De Man (1984).

Os SIGs necessitam usar o meio digital, portanto o uso intensivo da informática é imprescindível; deve existir uma base de dados integrada, estes dados precisam estar geo-referenciados e com controle de erro; devem conter funções de análises destes dados que variem de álgebra cumulativa (operações tipo soma, subtração, multiplicação, divisão, etc.) até álgebra não cumulativa (operações lógicas). Silva (1999).

Conjunto de programas, equipamentos, metodologias, e usuários que devem estar perfeitamente integrados de forma a tornar possível a coleta, o armazenamento, o processamento e análise de dados geográficos (georeferenciados) bem como a produção de informação. Teixeira (1995), apud Romão e Souza (2003).

Sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos e recuperam informações não apenas com base em suas características alfanuméricas, mas também através de sua localização espacial. Câmara *et al* (2001).

As definições de SIG são bastante claras e abrangentes, principalmente a de Silva (1999), que em linhas gerais enfoca seu modo de funcionamento, ferramentas, características necessárias e potencialidades.

O desenvolvimento do SIG não pode ser associado a uma pessoa ou entidade específica, pois durante os últimos dois séculos diversas pessoas contribuíram para seu desenvolvimento, desde o aprimoramento das técnicas de cartografia (ciência de produção e interpretação de mapas), até o lançamento dos satélites artificiais.

Silva (1999) relata que em 1912, Manning realizou um estudo na cidade de Billerica (Massachusetts, EUA), que gerou quatro mapas diferentes e um mapa final mostrando as conclusões a que ele havia chegado em relação ao padrão de uso do solo e mudanças nas estradas locais. Embora Manning não tenha citado o uso da técnica de superposição de mapas (e conseqüentemente de informações), ao se observar a discussão dos dados de solo e da vegetação juntamente com a topografia e suas inter-relações com o uso da terra, fica claro que ele tenha utilizado tal recurso, o que hoje em dia é extensivamente utilizado nos SIGs.

3.2.1 Bancos de Dados

Os bancos de dados constituem o armazenamento de forma organizada e a recuperação de informações quando necessárias, possibilitando buscas lógicas e sua representação visual através de plantas, cartas e mapas. Como citado por Silva (1999), em SIG os dados são classicamente armazenados na forma tabular.

Os dados formadores de tais bancos podem ser dos mais variados tipos e origens, informando desde, por exemplo, taxa de natalidade em dada região, até informações geológicas do subsolo de determinada região, obtidas através de sondagens.

A maior parte dos softwares da atualidade utiliza a estratégia dual em seu sistema de banco de dados, sendo que o ARCVIEW (ESRI, 1999) e SPRING (CÂMARA *et al*, 1996) são apenas alguns exemplos disso (CÂMARA, 2001). Tal estratégia consiste em se criar duas classes de bancos de dados para um mesmo projeto. O primeiro armazena informações a respeito dos vetores, raster, etc. O segundo armazena informações externas com as quais o operador o alimenta. É neste segundo banco de dados que se tem acesso para adicionar as informações externas do projeto. Nos bancos de dados as informações são gerenciadas por um Sistema Gerenciador de Banco de Dados (SGBD).

3.2.2 Vetores

Os vetores são representações gráficas de informações provenientes de bancos de dados. Eles podem ser do tipo *ponto*, *linha* ou *polígono*. As feições do tipo ponto são representadas por um único par de coordenadas. Os vetores do tipo linha são compostos por dois ou mais pares de coordenadas e os polígonos possuem, como particularidade, o fato de que eles iniciam e terminam no mesmo ponto, sendo, portanto, linhas que delimitam uma área fechada.

Os pontos são comumente utilizados para representar informações pontuais, como por exemplo, localização de sondagens, poços de monitoramento ou casos de uma determinada doença em uma região de uma cidade. As linhas representam divisas entre regiões, rios, arruamento e etc. Os polígonos podem ser utilizados para representar informações contidas dentro de áreas delimitadas, como por exemplo um local com determinado tipo de solo. Isto pode ser observado em Camargo (1988).

3.2.3 Raster

Segundo Silva (1999) os dados armazenados no modo *raster* são bem mais simples que os no modo vetorial. No sistema *raster* as informações gráficas são armazenadas e discretizadas em termos de “*cells*” ou *pixels*. Uma cena de uma imagem de satélite é um exemplo de *raster*. O *pixel* é a menor unidade dentro deste sistema. O modo como as

informações são armazenadas e recuperadas é mediante a numeração das linhas e colunas formadas pelos diversos *pixels* no *raster* em questão.

Em determinados *softwares* de SIG é possível se transformar dados vetoriais em *raster* e dados *raster* em vetoriais.

3.2.4 Geodésia

A geodésia é definida como a ciência que se ocupa da determinação da forma, das dimensões e do campo gravitacional da Terra (SILVA, 1999).

3.2.4.1 A Forma da superfície terrestre

A superfície do planeta Terra, ao nível médio do mar, se assemelha a uma esfera, com a diferença de que existe um achatamento nos pólos e um intumescimento no equador, o que desqualifica a Terra para ser comparada a uma esfera perfeita. O nome atribuído ao formato geométrico da Terra é geóide.

Não existe um modelo matemático capaz de representar um geóide como a superfície da Terra ao nível médio do mar. A forma geométrica que mais se aproxima do geóide é a elipse. Por isso, frequentemente, a superfície da Terra é cartograficamente representada por uma elipse ou elipsóide de revolução. Tal figura recebe o nome de elipsóide de revolução pelo fato de possuir dois semi-eixos de tamanhos distintos, e a formação desta figura geométrica se dar pela revolução destes semi-eixos.

Existem ainda dois planos de referência denominados de *Datum*, necessários a aplicação local do elipsóide. Eles se posicionam em relação à Terra real, sendo que o primeiro é chamado de *Datum* planimétrico ou horizontal e o segundo de *Datum* vertical. A partir do primeiro forma-se a base para o cálculo dos levantamentos de controle horizontal. Para o *Datum* horizontal são necessárias algumas informações para definir o elipsóide de referência, como as coordenadas do ponto de origem, a orientação (azimute inicial), a separação geóide-elipsóide (ondulação geoidal), e as componentes do desvio da

vertical (meridiana e primeiro vertical). Tal ponto, escolhido como padrão no território brasileiro pelo IBGE em 1979, localiza-se na cidade de Chuá, Minas Gerais.

O *Datum* vertical diz respeito às altitudes, contadas a partir do nível do mar. No Brasil o *Datum* vertical, que fixa como referência o nível médio registrado pelo marégrafo, está instalado em Imbituba, Santa Catarina.

Pelo fato do elipsóide de revolução não representar adequadamente toda a superfície da Terra, cada país tem adotado elipsóides com características diferentes, ou seja, as que melhor representam seu território. Até algumas décadas atrás o elipsóide adotado oficialmente no Brasil, ou o Sistema Geodésico Brasileiro, era o de *Hayford*, utilizando o *Datum* Córrego Alegre. A partir de 1979 o departamento de geodésia do IBGE adotou como elipsóide oficial a ser utilizado no Brasil o da União Astronômica Internacional, usando o *SAD 69 (South America Datum 1969)*.

Alguns dos dados necessários para definir o elipsóide de referência para o *Datum SAD 69* se encontram na Tabela 6 modificada de IBGE (2005).

Tabela 6 – Dados do SAD 69 necessários a definição do elipsóide de referência, IBGE (2005) modificada.

Estação	Vértice Chuá (MG)
Latitude	19° 45' 41,6527" S
Longitude	48° 06' 04,0639" W
Azimute de Uberaba	271° 30' 04,05"
Orientação elipsóide-geóide no ponto <i>datum</i>	$\xi=0,31$, $\eta=-3,52$
Altura Geoidal (m)	0

3.2.4.2 Sistemas de coordenadas

Os sistemas de coordenadas são dispositivos numéricos de se determinar a localização de certo ponto ou local na superfície terrestre. Muitos são os sistemas existentes, como por exemplo, a *Landsat 4 WRS* em que o método de localização de um ponto se dá através de linhas e colunas, ou a *Projeção Plana dos Estados Unidos de 1927* ou *1983*. Na atualidade dois são os sistemas de coordenadas mais comuns, sendo eles:

- Sistema de coordenadas planas ou cartesianas;
- Sistema de coordenadas geográficas ou latitude e longitude.

O sistema de coordenadas planas consiste na fixação de um sistema de eixos cartesianos de referência, de modo a obter, para cada ponto, suas coordenadas X e Y conforme esquema da Figura 11.

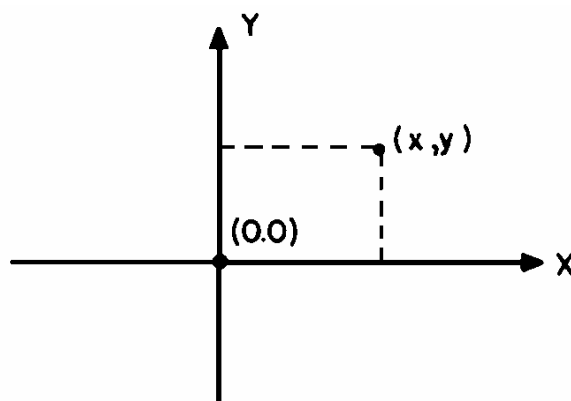


Figura 11 – Esquema de funcionamento de coordenadas planas, INPE (2005).

A fixação da origem deste sistema cartesiano pode ser a partir da linha de determinado fuso, linha do equador ou outro qualquer. As coordenadas neste sistema geralmente são métricas.

3.2.4.3 Sistemas de projeção

Desde a mais remota antiguidade o homem buscou maneiras de se orientar e indicar caminhos e direções para locais que para ele eram importantes. Após a queda do mito de que o planeta Terra era uma superfície plana, e o descobrimento e a aceitação da superfície curva da Terra, o homem continuou tentando representá-la. Porém percebeu que ao se tentar representar algo que possuía certa curvatura, de maneira plana (mapas), ocorriam certas distorções em relação à situação real. Desde então, diversos pesquisadores têm desenvolvido maneiras de se representar a superfície curva da Terra em um plano. Tais métodos são chamados de sistemas de projeção.

Muitos são os métodos ou sistemas de projeção, que apesar do grande número existente possuem particularidades que tornam um ou outro sistema mais adequado a determinadas representações da superfície terrestre. Algumas das características divergentes entre uma e outra projeção é a forma geométrica de como se projeta a superfície terrestre. As

projeções planas, por exemplo, projetam a superfície da Terra como se ela estivesse sendo vista ao espelho. Daí o nome de superfície plana. As projeções cônicas e cilíndricas consistem em se envolver o planeta em um cone ou cilindro, respectivamente, e então “abri-lo”. Exemplos ilustrativos de projeção do tipo plana, cônica e cilíndrica se encontram nas Figuras 12, 13 e 14 respectivamente, conforme extraído de Firkowski (2004).

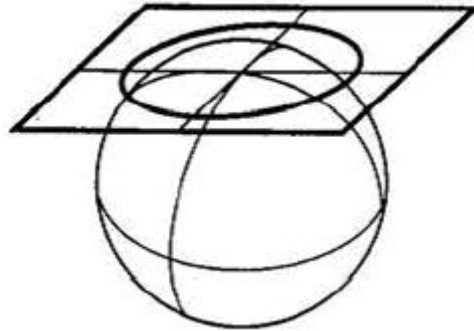


Figura 12 – Exemplo de projeção plana, Firkowski (2004).

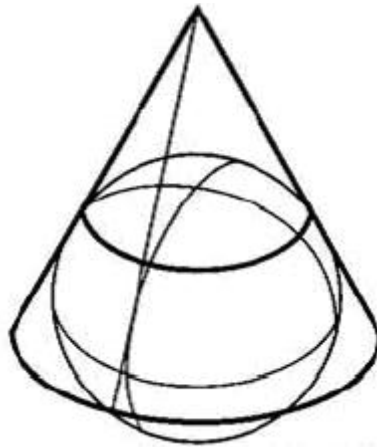


Figura 13 – Exemplo de projeção cônica, Firkowski (2004).

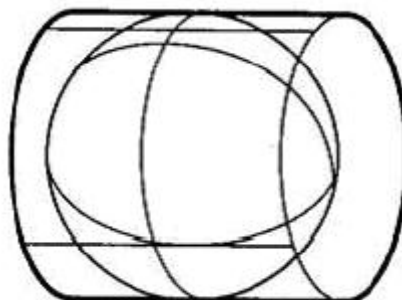


Figura 14 – Exemplo de projeção cilíndrica, Firkowski (2004).

As projeções podem ainda se subdividir em outras categorias. Por exemplo, entre as projeções do tipo cônicas existem as cônicas tangentes e as secantes. Como o nome sugere, nas projeções cônicas tangentes, a superfície da Terra é tangenciada pela superfície do cone de projeção. Já nas projeções cônicas secantes a superfície terrestre é seccionada pela superfície do cone. Como exemplos destes tipos de projeção são apresentados a Figura 15 como projeção cônica tangente e a Figura 16 como projeção cônica secante (DANA, 2006).

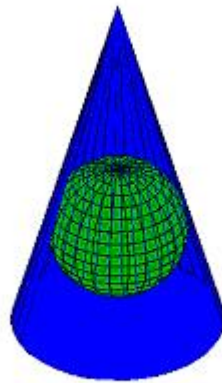


Figura 15 – Esquema de projeção cônica tangente, Dana (2006).

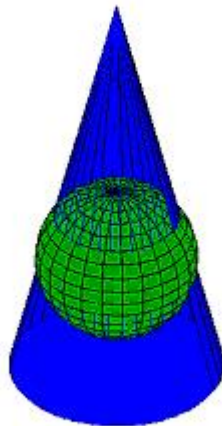


Figura 16 – Esquema de projeção cônica tangente, Dana (2006).

Outro exemplo de variação do estilo de projeção é a projeção cilíndrica transversa e a oblíqua. Na projeção do tipo transversa o comprimento do cilindro de projeção está paralelo à linha do equador, diferente da projeção da Figura 14, e na projeção do tipo

oblíqua o cilindro é localizado obliquamente. Exemplos destes dois tipos de projeção se encontram na Figura 17, (a) (Projeção transversa) e (b) (Projeção oblíqua).

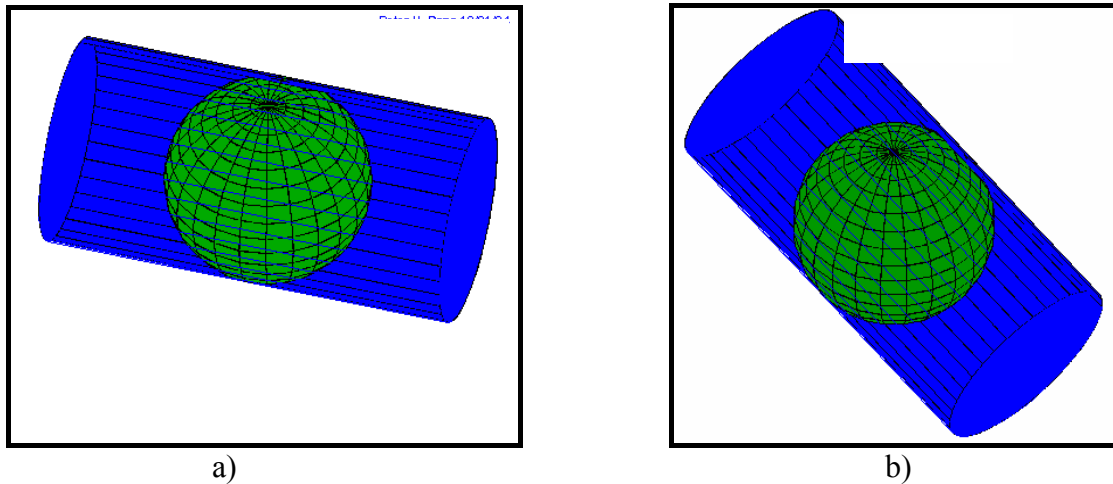


Figura 17 – Projeção cilíndrica, a) Transversa e, b) Oblíqua, Dana (2006).

Apesar dos esforços por parte dos pesquisadores, ainda não existe um sistema de projeção que consiga representar de maneira perfeita a superfície de planeta Terra. Os sistemas de projeção, atualmente existentes, conseguem representar somente de maneira parcial as características geométricas da Terra. Por exemplo, alguns tipos de projeção são chamados de conforme, por preservar o verdadeiro formato do que está sendo representado, porém distorcem muitas outras características como área, distância entre pontos, etc. Outros são chamados de projeção eqüidistante, por guardar escala entre as distâncias reais e as apresentadas pela projeção em determinadas linhas. Outros tipos ainda são chamados de projeção equivalente, por não distorcerem a área das figuras representadas. Um resumo das características das projeções é apresentado nas Tabelas 7 e na Tabela 8, Câmara *et al* (1996).

Tabela 7 – Resumo das principais características das projeções, Câmara *et al* (1996)..

Quanto ao sólido de projeção	Quanto à intersecção do plano	Característica	O que preserva	O que distorce
Plana/ Cilíndrica / Cônica	Secante ou Tangente	Equivalente	Área	Distância, Formato, Direções
		Eqüidistante	Distância	Área, Formato, Direções
		Afilática	-	Todas as propriedades
		Conforme	Formato	Distância, Área, Direções

Tabela 8 – Principais tipos de projeção, suas classificação, aplicações e características, Câmara *et al* (1996).

PROJEÇÃO	CLASSIFICAÇÃO	APLICAÇÕES	CARACTERÍSTICAS
Albers	Cônica Equivalente	Mapeamentos temáticos. Serve para mapear áreas com extensão predominante leste-oeste.	Preserva áreas. Substitui com vantagens todas as outras cônicas equivalentes.
Bipolar	Cônica Conforme	Indicada para base cartográfica confiável dos continentes americanos.	Preserva ângulos. É uma adaptação da Cônica de Lambert.
Cilíndrica Eqüidistante	Cilíndrica Eqüidistante	Mapas Mundi. Mapas em escalas pequenas. Trabalhos computacionais.	Altera áreas. Altera ângulos.
Gauss	Cilíndrica Conforme	Cartas topográficas antigas. Mapeamento básico em escala média e grande.	Altera áreas (mas as distorções não ultrapassam 0,5%). Preserva ângulos. Similar à UTM com defasagem de 3 de longitude entre os meridianos centrais.
Estereográfica Polar	Plana Conforme	Mapeamento das regiões polares.	Preserva ângulos. Oferece distorções de escala.

		Mapeamento da Lua, Marte e Mercúrio.	
Lambert	Cônica Conforme	Cartas gerais e geográficas. Cartas militares. Cartas aeronáuticas do mundo.	Preserva ângulos.
Lambert Million	Cônica Conforme	Cartas ao milionésimo.	Preserva ângulos.
Mercator	Cilíndrica Conforme	Cartas náuticas. Cartas geológicas e magnéticas. Mapas Mundi.	Preserva ângulos.
Miller	Cilíndrica	Mapas Mundi. Mapas em escalas pequenas.	Altera ângulos. Altera áreas.
No_Projection	Plana	Armazenamento de dados que não se encontram vinculados a qualquer sistema de projeção convencional (desenhos, plantas, imagens brutas ou não georeferenciadas, etc.).	Sistema local de coordenadas planas.
Policônica	Cônica	Mapeamento temático em escalas pequenas.	Altera áreas e ângulos. Substituída pela Cônica Conforme de Lambert nos mapas mais atuais.
Latlong	-	Armazenamento de dados matriciais com resolução espacial definida em graus decimais.	Geometria idêntica a da projeção cilíndrica eqüidistante.
Sinusoidal	Pseudo-cilíndrica Equivalente	Mapeamentos temáticos em escalas intermediárias e pequenas.	Preserva áreas.
UTM	Cilíndrica Conforme	Mapeamento básico em escalas médias e grandes. Cartas topográficas.	Preserva ângulos. Altera áreas (mas as distorções não ultrapassam 0,5%).

3.2.4.4 O Sistema de Projeção *Universal Transverse Mercator* (UTM)

O sistema UTM (*Universal Transverse Mercator* ou *Universo Transverso de Mercator*) foi concebido por Gerard Kremer em 1569, a partir de modificações na projeção Conforme ou de Gauss. Em 1956, o Brasil adotou como projeção cartográfica de mapeamento oficial o sistema UTM.

O sistema UTM, como visto no sub-item 3.2.4.3, é um sistema de projeção cilíndrico, que o cilindro é locado de maneira transversa ao elipsóide, tangente a ele. Aplica-se então um fator de escala no cilindro de 0,9996, no fuso central da zona, o que torna o cilindro secante ao elipsóide. Assim, torna-se possível assegurar um padrão mais favorável de deformação em escala ao longo do fuso. O erro de escala fica limitado a 1/2.500 no meridiano central, e a 1/1.030 nos extremos do fuso (IBGE, 2005). Partindo do fuso central, onde o valor de escala é 0,9996 até a distância aproximada de 1° 37', onde o cilindro secciona o elipsóide, tal valor aumenta até atingir o valor de um. A partir destas linhas até a linha do fuso, o valor é maior do que um, conforme ilustra a Figura 18.

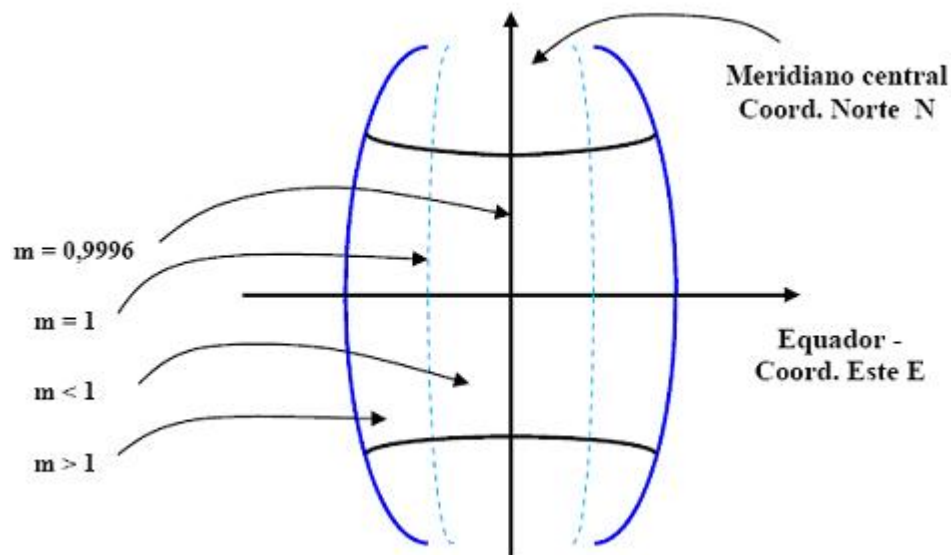


Figura 18 – Fuso UTM, seus principais elementos, e distorção de escala em diferentes regiões do fuso UTM, Firkowski (2004).

O cilindro secciona o elipsóide e a área compreendida entre as secções do cilindro e externa a ele é chamada de zona. Ao se rotacionar o cilindro de 6° tem-se uma nova secção e conseqüentemente uma nova zona. Sendo que uma volta completa em torno do

elipsóide é 360° , o sistema conta então com 60 faixas. A Figura 19 mostra o cilindro transverso de Mercator delimitando uma determinada zona. A Figura 20 representa a Terra dividida nas 60 zonas e a Figura 21 é um detalhe dos fusos sobre o Brasil.

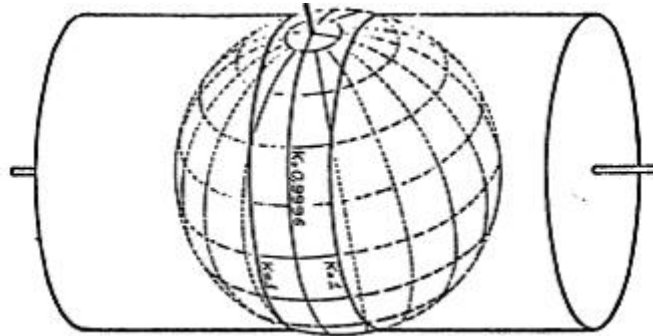


Figura 19 – Cilindro transverso de Mercator delimitando uma zona qualquer, IBGE (2005).

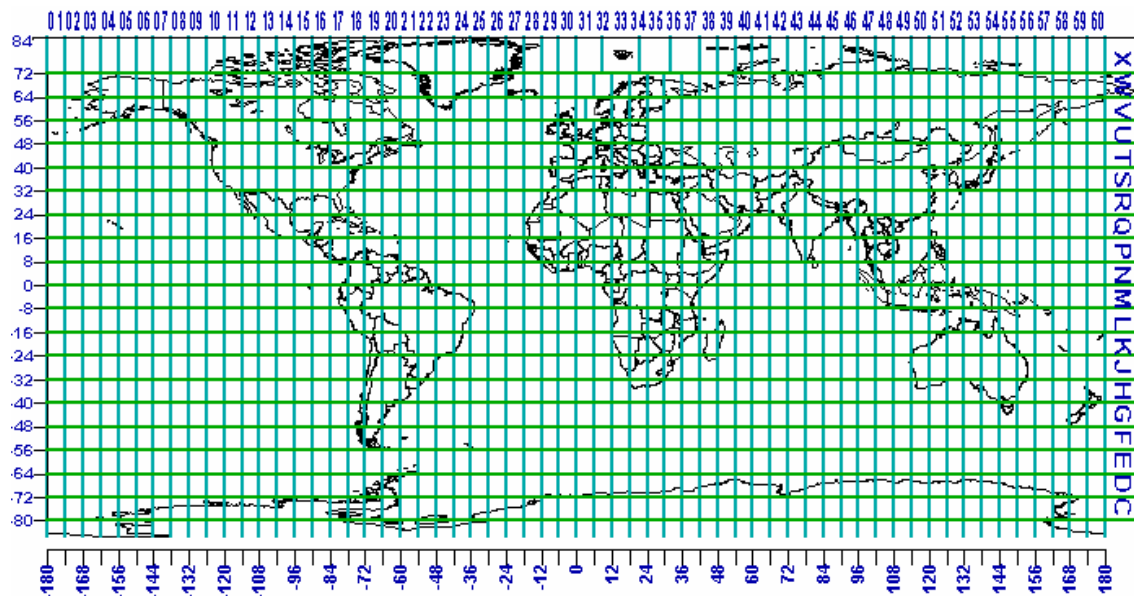


Figura 20 – Divisão de faixas dentro do sistema de projeção UTM, Duarte (2002).

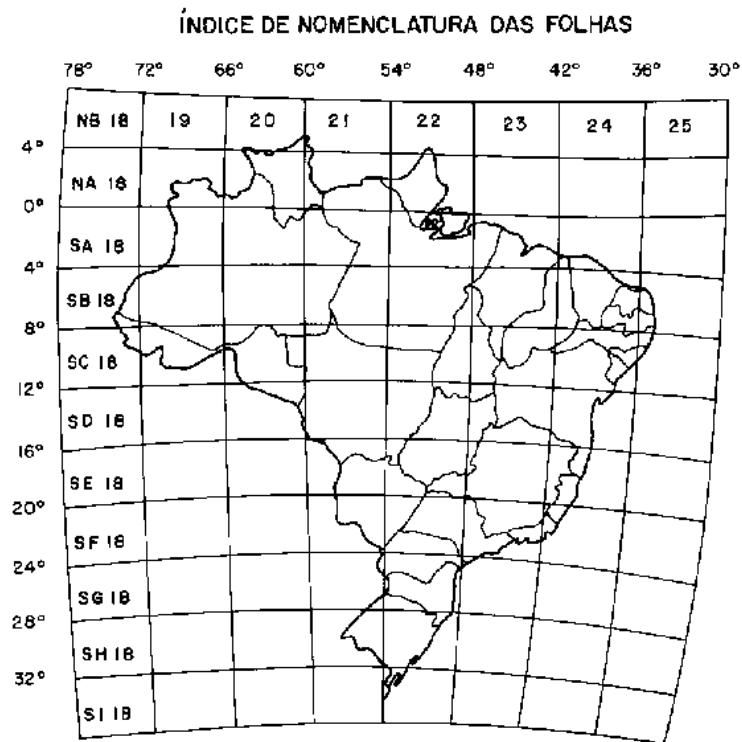


Figura 21 – Detalhe dos fusos UTM no território do Brasil, Câmara *et al* (1996).

A cada fuso associa-se um sistema cartesiano métrico de referência, atribuindo à origem do sistema (interseção da linha do Equador com o meridiano central) as coordenadas 500.000 m, para contagem de coordenadas ao longo do Equador, e 10.000.000 m ou 0 m, para contagem de coordenadas ao longo do meridiano central, para os hemisférios sul e norte respectivamente. Isto elimina a possibilidade de ocorrência de valores negativos de coordenadas. A designação das faixas é feita pelo número da zona UTM, seguido da indicação Norte e Sul (Sul se está abaixo do Equador, e Norte se está acima).

Algumas particularidades deste sistema de projeção podem ser observadas na Figura 22. Percebe-se, por exemplo, que as latitudes limites ao norte são 84° e ao sul 80°, sendo que além destes limites as distorções são exageradas. Nota-se, por exemplo, que na Figura 22 em que o planeta Terra é representado na projeção UTM, a área da Groenlândia é semelhante a da América do sul, porém na realidade a América do Sul é mais de oito vezes maior.

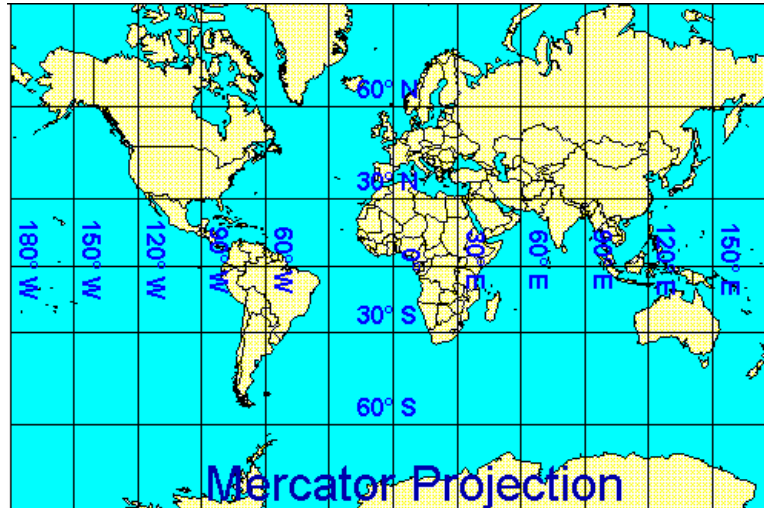


Figura 22 – O planeta Terra segundo a projeção de Mercator, Duarte (2002).

Algumas ressalvas devem ser feitas a respeito do sistema de projeção em questão. A projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*), por exemplo, é uma projeção do tipo conforme. Porém as distorções observadas em termos de área são de no máximo 0,5 %, conforme INPE (2005). Sendo assim, dependendo do nível de precisão desejado em determinado estudo, a projeção UTM poderia ser utilizada para estimar áreas, mesmo sendo um sistema de projeção conforme e não equivalente.

3.2.4.5 Escolha do Tipo de Projeção

A escolha do sistema de projeção a ser utilizado em determinado trabalho depende das características que deverão ser representadas com exatidão. Erro na escolha do sistema de projeção pode fornecer informações incorretas, conforme ilustrado por Dana (2006) na Figura 23, onde o autor mostra o mapa dos Estados Unidos utilizando três sistemas diferentes de projeção:

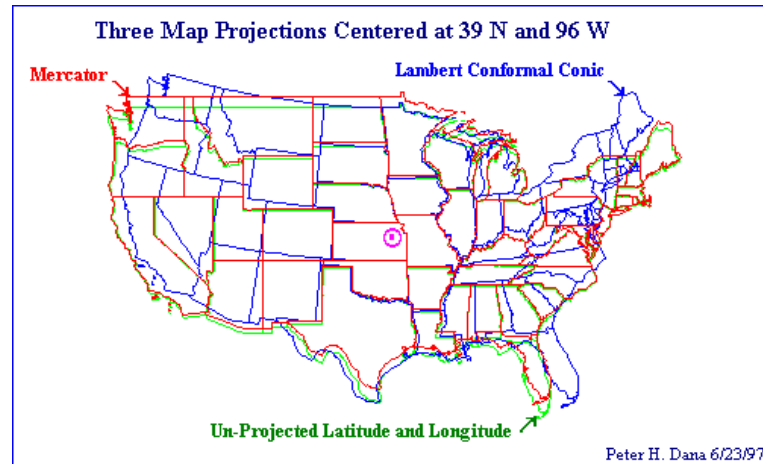


Figura 23 - Mapa dos Estados Unidos utilizando três sistemas diferentes de projeção, Dana (2006).

3.3 FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS

3.3.1 Estatística Básica

Muitos são os processos que influenciam na formação dos solos e, conseqüentemente, nas suas características e propriedades geomecânicas. Por exemplo, Pinto (1998) relata que até mesmo o estado de tensões existente na rocha-mater interfere nas características de resistência do solo originado dela. Assim, grande é a variabilidade de valores de N_{SPT} e Torque (máximo e residual) da sondagem a penetração do tipo SPT-T, tanto em profundidade, ou se na mesma profundidade, em furos de sondagem diferentes (heterogeneidade). Considerando-se este aspecto, a análise de informações e dados provenientes de processos naturais, necessita primeiramente de uma abordagem e tratamento estatístico. Neste contexto a estatística básica apresenta um grande número de ferramentas. Algumas delas ferramentas são a média aritmética, mediana, variância, desvio-padrão, coeficiente de variação, histograma, coeficiente de curtose e coeficiente de assimetria.

Segundo Sturaro (1993), as ferramentas anteriormente citadas podem ser divididas da seguinte maneira:

- Medidas de localização: média e mediana.
- Medidas de dispersão: variância e desvio-padrão.
- Medidas de forma: coeficientes de variação, assimetria e curtose.

3.3.1.1 Média Aritmética (\bar{x})

É o valor médio obtido dentre a população total através da equação (05):

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (05)$$

onde:

\bar{x} : média aritmética;

n : número de eventos;

x : valores da variável em estudo.

A média aritmética indica somente uma tendência dentro da amostra ou população, já que a variabilidade dos dados pode ser muito grande, o que não é indicada pela média.

3.3.1.2 Mediana

A mediana é o valor central dentro da população. Ao se ordenar os valores da população em ordem crescente, por exemplo, o valor que se encontra com igual número de valores amostrais maiores e menores é a mediana.

3.3.1.3 Variância (S^2)

Como dito anteriormente, muitas vezes o valor obtido com a média (\bar{x}) não representa adequadamente a população, por conta da grande dispersão de valores que pode existir dentro da amostra. Surge então a necessidade de se determinar o quanto a média (\bar{x}) representa a população analisada. Isso pode ser feito através do cálculo da variância (S^2), conforme equação (06):

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{x})^2 \quad (06)$$

onde:

S^2 : Variância

v_i : Valores assumidos pela variável em estudo

n : Número de componentes da amostra

Percebe-se pela análise da equação (06) que a variância é uma média quadrática das diferenças entre os valores amostrais e a média amostral. É necessário que as diferenças entre os valores e a média sejam elevadas ao quadrado para que tal operação não seja igual a zero.

A raiz quadrada da variância é denominada de desvio-padrão (σ). As unidades de desvio padrão são as mesmas da média.

3.3.1.4 Coeficiente de Variação

O desvio-padrão ou a variância em si, quando tomados como valores isolados, não fornece muita informação a respeito da distribuição encontrada na população. Tal informação pode ser obtida através do coeficiente de variação (CV) que é calculado pela equação (07)

$$CV = \frac{S}{x} \quad (07)$$

Como exposto anteriormente, o desvio-padrão é raiz das diferenças quadráticas médias de cada valor amostral em relação à média. Assim, a divisão do desvio-padrão pela média fornece um percentual de dispersão em relação à média. CV é adimensional.

3.3.1.5 Coeficiente de Assimetria

Representa o grau de assimetria na distribuição de frequência. Os valores obtidos são adimensionais, e podem ser calculados com a equação (08):

$$Assimetria = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(v_i - \bar{x})^3}{S^3} \quad (08)$$

3.3.1.6 Coeficiente de Curtose

Este coeficiente avalia o grau de achatamento de uma distribuição. Os valores obtidos são adimensionais. É calculado com a seguinte equação (09)

$$Curtose = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(v_i - \bar{x})^4}{S^4} \quad (09)$$

3.3.1.7 Covariância

Quando se deseja avaliar a correlação entre duas variáveis, tem-se como uma das ferramentas possíveis de serem utilizadas a covariância.

Se duas variáveis x_1 e x_2 possuem variâncias nos pontos n_1 e n_2 , conseqüentemente existe também uma covariância, sendo as variâncias função de suas localizações (STURARO, 1985). Goovaerts (1997) explica que a covariância é uma medida da variação dos valores x_1 e x_2 em relação a suas médias. A covariância pode ser definida conforme a equação (10):

$$C(x_1, x_2) = E\left\{ [Z(x_1) - \bar{x}(x_1)] [Z(x_2) - \bar{x}(x_2)] \right\} \quad (10)$$

onde:

$C(x_1, x_2)$: Covariância;

E : Esperança matemática (valor médio);

$Z(x_1)$: Valor amostral no ponto n_1 ;

$\bar{x}(x_1)$: Média amostral dos valores de x_1 ;

$Z(x_2)$: Valor amostral no ponto n_2 ;

$\bar{x}(x_2)$: Média amostral dos valores de x_2 ;

Com o objetivo de prever a probabilidade de ocorrência de determinado evento, foram desenvolvidos alguns modelos matemáticos por meio de observação destes eventos denominados de distribuição de probabilidade. Talvez a distribuição mais conhecida e utilizada seja a distribuição Normal ou de Gauss.

3.3.1.8 Distribuição Normal ou de Gauss

Provavelmente a distribuição normal é um dos tipos de distribuição mais importantes, pelo fato da maior parte dos fenômenos naturais poder ser representada por ela (STURARO, 1993).

A distribuição normal é definida pela equação (11):

$$Y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{1}{2\sigma^2}(v-\mu)^2} \quad (11)$$

Onde:

v : Variável

Y : Probabilidade

σ : Desvio-padrão da variável v

μ : Média Aritmética da variável v

e : 2,71828182846

π : 3,14159265359

3.3.2 Estatística Espacial ou Geoestatística

Ao se estudar fenômenos naturais, principalmente nos quais a posição espacial é relevante às características da variável em estudo, percebe-se que a estatística comum não modela ou representa adequadamente as variações existentes. Alguns dos motivos, de acordo com Camargo (1988) são:

- A estatística clássica não representa a variabilidade espacial;
- A estatística clássica não indica o tamanho ideal do domínio de estimação;
- A estatística clássica não indica a orientação da janela de estimação para obtenção da estimação ótima;
- A estatística clássica não determina os erros, ou incertezas, associadas à estimação em locais não amostrados em caso de interpolação.

Por volta de 1950, o engenheiro sul-africano Daniel G. Krige ao estudar a concentração de blocos mineralizados de ouro, percebeu que se não se levasse em consideração a configuração geométrica dos mesmos, resultaria em erros em suas estimativas. De posse das primeiras observações e pesquisas feitas por Krige, o engenheiro francês George Matheron desenvolveu a teoria que estuda o comportamento de variáveis distribuídas espacialmente e que representam um determinado fenômeno natural. Desta forma Matheron desenvolveu e generalizou os primeiros estudos realizados por Krige, bem como a teoria da variabilidade de amostragem associada ao tamanho das amostras em estudo e a teoria completa dos erros de cada estimativa (STURARO, 1993). Do sobrenome de Daniel G. Krige surgiu o termo utilizado para denominar o método de interpolação utilizado na geoestatística, *kriging* (inglês) ou krigagem (português).

O método da krigagem consiste na estimativa de valores por interpolação, mediante utilização de médias móveis, com o objetivo de evitar a superestimativa sistemática de valores (CAMARGO, 1988).

Landim (2000) apresentou um comparativo entre a krigagem e outros métodos de interpolação comumente utilizados e aponta as seguintes vantagens da krigagem em relação aos outros.

- A krigagem fornece parâmetros adequados de amostragem: número de amostras, distribuição e densidade;

- Fornece parâmetros adequados de busca: tamanho da área de busca, forma (circular ou elipsóide) e, se elipsóide, orientação do eixo principal;
- Fornece parâmetros adequados da grade: tamanho das células, forma e orientação;
- Expressa a natureza da distribuição espacial da variável investigada (uniformidade da distribuição, importância relativa da influência espacial e casual);
- Concede a previsibilidade da variação espacial da variável avaliada.
- Evita a ponderação arbitrária dos pontos amostrados;
- Permite a determinação das melhores estimativas sem tendenciosidade, ou em outras palavras menor variância;
- Permite o estabelecimento de limites de confiança, indicando se os resultados são aceitáveis e se a estratégia de amostragem deve ser modificada;
- Precisão, contornos suaves. Artefatos indesejáveis raras a não ser nas bordas do mapa.
- Interpolador exato, ou seja, os valores estimados para os nós das células são exatamente iguais ao valor amostrado naquela posição.
- Estima além dos limites máximo e mínimo dos valores dos pontos amostrados.
- É capaz de modelar tanto tendências regionais, quanto anomalias locais.
- Calcula variâncias dos pontos estimados (erros), que podem ser utilizadas para:
 1. Quantificar um intervalo de valores para os pontos estimados, definindo estimativas realistas;
 2. Calcular intervalos de confiança para verificar a probabilidade dos valores ocorrerem dentro de um intervalo de unidades de desvio padrão da média.
 Variâncias mapeadas podem indicar locais para adensamento da amostragem

A krigagem, quando proveniente de uma análise estrutural correta, é classificada com a abreviação inglesa *BLUE* (*Best, Linear, Unbiased, Estimate*), ou seja, o melhor estimador linear e não tendencioso (erro residual médio igual a zero). Cressie (1993) denomina a krigagem como sendo sinônimo de estimativa otimizada, como indicativo da qualidade dos resultados obtidos por este método. As características principais deste método de interpolação serão discutidas a seguir.

3.3.2.1 Semivariograma

Uma ferramenta imprescindível à análise geoestatística é o semivariograma, o qual é comumente denominado apenas de variograma.

A função variograma é na realidade a análise das informações estruturais do fenômeno em questão (comportamento espacial) ou, em outras palavras, é a ferramenta que possibilita identificar, qualificar e compreender a variação espacial de determinado fenômeno ou variável, a partir de dados amostrais aparentemente aleatórios e independentes.

Pode-se exemplificar da seguinte forma a função variograma: ao se realizar uma regressão entre duas variáveis, tenta-se estabelecer a correlação entre a variação de uma e outra. Semelhantemente, o variograma é a correlação de uma determinada variável, porém com ela mesma, mas ao longo de um vetor distância. Assim, através da determinação de uma função de correlação espacial, pode-se modelar a variabilidade ou continuidade espacial de um determinado fenômeno. Cressie (1993) apresenta resumidamente um histórico do surgimento e uso dos variogramas.

A função variograma é dada pela equação (12):

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n} \cdot \sum_{i=1}^{n(h)} [z(x_i) - z(x_{i+h})]^2 \quad (12)$$

onde:

$\gamma(h)$: Valor calculado da função variograma;

h : Distância entre pares amostrais;

$z(x_i)$ e $z(x_{i+h})$: Valores da variável em estudo em dois pontos distintos, separados por uma distância preestabelecida e constante em uma direção.

n : número de pares de pontos distanciados de h .

Em linguagem matemática, o variograma é a média quadrática das diferenças entre os valores obtidos em um ponto qualquer $z(x_i)$ e $z(x_{i+h})$, onde h representa o vetor distância entre as amostras. Na definição de Rendu (1981), os valores apresentados no variograma são as diferenças quadradas esperadas entre valores de determinada característica, separadas por uma distância h . Segundo Goovaerts (1997) o variograma mede a dissimilaridade média entre dados separados por uma distância vetorial h .

Sturaro e Landim (1996) definem a função variograma como derivada do momento de inércia. Goovaerts (1997) estabelece que os valores de semivariância são calculados em um gráfico de dispersão em relação à bissetriz do primeiro quadrante, como representa a Figura 24.

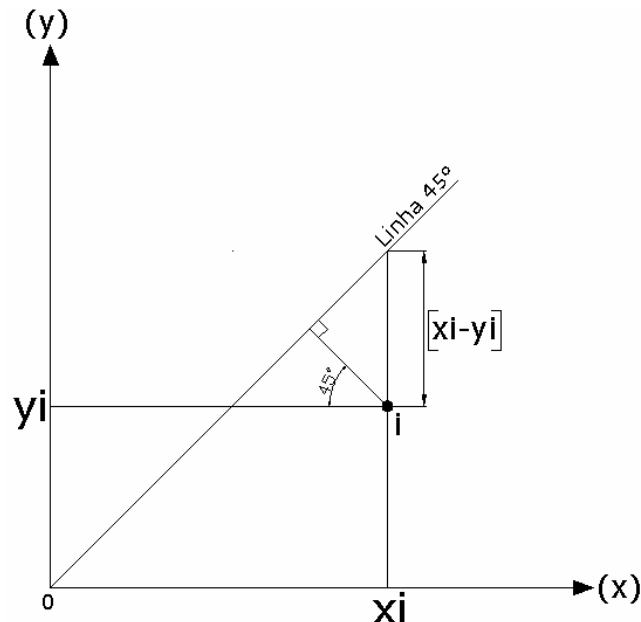


Figura 24 – Representação da distância ortogonal para o cálculo do momento de inércia na determinação dos valores do variograma, modificado de Genovois e Oliveira (2001).

Para aplicação desta ferramenta algumas hipóteses devem ser atendidas, dentre elas a de que a característica em estudo seja uma variável regionalizada. As variáveis regionalizadas são aqueles que estão distribuídas espacialmente e apresentam algum grau de correlação.

As variáveis regionalizadas possuem duplo aspecto contraditório, sendo eles o aleatório e o estrutural. Aleatório porque possui “*um valor numérico a partir de uma determinada lei de distribuição de probabilidades*” (STURARO, 1985), ou seja, a existência de uma determinada irregularidade e variação imprevisíveis de um ponto para outro no espaço, e estrutural por existirem relações entre os pontos no espaço por conta da gênese do fenômeno que gerou/influenciou a variável em estudo.

Através do variograma é possível que os fatores estruturais de determinado fenômeno sejam analisados. É importante também atentar para o fato de que o variograma, de acordo com a equação (12), é a média dos desvios em $z(x_i) + z(x_i + h)$. Assim ele representa também uma estimativa da variância do erro cometido quando se estima $z(x_i + h)$ por $z(x_i)$.

3.3.2.1.1 Parâmetros do variograma

A representação gráfica de um variograma segue o exemplo esquemático da Figura 25.

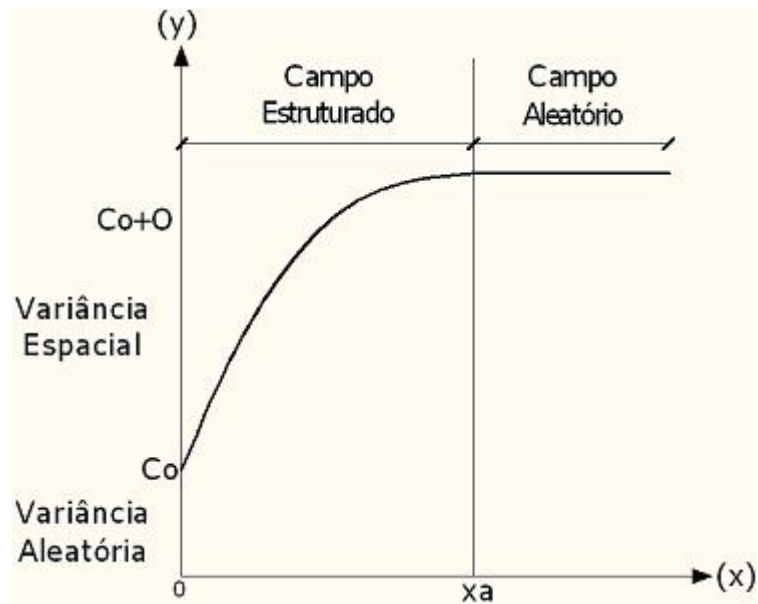


Figura 25 – Exemplo esquemático de um variograma, modificado de Genevois e Oliveira (2001).

Na Figura 25, é possível observar algumas características da maior parte dos variogramas, como a Amplitude (a), também denominada de alcance, o Efeito Pepita (C_0) ou Nugget Effect, e o Patamar ($C + C_0$). Outras características dos variogramas que não estão apresentadas na Figura 25 são o *lag*, a direção a ser variografada, a tolerância angular, o espaçamento de *lags* e a largura de banda. A Figura 26 mostra estes parâmetros e suas relações com os valores calculados de semivariância.

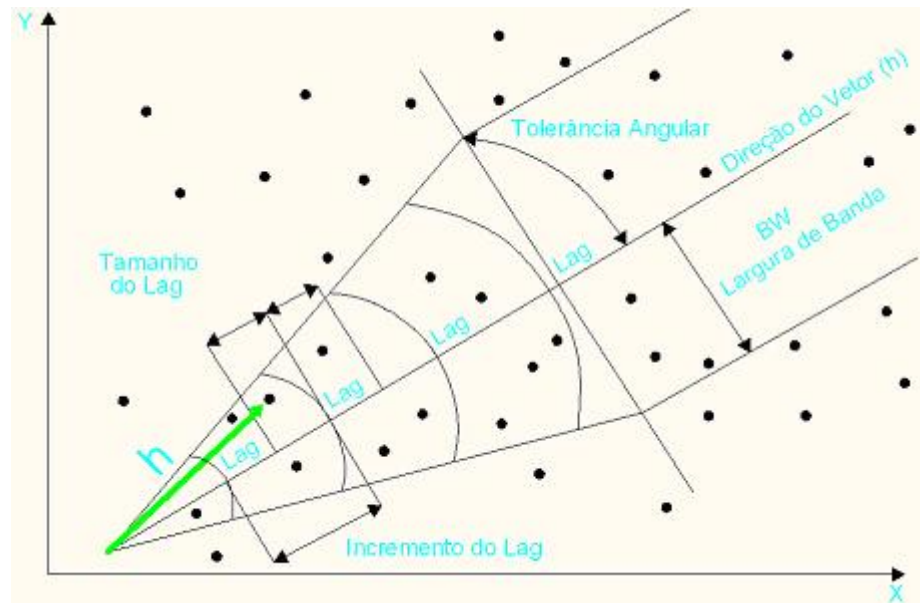


Figura 26 – Parâmetros do variograma, modificado de Deutsch e Journel (1992).

3.3.2.1.1.1 A Amplitude

A amplitude estima a distância para a qual não mais existe correlação entre os pares da variável estudada. O que determina esta distância é a estabilização média dos valores calculados da semivariância $\gamma(h)$. Assim, sempre que o gráfico da equação do variograma tiver inclinação positiva, em relação ao primeiro quadrante, tem-se correlação espacial entre as amostras, também denominada zona de influência.

3.3.2.1.1.2 O Efeito Pepita

O efeito pepita representa basicamente dois aspectos. O primeiro é de que existem regionalizações ou micro-regionalizações menores que a malha de amostragem, presentes na variável em estudo, as quais não puderam ser representadas por conta da pequena discretização existente do campo amostral.

O outro aspecto é de que a existência de valores elevados de efeito pepita é indicação de que a densidade de amostras (número de amostra por área quadrada) deve ser aumentada. Cressie (1993) ressalta que, se a primeira hipótese não é verificada, torna a

segunda obrigatoriamente verdadeira, ou seja, que existem erros na coleta de amostra ou medidas dos parâmetros. Em se tratando de dados provenientes de sondagens de solo, Folle *et al* (2001) exemplificam que o efeito pepita pode ser associado a problemas de heterogeneidade do material, técnica de escavação, equipamento ou procedimento de execução.

No caso de amostras grandemente espaçadas, o efeito pepita pode não representar as informações de microrregionalizações adequadamente. De acordo com Houlding (1994), *apud* Talamini Neto e Celestino (2001), o espaçamento ideal entre as sondagens deve estar entre 1/3 a 1/5 da amplitude variográfica.

3.3.2.1.1.3 Patamar

O Patamar ou $C + C_0$ representa o valor de semivariância máximo alcançado. Sturaro (1993), citando Garcia (1988), classifica a relação entre C_0 e C , denominada de grau de aleatoriedade e representada pela letra E , nas seguintes categorias:

- $E < 0,15$: componente aleatória pequena;
- $0,15 < E < 0,30$: componente aleatória significativa;
- $E > 0,30$: componente aleatória muito significativa.

O aumento dos valores de E significa uma variação da covariância entre os pares amostrais até o limite quando existe puramente o efeito pepita, mostrando a total aleatoriedade dos dados, não tendo sentido a aplicação do krigagem (LANDIM, 2006). Teoricamente, o patamar deve coincidir com a variância da população.

3.3.2.1.1.4 Lag

O *lag* é a faixa de distância incremental para o qual é calculada a relação espacial dos pares amostrais. O valor de *lag* adotado em cada situação é de determinação

empírica, através de tentativa e erro. Exemplos de variação dos variogramas em função do número de *lags* utilizado podem ser encontrados em Anselin (2003).

3.3.2.1.1.5 Lag Spacing

O parâmetro *lag spacing*, ou espaçamento entre *lags*, pode ser calculado de acordo com a sugestão de Landim (2004), ou seja, a metade da maior diagonal da área em estudo, correspondendo, a aproximadamente, metade da maior distância possível entre os pontos. Journel e Huijbregts (1978) apresentam um método empírico semelhante de cálculo do citado parâmetro.

3.3.2.1.1.6 Anisotropia

Por vezes, determinados fenômenos apresentam um comportamento de certa forma uniforme em determinada direção e sentido. Essa tendência de comportamento é denominada de anisotropia. Tem-se adotado a convenção de sinais e direções utilizada nos softwares Variowin (PANNATIER, 1996) e GSLIB[®] (DEUTSCH; JOURNEL, 1992), na qual a direção E – W é denominada 0°, a direção NW é denominada de 45°, a direção N é denominada de 90°, e a direção NE é denominada de 135°.

Em caso do fenômeno em estudo possuir um comportamento anisotrópico em alguma direção, os valores do variograma serão diferentes para cada direção variografada. Portanto, é usual adotar este procedimento para identificar anisotropias estruturais.

Primeiramente pode-se confeccionar a superfície variométrica. Tal ferramenta apresenta os variogramas experimentais em todas as direções (LANDIM, 2004). Um exemplo de superfície variométrica sem anisotropia e com anisotropia, respectivamente, é apresentado na Figura 27.

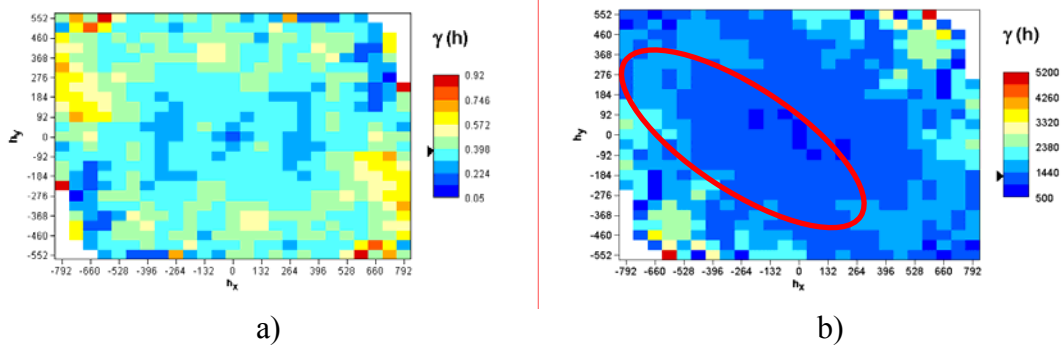


Figura 27 – Superfície variométrica, a) fenômeno isotrópico, b) fenômeno anisotrópico.

Considerando que a escala de cores da Figura 27 representa valores de variância dos variogramas em todas as direções, é possível perceber que na Figura 27-b existe anisotropia em uma das diagonais da superfície variométrica.

A anisotropia pode ser zonal, geométrica e híbrida. A anisotropia zonal é aquela na qual os valores de alcance são os mesmos não importando a direção variografada, porém não apresentando o mesmo patamar. Na anisotropia geométrica acontece o oposto. No caso da anisotropia híbrida tanto o alcance quanto o patamar são distintos para direções diferentes. A Figura 28 apresenta um exemplo de variograma com anisotropia geométrica e outro com anisotropia zonal.

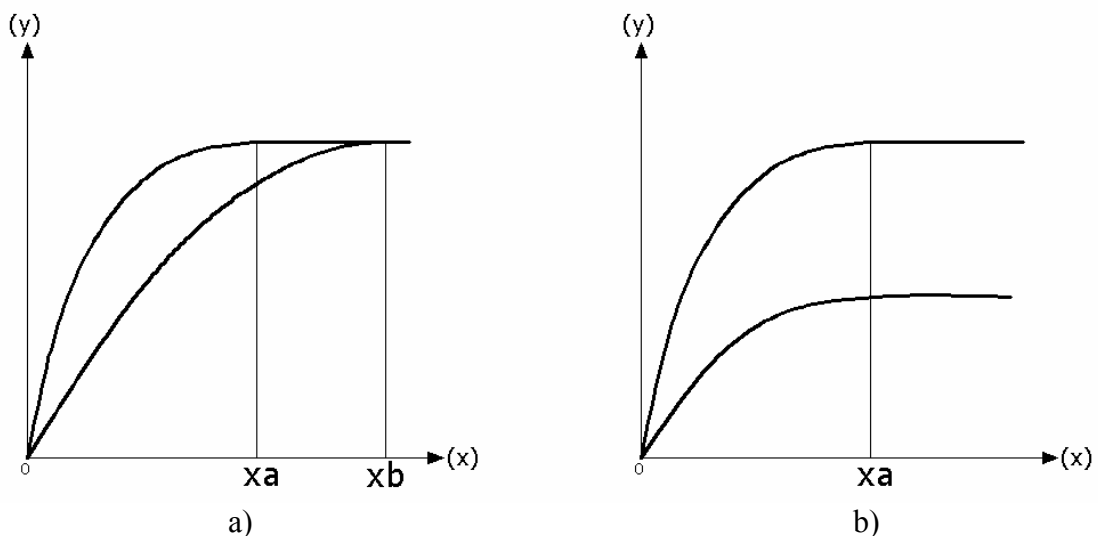


Figura 28 – Exemplo de variograma com anisotropia geométrica (a) e variograma com anisotropia zonal (b).

A anisotropia zonal pode ser reflexo do comportamento de duas populações distintas tomadas como uma só (STURARO, 1993). No caso da existência de anisotropia em qualquer direção, a mesma deve ser considerada no cálculo das estimativas. Isso pode ser modelado por meio de uma elipse de anisotropia, conforme Figura 29, modificada de Talamini Neto e Celestino (2001).

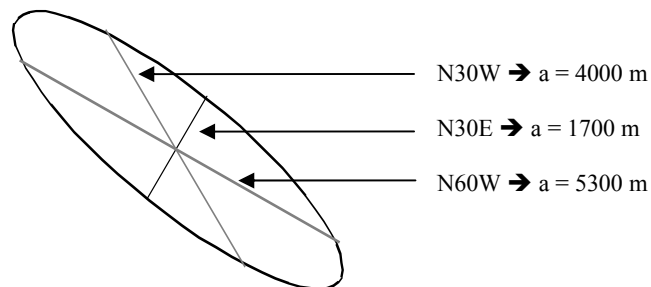


Figura 29 – Exemplo de Elipse de anisotropia, modificada de Talamini Neto e Celestino (2001).

Este processo consiste em confeccionar os variogramas nas direções de menor e maior variabilidade, obtendo-se assim, através dos valores de alcance (anisotropia geométrica) ou patamar (anisotropia zonal), os raios maior e menor da elipse. Este processo se assemelha a uma soma vetorial em duas dimensões, encontrando-se, assim, o vetor resultante com sua orientação e “intensidade”.

Por vezes, os valores de *range* ou *sill* podem, ou não, ser bastante distintos para direções diferentes, ou seja, podem existir graus maiores ou menores de anisotropia. A maneira para se verificar se uma anisotropia da variabilidade deve ser considerada ou não se resume em confeccionar os mapas interpolados para a variável em estudo, nas direções de interesse, e depois superpô-los e a fim de verificar, por meio da localização de curvas de isovalores, as diferenças.

3.3.2.1.1.7 Abertura angular

Novamente recorrendo à Figura 26 (DEUTSCH; JOURNAL, 1992), percebe-se uma abertura angular na consideração da amostras para o cálculo do variograma. Esta abertura é denominada de tolerância angular. Utiliza-se esta ferramenta quando se deseja considerar apenas amostras em determinada direção para o cálculo de correlação espacial. Isto

pode decorrer do fato do pesquisador conhecer ou prever tendências ou relações direcionais que a característica em estudo possua.

3.3.2.1.1.8 Considerações gerais

Após a determinação do modelo experimental do variograma, ajusta-se a ele um modelo teórico. O ajuste de modelos teóricos aos experimentais consiste na adequação de uma equação com parâmetros empíricos. Dentre os modelos teóricos simples mais comuns pode-se encontrar o esférico, o gaussiano, o exponencial e o de potência.

3.3.2.1.2 Modelos Variográficos Teóricos

Os modelos variográficos esférico, gaussiano e de potência são denominados de modelos com patamar, por possuírem tal aspecto.

3.3.2.1.2.1 Modelo esférico

O modelo esférico é representado pelas seguintes equações genéricas:

$$\gamma(h) = s \left(\frac{3}{2} \cdot \frac{|h|}{a} - \frac{1}{2} \cdot \frac{|h|^3}{a^3} \right) \text{ para } |h| \leq a \quad (13)$$

$$\gamma(h) = C \text{ para } |h| > a \quad (14)$$

onde:

C : Patamar

a : Alcance ou amplitude variográfica

O formato aproximado de um modelo esférico é o apresentado na Figura 30.

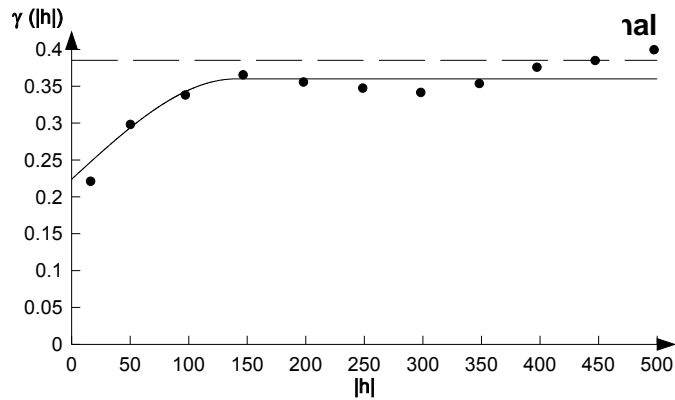


Figura 30 – Exemplo de variograma esférico.

Na origem o comportamento é linear, com inclinação de $1,5 C/a$. Este tipo de variograma teórico representa fenômenos contínuos, mas não diferenciáveis. Segundo Journel e Huijbregts (1978) este é um dos modelos mais utilizados para o caso de características estruturais de fenômenos geológicos. Estes mesmos autores ressaltam que este modelo, em se tratando de variáveis de cunho geológico, normalmente está acompanhado de efeito pepita.

Em termos práticos admite-se que a tangente atinge o patamar a $2/3$ da amplitude variográfica.

3.3.2.1.2.2 Modelo Gaussiano

Um exemplo de modelo gaussiano é apresentado na Figura 31, juntamente com sua respectiva equação de cálculo (15).

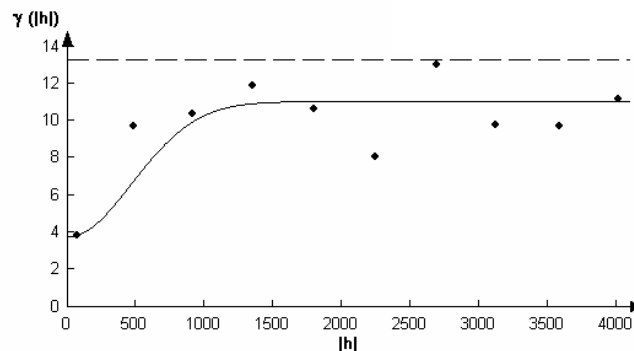


Figura 31 – Exemplo de variograma gaussiano.

$$\gamma(h) = C \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{-h}{a} \right)} \right) \quad (15)$$

Recomenda-se que modelos gaussianos de variograma sejam sempre combinados com o modelo de efeito pepita, com o fito de se evitar instabilidade numérica nos algoritmos de interpolação (GOOVAERTS, 1997).

3.3.2.1.2.3 Modelo Exponencial

A equação (16) define o modelo teórico exponencial de variograma. A Figura 32 retrata um variograma típico exponencial.

$$\gamma(h) = C \cdot \left(1 - e^{\frac{-h}{a}} \right) \quad (16)$$

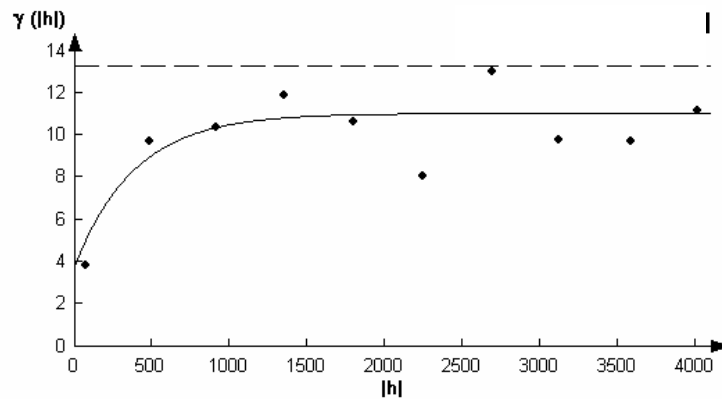


Figura 32 – Exemplo de variograma exponencial.

Neste modelo o patamar é atingido assintoticamente. O mesmo acontece com o modelo gaussiano. Uma regra prática que pode ser utilizada para determinar a distância para qual alguns modelos atingem o patamar é a seguinte (JOURNEL; HUIJBREGTS, 1978)

- Modelos exponenciais e gaussianos: a 1/3 do patamar.
- Modelos esféricos: a 2/3 do patamar.

3.3.2.1.2.4 Modelo de Potência

O modelo de Potência, nome genérico para denominar os variogramas sem patamar, são aqueles nos quais a variabilidade espacial aumenta constantemente à medida que a distância é incrementada. A equação que descreve este modelo se encontra em (17):

$$\gamma(h) = \alpha \cdot h^\theta \quad (17)$$

onde $0 \leq \alpha \leq 2$ e θ é a inclinação da curva. A Figura 33 apresenta exemplos genéricos deste tipo de variograma.

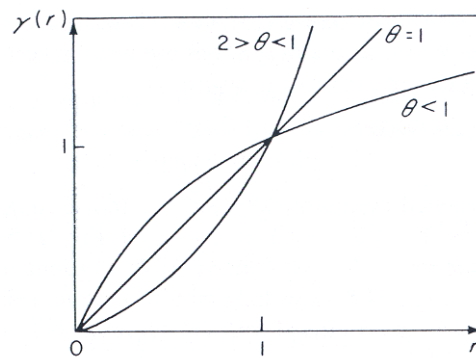


Figura 33 – Exemplo de variograma de potência, Journel e Huijbregts (1978).

Na prática, somente os modelos de potência com $\theta=1$ (ou seja, lineares) são utilizados.

Além dos modelos teóricos aqui apresentados, existem ainda os modelos denominados aninhados. Estes são modelos que reúnem mais de um tipo de modelo variográfico, por exemplo, um variograma combinado entre dois modelos esféricos. Para um estudo mais detalhado a respeito dos modelos aninhados pode-se consultar Cressie (1993) e Journel e Huijbregts (1978).

3.3.2.1.3 Ajuste do Variograma experimental ao teórico

O ajuste do variograma teórico ao variograma experimental pode ser de dois tipos, a saber: ajuste visual e ajuste matemático. Dentre os critérios de ajuste matemático pode-se citar o Método dos Mínimos Quadrados, Critério de Cressie e Critério de Pannatier (1996), sendo este último o utilizado pelo software Variowin. Os métodos dos Mínimos Quadrados e o de Cressie, assim como outros métodos de ajustes, podem ser encontrados em Rosa (2003).

O critério de Pannatier (software Variowin) é simples e largamente utilizado. Ele baseia-se no Grau de Ajuste Indicativo ou *Indicative Goodness of fit* (IGF). Este critério de ajuste é calculado com a seguinte equação (18):

$$IGF = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \sum_{i=0}^{n(K)} \frac{P(i)}{\sum_{j=0}^{n(K)} P(j)} \cdot \frac{D(K)}{d(i)} \cdot \left[\frac{\gamma(i) - \gamma^*(i)}{\sigma^2} \right]^2 \quad (18)$$

onde:

N : Número de variogramas direcionais;

$n(K)$: Número de *lags* relativos ao variograma K ;

$D(K)$: Distância máxima relativa ao variograma K ;

$P(i)$: Número de pares para *lag* i do variograma K ;

$d(i)$: Distância média dos pares para *lag* i do variograma K ;

$\gamma(i)$: Medida experimental da continuidade espacial para o *lag* i ;

$\gamma^*(i)$: Medida modelada da continuidade espacial para $d(i)$;

σ^2 : (co) variância dos dados para o variograma (cruzado).

Ao se analisar a equação (18), percebe-se algumas particularidades da mesma. No último termo, por exemplo, quanto mais próximo está o variograma teórico do experimental, mais próximo de zero será o resultado do numerador. Consequentemente, ao se dividir este valor próximo de zero pela covariância e elevar este valor ao quadrado, menor será o valor encontrado. Assim, quanto mais próximo de 0 for o valor do *IGF*, melhor é o ajuste do modelo teórico ao modelo experimental.

Landim (2004) ressalta que o *IGF* é apenas um parâmetro de referência, sendo de uso bem mais qualitativo do que quantitativo. Não existem valores de corte de *IGF* dos quais possa se dizer que abaixo dele tem-se um bom ajuste. Assim, na melhor das hipóteses o *IGF* pode somente ser utilizado em duas situações:

1. Comparar o ajuste de variogramas teóricos diferente ao mesmo variograma experimental.
2. Comparar o ajuste de um mesmo variograma teórico ao se variar os valores de *sill*, *range*, etc.

Ainda de acordo com Landim (2004) nenhum dos métodos de ajuste deve ser utilizado indistintamente, sendo que os resultados apresentados pelos métodos numéricos devem ser confrontados com o ajuste visual. Journel & Huijbregts (1978) apontam a mesma preocupação.

3.3.2.1.4 Verificação da Validade do Variograma (Teste da Validação Cruzada)

Após a confecção dos variogramas, é necessário verificar a validade dos mesmos em se representar as características estruturais dos dados amostrais. O método geralmente adotado é denominado de validação cruzada. O método, segundo Cressie (1993), consiste dos seguintes passos:

1. Remove-se um dado do conjunto de dados amostrais;
2. Utiliza-se um estimador e função ponderada relacionada com a distância;
3. Estima-se o valor retirado utilizando as amostras remanescentes;
4. Calcula-se o erro, que é a somatória das diferenças entre os valores reais e valores estimados.

3.3.2.1.5 Análise estrutural

3.3.2.1.5.1 Comportamento próximo à origem

Segundo Journel e Huijbregts (1978) existem basicamente 4 tipos de comportamento possíveis de uma função variograma próxima à origem do gráfico, que estão apresentados na Figura 34.

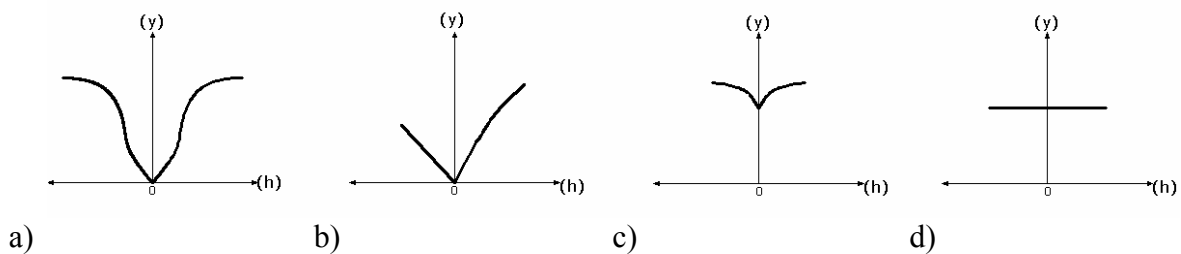


Figura 34 – Exemplos de comportamento próximo à origem em variogramas, modificado de Journel e Huijbregts (1978).

Os variogramas com comportamento parabólico próximo à origem (a) representam os fenômenos com alta regularidade espacial. Os de comportamento linear se encontram em (b). Os variogramas teóricos mais comuns para se modelar variogramas experimentais são os com descontinuidade na origem – Nugget Effect ou efeito pepita (c). O exemplo (d) representa um variograma sem relação espacial entre as amostras (efeito pepita puro).

Um detalhe importante a ser ressaltado é que os pontos utilizados no cálculo do valor da variância próximo à origem do variograma estão fisicamente mais próximos e conseqüentemente apresentam maior similaridade da variável em estudo. O comportamento parabólico do variograma próximo à origem deve ser adotado somente para analisar estruturalmente fenômenos que se sabem ser altamente contínuos (GOOVAERTS, 1997).

3.3.2.2 Krigagem

Os métodos de interpolação denominados de krigagem têm sido amplamente utilizados tendo em vista a grande qualidade dos resultados que eles apresentam. Dentre os vários interpoladores variantes da krigagem (krigagem ordinária, co-krigagem, krigagem por indicação e outros), o que será abordado nesta revisão de literatura é a krigagem ordinária.

A krigagem é basicamente probabilística. Dentre os métodos de interpolação existe uma grande divisão: (a) os determinísticos, e (b) os probabilísticos. Os primeiros, como sugere o nome, são modelos matemáticos de fenômenos naturais onde se conhecem todas as variáveis e seu comportamento. Assim, seus resultados são exatos. Os probabilísticos são aqueles métodos desenvolvidos em especial para modelar fenômenos onde não se possui total conhecimento das variáveis envolvidas nem de seus comportamentos. Nos métodos probabilísticos o comportamento da variável é tido como aleatório. A krigagem se encontra classificada entre os métodos probabilísticos, nos quais, além dos valores estimados das variáveis em questão, também se estima o erro associado à variável estimada.

3.3.2.2.1 Fundamentação e Desenvolvimento Matemático do Método de Krigagem Ordinária

O erro cometido na estimativa de um ponto estimado no espaço é dado por:

$$r = \hat{V}_i - V_i \quad (19)$$

onde:

r : Erro cometido na estimativa;

\hat{V}_i : Valor estimado;

V_i Valor real;

Após uma série de estimavas (N), ter-se-á o erro médio segundo a equação (20):

$$\bar{r} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\hat{V}_i - V_i}{N} \right) \quad (20)$$

onde:

\bar{r} : Erro médio cometido na estimativa;

N : Número total de estimativas;

Fato importante a ser destacado é que o valor real (V_i) não é conhecido. Isto se soluciona através do uso de um modelo probabilístico no qual os valores estimados são provenientes de um processo aleatório estacionário. Considera-se também que o valor médio é constante para todas as localizações espaciais e que é variável aleatória da mesma população. Com todas estas considerações, torna-se importante somente a distância que separa uma e outra amostra e não necessariamente sua localização no espaço, ou seja, o valor numérico de suas coordenadas.

Em relação à variância do erro calculado tem-se (21):

$$Var\{r(x_o)\} = Cov\{\hat{V}(x_o)\hat{V}(x_o)\} - 2Cov\{\hat{V}(x_o)V(x_o)\} - Cov\{V(x_o)V(x_o)\} \quad (21)$$

onde:

$Var\{r(x_o)\}$: Variância do erro calculado;

$Cov\{ \}$: Covariância.

A equação (21) representa o cálculo da relação espacial entre o valor real e o valor estimado. O primeiro termo é a covariância do valor estimado com ele mesmo. O segundo termo é a dupla subtração da covariância entre o valor real e o valor estimado. Finalmente, o terceiro termo é a subtração da covariância do valor real com ele mesmo.

Durante o processo de interpolação, a krigagem ordinária tem como característica a atribuição de pesos às amostras. As amostras que estão mais próximas do ponto a ser estimado terão maior peso e, a medida que a distância aumenta, o peso ou influencia diminui. Tal é feito através da determinação de uma matriz de covariância espacial, nas quais são determinados os pesos atribuídos às diferentes amostras. Um exemplo genérico da matriz de covariância se encontra na equação (22):

$$\begin{bmatrix} C_{11} & \dots & C_{1n} & 1 \\ \cdot & \dots & \cdot & \cdot \\ C_{n1} & \dots & C_{nn} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} w_1 \\ \cdot \\ w_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{10} \\ \cdot \\ C_{no} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (22)$$

A krigagem é um método de interpolação que pode ser utilizado tanto em amostras regular quanto irregularmente espaçadas (GOLDEN SOFTWARE, 2002).

3.4 O SOLO E O SUBSOLO

3.4.1 Processo de Formação do Solo

Os solos são provenientes da interação de processos intempéricos atuantes, sobre um dado substrato rochoso, e de processos pedogenéticos que atuam após e/ou conjuntamente com os intempéricos.

Os processos pedogenéticos podem ser definidos como os processos no qual a camada mais superficial de solo sofre adição, perda, transformação e transporte de material. Os principais processos pedogenéticos são os de eluviação (perda) e iluviação (adição), lixiviação (remoção de sais solúveis), e a podzolização (concentração de sílica) e laterização (concentração de ferro) (VAZ, 1996).

O intemperismo depende do clima, agentes biológicos (animais e vegetais), rocha matriz, relevo e do tempo de exposição da rocha à ação destes elementos. Segundo Vaz (2003), o clima define principalmente a espessura e o número de horizontes, ou camadas, do solo residual (não transportado). Após a formação de uma rocha, atuam sobre ela três tipos de intemperismos, a saber: intemperismo químico, físico e biológico.

Dentre os agentes do intemperismo químico pode-se identificar a hidratação/hidrólise, a oxidação/redução, a troca iônica e carbonatação. Em climas tropicais este é o tipo de intemperismo mais intenso, isto por causa das altas amplitudes térmicas e umidade, elementos essenciais para a aceleração das reações químicas.

Entre os agentes do intemperismo físico temos as variações de temperatura, vento, erosão, pH da água, tensões tectônicas, etc.

Agentes intempéricos biológicos são os animais e microorganismos capazes, de alguma forma, de desintegrar a rocha.

3.4.2 Laterização

A laterização é o fenômeno de concentração de moléculas contendo ferro no solo. Pinto (1998) caracteriza os solos lateríticos como sendo “*típicos da evolução de solos em clima quente, com regime de chuvas moderadas a intensas*”. Estes solos são encontrados na natureza geralmente na condição não-saturada. Segundo Vargas (1993), *apud* Kertzman e Diniz (1995), os solos lateríticos são normalmente argilosos, de coloração escura, vermelho-amarelo (isto em decorrência da presença de ferro e sua oxidação), relativamente homogêneos e não apresentando minerais ou estrutura da rocha matriz. Solos laterizados possuem em geral modificações em sua microestrutura, bem como o surgimento de cimentações entre suas partículas, fenômenos estes oriundos de processos intempéricos.

Segundo Kertzman e Diniz (1995) a lixiviação é o mecanismo mais significativo de laterização. Este mecanismo consiste na modificação da composição química do solo pela ação da passagem de água por meio dele, capaz de remover sais solúveis do solo.

A lixiviação pode se dar tanto através de movimentos de água verticais de cima para baixo (infiltração de águas de chuva com pH ácido, por exemplo), como de baixo para cima (ascensão do nível freático). No primeiro caso ocorre a remoção de óxidos de ferro e alumínio do solo, e no segundo caso pode ocorrer a solução e remoção de bases, seguindo-se o transporte de ferro e óxidos de alumínio por capilaridade das águas subterrâneas.

Os solos lateríticos correspondem sempre à porção superficial de um solo, que geologicamente também é denominado de solo eluvial, que segundo Vaz (2003) recebe este nome devido a perda de material.

Segundo Cozzolino e Nogami (1993), os solos lateríticos são bem drenados, apresentando elevado volume de vazios, baixa massa específica aparente e elevada permeabilidade, devido à estrutura macroporosa e microagregada. Nesta estrutura microagregada as argilas e óxidos se organizam em esferas de 0,1 mm de diâmetro, comportando-se na prática como areias. Tal mascaramento pode ser observado no elevado valor do coeficiente de permeabilidade, se comparado com outras argilas não lateríticas, e na modificação das curvas granulométricas (KERTZMAN; DINIZ, 1995). Uma característica

das argilas lateríticas, conforme citado por Décourt (2002), é o fato de elas apresentarem propriedades de rigidez muito superiores às demais argilas não lateríticas, mesmo quando estas possuem características geomecânicas semelhantes, avaliadas em ensaios de campo (mesma resistência à penetração N_{SPT}). Tal fato é comprovado por Décourt (2002), Miguel & Belincanta (2004), Miguel *et al* (2005) e outros.

Um aspecto importante a se ressaltar é que as classificações geotécnicas que consideram o caráter dos solos tropicais, têm mostrado eficiente aplicação para a cartografia geotécnica, colapsos, erosão e contaminação dos solos (KERTZMAN; DINIZ, 1995).

As características dos solos lateríticos citadas anteriormente como estrutura porosa, existência de agente cimentante e condição não-saturada, geralmente dão origem a um outro fenômeno denominado de colapso. O colapso consiste na redução brusca do índice de vazios do solo quando do aumento do teor de umidade do mesmo, sem alcançar entretanto a saturação. Em outras palavras, o solo colapsível apresenta uma estrutura instável, porém com uma rigidez temporária mantida pela tensão de sucção e/ou cimentação (CINTRA, 1998).

3.4.3 Fatores que Proporcionam Rigidez Temporária às Argilas Lateríticas

Na estrutura das argilas lateríticas existem forças que proporcionam rigidez extra como a tensão de sucção e os agentes cimentantes.

A tensão de sucção matricial está ligada à existência de ar e água (intersticial) entre as partículas de argila. A água, em sua superfície, quando em contato com o ar, se comporta como se fosse uma membrana. Assim surge um fenômeno conhecido na superfície da água denominado de tensão superficial. Em virtude desta tensão, a superfície de contato entre a água e o ar apresenta uma curvatura, já que os vazios do solo se comportam como vasos capilares. Esta curvatura caracteriza a diferença de pressão nos dois fluidos (água e ar). Esta diferença de pressão é denominada de tensão de sucção matricial (PINTO, 1998).

Segundo Cintra *et al.* (2003) os valores de N_{SPT} obtidos em sondagens realizadas em solos colapsíveis são afetados pela sucção matricial (ou teor de umidade). Estas grandezas são inversamente proporcionais, sendo que quanto menor o valor do teor de umidade do solo, maior será a tensão de sucção matricial e conseqüentemente a rigidez apresentada pelo solo. Isto quer dizer que os valores de N_{SPT} obtidos em um determinado

ponto em época chuvosa, serão maiores se a sondagem for realizada novamente, no mesmo ponto, mas em época de estiagem.

3.4.4 Métodos de Classificação

Devido à dificuldade de se enquadrar o comportamento de alguns tipos de solos encontrados em regiões tropicais, nas classificações clássicas internacionais, como a HRB (AASHTO) e a Unificada, de Casagrande, que em muitos casos foram feitas a partir de solos que estão em áreas em que os processos intempéricos não são tão intensos, surgiu então o termo “solo tropical” e sistemas de classificação especiais para este tipo de solo. O termo solo tropical não significa que este solo se encontra entre os trópicos, mas sim que possui algum comportamento particular quando utilizado como material de engenharia. Cozzolino e Nogami (1993) relatam que as principais peculiaridades dos solos tropicais que influenciam na não-eficiência da maioria dos sistemas de classificação, são:

- Agregação dos finos nos solos lateríticos;
- Natureza físico-química da fração argila;
- Influência dos macrocristais das micas e da caulinita nos solos saprolíticos;
- Natureza porosa e fragmentável dos grãos de silte e areia dos solos saprolíticos.

Exemplo de como a natureza química da fração argila pode ser determinante no comportamento geomecânico é apontada por Pinto (1998), que relata a diferença que pode haver no comportamento de solos argilosos com argilo-minerais distintos, em relação à presença maior ou menor de água no solo, como por exemplo, em termos de transmissão de carga entre partículas do solo, expansão, retração e outros.

3.4.1.1 Classificação dos Solos

Existem algumas maneiras e métodos de classificação de um solo segundo suas características geotécnicas. Alguns métodos levam em conta resultados de ensaios em laboratório ou de ensaios de campo.

3.4.4.1.1 Classificação Visual Táctil

Durante a execução do ensaio SPT, ao se coletar as amostras deformados do solo do amostrador-padrão, geralmente procede-se uma caracterização “visual-táctil”.

Bortolucci (1983) chama a atenção para o fato de que duas amostras de solo com classificação visual-táctil idênticas podem possuir comportamentos geomecânicos diferentes, em virtude de sua distinta origem geológica. Portanto é desejável que juntamente com a classificação visual-táctil exista também uma indicação da origem geológica do depósito estudado, constando ao menos a Formação e o Grupo.

3.4.4.2 Classificação Geológica

3.4.4.2.1 Classificação de Solos Residuais

Muitas são as maneiras e métodos de classificação geológica de maciços de solo e/ou rocha. Vaz (2003) apresenta um método de classificação, Figura 35.

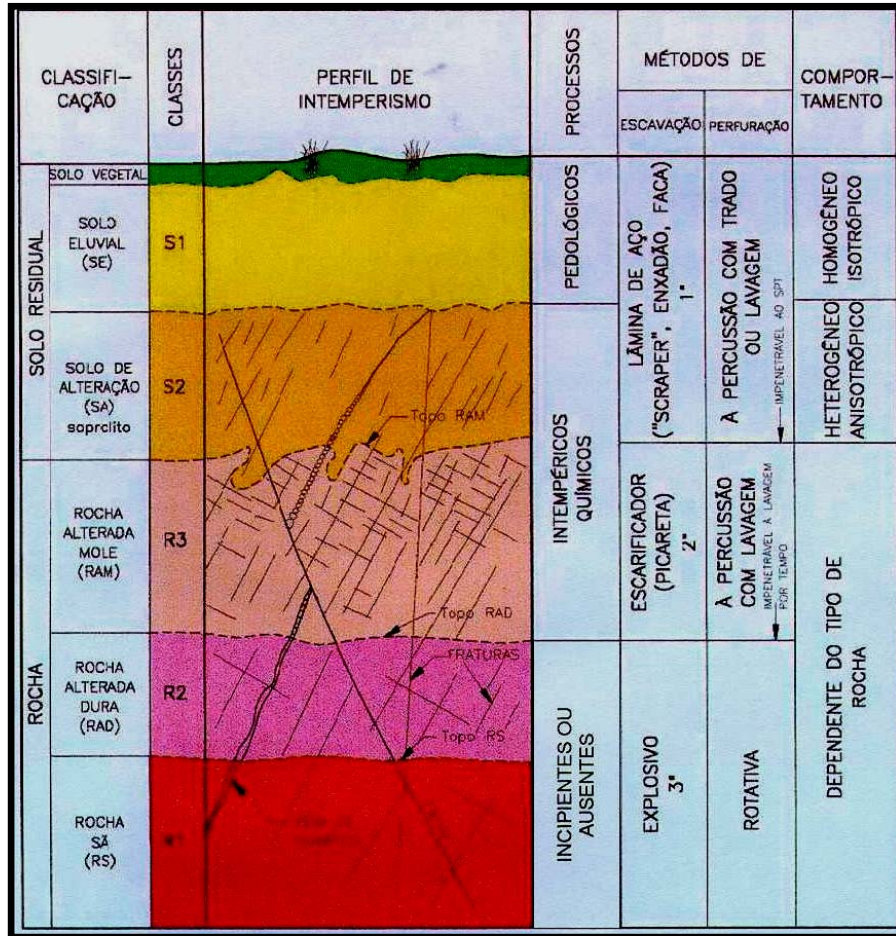


Figura 35 – Método esquemático de classificação geológica para solos residuais proposta por Vaz (2003).

O método propõe a princípio a divisão entre solo residual e rocha, que pode ser feita através da determinação da profundidade do “impenetrável” do SPT (cravação de menos de cinco centímetros do barrilete com dez golpes consecutivos ou cinquenta golpes num mesmo ensaio, NBR 6.484/2001), sendo que a partir deste ponto o material é considerado como rocha, em estágios diferentes de intemperismo.

Dentre o solo residual existem três subdivisões, a saber, solo vegetal, solo eluvial e solo de alteração. O solo vegetal corresponde aos primeiros dois centímetros a dez centímetros, sendo esta camada rica em matéria orgânica.

O solo eluvial corresponde à camada de solo que se inicia após o solo vegetal indo até o solo alterado ou alteração de rocha. Possui como características a homogeneidade em relação a cor, granulometria, composição mineralógica, ausência total da textura e das estruturas da rocha matriz. Possui também um comportamento isotrópico (VAZ, 2003).

Como característica principal, o solo alterado possui partes da rocha-mater em decomposição misturados ao solo. Esta camada do solo também é chamada de saprolito ou solo residual jovem. Ela é bastante heterogênea em relação à cor, textura e composição mineralógica. Nela é possível observar características da rocha-mater tais como xistosidade, estratificação, fraturas, falhas, dobras e contatos.

Como visto anteriormente, a divisão entre solo residual e rocha está abaixo da profundidade “impenetrável” do SPT (cravação de menos de cinco centímetros do amostrador-padrão com dez golpes consecutivos ou cinquenta golpes num mesmo ensaio). As condições hidrogeológicas e a presença de estruturas (fraturas, falhas, contatos, etc) são os fatores que governam as características dos maciços rochosos.

Três são as divisões dentre os horizontes de rocha, sendo elas: rocha alterada mole, rocha alterada dura e rocha sã.

As rochas alteradas moles correspondem ao material perfurado pelo processo de circulação de água nas sondagens de simples reconhecimento com SPT. Como características possuem minerais fortemente alterados e variegados.

O topo das rochas alteradas duras é identificado nas sondagens de simples reconhecimento com SPT como o ponto impenetrável à lavagem por tempo (três ciclos consecutivos de dez minutos com penetração inferior a cinco cm em cada um, NBR 6.484/2001). Abaixo desta camada encontra-se a rocha sã.

Detalhe importante a ser ressaltado é que a mudança entre uma camada e outra nem sempre é clara e imediata, sendo mais comum a existência de camadas de transição entre os extratos.

3.4.4.2.1.1 Classificação de Solos Transportados

Os solos transportados são caracterizados por serem de origem mineralógica diferente da rocha do substrato sobre o qual ele se encontra.

Vários são os modos de transporte dos solos, como por exemplo o vento, a água, o gelo e a gravidade.

Dentre os solos transportados podemos classificá-los em aluviões, terraços fluviais, coluviões, tálus, sedimentos marinhos e solos eólicos. A seguir serão apresentadas as principais características de cada tipo de solo transportado, de acordo com Vaz (2003).

Os aluviões são solos erodidos e transportados pelos cursos d'água e depositados nos seus leitos e margens. Os principais fatores intervenientes na produção de aluviões são o material fonte e a capacidade de transporte do curso d'água. Geralmente os aluviões apresentam estratificação, por conta das diferentes camadas depositadas sobre o leito do curso d'água. Apesar das camadas serem homogêneas em termos de textura, cor, etc., o estrato total do aluvião geralmente é heterogêneo. Outra característica marcante dos aluviões é de estarem quase sempre em condições saturadas.

Os terraços fluviais são aluviões antigos, depositados quando o nível de base do curso d'água se encontrava numa posição mais elevada do que a atual. Conseqüentemente os terraços obrigatoriamente se localizam em cotas mais altas que os aluviões. Quase sempre os terraços fluviais estão em condição não saturada e são compostos por areias e cascalhos.

Os coluviões são os solos transportados principalmente pela ação da gravidade e que se encontram usualmente no sopé das encostas. O tálus possui as mesmas características do coluviões quanto ao local de depósito e maneira de transporte, porém ao invés de ser composto apenas por solo, é composto por solo e blocos ou somente blocos de rochas.

Os sedimentos marinhos são produzidos em ambientes de praias e manguezais. Como exemplos neste grupo apontam-se as argilas orgânicas marinhas e os manguezais. O transporte de sedimentos se dá através da maré, que na praia deposita areias limpas finas quartzozas, e nos mangues deposita partículas finas (argilas).

Os solos eólicos são constituídos de areia fina, quartzosa, bem arredondada, o que mostra que durante o transporte destas partículas, elas sofrem atritos e impactos, que tornam os grãos arredondados ao invés de angulares. No Brasil a ocorrência deste tipo de solo é apenas junto na região litorânea, principalmente na região Nordeste.

3.4.4.2.1.2 Classificação Pedológica de Solos Residuais

A pedologia é a ciência que estuda e classifica o solo baseado nas características físicas e químicas do solo. Para a pedologia o perfil de solo é dividido em camadas, ou horizontes, mais ou menos paralelos à superfície topográfica. Atualmente a principal literatura de referência para os solos brasileiros é Embrapa (1999).

Neste tipo de classificação, a camada que confere as principais características ao solo para sua classificação está, aproximadamente, entre 0,10 m e 2,0 m. Esta camada é denominada de Horizonte B. Este horizonte é caracterizado, geralmente, por baixo teor de matéria orgânica e forte expressão de cor e estrutura. Sua espessura varia de acordo com a intensidade dos processos intempéricos/pedogenéticos que o solo/rocha sofreram.

A classificação pedológica é baseada nas características do Horizonte B, com exceção dos solos que não apresentam este horizonte. Algumas das características observadas neste horizonte para sua classificação é a presença de alumínio, ferro, e coloração.

A mineralogia e textura da rocha a que deu origem o solo, bem como as amplitudes térmicas, a pluviosidade, organismos vivos, processos erosivos, e a percolação e infiltração de água são fatores intervenientes no desenvolvimento das características analisadas pela pedologia em um solo.

Alguns exemplos de classes pedológicas são apresentados a seguir. Um grupo, por exemplo, é denominada de latossolo, que por sua vez possui diversas classes, como por exemplo os latossolos amarelos ou vermelhos. Os vermelhos são provenientes de rochas máficas (não-ácidas, ou seja, com teor de sílica menor do que 65%, Mineropar, 2006). Um latossolo possui como características principais sua grande espessura, teores de Fe_2O_3 , sua coloração e grande volume de poros (CORREA *et al*, 2003).

Outra classe é denominada como nitossolos. Estes possuem como principais características, estrutura bem desenvolvida, origem a partir de rochas básicas, intermediárias, alcalinas ou máficas. Este é um tipo de solo comum na região sul do Brasil (CORREA *et al*, 2003)..

Como sugere o nome, os neossolos litólicos, são solos jovens com horizontes de solo delgados. Geralmente algumas das características da rocha de origem ainda são marcantes no solo. De acordo com Correa *et al* (2003), este tipo de solo ocorre geralmente em locais com topografia acidentada, e por conta deste fator são solos que estão sendo constantemente removidos, por processos erosivos.

3.5 MAPEAMENTO DE ATRIBUTOS GEOTÉCNICOS

Pelo fato do Brasil urbano ser, na maior parte das vezes, fruto de um crescimento desordenado e não planejado, muitas áreas nos centros urbanos foram ocupadas e exploradas de maneira incorreta, por conta das potencialidades ou mesmo das limitações que o solo e subsolo impuseram, sejam elas geomecânicas ou ambientais.

Como ferramenta do planejamento urbano, dentro da Geologia de Engenharia, surge a cartografia geotécnica ou mapeamento geotécnico, que visa a indicação através de cartas ou mapas, orientar o melhor uso do solo tanto em termos de construção de edificações, obras subterrâneas, e avaliação de impactos ambientais, como também a indicação de áreas passíveis de riscos geológicos. IAEG (1976), apud Kertzman e Diniz (1995) publicou a seguinte definição de mapeamento geotécnico:

“O mapa geotécnico é um tipo de mapa geológico, o qual oferece uma representação generalizada de todos os componentes do ambiente geológico de significado no planejamento e uso da terra, em projetos, construção e manutenção aplicados a obras civis e engenharia de mina”.

Prandini *et al* (1995) cita que as cartas geotécnicas são a “*expressão prática do conhecimento geológico aplicado ao enfrentamento dos problemas postos pelo uso e ocupação do solo*”. O mapeamento geotécnico é composto de mapas geológicos (substrato e materiais inconsolidados), hidrogeológico, documentação, divisão geotécnica, e bancos de dados.

Thomas (1970), apud Souza (1992), considera o mapeamento geotécnico como um processo de análise dos componentes do meio físico, que tem como finalidade básica levantar, avaliar e analisar os atributos que compõe o meio físico, em termos geológicos, hidrogeológicos e outros.

3.5.1 O Mapeamento

As cartas geológico-geotécnicas podem conter informações geomecânicas como níveis de resistência média a penetração do amostrador-padrão do SPT-T (*Standard Penetration Test - with Torque Measurement*), indicação de áreas sujeitas a subsidências ou colapsos do solo, e ainda classificações geológica e geotécnica do solo e do subsolo. Souza (1992) inclui no mapeamento geotécnico classificação, análise e avaliação dos componentes do meio físico, através da representação de informações sobre as propriedades do relevo, dos materiais inconsolidados, das rochas, das águas e dos fenômenos que neles ocorrem. Matula (1978), *apud* Zuquette (1985), considera que as características mais importantes do mapeamento geotécnico são as estimativas do potencial de uso das diversas unidades, a avaliação das áreas para uso específico e decisão da melhor forma de construir.

Souza (1995), *apud* Romão e Souza (2003), afirma que a cartografia geotécnica ao analisar as informações sobre os condicionantes do meio físico à ocupação, advindas principalmente da interação entre as características geológicas, geomorfológicas, informações superficiais, hidrogeológicas, climáticas e do uso atual da terra, associada à investigação de campo, de laboratório e o geoprocessamento (este último utilizado para o armazenamento e tratamento dos dados de investigação) torna-a um instrumental tecnológico básico na determinação de diretrizes para o planejamento urbano. Segundo Souza (1992) o mapeamento geotécnico é essencial a para o planejamento de uso e ocupação do solo, respeitando suas limitações e otimizando suas potencialidades.

3.5.2 Metodologia de Obtenção dos Mapas Geotécnicos

A metodologia de execução das Cartas de Atributos Geológico-Geotécnicos segue, em geral, de acordo com Souza (1992), o seguinte padrão:

- 1) Formulação de uma hipótese ou modelo inicial orientativo: identificação objetiva dos recursos e problemas existentes ou esperados, mediante conhecimento do uso e ocupação do solo, comportamentos geológicos, geomorfológicos e geotécnicos levantados através de sondagens;

- 2) Análise fenomenológica e de desempenho: análise e identificação das causas e mecanismos de ativação dos fenômenos estudados;
- 3) Mapeamento e compartimentação: coleta de dados e seu tratamento, podendo ser feito através de bibliografia, sensoriamento remoto, etc;
- 4) Representação: apresentação dos resultados de modo claro e objetivo, de modo a fornecer subsídios aos possíveis interessados;
- 5) Retro alimentação do modelo ou banco de dados: atualização constante dos dados utilizados na realização do estudo, de modo a tornar o modelo mais preciso e detalhado.

Grant (1965), *apud* Moreira (1994), recomenda que as informações geológico-geotécnicas devam ser apresentadas em mapas. O teor de quantidade de detalhes apresentados neste tipo de mapa depende do propósito e da escala utilizada.

Moreira (1994) apresenta uma extensa lista de trabalhos de mapeamentos geológico-geotécnicos descrevendo os objetivos do mapeamento, as formas de recuperação, os atributos mapeados, as técnicas utilizadas, a região do mapeamento, o equipamento de informática utilizado e o sistema de coordenadas utilizado. Este autor também discute a necessidade de um banco de dados organizado, de modo a facilitar e agilizar a recuperação dos dados obtidos em campo.

4 O SOLO E O SUBSOLO DA REGIÃO DE LONDRINA/PR

A cidade de Londrina/Pr localiza-se na região norte do estado do Paraná, entre as latitudes sul 23° 08' 47" e 23° 55' 46", e as longitudes oeste 50° 52' 23" e 51° 19' 11" aproximadamente, ou no sistema de coordenadas planas métricas UTM, X1: 512.995 , Y1: 7.440.260, X2: 467.462 e Y2: 7.353.538. A Figura 36 mostra esquematicamente a localização do município de Londrina dentro do estado do Paraná, e o Paraná dentro do Brasil.

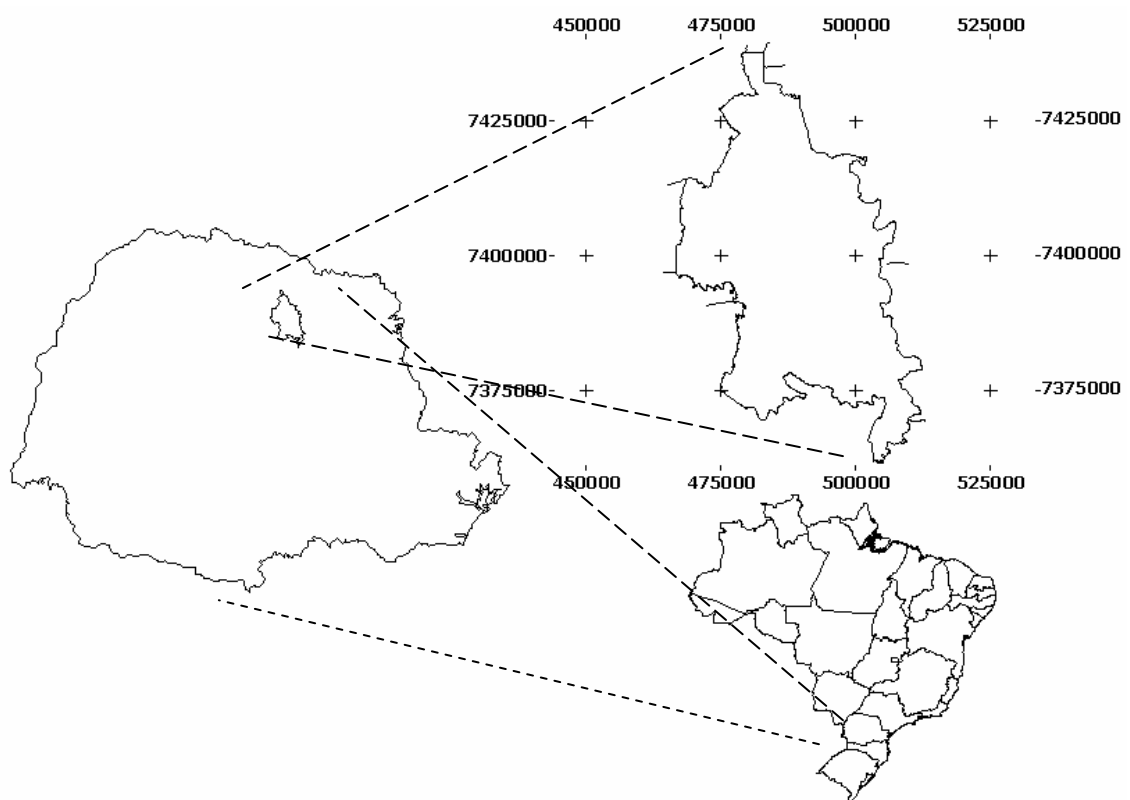


Figura 36 – Localização de Londrina dentro do estado do Paraná, e deste dentro do País.

Fonte: INPE (2005).

4.1 FATORES INTERVENIENTES NA FORMAÇÃO DOS SOLOS – CLIMA

Londrina se encontra, segundo a classificação climática de Köppen, em área de clima Subtropical Úmido Mesotérmico (Cfa). A metodologia de Wladimir Köppen, criada em 1900, porém amplamente utilizada até os dias de hoje, baseia-se em três letras. A primeira

letra refere-se à característica geral do clima, a segunda letra refere-se às particularidades do regime de chuvas e a terceira representa a temperatura característica da região. Segundo Trewartha (1968) a letra *C* significa “clima mesotérmico” (subtropical e temperado) com temperatura média do mês mais frio inferior a 18° C e superior a -3° C, ao menos um mês com média superior a 10° C. A letra *f* significa “sempre úmido” com mês menos chuvoso com precipitação superior a 60 mm, e por fim, a letra *a* significa “verões quentes”, com a média do mês mais quente igual ou superior a 22° C.

Ainda que os processos intempéricos e pedogenéticos não sejam instantâneos, mas atuam durante longos períodos de tempo, períodos estes em que o clima local pode ter sido diferente do atual, a classificação climática de Köppen serve como indicativo das condições atuais para a continuação da atuação do intemperismo. Essa classificação climática é evidenciada na Figura 37, publicada pelo IAPAR (Instituto Agrônomo do Paraná, 2000), onde é denominada de Cfa.

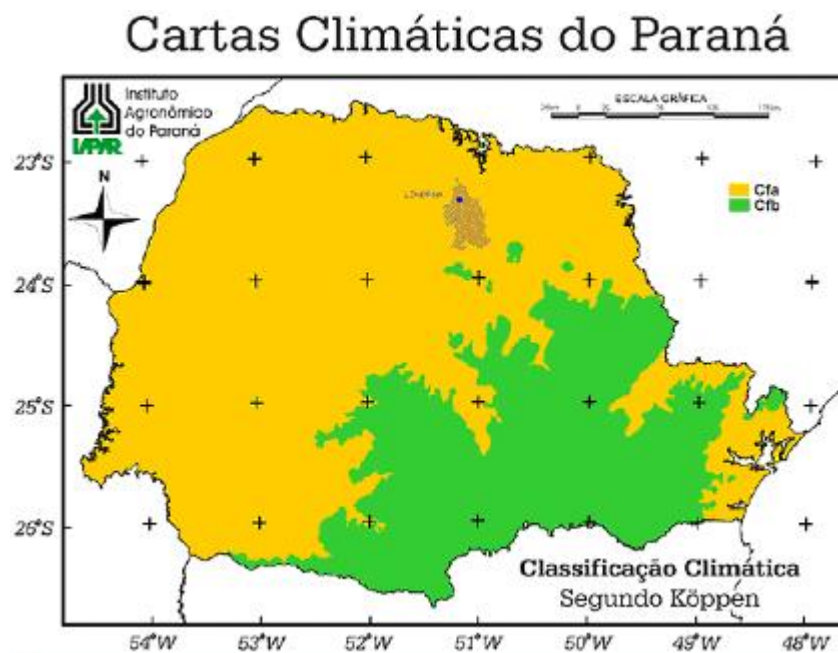


Figura 37 – Classificação climática do estado do Paraná segundo o método de Köppen, IAPAR (2000).

As condições climáticas apresentadas na Figura 37 é um dos fatores favoráveis às ações dos processos intempéricos e pedogenéticos responsáveis pela geração de camadas de solo espessas, que são muito comuns na área urbana da cidade de Londrina, em geral com mais de 15 m de espessura.

A precipitação pluviométrica média anual da região de Londrina, em conformidade com os registros do posto meteorológico instalado nesta região, com referência ao período de 1976 a 1999, encontra-se na faixa de 1.400 mm a 1.600 mm (Figura 38).

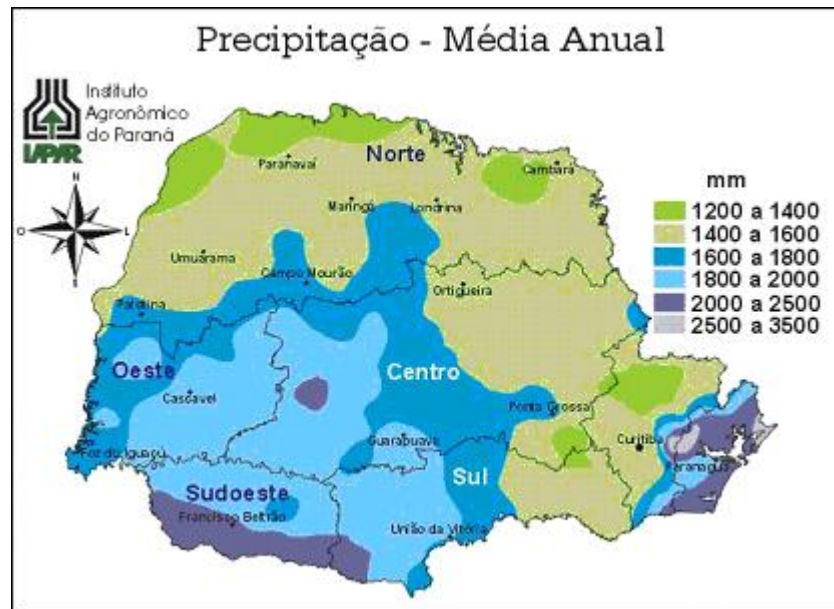


Figura 38 – Alturas médias precipitadas anuais no estado do Paraná entre 1976 a 1999, IAPAR (2000).

Em termos de temperatura média anual os registros meteorológicos da região de Londrina apresentam, para o período de 1976 a 1999 uma faixa média anual entre 21 °C a 22 °C, conforme a Figura 39.

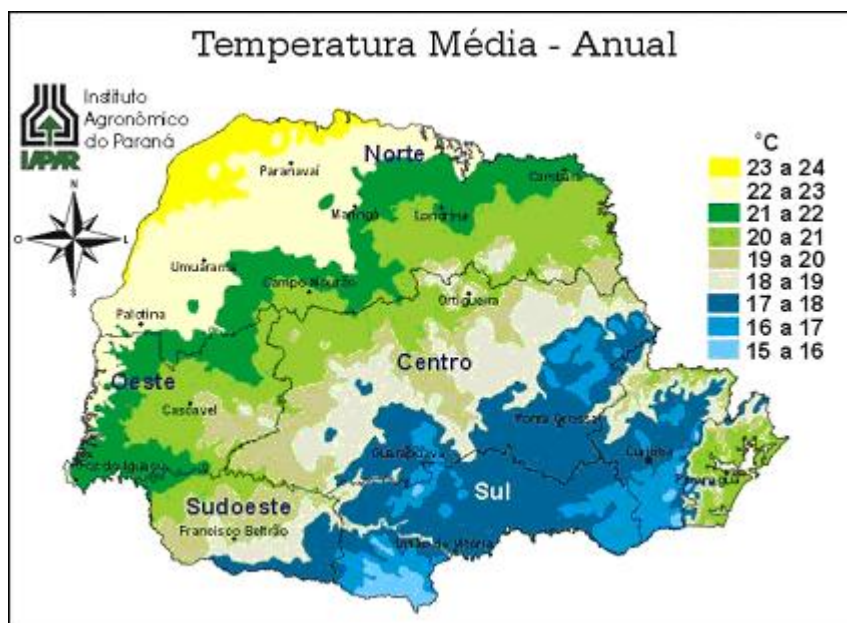


Figura 39 – Temperaturas médias anuais no estado do Paraná entre 1976 a 1999, IAPAR (2000).

O ábaco apresentado na Figura 40 (TEIXEIRA *et al*, 2001) relaciona a altura de precipitação pluviométrica anual com a temperatura média anual. Através do cruzamento destas informações no ábaco da referida figura, verifica-se que o tipo de intemperismo predominante atualmente na região de Londrina esta entre o químico moderado ao químico forte.

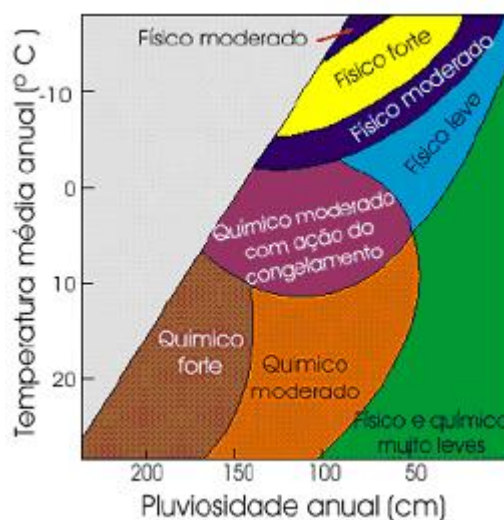


Figura 40 – Classificação do tipo de intemperismo predominante através da pluviosidade média anual e temperatura média anual, Teixeira et al (2001).

4.2 GEOLOGIA DA REGIÃO DE LONDRINA/PR

A Figura 41 apresenta o mapa geológico do estado do Paraná, com seus respectivos grupos, formações, falhas/fraturamentos e contatos litológicos. Por meio dessa figura percebe-se que o Norte do Paraná é composto basicamente de rochas sedimentares depositadas, na era Mesozoica, Paleozóica e sedimentos cenozóicos inconsolidados a Noroeste do Estado (calha do Rio Paraná), e rochas provenientes de atividade vulcânica básica (Formação Serra Geral) originadas também na era mesozóica, sendo esta última constituinte da geologia predominante na região de Londrina.

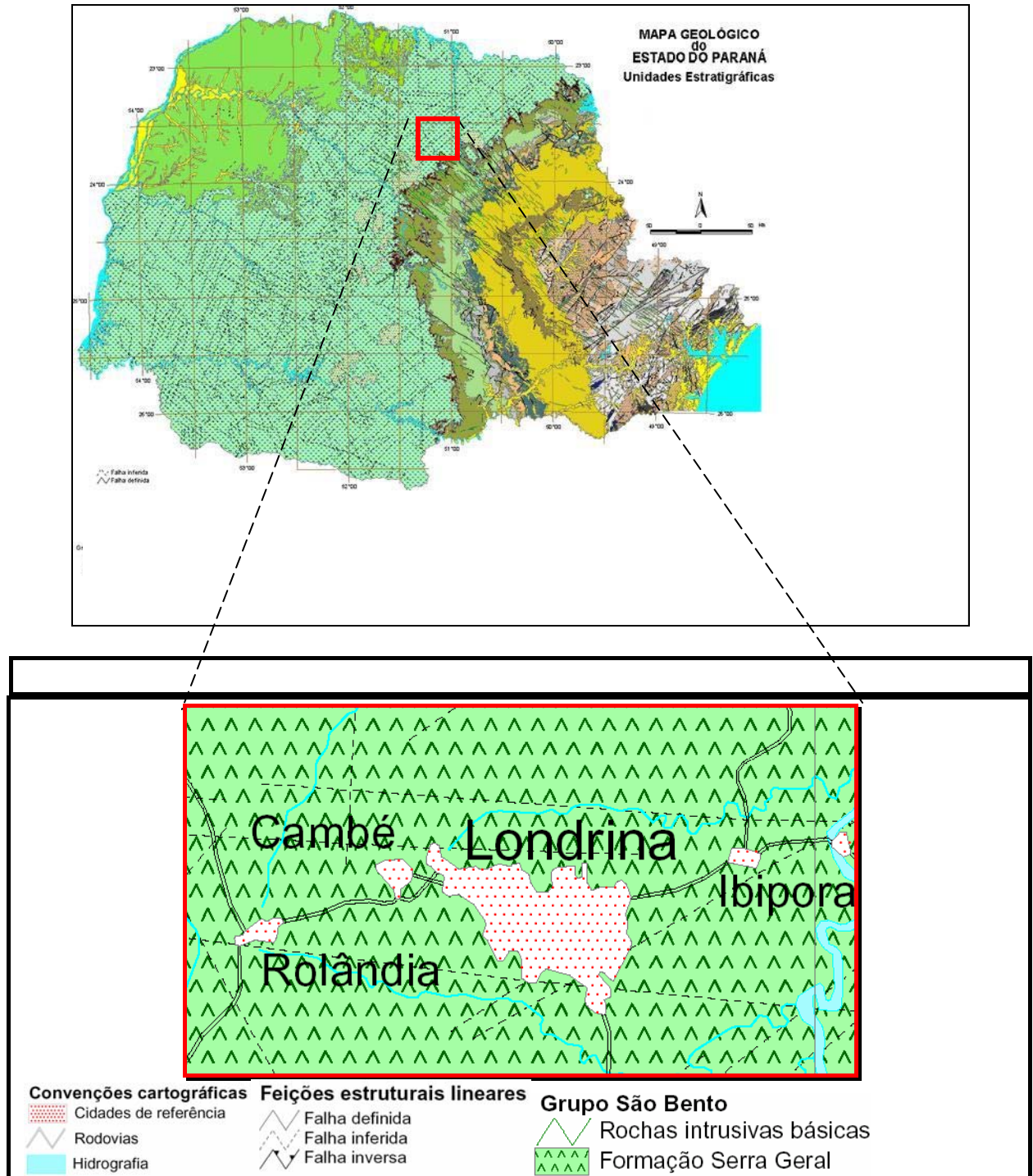


Figura 41 – Mapa contendo as formações geológicas e os respectivos contatos litológicos e fraturamentos na região de Londrina, modificado de Mineropar (2006).

4.3 O SOLO E O SUBSOLO DA ÁREA URBANA DA CIDADE DE LONDRINA

4.3.1 Derrames Basálticos da Formação Serra Geral

Na cidade de Londrina, o substrato rochoso é proveniente de derrames basálticos, sem cobertura de rocha sedimentar (TEIXEIRA *et al*, 2003). Os derrames basálticos observados na região de Londrina são pertencentes à Formação Serra Geral do Grupo São Bento, como demonstra a Figura 41, onde se destaca também os falhamentos/fraturamentos existentes (MINEROPAR, 2006).

Durante o período Jurássico-cretáceo, ocorreu o extravasamento de grandes volumes de lava, que recobriram os depósitos sedimentares então superficiais no local constituído pela Formação Botucatu. Tais extravasamentos ocorreram entre 140 e 120 milhões de anos atrás (PÉTRI; FULFARO, 1983).

Os derrames ocorreram de forma sucessiva, e recobriram uma área de aproximadamente 1.200.000 km² (Bacia Sedimentar do Paraná) que compreende parte do Brasil, Paraguai, Uruguai e Argentina (MACHADO *et al*, 2005). A espessura total dos derrames varia de 350 metros nas bordas, até 1.500 metros na parte central da bacia, conforme a Figura 42 (PICCIRILLO *et al*, 1988). Loczy e Ladeira (1976) esclarecem que “*quando ocorrem derrames sucessivos, de modo que um se sobreponha ao outro, a espessura do conjunto pode alcançar centenas e mesmo milhares de metros, especialmente em vulcanismo de fissura*”. Alguns autores atribuem uma espessura média para cada derrame da Formação Serra Geral entre 10 e 20 metros (PICCIRILLO *et al*, 1988), o que inclui a área estudada.

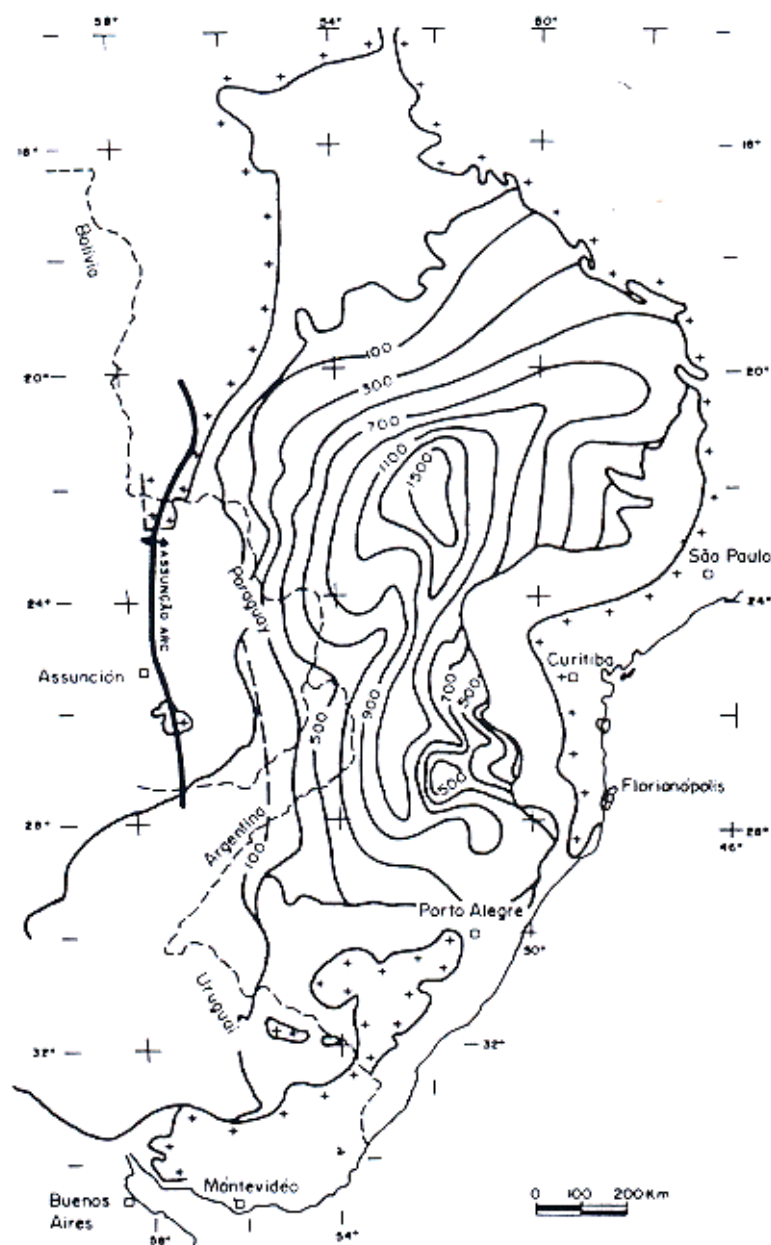


Figura 42 – Isopacas das rochas vulcânicas da Formação Serra Geral, Piccirillo *et al*, (1988).

Os fraturamentos existentes na região da área urbana de Londrina são provenientes do processo de resfriamento dos derrames basálticos, mas podem indicar zonas de fraqueza estrutural tectônica.

A Formação Serra Geral é caracterizada por derrames vulcânicos basálticos de natureza toleítica, e subordinadamente, por riolitos, riodacitos e dacitos, Melfi *et al*, (1988), *apud* Teixeira *et al* (2003). A Formação Serra Geral pertence ao Grupo São Bento, bem como as formações Botucatu e Pirambóia cuja formação geológica é anterior à Formação Serra Geral, Pinese (2002).

Em termos gerais as características da Formação Serra Geral são as seguintes:

- Basaltos com coloração cinza-escura a negra;
- Nos derrames mais espessos a zona central é maciça, microcristalina, fraturada por juntas subverticais;

Em termos de composição química, segundo Piccirillo *et al* (1988), o basalto da Formação Serra Geral da região, pode ser dividido em basicamente dois grupos: os basaltos alto titânio ($TiO_2 > 2\%$) e os basaltos baixo titânio ($TiO_2 < 2\%$). Os basaltos alto titânio, considerando-se o mesmo nível de evolução, são mais enriquecidos em TiO_2 , FeO_1 , K_2O , P_2O_5 , Ba, Rb, La, Zr, Sr, Ce e Y, e empobrecidos em Al_2O_3 , Co, Ni e Cr se comparados com os basaltos baixo titânio.

As relações estratigráficas entre as formações citadas anteriormente dentro do Grupo São Bento, na região de Londrina, encontram-se na Figura 43 (PINESE, 2002).

CRONO	SSE LITOESTRATIGRAFIA NNW	GRUPO	AMBIENTE
CRETÁCEO	GP BAURU	Bauru	eólico e fluvial
JURÁSSICO	FM SERRA GERAL	São Bento	vulcanismo
TRIÁSSICO	FM BOTUCATU		eólico
PERMIANO	FM ROSÁRIO DO SUL FM PIRAMBÓIA	Passa Dois	flúvio-lacustre e eólico
CARBONÍFERO	FM TERESINA/RIO DO RASTO FM IRATI		flúvio-lacustre mares
DEVONIANO	FM RIO BONITO	Guatá	nerítico e deltáico
SILURIANO	GP ITARARÉ FM AQUIDAUANA	Itararé	glacial continental/ marinho
ORDOVICIANO	FM ALTO GARÇAS FM PONTA GROSSA	Paraná	marinho
	FM FURNAS		fluvial a nerítico
	FM VILA MARIA	Rio Ivaí	marinho
	FM IAPÓ		glacial
			continental

Figura 43 – Parte da Coluna Lito-Cronoestratigráfica da Bacia do Rio Paraná, Pinese (2002).

4.3.2 O Solo da Região de Londrina

4.3.2.1 Características Geotécnicas

O solo da cidade de Londrina é composto em sua maior parte por uma argila siltosa residual do basalto. Teixeira *et al* (2003) publicaram resultados de ensaios de caracterização do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) da Universidade Estadual de Londrina, cujo subsolo os autores afirmam ser característico da área urbana da cidade de Londrina. Extraído do trabalho destes pesquisadores, apresenta-se na Figura 44 a variação dos limites de Atterberg (LP: Limite de Plasticidade, LL: Limite de Liquidez, IP: Índice de Plasticidade) em função da profundidade, juntamente com o teor de umidade (W). A Figura 45 mostra a variação em termos de porcentagem das frações granulométricas das partículas do solo (argila, silte e areia) também em função da profundidade.

A Tabela 9 traz as principais características geotécnicas médias obtidas com os ensaios de caracterização do CEEG. A partir da análise dos resultados dos ensaios realizados por Miguel *et al*, 2002, o subsolo do CEEG foi dividido em quatro camadas, sendo a primeira de 0m a 12m, a segunda de 12m a 16m, a terceira de 16m a 21m e a quarta de 21m a 23m.

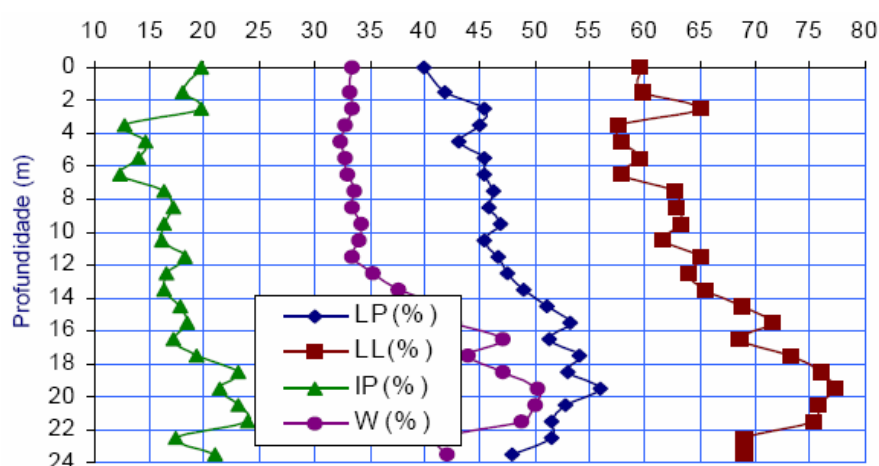


Figura 44 – Variação dos Limites de Atterberg (LP, LL e IP) em função da profundidade, juntamente com a variação do teor de umidade (W), Teixeira *et al* (2003).

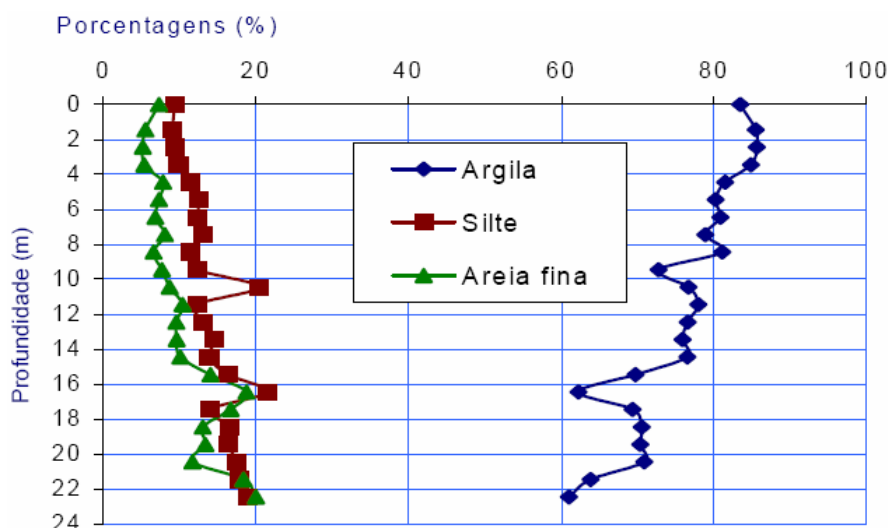


Figura 45 – Variação da composição dos tipos de partículas do solo do CEEG, em função da profundidade, Teixeira *et al* (2003).

Tabela 9 – Caracterização das Camadas do CEEG, Miguel *et al* (2002)

Valores Médios	Camada 1 (0m a 12m)	Camada 2 (12m a 16m)	Camada 3 (16m a 21m)	Camada 4 (21m a 23m)
W (%)	33	39	48	45
LL (%)	61	67	74	72
LP (%)	45	50	53	52
IP (%)	16	17	21	20
Argila (%)	81	75	69	62
Silte (%)	12	14	17	18
Areia Fina (%)	7	11	15	20
Massa Específica dos Sólidos (g/cm ³)	3,058	3,066	3,101	3,007
Tmax/N _{SPT}	1,0	1,3	1,46	1,40
Consistência	Mole a Média	Rija	Rija a Dura	Dura

Decorrente dos processos intempéricos que ocorreram até grandes profundidades no subsolo da região de Londrina, a sua camada superficial adquiriu o caráter laterítico como uma de suas particularidades.

Décourt (2002) submeteu amostras da argila siltosa de Londrina a alguns processos de detecção de caráter laterítico. O índice de laterização de Ignatius observado foi de 1,54 (segundo Ignatius valores de índice de laterização abaixo de 0,3 indicam solo não laterítico, e valores acima de 0,3 indicam solos lateríticos). Este mesmo autor utilizando a

classificação MCT (COZZOLINO; NOGAMI, 1993) classificou as amostras do solo de Londrina como LG', isto é, uma argila de comportamento laterítico.

Uma característica comum aos solos lateríticos, que pode ser observada na camada mais superficial do solo de Londrina é a elevada porosidade. Na classificação MCT os solos lateríticos são descritos como *“bem drenados, apresentando elevado volume de vazios, baixa massa específica aparente e elevada permeabilidade devido à estrutura macroporosa e microagregada”* (COZZOLINO; NOGAMI, 1993).

4.3.2.2 Características Pedológicas

Em termos de classificação pedológica, a área da bacia do ribeirão Cambezinho é classificada como segue no Anexo A (TAGIMA; TERABE, 2005).

Os solos existentes na bacia do ribeirão Cambezinho segundo o levantamento pedológico apresentado no Anexo A, constituem-se dos seguintes tipos:

- Latossolos Vermelhos distroféricos (LVdf);
- Nitossolos Vermelhos eutroféricos latossólicos (NVef);
- Nitossolos Vermelhos eutroféricos (NVef);
- Cambissolos Háplicos eutroféricos (CXef);
- Neossolos Litólicos, Regolíticos Eutróficos (RLe, RRe);
- Gleissolos Háplicos Eutróficos (GXbe).

Conforme Tagima e Terabe (2005), a área em recorte para este estudo apresenta Cambissolos Háplicos Eutroféricos (CXef), Neossolos Litólicos, Regolíticos Eutróficos (RLe e RRe), Latossolos Vermelhos distroféricos (LVdf), Nitossolos Vermelhos eutroféricos latossólicos (NVef) e Nitossolos Vermelhos eutroféricos (NVef), porém houveram sondagens somente nos Latossolos Vermelhos distroféricos (LVdf), Nitossolos Vermelhos eutroféricos latossólicos (NVef) e Nitossolos Vermelhos eutroféricos (NVef).

Os latossolos possuem como característica sua grande espessura se comparados com outros tipos de solo, como os Neossolos litólicos por exemplo. A grande espessura dos latossolos é evidência de que eles estão altamente expostos a agentes intempéricos. Segundo Correa et al (2002) os Latossolos Vermelhos possuem espesso

horizonte B (maior que 2,0 metros), e são provenientes de rochas máficas (não-acidas, ou seja, com teor de sílica menor do que 65%).

Os Nitossolos (anteriormente denominado de Terra Roxa Estruturada - TR) provenientes de rochas máficas, possuem como características horizonte maciço poroso com horizonte B latossólico. Geralmente são eutróficos. São solos que possuem alto potencial agrícola, apresentando teores de micronutrientes relativamente elevados. São solos profundos mas se não adotadas técnicas conservacionistas podem sofrer erosão pois são solos suscetíveis a este processo. Podem aparecer tanto em áreas altas como em baixa, e em terrenos suave e fortemente ondulados (EMBRAPA, 1999).

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para elaboração deste estudo utilizou-se o método proposto por Souza (1992). A aplicação de tal método produziu as seguintes etapas, em ordem cronológica:

1. Cadastramento dos boletins de sondagem (banco de dados).
2. Geo-referenciamento dos furos de sondagem.
3. Tratamento estatístico descritivo dos valores de N_{SPT} para caracterização da amostra.
4. Análise da variação dos valores médios de Torque Máximo, N_{SPT} , e a razão entre eles, para cada metro de profundidade.
5. Divisão das camadas do subsolo utilizando como critério o comportamento geotécnico em relação ao N_{SPT} e Torque Máximo nas faixas de variação de valores do mesmo.
6. Análise variográfica dos valores de N_{SPT} e Torque Máximo.
7. Interpolação através do método da krigagem ordinária.
8. Elaboração das cartas de desvio-padrão da krigagem ordinária.
9. Comparação dos resultados obtidos com mapas altimétricos.
10. Comparação dos resultados obtidos com mapas pedológicos.
11. Comparação dos resultados obtidos com o mapa hidrográfico da bacia.
12. Comparação dos resultados obtidos com as cartas apresentados por Silva & Miguel (2007) de Torque Máximo ($T_{máx}$) para a bacia do Cambezinho.
13. Retro-alimentação e re-análise dos resultados.

5.1 CADASTRAMENTO DAS SONDAgens

A partir de 234 sondagens realizadas por duas empresas atuantes na cidade de Londrina/Pr, criou-se um banco de dados com informações tais como: nome do furo de sondagem, coordenadas este e norte e valores de N_{SPT} e Torque Máximo obtidos metro a metro. Tal banco de dados foi organizado no software Arcview 3.2 (ESRI 1999).

5.2 GEORREFERENCIAMENTO DOS FUROS DE SONDAGEM

De posse dos boletins de sondagem com croquis de locação de cada furo de sondagem e através de mapa da área urbana de Londrina locaram-se os furos de sondagem sobre a base cartográfica digital em formato DWG (AutoCad), sendo esta uma digitalização da Folha SF. 22-Y-D-III-4, escala 1:50.000, IBGE (1996). Posteriormente, no software Arcview 3.2, por meio de algoritmo existente na biblioteca do software, calcularam-se as coordenadas este e norte de cada furo.

Os dados cartográficos utilizados são os seguintes:

- Datum horizontal: *South America Datum* 1969, Brazil;
- Projeção: Universo Transverso de Mercator;
- Sistema de Coordenadas: Métricas;

Considerando que a totalidade dos dados externos geo-referenciados utilizados neste estudo estão na projeção UTM (base cartográfica incluindo o arruamento, curvas de nível, hidrografia, entre outros), bem como o uso corrente deste tipo de projeção em documentos cartográficos nacionais e internacionais, optou-se por adotá-la como projeção padrão.

Sabendo-se que a projeção UTM é cilíndrica conforme, ou seja, preserva ângulos, e conseqüentemente, distorce as outras propriedades (inclusive distância), nota-se que o método adotado para locação dos furos incorre em um erro numérico de localização (coordenadas). Conforme discutido na revisão bibliográfica, os variogramas são calculados a partir da distância entre amostras. Já que a projeção UTM distorce a distância, os variogramas poderão ser super ou subestimados. Tornou-se então necessário realizar uma verificação da influência deste fator nos resultados.

A técnica escolhida para a realização da verificação foi composta dos seguintes passos:

1. Criação de um plano de informação (*shape* – sondagens UTM) no arcview para a entidade “sondagens”;
2. Locação dos pontos de sondagem através do método descrito anteriormente;
3. Criação de um segundo *shape* (sondagens Albers) através da transformação do *shape* “sondagens - UTM” para um sistema de projeção equidistante (Albers);
4. Superposição do *shape* “sondagens UTM” com o *shape* “sondagens Albers”;

5. Verificação, sondagem a sondagem, de possíveis discrepâncias em termos de localização espacial (coordenadas).

Ao proceder o método descrito anteriormente, verificou-se que para a área em estudo, os pontos de sondagem locados na projeção UTM coincidiam exatamente com os pontos de sondagem locados na projeção eqüidistante de Albers. Uma possível explicação para isso seria o fato de que as distorções de distância para as dimensões da área de estudo foram desprezíveis.

5.3 ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS

Através do software histplt.exe da biblioteca GSLIB[®] obteve-se o histograma de frequência de distribuição de valores observados. Através do software Surfer[®] Golden Software (2002), calcularam-se as demais estatísticas descritivas apresentadas neste trabalho.

5.4 ESTATÍSTICAS ESPACIAIS

Nesta etapa do estudo foram utilizados os softwares da biblioteca Variowin[®], Pannatier (1996). No software Surfer[®], Golden Software (2002), realizou-se a interpolação por meio do algoritmo de krigagem ordinária e a estimação dos erros obtidos através da carta de desvios-padrão.

5.5 ANÁLISE ESPACIAL

Através do software Arcview realizaram-se as análises visuais e o geoprocessamento dos dados obtidos com os mapas altimétrico, hidrográfico, e pedológico,

visando à detecção de correlações entre eles. Para os dois primeiros mapas (altimétrico e hidrográfico) utilizou-se a técnica de superposição dos mesmos com os mapas produzidos de N_{SPT} e Torque Máximo para todas as camadas.

Para o caso do mapa pedológico, utilizou-se uma álgebra de mapas. Primeiramente recortou-se o mapa de pedológico de acordo com as classes de resistência estimadas em cada camada e para cada índice (N_{SPT} e Torque Máximo) utilizando a ferramenta *GeoProcessing Wizard (Intersect Two Themes)*. Posteriormente, através de análise visual, buscaram-se correlações entre valores máximos, médios, e mínimos dos índices e as classes pedológicas.

Optou-se por analisar também a distribuição dos valores de desvio-padrão em relação ao mapa pedológico, buscando-se correlações. Repetiu-se o mesmo processo descrito anteriormente, ou seja, recortou-se o mapa de pedológico de acordo com as classes de desvio-padrão em cada camada e para cada índice (N_{SPT} e Torque Máximo) utilizando a ferramenta *GeoProcessing Wizard (Intersect Two Themes)*, e por meio de análise visual, buscaram-se correlações entre valores máximos, médios e mínimos dos desvios-padrão dos índices e as classes pedológicas.

6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

De posse dos dados das sondagens registrados e geo-referenciados, procedeu-se primeiramente o cálculo da média e da mediana em profundidade, para a variável N_{SPT} . Feito isso, fez-se um gráfico (Figura 46) dos valores obtidos *versus* as suas respectivas profundidades.

A partir deste gráfico, observou-se em profundidade o comportamento geotécnico desta variável no interior da bacia do ribeirão Cambezinho, dentro da área urbana de Londrina/Pr. A primeira constatação foi a de que, até uma profundidade aproximada de 10 metros, os valores médios são próximos dos valores medianos e, a partir desta profundidade, o comportamento destas duas estatísticas (média e mediana) possuem tendências relativamente semelhantes, porém com valores diferentes.

Ao se analisar o gráfico obtido (Figura 46) pôde-se dividir o subsolo da bacia, em termos de comportamento geotécnico do N_{SPT} , em três camadas, sendo elas:

- Primeira Camada: 0m a 7m.
- Segunda Camada: 8m a 17m.
- Terceira Camada: 18m a 30m.

A Figura 46 retrata tais constatações e a divisão do subsolo proposta.

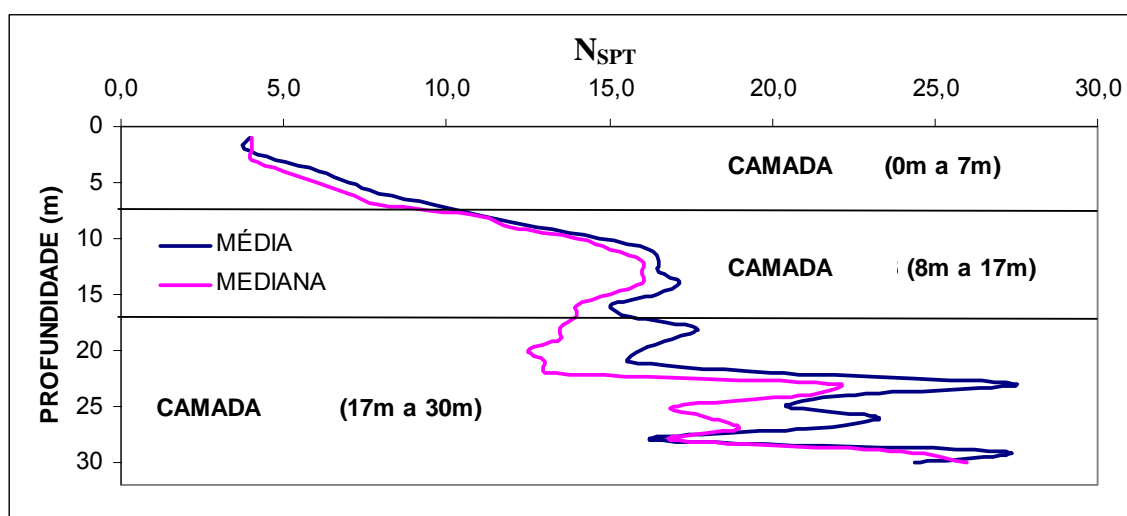


Figura 46 – Divisão das camadas do subsolo da bacia do Cambezinho (área urbana) de acordo com os valores médios e medianos de N_{SPT} .

Miguel *et al* (2002), baseados em 14 sondagens do tipo SPT realizadas no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica (CEEG) da Universidade Estadual de Londrina (com área de aproximadamente 2.900 m²), analisando o comportamento desta variável (N_{SPT}), dividiram o subsolo do mesmo em 4 camadas, entre as profundidades de 0m a 12m, 13m a 16m, 17m a 21m e 22m a 23m.

Silva e Miguel (2007) fizeram a mesma análise para a variável Torque Máximo (ou de pico) medida no ensaio SPT-T (234 sondagens), também para a bacia do ribeirão Cambezinho. O resultado encontrado por estes autores se encontra na Figura 47.

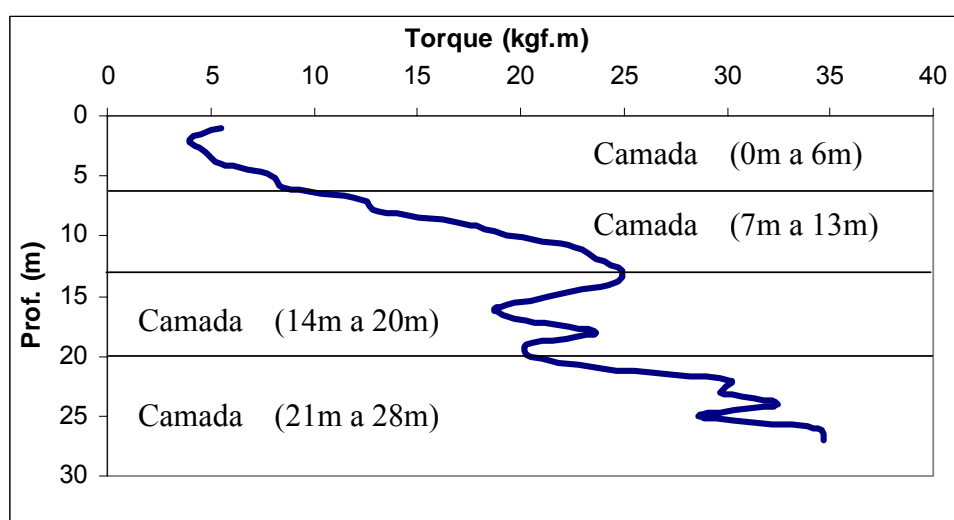


Figura 47 – Divisão das camadas do subsolo da bacia do Cambezinho (área urbana) de acordo com os valores médios de Torque Máximo, Silva e Miguel (2007).

Percebe-se através da análise da Figura 47 que a divisão obtida por Silva & Miguel (2007) é relativamente semelhante à proposta por Miguel *et al* (2002). Porém, a mesma difere da divisão proposta neste estudo.

A divisão do subsolo baseado em tendências de comportamento geotécnico foi utilizada por vários autores (STURARO 1993, FOLLE *et al* 2001 e outros). Em Sturaro (1993), percebe-se que a divisão obtida através de valores medianos de N_{SPT} aproxima-se da divisão obtida através de ensaios geofísicos (refração sísmica) para solo residual proveniente do arenito Formação Bauru. Isto mostra que a divisão de camadas pelo processo simplificado de análise do comportamento geotécnico pode ser utilizada com certa confiabilidade.

Foram consideradas neste estudo somente a primeira e a segunda camada para o parâmetro N_{SPT} , pelo fato da terceira camada apresentar pouquíssimos dados,

impossibilitando a análise geoestatística (número mínimo de amostras para estudos geoestatísticos: 30).

Realizaram-se também as estatísticas básicas descritivas para as camadas um e dois em termos de N_{SPT} . Calcularam-se os coeficientes de assimetria e curtose, e a aderência dos valores amostrais a uma distribuição normal através do teste de Kolmogorov-Smirnov. Esta última verificação foi feita admitindo-se um grau de significância de 95 %. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 10, Figura 48 e 49.

Tabela 10 – Estatísticas descritivas da primeira e segunda camadas em termos de N_{SPT} .

PARÂMETRO	CAMADA	
	0m a 7m	8m a 17m
Coef. de Assimetria	1,27	0,556
Coef. de Curtose	3,284	0,277
Estatística de Kolmogorov-Smirnov	0.074	0,192
Valor Crítico da Estatística de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,05$)	0,1	0,1

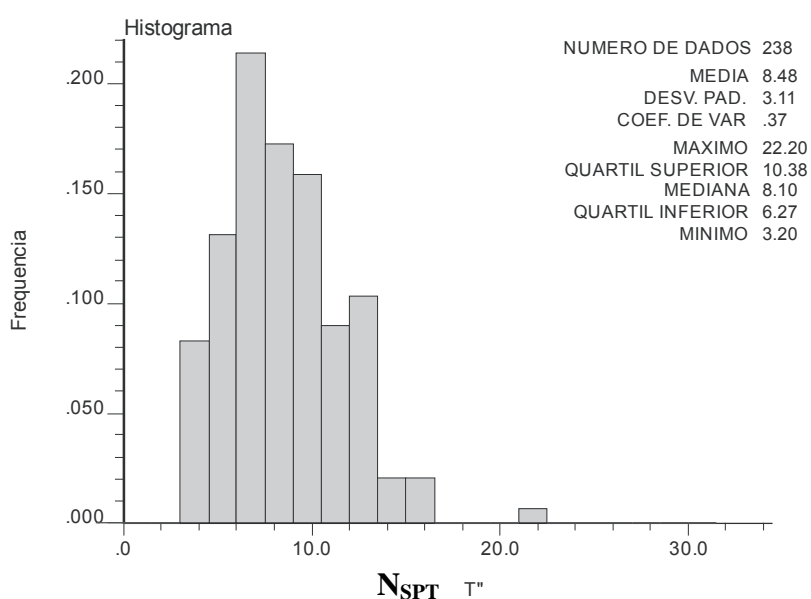


Figura 48 – Histograma de frequência para a primeira camada (0 m a 7m) da bacia do Cambezinho (área urbana) de acordo com os valores médios de N_{SPT} .

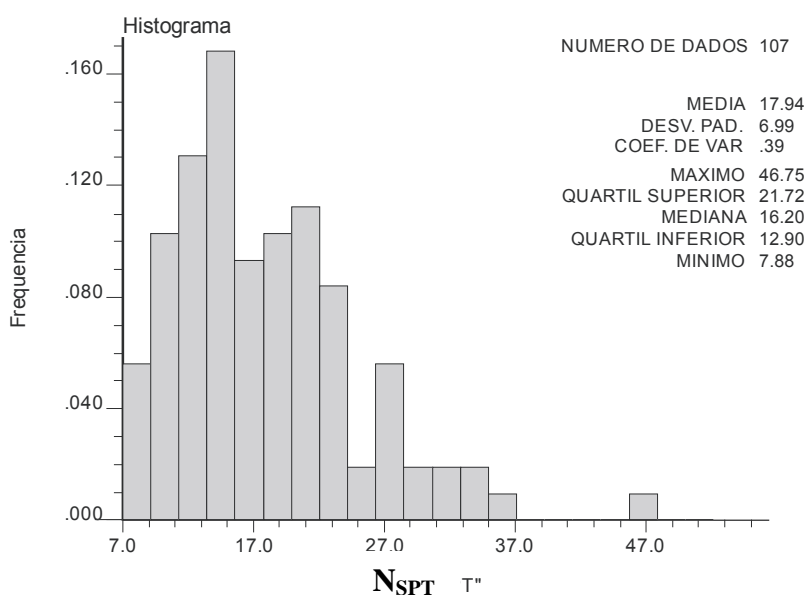


Figura 49 – Histograma de frequência para a segunda camada (8m a 17m) da bacia do Cambezinho (área urbana) de acordo com os valores médios de N_{SPT} .

Pelas estatísticas apresentadas na Tabela 10 e Figuras 48 e 49 percebe-se que tanto na primeira camada como na segunda camada, os valores amostrais possuem pequeno grau de achatamento ($k > 0,263$) e assimetria à esquerda. Percebe-se também que os valores de N_{SPT} da primeira camada aderem de maneira satisfatória a uma distribuição normal, enquanto os da segunda não apresentaram boa aderência (ambas com grau de confiabilidade de 95%).

O próximo passo foi a realização da análise estrutural do fenômeno em questão (N_{SPT}) por meio da confecção de variogramas.

As etapas realizadas para esta análise consistiram de:

1. Elaboração da superfície variométrica, para detecção de possíveis anisotropias.
2. Elaboração de diversos variogramas com a variação de direções variografadas, *lags*, espaçamento dos *lags* e ângulo de abertura.

As Figuras 50 e 51 apresentam a superfície variométrica para a primeira e segunda camadas respectivamente.

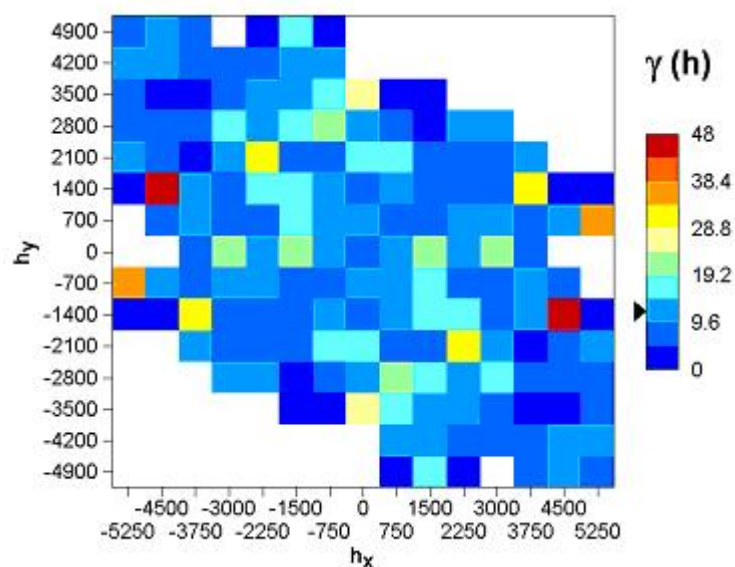


Figura 50 – Superfície variométrica da primeira camada (0m a 7m) da bacia do Cambezinho (área urbana) em termos de N_{SPT} .

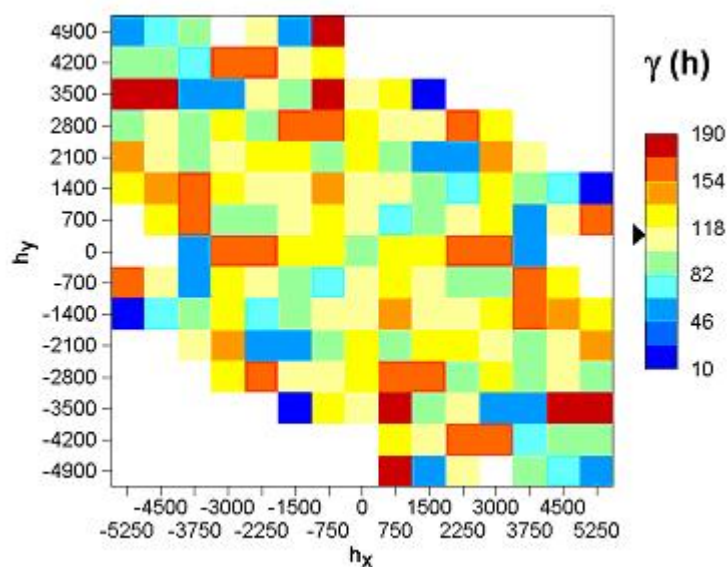


Figura 51 – Superfície variométrica da segunda camada (8m a 17m) da bacia do Cambezinho (área urbana) em termos de N_{SPT} .

Percebe-se através das Figuras 50 e 51 uma isotropia em termos da variável N_{SPT} , principalmente próximo ao valor indicado de covariância da população $\gamma(h)$.

A partir de então, através de tentativa e erro, obtiveram-se os variogramas que melhor modelaram o fenômeno em questão. A Figura 52 apresenta o variograma global

(ou omnidirecional) obtido para a primeira camada. A Figura 53 apresenta o variograma global para a segunda camada (8m a 17m).

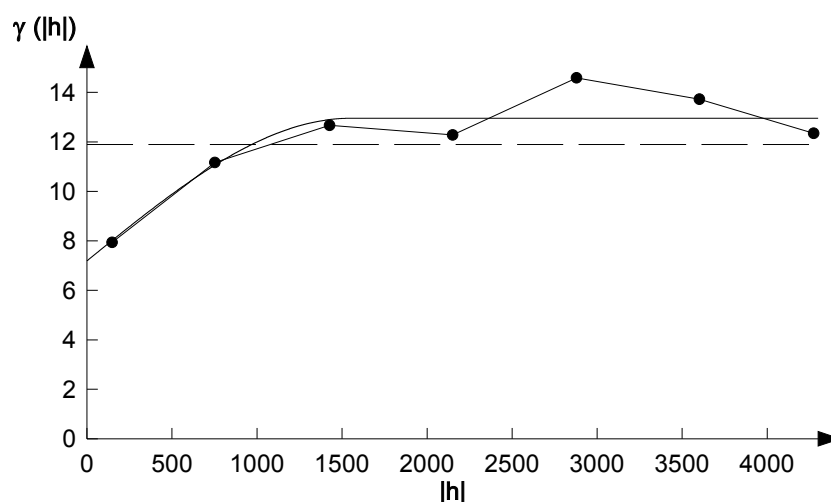


Figura 52 – Variograma global para a primeira camada (0m a 7m) da bacia do Cambezinho (área urbana).

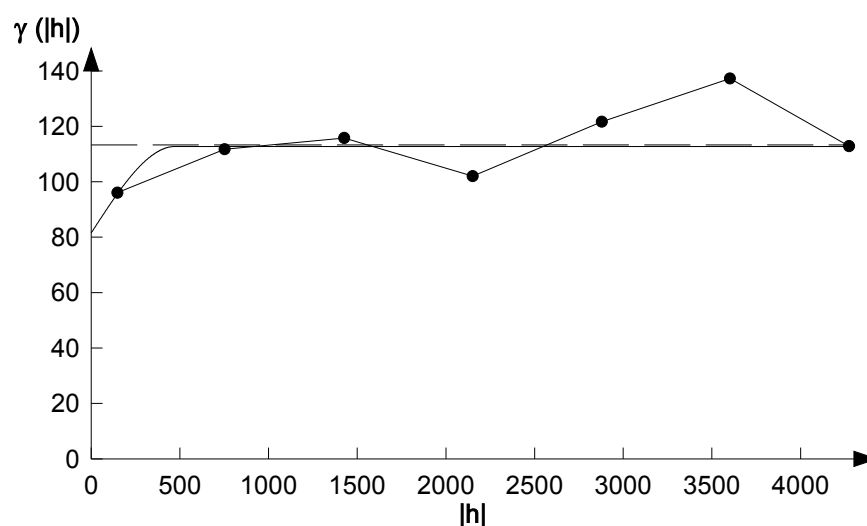


Figura 53 – Variograma global para a segunda camada (8m a 17m) da bacia do Cambezinho (área urbana).

As características de cada variograma estão apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Valores de parâmetros dos variogramas obtidos para as camadas um e dois.

PARÂMETRO	CAMADA	
	0m a 7m	8m a 17m
Modelo	Esférico	Esférico
Range	1548	472,85
Sill	5,76	31,196
Nugget	7,2	81,596
E	0,80	0,38

Comparando-se a primeira e a segunda camada em termos de resultados obtidos, nota-se que a primeira camada apresentou menores valores de coeficiente de variação (CV), indicando assim uma menor dispersão dos valores em torno do valor médio. As principais diferenças que a primeira camada possui em relação à segunda camada seriam: a distribuição mais simétrica de valores em relação à média (coeficiente de assimetria), menor achatamento da distribuição dos valores (coeficiente de curtose), normalidade dos valores amostrais (teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov) e maior correlação espacial da variável em estudo (grau de aleatoriedade). Provavelmente, a maior razão para isto é o fato do número de furos de sondagens na primeira camada ser bem maior do que o que atingiu a segunda camada.

Através das informações obtidas na análise estrutural variográfica, teve-se subsídio para a confecção da interpolação dos valores pontuais de N_{SPT} através da krigagem ordinária. Apesar do espaçamento irregular dos furos de SPT-T (Figura 54), foi possível utilizar o algoritmo da krigagem ordinária pois para seu uso não é necessário que as amostras estejam espaçadas uniformemente como em um *grid*.

As Figuras 55 e 57 apresentam as cartas com as estimativas de resistência do solo à penetração do amostrador-padrão do SPT em faixas de números de golpes (N_{SPT}) para a primeira e segunda camada, respectivamente. Já as Figuras 56 e 58 apresentam os respectivos desvios-padrão.

A Figura 59 apresenta as curvas de nível extraídas da carta topográfica do IBGE (1996) para a região de Londrina (escala 1:50.000) para a bacia do Cambezinho (Folha SF. 22-Y-D-III-4).

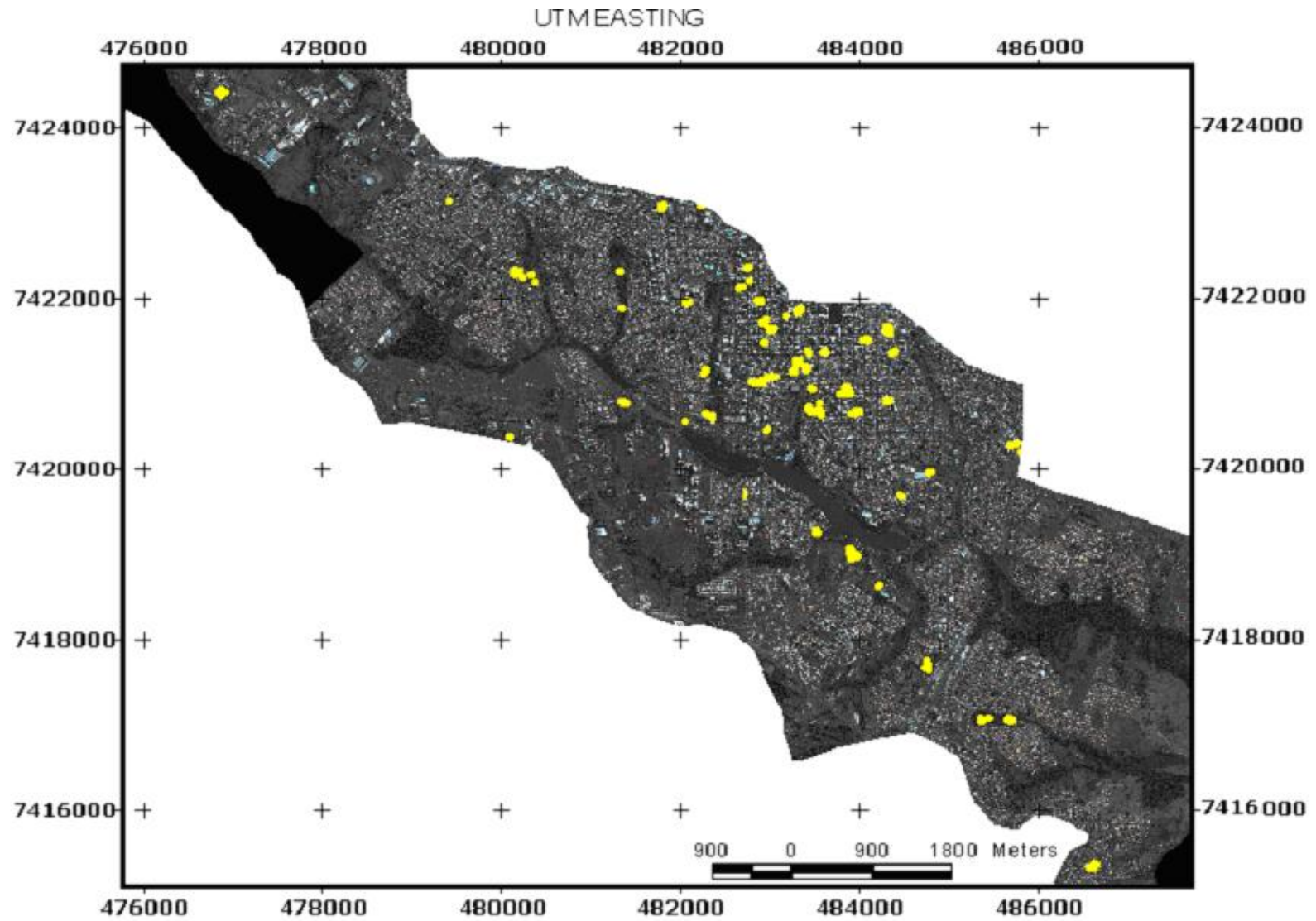


Figura 54 – Imagem Quick-Bird (Google Earth) com localização dos pontos de sondagens utilizados neste trabalho, em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana).

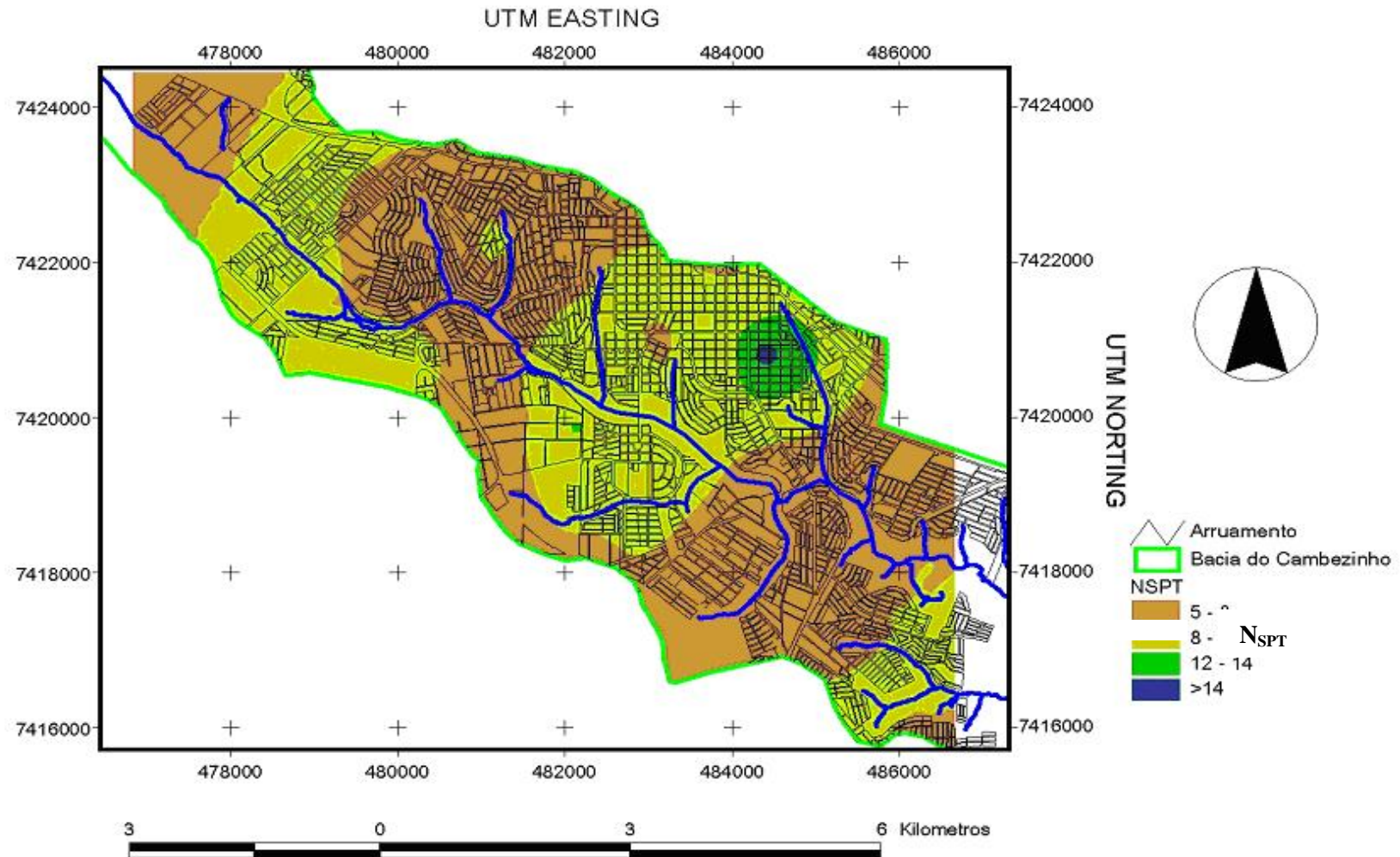


Figura 55 – Carta de resistência do solo à penetração do amostrador-padrão do SPT para a primeira camada (0m a 7m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana).

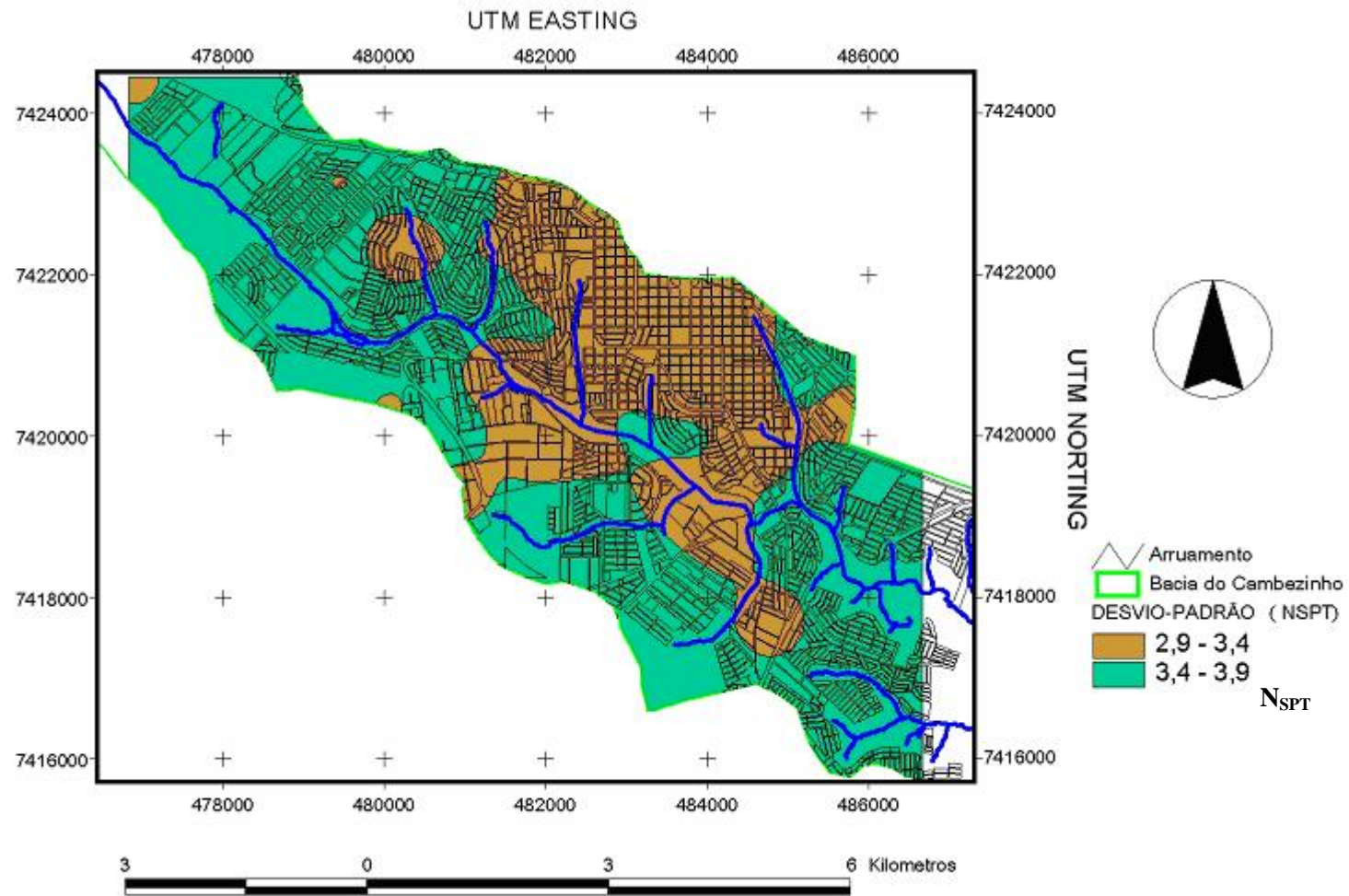


Figura 56 – Carta dos desvios-padrão da resistência do solo à penetração do amostrador-padrão do SPT para a primeira camada (0m a 7m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana).

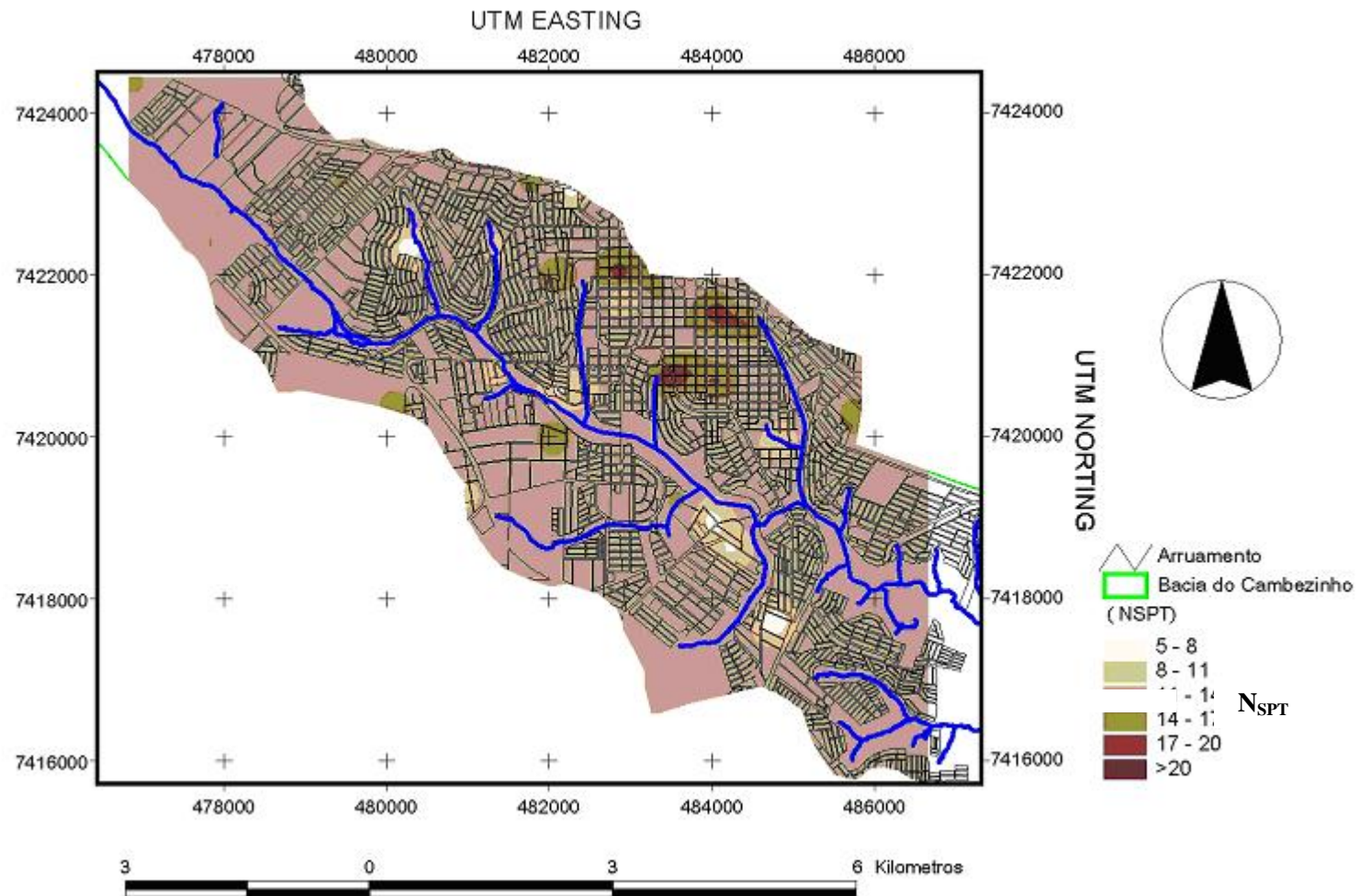


Figura 57 – Carta de resistência do solo à penetração do amostrador-padrão do SPT para a camada 2 (8m a 17m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana).

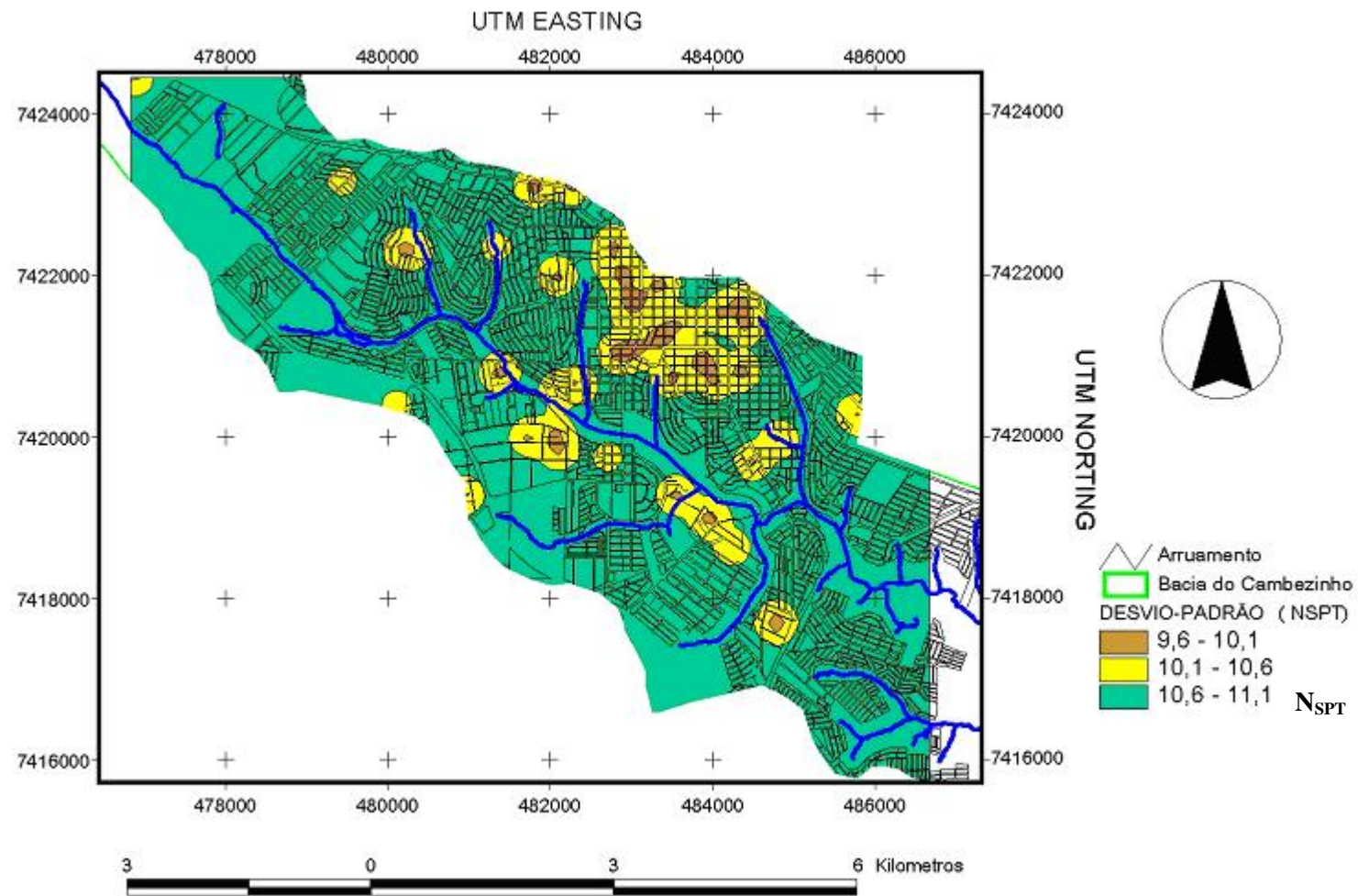


Figura 58 – Carta dos desvios-padrão da resistência do solo à penetração do amostrador-padrão do SPT para a camada 2 (8m a 17m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana).

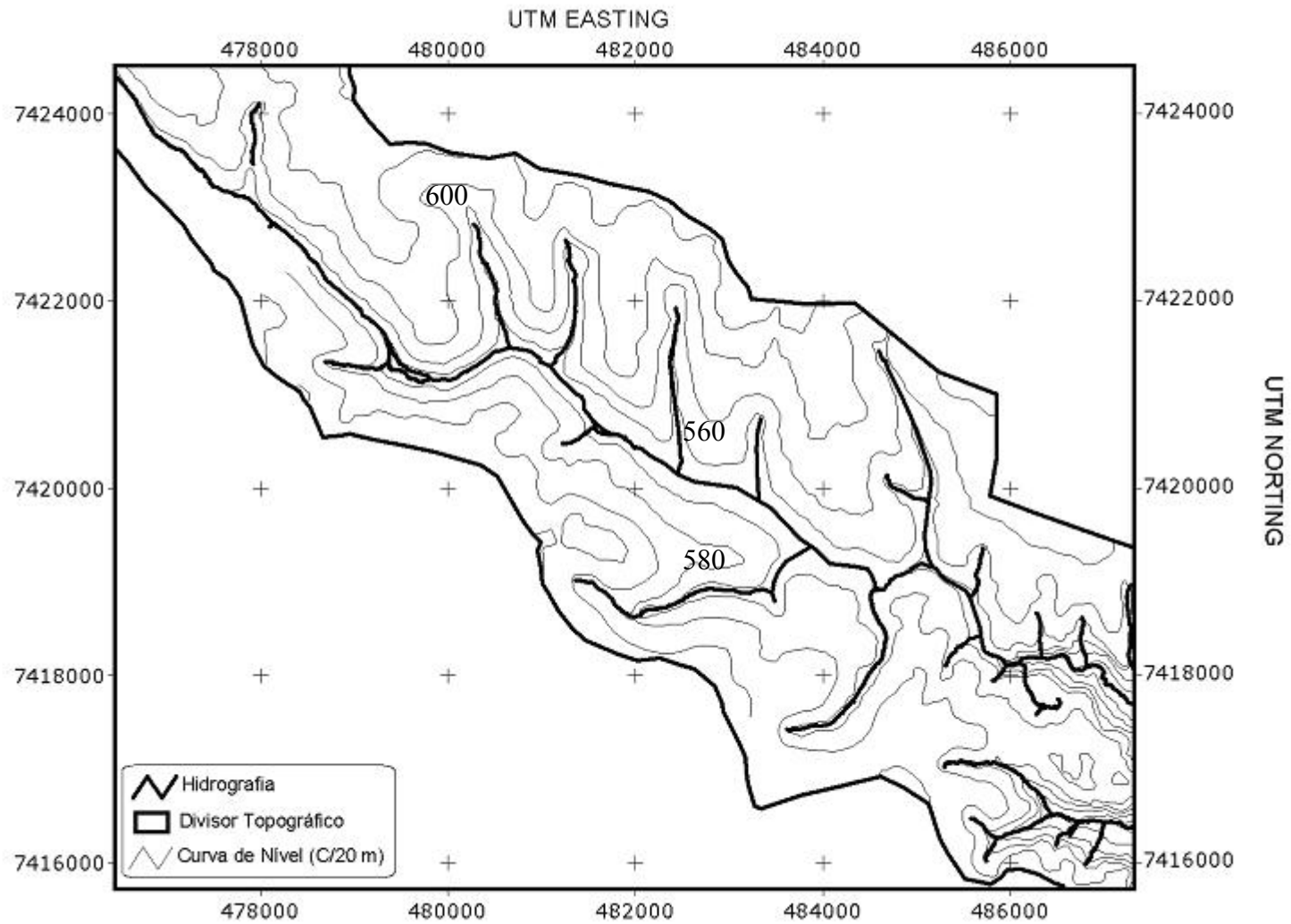


Figura 59 – Carta topográfica para parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana). Fonte: IBGE Carta Londrina Folha SF. 22-Y-D-III-4.

Na Figura 56 observa-se que o desvio-padrão da primeira camada apresenta uma grande área contínua com valores relativamente baixos (2,9 a 3,4). Isto ocorreu em virtude do grande número de sondagens que atravessa esta camada.

Na segunda camada (Figura 57), percebe-se quase em todas as regiões, mas com algumas poucas exceções, que as áreas de menor resistência estão próximas às drenagens naturais da bacia. Considerando que a segunda camada se inicia a 8 metros de profundidade, e que as tensões de sucção existentes na argila siltosa da região de Londrina/Pr abaixo do nível freático são nulas, pode-se supor que esta diminuição da resistência à penetração do amostrador-padrão do SPT seja por influência da pequena profundidade do nível freático, já que os valores de N_{SPT} são influenciados pelo teor de umidade do solo, Cintra (2003).

As Figuras 60, 62 e 64 apresentam, respectivamente, os valores de Torque Máximo ($T_{máx}$) estimados para a área em estudo, sendo as Figuras 61, 63 e 65 suas respectivas cartas de desvio-padrão, obtidos por Silva & Miguel (2007).

Preliminarmente, também não foi encontrada relação alguma entre topografia (Figura 59) e resistência do solo, seja com valores de N_{SPT} , ou com os valores de Torque Máximo apresentados por Silva e Miguel (2007).

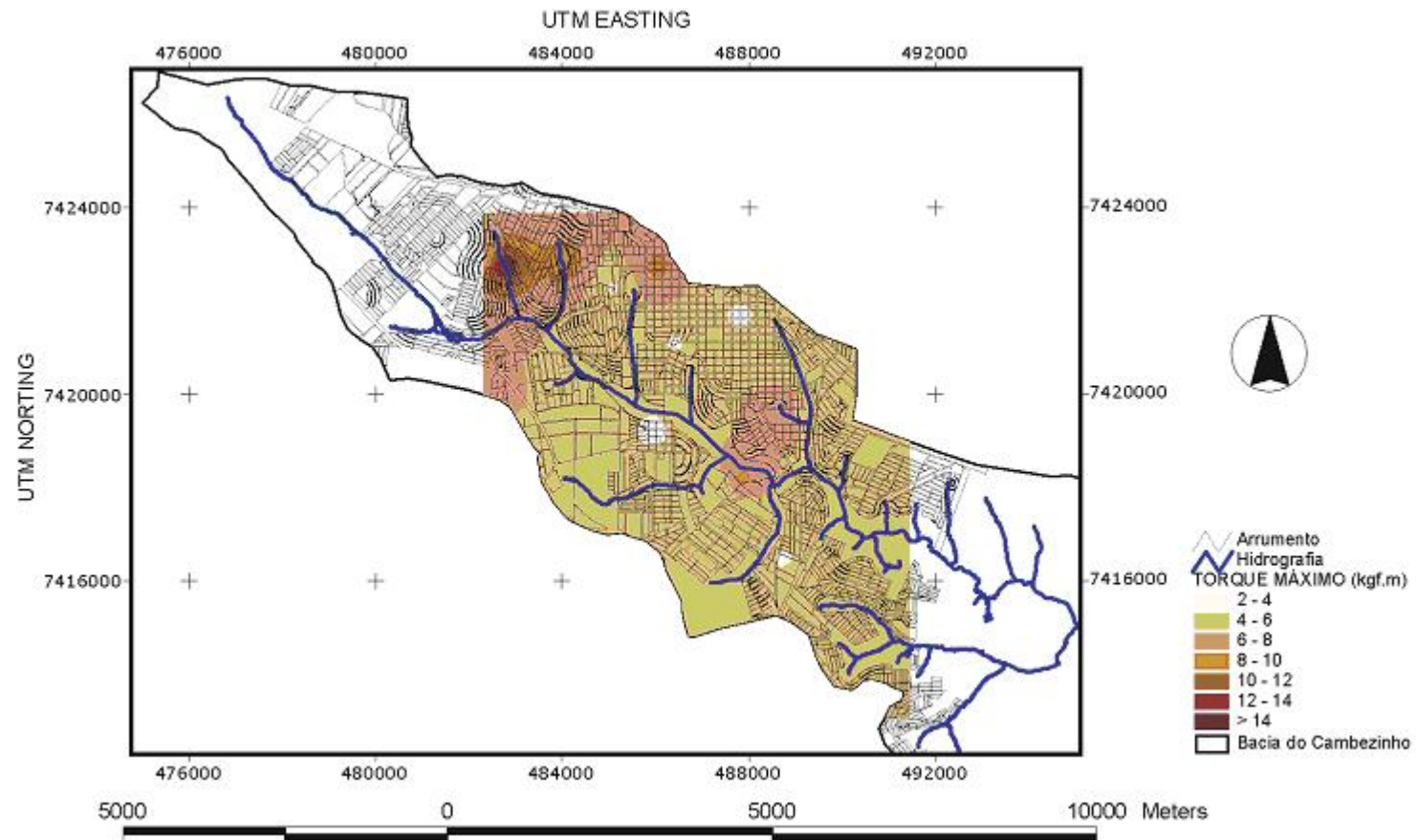


Figura 60 – Carta de resistência do solo ao Torque Máximo medido no SPT-T para a primeira camada (0m a 6m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana), Silva & Miguel (2007).

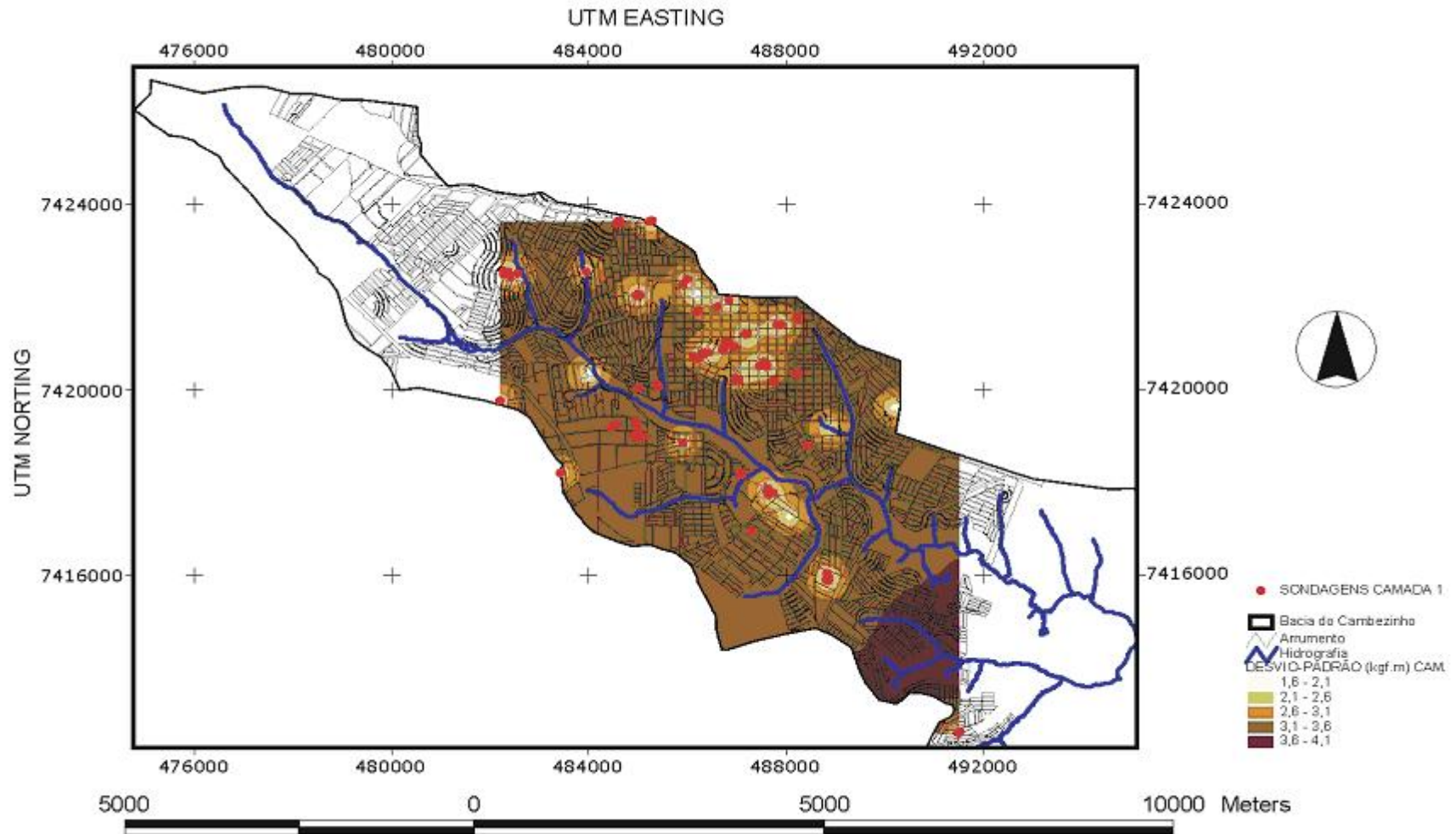


Figura 61 – Carta dos desvios-padrão da resistência do solo ao Torque Máximo medido no SPT-T para a primeira camada (0m a 6m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana), Silva e Miguel (2007).

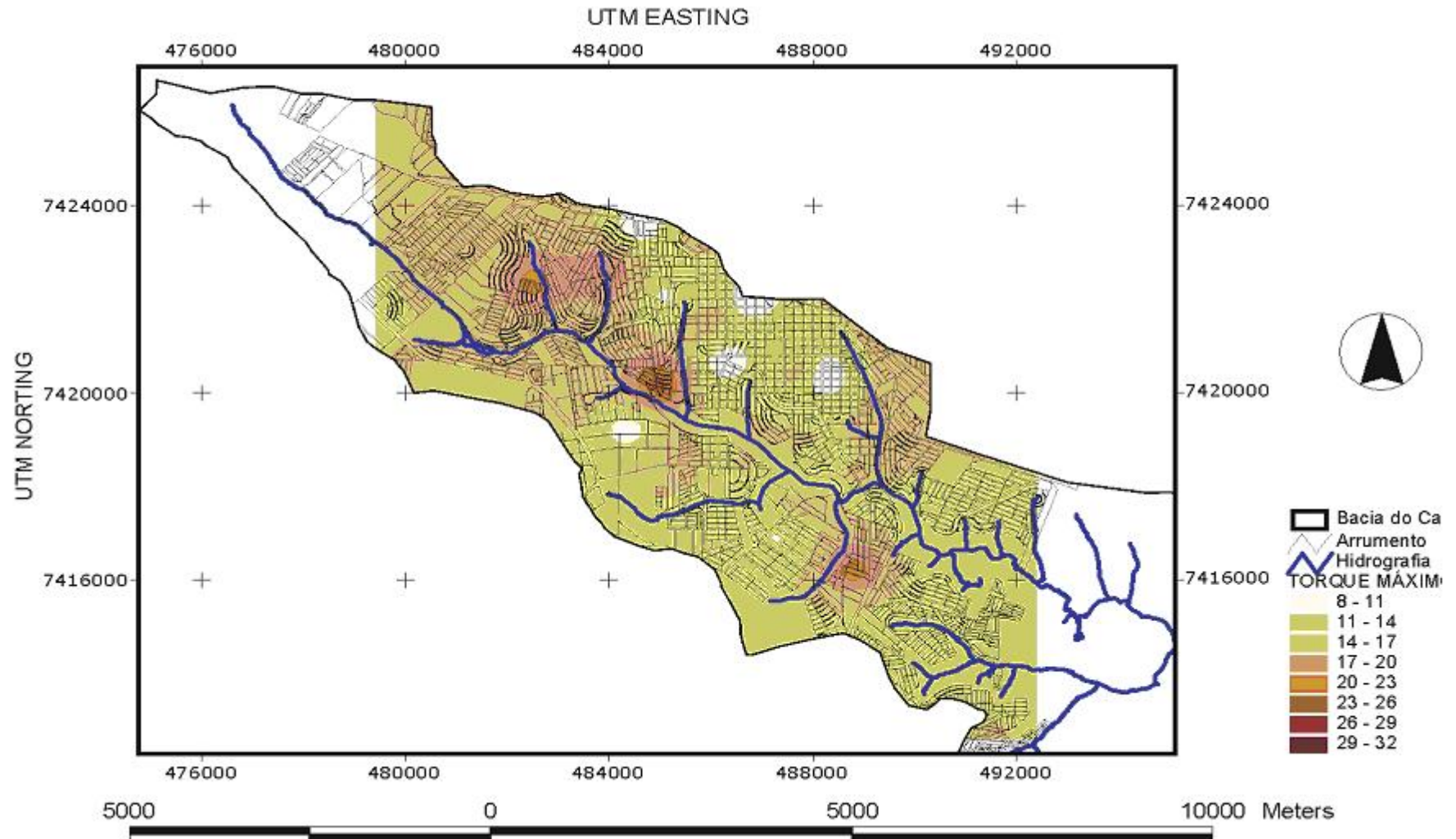


Figura 62 – Carta de resistência do solo ao Torque Máximo medido no SPT-T para a segunda camada (7m a 13m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana), Silva e Miguel (2007).

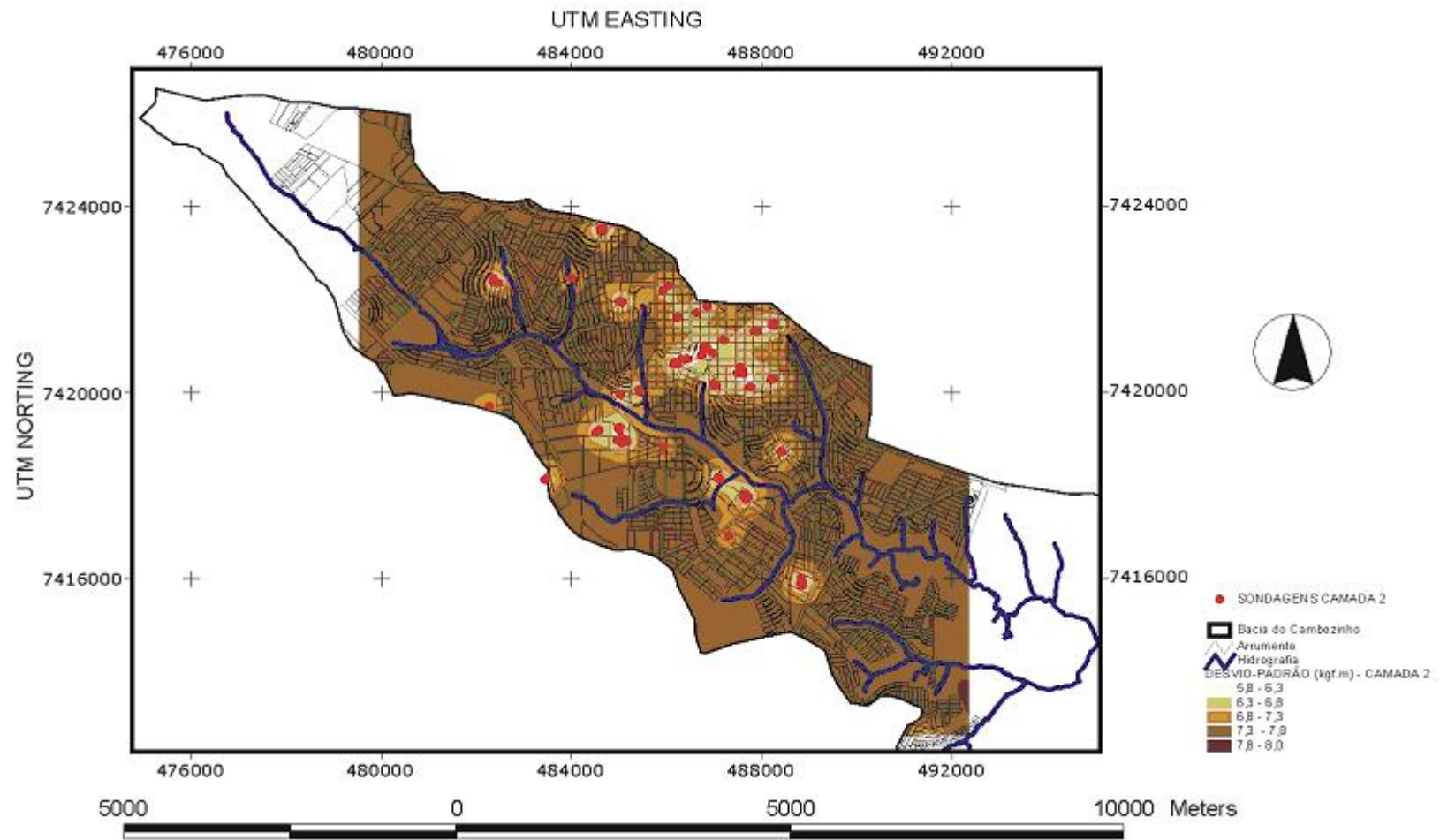


Figura 63 – Carta dos desvios-padrão da resistência do solo ao Torque Máximo medido no SPT-T para a segunda camada (7m a 13m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana), Silva e Miguel (2007).

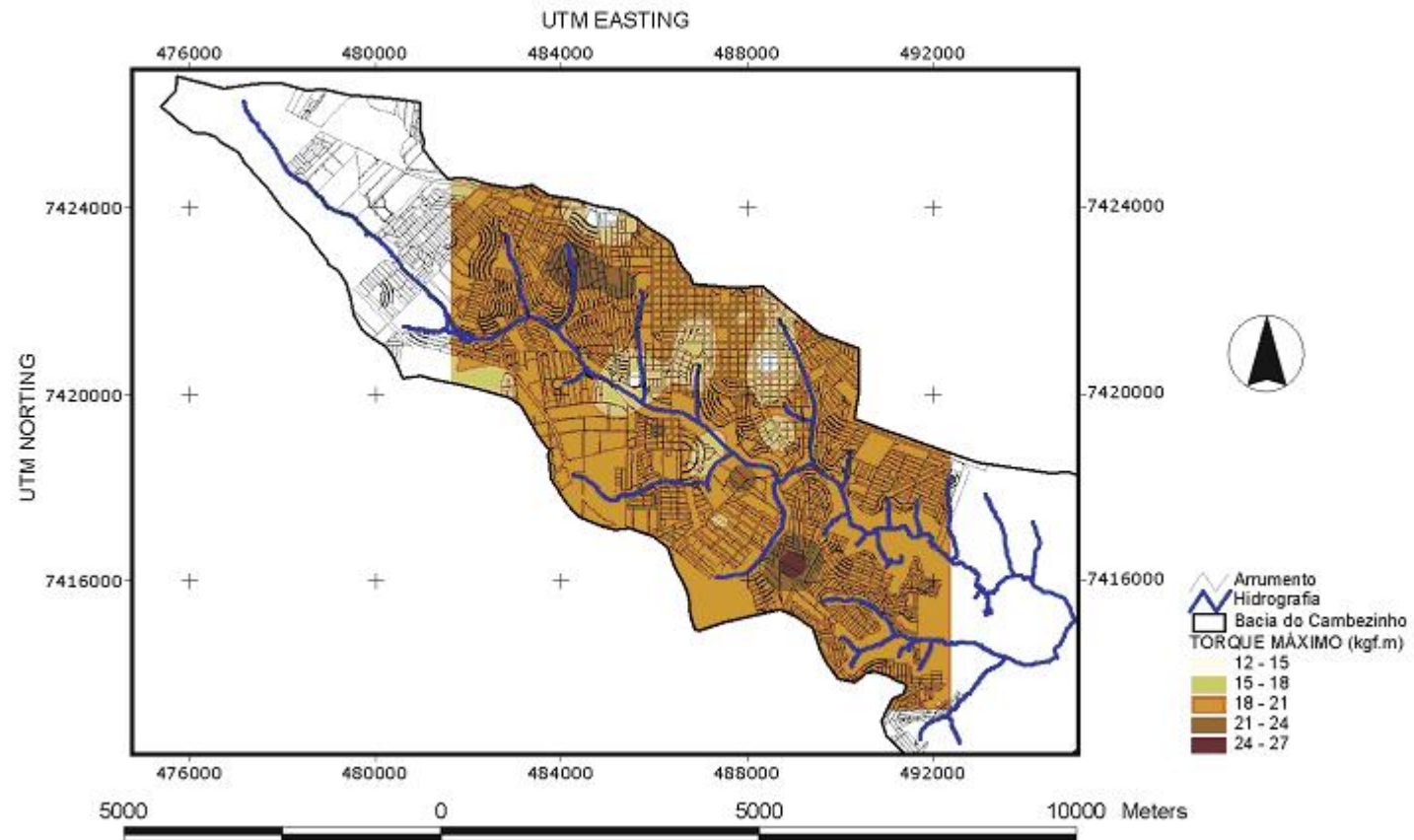


Figura 64 – Carta de resistência do solo ao Torque Máximo medido no SPT-T para a terceira camada (14m a 20m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana), Silva e Miguel (2007).

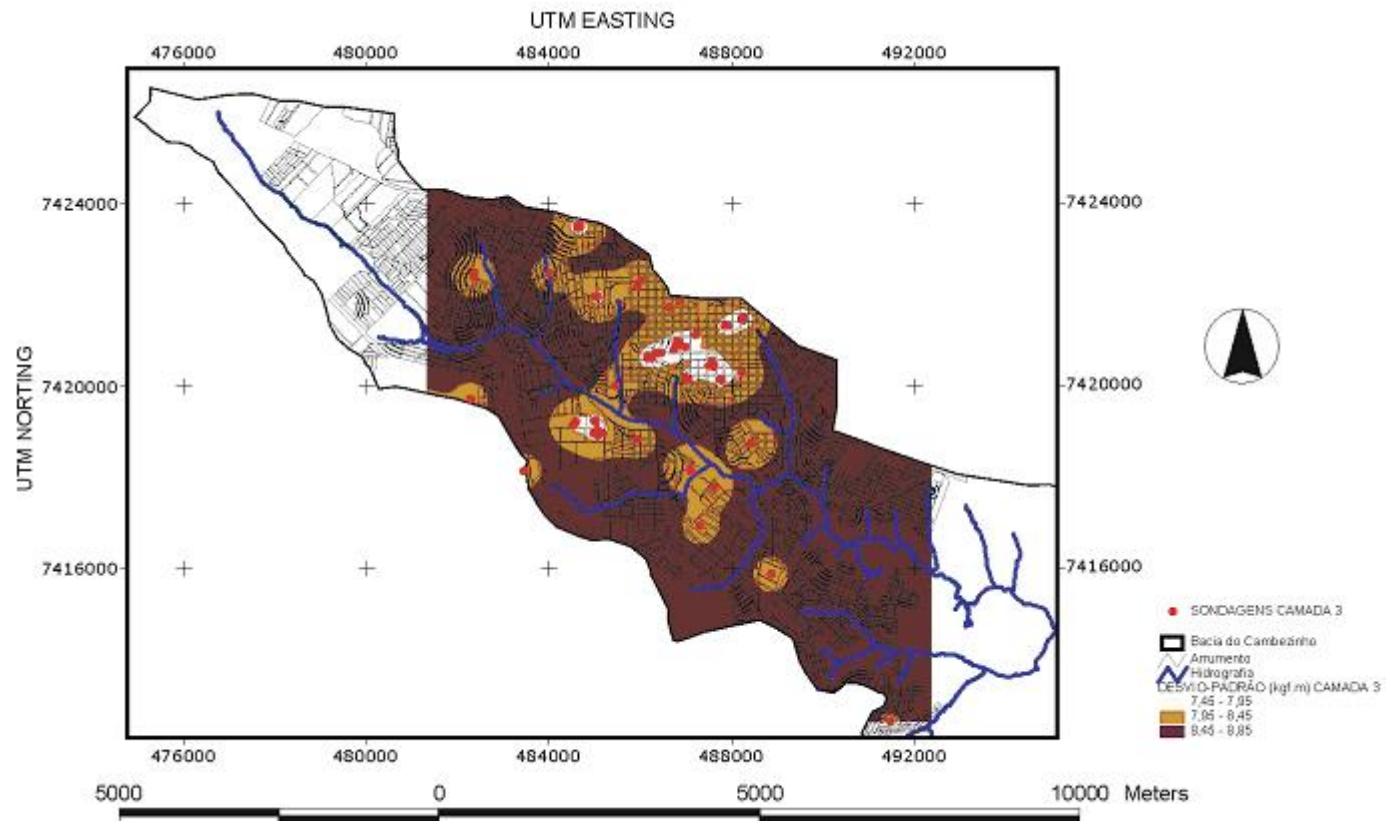


Figura 65 – Carta dos desvios-padrão da resistência do solo ao Torque Máximo medido no SPT-T para a terceira camada (14m a 20m), em parte da bacia do ribeirão Cambezinho (área urbana), Silva & Miguel (2007).

Ao se comparar o mapa das classes pedológicas (Anexo A) com as cartas geradas de resistência do solo à penetração do amostrador-padrão, a princípio, não se detectou nenhuma relação entre ambos. Levantou-se então a possibilidade da tensão de sucção matricial ter mascarado os valores obtidos nas interpolações, já que não foram analisadas separadamente as sondagens com e sem a presença do nível freático. A Tabela 12 apresenta as novas considerações para realização das análises.

Tabela 12 -- Novas considerações para realização das análises estatísticas.

VARIÁVEL	CONDIÇÃO
N_{SPT}	Não-saturado
	Saturado
Torque Máximo	Não-saturado
	Saturado

A seguir são apresentadas as análises estatísticas (clássica e espacial) realizadas levando-se em consideração a presença ou não do nível freático nos furos de sondagem.

A partir da ferramenta *Query Builder* no banco de dados gerenciado pelo software Arcview, selecionaram-se somente os valores de N_{SPT} acima do nível freático. Com a divisão entre valores saturados e não-saturados de N_{SPT} notou-se uma relação aproximadamente linear com a profundidade com comportamento diferente do apresentado na Figura 67, conforme apresentado na Figura 66. Isto evidencia a influencia da sucção matricial na variável N_{SPT} .

As Figuras 66, 67, 68, e 69 apresentam as novas divisões de camadas.

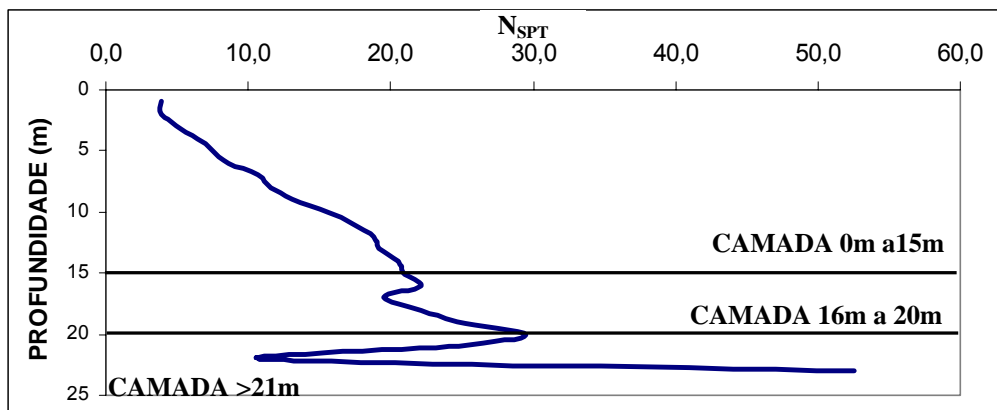


Figura 66 – Divisão de camadas, na condição não-saturada, segundo o comportamento geotécnico para a variável N_{SPT} .

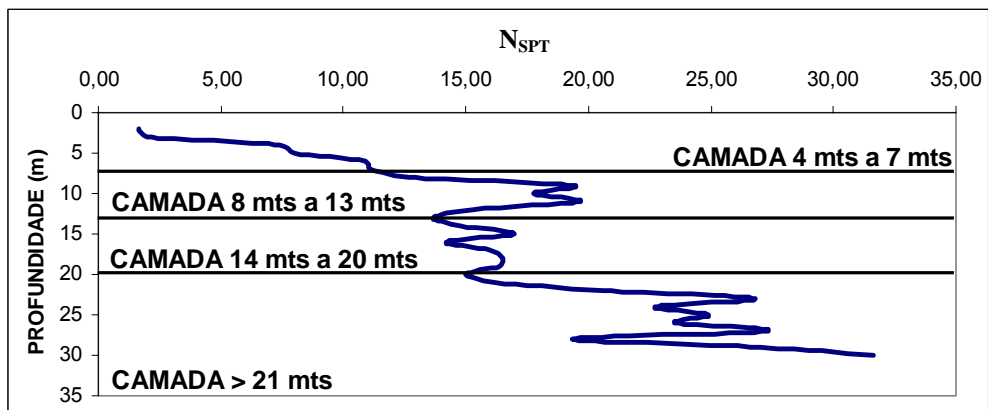


Figura 67 – Divisão de camadas, na condição saturada, segundo o comportamento geotécnico para a variável N_{SPT} .

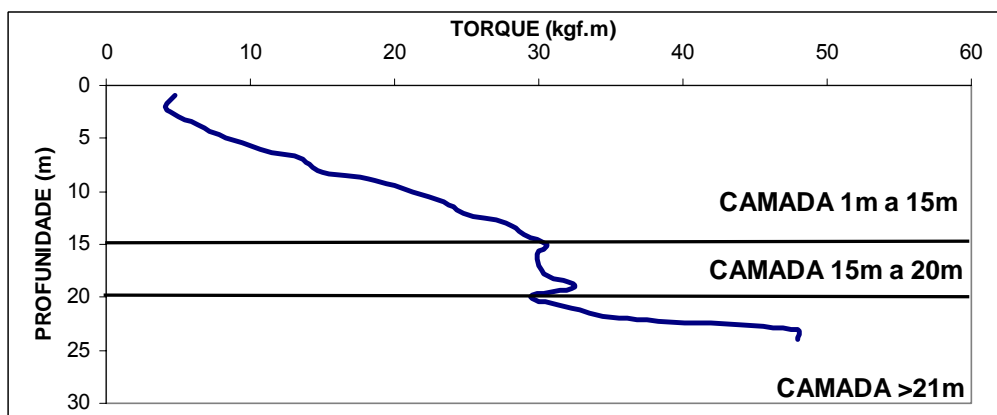


Figura 68 – Divisão de camadas, na condição não-saturada, segundo o comportamento geotécnico para a variável Torque Máximo.

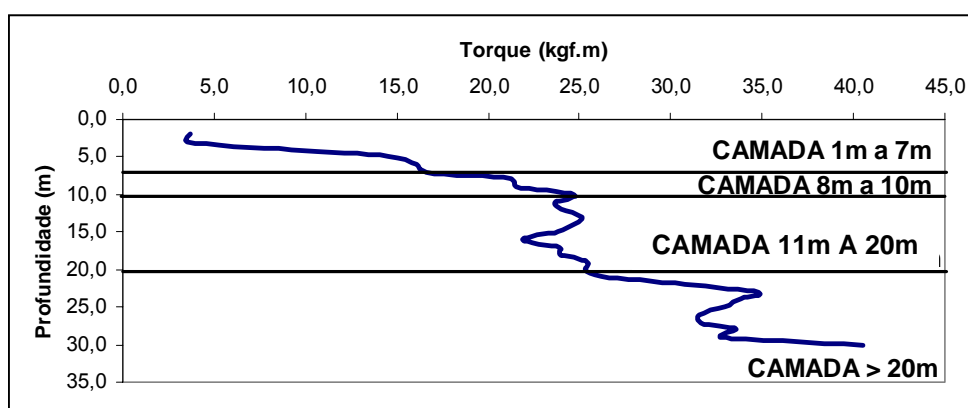


Figura 69 – Divisão de camadas, na condição saturada, segundo o comportamento geotécnico para a variável Torque Máximo.

Se observadas as Figuras 66 e 68 nota-se que as variáveis medidas em condições não-saturadas, tanto N_{SPT} como Torque Máximo, tendem a ter menores alternâncias entre valores crescentes e decrescentes em profundidade. Nota-se também que para a variável N_{SPT} como também para a variável Torque Máximo, tanto em condição saturada como não saturada, existe um divisor de comportamento para a profundidade de 20,0 m.

É interessante notar que para a condição não-saturada, tanto a variável N_{SPT} como a variável Torque Máximo apresentaram a mesma divisão de camadas, evidenciando assim, que para valores médios, o comportamento de ambas as variáveis, em profundidade, é relacionado. O mesmo já não acontece para os parâmetros medidos na condição saturada.

Nota-se também que para os dois parâmetros medidos, para as duas condições de saturação consideradas, a variabilidade após os 20,0m de profundidade é maior, provavelmente por conta da maior heterogeneidade do material (visto a menor atuação de processos intempéricos), e pela menor quantidade de furos de sondagem.

Optou-se então por avaliar a relação entre as variáveis em estudo considerando a profundidade que se encontravam os valores medidos. Os resultados estão na Figura 70.

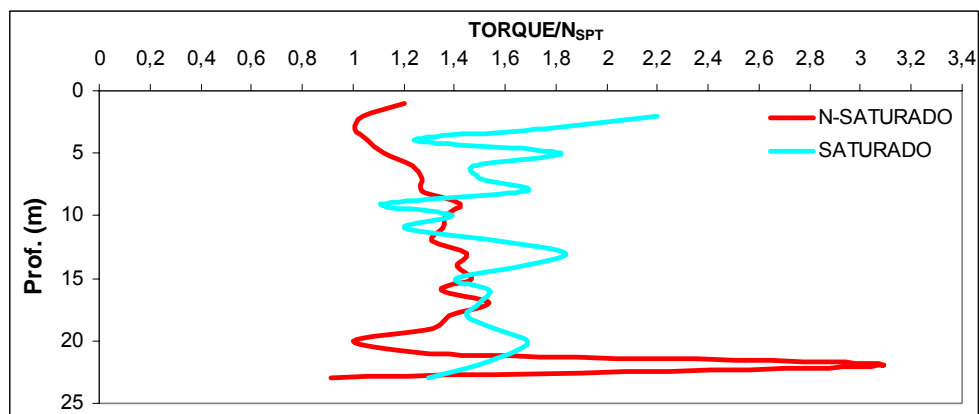


Figura 70 – Relação, em profundidade, da variável Torque Máximo com N_{SPT} para as condições saturada e não-saturada.

Os resultados apresentados na Figura 70 mostram que para a condição não-saturada, até aproximadamente 17,0m de profundidade, o comportamento médio pode ser modelado como linear crescente, porem com grande variabilidade para maiores profundidades. A equação que descreve o comportamento se encontra em (23). Tal equação alcançou ajuste, medido pelo coeficiente de Pearson (r), igual a 0,7655. Este valor está bem acima do mínimo calculado para um teste unilateral com significância de 0,1%, que seria 0,305, (BARBETA ET AL, 2004)

$$\frac{\text{TorqueMáximo}}{N_{SPT}} = \frac{\text{Profundidade} + 27,04}{28,016} \quad (23)$$

Nota-se também que tanto para a condição saturada como para a não saturada, o valor médio de Torque Máximo é igual ou superior, numericamente, ao valor de N_{SPT} , significando que a relação Torque Máximo por N_{SPT} é sempre maior do que um, com exceção dos resultados relativos à profundidade 23 metros.

Já para a condição saturada, o comportamento médio é aproximadamente constante até a profundidade amostrada, com valor médio entre 1,5 e 1,7 kgf.m.

6.1 N_{SPT} – EXTRATO NÃO-SATURADO

As estatísticas para a nova divisão de camadas para o N_{SPT} na condição não-saturado estão apresentadas na Tabela 13 e nas Figuras 71 e 72 (histogramas de frequência). A camada com profundidade maior do que 20,0m não foi considerada pelo fato de apresentar número insuficiente de furos de sondagem para as análises geoestatísticas.

Tabela 13 – Estatísticas descritivas para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para a primeira e segunda camadas com respectivamente.

PARÂMETRO	CAMADA	
	0m a 15m	16m a 20m
Coef. de Assimetria	0,95	3,643
Coef. de Curtose	2,778	17,834
Estatística de Kolmogorov-Smirnov	0,053	0,233
Valor Crítico da Estatística de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,05$)	0,092	0,196

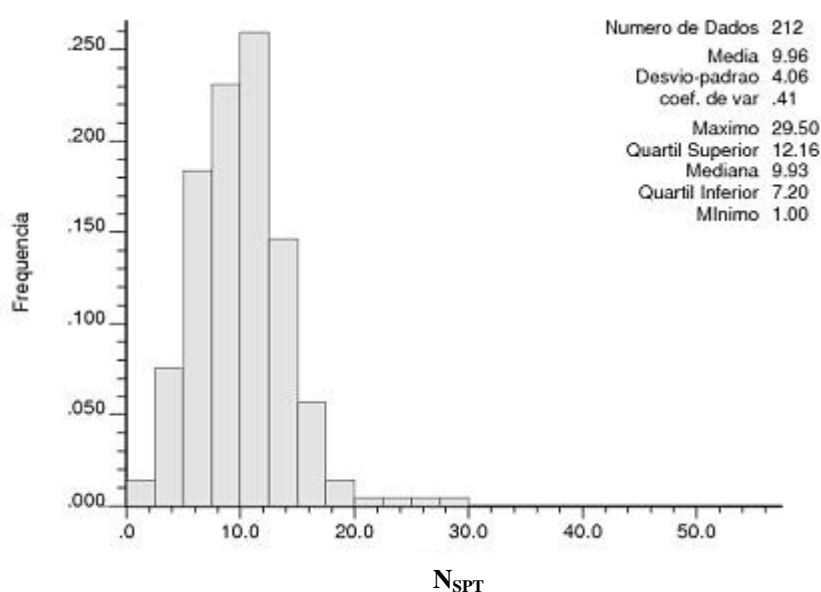


Figura 71 – Histograma para a variável N_{SPT} para a primeira camada (0m a 15m) na condição não-saturado.

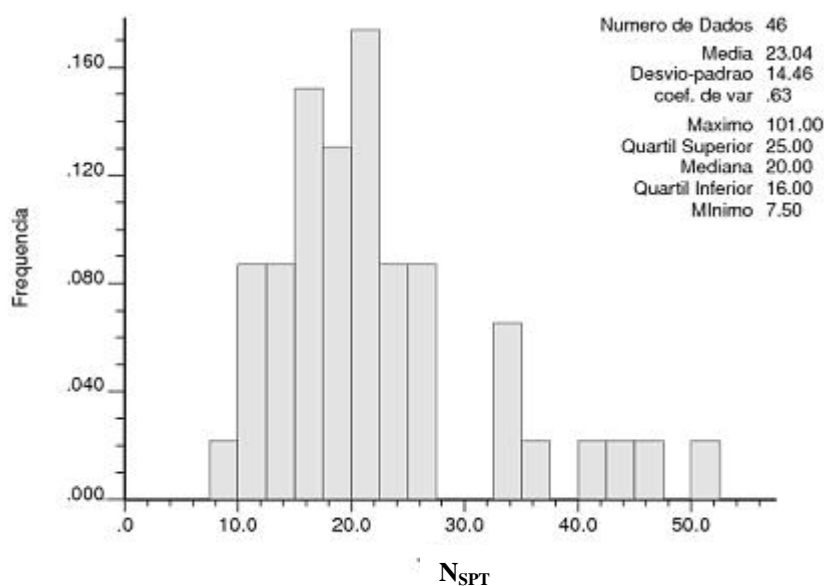


Figura 72 – Histograma para a variável N_{SPT} para a segunda camada (16m a 20m) na condição não-saturado.

Ao se observar os valores apresentados na Tabela 13, percebe-se que tanto os valores de N_{SPT} das camadas 0m a 15m e 16m a 20m apresentaram pequeno grau de achatamento, assimetria a esquerda, mas que somente a primeira camada apresentou aderência à distribuição normal, com grau de confiabilidade de 95% (tal pode ser intuído visualmente através dos histogramas de frequência). Observa-se também que para a primeira camada os valores mais frequentes foram entre 10 e 12, e que para a segunda camada foram entre 20 e 22.

Calculadas as estatísticas descritivas, confeccionou-se a superfície variométrica para cada camada. Os resultados obtidos estão presentes nas Figuras 73 e 74.

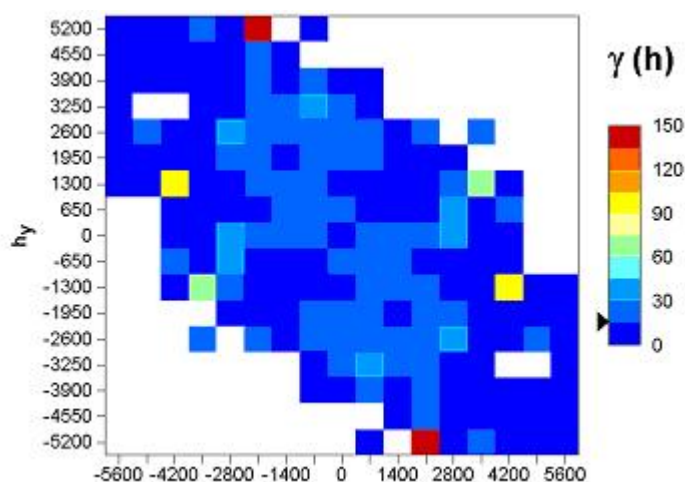


Figura 73 – Superfície variométrica para a variável N_{SPT} na condição não-saturado, para a primeira camada (0m a 15m).

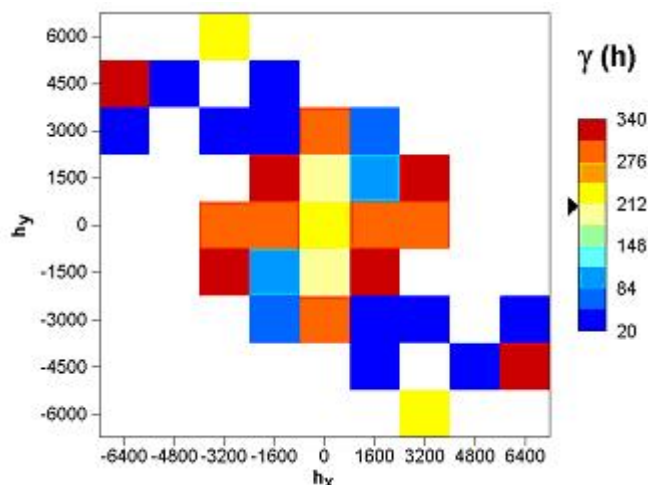


Figura 74 – Superfície variométrica para a variável N_{SPT} na condição não-saturado, para a segunda camada (16m a 20m).

A partir das superfícies variométricas para as camadas um e dois notou-se que o comportamento estrutural da variável é relativamente isotrópico, ou seja, o grau de variabilidade é semelhante em todas as direções, o que justificou a confecção de variogramas globais para ambas as camadas. Os mesmos estão apresentados nas Figuras 75 e 76.

Na Figura 74 nota-se também a existência relativa de poucos dados para análise estrutural (trechos em branco). Estima-se também que o comportamento dos variogramas da primeira camada será mais uniforme, já que ela apresenta uma menor variabilidade espacial, ou seja, os valores da superfície variométrica estão próximos da variância calculada.

Ao se confeccionarem os variogramas experimentais percebeu-se que o variograma experimental da segunda camada revelou praticamente a inexistência de correlação espacial entre as amostras consideradas (aleatoriedade total) conforme a Figura 76.

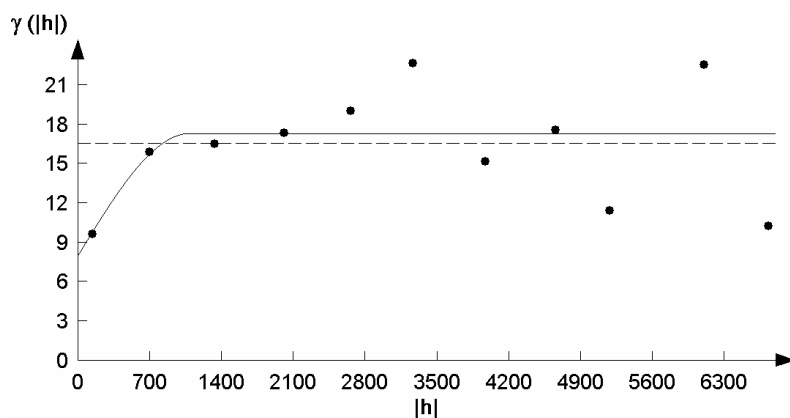


Figura 75 – Variograma teórico global ajustado ao variograma experimental para a primeira camada (0m a 15m).

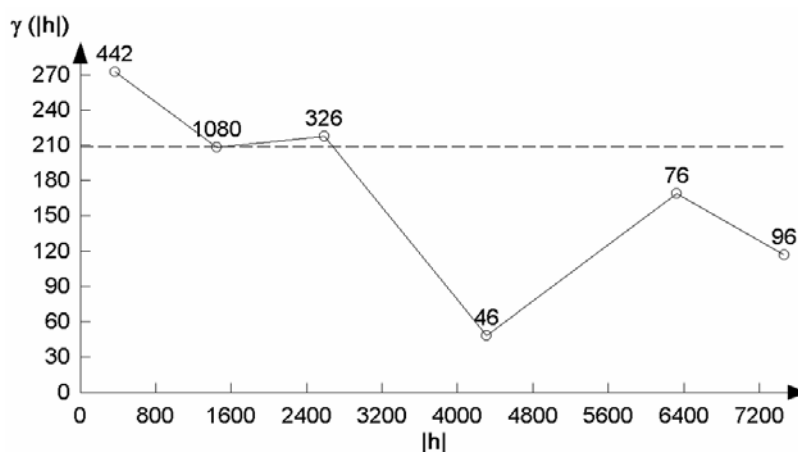


Figura 76 - Variograma experimental global para a segunda camada (16m a 20m).

Os valores dos parâmetros de referencia para os variogramas teóricos estão apresentados na Tabela 14.

Tabela 14 – Valores de parâmetros dos variogramas teóricos obtidos para as camadas de 0m 15m e 16m a 20m de profundidade.

PARÂMETRO	CAMADA	
	0m a 15m	16m a 20m
Modelo	Esférico	-
Direção	Omnidirecional	-
Range	1088	-
Sill	9,35	-
Nugget	7,99	-
E	1,17	-
Ajuste Validação Cruzada	0,001058	-

Através da Tabela 14 nota-se que o alcance de relação entre uma e outra sondagem, respeitado o grau de influência inversamente proporcional à distância entre elas, é de no máximo 1088 m. O teste de validação cruzada revelou que o variograma confeccionado é representativo das características estruturais da amostra (pequeno valor), e que o grau de aleatoriedade é muito significativo.

De posse dos valores das características estruturais calculadas através dos variogramas, confeccionou-se a interpolação dos valores de N_{SPT} através do algoritmo da krigagem, com seus respectivos desvios-padrão. Os resultados são apresentados nas Figuras 77 e 78.

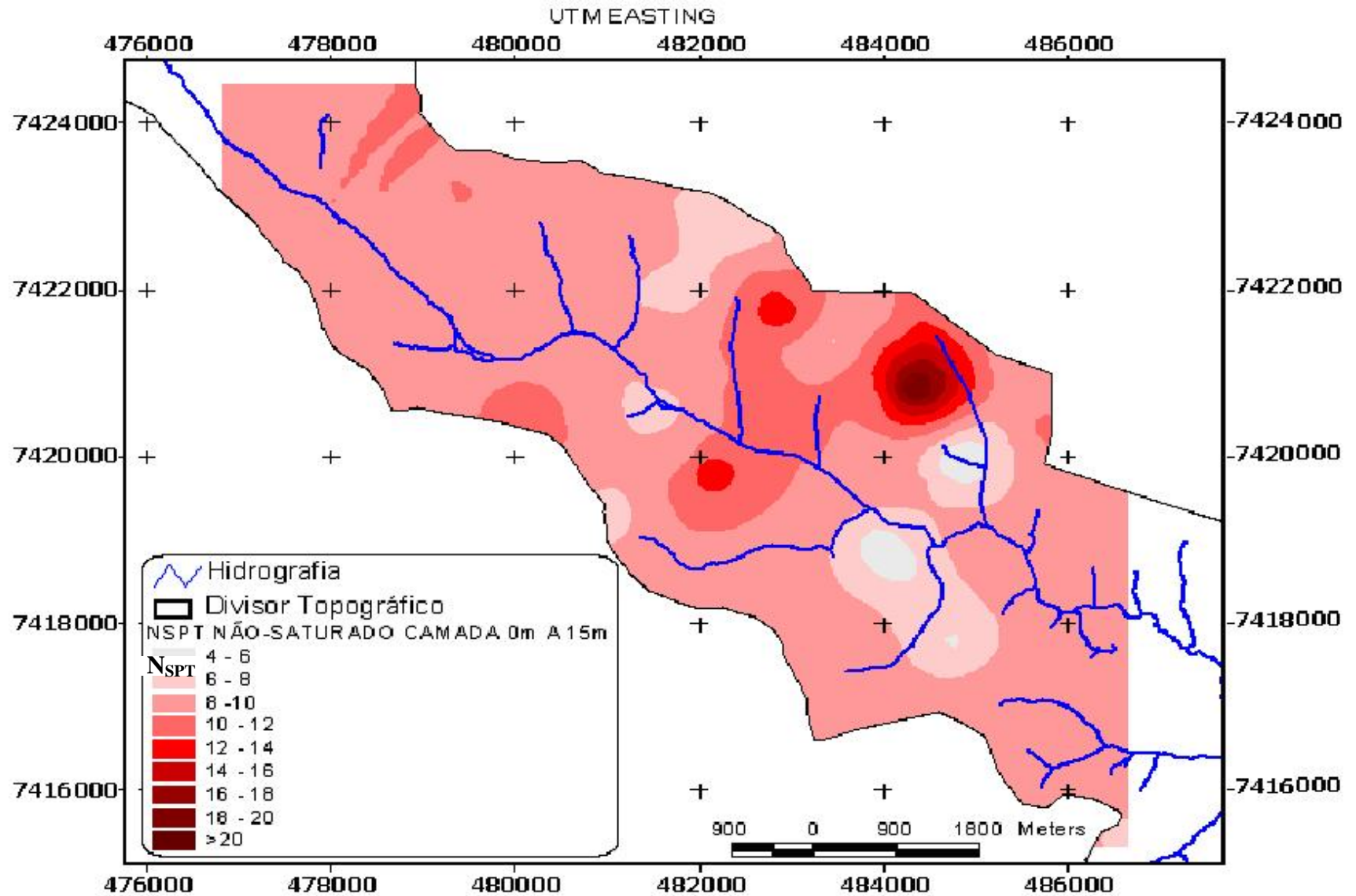


Figura 77 – Carta para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para a primeira camada (0,0m a 15,0m).

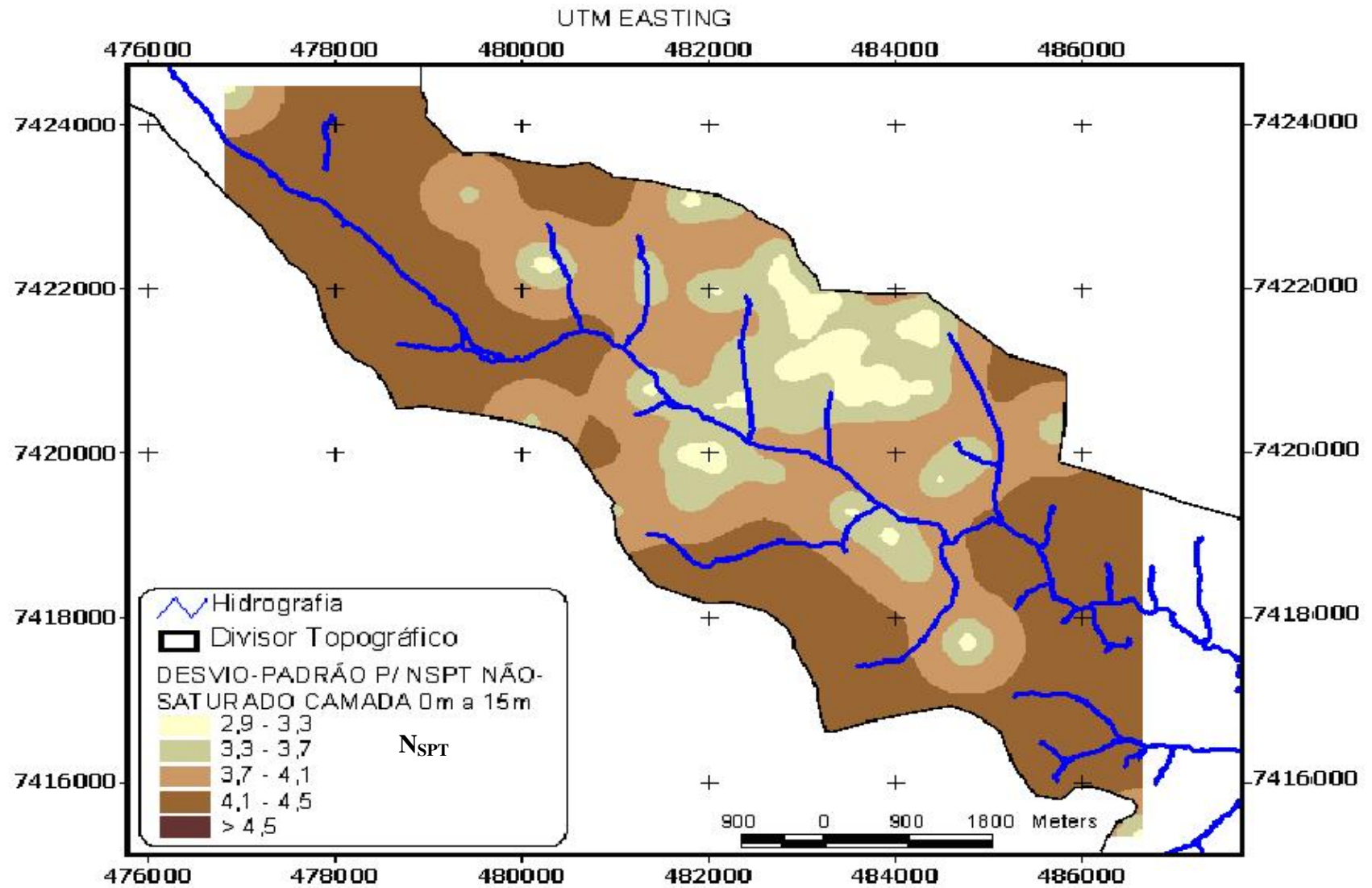


Figura 78 – Carta dos desvios-padrão para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para a primeira camada (0,0m a 15,0m).

Ao se analisar a Figura 77 percebe-se que a maior parte da área em estudo apresentou valores médios de N_{SPT} na camada de 0m a 15m de profundidade em torno de 8 a 10, porém com um aumento considerável de resistência à penetração do amostrador-padrão chegando a valores maiores do que 20. Ao se comparar o local em questão com carta de desvios-padrão nota-se que tal faixa de valores está sobre o local com menores desvios-padrão, o que confere certa confiabilidade sobre os resultados. O quociente entre os valores médios estimados no local para N_{SPT} e desvio-padrão indicam um coeficiente de variação máximo de 17,5 %, o que não indica uma dispersão significativa de valores em torno da média.

Para compreensão da presença do pico de resistência para o local em questão, recorreu-se aos boletins de sondagem para verificação do perfil estratigráfico atravessado. Os furos de sondagem localizados na região em questão são os de número 191 a 195, todos eles pertencentes à mesma obra. Notou-se que os mesmos, desde o início, atravessavam a camada de saprolito (material inconsolidado) até atingirem o ponto impenetrável ao amostrador. Além de o local apresentar um perfil de solo relativamente raso (considerando que estão em um latossolo), as sondagens 191 a 194 foram realizadas após um corte no terreno de aproximadamente 2,5 metros. Por conta disso os furos de sondagem se iniciaram praticamente dentro do horizonte C. As descrições dos boletins de sondagem apontam para a existência de argila variegada, com cores variando de vermelho claro a laranja, ou marrom, ou cinza esverdeado, chegando a fragmentos de rocha, sendo esta a razão no incremento de resistência observada.

6.2 N_{SPT} – EXTRATO SATURADO

A área em estudo é composta em sua maior parte de tipos pedológicos que possuem espesso horizonte B (Latosolos e Nitossolos – Anexo A) o que pode ser tomado como indicativo que relativamente poucos furos de sondagem detectariam o nível do freático a pouca profundidade, a não ser pelas sondagens realizadas próximas às drenagens naturais da bacia ou as que alcançaram maior profundidade. Por esta razão a camada de 4 a 7 metros não apresentou dados suficientes para incluí-la nos estudos, isto é, no mínimo 30 furos de sondagem.

Para cada camada calcularam-se os seguintes parâmetros de estatística clássica apresentados na Tabela 15 e nas Figuras 79, 80 e 81.

Tabela 15 – Estatísticas descritivas para a variável N_{SPT} na condição saturada.

PARÂMETRO	CAMADA		
	8 a 13	14 a 20	> 21
Coef. de Assimetria	1,155	1,735	1,04
Coef. de Curtose	1,885	4,447	1,393
Estatística de Kolmogorov-Smirnov	0,128	0,151	0,11
Valor Crítico da Estatística de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,05$)	0,185	0,153	0,192

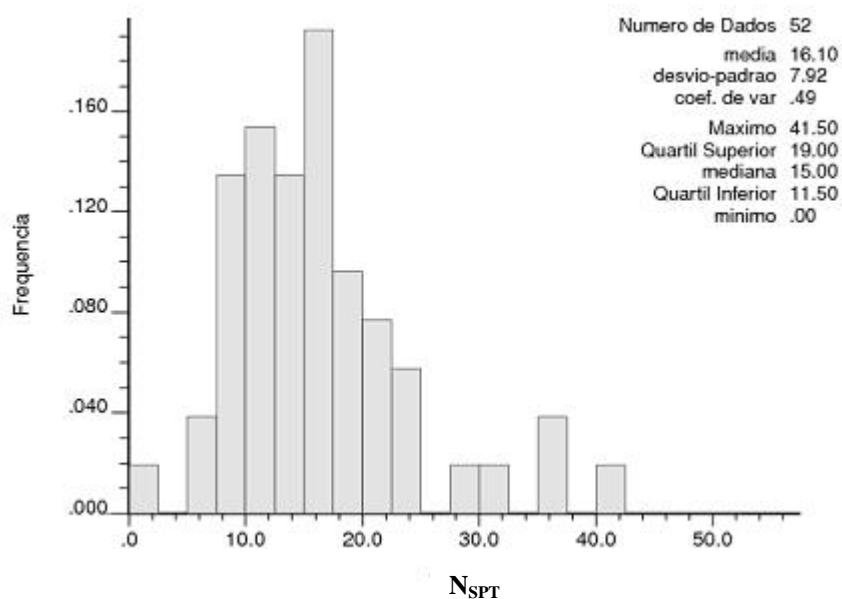


Figura 79 – Histograma para a variável N_{SPT} para a camada com profundidade entre 8m a 13m na condição saturada.

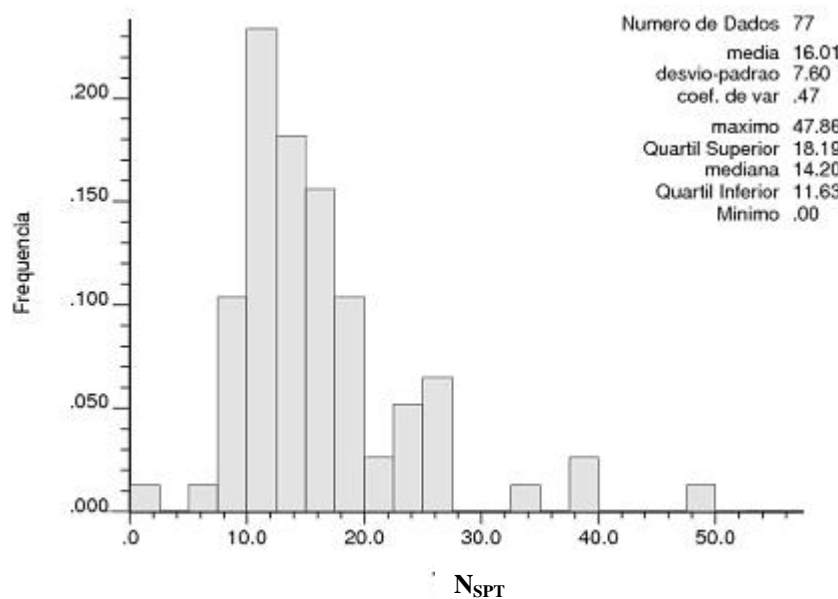


Figura 80 – Histograma para a variável N_{SPT} para a camada com profundidade entre 14m a 20m na condição saturada.

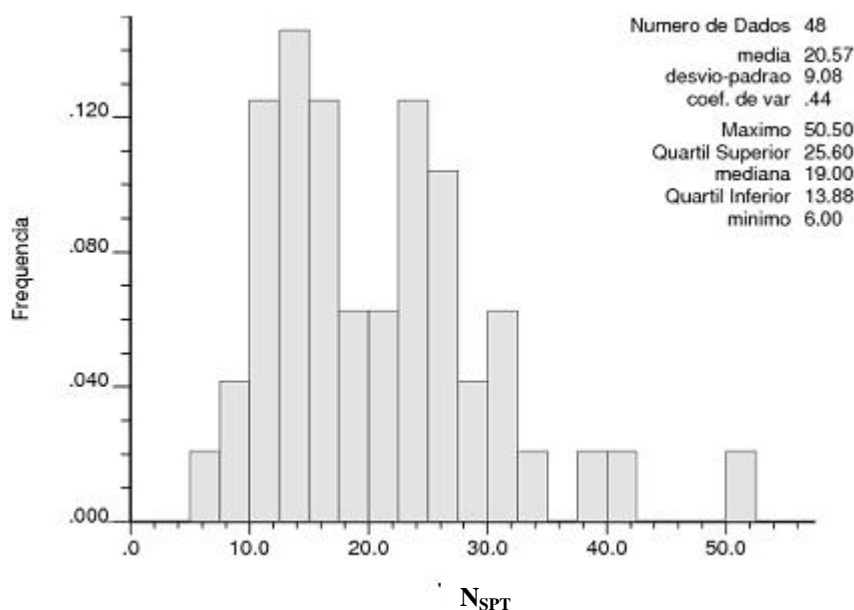


Figura 81 – Histograma para a variável N_{SPT} para a camada com profundidade a partir de 21m na condição saturada.

Os valores de N_{SPT} , referentes às três camadas, quando agrupados em forma de histograma, apresentam-se com pequeno grau de achatamento, assimetria à esquerda, e aderência à distribuição normal (com grau de confiabilidade de 95%).

Nota-se também nas Figuras 79, 80 e 81 que a maior concentração de valores de N_{SPT} está entre 15 e 17 para a primeira camada, entre 10 e 12 para a segunda camada e entre 12 a 15 para a terceira camada.

O próximo passo foi a elaboração das superfícies variométricas para cada camada. Os resultados estão apresentados nas Figuras 82, 83 e 84.

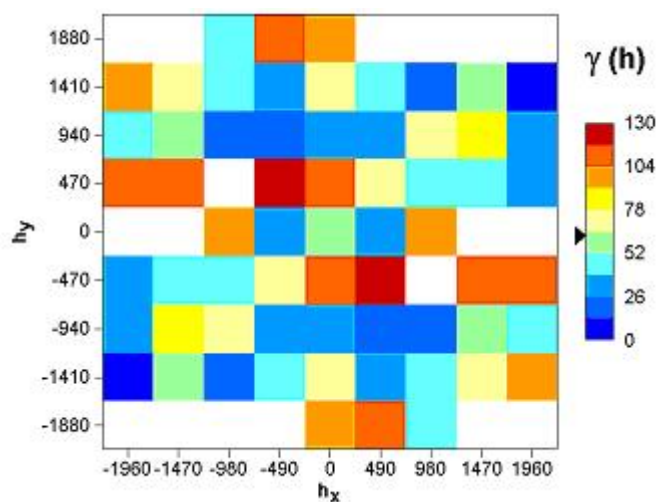


Figura 82 – Superfície variométrica para a variável N_{SPT} na condição saturada, para a camada de 8m a 13m.

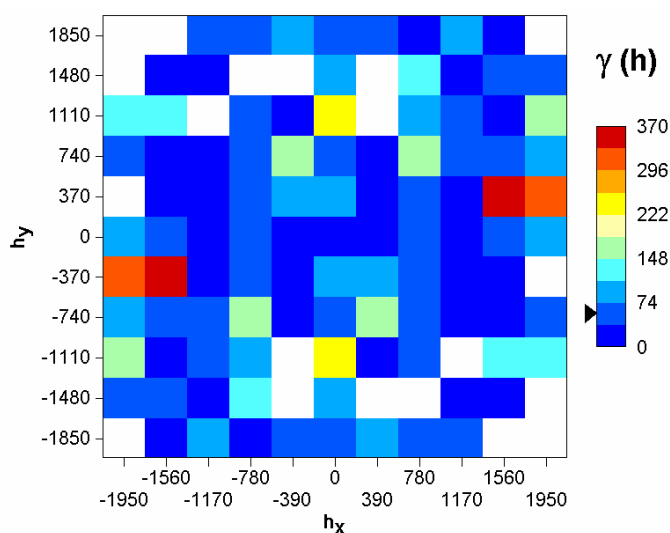


Figura 83 – Superfície variométrica para a variável N_{SPT} na condição saturada, para a camada de 14m a 20m.

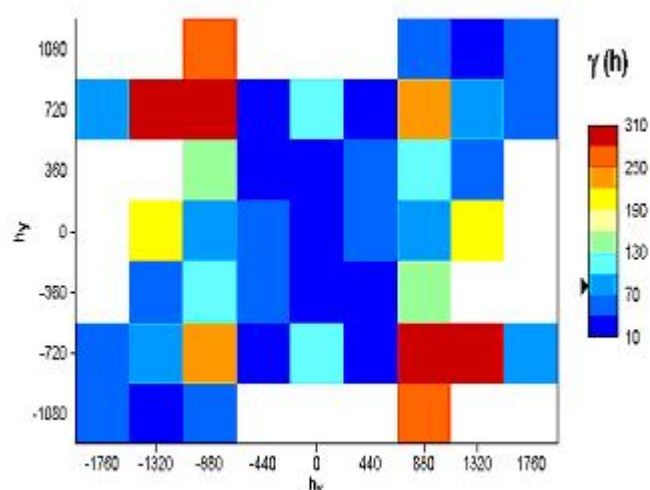


Figura 84 – Superfície variométrica para a variável N_{SPT} na condição saturada, para a camada com profundidade a partir de 21m.

Através das superfícies variométricas notaram-se leves anisotropias nas duas primeiras camadas, e anisotropia mais pronunciada na terceira camada. Então se elaboraram-se os variogramas experimentais para varias direções para se analisar a necessidade de se considerar as anisotropias das duas primeiras camadas ou não. Após exaustivas tentativas notou-se que o grau de anisotropia nas duas primeiras camadas praticamente não influenciou significativamente os valores de *range* e *sill* calculados para os variogramas experimentais. Assim, para as primeiras duas camadas confeccionaram-se variogramas globais (omnidirecionais) e para a terceira camada nas direções 45° e 135° , conforme as Figuras 85, 86, e 87.

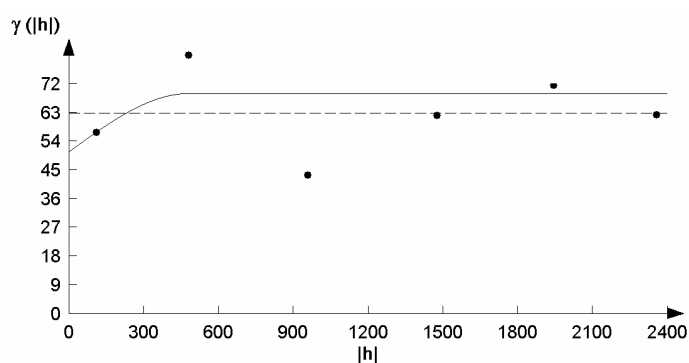


Figura 85 – Variograma teórico global para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada 8m a 13m.

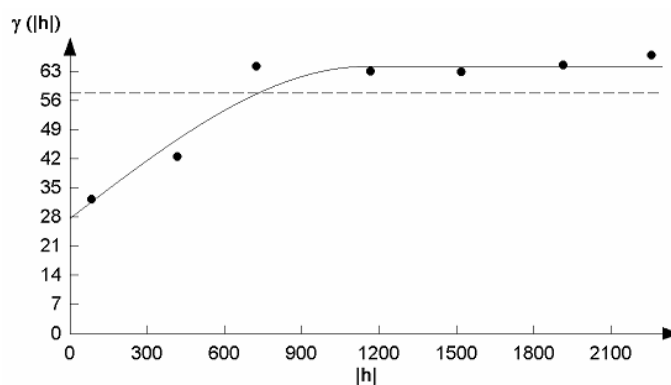


Figura 86 – Variograma teórico global para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada 14m a 20m.

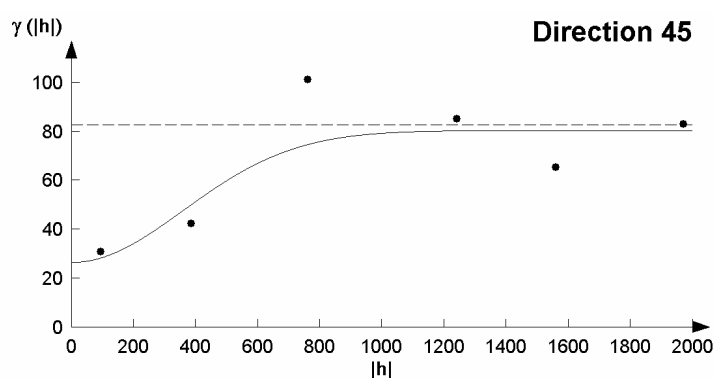


Figura 87 – Variograma teórico para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada com profundidade a partir de 21m.

Os parâmetros obtidos das camadas investigadas e constantes nos variogramas calculados anteriormente (figuras 85 e 87) encontram-se apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Valores de parâmetros dos variogramas obtidos para as camadas com profundidade 8m a 13m, 14m a 20m, e maior que 21m.

PARÂMETRO	CAMADAS			
	8m a 13m	14m a 20m	>21m	
Modelo	Esférico	Esférico	Gaussiano	Gaussiano
Direção	Omnidirecional	Omnidirecional	135° ⁽¹⁾	45° ⁽¹⁾
Range	480	1150	1365	294
Sill	18,2679	36,54	83	26.56
Nugget	50,8536	27,84	19.92	19.92
E	0,36	1,31	4,16	1,33
Ajuste Validação Cruzada	0,0016537	0,003148	0,003603	

¹: Razão de anisotropia: 0,217

Os valores calculados para o parâmetro E revelam que o grau de aleatoriedade é muito significativo para todas as camadas. Por outro lado o teste de validação cruzada revelou que os variogramas calculados representam bem o fenômeno estudado.

Os valores dos parâmetros *range* e *sill* obtidos para os variogramas teóricos nas direções 45° e 135° revelam que a anisotropia presente é híbrida, ou seja, valores de *range* e *sill* diferentes para cada direção. A elipse de anisotropia forneceu para a camada com mais de 21,0 m de profundidade valores de *range* e *sill*, respectivamente de 1396 e 87.

De posse dos valores das características estruturais calculadas através dos variogramas, confeccionaram-se as interpolações dos valores de N_{SPT} através do algoritmo da krigagem, com seus respectivos desvios-padrão. Os resultados são apresentados nas Figuras 88, 89, 90, 91, 92 e 93.

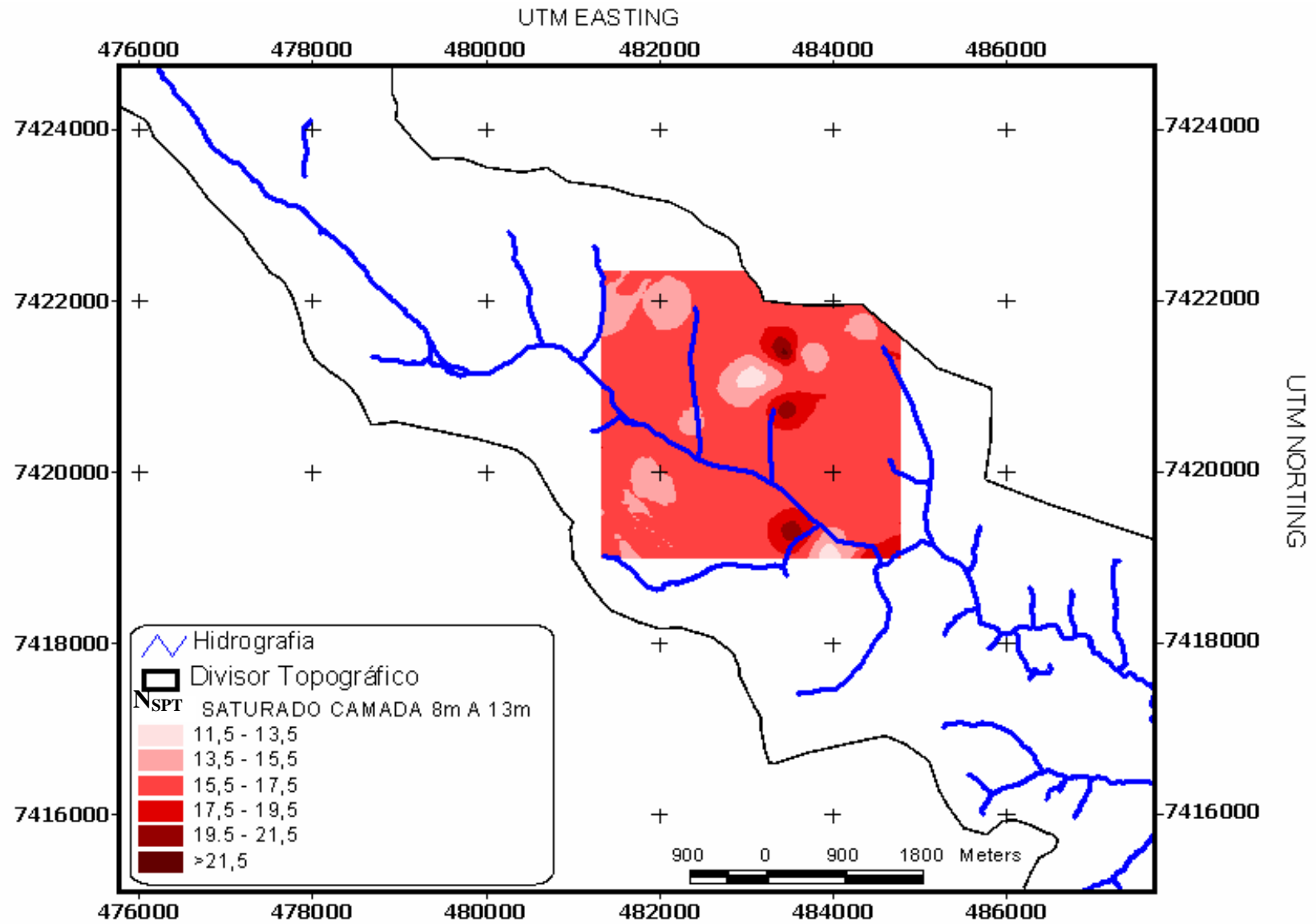


Figura 88 – Carta para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada com profundidade de 8,0m a 13,0m.

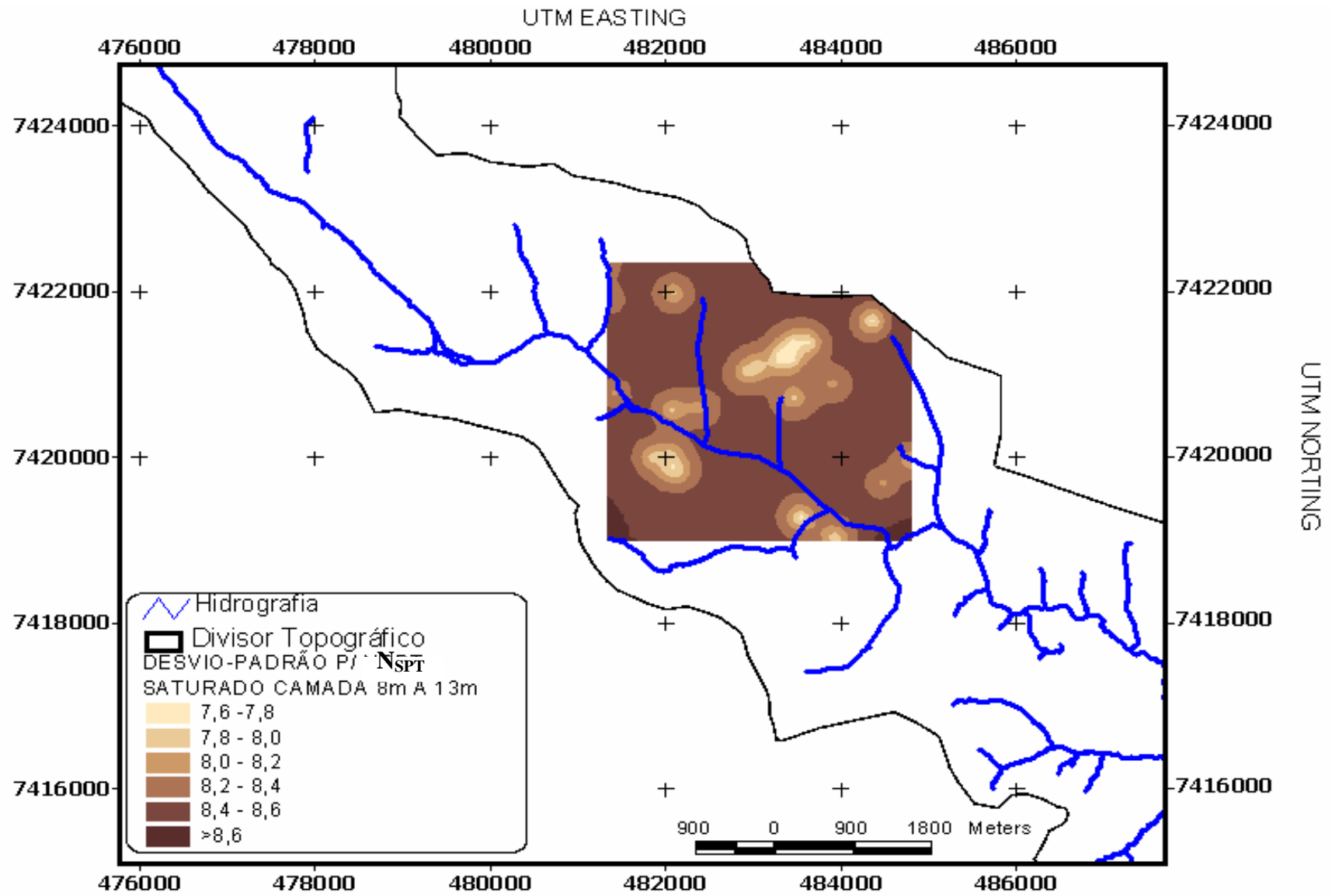


Figura 89 – Carta dos desvios-padrão para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada com profundidade de 8,0m a 13,0m.

Em relação à camada com profundidade de 8,0m a 13,0m para valores de N_{SPT} medidos na condição saturada, nota-se que a área de abrangência é bem menor se comparada com a da Figura 77. Nota-se também que a influência dos valores de determinada região sobre sua vizinhança é menor, sendo que tal informação poderia ser intuída através de uma comparação entre os valores de *range* de uma e outra condição (saturada e não-saturada).

Na maior parte da área interpolada (FIGURA 88) os valores médios de N_{SPT} encontram-se entre 15,5 e 17,5, o que por sua vez são maiores que os encontrados na condição não-saturada para a camada com profundidade aproximadamente correspondente. Tal fato pode ser explicado tendo em vista que a presente camada não abrange os primeiros 8,0 m superficiais, que por possuírem valores baixos de N_{SPT} causam o abaixamento da média final para a área como um todo.

Em relação à carta de desvios-padrão (FIGURA 89) nota-se, como já era de se esperar, os menores valores de desvio-padrão nas áreas com maior concentração de dados analisados nesta camada. Ao se comparar os valores médios obtidos na maior parte da área tanto de média como de desvios-padrão, obteve-se um valor médio de coeficiente de variação de 50%, o que pode ser considerado alto, evidenciando assim uma grande dispersão de valores em relação à média.

Ao se analisar os boletins de sondagem das áreas que apresentaram maior resistência na Figura 88, nota-se que estas sondagens estavam, na profundidade considerada nesta camada, atravessando material inconsolidado (saprolito), sendo que em alguns dos relatórios das citadas sondagens registram a presença de rocha fragmentada.

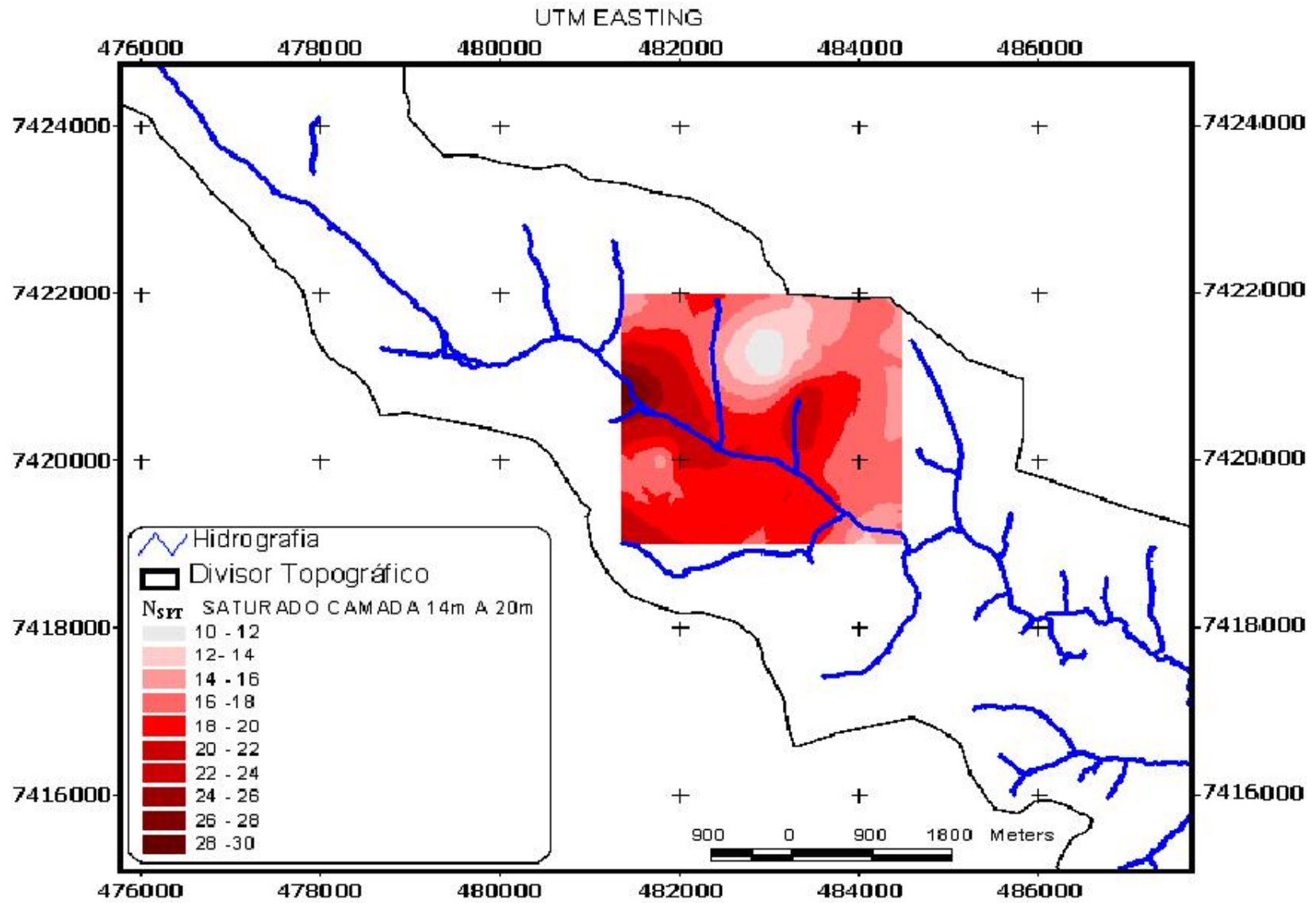


Figura 90 – Carta para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada compreendida entre 14,0m a 20,0m.

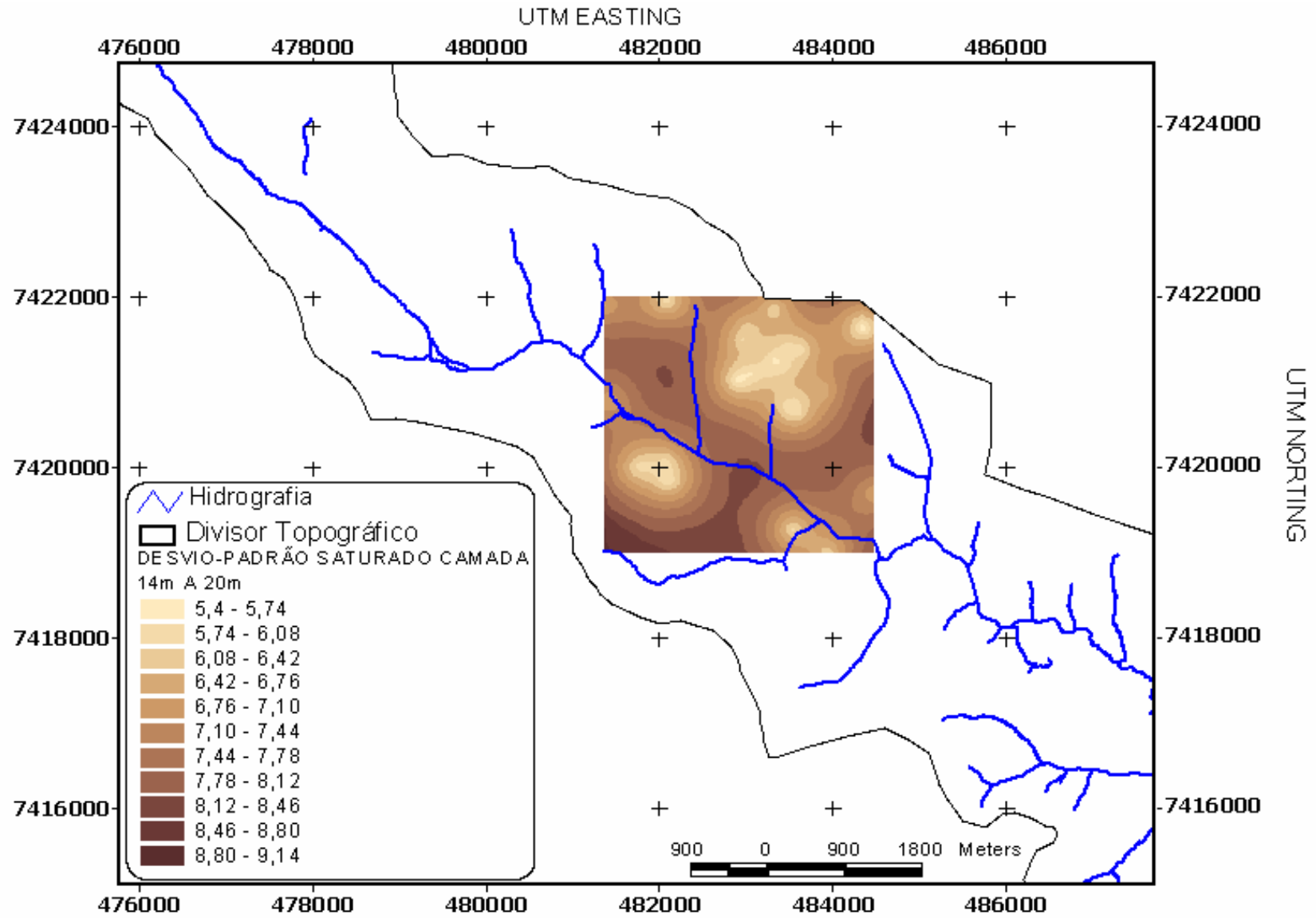


Figura 91 – Carta dos desvios-padrão para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada compreendida entre 14,0m a 20,0m.

Na carta da Figura 90 percebe-se um número de classes de resistência à penetração do amostrador-padrão é maior do que o observado na carta da camada 8,0m a 13,0m, considerando que o critério para escolha do número de classes foi o mesmo para todas as cartas (classes a cada duas unidades). Isto reflete o fato desta camada apresentar maior quantidade de furos de sondagem e conseqüente melhor distribuição espacial deles, fazendo assim com que eles sejam mais representativos dos fenômenos analisados. Isso pode ser percebido pela diferença entre o efeito pepita de uma e outra camada, observado na carta de desvios-padrão (Figura 91).

Ainda analisando a carta da Figura 90 percebe-se uma concentração dos valores de maior resistência à penetração, próximo às drenagens naturais da bacia, ainda que este fato não seja válido para toda a área em análise. Esta área de maior resistência apresenta uma grande variação em termos de desvio-padrão, com valores desde 5,74 até 8,12 (variação de até 40%).

As sondagens que se encontram na região de maior resistência observada na Figura 90 não estavam compreendidas na camada de solo saprolito, porém foram executadas após um corte no terreno de aproximadamente 3,50 m de profundidade, encontrando assim um solo mais resistente.

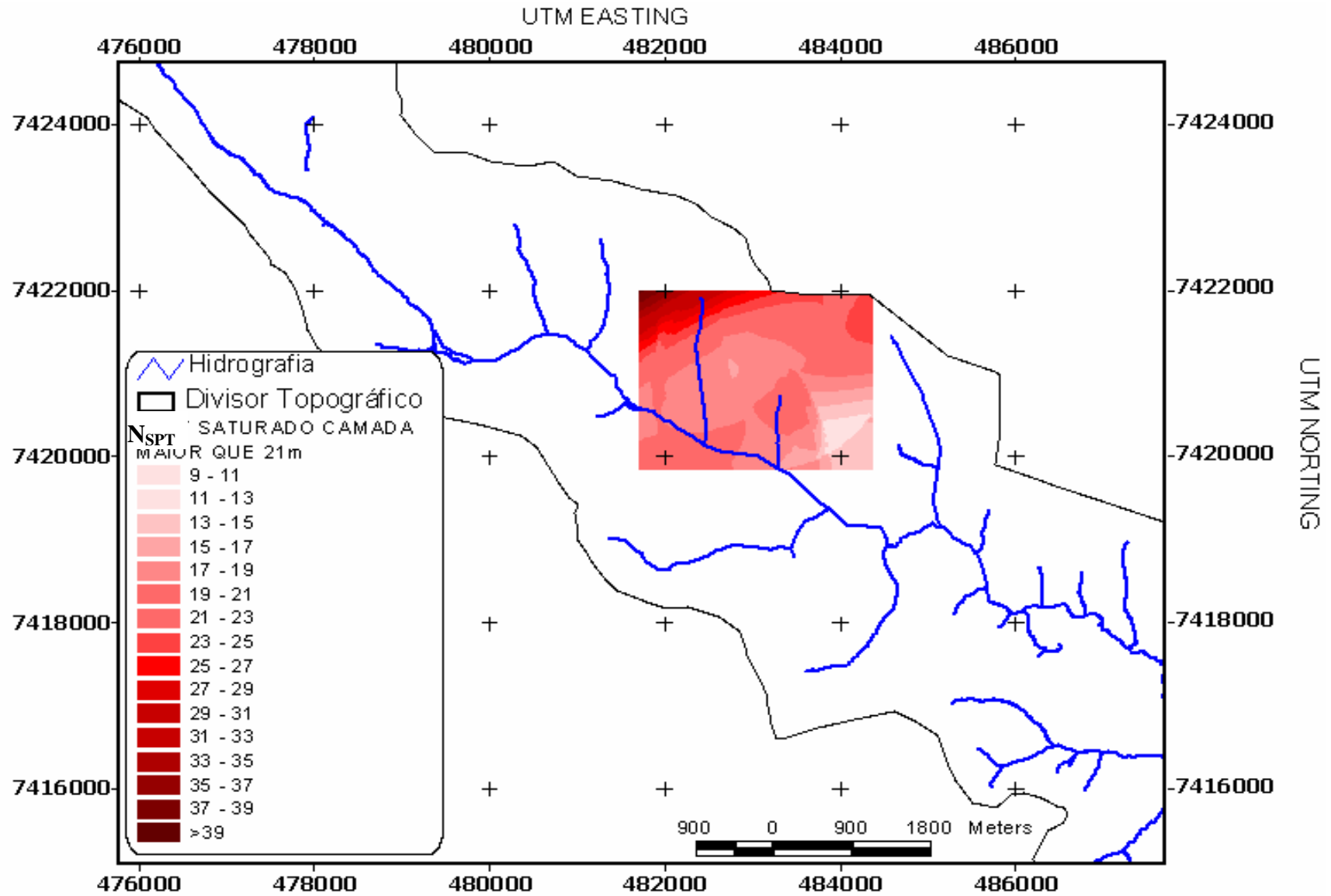


Figura 92 – Carta para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada com profundidade maior de 21,0m.

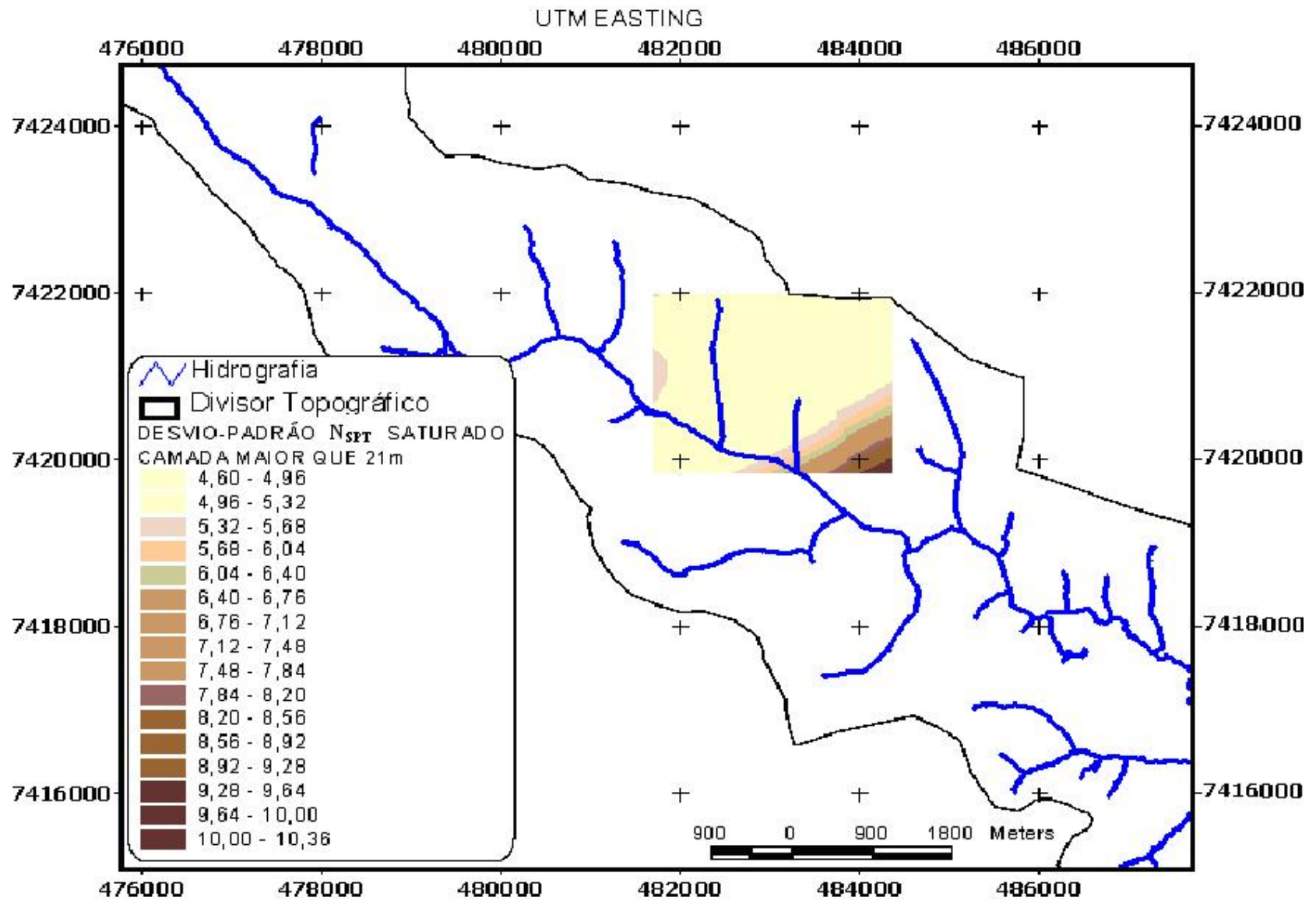


Figura 93 – Carta dos desvios-padrão para a variável N_{SPT} na condição saturada para a camada com profundidade maior de 21,0m.

Percebe-se na Figura 92 que, apesar das sondagens selecionadas para esta camada atingirem profundidades maiores que a 21,0 m, o que aumenta a probabilidade de se interceptar o aquífero freático, o número de sondagens que atingiu esta profundidade é reduzido, o que justifica a pequena área interpolada.

Nota-se ainda, através da Figura 92, que os menores valores de N_{SPT} estão associados a um eixo levemente perpendicular ao eixo da drenagem natural da bacia e que esta área apresenta os menores desvios-padrão, ainda que em média apresentam coeficiente de variação em torno de 28%.

Através da carta de valores médios de N_{SPT} (Figura 92) e da carta de desvios-padrão (Figura 93) verifica-se que os locais com menor confiabilidade de resultados (maiores valores de desvio-padrão) são os que apresentaram menores resistências.

6.3 TORQUE MÁXIMO – EXTRATO NÃO-SATURADO

Notou-se que a separação entre valores medidos de Torque Máximo em condições saturadas e não-saturadas fez com que o comportamento da variável em questão apresentasse menos variações entre valores crescente e decrescente. Prova disso é o número diminuto de camadas com comportamento geomecânico distintos. Notou-se que isto ocorreu somente para as análises não-saturadas, tanto para N_{SPT} quanto para Torque Máximo.

A partir da divisão das camadas em termos de comportamento, calcularam-se alguns parâmetros da estatística clássica para caracterização da camada, conforme a Tabela 17 e os histogramas de frequência de valores (Figuras 94 e 95). A camada com profundidade maior de 21m não foi considerada por apresentar poucos valores, o que inviabilizaria a análise geoestatística.

Tabela 17 – Estatísticas descritivas para a variável Torque Máximo na condição não-saturada para todas as camadas.

PARÂMETRO	CAMADA		
	1m a 15m	16m a 20m	> 21m
Coef. de Assimetria	0,936	-0,225	-
Coef. de Curtose	1,146	-0,352	-
Estatística de Kolmogorov-Smirnov	0,091	0,068	-
Valor Crítico da Estatística de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,05$)	0,101	0,155	-

Os valores apresentados na Tabela 17 revelam que a primeira camada apresenta assimetria à esquerda e pequeno grau de achatamento, bem como aderência satisfatória à distribuição normal (com grau de confiabilidade de 95%). Já a segunda camada apresentou assimetria à direita, grande grau de achatamento e aderência satisfatória à distribuição normal também.

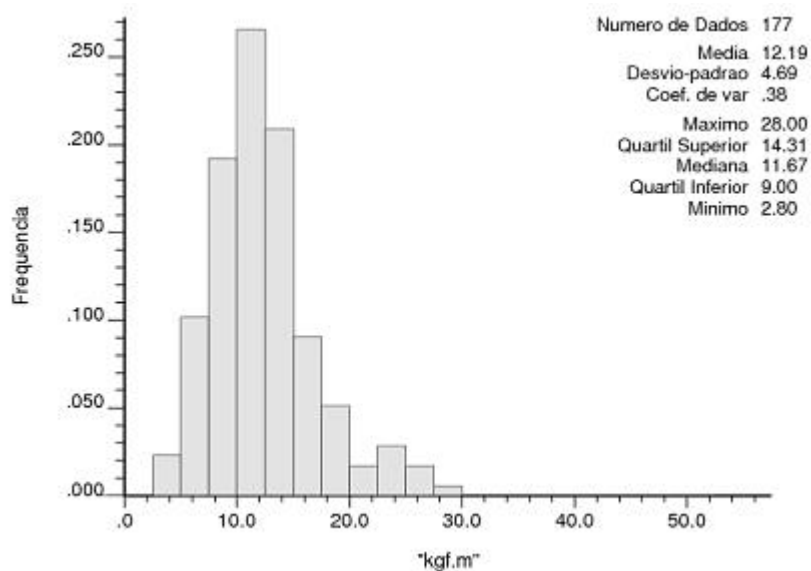


Figura 94 – Histograma para a variável Torque Máximo para a camada com profundidade entre 1,0m e 15,0m na condição não-saturada.

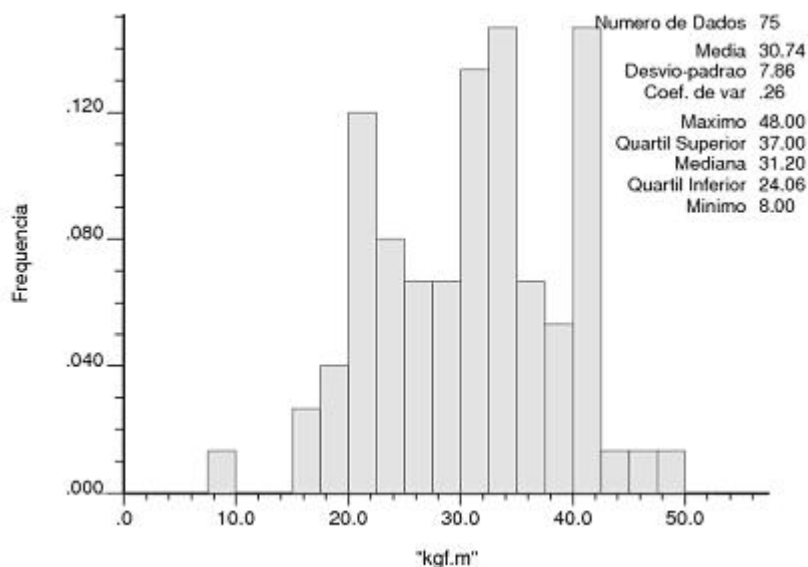


Figura 95 – Histograma para a variável Torque Máximo para a camada com profundidade entre 16,0m e 20,0m na condição não-saturada.

Através das Figuras 94 e 95 nota-se que para a primeira camada os valores mais freqüentes de Torque Máximo se concentram em torno de 10 kgf.m a 12 kgf.m. Já para a segunda existem 4 faixas de valores mais freqüentes, sendo elas de 20 kgf.m a 22 kgf.m, 30 kgf.m a 32 kgf.m, 32 kgf.m a 34 kgf.m, e 40 kgf.m a 42 kgf.m.

Na seqüência construiu-se as superfícies variométricas. Os resultados se encontram nas Figuras 96 e 97.

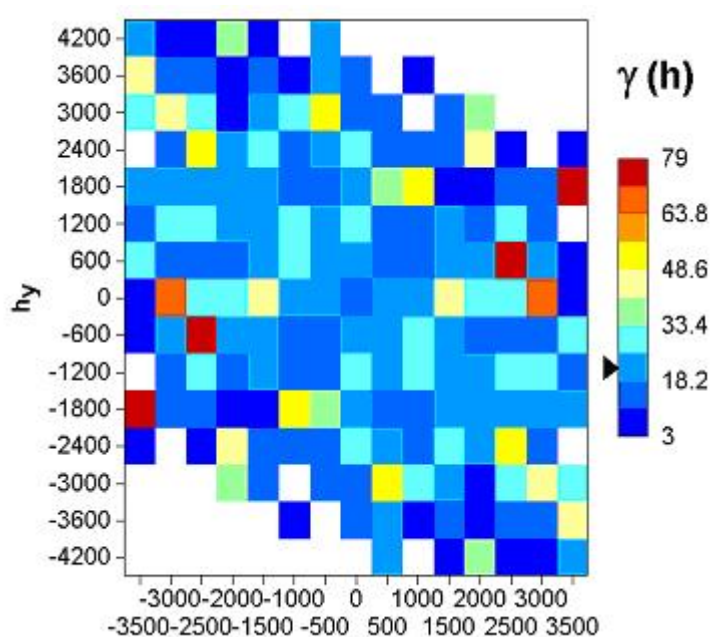


Figura 96 – Superfície variométrica para a variável Torque Máximo na condição não-saturada, para a camada de 1,0m a 15,0 m de profundidade.

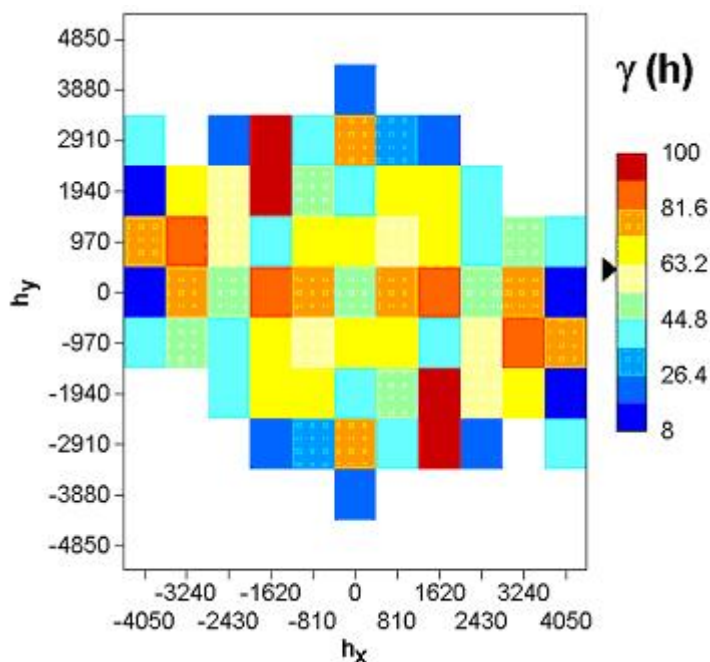


Figura 97 – Superfície variométrica para a variável Torque Máximo na condição não-saturada, para a camada de 16,0m a 20,0 m de profundidade.

Assim como no caso das duas primeiras camadas na condição não saturada para a variável N_{SPT} , nota-se que tanto a primeira como a segunda apresentaram uma pequena anisotropia em termos de variabilidade, o que após verificações feitas através de diversos variogramas experimentais revelaram não ser significativas a ponto de serem consideradas separadamente. Assim foram elaborados variogramas experimentais e teóricos globais para as duas primeiras camadas, os quais são apresentados a seguir através das Figuras 98 e 99, com seus respectivos valores de parâmetros apresentados na Tabela 18.

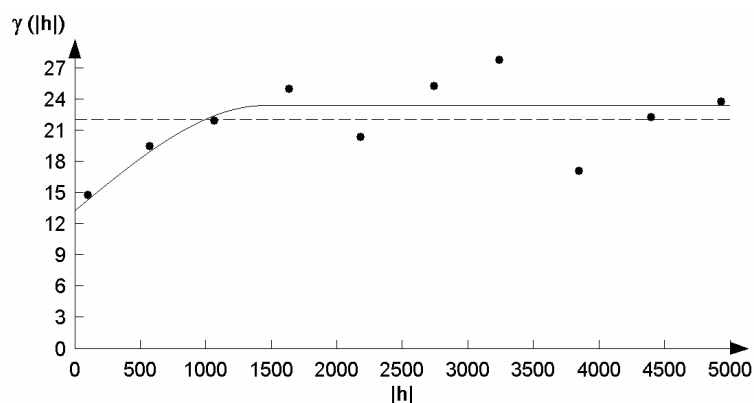


Figura 98 – Variograma teórico global para a variável Torque Máximo na condição não-saturada para a camada 1,0 m a 15,0 m.

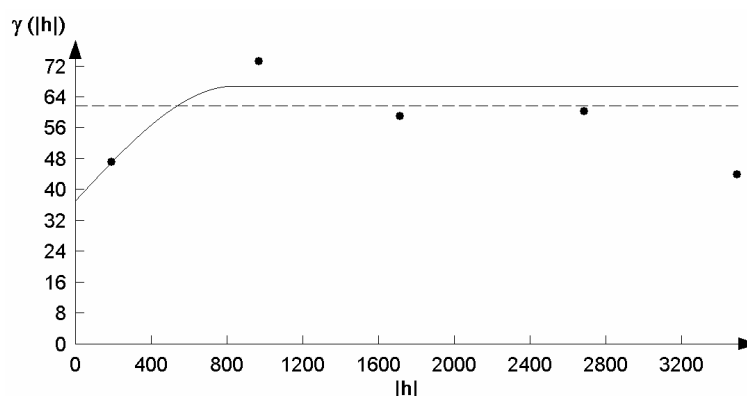


Figura 99 – Variograma teórico global para a variável Torque Máximo na condição não-saturada para a camada 16,0 m a 20,0 m.

Tabela 18 – Valores de parâmetros dos variogramas globais teóricos obtidos para as camadas com profundidade 1,0m a 15,0m, 16,0m a 20,0m, e maior que 21,0m.

PARÂMETRO	CAMADAS		
	1,0m a 15,0m	16,0m a 20,0m	>21,0m
Modelo	Esférico	Esférico	-
Direção	Omnidirecional	Omnidirecional	-
Range	1450	839,88	-
Sill	10,12	29,76	-
Nugget	13,34	37,2	-
E	0,76	0,80	-
Ajuste Validação Cruzada	0,001245	0,005438	-

As duas camadas apresentaram componente aleatória muito significativa bem como a validade dos variogramas calculados, isto sendo evidenciado através dos baixos valores resultantes do teste de validação cruzada.

De posse dos valores das características estruturais calculadas através dos variogramas, confeccionou-se a interpolação dos valores de Torque Máximo através do algoritmo da krigagem, com seus respectivos desvios-padrão. Os resultados são apresentados nas Figuras 100, 101, 102 e 103.

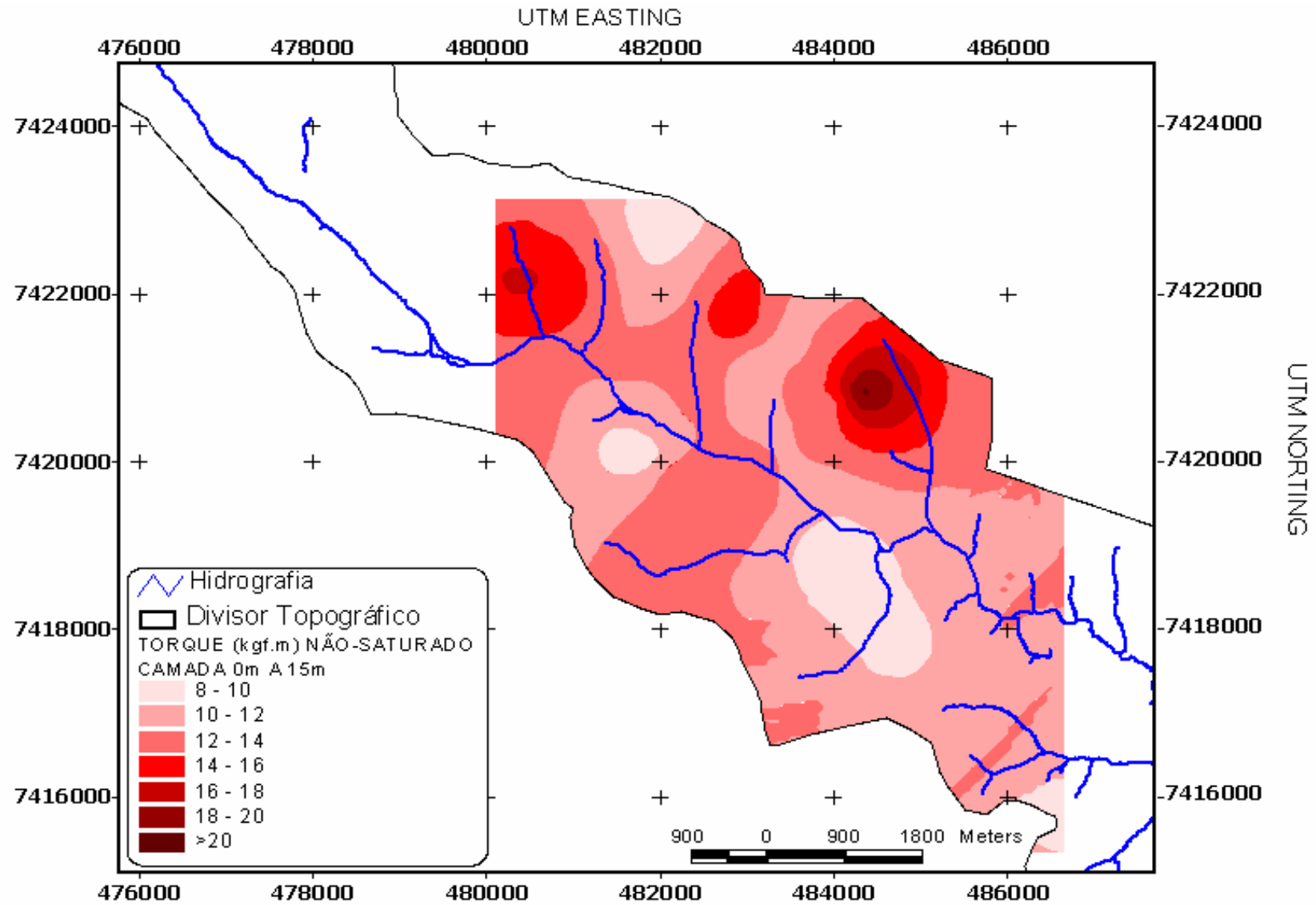


Figura 100 – Carta para a variável Torque Máximo na condição não-saturada para a camada com profundidade entre 0,0m e 15,0m.

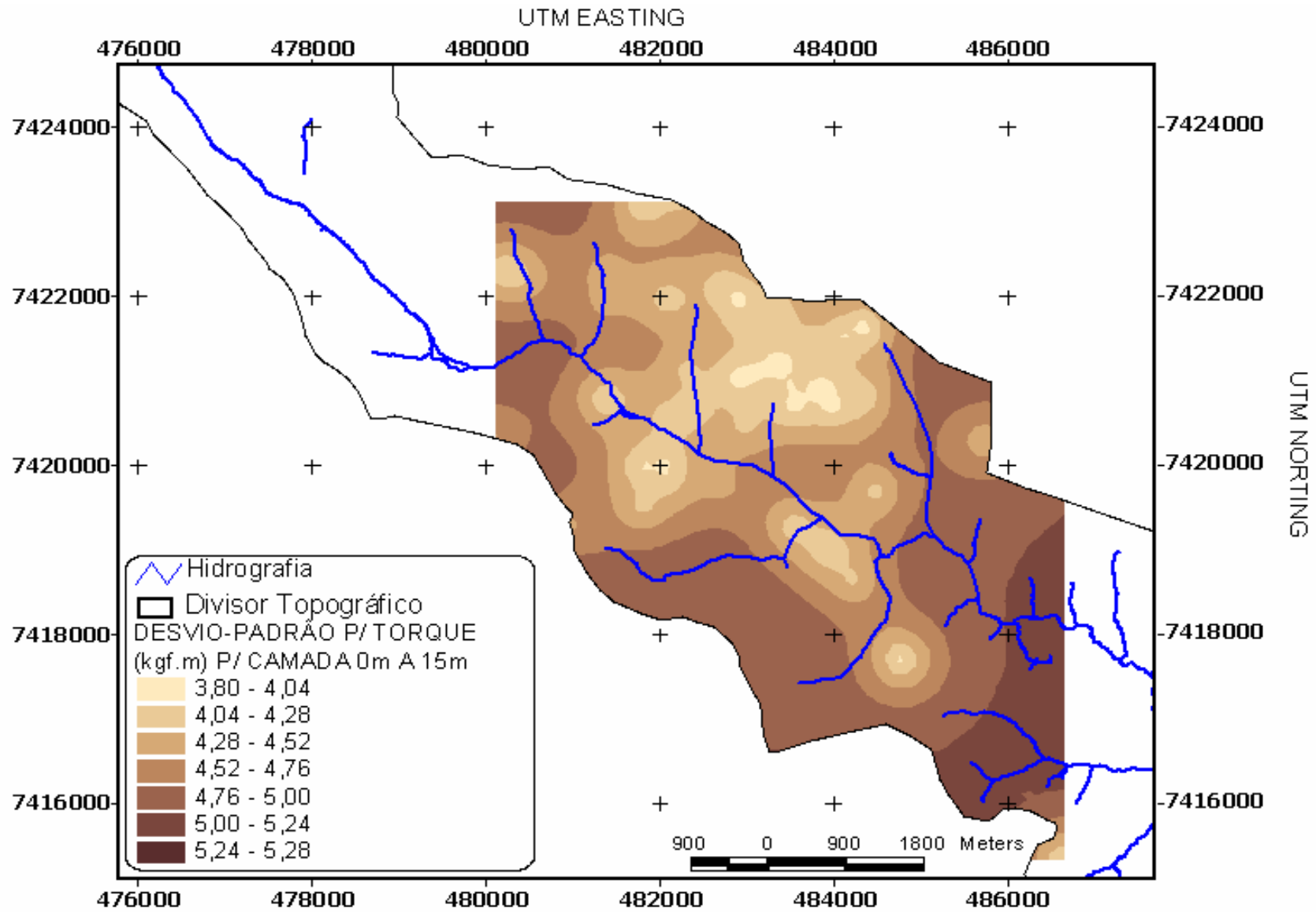


Figura 101 – Carta dos desvios-padrão para a variável Torque Máximo na condição não-saturada para a camada com profundidade entre 0,0m e 15,0m.

A Figura 100 retrata a distribuição espacial da variável Torque Máximo para a camada com profundidade variando de 0,0m a 15,0m. Nota-se nesta carta que a área aproximadamente entre as coordenadas 484.000 e 7.421.000 coincide com a área de maior resistência à penetração do amostrador-padrão para a mesma profundidade (Figura 77), o que evidencia que a relação entre valores de N_{SPT} e Torque Máximo é diretamente proporcional. Isto mostra que os valores de Torque Máximo tendem a aumentar em materiais mais inconsolidados (saprolito). Tal relação pode ser observada em toda a área em comum entre as duas cartas, com exceção da área com coordenadas aproximadas 480.000 e 7.422.000.

Em termos de desvio-padrão (Figura 101) a porção anterior da bacia apresentou valores menores se comparado com a porção posterior. Na porção anterior da bacia os valores estiveram entre 3,80 e 4,76, já a porção posterior esteve entre 4,76 e 5,28.

Nota-se também que a área preenchida com valores médios tanto para o Torque Máximo como para os desvios-padrão do Torque Máximo foi menor do que a observada nas interpolações apresentadas anteriormente, isto por conta do número de sondagens utilizadas para análise desta camada.

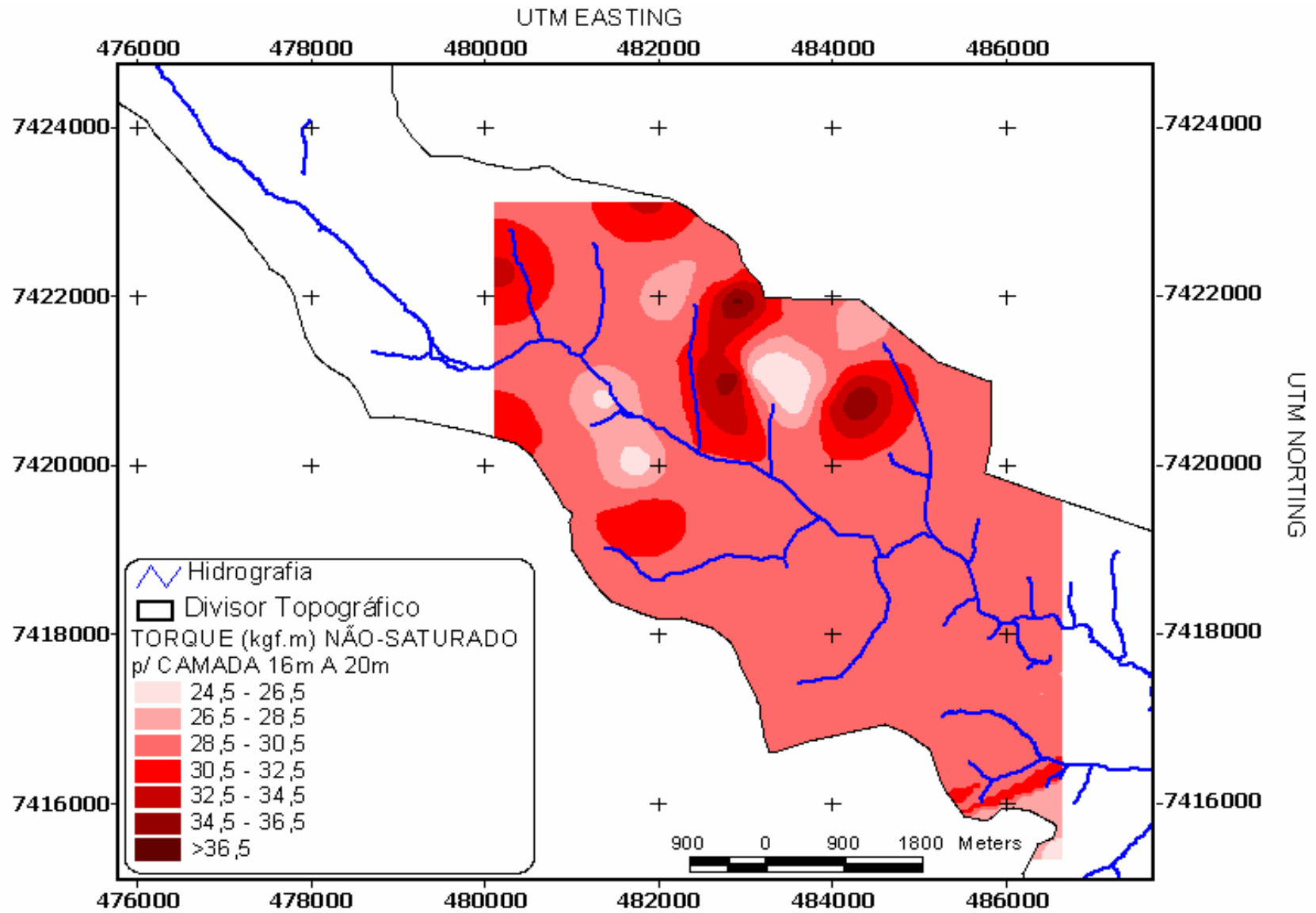


Figura 102 – Carta para a variável Torque Máximo na condição não-saturada para a camada compreendida entre 16,0m e 20,0m.

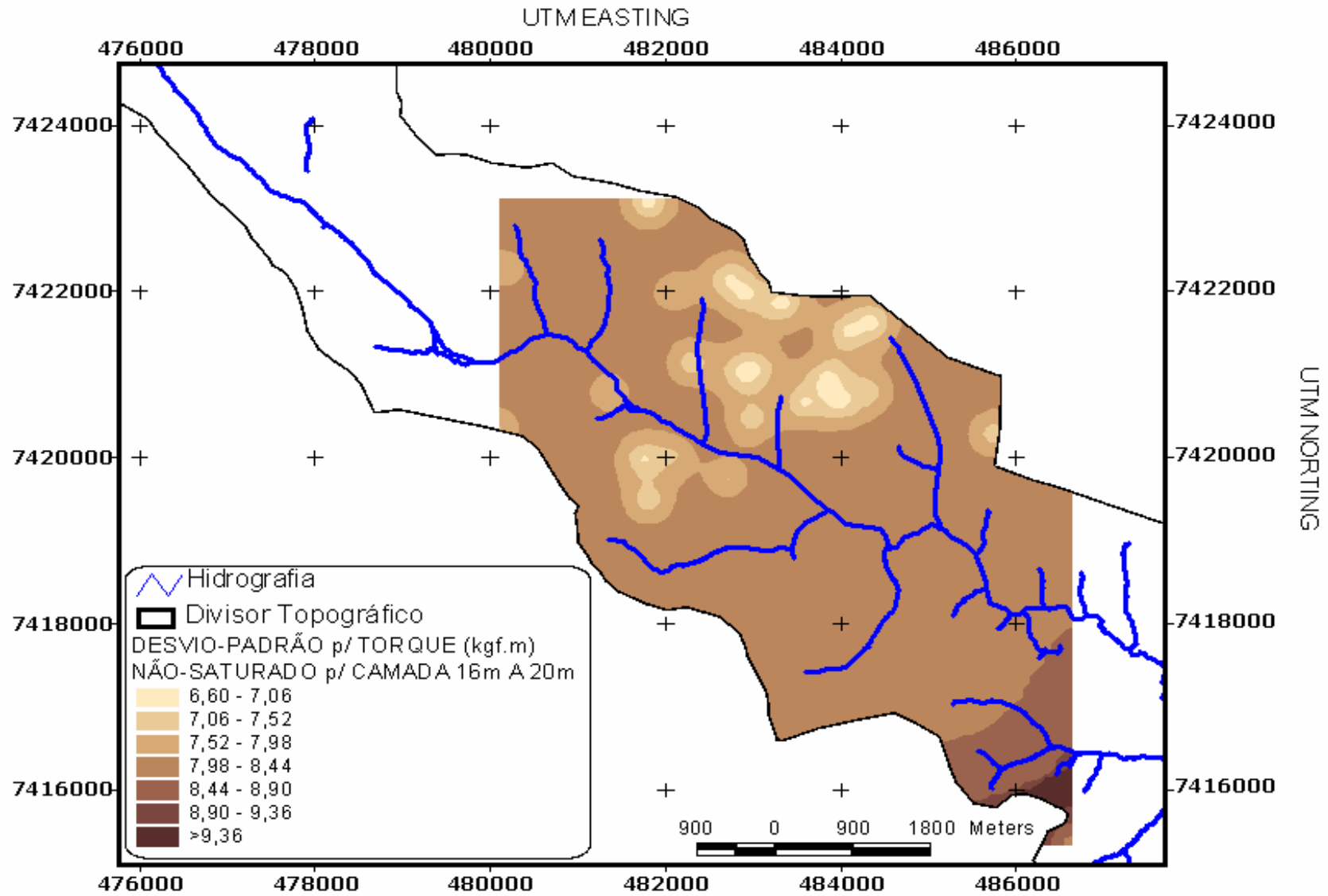


Figura 103 – Carta do desvio-padrão para a variável Torque Máximo na condição não-saturada para a camada compreendida entre 16,0m e 20,0m.

Através da Figura 102 nota-se que praticamente todas as áreas que apresentaram maiores valores de Torque Máximo na condição saturada na profundidade de 1,0m a 15,0m coincidem aproximadamente com as da Figura 100.

É possível notar que entre as coordenadas 482.000 e 486.000 existem áreas com picos de valores de resistência, tanto superiores como inferiores. Nota-se também que a maior parte da área apresentou valores médios de Torque Máximo, assim como na carta de desvios-padrão, isto sendo consequência direta dos menores valores calculados de *range* (839 m) se comparados com a camada 1,0m a 15,0m.

Calculando-se um valor médio de Torque Máximo bem como de desvio-padrão (também em kgf.m), dividindo-se um pelo outro se chega a um valor aproximado de 28%. Este valor como coeficiente de variação transmite a idéia de variação relativamente alta em torno da média.

6.4 TORQUE MÁXIMO – EXTRATO SATURADO

Em termos da variável Torque Máximo fez-se um estudo semelhante ao desenvolvido até agora para as outras variáveis, porém considerando somente a variável Torque Máximo medido no extrato na condição saturada. Os valores das estatísticas clássicas para esta variável se encontram na Tabela 19, seguida dos respectivos histogramas de frequência nas Figuras 104, 105 e 106.

Tabela 19 – Estatísticas descritivas para a variável Torque Máximo na condição saturada para todas as camadas.

PARÂMETRO	CAMADA			
	4m a 7m	8m a 10m	11m a 20m	>21m
Coef. de Assimetria	-	0,916	0,501	-0,022
Coef. de Curtose	-	1,068	-0,484	-1,024
Estatística de Kolmogorov-Smirnov	-	0,176	0,117	0,102
Valor Crítico da Estatística de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,05$)	-	0,246	0,151	0,186

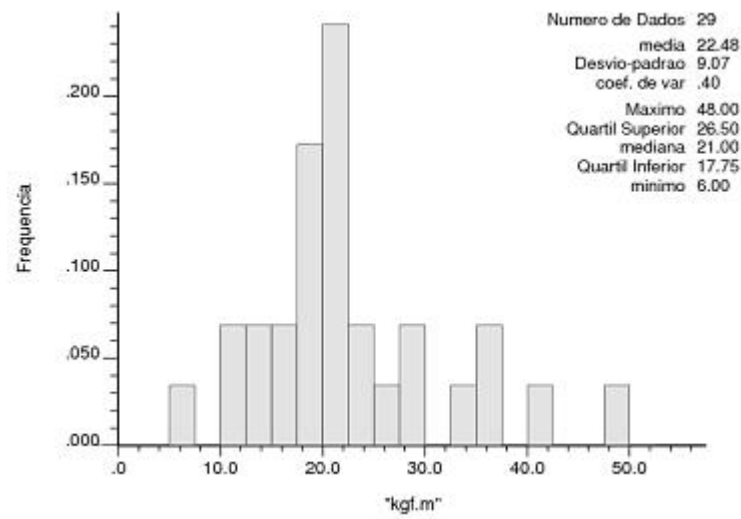


Figura 104 – Histograma de frequência para a variável Torque Máximo para a camada com profundidade entre 8,0m e 10,0m.

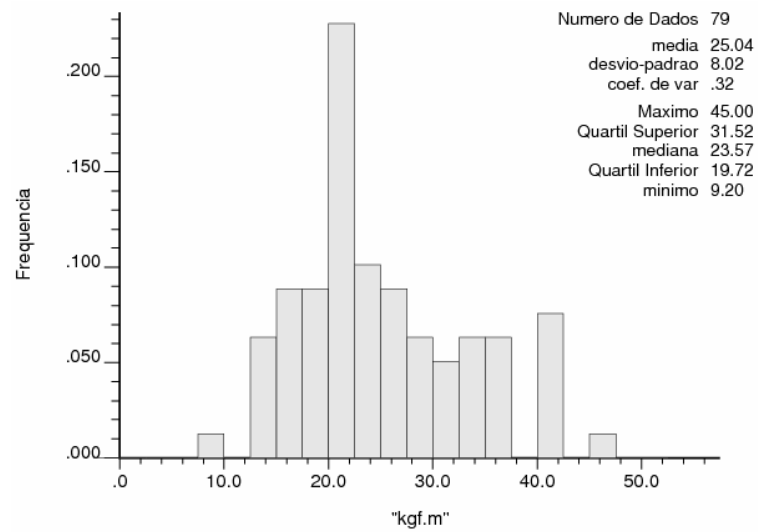


Figura 105 – Histograma de frequência para a variável Torque Máximo para a camada com profundidade entre 11,0m e 20,0m.

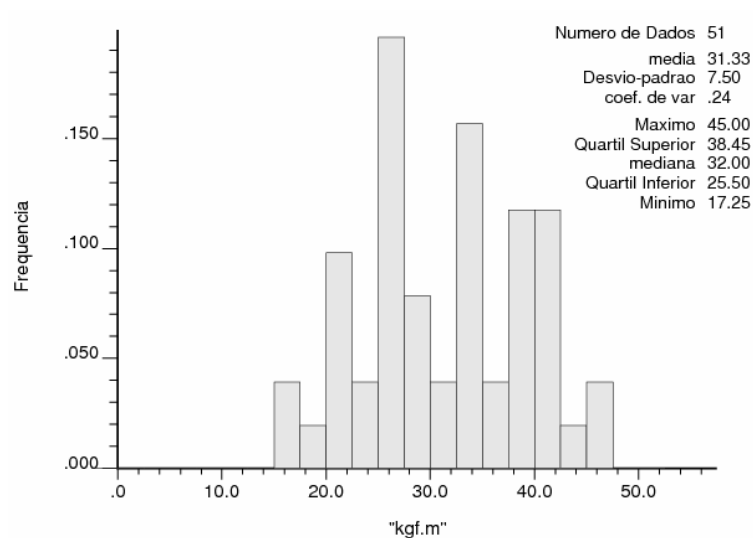


Figura 106 – Histograma de frequência para a variável Torque Máximo para a camada com profundidade a partir de 21,0m.

Percebe-se através da Figura 104 que o histograma possui assimetria à direita, com aderência à distribuição normal (com grau de confiabilidade de 95%), com pequeno grau de achatamento. O mesmo se deu para a camada situada de 11,0m a 20,0m (Figura 105). Já para a camada com profundidade maior que 21,0m (Figura 107), apesar de ter aderência à distribuição normal, nota-se que a distribuição de valores é menos uniforme.

Após os cálculos realizados pela estatística clássica, iniciou-se a análise estrutural do fenômeno que gerou/influenciou o solo em estudo. O primeiro passo foi a confecção das superfícies variométricas, conforme as Figuras 107, 108, e 109.

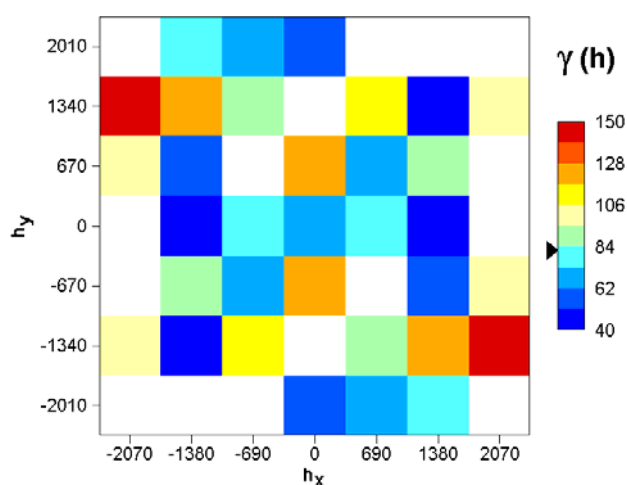


Figura 107 – Superfície variométrica para a variável Torque Máximo, na condição saturada, para a camada de 8,0m a 10,0 m de profundidade.

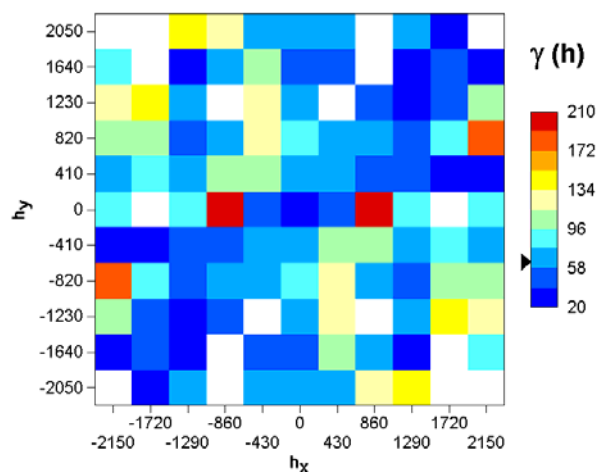


Figura 108 – Superfície variométrica para a variável Torque Máximo, na condição saturada, para a camada de 11,0m a 20,0m de profundidade.

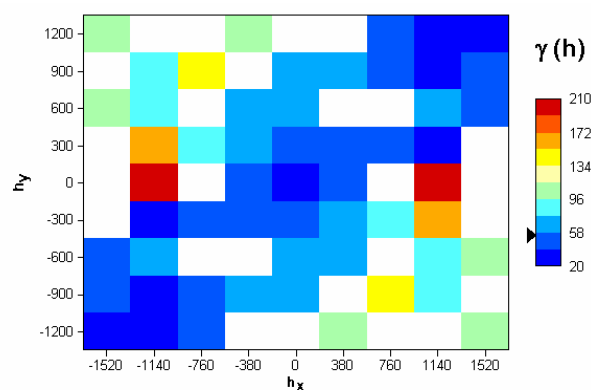


Figura 109 – Superfície variométrica para a variável Torque Máximo, na condição saturada, para a camada com profundidade maior que 21,0m.

Através das Figuras 107, 108, e 109 (superfícies variométricas) nota-se que a camada 11,0m a 20,0m (Figura 108) é a camada que mais apresenta dados.

A camada com profundidade entre 8,0m a 10,0m apresenta variabilidade relativamente isotrópica. Os valores de covariância na direção 45° são semelhantes à covariância populacional. Porém para as camadas subsequentes nota-se uma crescente anisotropia na variabilidade na direção do eixo 45° . Esta tendência observada parece indicar que, para a variável Torque Máximo, existem fenômenos que influenciam sua variabilidade a partir de profundidades maiores do que 10,0m e que se intensifica com o aumento da profundidade. Tal fenômeno pode estar ligado a ausência dos processos pedogenéticos (tendo em vista a profundidade), pois quanto menor a influência destes processos, mais presente o fenômeno esteve. Uma vez que superficialmente, em áreas relativamente pequenas, os

processos pedogenéticos atuam de maneira relativamente uniforme no espaço. Em maiores profundidades, a influência destes processos é reduzida ou ausente, intensificando-se assim as características da rocha mater, como linhas preferenciais de fratura, xistosidades, etc.

Conhecendo-se o comportamento espacial da variabilidade (covariância), confeccionaram-se os variogramas experimentais e teóricos. Nas Figuras 110, 111, e 112 são apresentados os citados variogramas.

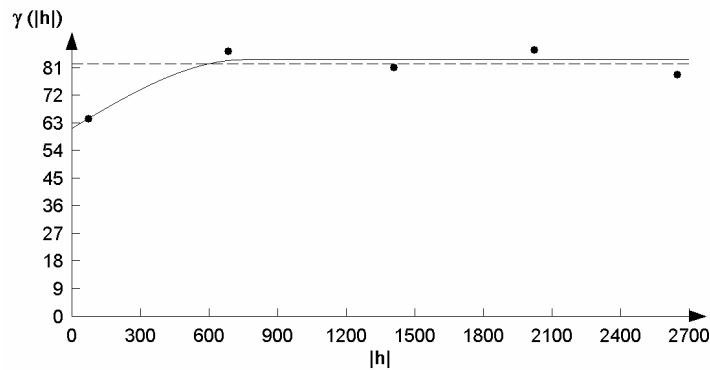
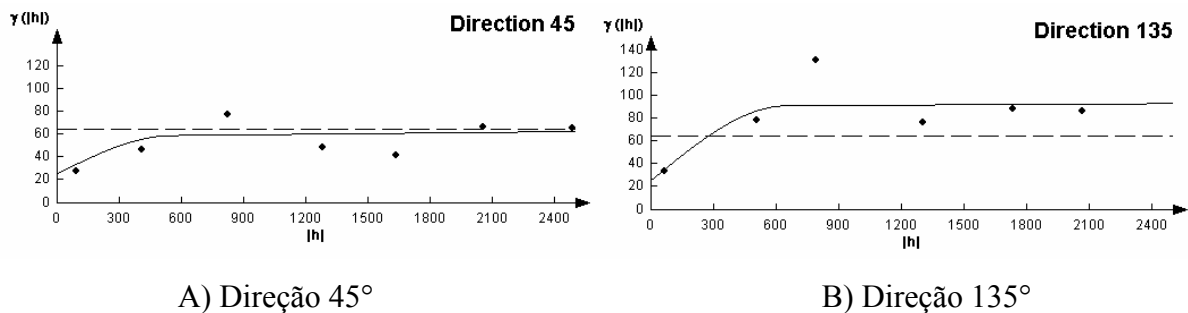


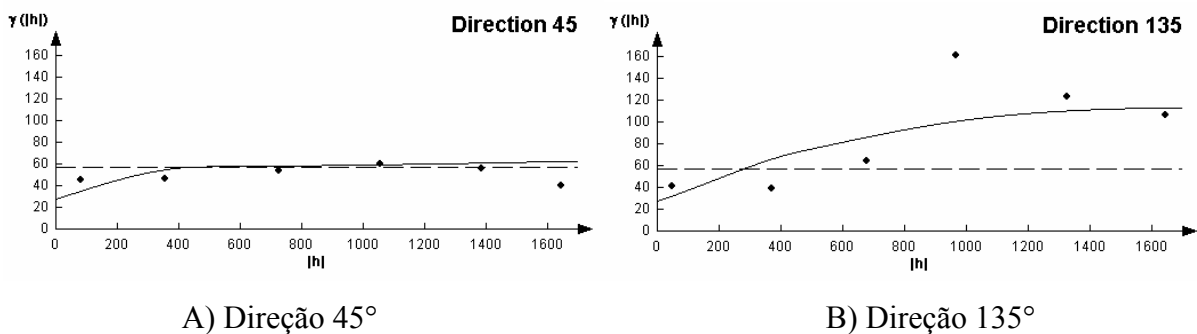
Figura 110 – Variograma teórico global para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada 8,0 m a 10,0 m.



A) Direção 45°

B) Direção 135°

Figura 111 – Variogramas teóricos globais para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada 11,0 m a 20,0 m. A) Direção 45° e B) Direção 135°.



A) Direção 45°

B) Direção 135°

Figura 112 – Variogramas teóricos globais para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada com mais de 21,0 m de profundidade. A) Direção 45° e B) Direção 135°.

Os valores obtidos para os parâmetros de cada variograma, bem como algumas características, são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 – Valores de parâmetros dos variogramas obtidos todas as camadas.

PARÂMETRO	CAMADAS				
	8m a 10m	11m a 20m		>21m	
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico	Gaussiano	Gaussiano
Direção	Omnidirecional	45°	135°	45°	135°
<i>Range</i>	729	550	650	476 ²	1386 ²
<i>Sill</i>	22,41	32,5 ¹	65 ¹	29,64 ²	57 ²
Nugget	61,42	26	26	27,93	27,93
E	0,36	1,25	2,5	1,06	2,04
Ajuste Validação Cruzada	0,001017	0,004086		0,002561	

¹: Razão de anisotropia: 1,0976.

²: Razão de anisotropia: 6,05.

A partir dos dados apresentados na Tabela 20 percebe-se que aqueles das camadas de 11,0m a 20,0m e maior que 21,0m apresentaram anisotropia híbrida. Para a camada com profundidade entre 11,0m e 20,0m a anisotropia, em termos de *range* foi relativamente suave, já que os valores divergiram aproximadamente 18%. O mesmo não ocorreu para a camada mais profunda, no qual a anisotropia híbrida foi mais pronunciada.

Para todas as camadas o valor da relação E resultou em classificação como componente aleatória muito significativa.

De posse dos valores das características estruturais calculadas mediante os variogramas, confeccionou-se a interpolação dos valores de Torque Máximo através do algoritmo da krigagem, com seus respectivos desvios-padrão. Os resultados são apresentados nas Figuras 113, 114, 115, 116, 117 e 118.

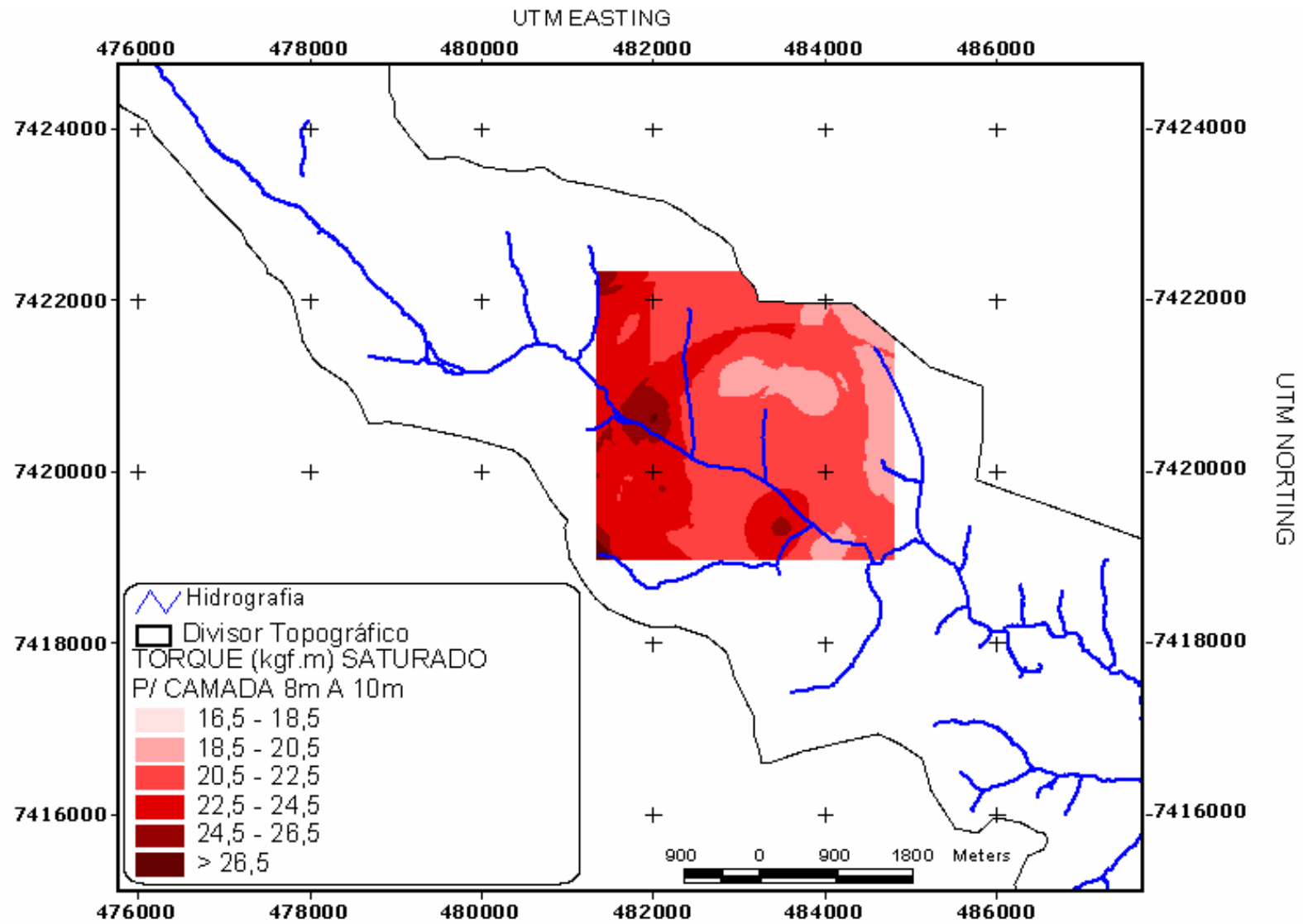


Figura 113 – Carta para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada compreendida entre 8,0m e 10,0m.

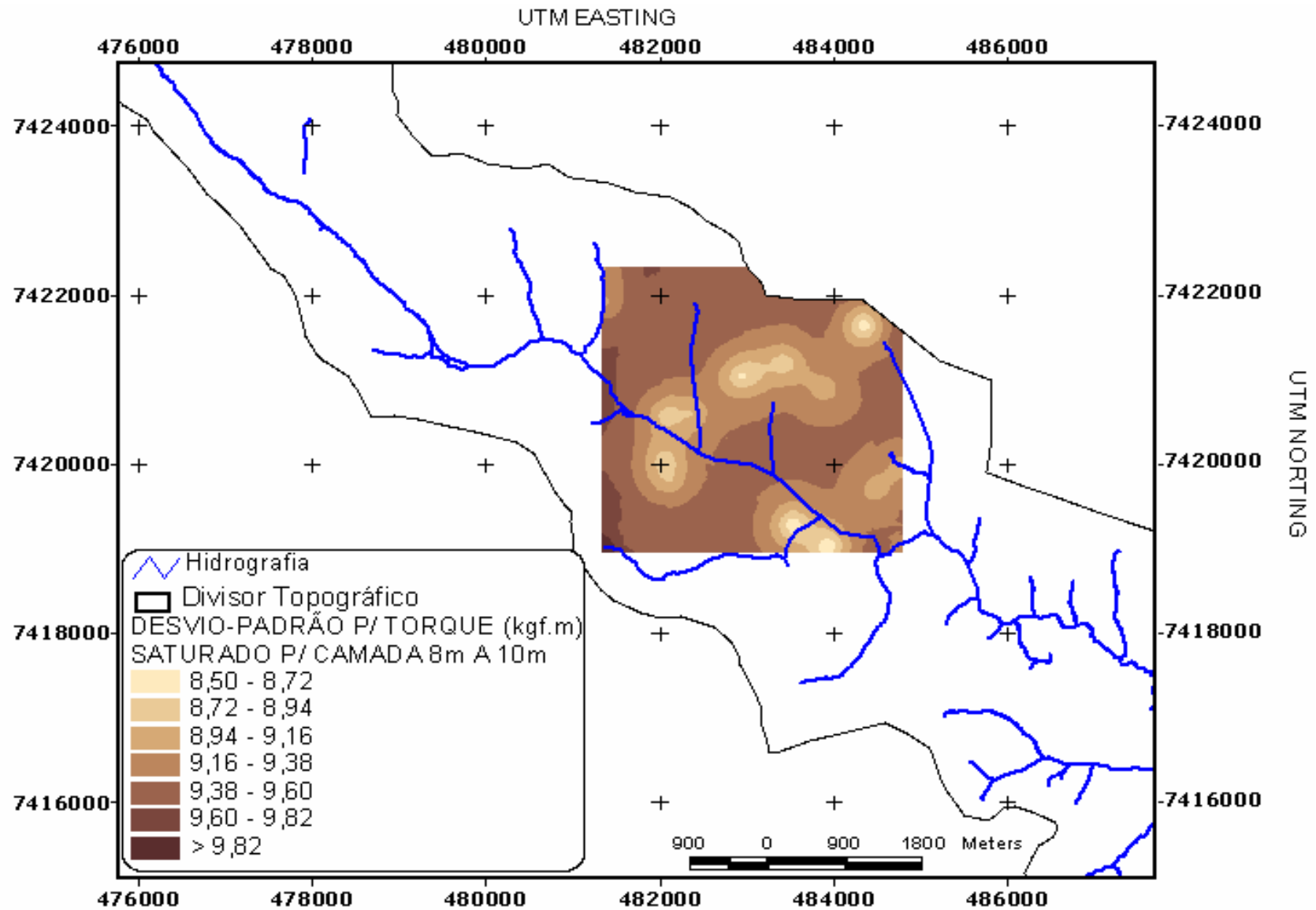


Figura 114 – Carta dos desvios-padrão para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada compreendida entre 8,0m e 10,0m.

Observando-se as Figuras 113 e 114, percebe-se que existem alguns picos de resistência, em termos de Torque Máximo, próximo à drenagem natural da bacia. Parte destes picos se encontra sobre uma das áreas com menor valor de desvio-padrão, em torno 8,94 kgf.m. A maior parte da área apresentou valores de desvios-padrão da ordem de 9,16 kgf.m a 9,34 kgf.m. A distribuição espacial da resistência ao Torque Máximo aparentemente não apresentou nenhuma relação com a topografia.

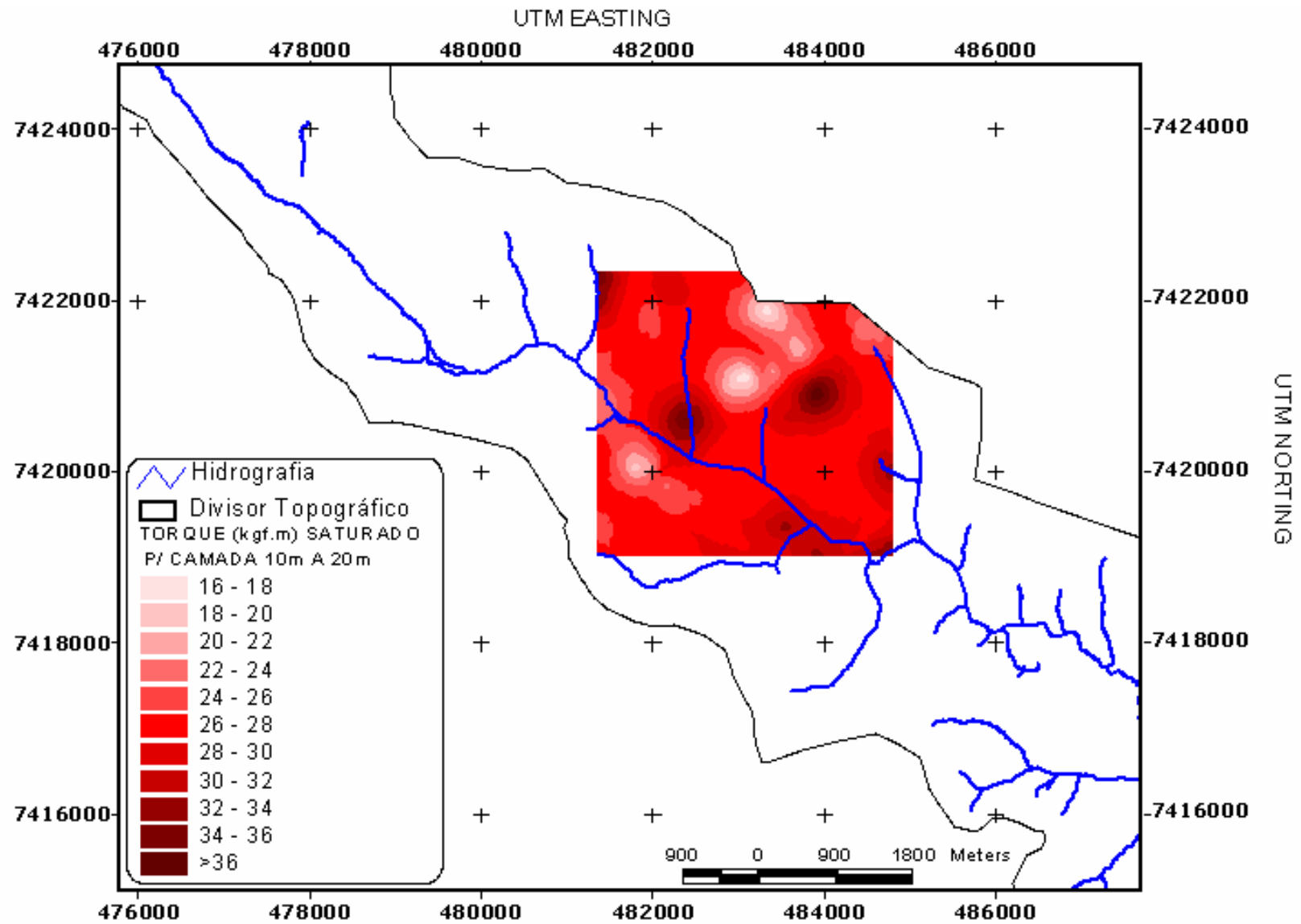


Figura 115 – Carta para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada compreendida entre 10,0m e 20,0m.

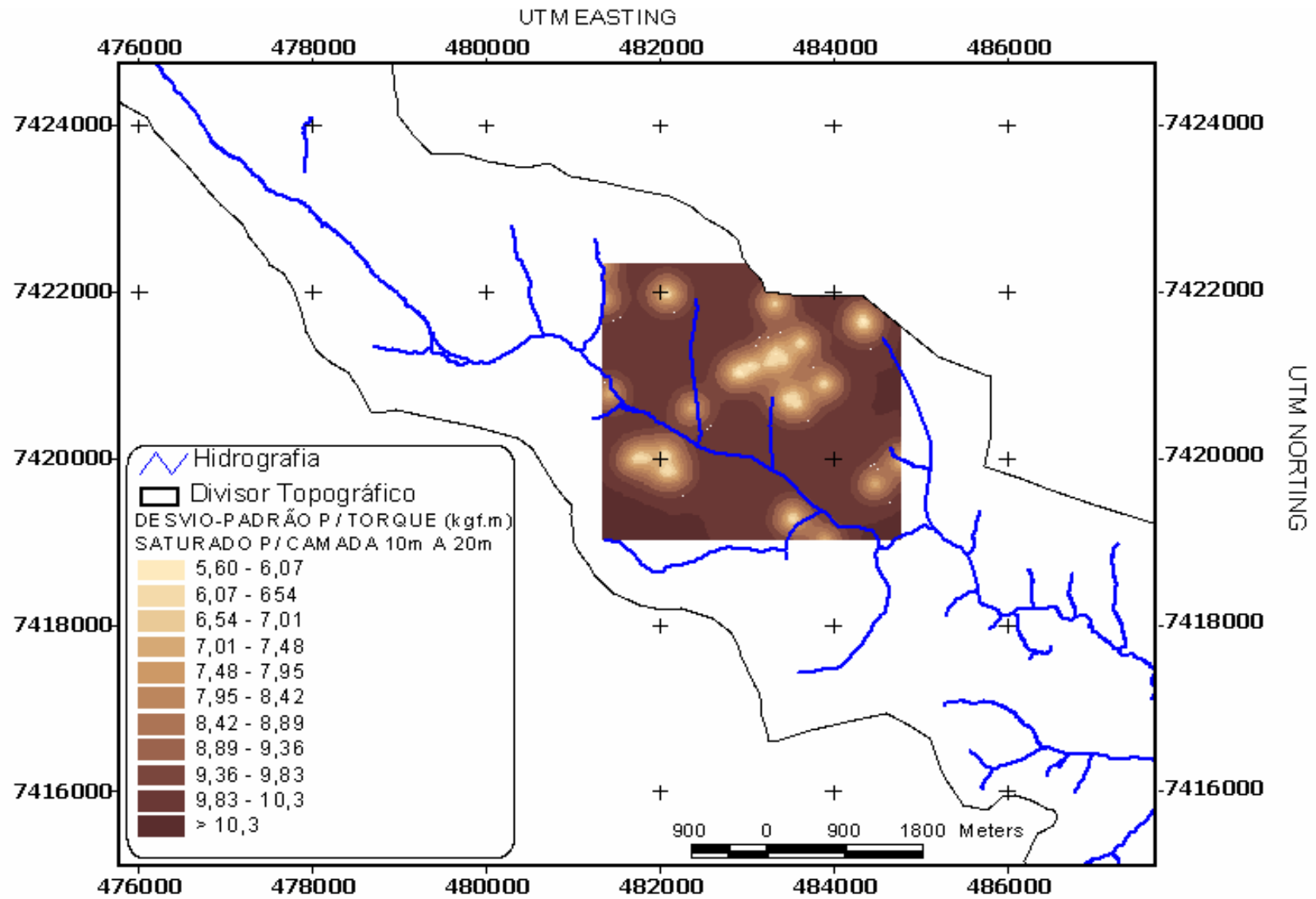


Figura 116 – Carta dos desvios-padrão para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada compreendida entre 10,0m e 20,0m.

Através dos valores apresentados na carta de desvios-padrão (Figura 116), percebe-se que a grande variabilidade para esta camada, somada a relativa escassez de sondagens com medidas de Torque Máximo na condição saturada, produziu uma grande área com altos valores de desvio-padrão.

Nota-se também que as áreas com picos de resistências foram detectadas graças a sondagens existentes no banco de dados, já que a carta de desvios-padrão revela que tais áreas se encontram sobre uma região com presença de sondagens. As variações de resistência apresentadas na carta da Figura 115 apresentam maiores alcances na direção 45° já que esta é a direção com anisotropia de variabilidade.

Tanto a carta de valores de Torque Máximo quanto a carta com os valores de desvio-padrão apresentaram grandes áreas com os valores médios sendo os estimados.

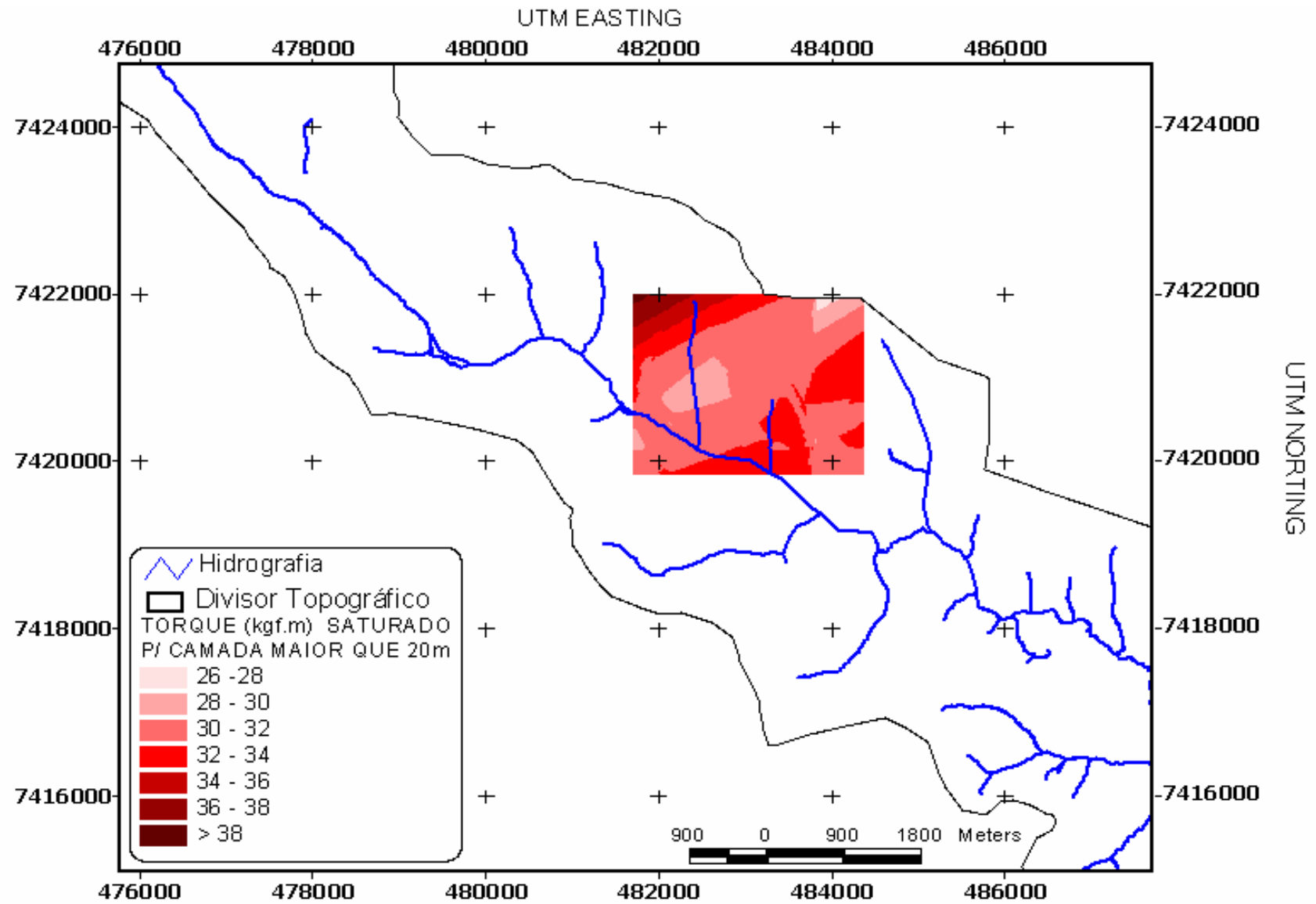


Figura 117 – Carta para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada compreendida maior que 20,0m.

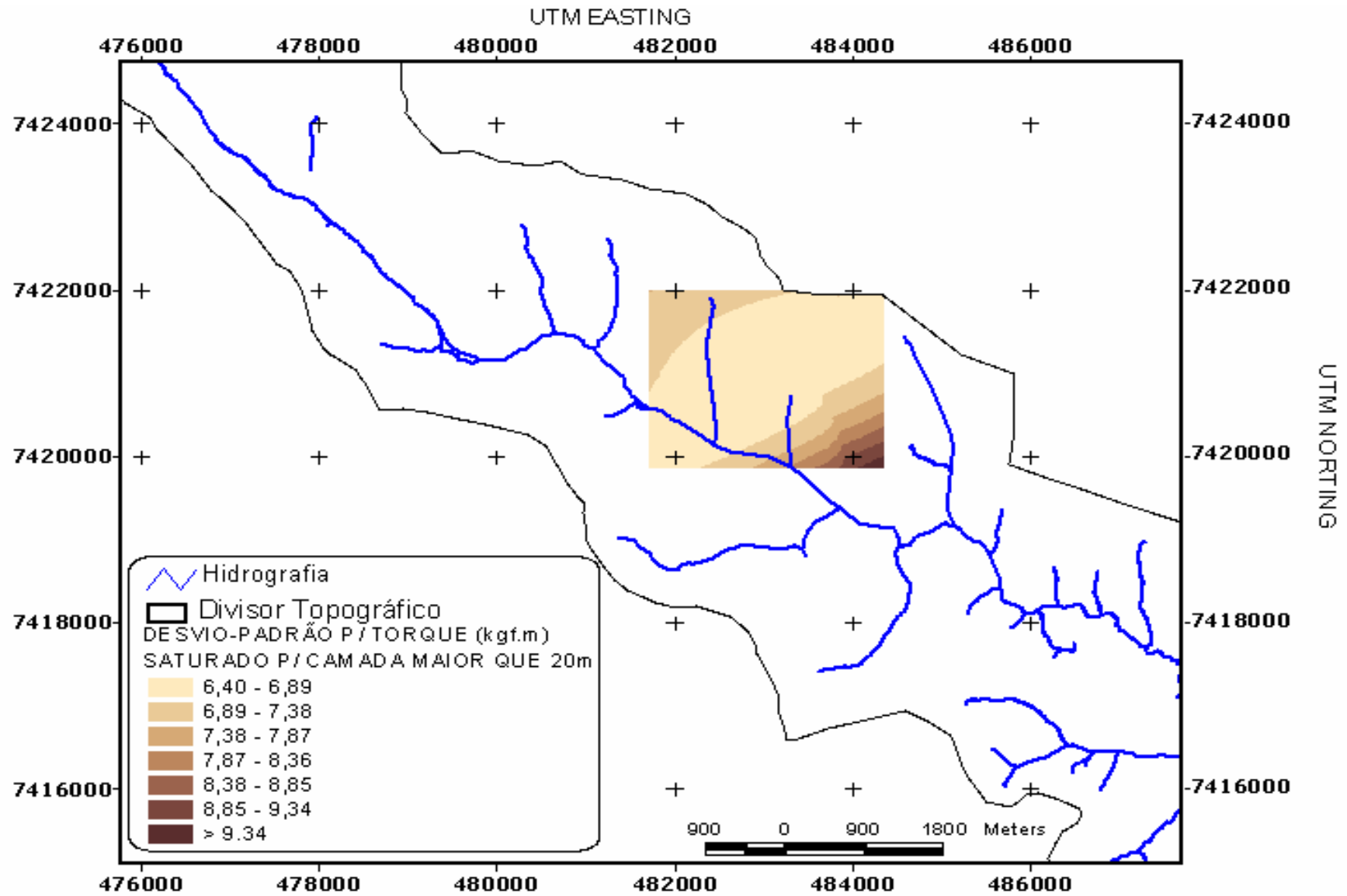


Figura 118 – Carta dos desvios-padrão para a variável Torque Máximo na condição saturada para a camada compreendida maior que 20,0m.

Nas cartas apresentados nas Figuras 117 e 118 nota-se que o comportamento da variável em estudo apresenta uma tendência na direção 45°. Tal pode ser observado facilmente na carta de desvios-padrão (Figura 118). Esta camada apresentou um número reduzido de dados para análise.

6.5 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM A TOPOGRAFIA DA BACIA DO CAMBEZINHO

Os pontos com maior resistência não se encontram concentrados em uma única vertente da bacia, apesar da maior parte deles estar na vertente esquerda. Notou-se também que não se encontram na mesma cota topográfica, mas em altitudes distintas, evidenciando assim que topografia não influenciou, diretamente, a resistência do solo á penetração do amostrador-padrão ou ao Torque Máximo.

6.6 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM AS FEIÇÕES NATURAIS DE DRENAGEM EXISTENTES NA BACIA DO CAMBEZINHO

Compararam-se as cartas geradas nos itens anteriores com as feições naturais de drenagem existentes na bacia do ribeirão Cambezinho, em busca de alguma correlação entre ambos. Após várias tentativas, não se percebeu a princípio nenhuma correlação visível.

Outra análise foi realizada, buscando um maior entendimento de uma possível correlação, Separando-se, metro a metro de profundidade, os furos de sondagem acumulados que apresentaram a presença do nível freático. O resultado encontra-se na Figura 119.

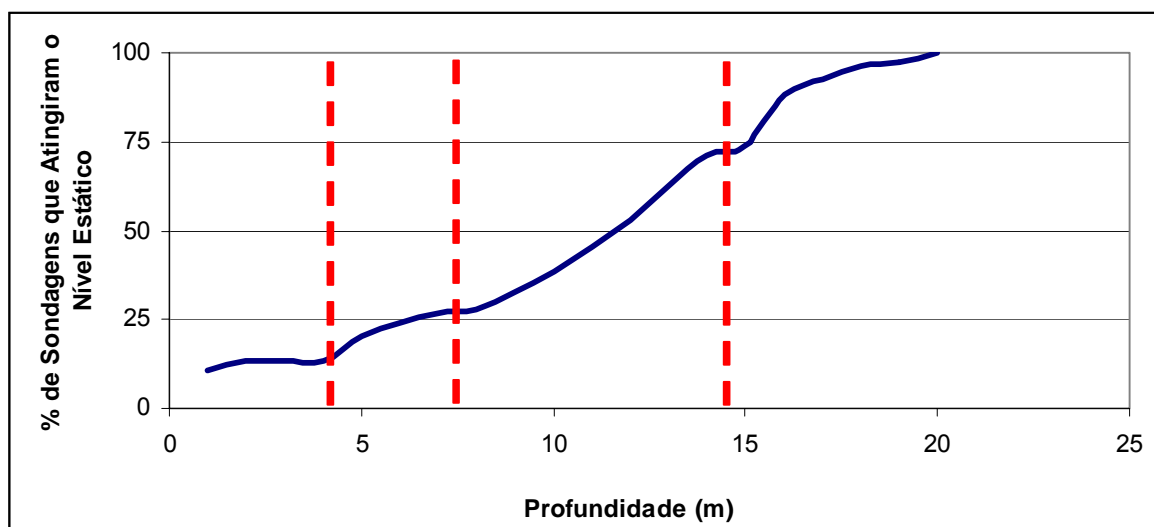


Figura 119 – Distribuição das profundidades no qual foi detectado o nível freático nos furos de sondagem utilizados neste estudo.

A partir da observação da Figura 119 notam-se algumas tendências de comportamento, o que possibilitou a divisão dos dados presentes, conforme a citada figura.

Analisando-se os resultados notou-se que, dentre todas as sondagens utilizadas no estudo as quais detectou o nível do freático a menos de 5 metros de profundidade, estavam a no máximo 70 metros de distância do eixo da drenagem natural. A partir de 70 metros de distância a distribuição espacial do nível do freático não apresentou nenhuma correlação com a distância as drenagens naturais.

Percebe-se ainda na Figura 119 que em todos os furos de sondagem que detectaram a presença do aquífero freático, o mesmo estava à profundidade máxima de 20 metros, sendo esta a profundidade também para a qual se apresentou um divisor de comportamento em termos geotécnicos, já que todas as variáveis, independente do grau de saturação apresentaram um divisor de comportamento para esta profundidade (ver Figuras 66, 67, 68, e 69).

6.7 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS COM O LEVANTAMENTO PEDOLÓGICO DA BACIA DO CAMBEZINHO

Com o objetivo de se verificar uma possível correlação entre as classes pedológicas do solo da bacia em estudo, juntamente com os resultados encontrados, compararam-se visualmente as cartas produzidas neste estudo com a apresentada por Tagima & Terabe (2005). Após varias tentativas não se detectou nenhuma correlação a princípio.

Considerando que as cartas produzidas com a krigagem ordinária não apresentavam profundidades analisadas iguais as consideradas na pedologia para determinação dos horizontes (profundidade máxima de 3,0 m), mas com profundidades muito maiores, optou-se então por separar uma nova camada para o N_{SPT} e para o Torque Máximo, com profundidade máxima de 4,0 m. Deve-se ressaltar que foram analisadas somente para a condição não-saturada, uma vez que a esta profundidade o aquífero freático praticamente não foi detectado no banco de sondagens utilizado.

O processo para obtenção dos valores interpolados de N_{SPT} e Torque Máximo foi o mesmo já descrito no item 5. Os valores calculados para as estatísticas clássicas, bem como o histograma de frequência se encontram na Tabela 21 e na Figura 120, respectivamente.

Tabela 21 – Estatísticas descritivas para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para profundidade até 4,0m..

PARÂMETRO	CAMADA
	0,0m a 4,0m
Coef. de Assimetria	2,015
Coef. de Curtose	6,497
Estatística de Kolmogorov-Smirnov	0,16
Valor Crítico da Estatística de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,05$)	0,093

Os valores constantes na Tabela 21 revelam que a amostra possui assimetria à direita (Figura 120), pequeno grau de achatamento e que não se ajusta a uma distribuição normal (com grau de confiabilidade de 95%).

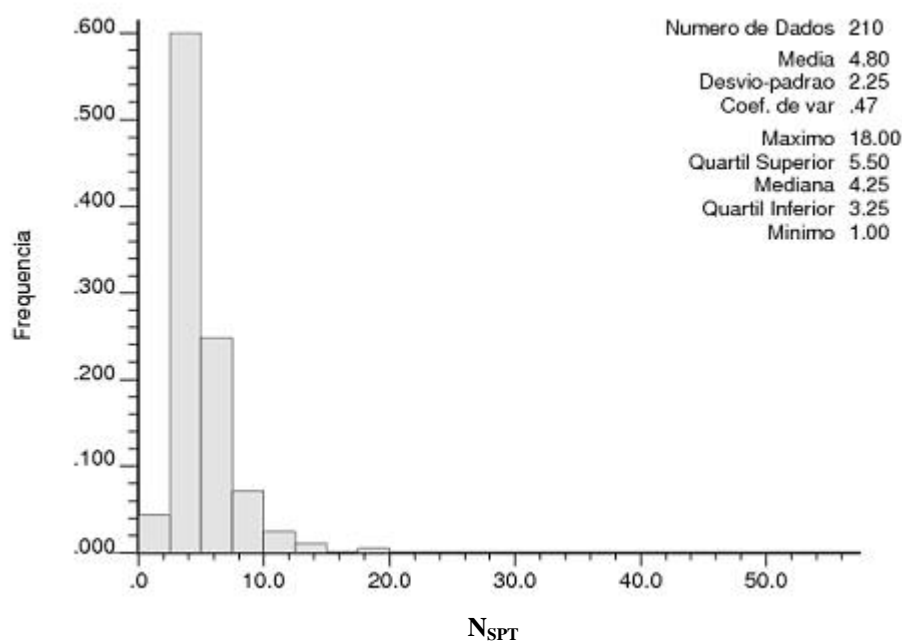


Figura 120 – Histograma de Frequência para a variável N_{SPT} para profundidade de 0,0m a 4,0m.

Analisando-se o histograma da Figura 120, nota-se que existe uma grande concentração de valores de N_{SPT} entre 2,5 e 5, com uma frequência de ocorrência de aproximadamente 60% entre os valores totais da amostra. Isto significa que a maior parte da área, quando da interpolação de valores, apresentará valores médios. A amplitude da amostra está entre 2 e 20.

Os resultados obtidos para os variogramas para todas as direções estão apresentados na superfície variométrica da Figura 121.

A Figura citada anteriormente (Figura 120) revela, assim como a Figura 121, uma relativa isotropia, com a maior parte dos variogramas experimentais tendo seus patamares próximos à covariância amostral.

Considerando a isotropia observada na Figura 121, calculou-se o variograma experimental global, obtendo-se a Figura 122. Os parâmetros de tal variograma se encontram na Tabela 22.

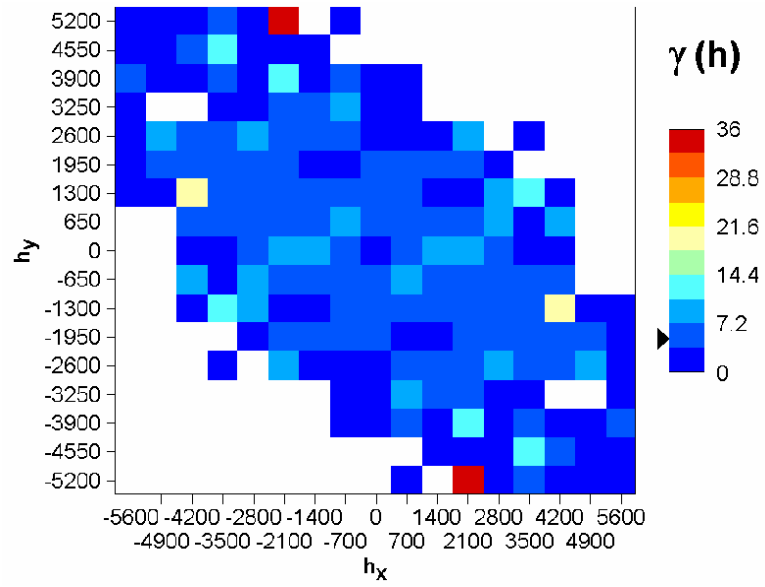


Figura 121 – Superfície variométrica para a variável N_{SPT} na condição não-saturada, para a camada de 0,0m a 4,0 m de profundidade.

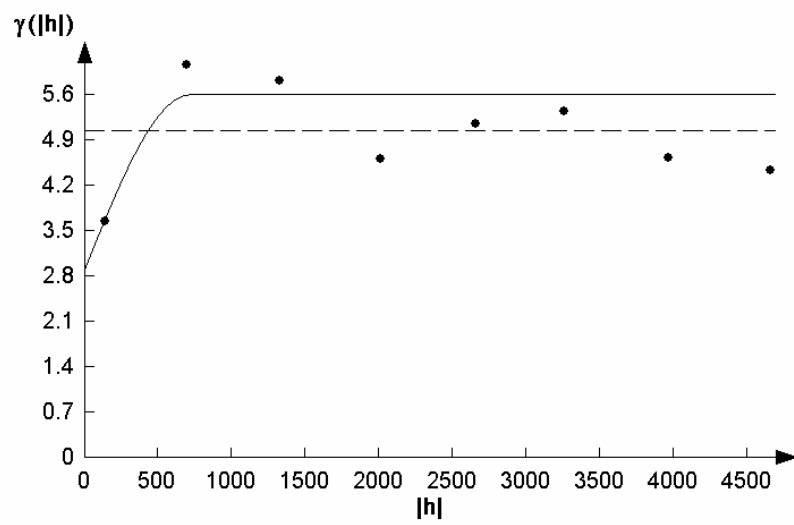


Figura 122 – Variograma teórico global para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para a camada 0,0 m a 4,0 m de profundidade.

Tabela 22 – Valores de parâmetros para o variograma global.

PARÂMETRO	CAMADA
	0,0m a 4,0m
Modelo	Esférico
Direção	Omnidirecional
<i>Range</i>	716,75
<i>Sill</i>	2,703
Nugget	2,907
E	0,93
Ajuste Validação Cruzada	0,000258

O valor apresentado para a relação “E” na Tabela 22 revela um alto grau de aleatoriedade para a variável em questão. Esta informação apresenta relativo grau de confiabilidade, uma vez que o teste de validação cruzada evidencia a validade do variograma calculado.

Com os parâmetros obtidos no ajuste do variograma teórico ao experimental, realizou-se a interpolação dos valores para a camada em questão, com cálculo dos desvios-padrão. Os resultados obtidos estão presentes na Figura 123 e 124.

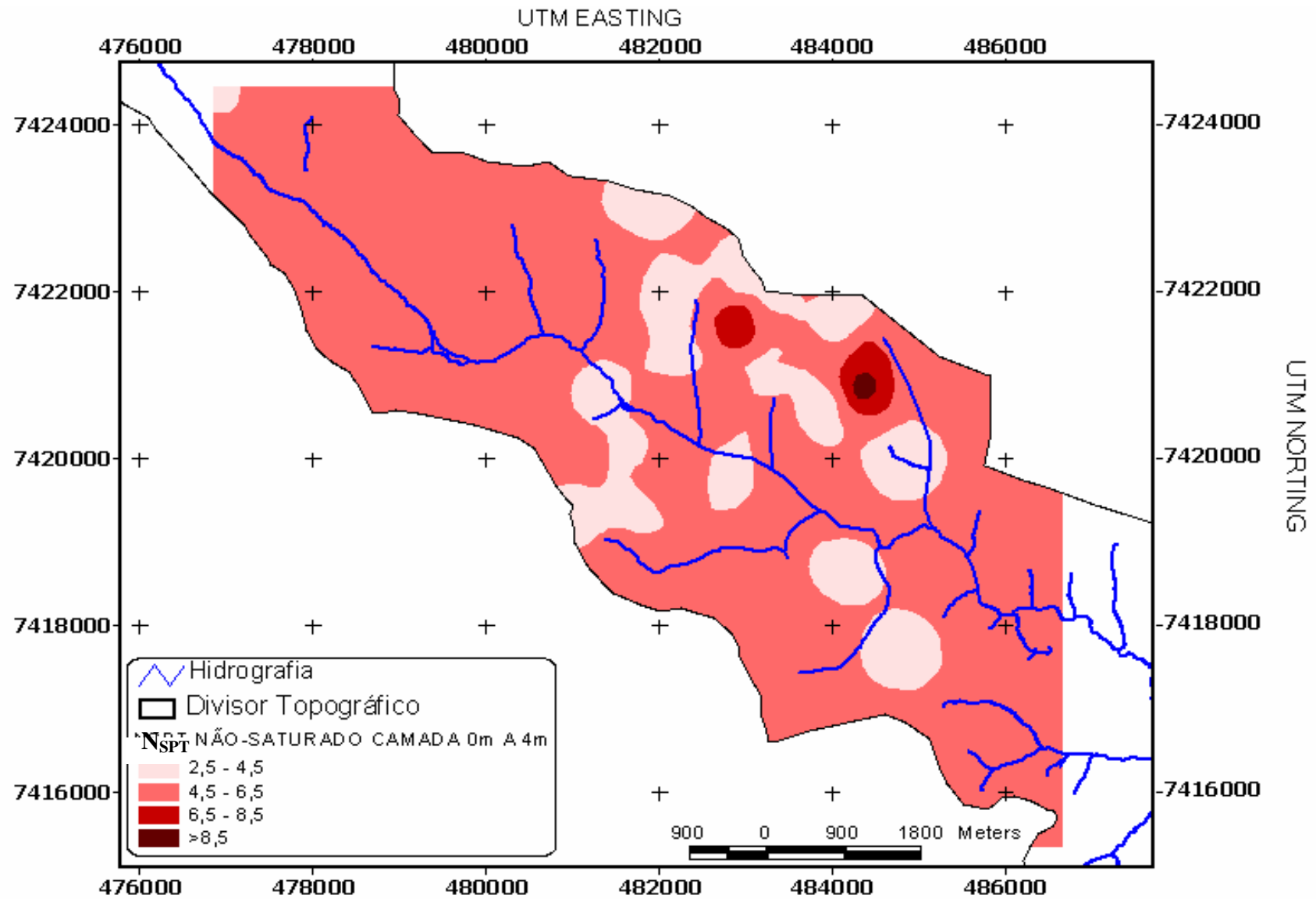


Figura 123 – Carta para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para a camada compreendida entre a 0,0m e 4,0m.

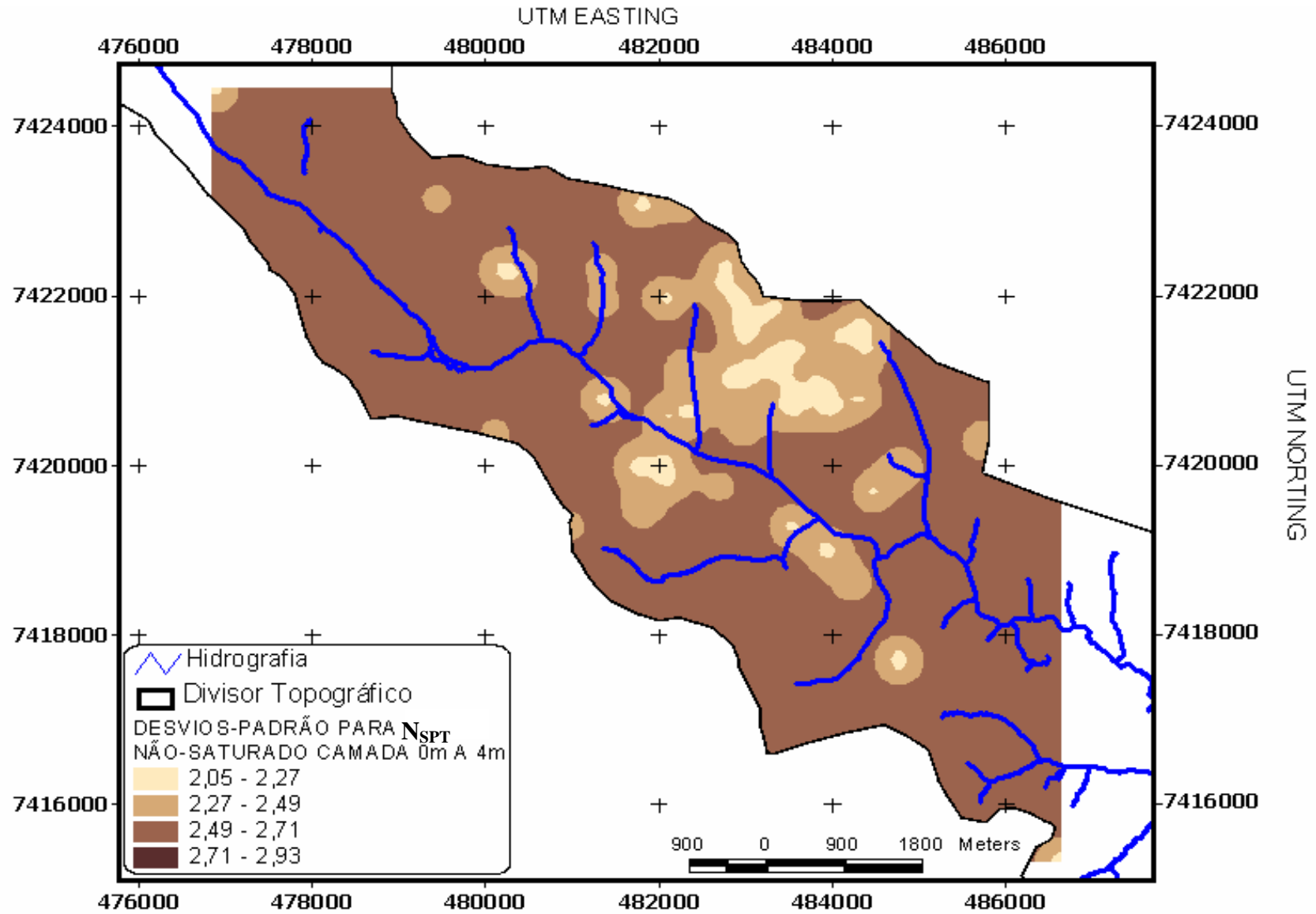


Figura 124 – Carta dos desvios-padrão para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para a camada compreendida entre a 0,0m e 4,0m.

Ao se comparar as Figuras 123 e 124, com as Figuras 78 e 79 respectivamente (Carta para a variável N_{SPT} na condição não-saturada para profundidade entre 0,0m e 15,0m e seu desvio-padrão) revelam uma grande semelhança entre ambas. Como era de se esperar, esta camada apresentou maiores áreas com menores valores médios, visto que se trata de material mais superficial, portanto mais intemperizado.

As áreas com menores valores na Figura 123 correspondem a áreas com menores valores também na Figura 77.

Em termos de desvio-padrão, esta camada apresentou resultados semelhantes, mesmo com maiores áreas com menores valores de desvio padrão, mas que se comparados com os valores médios calculados, revelam praticamente os mesmos coeficientes de variação que para a camada de 0,0m a 15,0m de profundidade.

Comparando-se visualmente, por meio de superposição, as cartas da Figura 123 e a carta pedológica produzida por Tagima e Terabe (2005), não se detectou nenhuma correlação entre distribuição espacial qualitativa dos valores de N_{SPT} e classes pedológicas, já que os valores baixos, médios e altos se encontram sobre todas as classes de solo presentes no trecho analisado da bacia.

Considerando a Figura 71, na qual é apresentada a relação entre Torque Máximo e N_{SPT} para a condição não-saturada, nota-se que a relação entre eles é aproximadamente 1,0 para profundidade até 5,0 m. Assim, conclui-se que a carta para a variável Torque Máximo, na condição não-saturada, apresentará comportamento semelhante ao da Figura 100 (variável Torque Máximo na condição não-saturada para profundidade de 1,0m a 15,0m). Deste modo, o mesmo não apresentará correlação com a pedologia, como já verificado anteriormente no item 6.4.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho analisaram-se os parâmetros N_{SPT} e Torque Máximo medidos em sondagens do tipo SPT-T dentro dos limites da bacia do ribeirão Cambezinho, na cidade de Londrina, o que inclui parte da área urbana do município, mediante métodos estatísticos e geoestatísticos. As principais conclusões obtidas são apresentadas a seguir.

Concluiu-se que o grau de intemperismo sofrido pelo solo é relacionado à resistência do solo em termos de índices do SPT-T (N_{SPT} e Torque Máximo), sendo que quanto maior o grau de intemperismo sofrido, menor é, em média, o valor numérico do índice considerado. Material inconsolidado (saprolito ou Horizonte C) apresenta resistências elevadas, se comparado com material mais intemperizado. Como consequência disso, quanto maior a profundidade amostrada, maior é, em média, a resistência do solo, independente do grau de saturação que o solo se encontre.

Concluiu-se também que as classes pedológicas presentes na bacia do Cambezinho na área em estudo (Nitossolo Vermelho Eutroférico - NVef, Nitossolo Vermelho Eutroférico Latossólico – Nvef, e Latossolo Vermelho Distroférico - LVdf) não possuíram relação com a variação dos índices de resistência do SPT-T considerados (N_{SPT} e Torque Máximo), tanto em termos de valores máximos, mínimos e médios, considerando valores medidos em condições saturadas, não-saturadas, ou considerados sem distinção de grau de saturação. De igual modo a topografia e a disposição das drenagens naturais não influenciaram a resistência do solo em relação aos parâmetros considerados neste estudo (N_{SPT} e Torque Máximo). Notou-se, porém, que a 20,0m de profundidade ocorre um divisor em termos de comportamento geotécnico, não importando a classificação pedológica do solo superficial, nem o grau de saturação do solo.

Em termos de comportamento em profundidade das variáveis Torque Máximo e N_{SPT} concluiu-se que ambas possuem comportamento com ausência de variações bruscas entre valores maiores e menores para os parâmetros considerados neste estudo na condição não-saturada, e que o oposto ocorre para tais variáveis na condição saturada. A relação média Torque Máximo por N_{SPT} é linear crescente na condição não-saturada para profundidades até 17,0m. Já para a condição saturada a relação é relativamente constante em profundidade, com valor médio entre 1,5 e 1,7 kgf.m. Para qualquer profundidade estudada, o valor médio de Torque Máximo sempre foi maior ou igual, numericamente, ao valor de médio de N_{SPT} .

Os furos de sondagem que detectaram a presença do aquífero freático, o interceptaram a profundidade máxima de 20,0 m. Para a área que contorna as drenagens naturais da bacia, com distancia máxima até 70,0m do eixo da drenagem, a profundidade máxima que se encontra o aquífero freático é de 5,0m. A partir 70,0m de distância não se detectou nenhuma correlação com a profundidade.

A partir das devidas considerações em relação aos desvios-padrão obtidos nas interpolações, pode-se afirmar que estas conclusões foram baseadas para a área estudada dentro da bacia do ribeirão Cambezinho.

Tendo em vista que a hipótese inicial de que a pedologia e a topografia possuíam correlação com os índices de resistência do SPT-T não foi constata, propõem-se para futuros trabalhos mapeamento e análise geoestatística com a utilização de *Breaklines* nas drenagens naturais da bacia do Cambezinho para interpolação dos Valores de N_{SPT} e Torque Máximo.

REFERÊNCIAS

ABNT. Solo – Sondagens de Simples Reconhecimento com SPT – Método de Ensaio. NBR 6.484, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.

ANSELIN, L. An Introduction to Variography Using Variowin, Spatial Analysis Laboratory, Department of Agricultural and Customer Economics, University of Illinois, 2003, Disponível em <<http://www.sal.uiuc.edu/stuff/stuff-sum/tutorials>> , Acesso em: 16 novembro de 2006.

BARBETA, P. A.; REIS, M. M.; BORNIA, A. C.; Estatística para Cursos de Engenharia e Informática, Editora Atlas, São Paulo, SP, 2004.

BELINCANTA, A.; Avaliação de Fatores Intervenientes no Índice de Resistência à Penetração do SPT, tese de doutoramento, Universidade de São Paulo, 1998.

_____, ____.; Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT e Torque Máximo, Notas de Aula do curso Investigações Geológico-geotécnicas com fins de Fundações e Ambientais, Promovido pela Universidade Estadual de Londrina, 2004..

BRAGA, B. (coord). Introdução à Engenharia Ambiental. Benedito Braga et al, 2002 – São Paulo: Prentice Hall.

BORTOLUCCI, A. A.; Caracterização Geológico-Geotécnica da Região Urbana de São Carlo-SP, a Partir de Sondagens de Simples Reconhecimento, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, 1983.

BROOMS, B. B., & FLODIN, N., (1988) History of Soil Penetration Test, ISOPT-1, De Ruitter (ed.), Balkena, Rotterdam, ISBN 9061918014. pp. 169.

CÂMARA, G., (Organizador);Introdução à Ciência da Geoinformação, São José dos Campos, 2001, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Disponível em <www.dpi.inpe.br/gilberto/livro>.

CÂMARA, G., CASANOVA, M. A., HERMELEY, A. S., MAGALHÃES, G. C., MEDEIROS, C. C. B.; Anatomia de Sistemas de Informações Geográficas, SBC, X Escola de Computação, 1996, Disponível em < <http://www.dpi.inpe.br/geopro/livros/anatomia.pdf> >.

CÂMARA G, SOUZA RCM, FREITAS U.M., SPRING: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling, *Garrido J Computers & Graphics*, 20: (3) 395-403, May-Jun 1996.

CAMARGO, E. C. G., Geoestatística: Fundamentos e Aplicações, in material do curso Geoprocessamento para Projetos Ambientais, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1988, disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/>

CINTRA, J. C. A., Livro: Fundações Em Solos Colapsíveis. 01. ed. SÃO CARLOS: Rima, 1998. 106 p.

CINTRA, J. C., H.; A. ALBIERO, AOKI, N., Livro: “Tensão Admissível em Fundações Diretas” Editora Rima, São Carlos, 2003.

COZZOLINO, V. M. N. E NOGAMI, J. S. Classificação Geotécnica MCT para Solos Tropicais. *Revista Solos e Rochas. ABMS/ ABGE. Vol 16, n. 2, p. 77-91, 1993.*

CRESSIE, N.A. C. *Statistics for Spatial Data, Revised Edition, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. John Wiley & Sons, inc, 1993.*

DANA, P. Site acessado:
http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/mapproj/mapproj_f.html, Data de Acesso: 16 novembro de 2006

DE MAN, E.; *Conceptual Framework and Guidelines for Establishing Geographic Information Systems, Paris, France, Unesco, 1984.*

DÉCOURT, L. Capacidade de carga em estacas executadas no Campo Experimental de Engenharia Geotécnica da Universidade Estadual de Londrina. Algumas ponderações. XII CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA. SÃO PAULO/SP. VOL. 3, PP.1545-1555, 2002.

DEUTSCH, C. V.; JOURNAL, A. G.; GSLIB. *Geostatistical Software and User's Guide. Oxford University Press, 1992.*

DUARTE, P. A. *Fundamentos de Cartografia, 2ª edição, editora da UFSC – Série didática, 2002.*

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, Rio de Janeiro, 1999, 412 p.

ESRI, Environmental Systems Research Institute, Inc, Version, 3.2, 1999.

FERREIRA, C. V.; ALBIERO, J. H.; LOBO, A. DA S. E CARVALHO, D. DE., Correlações entre atrito lateral medido em provas de carga, em estacas apiloadas instrumentadas, e resultados de ensaios SPT-T e CPT. Revista Solos e Rochas. São Paulo.n.27, Vol.1.Abril. p.3-18, 1998.

FIRKOWSKI, H., Projeções Cartográficas: Fundamentos, In: Curso de Georreferenciamento de Imóveis Rurais, módulo III: Cartografia e Ajustamento de Observações, 2004.

FOLLE, D.; COSTA, J. F. C. L.; KOPPE, J.C.; Geração de Mapas de SPT: Uma Abordagem Geoestatística, In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DA INFORMÁTICA EM GEOTECNIA. ABMS. CURITIBA/PR. 2001.

GENOVOIS, B. B. P.; & OLIVEIRA, G. M. P.; Análise Geoestatística da Distribuição de Camadas de Argilas Orgânicas em Três Áreas da Região Sul do Recife, In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE APLICAÇÕES DA INFORMÁTICA EM GEOTECNIA. ABMS. CURITIBA/PR. 2001.

GOLDEN SOFTWARE, I. Surfer Version 8.00 [Surface Mapping System]. Colorado, U.S.A., 2002.

GOOVAERTS, P. Geostatistics for Natural Resources Evaluation, Published by Oxford University Press Inc, pp. 483, 1997.

IAPAR Instituto Agrônomo do Paraná, Departamento de Agrometeorologia, 2000, disponível em: <<http://www.pr.gov.br/iapar/>> .

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Site: <<http://www.ibge.gov.br/home/geociencias/geodesia/default.shtm>>, acesso em: 16 de novembro de 2005.

_____ . Carta Topográfica, Folha SF. 22-Y-D-III-4, escala 1:50.000, 1996.

INPE Introdução À Ciência da Geoinformação (2001), Câmara C., Davis, C., Monteiro, A. M. V., livro, 2005, (Disponível em <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/>>)

_____ Arquivo de ajuda do software SPRING (Sistema de Processamento de Informação Geográfica), SPRING versão 4.2., 2005.

JOURNAL, A. G.; HUIJBREGTS, J. C. H.; Mining Geostatistics, London: Academic Press, 600p, 1978.

KERTZMAN, F. F., & DINIZ, N. C. As Abordagens de Solos Utilizadas na Geologia Aplicada ao Meio Ambiente, Capítulo 3, Livro: Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente, Organizador: Omar Yasbek Bitar, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia/Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Divisão de Geologia (Série Meio Ambiente), São Paulo, 1995.

LANDIM, P. M. B “Notas – Variograma”, Departamento de Geologia Aplicada, Universidade Estadual Paulista, 2006. Disponível em:
<<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>> Acesso em: 16 novembro de 2006

_____ Introdução a Análise Variográfica com o Variowin, Departamento de Geologia Aplicada, Universidade Estadual Paulista, 2004. Disponível em:
<<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html>> Acesso em: 16 novembro de 2006

_____ Introdução aos Métodos de Estimacão Espacial para Confecção de Mapas, Departamento de Geologia Aplicada, Universidade Estadual Paulista, 2000. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br>> Acesso em: 16 novembro de 2006

LOCZY, L. DE, & LADEIRA, E. A.; Geologia Estrutural e Introdução à Geotectônica, São Paulo, São Paulo, Editora Edgard Blucher, 1976.

MACHADO, F. B.; NARDY, A, J. R.; SQUISATO, E.; OLIVEIRA, M. A.F.; (2005) O Vulcanismo Serra Geral na Porção NE da Bacia do Paraná: Aspectos Petrográficos e Geoquímicos, III SIMPÓSIO DE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, CABO FRIO, RIO DE JANEIRO, 02 A 07/08/2005.

MELLO, V. F.B.; The Standard Penetration Test - State of the art, Volume I, IV PAN AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, PUERTO RICO, PUBLISHED BY AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, NEW YORQ, USA, 1971.

MIGUEL, M. G. & BELINCANTA, A.; Avaliação do Coeficiente de Majoração da Resistência Lateral para Estacas Escavadas com Trado Manual em Solo Laterítico de Londrina/Pr. Anais do IV SEMINÁRIO DE FUNDAÇÕES ESPECIAIS (SEFE)-CURITIBA/PARANÁ, 2004.

MIGUEL, M. G.; SILVA, D. F.; CAMPOS, G. G. G. ; ALMEIDA, M. A. DE ; BELINCANTA, A. . Adaptação de Métodos Semi-Empíricos de Estimativa de Capacidade de Carga de Estacas de Pequeno Diâmetro para o Solo de Londrina/PR. Acta Scientiarum. Technology, Maringá/PR, v. 27, n. 2, p. 155-165, 2005.

MIGUEL, M. G. ; BELINCANTA, A. ; PINESE, J. P. P. ; BRANCO, C. J. M. C. ; TEIXEIRA, R. S. . Caracterização Geotécnica do Subsolo da Cidade de Londrina/PR. In: 100 CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 2002, OURO PRETO/MG. 10CBGE. OURO PRETO/MG : UFOP, 2002. V. 1.

MINEROPAR, site: <<http://www.mineropar.com.br>>, 2006, Acessado em 23/04/2006.

MOREIRA, É. C.; Sistemas de Gerenciamento de Dados Aplicados ao Processo de Mapeamento Geotécnico, Monografia Geotécnica nº 5, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, Publicação 035/94. 1994.

NILSSON, T. U.; Comparações entre DPL NILSSON e SPT. Anais do GEOSUL 2004, Volume Único pg. 61-68.

ODEBRECHT, E. ; SCHNAID, F. ; ROCHA, M. M. ; BERNARDES, G. P. . Energy measurements for Standard Penetration Tests and the effects of the length of rods. In: GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL SITE CHARACTERIZATION, 2004, PORTO. PROCEEDINGS ISC-2 ON GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL SITE CHARACTERIZATION. ROTTERDAM : MILLPRESS, 2004. V. 1. P. 351-358.

PANNATIER, Y.; Variowin: Software for Spatial Data Analysis in 2D. New York, N.Y.: Springer-Verlag, 1996.

PEIXOTO, A. S. P. ; CARVALHO, D. DE ; GIACHETI, H. L. . SPT-T: Test procedure and applications.. In: ISSMGE; ASCE; SPG; ISRM. (Org.). Proceedings ISC'2-GEOTECHNICAL AND GEOPHYSICAL SITE CHARACTERIZATION. ROTTERDAM: MILLPRESS, 2004, V. 1, P. 359-366.

PETRI, S., FULFARO, V. J.; Geologia do Brasil (Fanerozóico) - São Paulo: T. A. Queiroz - Ed. da Universidade de São Paulo, 1983.

PICCIRILLO, E. M.; COMIN-CHIARAMONTI, P.; MELFI, A. J.; STOLFA D.; BELLINI, G.; MARQUES, L. S.; GIARETTA, A.; NARDY, A. J.; PINESE, J. P. P.; RAPOSO, M. I. B.; ROISEMBERG, A. Petrochemistry of continental flood basalt-rhyolite suites and related intrusives from the Paraná Basin (Brazil). In: The Mesozoic flood volcanism of the Paraná Basin: Petrogenetic and geophysical aspects. Piccirillo E. M. & Melfi, A. J. (Eds), São Paulo, IAG-USP, p.107-156, 1988.

PINESE, J. P. P.; Síntese Geológica da Bacia do Rio Tibagi, Cap. 1, in: A Bacia do Rio Tibagi, Editor Moacyr E. Medri et al, Londrina-Paraná, 2002.

PINTO, C. S.; Mecânica dos Solos, Capítulo 2, Livro: Fundações Teoria e Prática, Organizador: Waldemar Hachich, Editora Pini, São Paulo, 1998.

PML - Prefeitura Municipal de Londrina, Caderno Perfil de Londrina, 2003a.

____ - _____, Gestão e Monitoramento Ambiental da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Lindóia, 2003b.

PRANDINI, L. F., N., VALDIR A., FREITAS, CARLOS G. L. DE, DINIZ, NÓRIS C. ; Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente, São Paulo. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Divisão de Geologia. (Série Meio Ambiente), 1995.

QUARESMA, ET AL , In: Hachich, W (org.), Fundacoes, Teoria e Prática, Editora Pini Ltda, 2 edição, São Paulo, SP, 1998.

RANZINI, S. M. T.; “SPTF”. Revista Solos e Rochas, Vol. 11, pp. 29-30, 1998.

RENDU, J. M.; An Introduction to Geostatistical Methods of Mineral Evaluation, Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg, published by the South African Institute of Mining and Metallurgy, 1981.

ROMÃO, P. DE A., SOUZA, N. M. DE,; Banco de Dados Digitais de Sondagens SPT, no Estudo do Meio Físico da Área urbana do Município de Goiânia – GO, I SIMPÓSIO SOBRE SOLOS TROPICAIS E PROCESSOS EROSIVOS NO CENTRO-OESTE, 277-281 PP, UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, 2003.

ROSA, G.; Avaliando a Qualidade dos Estimadores de Variograma (Variograma Experimental) e do Método de Mínimos Quadrados Ponderados para Estimação dos

Parâmetros do Modelo de Variograma Teórico do Processo, Dissertação de Mestrado, Mestrado em Estatística, Universidade Federal de Minas Gerais, 2003.

SCHMERTMANN, J. H., & PALÁCIOS, A.; Energy Dynamics of SPT, Journal of the Geotechnical Engineering Division, August, GT8-926, 1979.

SCHNAID, F.; “Ensaio de campo e suas aplicações à Engenharia de Fundações.” Editora Oficina do Texto. Porto Alegre/Rs, 2002.

SILVA, A. de B.; Sistemas de Informações Geo-referenciadas – Editora da Unicamp, 1999.

SILVA, D. F. & MIGUEL, M. G.; Mapeamento Geoestatístico do Torque Máximo Medido em Ensaio SPT-T em Parte da Bacia do Ribeirão Cambezinho em Londrina/Pr e sua Aplicação no Planejamento Urbano, In: 6º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E GEOAMBIENTAL, 2007.

SOUZA, N. C. D. C. de, Mapeamento Geotécnico com Base na Compartimentação por Formas de Relevo e Perfis Típicos de Alteração, Monografia Geotécnica nº 2, Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia. Publicação 081/92, 1992.

STURARO, J. R.; Estudo das Variações Espaciais de Parâmetros Geotécnicos, Seminário Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Pós-graduação, 1985.

_____; Mapeamento Geoestatístico de Propriedades Geológico-Geotécnicas Obtidas de Sondagem de Simples Reconhecimento, Tese de doutoramento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1993.

STURARO, J R ; LANDIM, P. M. B. . Mapeamento Geoestatístico de Ensaio de Penetração Patronizada (Spt). Solos e Rochas - Revista Brasileira de Geotecnia, SÃO PAULO, v. 19, n. 1, p. 03-14, 1996.

TAGIMA, N. & N. I. TERABE; Minibacia do Riacho Cambé Diagnóstico Físico-ambiental e Mapeamento Detalhado de Solos, Centro de Ciências Exatas, Departamento de Geociências, Editora da Universidade Estadual de Londrina, 2005.

TALAMINI NETO, E.; & CELESTINO, T. B; Utilização de SIG e Geoestatística no Mapeamento do Subsolo de Curitiba: Aplicação ao Planejamento de Uso do Espaço Subterrâneo, 2001.

TEIXEIRA, R S, MIGUEL, M. G., BRANCO, C. J. M DA C. E PINESE, P. P.
“Caracterização Geológico-Geotécnica do Campo Experimental de Engenharia Geotécnica
“Prof. Saburo Morimoto da Universidade Estadual de Londrina (UEL)””. Anais: I
ENCONTRO GEOTÉCNICO DO TERCEIRO PLANALTO PARANAENSE.
MARINGÁ/PR. PP.165-182, 2003.

TEIXEIRA, W., TOLEDO, M.C.M., FAIRCHILD, T.R. E TAIOLI, F. (Orgs.). Em busca
dopassado do planeta: Tempo Geológico. Decifrando a Terra. São Paulo, Oficina de Textos.
p.508. 2001.

TREWARTH, G. T., An Introduction to Climate, 4th edition, San Francisco, MacGraw-Hill,
408 p, 1968.

UNITED STATES CENSUS BUREAU, site <<http://www.census.gov/>>, acesso em 21
fevereiro 2006.

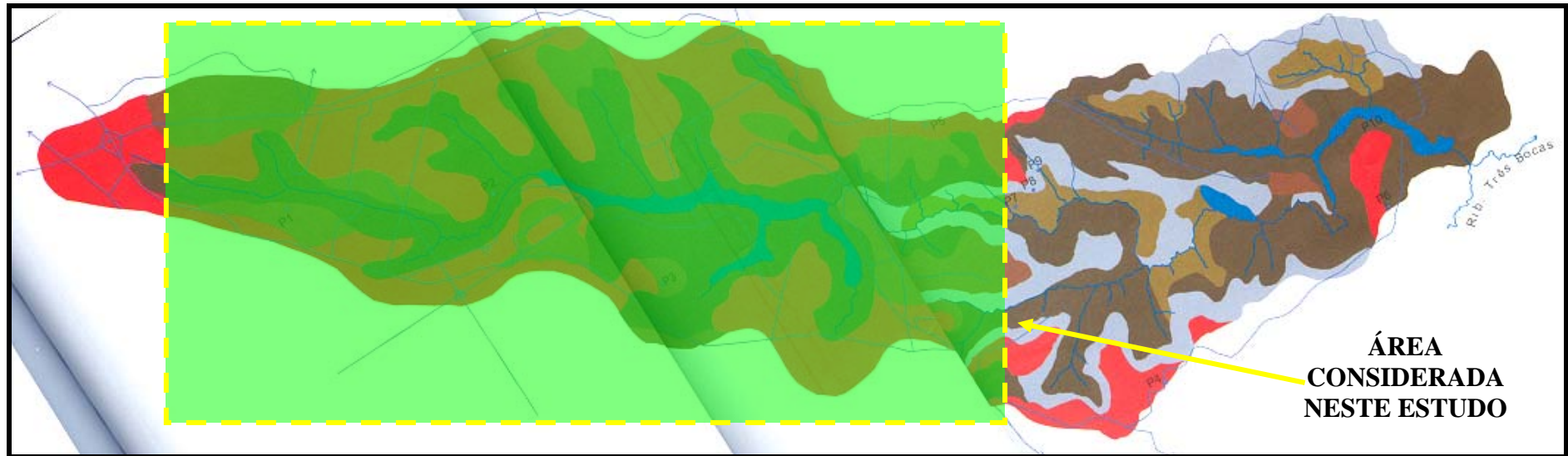
VARGAS, M.; Solos Porosos e colapsíveis, Aula Inaugural de 1992, Universidade de São
Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, Publicação 079/93,
1993.

VAZ, L. F.; Apostila “Origem e Tipos de Solos”, Instituto de Geologia/Universidade de
Campinas, 2003.

_____ ; Classificação Genética dos Solo e dos Horizontes de Alteração de Rocha em
Regiões Tropicais, revista Solos e Rochas, (19), 2, 117-136, São Paulo, SP, 1996.

VESSARO, P. ; BRANCO, C. J. M. C. ; CINTRA, J. C. A. ET AL. Provas de carga dinâmica
em estacas escavadas com trado mecânico.. In: V SEMINÁRIO DE ENGENHARIA DE
FUNDAÇÕES ESPECIAIS E GEOTECNIA, 2004, SÃO PAULO. ANAIS.

ANEXO



LEGENDA

- LATOSSOLOS VERMELHOS Distrofêrricos (LVdf)
- NITOSSOLOS VERMELHOS Eutrofêrricos latossólicos (NVef)
- NITOSSOLOS VERMELHOS Eutrofêrricos (NVef)
- CAMBISSOLOS HÁPLICOS Eutrofêrricos (CXef)
- NEOSSOLOS LITÓLICOS, REGOLÍTICOS Eutróficos (RLe, RRe)
- GLEISSOLOS HÁPLICOS Eutróficos (GXbe)
- Pn LOCALIZAÇÃO DO PERFIL AMOSTRADO
- Riacho Cambé
- Sistema Rodoviário Interno
- ▲ Marco Geodésico - código 91647
Campus Universitário - UEL
Latitude 23° 17'20", 0564S
Longitude 51° 12'05", 9749W
Altitude Ortométrica : 583m



Escala aproximada 1:100.000

Mapa pedológico detalhado (Escala original 1:50:000) da bacia do Ribeirão Cambezinho, modificado de Tagima e Terabe (2005)