USO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA: O CASO DE PALMAS-TO

BRUNO CARRILHO DE CASTRO

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc.

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

USO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA PARA A CIDADE DE PALMAS-TO

BRUNO CARRILHO DE CASTRO

ORIENTADOR: NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc.

TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.TD - 142/18

BRASÍLIA/DF: JUNHO DE 2018

USO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA: OCASO DE PALMAS-TO

BRUNO CARRILHO DE CASTRO

TESE DE DOUTORADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.

APROVADO POR:

_____

NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc. (UnB)

(ORIENTADOR)

_____

LUIS FERNANDO MARTINS RIBEIRO, PhD. (UnB)

(EXAMINADOR INTERNO)

_____

CARLOS PETRÔNIO LEITE SILVA, DSc. (IFB)

(EXAMINADOR EXTERNO)

_____

WELITOM RODRIGUES BORGES, DSc. (UnB)

(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, JUNHO DE 2018

CASTRO, BRUNO CARRILHO DE
Uso de Resistividade Elétrica Em Investigação Geotécnica: Ocaso De Palmas-TO [Distrito Federal] 2018
xii, 298 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutor, Geotecnia, 2018)
Tese de Doutorado – Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.
Departamento de Engenharia Civil
1. Investigação Geotécnica 2. Resistividade Elétrica
3. SPT
I. ENC/FT/UnB II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CASTRO, B.C. (2018). Uso de Resistividade Elétrica Em Investigação Geotécnica: Ocaso De Palmas-TO. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-142/18, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 298 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Bruno Carrilho de Castro
TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Uso de Resistividade Elétrica Em Investigação Geotécnica: Ocaso De Palmas-TO
GRAU/ANO: Doutor/2018

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

_____

Bruno Carrilho de Castro
Quadra 109 Norte, Avenida Ns-15, Alcno-14
Plano Diretor Norte | 77001-090 | Palmas/TO - Brasil

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor Newton por mais uma vez depositar sua confiança e me oferecer a oportunidade de realizar um trabalho como este, tão importante na vida profissional.
Agradeço a minha família pelo suporte e apoio inconteste em todos os momentos difíceis que fazem parte do desenvolvimento de uma tese.
Agradeço ao Petrônio por estar junto desde o início do projeto contribuindo enormemente em todas as etapas, dando apoio técnico à realização dos ensaios e na modelagem computacional.
Agradeço ao Fernando e a Larissa por todo incentivo, receptividade, ajuda de todas as formas, vocês foram essenciais nessa conquista.
Agradeço a Universidade Federal do Tocantins pelo apoio financeiro, aos colegas do colegiado de Engenharia Civil, aos amigos que muito me ajudaram em todas as etapas, em especial aos amigos e professores Marcelo e Salmo.
Sem a ajuda de cada um de vocês nada disso seria possível.

USO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA: O CASO DE PALMAS-TO

RESUMO

A cidade de Palmas-TO é uma das inúmeras cidades de médio porte que apresentam um ritmo de crescimento maior que a média nacional, provocando simultaneamente desenvolvimento econômico e problemas urbanos com a falta de planejamento. O desenvolvimento de modelos geotécnicos pode contribuir para solucionar esses problemas. Os bancos de dados de sondagem à percussão SPT fornecem informações valiosas do subsolo e, quando tratadas em ambiente computacional com o uso de técnicas de geoestatística e ferramentas de interpolação, permitem gerar modelos bi e tridimensionais que colaborem para o entendimento geotécnico local. Entretanto, a escassez e a dificuldade de reunir dados dessa natureza podem impedir que os mesmos sejam elaborados a tempo. Nesse contexto, métodos geofísicos como a resistividade elétrica podem colaborar com a aquisição de informações de maneira mais rápida e barata, atuando na orientação de investigações diretas ou mesmo na expansão das informações já disponíveis por meio de correlações entre propriedades geoelétricas e os tipos de solos presentes na região. Este trabalho identifica os principais tipos de solos encontrados na cidade de Palmas-TO relacionando-os com intervalos característicos de resistividade elétrica a partir de campanhas de ensaios de laboratório, permitindo realizar interpretações geotécnicas de seções geoelétricas obtidas em campo. Paralelamente são elaborados modelos geotécnicos de tipos de solos, nível freático e valores N_{SPT}, de onde são extraídos perfis estratigráficos que, comparados com aqueles gerados a partir da geofísica, mostram como ambos podem se complementar na aquisição de dados geotécnicos. Como resultados, verificam-se que os solos classificados como saprólitos, encontrados na área de estudo, apresentam valores de resistividade elétrica entre 100 Ω.m e 1.000 Ω.m, os solos argilosos apresentam valores entre 100 Ω.m e 6.000 Ω.m, os solos siltosos apresentam valores entre 1.000 Ω.m e 30.000 Ω.m e os solos arenosos apresentam valores entre 10.000 Ω.m e 150.000 Ω.m. Em relação às características geotécnicas, observam-se que a camada impenetrável ao SPT se encontra, em média, abaixo dos 10 m de profundidade, com o lençol freático, em média, a 5 m de profundidade.

Palavras chave: Investigação Geotécnica, Resistividade Elétrica, SPT.

THE USE OF ELECTRICAL RESISTIVITY IN GEOTECHNICAL INVESTIGATION: THE CASE OF PALMAS-TO.

ABSTRACT

The city of Palmas, Tocantins, is one of numerous medium-sized cities that present a growth rate which is higher than the national average, simultaneously stimulating both economic development and urban problems due to the lack of planning. The development of geotechnical models can contribute to solving these problems. Databases of Standard Penetration Test (SPT) drilling offer valuable underground information and, when treated in a computational environment with the use of geo-statistical techniques and interpolation tools, allow the generation of bi- and tridimensional models that help local geotechnical understanding. However, the scarcity and difficult collection of data of this nature can limit their expansion over time. In this context, geophysical methods such as electro-resistivity can collaborate with the acquisition of information in a cheaper and faster way, acting in the orientation of direct investigations or even in the expansion of information already available through correlations between geo-electric properties and the types of soil present in the region. This paper identifies the main types of soil found in the city of Palmas, Tocantins, linking them to typical ranges of electrical resistivity from laboratory testing, allowing the geotechnical interpretation of geo-electric sections acquired in the field. Alongside this, geotechnical models of soil types, groundwater level and NSPT values are developed, from which stratigraphic profiles are extracted which, when compared with those generated from geophysics, show how both models can complement each other in the acquisition of geotechnical data. As results, it is verified that soils classified as saprolites, found in the study area, present values of electrical resistivity between 100 Ω.m and 1.000 Ω.m, clayey soils present values between 100 Ω.m and 6.000 Ω.m, silty soils have values between 1.000 Ω.m and 30.000 Ω.m and sandy soils show values between 10.000 Ω.m and 150.000 Ω.m. In relation to the geotechnical characteristics, it is observed that the refusal surface to the SPT is, on average, below 10 m depth, with the groundwater level, on average, 5 m deep.

Key Words: Geotechnical Investigation, Electrical Resistivity, SPT.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1 OBJETIVOS 3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 4
2.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO 4
2.2 ASPECTOS GERAIS 9
2.3 SONDAGEM À PERCUSSÃO SPT 14
2.4 USO DO SPT NA ESPACIALIZAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO SUBSOLO 18
2.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA 21
2.5.1 ASPECTOS GERAIS DA GEOFÍSICA 21
2.5.2 PRINCÍPIOS FÍSICOS DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA 22
2.5.3 CAMINHAMENTO ELÉTRICO 24
2.5.4 USO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA.. 26
2.6 CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS 29
2.6.1 IDENTIFICAÇÃO TÁCTIL VISUAL 29
2.6.2 CLASSIFICAÇÃO UNIFICADA (SUCS) 31
2.6.3 MINERALOGIA 32
2.7 GEOESTATÍSTICA 33
2.7.1 ASPECTOS GERAIS 33
2.7.2 MODELOS MATEMÁTICOS 35
2.7.3 TRABALHOS RELACIONADOS COM GEOESTATÍSTICA 39
2.8 MODELAGEM COMPUTACIONAL 40
2.8.1 ASPECTOS GERAIS 40
2.8.2 TRABALHOS RELACIONADOS COM MODELAGEM COMPUTACIONAL. 41
2.9 CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA 45
2.9.1 ASPECTOS GERAIS DA CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA 46
2.9.2 ESCALA DE TRABALHO 48
3. MATERIAIS E MÉTODOS 50
3.1 ESTRUTURA DA METODOLOGIA 50

3.2 RECONHECIMENTO DE CAMPO 53
3.2.1 RESISTIVIDADE ELÉTRICA – ÁREAS CHAVE 53
3.2.2 SONDAGEM À PERCUSSÃO SPT 56
3.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO 57
3.3.1 ENSAIOS DE CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA 58
3.3.2 ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM LABORATÓRIO 60
3.3.3 ENSAIOS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X 64
3.4 RELAÇÃO ENTRE RESISTIVIDADE ELÉTRICA E TIPO DE SOLO 64
3.5 PERFIS GEOTÉCNICOS GERADOS A PARTIR DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA 65
3.5.1 LOCALIZAÇÃO 66
3.5.2 PROCEDIMENTO DE ENSAIO 66
3.5.3 FILTRAGEM E INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA 67
3.5.4 AMOSTRAGEM A TRADO PARA VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS 69
3.6 MODELAGEM GEOTÉCNICA POR MEIO DE BANCOS DE DADOS DE SONDAGENS SPT 70
3.6.1 MODELO NUMÉRICO DE TERRENO 70
3.6.2 CAPTAÇÃO E MONTAGEM DO BANCO DE DADOS 71
3.6.3 DEFINIÇÃO DA ESCALA 73
3.6.4 PROCESSAMENTO DOS DADOS 74
3.6.5 VALIDAÇÃO DOS MODELOS 76
3.7 PRODUTOS CARTOGRÁFICOS 76
3.7.1 CARTAS DE COTA E PROFUNDIDADE IMPENETRÁVEL AO SPT 77
3.7.2 CARTAS DE COTA E PROFUNDIDADE DO NÍVEL FREÁTICO 77
3.7.3 CARTAS DE TOPO, BASE E ESPESSURA DE CAMADAS 78
3.7.4 CARTA DE VALORES DE N_{SPT} PARA PROFUNDIDADES DE 2 m, 5 m, 7 m E 10 m 79
3.7.5 CARTA HIPSOMÉTRICA E CURVA HIPSOMÉTRICA 80
3.7.6 CARTA DE DECLIVIDADE 80
3.7.7 CARTAS DE CURVATURA PLANA E DE PERFIL 80
3.7.8 CARTA DE COMPARTIMENTAÇÃO GEOTÉCNICA 81
4. RESULTADOS 83

4.1 ENSAIOS DE CAMPO 83
4.1.1 SONDAGEM À PERCUSSÃO SPT 83
4.1.2 RESISTIVIDADE ELÉTRICA – ÉPOCA DO ANO E TIPO DE ARRANJO 85
4.1.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA – ÁREAS CHAVE 87
4.1.4 PERFIS ELETRORRESISTIVOS PARA AS LINHAS CENTRAL, NORTE E SUL 89
4.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO 90
4.2.1 CARACTERIZAÇÃO TÁCTIL VISUAL 90
4.2.2 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA 92
4.2.3 ANÁLISES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X 96
4.2.4 RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM LABORATÓRIO 97
4.3 RELAÇÃO ENTRE RESISTIVIDADE ELÉTRICA E TIPO DE SOLO 100
4.4 MODELOS GEOTÉCNICOS 103
4.4.1 QUADRILÁTERO CENTRO LESTE 104
4.4.2 QUADRILÁTERO NORTE 106
4.4.3 QUADRILÁTERO SUL 109
4.4.4 QUADRILÁTERO UFT 111
4.5 PERFIS GEOTÉCNICOS 113
4.5.1 ÁREAS CHAVE 113
4.5.2 LINHAS CENTRAL, NORTE E SUL 116
4.5.3 INVESTIGAÇÃO A TRADO 120
4.6 PRODUTOS CARTOGRÁFICOS 120
4.6.1 COTA E PROFUNDIDADE DO IMPENETRÁVEL AO ENSAIO SPT 121
4.6.2 COTA E PROFUNDIDADE DO NÍVEL FREÁTICO 121
4.6.3 COTAS E ESPESSURAS DE DIFERENTES TIPOS DE SOLO 121
4.6.4 CARTAS DE VALORES NSPT 122
4.6.5 HIPSOMETRIA 140
4.6.6 DECLIVIDADE 140
4.6.7 CURVATURAS PLANA E DE PERFIL 140
4.6.8 CARTA DE COMPARTIMENTAÇÃO GEOTÉCNICA 140
5. ANÁLISE DE RESULTADOS 147
5.1 CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA ÁREA DE ESTUDO 147

5.2 RELAÇÃO ENTRE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CAMPO E DE LABORATÓRIO 152
5.3 ANÁLISE DOS PERFIS GEOTÉCNICOS 158
5.3.1 ÁREA DO ESPAÇO CULTURAL 158
5.3.2 ÁREA DO SESC 159
5.3.3 ÁREA DO PARQUE SUSSUAPARA 160
5.3.4 LINHA CENTRAL 162
5.3.5 LINHA NORTE 167
5.3.6 LINHA SUL 172
5.3.7 ANÁLISE DAS INTERPRETAÇÕES GEOTÉCNCIAS 177
5.4 ANÁLISE DOS MODELOS GEOTÉCNICOS E PRODUTOS CARTOGRÁFICOS 182
5.4.1 PERFIS GEOTÉCNICOS OBTIDOS PELA ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS DE SONDAGEM 182
5.4.2 MODELO DE VALORES N_{SPT} 183
5.4.3 MODELO DE NÍVEL FREÁTICO 184
5.4.4 PRODUTOS CARTOGRÁFICOS 184
6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES 188
6.1 CONCLUSÕES 188
6.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS 190
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 192
APÊNDICE A 199
A.1 SONDAGENS À PERCUSSÃO 199
A.2 PERFIS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA – ÁREAS CHAVE 205
A.3 PERFIS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA – EIXOS TRANSVERSAIS 210
A.3.1 LINHA CENTRAL 210
A.3.2 LINHA NORTE 216
A.3.3 LINHA SUL 220
APÊNDICE B 224
B.1 CARACTERIZAÇÃO 224
B.2 ANÁLISE DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X 239
B.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM LABORATÓRIO 245
APÊNDICE C 252

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Fotografia que registra parte da cidade de Palmas, em destaque a Avenida JK, com a Serra de Lajeado ao fundo. 5
Figura 2.2 - Fotografia que registra parte da cidade de Palmas, em destaque a Avenida JK, com o Lago de Palmas e a ponte FHC ao fundo. 5
Figura 2.3 – Carta imagem da área de estudo. 6
Figura 2.4 – Relação entre intensidade e tempo de duração das chuvas para a cidade de Palmas. 10
Figura 2.5 – Histograma para a precipitação anual acumulada para a cidade de Palmas. 11
Figura 2.6 – Histograma para as temperaturas mínimas registradas na cidade de Palmas. 12
Figura 2.7 – Histograma para as temperaturas máximas registradas na cidade de Palmas..... 12
Figura 2.8 – Ilustração da situação geológica da área de estudo..... 13
Figura 2.9 – (a) Trado concha (b) Trépano (c) Trado hélice..... 15
Figura 2.10 – (a) Conjunto moto-bomba (b) Conexão para hastes (c) Mangueira para alta pressão. 16
Figura 2.11 – (a) Tubos de revestimento (b) Haste de 2 m. 16
Figura 2.12 – (a) Cabeça de bater (b) conjunto de peso e haste guia. 16
Figura 2.13 – (a) Amostrador tipo Raymond, (b) roldana e (c) corda – cabo de aço.. 17
Figura 2.14 - Equipamento de sondagem à percussão montado e em operação. 17
Figura 2.15 – Diagrama elétrico para auxiliar na definição da resistividade elétrica. 22
Figura 2.16 - Intervalos de valores típicos para materiais componentes do subsolo.. 23
Figura 2.17 - Relação entre umidade volumétrica e resistividade elétrica para solos argilosos 24
Figura 2.18 – Representação esquemática de caminhamento elétrico utilizando arranjo dipolo-dipolo..... 25
Figura 2.19 - Seção obtida por resistividade elétrica para uma área controlada.. 27
Figura 2.20 - Relação entre resistividade elétrica e umidade volumétrica..... 33
Figura 2.21 – Semivariograma e seus componentes. 37
Figura 2.22 – Representação da atuação do semivariograma sobre o conjunto de dados..... 38
Figura 2.23 - Representação gráfica dos interpoladores apresentados..... 38
Figura 2.24 - Comparação entre a representatividade de diferentes interpoladores. 40
Figura 2.25. Diagrama para o processo de construção de modelos geotécnicos. 43

Figura 2.26 - Modelo geotécnico tridimensional para a cidade de Glasgow no Reino Unido.. 44
Figura 2.27 - Modelo tridimensional com dados geofísicos em Brasília - DF. 45
Figura 2.28 – Principais metodologias utilizadas na elaboração de cartas geotécnicas. 47
Figura 2.29 - Determinação da escala de trabalho pelos principais pesquisadores. 49
Figura 3.1 – Identificação dos locais utilizados na determinação da relação entre características geotécnicas e geoelétricas. 50
Figura 3.2 – Localização das Linhas Central, Norte e Sul utilizadas na investigação do subsolo da área de estudo. 51
Figura 3.3 – Fluxograma síntese do procedimento de criação dos perfis e dos modelos geotécnicos. 52
Figura 3.4 – Detalhe do equipamento Syscal Kid® utilizado nos ensaios. 53
Figura 3.5 - Disposição das linhas de eletrorresistividade para a região do Espaço Cultural.. 55
Figura 3.6 - Disposição das linhas de eletrorresistividade para a região do SESC. 55
Figura 3.7 - Disposição das linhas de eletrorresistividade para a região do Parque Sussuapara. 56
Figura 3.8 – Coleta de amostra retida no amostrador bipartido.. 57
Figura 3.9 – Fluxograma de atividades desenvolvidas no laboratório. 58
Figura 3.10– (a) Processo de destorroamento (b) Classificação quanto à cor (c) Verificação da coesão.. 59
Figura 3.11 – (a) Fonte de corrente contínua (b) Multímetro (c) Capacete de contato. 62
Figura 3.12 – Circuito elétrico utilizado na determinação da resistividade elétrica dos corpos de prova. 62
Figura 3.13 – Relação entre corrente elétrica medida e diferença de potencial aplicada. 63
Figura 3.14 – Relação entre resistividade elétrica e umidade volumétrica.. 64
Figura 3.15 – Plataforma Prosys II, processo de verificação da consistência dos dados.. 67
Figura 3.16 – (a) Perfil geoelétrico inicial (b) perfil geotécnico interpretado... 69
Figura 3.17 – Aspecto do banco de dados geotécnico criado no programa Rockworks®.. 72
Figura 3.18 – Ábaco utilizado na determinação da escala de trabalho pelos principais pesquisadores... 73
Figura 3.19 – Tela de ajuste do processamento no programa *Rockworks*®. 74
Figura 3.20 – Tela de processamento para obtenção do modelo de aquífero no programa *Rockworks*®... 78

Figura 3.21 – Tela de processamento para obtenção do modelo de N_{SPT} no programa *Rockworks®*... 79
Figura 3.22 – Programa utilizado no processamento das cartas de curvatura plana e de perfil.... 81
Figura 4.1 – Valores de NSPT obtidos nos ensaios de sondagem à percussão.... 84
Figura 4.2 – Seção de resistividade elétrica obtida para o SESC no início do período chuvoso (Novembro, 2015).... 86
Figura 4.3 – Figura 4.3 – Seção de resistividade elétrica obtida para o SESC no final do período chuvoso (Março, 2016).... 86
Figura 4.4 – Seção de resistividade elétrica obtida para a linha Central com o método dipolo-dipolo (Fevereiro, 2017)..... 87
Figura 4.5 – Seção de resistividade elétrica obtida para a linha Central com o método polo-dipolo (Fevereiro, 2017)..... 87
Figura 4.6 (a) e 4.6 (b) - Seções de resistividade elétrica para a região do Espaço Cultural, Trecho 07 (a) e Trecho 01(b)..... 88
Figura 4.7 - Seção de resistividade aparente para a região do SESC, Trecho 03 (a) e Trecho 00 (b)..... 88
Figura 4.8 - Seção de resistividade aparente para a região do Parque Sussuapara, Trecho 01 (a) e Trecho 04 (b)..... 89
Figura 4.9 – Seção de resistividade elétrica obtido na linha Central.... 89
Figura 4.10 – Seção de resistividade elétrica obtido na linha Norte.... 90
Figura 4.11 – Seção de resistividade elétrica obtido na linha Sul.... 90
Figura 4.12 – Relação entre o grau de saturação e a máxima força aplicada para as amostras argilosas..... 98
Figura 4.13 – Histograma e curva de distribuição normal para as amostras argilosas ensaiadas em laboratório..... 99
Figura 4.14 – Histograma e curva de distribuição normal para as amostras siltosas ensaiadas em laboratório..... 99
Figura 4.15 – Histograma e curva de distribuição normal para as amostras arenosas ensaiadas em laboratório..... 100
Figura 4.16 – Histograma e curva de distribuição normal solos argilosos encontrados nas análises de campo.... 101

Figura 4.17 – Histograma e curva de distribuição normal para solos siltosos encontrados nas análises de campo.... 101
Figura 4.18 – Histograma e curva de distribuição normal para solos arenosos encontrados nas análises de campo.... 102
Figura 4.19 – Histogramas para os dados de N_{SPT}.... 103
Figura 4.20 – Localização dos quadriláteros Norte, Centro-Leste, Sul e UFT.... 104
Figura 4.21 – Localização do quadrilátero centro-leste.... 104
Figura 4.22 – Disposição das sondagens encontradas no quadrilátero Centro-Leste..... 105
Figura 4.23 – Modelo de seções para os solos do quadrilátero centro-leste.... 105
Figura 4.24 – Modelo de seções para valores de NSPT para o quadrilátero centro-leste.... 106
Figura 4.25 – Localização do quadrilátero Norte.... 107
Figura 4.26 – Disposição das sondagens encontradas no quadrilátero Norte.... 107
Figura 4.27 – Modelo de seções para os solos do quadrilátero Norte.... 108
Figura 4.28 – Modelo de seções para valores de NSPT para o quadrilátero Norte.... 108
Figura 4.29 – Localização do quadrilátero Sul.... 109
Figura 4.30 – Disposição das sondagens encontradas no quadrilátero Sul.... 109
Figura 4.31 – Modelo de seções para os solos do quadrilátero Sul.... 110
Figura 4.32 – Modelo de seções para valores de NSPT para o quadrilátero Sul.... 110
Figura 4.33 – Localização do quadrilátero UFT.... 111
Figura 4.34 – Disposição das sondagens encontradas no quadrilátero UFT.... 111
Figura 4.35 – Modelo de seções para os solos do quadrilátero UFT.... 112
Figura 4.36 – Modelo de seções para valores de NSPT para o quadrilátero UFT.... 112
Figura 4.37 – Perfis geotécnicos para o Espaço Cultural e Parque Sussuapara.... 114
Figura 4.38 – Perfil geotécnico para o SESC.... 115
Figura 4.39 – Perfil geotécnico para o trecho inicial da linha Central.... 117
Figura 4.40 – Perfil geotécnico para o trecho inicial da linha Norte.... 118
Figura 4.41 – Perfil geotécnico para o trecho inicial da linha Sul.... 119
Figura 4.42– Cotas da superfície impenetrável ao SPT.... 123
Figura 4.43– Profundidade do impenetrável ao SPT.... 124
Figura 4.44– Cotas da superfície freática.... 125
Figura 4.45– Profundidade do nível freático.... 126
Figura 4.46– Cotas do topo da camada arenosa.... 127

Figura 4.47– Cotas da base da camada arenosa.... 128
Figura 4.48– Espessura da camada arenosa.... 129
Figura 4.49– Cotas do topo da camada argilosa..... 130
Figura 4.50– Cotas da base da camada argilosa.... 131
Figura 4.51– Espessura da camada argilosa.... 132
Figura 4.52– Cotas do topo da camada siltosa.... 133
Figura 4.53– Cotas da base da camada siltosa.... 134
Figura 4.54– Espessura da camada siltosa.... 135
Figura 4.55– Valores de N_{SPT} a 2 m de profundidade.... 136
Figura 4.56– Valores de N_{SPT} a 5 m de profundidade.... 137
Figura 4.57– Valores de N_{SPT} a 7 m de profundidade.... 138
Figura 4.58– Valores de N_{SPT} a 10 m de profundidade.... 139
Figura 4.59– Carta hipsométrica.... 142
Figura 4.60– Carta de declividade..... 143
Figura 4.61– Carta de curvatura vertical.... 144
Figura 4.62– Carta de curvatura plana.... 145
Figura 4.63– Carta de unidades geotécnicas.... 146
Figura 5.1 – Histograma para o impenetrável ao NSPT da área de estudo.... 147
Figura 5.2 – Histograma para a profundidade do nível freático considerando dados de todos os meses do ano..... 148
Figura 5.3 – Histograma para a profundidade de furos onde não se encontrou o lençol freático 149
Figura 5.4 – Histograma para a profundidade do nível freático considerando dados dos meses chuvosos.... 150
Figura 5.5 – Histograma para a profundidade do nível freático considerando dados dos meses secos.... 151
Figura 5.6 – Distribuição relativa entre os principais tipos de solos encontrados na área de estudo.... 152
Figura 5.7 – Relação entre resistividade elétrica obtida em campo e aquela obtida em laboratório para o furo SPT 01.... 154
Figura 5.8 – Relação entre resistividade elétrica obtida em campo e aquela obtida em laboratório para o furo SPT 02.... 154
Figura 5.9 – Relação entre resistividade elétrica obtida em campo e aquela obtida em laboratório para o furo SPT 03.... 155

Figura 5.10 – Relação entre resistividade elétrica obtida em campo e aquela obtida em laboratório para o furo SPT 04.... 156
Figura 5.11 – Relação entre resistividade elétrica obtida em campo e aquela obtida em laboratório para o furo SPT 05.... 157
Figura 5.12 – Relação entre resistividade elétrica obtida em campo e aquela obtida em laboratório para o furo SPT 06.... 158
Figura 5.13 – (a) Seção de resistividade elétrica para a área do Espaço Cultural, margem Sul (b) Perfil geotécnico para a área do Espaço Cultural, margem Sul.... 159
Figura 5.14 – (a) Seção de resistividade elétrica para a área do SESC (b) Perfil geotécnico para a área do SESC.... 160
Figura 5.15 – (a) Seção de resistividade elétrica para a área do Parque Sussuapara, margem Sul (b) Perfil geotécnico para a área do Parque Sussuapara, margem Sul.... 161
Figura 5.16 – (a) Seção de resistividade elétrica para a área do Parque Sussuapara, margem Norte (b) Perfil geotécnico para a área do Parque Sussuapara, margem Norte.... 162
Figura 5.17 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho entre o Lago e a Av. NS-15, Linha Central.... 163
Figura 5.18 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho entre a Av. NS-07 e a Av. NS-05, Linha Central. 164
Figura 5.19 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho entre a Av. NS-05 e a Av. NS-01, Linha Central.... 165
Figura 5.20 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho entre a Av. NS-10 e a TO-050, Linha Central.... 166
Figura 5.21 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho entre a Av. NS-15 e a NS-05, Linha Norte.... 168
Figura 5.22 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho entre a Av. NS-05 e a NS-01, Linha Norte.... 169

Figura 5.23 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho próximo à Av. NS-06, Linha Norte.... 170
Figura 5.24 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho próximo à Av. NS-08, Linha Norte..... 171
Figura 5.25 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Próximo à Praia do Prata, Linha Sul..... 173
Figura 5.26 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Altura das quadras 5, Linha Sul.....174
Figura 5.27 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Altura das quadras 3, Linha Sul.... 175
Figura 5.28 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Próximo à NS-01..... 176
Figura 5.29 – Curva de distribuição normal e histograma para os perfis de investigação a trado, solos argilosos.... 180
Figura 5.30 – Curva de distribuição normal e histograma para os perfis de investigação a trado, solos siltosos..... 181
Figura 5.31 – Curva de distribuição normal e histograma para os perfis de investigação a trado, solos arenosos..... 181
Figura 5.32 – Curva hipsométrica para a área de estudo.... 185
Figura 5.33 – Perfil topográfico para a porção Norte da área de estudo.... 185
Figura 5.34 – Perfil topográfico para a porção Central da área de estudo.... 186
Figura A.1 – Boletim de sondagem SPT 01.... 199
Figura A.2 – Boletim de sondagem SPT 02.... 200
Figura A.3 – Boletim de sondagem SPT 03.... 202
Figura A.4 – Boletim de sondagem SPT 04.... 202
Figura A.5 – Boletim de sondagem SPT 05.... 203
Figura A.6 – Boletim de sondagem SPT 06.... 204

Figura A.7 – Seção de resistividade elétrica obtida para o Espaço Cultural no início do período chuvoso, parte Sul.... 205
Figura A.8 – Seção de resistividade elétrica obtida para o Espaço Cultural no final do período chuvoso, parte Sul.... 205
Figura A.9 – Seção de diferenças observadas para resistividade elétrica entre o início e o final do período chuvoso para o Espaço Cultural, parte Sul.... 205
Figura A.10 – Seção de resistividade elétrica obtida para o Espaço Cultural no início do período chuvoso, parte Norte.... 206
Figura A.11 – Seção de resistividade elétrica obtida para o Espaço Cultural no final do período chuvoso, parte Norte.... 206
Figura A.12 – Seção de diferenças observadas para resistividade elétrica entre o início e o final do período chuvoso para o Espaço Cultural, parte Norte.... 206
Figura A.13 – Seção de resistividade elétrica obtida para o SESC no início do período chuvoso..... 207
Figura A.14 – Seção de resistividade elétrica obtida para o SESC no final do período chuvoso..... 207
Figura A.15 – Seção de diferenças observadas para resistividade elétrica entre o início e o final do período chuvoso para o SESC..... 207
Figura A.16 – Seção de resistividade elétrica obtida para o Parque Sussuapara no início do período chuvoso, parte Sul.... 208
Figura A.17 – Seção de resistividade elétrica obtida para o Parque Sussuapara no final do período chuvoso, parte Sul.... 208
Figura A.18 – Seção de diferenças observadas para resistividade elétrica entre o início e o final do período chuvoso para o Parque Sussuapara, parte Sul.... 208
Figura A.19 – Seção de resistividade elétrica obtida para o Parque Sussuapara no início do período chuvoso, parte Norte.... 209
Figura A.20 – Seção de resistividade elétrica obtida para o Parque Sussuapara no final do período chuvoso, parte Norte.... 209
Figura A.21 – Seção de diferenças observadas para resistividade elétrica entre o início e o final do período chuvoso para o Parque Sussuapara, parte Norte.... 209
Figura A.22 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 01.... 210
Figura A.23 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 02.... 210
Figura A.24 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 03.... 210

Figura A.25 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 04.... 211
Figura A.26 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 05.... 211
Figura A.27 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 06.... 211
Figura A.28 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 07.... 211
Figura A.29 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 08.... 212
Figura A.30 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 09.... 212
Figura A.31 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 10.... 212
Figura A.32 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 11.... 212
Figura A.33 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 12.... 213
Figura A.34 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 13.... 213
Figura A.35 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 14.... 213
Figura A.36 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 15.... 213
Figura A.37 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 16.... 214
Figura A.38 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 17.... 214
Figura A.39 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 18.... 214
Figura A.40 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 19.... 214
Figura A.41 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 20.... 215
Figura A.42 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 21.... 215
Figura A.43 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 22.... 215
Figura A.44 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 23.... 215
Figura A.45 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha central – trecho 24.... 216
Figura A.46 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 01.... 216
Figura A.47 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 02.... 216
Figura A.48 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 03.... 216
Figura A.49 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 04.... 217
Figura A.50 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 05.... 217
Figura A.51 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 06.... 217
Figura A.52 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 07.... 217
Figura A.53 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 08.... 218
Figura A.54 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 09.... 218
Figura A.55 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 10.... 218
Figura A.56 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 11.... 218
Figura A.57 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 12.... 219

Figura A.58 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 13.... 219
Figura A.59 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 14.... 219
Figura A.60 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 15.... 219
Figura A.61 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha norte – trecho 16.... 220
Figura A.62 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 01.... 220
Figura A.63 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 02.... 220
Figura A.64 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 03.... 220
Figura A.65 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 04.... 221
Figura A.66 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 05.... 221
Figura A.67 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 06.... 221
Figura A.68 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 07.... 221
Figura A.69 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 08.... 222
Figura A.70 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 09.... 222
Figura A.71 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 10.... 222
Figura A.72 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 11.... 222
Figura A.73 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 12.... 223
Figura A.74 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 13.... 223
Figura A.75 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 14.... 223
Figura A.76 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 15.... 223
Figura A.77 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 16.... 224
Figura A.78 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 17.... 224
Figura B.1 – Resultados de caracterização obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT01.... 229
Figura B.2 – Resultados de caracterização obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT02.... 231
Figura B.3 – Resultados de caracterização obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT03.... 234
Figura B.4 – Resultados de caracterização obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT04.... 236
Figura B.5 – Resultados de caracterização obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT05.... 237
Figura B.6– Resultados de caracterização obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT06.... 239

Figura B.7– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT01 a 5 m de profundidade.... 240
Figura B.8– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT02 a 1 m de profundidade.... 240
Figura B.9– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT02 a 4 m de profundidade.... 241
Figura B.10– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT02 a 11 m de profundidade.... 241
Figura B.11– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT03 a 5 m de profundidade.... 242
Figura B.12– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT03 a 6 m de profundidade.... 242
Figura B.13– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT04 a 1 m de profundidade.... 243
Figura B.14– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT04 a 5 m de profundidade.... 243
Figura B.15– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT04 a 7 m de profundidade.... 244
Figura B.16– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT05 a 1 m de profundidade.... 244
Figura B.17– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT06 a 2 m de profundidade.... 245
Figura B.18– Histograma para máximas cargas aplicadas na compactação dos solos argilosos.... 246
Figura B.19– Histograma para máximas cargas aplicadas na compactação dos solos siltosos.... 246
Figura B.20– Histograma para máximas cargas aplicadas na compactação dos solos arenosos.... 247
Figura B.21– Histograma para máximas cargas aplicadas na compactação dos saprólitos....247
Figura C.1– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Central.... 253
Figura C.2– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Central.... 254

Figura C.3– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Central.... 255
Figura C.4– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Central.... 256
Figura C.5– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Central.... 257
Figura C.6– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Central.... 258
Figura C.7– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Central.... 259
Figura C.8– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Central.... 260
Figura C.9– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Norte.... 261
Figura C.10– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Norte.... 262
Figura C.11– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Norte.... 263
Figura C.12– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Norte.... 264
Figura C.13– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Norte.... 265
Figura C.14– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Sul..... 266
Figura C.15– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Sul..... 267
Figura C.16– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Sul..... 268
Figura C.17– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Sul..... 269
Figura C.18– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções de resistividade elétrica para a linha Sul..... 270

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1. Evolução populacional absoluta.. 8
Tabela 2.2. Taxas de incremento populacional. 8
Tabela 2.3 – Relação entre consistência, compacidade e índice de resistência à penetração. . 30
Tabela 2.4 – critérios de classificação utilizados na determinação dos grupos segundo o sistema SUCS de classificação. 32
Tabela 3.1 – Coordenadas dos pontos onde foram realizadas as sondagens SPT – Datum Sirgas 2000. 56
Tabela 3.2 – Amostras submetidas a ensaios de granulometria com sedimentação e limites de consistência. 60
Tabela 3.3 – Coordenadas de inicio e fim das Linhas Central, Norte e Sul – Datum Sirgas 2000.. 66
Tabela 3.4 – Coordenadas dos vértices dos Quadriláteros: Centro-Leste, Norte, Sul e UFT – Datum Sirgas 2000.. 75
Tabela 4.1 – Síntese da classificação tátil visual para as amostras coletadas. 83
Tabela 4.2 – Chuva acumulada mensal para os meses em que ocorreram ensaios de campo.. 85
Tabela 4.3 – Classificação das amostras obtidas nas sondagens SPT 01 e 02.. 91
Tabela 4.4 – Classificação das amostras obtidas nas sondagens SPT 03 e 04.. 91
Tabela 4.5 – Classificação das amostras obtidas nas sondagens SPT 05 e 06.. 92
Tabela 4.6 – Média dos resultados dos ensaios de granulometria para os solos classificados como argila, silte areia e saprólito na análise táctil visual... 92
Tabela 4.7 – Valores de limites de consistência dos solos estudados.. 93
Tabela 4.8 – Resultados obtidos para a umidade, peso específico, índice de vazios, saturação e porosidade para a sondagem SPT01 94
Tabela 4.9 – Resultados obtidos para a umidade, peso específico, índice de vazios, saturação e porosidade para a sondagem SPT02 94
Tabela 4.10 – Resultados obtidos para a umidade, peso específico, índice de vazios, saturação e porosidade para a sondagem SPT03.. 95
Tabela 4.11 – Resultados obtidos para a umidade, peso específico, índice de vazios, saturação e porosidade para a sondagem SPT04.. 95
Tabela 4.12 – Resultados obtidos para a umidade, peso específico, índice de vazios, saturação e porosidade para a sondagem SPT05.. 95

Tabela 4.13 – Resultados obtidos para a umidade, peso específico, índice de vazios, saturação e porosidade para a sondagem SPT06.. 96
Tabela 4.14 – Percentual de argilominerais encontrados nas análises de difração de raios-X.. 97
Tabela 4.15 – Relação entre tipo de solo e intervalo esperado de resistividade elétrica.. 102
Tabela 4.16 – Resultados para a investigação de reconhecimento a trado.. 120
Tabela 5.1 – Comparativo entre valores de resistividade elétrica esperada e observada na campanha de investigação a trado, Linha Norte.. 178
Tabela 5.2 – Comparativo entre valores de resistividade elétrica esperada e observada na campanha de investigação a trado, Linha Central.. 178
Tabela 5.3 – Comparativo entre valores de resistividade elétrica esperada e observada na campanha de investigação a trado, Linha Sul.. 179
Tabela 5.4 – Relação ajustada entre tipo de solo e intervalo esperado de resistividade elétrica.. 182
Tabela B.1 – Resultados dos ensaios de laboratório para classificação táctil visual, SPT01 .. 224
Tabela B.2 – Resultados dos ensaios de laboratório para classificação táctil visual, SPT02 .. 225
Tabela B.3 – Resultados dos ensaios de laboratório para classificação táctil visual, SPT03 .. 226
Tabela B.4 – Resultados dos ensaios de laboratório para classificação táctil visual, SPT05 .. 226
Tabela B.5 – Resultados dos ensaios de laboratório para classificação táctil visual, SPT05 .. 227
Tabela B.6 – Resultados dos ensaios de laboratório para classificação táctil visual, SPT01 .. 228
Tabela B.7 – Resultados obtidos para os ensaios de resistividade elétrica em laboratório.... 228

ÍNDICE DE EQUAÇÕES

Equação 2.1.. 9
Equação 2.2. 22
Equação 2.3. 26
Equação 2.4. 31
Equação 2.5. 31
Equação 2.6. 33
Equação 2.7. 36
Equação 2.8. 36
Equação 2.9. 39
Equação 2.10. 39
Equação 2.11. 39
Equação 2.12. 39
Equação 2.13. 39
Equação 3.1. 64

SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

% - porcentagem

® - marca registrada

A - área

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

Av. – avenida

C – argila

C_C – coeficiente de curvatura

cm² - centímetros quadrados

CPRM – Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil

CPT – *cone penetration test*

C_U – coeficiente de uniformidade

d – distância intercamada

ddp – diferença de potencial

Eq. – equação

Fig. - figura

g – grama

G – pedregulho

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IP – índice de plasticidade

JK – Juscelino Kubitschek

K – quilo (10^3)

kg - quilograma

L – comprimento

m – metro

M – silte

mm – milímetro

N - Newton

NBR – norma brasileira

N_{SPT} – número de golpes do ensaio SPT

O – solo orgânico

P – mal graduado

R – resistência

S – siemens

S - areia

Σ - somatório

SPT – *standard penetration test*

V – diferença de potencial

W – bem graduado

w - umidade

W_L – limite de liquidez

W_{LO} – limite de liquidez com material seco em estufa

W_{Ln} – limite de liquidez com material não seco

W_P – limite de plasticidade

γ – peso específico

Δ – variação

θ – ângulo

λ – comprimento de onda

ρ – resistividade

ρ_S – massa específica dos sólidos

Ω – ohm

1 – INTRODUÇÃO

A investigação geotécnica permite obter informações do solo abaixo da superfície e pode ser realizada de maneira direta, com o uso de trados, amostradores, penetrômetros, escavação de poços e trincheiras, ou de forma indireta, por meio da geofísica (Caputo, 1996).

Os métodos diretos são bastante confiáveis e são os mais comumente empregados no dia a dia da construção civil, contudo, apresentam tempo de execução e custos significativamente elevados, especialmente quando se tratam de grandes áreas.

A sondagem à percussão do tipo *Standard Penetration Test* (SPT), normatizada pela NBR 6484 (ABNT, 2001) é um dos tipos de investigação mais empregados no País, especialmente quando o objetivo do estudo é subsidiar projetos de fundações, sendo também utilizada amplamente em obras de rodovias, ferrovias, barragens entre tantas outras.

O seu amplo emprego se deve, em grande parte, pela dedicação de pesquisadores em extrair o máximo de informação dos dados fornecidos pelo ensaio e, especialmente, correlacionando-os diretamente com a capacidade de carga de fundações.

A padronização do ensaio SPT possibilita aos pesquisadores reunir os laudos produzidos e agrupar informações, relacionando-as com suas respectivas posições no espaço geográfico. Desse modo, interpolam-se os dados oriundos de sondagem SPT e elaboram-se cartas geotécnicas baseadas em suas informações.

Trabalhos como os de Belcher (1954), que apresenta relatório sobre as condições físicas da área onde seria edificada a Capital Brasília, e de Dearman e Matula (1976), que tratam dos aspectos envolvidos na produção de cartas geotécnicas, contribuíram para o desenvolvimento da cartografia geotécnica.

No Brasil, Lollo (1996) aplica técnicas de avaliação de terreno para a cartografia geotécnica em Campinas - SP. Zuquette e Gandolfi (2004) apresentam, no livro intitulado Cartografia Geotécnica, uma referência para essa ciência no País.

Baseado nos princípios cartográficos desenvolvidos até então, trabalhos utilizando o ensaio SPT como fonte de dados geotécnicos são empregados no desenvolvimento de estudos de cartografia geotécnica.

Talamini Neto (2001) apresenta estudo de caracterização geotécnica para a cidade de Curitiba empregando dados obtidos em sondagem SPT. Silva e Souza (2008) apresentam estudo que

relata a produção de modelos geotécnicos tridimensionais a partir de dados de sondagem SPT. Soares (2011) apresenta trabalho que utiliza um banco de dados geotécnicos baseado em dados de sondagem SPT para desenvolver o mapeamento do lençol freático e de valores de N_{SPT} para a cidade de João Pessoa. Bezerra (2014) apresenta estudo em que técnicas de geoestatística são aplicadas na melhoria de projetos de fundações estaqueadas.

A partir dos estudos desenvolvidos no Brasil e no exterior por pesquisadores como Belcher (1954), Dearman e Matula (1976), Grant e Finlayson (1978), Lollo (1996), Zuquette e Gandolfi (2004), Silva e Souza (2008), permitiu-se analisar de maneira quantitativa a subsuperfície das principais áreas urbanas do mundo, inclusive do Brasil.

As cartas geotécnicas produzidas a partir de bancos de dados de sondagem SPT contribuíram e ainda contribuem para o desenvolvimento dos centros metropolitanos, fomentando a tomada de decisões por parte dos engenheiros. Ainda que, em muitos casos, ocorra carência dessas informações, seja pela inexistência de sondagens ou pela sua inacessibilidade.

Por outro lado, o gestor público incumbido de resolver os problemas urbanos recorre às cartas geotécnicas para amparar suas decisões e fomentar seus projetos a serem licitados, mas esbarra justamente na dificuldade de encontrar essas informações nas áreas onde as intervenções do Estado são mais requeridas.

A realização de furos de sondagem para o fim de planejamento urbano é considerada dispendiosa, já que seria necessário um número muito grande de furos para cobrir áreas urbanas. Nesse cenário, o emprego de métodos indiretos de investigação passa a ser interessante.

Os métodos geofísicos, em particular a resistividade elétrica, permitem distinguir diferentes tipos de solo pela medida da resistividade elétrica, observada quando se induz nele uma corrente elétrica.

A resistividade elétrica observada varia de em função de algumas propriedades do solo, tais como o grau de compactação e a umidade. Ou seja, em tese é possível relacionar a resistividade elétrica com o tipo de solo, grau de compactação e umidade.

Contudo, diferente do que se tem com o SPT para a engenharia civil, a eletrorresistividade não é cotidianamente empregada pelos engenheiros civis, e a quantidade de trabalhos realizados com ela para fins de investigação geotécnica não é, ainda, em número suficiente para contribuir como a sondagem à percussão contribui.

Decorrente disso há a dificuldade de se encontrar na bibliografia padrões que relacionam as características dos solos com os valores observados de resistividade elétrica, para as várias regiões do Brasil. Até porque a resistividade elétrica é bastante sensível a pequenas alterações no meio, podendo assumir valores muito distintos conforme a localidade de estudo e condições climáticas, por exemplo.

Assim, busca-se com este trabalho contribuir para a utilização de eletrorresistividade na investigação geotécnica voltada para o planejamento urbano das cidades brasileiras.

1.1 - OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo geral avaliar a viabilidade de se obter informações geotécnicas a partir do emprego de resistividade elétrica, tendo como base um modelo geotécnico desenvolvido a partir de dados de sondagens SPT e utilizando a cidade de Palmas-TO como área de estudo.

A pesquisa teve ainda os seguintes objetivos específicos:

- ✓ Construir e organizar um banco de dados de sondagens do tipo SPT;
- ✓ Produzir modelos geotécnicos para caracterizar a área de estudo;
- ✓ Estabelecer faixas de valores de resistividade elétrica para os principais tipos de solos encontrados na área de estudo;
- ✓ Avaliar a viabilidade de traçar perfis geotécnicos a partir de perfis geofísicos;
- ✓ Criar produtos cartográficos com informações geotécnicas para auxiliar o desenvolvimento urbano.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão bibliográfica utilizada para referenciar e fundamentar o desenvolvimento do trabalho. É apresentada a área de estudo, seus limites geográficos, seus principais aspectos de população, clima, relevo e geologia. O embasamento teórico relativo à sondagem à percussão, à resistividade elétrica, além de estudos correlatos com este trabalho.

2.1 - DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Palmas, Capital do Estado do Tocantins, foi fundada aos 20 dias de maio do ano de 1989. O mais novo centro urbano do País foi planejado para atender as demandas de seus moradores, devendo ser capaz de absorver o crescimento esperado com a criação do novo Estado (Carvalhedo, 2009).

Os projetistas da cidade limitaram o espaço urbano da Capital entre as margens do então futuro lago da UHE Lajeado, hoje Lago de Palmas a Oeste, e a Serra de Lajeado a Leste. Esperavam, para a primeira etapa do projeto, atender uma população de até 200 mil habitantes, sendo que com as áreas destinadas a expansões planejadas poderiam ser abrigadas até 1,2 milhão de pessoas (Carvalhedo, 2009).

O acesso à cidade se dá por meio das rodovias estaduais TO-080, que liga à cidade de Paraíso do Tocantins e dá acesso à rodovia Belém-Brasília (BR-153), e TO-050 que faz a conexão com o Norte e o Sul do Estado. Também se pode acessar a cidade por meio do aeroporto Brigadeiro Lysias Rodrigues, que opera voos nacionais. Existem, ainda, projetos para a implantação de um eixo hidroviário, passando pelo Lago de Palmas, contudo, não há um cronograma previsto para sua execução.

A cidade está limitada a Leste pela Serra de Lajeado, formação rochosa que se estende desde o município de Palmas até o município de Lajeado, ao Norte da Capital. Entre o Plano Diretor e a Serra de Lajeado existe a rodovia TO-050 que liga Palmas a Miracema, ao Norte, e a Porto Nacional, ao Sul. A Figura 2.1 ilustra a Serra de Lajeado ao fundo da fotografia.

O Lago de Palmas limita a cidade a Oeste, banhando a Capital por toda a sua extensão longitudinal. A ponte Fernando Henrique Cardoso (Figura 2.2) liga Palmas à cidade de Paraíso do Tocantins.

Apesar de se localizar em um município de topografia escarpada, o Plano Diretor foi definido em uma região particularmente plana, com declividade predominante entre 2% e 10%. Quanto

à hidrografia, a cidade é cortada no sentido Leste-Oeste pelo Ribeirão Água Fria ao Norte, pelo Córrego Comprido na região Central e pelo Ribeirão Taquaruçu ao Sul.



Figura 2.1 - Fotografia que registra parte da cidade de Palmas, em destaque a Avenida JK, com a Serra de Lajeado ao fundo (Kleiber Arantes, 2017).



Figura 2.2 - Fotografia que registra parte da cidade de Palmas, em destaque a Avenida JK, com o Lago de Palmas e a ponte FHC ao fundo (Zezinha Carvalho, 2017).

A Figura 2.3 apresenta a carta imagem da Cidade. Nela se observam a distribuição da área urbana, a disposição da cidade em relação à topografia da região, além dos principais elementos físicos que compõem a área de estudo.

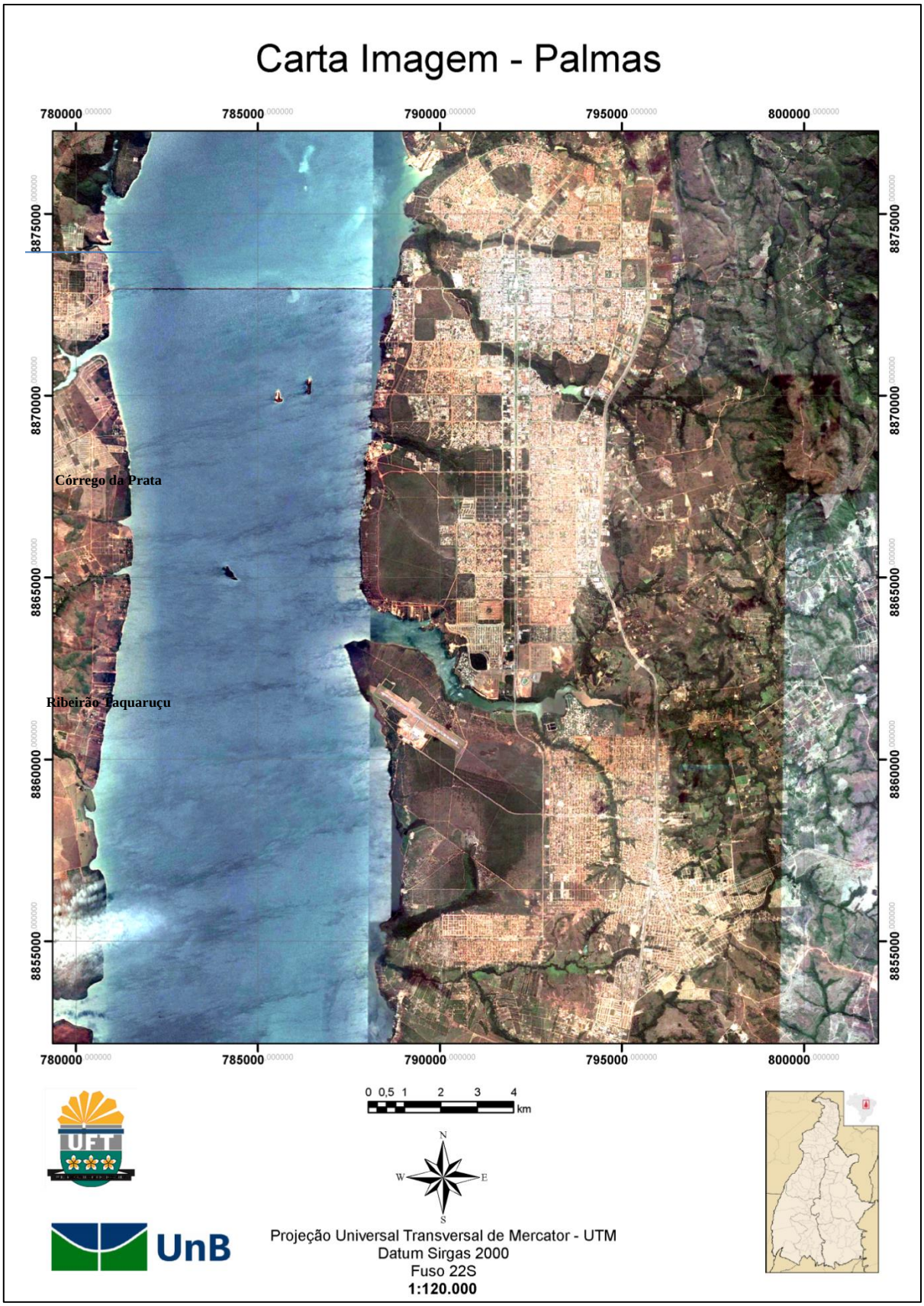


Figura 2.3 – Carta imagem da área de estudo.

As Avenidas Theotônio Segurado e Juscelino Kubitschek (JK) são os principais eixos de transporte da cidade. A primeira corta a cidade de Norte a Sul, já a segunda de Leste a Oeste. O seu cruzamento ocorre na Praça dos Girassóis, onde estão as sedes dos Poderes Executivo, Legislativo e Judiciário do Estado. Ao seu redor está concentrada a maior parte das empresas ligadas ao comércio e ao setor de serviços da cidade.

As vias auxiliares conectam as diferentes quadras e recebem o prefixo NS quando são paralelas a Av. Theotônio Segurado ou LO quando são paralelas a Av. JK. O deslocamento dentro das quadras é realizado por meio de alamedas, sendo a alameda principal aquela que conecta a quadra às vias auxiliares.

Segundo a Lei Municipal Complementar n° 14 de 2006 que versa sobre o Plano Diretor da Cidade, a área urbana é dividida em diferentes zonas com interesses específicos, dentre elas destacam-se: área de ocupação prioritária em torno da Av. Theotônio Segurado, área de ocupação prioritária em torno da Av. JK, área de ocupação prioritária em torno das vias auxiliares, área de ocupação preferencial em torno da Av. Theotônio Segurado e área de ocupação preferencial em torno da Av. JK.

As áreas de ocupação prioritária são aquelas adjacentes aos principais corredores de transporte e são destinadas para uso comercial misto, a serem edificados prédios de múltiplos pavimentos e que receberão corredores de transporte para interligação das regiões Norte, Sul e Central da Cidade.

As áreas de ocupação definidas como prioritárias de via auxiliar são aquelas localizadas nas avenidas que dividem as quadras e que se destinam ao comércio local, recebendo estruturas médias com poucos pavimentos.

As áreas classificadas como ocupação preferencial são as quadras de uso misto, próximas aos eixos de ocupação prioritária e que devem ser ocupadas por residências unifamiliares, pequenos comércios e, em locais específicos, edifícios residenciais.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), as estimativas apontam para 2017 uma população próxima a 300 mil habitantes e um ritmo de crescimento populacional superior à média estadual e a nacional, como se pode observar nas Tabelas 2.1 e 2.2, que apresentam a evolução populacional absoluta e as taxas de incremento populacional, respectivamente (IBGE, 2017).

Entre os anos de 1991 e 2015 Palmas experimentou um aumento superior a 1.000 % em sua população, enquanto que o estado do Tocantins e o Brasil, nesse mesmo período, sofreram aumentos de 60 % e 40 %, respectivamente em suas populações, o que implica em uma crescente demanda por serviços públicos e equipamentos de infraestrutura urbana.

Tabela 2.1. Evolução populacional absoluta. (IBGE, 2017).

Evolução Populacional (hab.)			
Ano	**Palmas**	**Tocantins**	**Brasil**
1991	24.334	919.863	146.825.475
1996	82.977	1.037.398	156.032.944
2000	137.355	1.157.098	169.799.170
2007	178.386	1.243.627	183.987.291
2010	228.332	1.383.445	190.755.799
2015	272.726	1.515.126	206.159.235

Tabela 2.2. Taxas de incremento populacional. (IBGE, 2017).

Taxa da Evolução Populacional (%/ano)			
Ano	**Palmas**	**Tocantins**	**Brasil**
1991/1996	48,2	2,6	1,3
1996/2000	16,4	2,9	2,2
2000/2007	4,3	1,1	1,2
2007/2010	9,3	3,8	1,2
2010/2015	3,9	1,9	1,6
1991/2015	42,5	2,7	1,7

Com o objetivo de manter a concepção original do projeto urbanístico, prover os cidadãos de serviços públicos de qualidade e garantir a manutenção da gerência da cidade, apesar do incremento populacional acentuado, os administradores elaboraram um conjunto de medidas

legais, dentre elas destacam-se: o Código de Obras (1990), Código de Postura (1992), Lei de Zoneamento e Uso do Solo (1993) e o Plano Diretor (2007).

Contudo, nenhum dos instrumentos legais foi embasado em estudos de investigação geotécnica, o que resulta na impossibilidade da previsão da viabilidade técnica e econômica da construção e operação dos aparelhos de infraestrutura necessários a serem edificados na cidade num horizonte próximo.

2.2 ASPECTOS GERAIS

A cidade está em uma altitude média de 246 m acima do nível do mar, variando entre os 208 m e os 310 m. A Sede Administrativa do município atualmente está localizada nas coordenadas: latitude 10° 11’ 2’’ Sul e longitude 48° 19’ 36’’ Oeste. O relevo apresenta declividade predominante entre 2% e 10%, sendo dividido hidrograficamente pelas: Bacia do Ribeirão Água Fria, Bacia do Córrego Sussuapara, Bacia do Córrego Comprido, Bacia do Córrego da Prata e Bacia do Ribeirão Taquaruçu.

O clima é classificado como tropical semiúmido, com a existência de duas estações bem definidas, uma chuvosa e outra seca. A direção dos ventos é sudeste, com velocidades que variam entre 0,1 m/s a 2,1 m/s (INMET, 2017). A temperatura média anual é de 25 °C, variando entre os 15 °C e os 42 °C, e a pluviosidade média anual é cerca de 1800 mm, variando entre os 1400 e os 2200 mm anuais. Janeiro é o mês mais chuvoso, acumulando cerca de 240 mm de precipitação.

Segundo o Anexo III do Decreto n° 700 de 15 de janeiro de 2014 da Prefeitura de Palmas, a equação que determina o cálculo da intensidade pluviométrica é a mostrada na Equação 2.1.

$$i = \frac{749{,}97 x Tr^{0{,}104}}{(td+9)^{0{,}702}} \qquad \text{Eq. 2.1}$$

i – intensidade da precipitação (mm/h)

Tr – tempo de retorno

td – tempo de duração da chuva

A Figura 2.4 apresenta a relação entre a intensidade e o tempo de duração das chuvas para tempos de retorno de 2 a 100 anos na cidade de Palmas.

Pode-se observar que a diferença na intensidade da chuva em relação ao tempo de retorno é mais significativa para tempos menores de duração das chuvas. A partir de 180 minutos o

tempo de retorno influi pouco na intensidade da chuva. Já para chuvas de até 60 minutos o tempo de retorno é significante na intensidade de chuva observada.

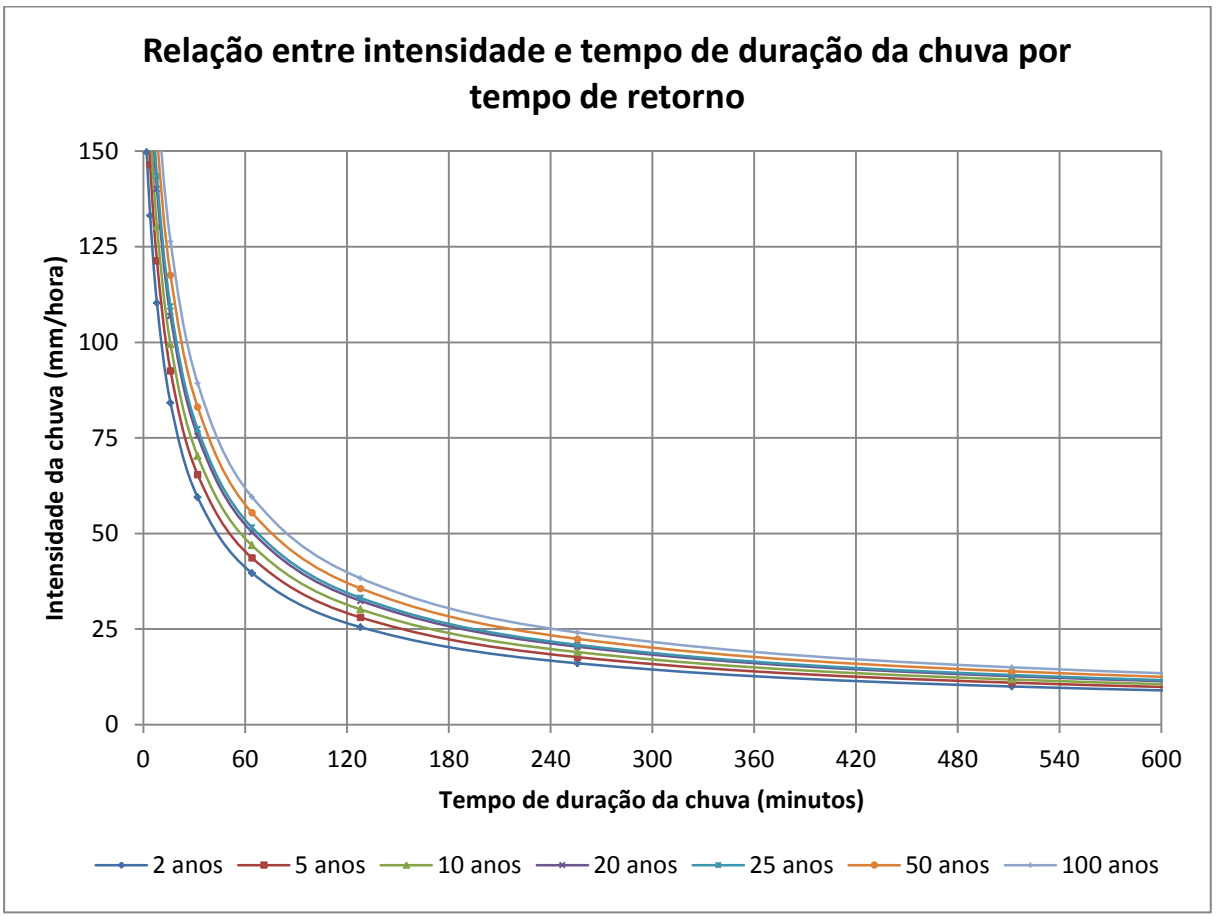


Figura 2.4 – Relação entre intensidade e tempo de duração das chuvas para a cidade de Palmas (Decreto n° 700, 2014).

Para um tempo de duração de precipitação de 30 minutos, por exemplo, a intensidade das chuvas varia entre os 60 mm/h para um tempo de retorno de 2 anos e os 90 mm/h para um tempo de retorno de 100 anos. Assim, observa-se um incremento de 50 % na intensidade das chuvas em função dos limites inferior e superior de tempo de retorno.

No que se referem às frequências observadas para a pluviosidade anual verifica-se que ocorrem variações entre os 1500 mm e os 2500 mm, sendo mais frequentes valores próximos a 1900 mm anuais. A Figura 2.5 apresenta o histograma para as precipitações anuais acumuladas.

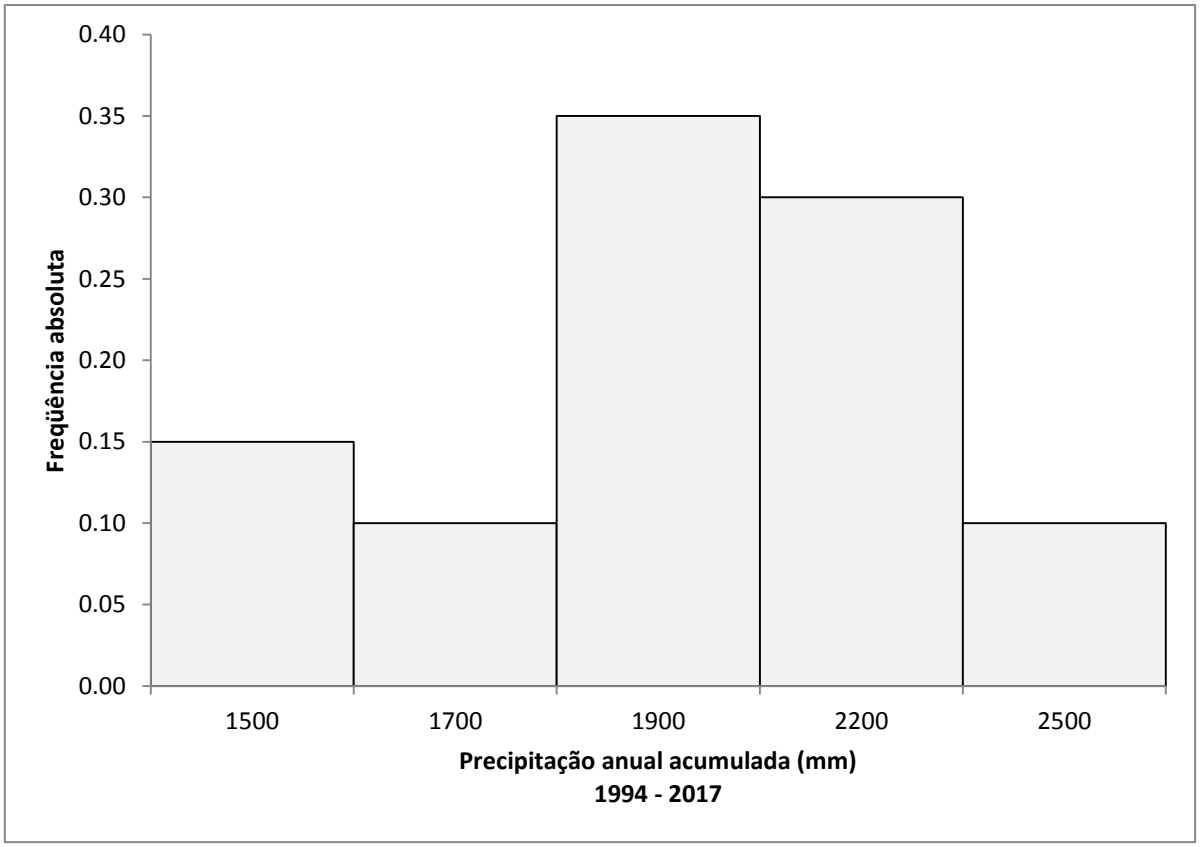


Figura 2.5 – Histograma para a precipitação anual acumulada para a cidade de Palmas (INMET, 2017).

Na estação chuvosa, que ocorre entre outubro e abril, as temperaturas médias variam entre 22°C e 28°C, com ventos fracos a moderados. Entre maio e setembro ocorre a estação seca, com temperaturas médias entre 27 °C e 32 °C. A temperatura máxima absoluta é superior a 40 °C. As Figuras 2.6 e 2.7 apresentam, respectivamente, os histogramas para as temperaturas mínimas e máximas medidas na cidade desde o ano de 1994, quando a estação iniciou suas atividades.

No que tange aos aspectos pedológicos, segundo Amaro *et al*. (2012), predominam os solos classificados como: areias quartzosas, latossolos vermelho-amarelo, litólicos e concressionários. Para os ambientes geológicos, predominam a Formação Pimenteiras e os Terraços Fluviais do Rio Tocantins. A primeira apresenta uma intercalação de argilitos, siltitos e arenitos, já a segunda apresenta depósitos arenosos, pedregulhosos e argilosos resultantes dos processos erosivos e de deposição que ocorreram na área de estudo.

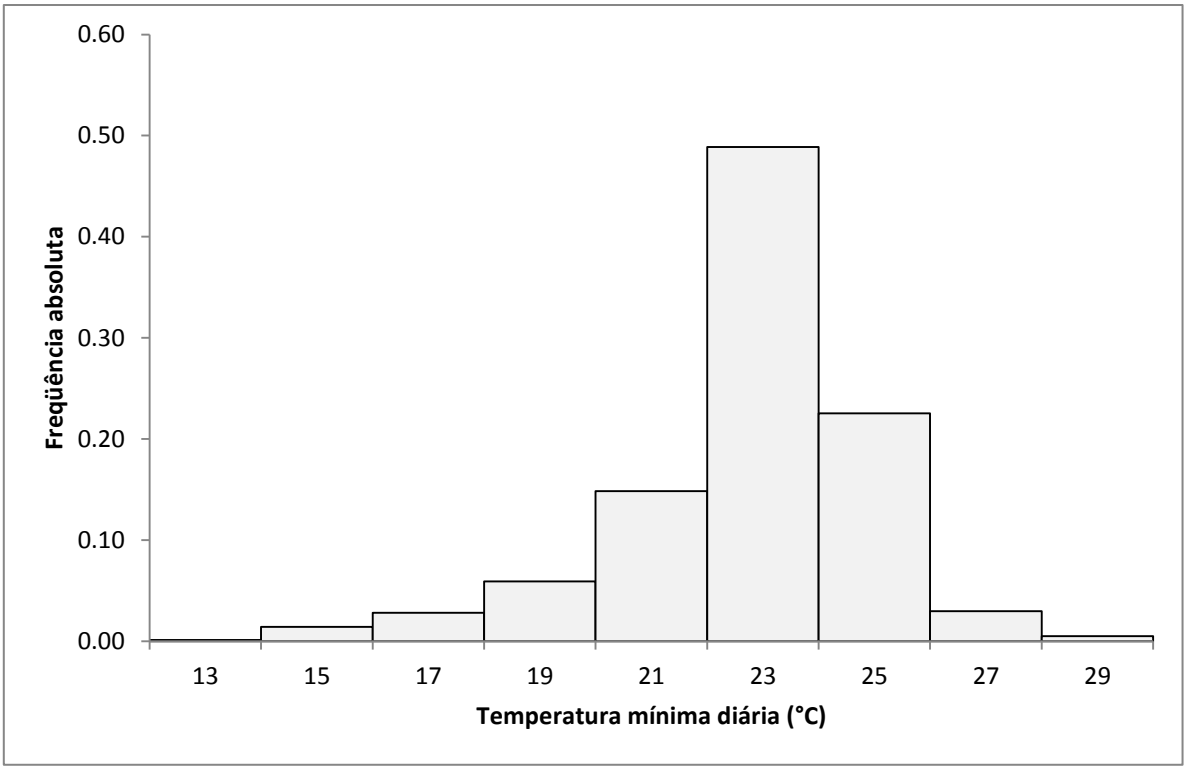


Figura 2.6 – Histograma para as temperaturas mínimas registradas na cidade de Palmas (INMET, 2017).

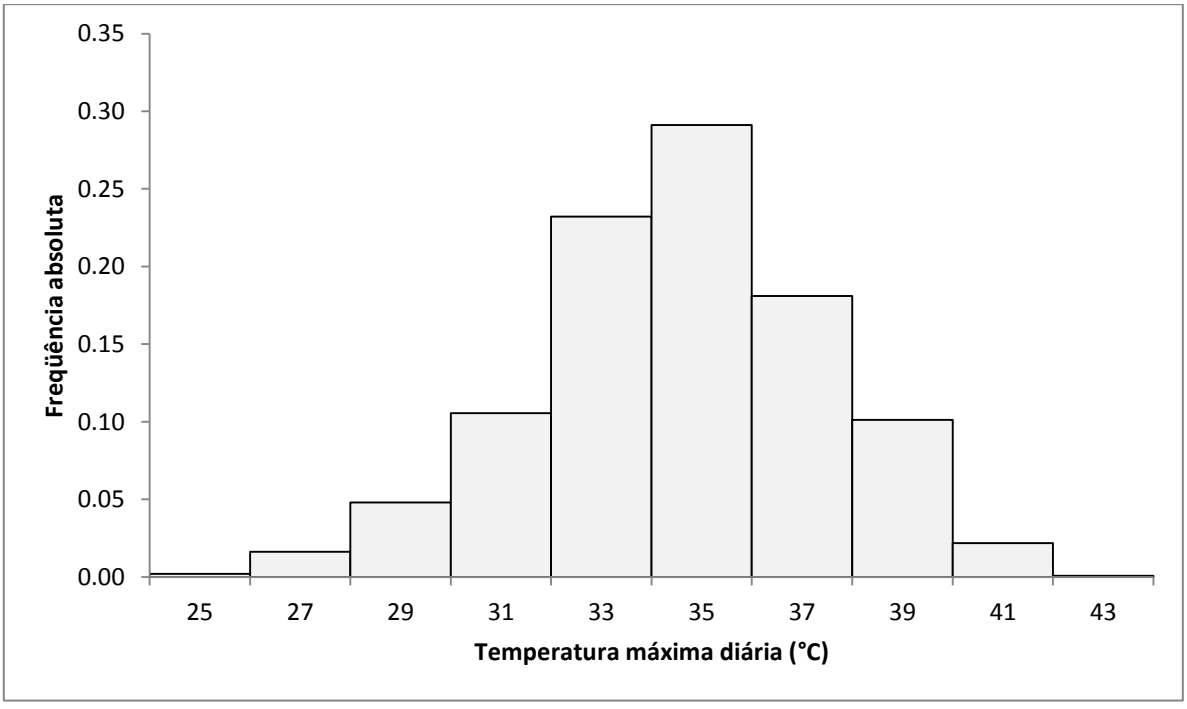
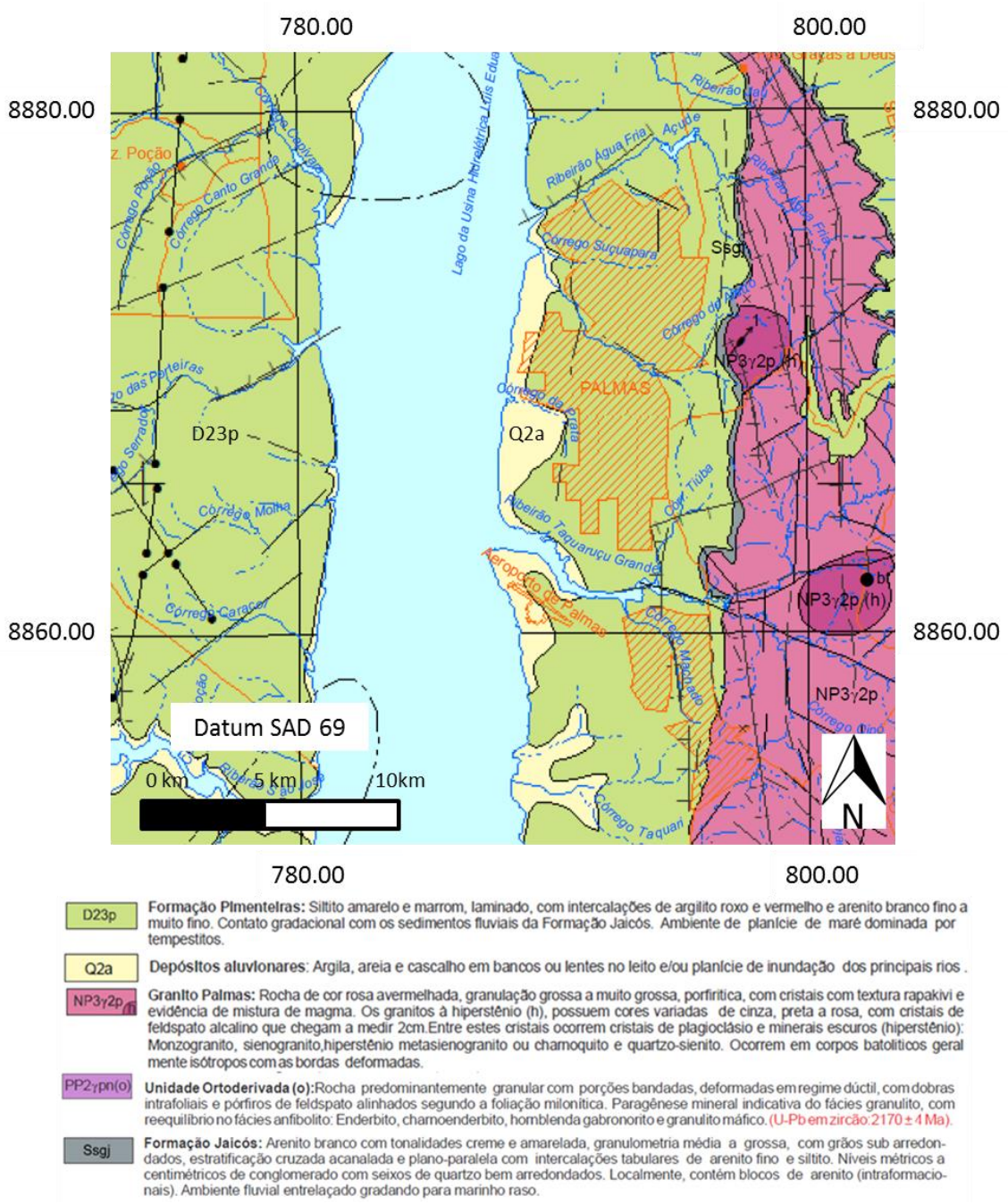


Figura 2.7 – Histograma para as temperaturas máximas registradas na cidade de Palmas (INMET, 2017).

Amaro *et al*. (2012) afirmam que a Formação Pimenteiras é constituída de folhelhos cinzentos a pretos, ou avermelhados e bege-amarelados, micaceos, além de siltitos e arenitos finos argilosos. Em diversos níveis ao longo da área ocorrem intercalações oolíticas e pelíticas ferruginosas, além de subgrauvacas, grauvacas e arenitos feldspáticos interdigitados, sobretudo na parte basal da formação. A Figura 2.8 apresenta a situação geológica para a área de estudo.



D23p	**Formação Pimenteiras:** Siltito amarelo e marrom, laminado, com intercalações de argilito roxo e vermelho e arenito branco fino a muito fino. Contato gradacional com os sedimentos fluviais da Formação Jaicós. Ambiente de planície de maré dominada por tempestitos.
Q2a	**Depósitos aluvionares**: Argila, areia e cascalho em bancos ou lentes no leito e/ou planície de inundação dos principais rios.
NP3γ2p(h)	**Granito Palmas:** Rocha de cor rosa avermelhada, granulação grossa a muito grossa, porfiritica, com cristais com textura rapakivi e evidência de mistura de magma. Os granitos à hiperstênio (h), possuem cores variadas de cinza, preta a rosa, com cristais de feldspato alcalino que chegam a medir 2cm.Entre estes cristais ocorrem cristais de plagioclásio e minerais escuros (hiperstênio): Monzogranito, sienogranito,hiperstênio metasienogranito ou charnoquito e quartzo-sienito. Ocorrem em corpos batoliticos geral mente isótropos com as bordas deformadas.
PP2γpn(o)	**Unidade Ortoderivada (o):**Rocha predominantemente granular com porções bandadas, deformadas em regime dúctil, com dobras intrafoliais e pórfiros de feldspato alinhados segundo a foliação milonítica. Paragênese mineral indicativa do fácies granulito, com reequilíbrio no fácies anfibolito: Enderbito, charnoenderbito, hornblenda gabronorito e granulito máfico. (U-Pb em zircão: 2170 ± 4 Ma).
Ssgj	**Formação Jaicós:** Arenito branco com tonalidades creme e amarelada, granulometria média a grossa, com grãos sub arredondados, estratificação cruzada acanalada e plano-paralela com intercalações tabulares de arenito fino e siltito. Níveis métricos a centimétricos de conglomerado com seixos de quartzo bem arredondados. Localmente, contém blocos de arenito (intraformacionais). Ambiente fluvial entrelaçado gradando para marinho raso.

Figura 2.8 – Ilustração da situação geológica da área de estudo (CPRM, 2016).

Segundo Hasui *et al*. (2012) a Formação Pimenteiras pertence ao Grupo Canindé e este é embasado estratigraficamente pelas formações Serra Grande (Siluriano) e Balsas (Carbonífero-Triássico), e corresponde à sequência devoniana dessa bacia, sendo constituído, da base ao topo, pelas formações Itaim, Pimenteiras, Cabeças, Longá e Poti, as quais revelam rochas derivadas de sedimentos depositados em ambientes de maré, marinhos rasos e fluviais.

Ainda segundo Hasui *et al*. (2012), a espessura da Formação Pimenteiras é da ordem de 200 m, sua gênese se deu em ambiente marinho litorâneo e infra nerítico, abrangendo um conjunto de ciclotermas que refletem repetidos ciclos de subida e descida do nível do mar. O conteúdo palinológico possibilitou estabelecer sua idade como correspondente ao Devoniano Médio a Superior.

À margem do Lago de Palmas, antiga calha de inundação do Rio Tocantins, se encontram os depósitos fluviais. Segundo Santos (2000), trata-se de depósitos clásticos e pelíticos inconsolidados, constituídos por seixos, areias, siltes e argilas, restritos à faixa de planície aluvial, barras de canais e canais fluviais atuais. Essa área se caracteriza pela alta permeabilidade, suscetibilidade à erosão e lençol freático raso, impactando significativamente as obras civis.

2.3 - SONDAGEM À PERCUSSÃO SPT

Segundo a NBR 6484 (ABNT, 2001), o ensaio de sondagem à percussão SPT consiste na cravação dinâmica de um amostrador padrão no solo a ser estudado. A cada metro é medido o número de golpes necessários para se penetrar os últimos 45 cm, sendo desprezados para fins de projeto os 15 cm iniciais, obtendo assim o valor de N_{SPT}, índice de resistência característica do solo.

Ainda segundo a NBR 6484 (ABNT, 2001), o processo de cravação é dividido em três trechos de 15 cm, sendo que a quantidade de golpes necessária para se vencer os 30 cm finais determina o valor de N_{SPT} para aquela camada. Contudo, a cravação do amostrador padrão deve ser interrompida antes de se atingir o curso final sempre que:

- ✓ Não se observar avanço na cravação após a aplicação de cinco golpes sucessivos;
- ✓ Um total de 50 golpes tiver sido aplicado durante toda a cravação;
- ✓ For ultrapassado mais de 30 golpes em qualquer seguimento de 15 cm.

O ensaio é finalizado ao se alcançar a profundidade especificada em projeto ou quando se atingir um dos seguintes critérios:

- ✓ Quando, em 3 metros sucessivos, obtiver 30 golpes para a penetração dos 15 cm iniciais do amostrador padrão;
- ✓ Quando, em 4 metros sucessivos, obtiver 50 golpes para a penetração dos 30 cm iniciais do amostrador padrão;
- ✓ Quando, em 5 metros sucessivos, obtiver 50 golpes para a penetração dos 45 cm do amostrador padrão;

De acordo com a NBR 6484 (ABNT, 2001), o acompanhamento do nível freático deve ser realizado durante todo o ensaio. Quando, durante a perfuração, se atravessar o lençol freático deve-se observá-lo por no mínimo 15 minutos, com leituras a cada 5 min e decorridas 12 h do fim do ensaio deve-se medir a posição do nível de água, bem como a profundidade até onde o furo permanece aberto.

A escavação inicial deve ser feita com trado concha (Figura 2.9a) até a profundidade de 1 m, quando se inicia a amostragem. Os demais avanços antes de se atingir o lençol freático devem ser feitos com trado hélice (Figura 2.9c). Em caso de impossibilidade de avanço a trado deve-se utilizar o trépano (Figura 2.9b).

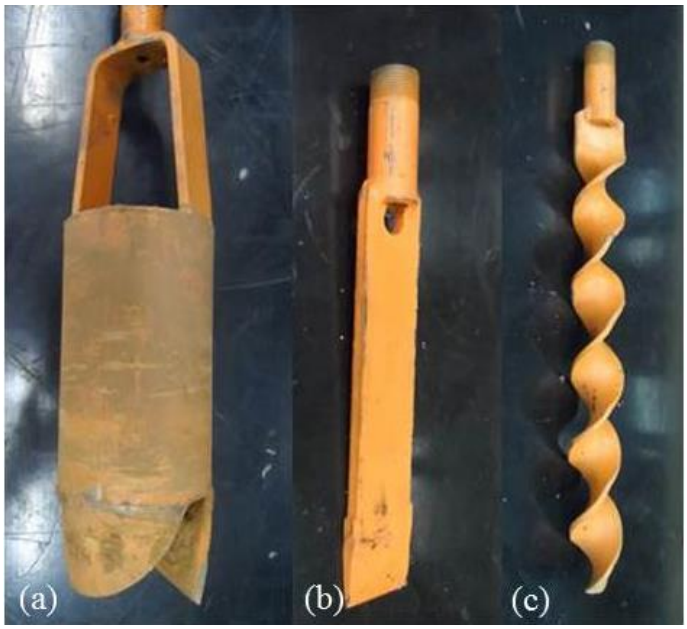


Figura 2.9 – (a) Trado concha (b) Trépano (c) Trado hélice.

Caso seja atingido o nível freático ou quando da impossibilidade de avanço com trado, pode-se utilizar o sistema de circulação de água, conforme NBR 6484 (ABNT, 2001). O mesmo consiste em um conjunto moto-bomba (Figura 2.10a,) conexão para as hastes (Figura 2.10b), e ainda de mangueira de alta pressão (Figura 2.10c).

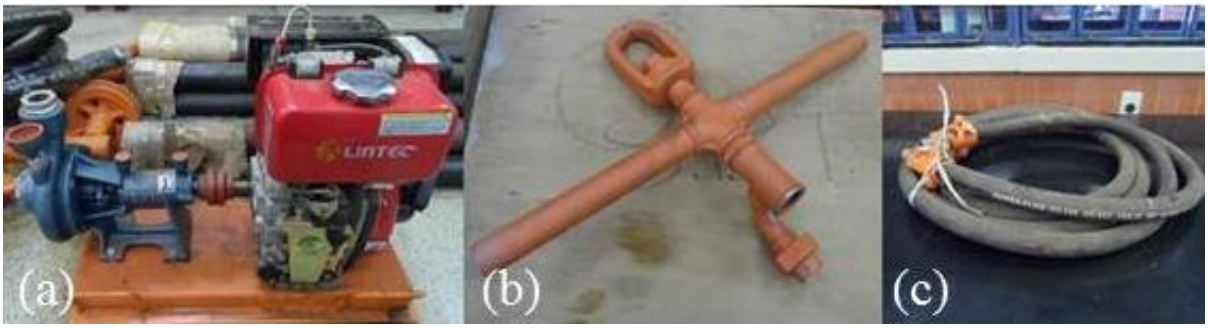


Figura 2.10 – (a) Conjunto moto-bomba (b) Conexão para hastes (c) Mangueira para alta pressão.

As hastes utilizadas no ensaio (Figura 2.11b) devem apresentar comprimento de 1 m ou 2 m e se conectarem por meio de luvas em suas extremidades. Caso seja necessário, as paredes do furo devem ser contidas por meio de tubos de revestimento (Figura 2.11a), mas os mesmos não devem se apoiar na base do furo para não interferir nos resultados do ensaio.

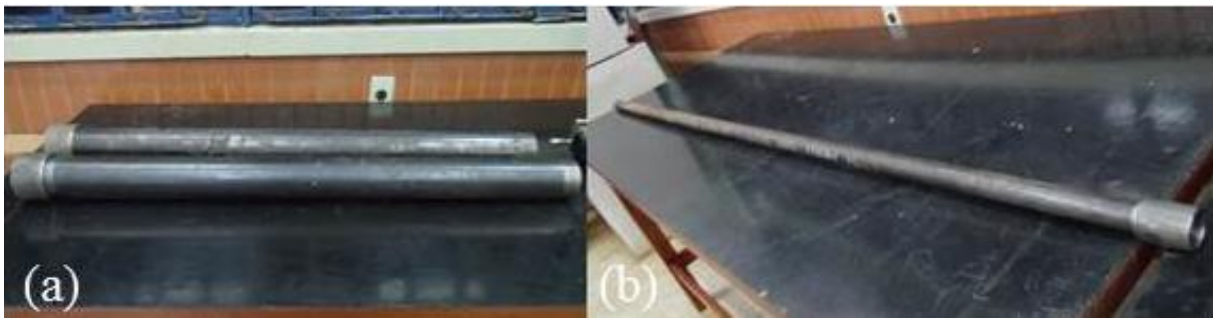


Figura 2.11 – (a) Tubos de revestimento (b) Haste de 2 m.

A aplicação da energia do ensaio se dá por meio da massa padronizada de 65 kg adotada no Brasil (Figura 2.12b) sob a denominada cabeça de bater (Figura 2.12a). Para direcionar o peso sobre o eixo da cabeça de bater existe a chamada haste guia (Figura 2.12b). O resultado acurado do ensaio depende do estado de conservação dessas peças.

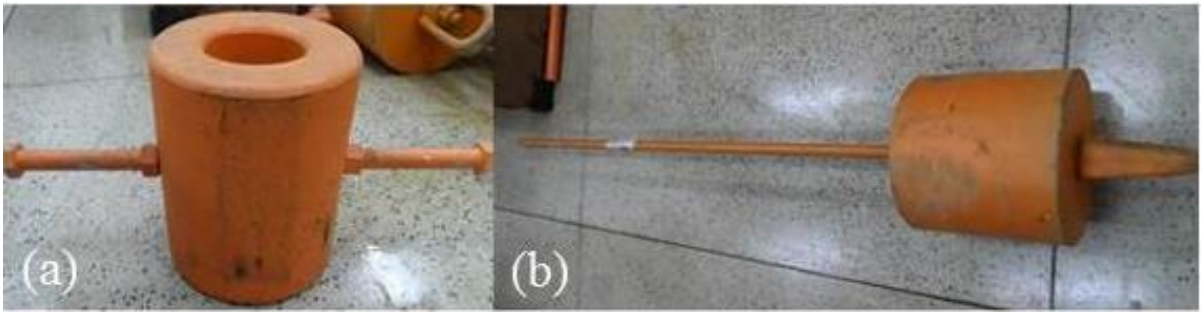


Figura 2.12 – (a) Cabeça de bater (b) conjunto de peso e haste guia.

A amostragem do solo é feita por meio do amostrador tipo Raymond (Figura 2.13a). O direcionamento da energia se dá pela roldana instalada no topo do tripé (Figura 2.13b) e a aplicação dos golpes se dá por meio da corda de sisal ou, no caso ilustrado, cabo de aço (Figura 2.13c). A eficiência energética aplicada ao amostrador depende em grande parte desse sistema. De acordo com o material empregado devem ser feitas as considerações pertinentes na análise dos resultados obtidos.



Figura 2.13 – (a) Amostrador tipo Raymond, (b) roldana e (c) corda – cabo de aço.

Desse modo, a montagem do ensaio se dá por meio da instalação e fixação do tripé, em seguida posicionam-se a roldana e a haste guia, fazendo o furo inicial. É necessária uma fonte de água para o sistema moto-bomba, pranchetas de anotação e marcadores para os intervalos de medição a serem escritos na haste guia. A Figura 2.14 apresenta o esquema geral de montagem do ensaio.



Figura 2.14 - Equipamento de sondagem à percussão montado e em operação.

2.4 - USO DO SPT NA ESPACIALIZAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO SUBSOLO

Neste item são apresentadas publicações que desenvolveram estudos de caracterização de subsolo utilizando bancos de dados formados a partir de informações contidas em laudos de sondagens SPT.

Talamini Neto (2001) reuniu informações oriundas de investigações geotécnicas diversas, como SPT, poços, mapas topográficos, e com a ajuda da geoestatística gerou cartas de isovalores, caracterizando espacialmente as principais unidades geotécnicas encontradas em Curitiba. Segundo o autor, os produtos gerados em seu trabalho podem ser utilizados para auxiliar no planejamento e ocupação do espaço subterrâneo.

Folle (2002) aponta a grande quantidade de dados de sondagens SPT produzidas nas obras de engenharia e propõe a utilização de geoestatística para a produção de cartas de caracterização com base na resistência à penetração N_{SPT} em áreas urbanas. Desse modo, procura contribuir para a maior utilização de técnicas de espacialização de variáveis regionalizadas, visando sua aplicação nas obras de engenharia, especialmente em engenharia de fundações.

Viana Da Fonseca *et al.* (2008) realizaram a caracterização geotécnica da área envolvida na escavação para as obras do metrô de Porto - Portugal. Para tanto utilizou dados de investigações SPT, *Cone Penetration Test* (CPT) e ensaios de laboratório. Desse modo, pode-se chegar a modelos físicos que permitiram a análise estrutural das escavações e a consequente previsão de deslocamentos e, assim, contribuiu de maneira significativa para a segurança do empreendimento. Ademais, Viana Da Fonseca *et al.* (2008) demonstraram a importância e a relevância de estudos investigativos na implementação de obras de infraestrutura urbana analisando as escavações do metrô de Porto, uma obra de alta complexidade técnica e de grande relevância para a cidade.

Alves (2009) atualizou e compilou 1785 sondagens do tipo SPT e, por meio de geoestatística, criou modelos bidimensionais e tridimensionais com ênfase na construção de garagens subterrâneas no plano piloto de Brasília. Em seu trabalho a autora criou diversos produtos em que se pode verificar a maior ou menor adequabilidade do solo para escavação segundo critérios pré-estabelecidos.

Rienzo *et al*. (2009) elaboraram um modelo tridimensional para a cidade de Turim, na Itália, baseado em investigações geotécnicas contendo dados de sondagens SPT. Segundo o autor, o

modelo geotécnico produzido deve ser utilizado como ferramenta de apoio no gerenciamento de obras de engenharia que envolva o subsolo da cidade, inclusive para futuras ampliações do sistema de metrô.

Abel (2011) apresentou cartas geotécnicas baseadas na interpretação de ensaios de sondagem SPT e CPT associadas a ensaios de cisalhamento direto para a cidade de Maputo, em Moçambique. Seu trabalho ajudou no mapeamento de jazidas de materiais de construção para a referida localização, além de fornecer parâmetros de resistência para profundidades de 3, 6 e 9 m.

Castro (2011) correlacionou dados de sondagens do tipo SPT com resultados obtidos em provas de carga estática e, por meio de geoestatística, criou modelos geomecânicos aplicáveis para solos típicos de Brasília. Em seu trabalho o autor apresenta resultados comparativos entre a acurácia dos modelos propostos por ele e aqueles obtidos por métodos semi-empíricos, contribuindo, assim, para o aprimoramento do conhecimento de características do subsolo relevantes para os projetos geotécnicos.

Soares (2011), por outro lado, aborda uma questão mais ampla e afirma que intervenções antrópicas descontroladas têm causado problemas ambientais de diversas naturezas nos meios urbanos. Tais impactos negativos têm parte de sua origem ligada ao desconhecimento de características físicas do meio e, portanto, o conhecimento dessas características físicas é fundamental na solução desses problemas.

Ainda segundo Soares (2011), a integração de sondagens SPT por meio de técnicas de geoestatística é viável e permite determinar características geotécnicas relevantes para o planejamento de áreas urbanas, incluindo a determinação de superfície impenetrável, nível do lençol freático, capacidade de carga para fundações diretas além de características físicas do subsolo, como a cor e textura.

Altun *et al*. (2013) descreveram o processamento de banco de dados composto com informações oriundas de sondagem SPT obtidos para a região Norte de Izmir, na Turquia. Em seu estudo mostram a disposição dos valores N_{SPT} para profundidades que variam desde 3 m até 25,5 m, propõe uma correção dos mesmos por meio de análise estatística e a sua posterior utilização na correlação de parâmetros de resistência do solo.

Todo *et al*. (2013) descreveram a elaboração e as prováveis aplicações da base de dados geofísicos e geotécnicos apresentadas em 2010 pela *Japanese Geotechnical Society* (JGS).

Destaca-se a integração de dados oriundos de empresas privadas e entidades governamentais e o processamento conjunto de dados geofísicos e geotécnicos constituindo uma única base de dados.

Segundo Todo *et al*. (2013) a base de dados disponibilizada permite aos engenheiros geotécnicos prever o risco de eventuais intervenções ou construções que envolvam o subsolo. Já o público em geral pode se orientar sobre as precauções que devem tomar de acordo com a área que pretende construir suas casas.

Bezerra (2014) aplica técnicas de geoestatística no processo de melhoria de projetos de fundações estaqueadas. Para o autor, o maior desafio da engenharia de fundações é a realização de projetos que associem segurança e economia considerando a grande variabilidade do solo que comporá os sistemas de fundações.

Ainda segundo Bezerra (2014), seu trabalho busca aplicar a geoestatística na solução de problemas corriqueiros da engenharia de fundações. Para tanto, desenvolveu um sistema de planilhas integradas que são capazes de computar uma série de dados de sondagem SPT, contribuindo para uma melhor previsibilidade da capacidade de carga nos projetos de fundações, reduzindo custos e incrementando a segurança global.

Desse modo, o planejamento e a gestão das intervenções humanas no meio só são possíveis por intermédio do conhecimento de diversos fatores, incluindo aqueles relacionados às características geotécnicas do mesmo. Assim, a construção e a operação de bancos de dados geotécnicos são fundamentais nesse processo e as sondagens SPT, por sua natureza investigativa e por serem realizadas em larga escala em todas as cidades brasileiras, apresentam grande potencial na composição desses bancos de dados.

Kolathayar *et al*. (2014) apresentaram estudo que utiliza dados provenientes de sondagem SPT para avaliar a suscetibilidade de liquefação dos solos da Índia. Nesse estudo os autores relacionam o número frequente de abalos sísmicos com a possibilidade de liquefação dos solos e a consequente ocorrência de danos às infraestruturas do país, e utilizam os parâmetros obtidos no ensaio SPT para determinar a suscetibilidade das diferentes áreas do País, o que mostra a versatilidade do uso desse ensaio no que se referem às possíveis aplicações.

Palacios *et al*. (2014) utilizaram ferramentas de geoestatística para espacializar dados geotécnicos oriundos de sondagem SPT para a região de Granada, na Espanha. O principal objetivo desse estudo, segundo os próprios autores, é determinar os parâmetros geotécnicos

relacionados com obras de fundações reduzindo, assim, danos às estruturas causados pela falha das fundações decorrentes da variação das características do subsolo em cada setor da cidade.

Jasso *et al.* (2017) relacionaram as sondagens SPT com a refração sísmica de modo a se estimar os efeitos de um abalo sísmico na infraestrutura da zona central da cidade de Monterrey, no México. Segundo os autores, os modelos gerados a partir das sondagens SPT podem ser muito úteis na tomada de decisões envolvendo planejamento, no desenvolvimento de protocolos de resposta a desastres e na produção de cartas de microzoneamento detalhadas.

Masoud e Aal (2017) promoveram a espacialização de dados obtidos de 143 furos de sondagem SPT em solos aluvionares, incluindo dados de caracterização utilizados pelo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). Assim propõe a sua utilização no apoio do planejamento de obras civis na cidade de Riyardh, na Arábia Saudita.

2.5 RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Neste item são apresentados os conceitos básicos da resistividade elétrica, os princípios físicos que envolvem o cálculo da mesma, os métodos de aquisição de dados e alguns estudos que a empregam na área de geotecnia.

2.5.1 – ASPECTOS GERAIS DA GEOFÍSICA

A resistividade elétrica é um método de aquisição de dados inserida no campo da geofísica. A geofísica, por sua vez, é a ciência que se dedica a estudar a Terra por meio da aplicação de princípios da física, realizando medidas na superfície ou próximas a ela, detectando anomalias que se correlacionam com a distribuição interna das propriedades físicas do planeta (Kearey, 2009).

Ainda segundo Kearey (2009), a geofísica apresenta o problema da ambiguidade na interpretação dos dados adquiridos. Isso se dá por não se conhecer exatamente as estruturas internas e as propriedades físicas das camadas que compõem a Terra. Assim, quaisquer medidas realizadas não podem ser interpretadas direta e inequivocamente.

Evidentemente, as técnicas de aquisição de dados procuram minimizar o problema da ambiguidade, contudo, é impossível eliminar todas as incertezas e a resposta para um dado problema geofísico é sempre um conjunto de possibilidades (Kearey, 2009).

Segundo Kearey (2009), o trabalho do geofísico é, em síntese, a aquisição de informações, sua filtragem e a elaboração de um produto que será a ferramenta para a realização de um

dado estudo. As informações adquiridas normalmente são em formas de ondas, que podem ser traduzidas na forma de equações. Cabe ao geofísico distinguir os sinais dos ruídos captados no processo, evitando sua interferência no resultado final.

2.5.2 – PRINCÍPIOS FÍSICOS DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Segundo Halliday *et al.* (2009), ao se aplicar uma diferença de potencial entre dois pontos de um dado material é induzida a passagem de corrente elétrica. Nessa corrente, o fluxo de elétrons é prejudicado pela resistência elétrica.

A resistência elétrica depende da área da seção transversal pelo qual o fluxo de corrente irá atravessar, do comprimento percorrido e também da resistividade do material. A resistividade elétrica, por sua vez, é a propriedade utilizada para descrever o quão resistivo é um material, pois ela não depende das dimensões do material (Halliday *et al.*, 2009).

Assim se pode dizer: a corrente elétrica ao atravessar um meio qualquer provoca no mesmo o surgimento de uma resistência denominada resistividade. A resistividade promove um empecilho à passagem da corrente e pode ser representada pela letra "ρ" e é definida, considerando um cilindro condutor de resistência "R", com comprimento "L" e área de seção transversal "A", pela Equação 2.2.

$$\rho = \frac{RA}{L} \qquad \text{Eq. 2.2}$$

Segundo Halliday *et al.* (2009), a resistividade é definida pelo Sistema Internacional (S.I) em Ohm.m e seu inverso, a condutividade é definida em Siemens por metro ($S.m^{-1}$). A Figura 2.15 apresenta um diagrama representativo utilizado na definição física da resistividade.

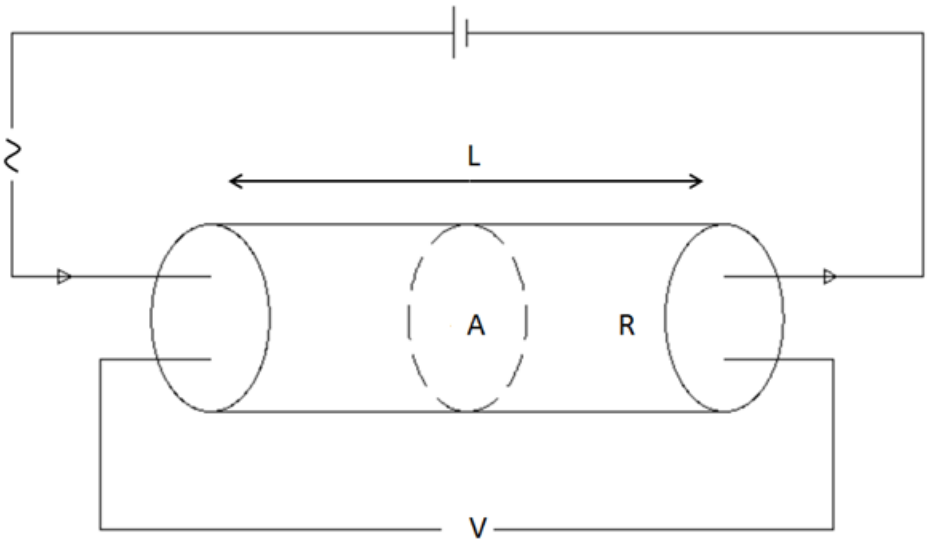


Figura 2.15 – Diagrama elétrico para auxiliar na definição da resistividade elétrica.

Segundo Mcneill (1980), materiais heterogêneos como o solo apresentam grande variabilidade em relação à resistividade, isso porque essa propriedade depende de vários fatores, como a presença de fratura nas rochas, umidade e presença de moléculas condutoras dissolvidas na água, entre outros. A seguir são listados os principais fatores dos quais depende a resistividade do solo:

- ✓ Porosidade: quantidade, forma e tamanho dos poros, passagens e interconexões;
- ✓ Peso específico;
- ✓ Quantidade dos poros preenchidos por água;
- ✓ Concentração de sólidos dissolvidos na água;
- ✓ Temperatura e estado físico da água nos poros;
- ✓ Composição mineralógica dos cristais e grãos minerais;
- ✓ Concentração e composição dos coloides.

A Figura 2.16 apresenta intervalos de valores de resistividade e condutividade tipicamente atribuídos a diferentes materiais componentes do subsolo.

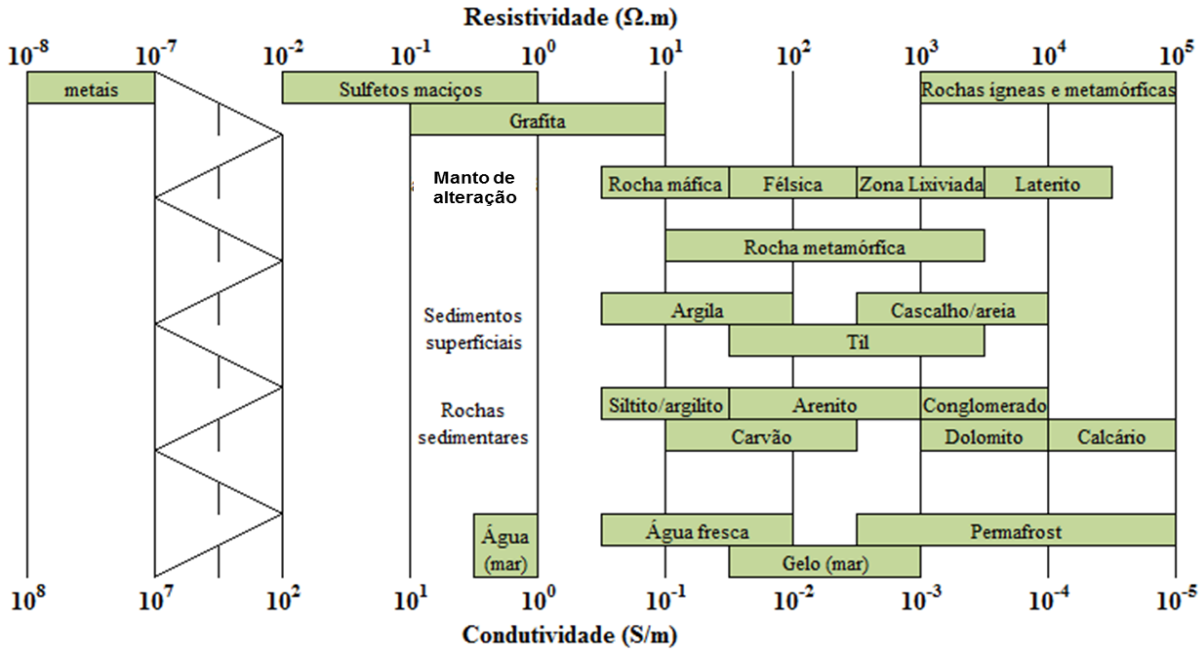


Figura 2.16 - Intervalos de valores típicos para materiais componentes do subsolo (Telford *et al*., 1990).

A grande variação da resistividade para um mesmo tipo de material pode ser explicada pelas condições em que esse material se encontra. Como exemplo pode-se citar um granito, que em sua condição íntegra apresenta elevada resistividade, contudo, se fraturado e com as fraturas

preenchidas por água, sais ou com alto conteúdo de sólidos totais dissolvidos apresenta resistividade significativamente menor.

Ainda de acordo com Mcneill (1980), a condutividade apresenta uma relação de proporcionalidade exponencial com a umidade volumétrica do solo.

Aquino (2010) demonstrou a relação da resistividade com as propriedades físicas de solos argilosos. Segundo o autor, o preenchimento dos vazios por água e suas conexões com outros vazios são fatores preponderantes na determinação da resistividade de um meio poroso como o solo. Para o autor, os valores da resistividade do solo tendem aos da água que ocupa seus vazios quando a umidade volumétrica tender a níveis elevados, acima de 30 %. A Figura 2.17 apresenta a relação entre resistividade e umidade volumétrica definida pelo autor. Observa-se que a resistividade depende, basicamente, da umidade volumétrica até os 25 %, quando a relação entre a resistividade e a umidade é praticamente constante.

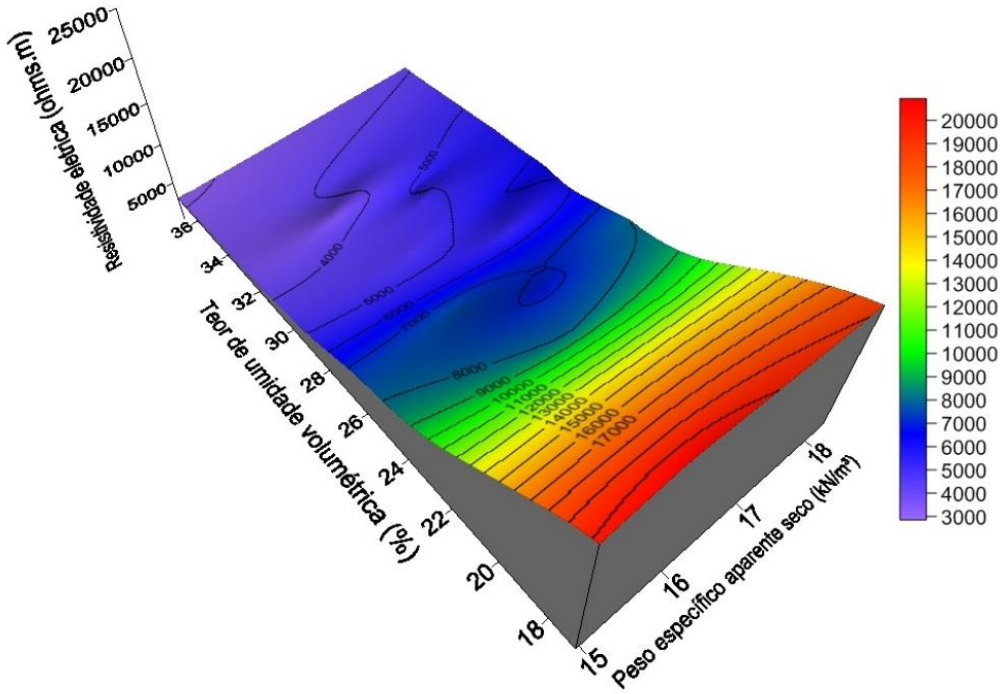


Figura 2.17 - Relação entre umidade volumétrica e resistividade elétrica para solos argilosos, valores em Ω.m (Aquino, 2010).

2.5.3 – CAMINHAMENTO ELÉTRICO

O caminhamento elétrico consiste em uma técnica de aquisição de dados de resistividade ao longo de uma seção, por meio de vários pontos ao longo da mesma. Essa metodologia de

ensaio permite obter dados em várias profundidades, a depender da distância entre os eletrodos utilizados.

No caminhamento elétrico é induzida uma corrente elétrica por meio da aplicação de uma diferença de potencial entre eletrodos. A corrente gerada é então medida. A alternância dos eletrodos permite a aquisição de dados ao longo da seção e em diferentes profundidades. Segundo Kearey (2009), são comumente empregadas correntes contínuas para essa finalidade, mas também podem ser utilizadas correntes alternadas de baixa frequência.

A Figura 2.18 apresenta a disposição dos eletrodos em um caminhamento elétrico para um arranjo do tipo dipolo-dipolo. Os eletrodos de recepção são afastados dos eletrodos de emissão de modo a se atingir as profundidades requeridas no ensaio ao longo da linha a ser analisada.

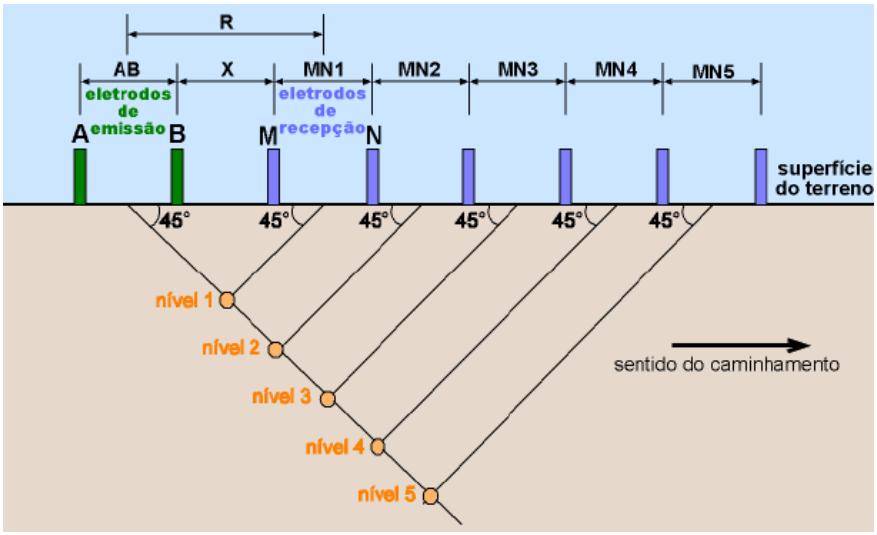


Figura 2.18 – Representação esquemática de caminhamento elétrico utilizando arranjo dipolo-dipolo (Velozo, 2006).

A disposição dos eletrodos pode se dar por diversas maneiras, conhecidas como arranjos. Os mais utilizados são:

- ✓ Arranjo Wenner-Schlumberger alpha, beta e gama;
- ✓ Arranjo Dipolo-Dipolo;
- ✓ Arranjo Polo-Dipolo;
- ✓ Arranjo Gradiente convencional e não convencional;
- ✓ Arranjo Polo-Polo.

Cada arranjo apresenta suas particularidades e são mais ou menos interessantes, a depender das condições de ensaio, dos equipamentos disponíveis e dos dados de interesse a serem

investigados. O arranjo dipolo-dipolo, por exemplo, é muito empregado na investigação de transições horizontais pela sensibilidade do sistema a essas variações, também apresentando a vantagem de ser isométrico, o que reduz a ocorrência de distorções na pseudo-seção. A Equação 2.3 apresenta a relação entre diferença de potencial induzida e a resistividade elétrica do material analisado para um arranjo qualquer.

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{\rho I}{2\pi}\left[\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right)\left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right)\right] \quad \text{Eq. 2.3}$$

ρ – resistividade

I – corrente elétrica

V_M – diferença de potencial observada em M

V_N – diferença de potencial observada em N

A e B – eletrodos de emissão

M e N – eletrodos de recepção

AM, BM, AN e BN – distância entre os respectivos eletrodos de emissão e recepção.

Com o aprimoramento da capacidade de processamento dos microcontroladores, assim como sua popularização, passou-se a usar com mais frequência os arranjos que outrora eram mais complexos, e arranjos mais simples gradualmente passaram a ser cada vez menos empregados. Assim, o arranjo dipolo-dipolo ganhou espaço frente ao arranjo tipo Wenner, por exemplo.

Os arranjos Wenner e Gradiente apresenta um perfil de tronco de cone, onde a parte inferior do perfil tende a ser representada por um único ponto e a parte superior apresenta a maior quantidade de pontos. O arranjo Wenner - Schlumberger apresenta um perfil trapezoidal, mas com a base inferior significativamente menor que a superior.

O arranjo Dipolo-Dipolo e Polo-Dipolo apresenta uma diferença menor entre o número de pontos na parte superior e inferior do perfil. Já o arranjo Polo-Polo apresenta uma distribuição de pontos alinhados horizontal e verticalmente, como o arranjo Wenner-Schlumberger.

2.5.4 USO DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM INVESTIGAÇÃO GEOTÉCNICA

Nesse item são apresentados estudos que utilizaram técnicas de resistividade elétrica no processo de investigação geotécnica voltado para a Engenharia civil.

Abu-Hassanein *et al*. (1996) desenvolveram estudos para a determinação do comportamento das argilas em relação à resistividade elétrica, de acordo com a variação de condições de energia de compactação, umidade, granulometria e temperatura. Assim, os autores

estabeleceram os comportamentos esperados para solos argilosos sujeitos a essas variações como a densidade aparente, umidade volumétrica e textura dos grãos, contribuindo no processo de interpretação de seções de resistividade elétrica em solos argilosos.

Velozo (2006) utilizou caminhamentos elétricos para realizar a caracterização geotécnica do lixão desativado de São Carlos-SP. O autor identificou, ainda, a pluma de contaminação oriunda da decomposição dos materiais presentes no lixão e propôs a adoção de medidas mitigatórias, além de monitoramento do avanço da referida contaminação.

Borges (2007) propôs a utilização de resistividade elétrica como ferramenta de identificação de elementos de infraestrutura presentes nos espaços urbanos como ferramenta de planejamento urbano e meio ambiente. Para tanto, o autor inseriu elementos comuns de infraestrutura em um terreno controlado em São Paulo-SP e, em seguida, buscou identificá-los por meio de técnicas de resistividade elétrica.

A Figura 2.19 apresenta uma seção obtida por Borges (2007) utilizando a resistividade elétrica como meio de identificação de elementos típicos presentes no subsolo de áreas urbanas, como tubulações de aço ou concreto, por exemplo.

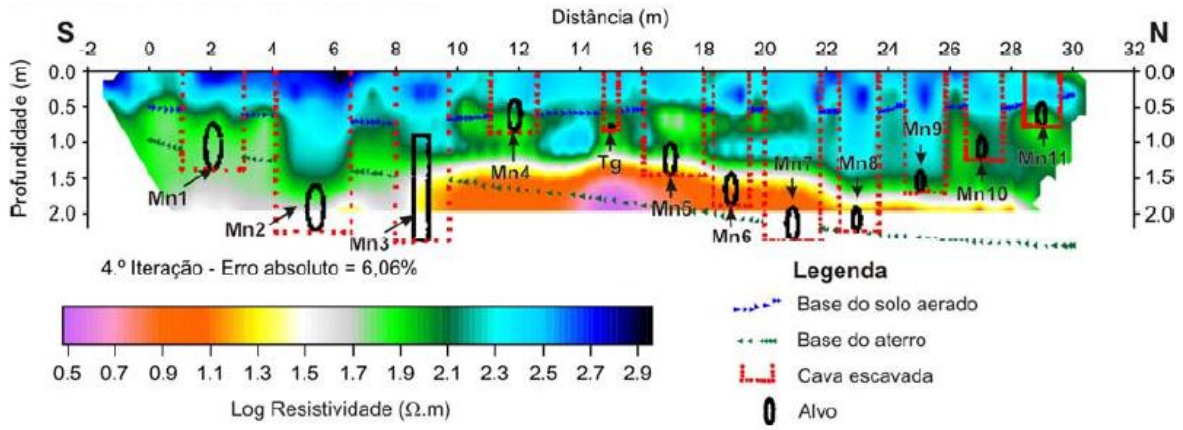


Figura 2.19 - Seção obtida por resistividade elétrica para uma área controlada (Borges, 2007).

Grandjean *et al*. (2009) estabeleceram as principais relações entre as propriedades geotécnicas de alguns tipos de solos e sua relação com os métodos de investigação indiretos mais utilizados, dentre eles a resistividade elétrica. Desse modo os autores estabeleceram relação entre a resistividade elétrica e a umidade volumétrica (Figura 2.20).

Pode-se inferir do trabalho de Grandjean *et al*. (2009) que a resistividade elétrica diminui com o incremento da umidade volumétrica e que para percentuais menores dessa umidade as diferenças de comportamento dos solos em relação à resistividade elétrica são amplificadas.

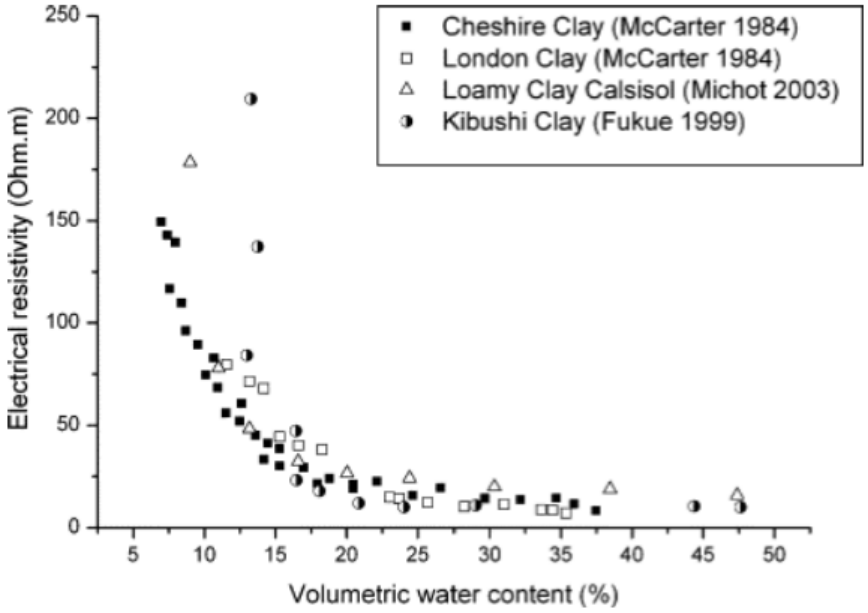


Figura 2.20 - Relação entre resistividade elétrica e umidade volumétrica. (Grandjean *et al*., 2009).

Aquino (2010) estabeleceu relações entre a resistividade elétrica e diversas propriedades e parâmetros do solo, em especial a umidade volumétrica e o peso específico aparente, como mostrado anteriormente na Figura 2.17.

Ainda segundo Aquino (2010), o solo respeita a Lei de Ohm para os níveis de diferença de potencial aplicados (0 a 30 V). A presença de areia tende a elevar o valor médio de resistividade elétrica para um dado material. O grau de saturação não é o único, ou mesmo o preponderante no comportamento eletrorresistivo de uma amostra, dependendo, portanto, da atuação conjunta com outras variáveis, tais como o líquido intersticial e o peso específico. A resistividade elétrica tende a reduzir à medida que se compactam as amostras. A relação entre resistividade elétrica e a umidade volumétrica é descrita por uma curva exponencial.

Lollo *et al*. (2011) utilizaram a resistividade elétrica para identificar camadas de solos colapsíveis na região de Ilha Solteira-SP. Em seu trabalho, os autores realizaram uma campanha de investigações geoelétricas e identificaram o topo das camadas de solo colapsível, em seguida, aferiram os resultados com sondagens do tipo CPT, obtendo similaridade na identificação das camadas.

Silva (2011) utilizou dados de resistividade elétrica para criar modelos bidimensionais e tridimensionais em três estudos de caso na cidade de Brasília-DF. O autor utilizou o caminhamento elétrico com arranjos dipolo-dipolo para investigar as camadas da

subsuperfície e, com associação de informações de sondagens SPT, identificou as camadas de solos, bem como a presenças de matacões e afloramentos rochosos nas áreas de estudo.

Yan *et al*. (2012) analisaram solos expansivos da província de Guanxgxi (China) sob o ponto de vista da resistividade elétrica. Por meio de uma campanha de ensaios de laboratório, os autores determinaram que a resistividade das amostras observadas está relacionada com o grau de umidade volumétrico das mesmas. Conclusão semelhante que Aquino (2010) obteve para solos argilosos no DF, apontando, inclusive, a proporcionalidade exponencial entre a condutividade e a resistividade elétrica.

Maciej e Tucholka (2014) apontam a resistividade elétrica como um método poderoso na estimativa de parâmetros físicos do solo com vistas à construção de obras de infraestrutura, como linhas de metrô e estradas. Em seu trabalho, demonstraram a viabilidade de se identificar a compacidade de solos não coesivos por meio de investigações geoelétricas. Para tanto, Maciej & Tucholka (2014) analisaram em laboratório amostras do solo a ser investigado, determinando relações para a variação da resistividade em relação à compacidade das amostras coletadas.

2.6 – CLASSIFICAÇÃO DOS SOLOS

Neste item são apresentadas as referências relacionadas à estrutura mineralógica dos solos e sua relação com algumas propriedades que os mesmos apresentam e que são importantes para a engenharia civil. São ainda apresentadas as referências para os sistemas de classificação táctil visual, que valoriza o comportamento do solo, e o sistema unificado de classificação dos solos (SUCS), segundo a ASTM D2487 (ASTM, 2011), em que predomina a distribuição granulométrica do material e a variação da consistência com a umidade.

2.6.1 – IDENTIFICAÇÃO TÁCTIL VISUAL

A identificação táctil visual do solo permite que se possa classificar uma dada amostra de solo e estimar seu comportamento de maneira rápida e econômica. É tipicamente utilizada em ensaios de campo, notadamente associada ao ensaio de sondagem à percussão SPT.

Segundo a NBR 7250 (ABNT, 1982), as amostras devem ser inspecionadas e identificadas de acordo com as seguintes características:

a) Granulometria;
b) Plasticidade;
c) Compacidade, no caso de solos grossos;

d) Consistência, no caso de solos finos;
e) Cor;
f) Origem, por exemplo, de solos orgânicos, residuais, sedimentares ou aterros.

A amostra deve ser inspecionada inicialmente em relação à sua granulometria, diferenciando entre solos grossos e solos finos. Visualmente é possível determinar se predominam grãos grossos ou finos. Caso os grãos estejam entre 0,1 mm e 2,0 mm eles são classificados como areias, acima de 2,0 mm classificados como pedregulho e abaixo de 0,1 mm como siltes ou argilas.

A diferenciação entre os tipos de solo nem sempre é óbvia, assim, outros ensaios são empregados. O ensaio de dilatância, por exemplo, permite diferenciar areias finas e siltes dos demais tipos de solo. Nesse ensaio, uma amostra úmida é esfregada na palma de uma das mãos, formando uma camada e em seguida é promovido o choque sistemático com a outra mão. A velocidade com que a água surge à superfície da amostra indica se o material é arenoso ou siltoso.

Quebrar torrões secos ao ar ajuda a distinguir os diferentes tipos de solo, pois as argilas apresentam grande resistência quando pressionadas, enquanto que os siltes apresentam uma resistência bem menor, e as areias se desagregam completamente quando pressionadas.

Os solos, contudo, quase sempre se apresentam em uma combinação de diferentes frações. Deve-se, assim, identificar a porção predominante por meio dos ensaios já descritos e a fração secundária, se houver, resultando por exemplo em: areia siltosa.

As informações de consistência e compacidade são atribuídas de acordo com os valores obtidos no ensaio SPT, e são classificadas de acordo com a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Relação entre consistência, compacidade e índice de resistência à penetração (NBR 7250).

Solo	N_{SPT}	Designação
Areia e silte arenoso	≤ 4	Fofo
	5 a 8	Pouco compacto
	9 a 18	Medianamente compacto
	19 a 40	Compacto
	>40	Muito compacto
Argila e silte argiloso	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média
	11 a 19	Rija
	>19	Dura

A cor traz muitas informações sobre o solo, e sua determinação deve seguir um padrão, sendo admitidas as seguintes designações: branco, cinza, preto, marrom, amarelo, vermelho, roxo, azul e verde. Essas designações podem ser complementadas com os adjetivos "claro" ou "escuro". O termo variegado pode ser utilizado quando a amostra apresenta várias cores diferentes.

A origem do solo também traz informações importantes. Quando ela pode ser identificada deve ser acrescentada na descrição do solo.

2.6.2 – CLASSIFICAÇÃO UNIFICADA (SUCS)

Neste item são apresentados os aspectos pertinentes ao sistema de classificação unificada.

Segundo Das (2006), o sistema SUCS classifica os diferentes tipos de solos de acordo com sua textura e consistência, agrupando-os de acordo com seu comportamento esperado em estradas, aeroportos, aterros e fundações.

A classificação dos solos por meio do sistema SUCS depende da determinação dos limites de liquidez e plasticidade, da determinação da curva granulométrica (série de peneiras da ASTM) e do cálculo dos coeficientes de uniformidade C_U (Equação 2.4) e de curvatura C_C (Equação 2.6).

$$C_{U} = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad \text{Eq. 2.4}$$

$$C_{C} = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} x D_{10}} \qquad \text{Eq. 2.5}$$

Onde:

D_{10}, D_{30} e D_{60} são dimensões em (mm) para as quais se tem 10, 30 e 60%, respectivamente, de material passante.

A Tabela 2.4 mostra uma síntese da relação entre a classificação e os critérios utilizados para essa finalidade. Nela podemos observar que a granulometria, o limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade são empregados simultaneamente para diferenciar cada tipo de solo dentre aqueles previstos pela metodologia SUCS.

Tabela 2.4 – Exemplo de critérios de classificação utilizados na determinação dos grupos segundo o sistema SUCS de classificação (ASTM, 2011).

Critérios				Grupo
Solos Grossos	Pedregulhos	Pedregulhos puros	$C_U \geq 4$ e $1 \leq C_C \leq 3$	GW
			$C_U < 4$ e/ou $1 > C_C > 3$	GP
		Pedregulho com finos	IP < 4	GM
			IP > 7	GC
	Areias	Areias puras	$C_U \geq 6$ e $1 \leq C_C \leq 3$	SW
			$C_U < 6$ e/ou $1 > C_C > 3$	SP
		Areias com finos	IP < 4	SM
			IP > 7	SC
Solos Finos	Siltes e argilas $w_L < 50$	Inorgânico	IP > 7	CL
		Orgânico	$W_{LO}/W_{Ln} < 0,75$	ML
	Siltes e argilas $W_L \geq 50$	Inorgânico	abaixo da linha a	CH
		Orgânico	$W_{LO}/W_{Ln} < 0,75$	OH

Legenda: W_{LO} – limite de liquidez com material seco em estufa; W_{Ln} – limite de liquidez cm material não seco; G – pedregulho; S – areia; C – argila; M – silte; O – solo orgânico; W – bem graduado; P – mal graduado; L – baixo limite de liquidez; H – elevado limite de liquidez.

2.6.3 – MINERALOGIA

Segundo Guimarães (1999), os solos são constituídos por uma mistura de minerais que varia de acordo com o seu nível de amadurecimento. Em solos menos intemperizados podem ocorrer minerais constituintes da rocha mãe, esses minerais podem preservar suas feições características ou se transformarem em produtos de alteração. Os feldspatos, micas, quartzo, óxido de ferro e carbonatos podem ser encontrados nesse tipo de solo.

A ação intensa de processos de intemperismo promove a alteração dos minerais da rocha mãe em argilominerais. Nesses solos, especialmente os solos lateríticos, são encontrados quartzo, óxidos e hidróxidos metálicos de ferro, alumínio, titânio e manganês.

Os minerais como o quartzo, os feldspatos e as micas apresentam estrutura cristalina bem definida, já os argilominerais como a ilita e a caulinita apresentam estrutura mal definida. Essa diferença estrutural permite a diferenciação dos mesmos quando submetidos à análise de difração de raios-X.

Para a correta diferenciação entre os argilominerais é necessário compreender seu arranjo cristalográfico, que é composto por uma sobreposição de folhas tetraédricas e octaédricas. O diferente arranjo dessas folhas, com presença de diferentes elementos em sua composição e na intercamada, define cada argilomineral.

Quando se tem a sobreposição de uma folha octaédrica e uma folha tetraédrica, é obtida uma estrutura 1:1, considerada não expansiva. Quando se tem uma folha octaédrica e duas folhas tetraédricas é obtida uma estrutura 2:1, considerada pouco expansiva. Ainda é possível que se tenha a inserção de substâncias ou compostos orgânicos no espaço intercamada de estruturas 2:1, nesse caso o argilomineral é considerado expansivo e é responsável por uma série de problemas geotécnicos.

Dentre os argilominerais mais comumente encontrados têm-se: caulinita, esmectita, ilita, e vermiculita. É comum, ainda, a presença de interestratificados, que são camadas sobrepostas de dois argilominerais diferentes. Assim, podemos encontrar esmectita associada com ilita ou clorita ou caulinita, além de interestratificados de micas e cloritas.

Desse modo, a determinação dos argilominerais que compõem uma dada amostra é importante para a previsão de possíveis problemas geotécnicos e, sendo assim, uma informação útil para orientar o engenheiro em como e onde aplicar esse material, ou, ainda, se o mesmo deve ser descartado ou receber algum tipo de tratamento.

Essa determinação é feita por meio do princípio de difração de raios-x, onde um feixe de ondas é direcionado para uma superfície e parte dessa onda é refletida de volta enquanto outra parte ultrapassa para a camada subjacente, sendo novamente parcialmente refletida, formando padrões que resultam do arranjo estrutural e a distância interplanar (d) dos argilominerais.

A distância interplanar do argilomineral é calculada por meio da equação de Bragg, que relaciona o comprimento de onda (λ) e os ângulos de incidência (θ) e de reflexão (θ') com a distância interplanar (d). A Equação 2.6 apresenta a equação de Bragg.

$$n\lambda = 2dsen\theta \qquad \text{Eq. 2.6}$$

2.7 – GEOESTATÍSTICA

Neste item são apresentadas as referências sobre a geoestatística e o estudo das variáveis regionalizadas, os aspectos matemáticos envolvidos além de trabalhos publicados nessa linha de pesquisa.

2.7.1 – ASPECTOS GERAIS

Segundo Yamamoto e Landim (2013), a geoestatística tem por objetivo caracterizar uma variável de interesse a partir de sua distribuição e variação espacial, quantificando as incertezas associadas à mesma.

Assim, a geoestatística se dedica ao estudo de fenômenos espaciais, ou seja, que podem ser explicados com a determinação da posição que uma dada variável se encontra em relação a um conjunto de dados dentro de um espaço físico determinado, seja ele bidimensional ou tridimensional.

Como em qualquer análise estatística, na geoestatística procura-se reduzir o erro e aumentar o nível de confiança. Para tanto, uma das etapas primordiais é a amostragem adequada da variável de interesse.

A técnica de amostragem mais indicada para áreas com características homogêneas é a sistemática, onde as amostras são coletadas nos eixos de uma grade pré-definida. Contudo, para áreas com características heterogêneas deve-se respeitar a distribuição natural das mesmas no terreno. De qualquer modo, é praticamente impossível executar uma amostragem regular em campo, especialmente quando o estudo é desenvolvido em grandes áreas, pois obstáculos como pontes e rios são comuns e impedem a realização da amostragem.

Em grandes áreas tem-se uma amostragem semirregular, que acaba por acompanhar estradas, caminhos e infraestruturas pré-existentes. Não é a técnica ideal, como já foi dito, mas a geoestatística tem como objetivo extrair o máximo de informações possível da amostragem realizada.

Os espaços existentes entre as amostras coletadas devem ser preenchidos, para tanto são utilizadas técnicas de interpolação, que podem ser classificadas em determinísticas e estocásticas.

Os modelos determinísticos consideram a posição relativa entre as amostras e o ponto a ser estimado, não fornecendo uma margem de erro para o valor estimado. O método do inverso do quadrado da distância é um exemplo de modelo determinístico. Já os modelos estocásticos permitem a estimação da incerteza associada ao valor calculado, a krigagem é um exemplo de modelo estocástico (Silva, 2011).

No que se referem às variáveis, elas podem ser aleatórias ou regionalizadas. O primeiro grupo é aquele cujo valor de uma amostra independe dos demais valores que a circundam. Já o segundo, ao contrário, o valor de uma dada amostra está relacionado com aqueles que a cercam. Assim, a geoestatística se ocupa do estudo das variáveis regionalizadas.

2.7.2 – MODELOS MATEMÁTICOS

Segundo Andriotti (2009), a geoestatística deriva da estatística clássica e pode ser compreendida como sendo a aplicação prática da teoria das variáveis regionalizadas, que, por sua vez, são aquelas que possuem condicionamento espacial, apresentando características intermediárias entre as variáveis determinísticas e aleatórias.

Desse modo, a geoestatística encontra aplicação no estudo de fenômenos que variam com o espaço e se caracteriza por possibilitar a diminuição do número de amostras necessárias para se descrever as características de uma dada variável de acordo com a região onde a mesma se encontra.

A estatística clássica assume que as características das variáveis não dependem da posição em que se encontram no espaço. Pode-se utilizar como exemplo uma caixa com um número determinado de bolas pretas e brancas. Segundo a estatística clássica, a probabilidade de se sacar uma bola preta ou branca depende unicamente da quantidade de bolas restantes de cada cor dentro da caixa e, portanto, em nada se relaciona com sua posição interna na caixa.

Contudo, algumas variáveis apresentam condicionamento espacial, em especial aquelas relacionadas com as características físicas do solo, como a cor, textura e resistência à penetração, por exemplo. Para essas variáveis, o comportamento é melhor descrito quando se aplicam técnicas de geoestatística.

A teoria das variáveis regionalizadas mensura a mudança de uma dada variável pela soma de três fatores (Silva, 2011):

- ✓ Componente estrutural, relacionado a uma constante ou valor médio característico;
- ✓ Componente aleatório, com condicionamento espacial;
- ✓ Ruído, aleatório ou residual.

A somatória dos componentes acima define o valor assumido pela variável. Contudo, deve-se ressaltar que alguns elementos físicos interferem no comportamento das variáveis, tais como a anisotropia e a continuidade, por exemplo.

Nesses casos as variáveis apresentam comportamentos irregulares nas diferentes direções e uma análise cuidadosa deve considerar essas características, de modo a garantir que haja uma boa representatividade física da previsão realizada para essas variáveis.

Essa previsão é realizada por modelos matemáticos, conhecidos como interpoladores. Alguns dentre os mais comumente empregados são o inverso ponderado da distância e a Krigagem.

Segundo Silva (2011), o método do inverso ponderado da distância é muito utilizado na espacialização de dados e considera para os cálculos do valor de um dado ponto a média com os pontos mais próximos, considerando a relação ponderada inversa da distância entre os pontos (Equação 2.7).

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^{n} \frac{Z_i}{h_{ij}^{\beta}}}{\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{h_{ij}^{\beta}}} \qquad \text{Eq. 2.7}$$

Z = valor interpolado para o nó;

Z_i = valor do ponto amostrado vizinho ao nó;

h_{ij} = distância entre o nó e Z_i;

β = expoente de ponderação;

n = número de pontos utilizados na interpolação de cada nó.

O uso do referido interpolador é recomendado para estimativas com propósitos generalistas e quando se dispuser de boa densidade de dados, assim como de uma distribuição uniforme dos mesmos.

Contudo, não é recomendada a utilização do inverso ponderado da distância quando se dispuser de dados agrupados, ou houver uma má distribuição dos dados ou ainda se observar uma tendência pronunciada nos mesmos.

A determinação da continuidade espacial só pode ser feita pela análise de variogramas. Existindo tal continuidade, utilizam-se distâncias ponderadas e estimação por médias móveis. Os pesos são fornecidos pelo variogramas como mostra a Equação 2.8.

$$Z(u) = X(u) + \sum_{\alpha=1}^{n(u)} \lambda_a(u)[Z(u_\alpha) - (u_\alpha)] \qquad \text{Eq. 2.8}$$

Z(u) = valor estimado;

X(u) = média do atributo Z(u);

$\lambda_a(u)$ = pesos a serem determinados pelo variogramas.

A krigagem é recomendada para variáveis que se correlacionam entre si onde se observe situações de distribuição irregular de dados amostrados ou, ainda, agrupamento desses dados. Contudo, não se recomenda esse interpolador quando se dispõe de menos de 30 pontos amostrados ou, ainda, quando se observar efeito pepita, que indica a descontinuidade do

semivariograma para distâncias menores que a menor distância entre as amostras, muito acentuado e sem explicação para tal.

Os interpoladores dependem, por sua vez, dos modelos de variogramas para atuarem. Eles são o critério que determinarão quais pontos serão computados para o cálculo do atributo para uma dada posição.

De acordo com Silva (2011), os variogramas são ferramentas básicas paras as técnicas de krigagem e representam quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço. Ele expressa o grau de dependência espacial entre as amostras contidas em um campo experimental e define parâmetros utilizados na estimativa de valores para pontos não amostrados.

A Figura 2.21 apresenta o semivariograma e as partes que o compõe.

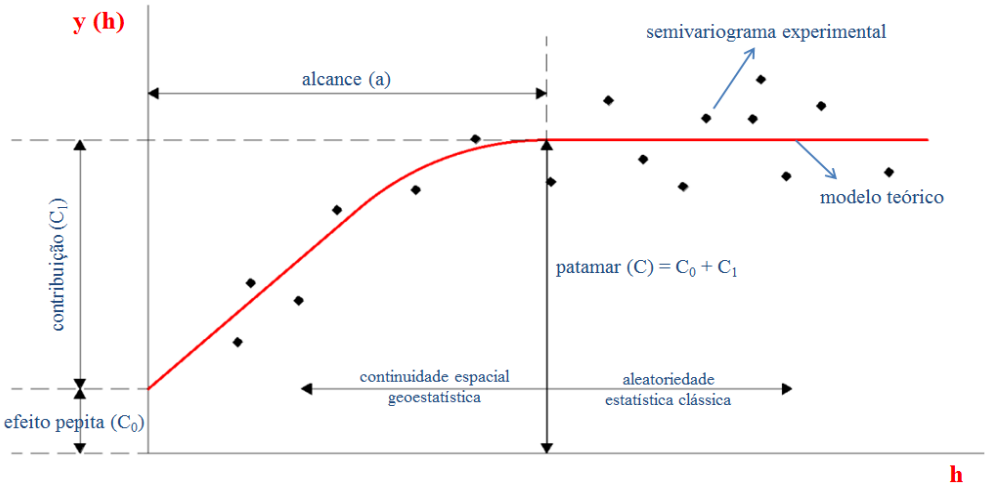


Figura 2.21 – Semivariograma e seus componentes.

Do ponto de vista teórico, o semivariograma teria seu início na origem do gráfico, contudo sempre se observa algum nível de ruído, também conhecido por efeito pepita. A distância alcançada pelos variogramas é denominada alcance, a partir da qual não se observa mais dependência espacial entre as amostras.

Para o cálculo do semivariograma é necessário que se definam limites de tolerância para a direção e a distância a serem consideradas. Adotando-se uma distância pré-definida (lag) e uma direção angular pré-estabelecida e suas respectivas tolerâncias angulares obtém-se os pares de observações que serão incluídos no cálculo, como mostra a Figura 2.22.

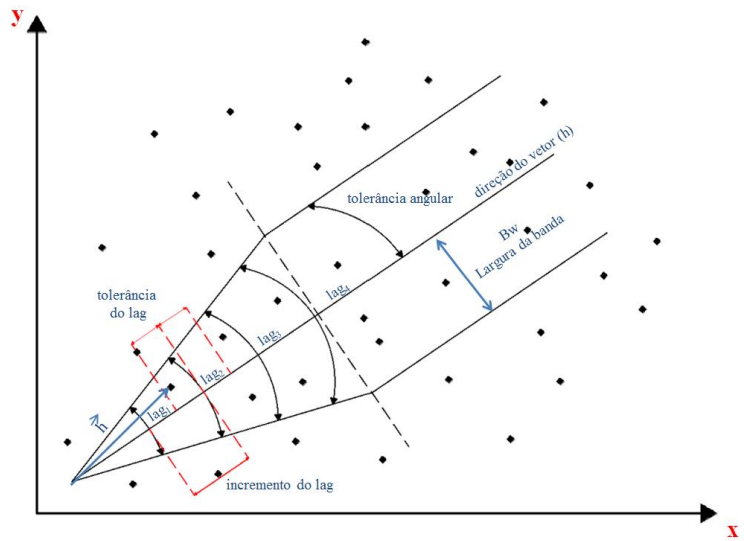


Figura 2.22 – Representação da atuação do semivariograma sobre o conjunto de dados.

Os semivariogramas podem ser estimados pelo programa utilizado na interpolação ou ainda seguir um dos vários modelos teóricos já consagrados. Dentre os mais utilizados tem-se:

- ✓ *Hole Effect*;
- ✓ Exponencial;
- ✓ Esférico;
- ✓ Gaussiano;
- ✓ Linear.

Cada modelo apresenta suas particularidades e sua maior ou menor adequabilidade em cada situação. A Figura 2.23 apresenta a visualização gráfica dos modelos teóricos de semivariogramas citados.

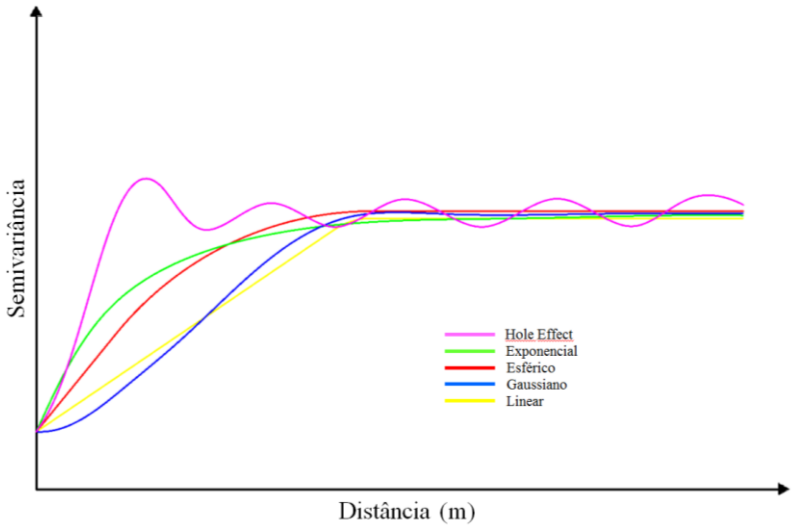


Figura 2.23 - Representação gráfica dos interpoladores apresentados.

O modelo *Hole Effect* apresenta uma oscilação senoidal e é descrito pela Equação 2.9.

$$y(h) = C_0 + C\left[1 - \frac{sen\pi\frac{h}{a}}{\pi\frac{h}{a}}\right] \quad \text{Eq. 2.9}$$

O modelo exponencial, popularmente empregado, atinge o patamar assintoticamente, com alcance definido como sendo a distância na qual o valor do modelo é 95% do patamar (Equação 2.10).

$$y(h) = C_0 + C\left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right)\right] \quad \text{Eq. 2.10}$$

Outro modelo comumente empregado é o esférico, descrito pela Equação 2.11.

$$y(h) = C_0 + C\left[1{,}5\frac{h}{a} - 0{,}5\left(\frac{h}{a}\right)^3\right] \; para\; h < a$$

$$y(h) = C_0 + C \quad para\; h \geq a \quad \text{Eq. 2.11}$$

O modelo gaussiano é normalmente empregado para modelar fenômenos contínuos e é apresentado pela Equação 2.12.

$$y(h) = C_0 + C\left[1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right)\right] \quad \text{Eq. 2.12}$$

A Equação 2.13 apresenta o modelo linear, cujo coeficiente C/a determina a inclinação da reta que passa por y(h).

$$y(h) = C_0 + \frac{C}{a}h \quad para\; h \leq a$$

$$y(h) = C_0 + C \quad para\; h > a \quad \text{Eq. 2.13}$$

2.7.3 – TRABALHOS RELACIONADOS COM GEOESTATÍSTICA

A geoestatística é utilizada como ferramenta em um largo número de trabalhos, com as mais diversas finalidades. Nesse item são apresentadas algumas publicações que utilizaram essa ferramenta em trabalhos voltados para a engenharia geotécnica.

Campolunghi *et al*. (2007) apresentaram estudos geotécnicos baseados em geoestatística para o depósito aluvial existente sob a cidade de Roma, na Itália. Segundo os autores, muitas estruturas da cidade estão assentes sobre o referido depósito e alguns problemas de recalques diferenciais prejudicam as construções.

Para a execução do estudo os autores reuniram centenas de dados combinados de ensaios de campo e laboratório. A compilação desses dados resultou na identificação de zonas de risco para as construções assentes sobre o depósito aluvial.

Raspa *et al*. (2008) utilizaram ferramentas de geoestatística para criar e avaliar modelos geotécnicos para o subsolo de Roma (Itália). Nesse trabalho foram apresentados os resultados das análises dos interpoladores utilizados e, para o caso dele, a cokrigagem apresentou um resultado melhor. (Figura 2.24).

Contudo, é necessário ressaltar que nem sempre o interpolador que melhor ajustou os dados de um trabalho é o ideal para todos os trabalhos. O interpolador que melhor ajusta deve ser sempre pesquisado e comparado com outros, pois o resultado varia significativamente de acordo com o conjunto de dados.

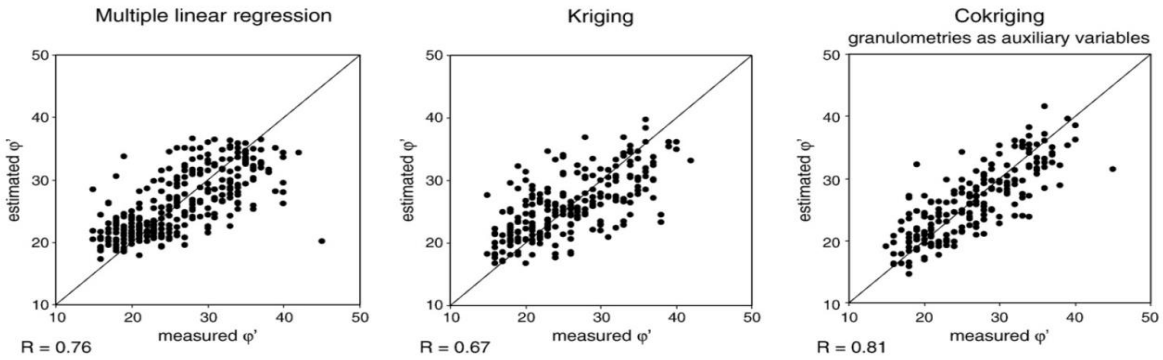


Figura 2.24 - Comparação entre a representatividade de diferentes interpoladores (Raspa *et al.* 2008).

Marache *et al*. (2009) apresentou modelo geotécnico para Pessac (França) por meio do emprego de ferramentas de geoestatística. Para tanto, os autores utilizaram dados de ensaios pressiométricos e verificaram a não compatibilidade destes com os interpoladores do tipo *kriging*, por este gerar um nível elevado de ruído além de subestimar valores de topo e base.

2.8 – MODELAGEM COMPUTACIONAL

Nesse item são apresentados os princípios gerais da modelagem computacional, suas principais aplicações e publicações relacionadas com a linha de pesquisa da tese que empregaram essa ferramenta em seu desenvolvimento.

2.8.1 – ASPECTOS GERAIS

A execução e os projetos de engenharia têm seu sucesso diretamente relacionado com o grau de compreensão que se tem da região a ser edificada. De acordo com Folle *et al*. (2008),

modelos tridimensionais capazes de descrever a estratigrafia bem como as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos são fundamentais nesse contexto.

Silva (2007) divide em 16 fases o processo para a elaboração de modelos geotécnicos tridimensionais, a saber:

- ✓ Identificar ou localizar a área de trabalho;
- ✓ Estruturar os dados em um banco de dados digital;
- ✓ Estabelecer um perfil de solo com base em dados geológicos;
- ✓ Obtenção da base cartográfica da área, caso exista;
- ✓ Elaboração do modelo numérico do terreno (MNT);
- ✓ Obtenção e organização dos relatórios técnicos de sondagem;
- ✓ Sistema de banco de dados e cadastro dos furos;
- ✓ Acesso ao banco de dados pelo *Spring*®;
- ✓ Digitalização dos boletins técnicos de sondagem;
- ✓ Acesso ao banco de dados pelo *Rockworks*®;
- ✓ Definição de uma grade 3D baseada nas sondagens;
- ✓ Transcrição dos parâmetros para modelagem 3D;
- ✓ Nível de água;
- ✓ Modelo das edificações em 3D;
- ✓ Escolha dos métodos de interpolação;
- ✓ Apresentação dos resultados.

O autor ressalta que algumas fases podem ser suplantadas ou acrescentadas de acordo com cada caso específico. Ainda, a estruturação do processo em fases está de acordo com a tecnologia disponível atualmente.

2.8.2 – TRABALHOS RELACIONADOS COM MODELAGEM COMPUTACIONAL

Hack *et al*. (2006) apresentam um estudo sobre as aplicações das técnicas de modelagem tridimensional de subsuperfície na prática da Engenharia civil. Segundo os autores, modelos de subsuperfície são requeridos nos projetos de fundações de prédios, pontes, túneis, estacionamentos e garagens subterrâneas. Além disso, apesar de seu uso no planejamento urbano não ser comum ele deve ser encorajado.

Ainda segundo Hack *et al*. (2006), existem alguns percalços no processo de implantação da modelagem tridimensional no cotidiano da engenharia. Um desses problemas é o fato de não

se poder desenvolver todo o processo utilizando um único software, o que demanda o trabalho conjunto de vários especialistas e a convivência com problemas de compatibilidade de dados entre esses programas.

Os autores também alertam para as incertezas geradas no processo de construção do modelo, que vão desde erros humanos até problemas na qualidade dos dados inseridos, passando pelas considerações matemáticas dos processos de interpolação adotados.

Contudo, de acordo com Hack *et al*. (2006), a modelagem tridimensional é o futuro das análises geotécnicas apesar dos problemas observados, uma vez que a evolução tecnológica e os benefícios advindos com esse tipo de processo irão proporcionar a superação dos mesmos.

Segundo Folle *et al*. (2008), o conhecimento da distribuição dos tipos e propriedades dos solos em uma determinada área é relevante para diversas aplicações na engenharia civil. Os autores ainda afirmam que os ensaios SPT são a fonte mais abundante de dados disponíveis, tendo como maior inconveniente o fato de suas informações serem pontuais.

De acordo com Royse *et al*. (2009), o rápido desenvolvimento da tecnologia da informação e o incremento na digitalização de dados geotécnicos permitem aos pesquisadores desenvolver modelos tridimensionais de subsuperfície para as áreas urbanas. Por meio da tecnologia, pode-se não apenas gerar modelos estratigráficos, mas também gerar modelos de propriedades para esses materiais, tais como modelos de permeabilidade, resistência ao cisalhamento, entre outros.

Ainda segundo Royse *et al*. (2009), os modelos produzidos colaboram na compreensão dos mecanismos de infiltração e reposição dos aquíferos, por exemplo, e podem, ainda, contribuir para a identificação de fraturas nas bases rochosas, viabilizando a concepção de reforços nessas áreas, especialmente em situações especiais, como a construção de um túnel ou estação de metrô, por exemplo.

A Figura 2.25 apresenta um diagrama proposto por Royse *et al*. (2009) demonstrando o fluxo de entrada, processamento e saída de produtos geoestatísticos.

Culshaw e Price (2011) apontam a importância de se acrescentar os estudos geotécnicos no planejamento das cidades. Os autores afirmam que essa ciência deve se integrar às demais, como as ciências sociais, tão presente no processo de tomada de decisões e no gerenciamento das cidades.

Ainda segundo Culshaw e Price (2011) um dos principais motivos pela não inserção dos estudos geotécnicos nesse contexto é a falha em se demonstrar os benefícios e impactos positivos gerados adotando-os.

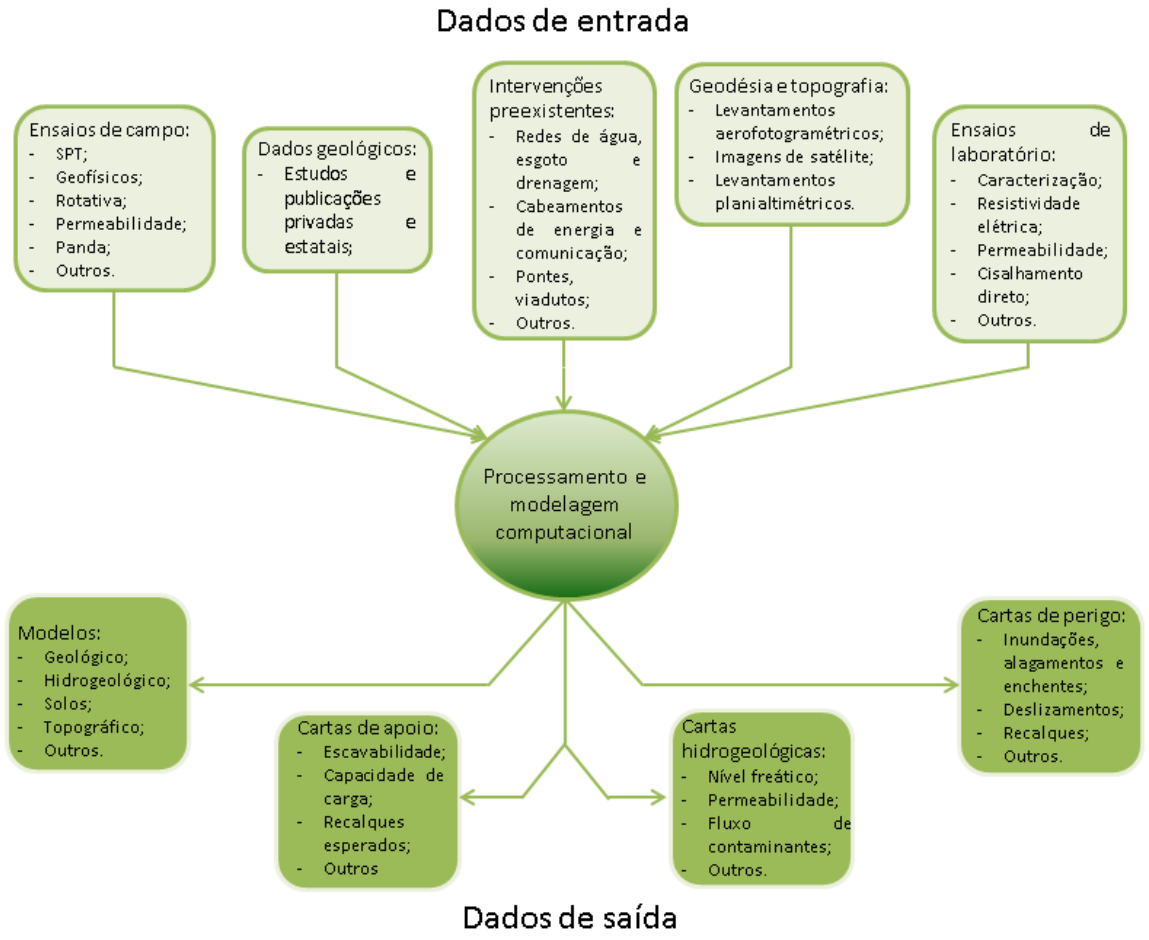


Figura 2.25. Diagrama para o processo de construção de modelos geotécnicos.

Os autores afirmam que algumas cidades no Reino Unido já desenvolveram modelos tridimensionais de suas subsuperfícies, mapeando depósitos naturais e antrópicos, provenientes da exploração de minas, além de modelar os elementos componentes de infraestrutura dessas cidades, tais como linhas de metrô, pontes, túneis, adutoras, tubulações de gás, energia e internet, entre outros.

Em seu estudo, os autores chegam à conclusão de que as técnicas de modelagem tridimensionais desenvolvidas nos últimos anos com o advento dos *hardwares* e *softwares* precisam ser empregadas com mais frequência na solução de problemas urbanos, desde as etapas de planejamento das cidades até os processos de modernização e manutenção das mesmas.

A Figura 2.26 mostra o modelo tridimensional apresentado por Culshaw e Price (2011) para parâmetros de liquidez e plasticidade dos principais solos encontrados na área da cidade de Glasgow no Reino Unido.

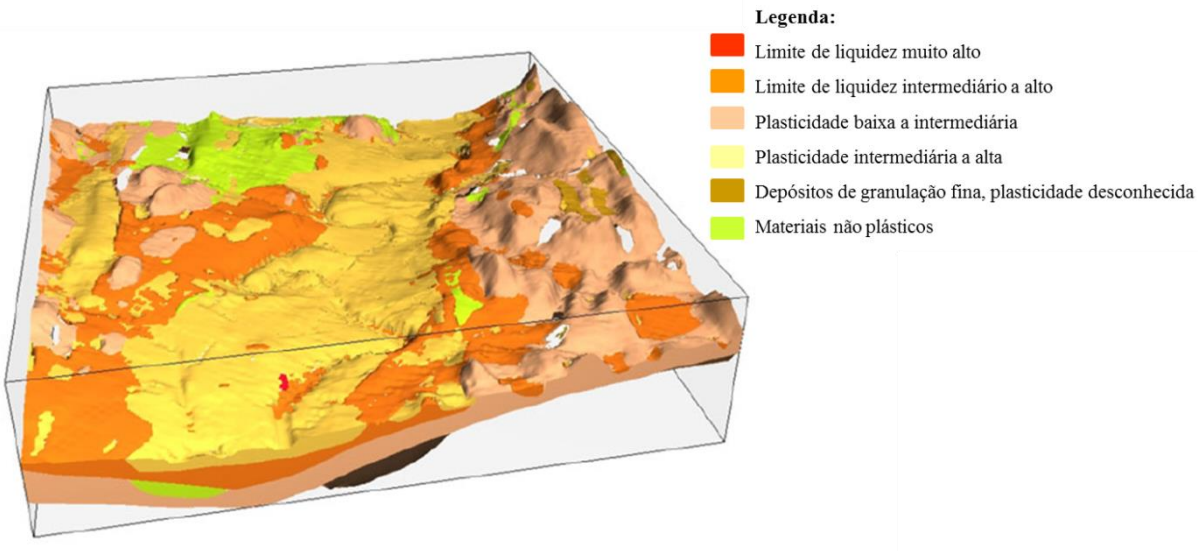


Figura 2.26 - Modelo geotécnico tridimensional para a cidade de Glasgow no Reino Unido. (Culshaw e Price, 2011).

Silva *et al*. (2012) demonstraram a aplicabilidade dos modelos tridimensionais de subsuperfície na redução das incertezas em relação às propriedades do solo em obras geotécnicas. Segundo os autores, os modelos podem mitigar o risco inerente às obras de engenharia, particularmente nas fundações. (Figura 2.27).

Segundo Dong *et al*. (2014), um bom modelo geotécnico tridimensional deve ser capaz de combinar dados específicos e tecnologia da informação com o objetivo de reduzir incertezas associadas à modelagem, contribuindo para o planejamento e desenvolvimento das cidades modernas.

Os autores apresentam um estudo baseado na criação de modelos tridimensionais para a subsuperfície da cidade de Aachen, na Alemanha. Os mesmos propõem a adoção de três passos para a construção dos modelos: determinação das propriedades do solo em pontos georreferenciados, análise da variabilidade dessas propriedades e, por fim, a previsão dessas propriedades para os pontos localizados entre as amostragens.

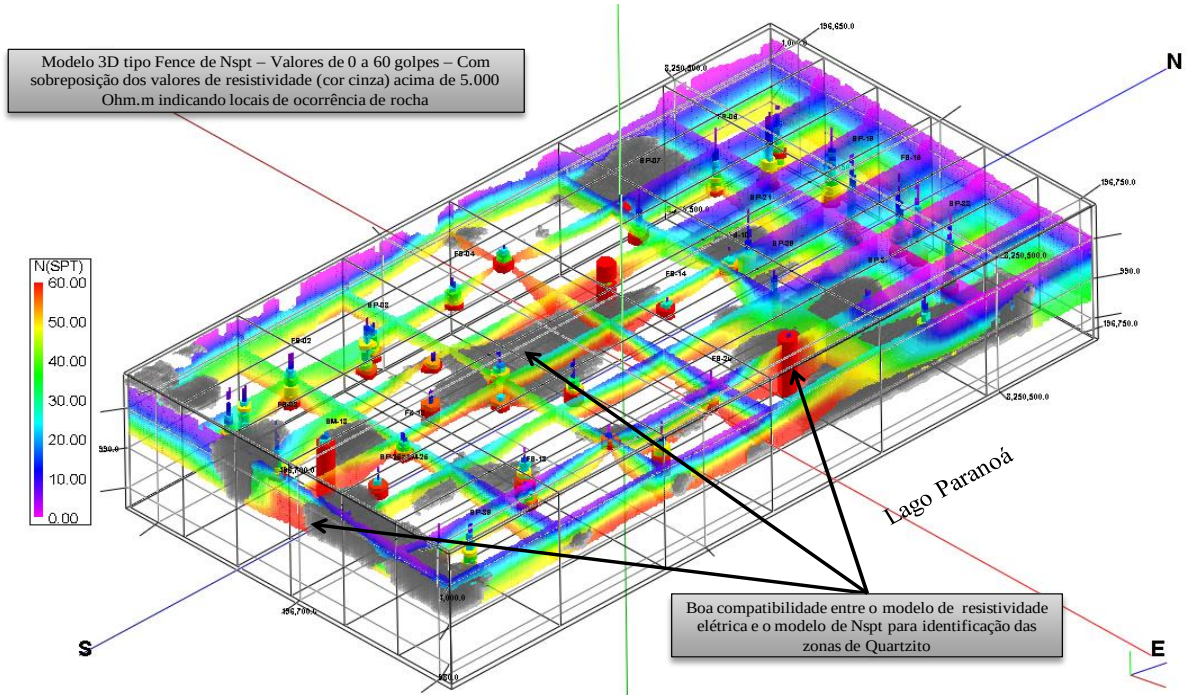


Figura 2.27 - Modelo tridimensional com dados geofísicos em Brasília - DF (Silva *et al*., 2012).

Dong *et al*. (2014) concluem que a modelagem tridimensional é capaz de solucionar diversos problemas geotécnicos e pode contribuir de maneira significativa no processo de planejamento de áreas urbanas. Contudo, deve-se buscar a formação de bancos de dados confiáveis, tanto na acurácia das informações quanto em suas posições, de modo a permitir a criação de modelos igualmente confiáveis.

Desse modo, esses autores propõem a espacialização dos dados de sondagem em um estudo de caso onde demonstram os ganhos significantes devido à modelagem tridimensional para os projetos de engenharia de maneira geral.

Por meio dos trabalhos expostos ficam evidentes os esforços de diversos pesquisadores no Brasil e no mundo no sentido de aprimorar as técnicas de representação das informações geotécnicas obtidas, principalmente na tentativa de contribuir para o ganho de segurança nas obras civis e em particular na inserção da geologia e da geotecnia no processo de planejamento das cidades.

2.9 – CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA

Neste item são apresentadas as referências relacionadas com a cartografia geotécnica e a produção de produtos cartográficos.

2.9.1 – ASPECTOS GERAIS DA CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA

A cartografia geotécnica se dedica à elaboração de cartas que abordem temas geotécnicos diversos, permitindo a rápida visualização e compreensão de aspectos que envolvam a geotecnia em uma dada área de estudo.

Segundo Zuquette e Gandolfi (2004), para a produção de uma carta geotécnica há de se atender certos critérios a fim de enquadrar o documento nas recomendações da *International Association of Engineering Geology* (IAEG) e também da *Geological Society of London*. Tais orientações preconizam que as informações geotécnicas sejam utilizadas em aplicação direta ou para previsão de desempenhos, que suas unidades de utilização não sejam heterogêneas, estejam de acordo com outras associações relacionadas à área de estudo, amostragem de um atributo ou material geológico apropriado à geotecnia, respeito às definições empregadas pelo meio científico e associação dos documentos a uma classificação funcional.

O termo atributo, que permeia as recomendações, diz respeito ao aspecto essencial escolhido para a execução de um mapeamento. Como exemplo pode-se citar a cota do nível freático, valor de N_{SPT}, tipo de solo, entre outras. É importante frisar que o atributo é a informação principal e que necessita de um detalhamento completo. Ressalta-se, também, que os resultados da cartografia geotécnica não suprem a necessidade de investigações específicas para uma determinada obra na área de estudo.

A produção de cartas geotécnicas deve seguir recomendações específicas. As metodologias internacionais mais usuais em trabalhos brasileiros, segundo Carvalho (2014), são da IAEG, a metodologia Francesa, metodologia Zermos (Zonas Expostas ao Movimento dos Solos), metodologia PUCE (Pattern, Unity, Component, Evaluation) e a metodologia Mathewson & Font.

Esses sistemas internacionais de produção variam principalmente devido a sua finalidade. O resumo de suas características é apresentado na Figura 2.28.

Nacionalmente, são influentes seis metodologias de mapeamento geotécnico, as quais norteiam inúmeros estudos brasileiros. Segundo os autores Zuquette e Gandolfi (2004), esses procedimentos foram criados pelos:

a) Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ);
b) Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT);
c) Departamento de Geotecnia da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP);

d) Grupo de Geotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS);

e) Instituto Geológico de São Paulo (IG/SP) e

f) Universidade Estadual de São Paulo (Unesp).

Metodologia	Histórico	Escala	Documentos	Observações
IAEG	Baseada em trabalhos de diversos países, tem finalidades gerais e específicas	Pré-definidas de acordo com a finalidade. Grande (1:10.000) Intermediária (1:10.000 a 1:100.000) Pequena (1:100.000)	Básicos Sintéticos Zoneamentos	
Francesa ou SANEJOUAND	Baseadas e trabalhos realizados por universidades e institutos, tem finalidades gerais e específicas	Condicionada pela Finalidade Regional (<1:100.000) Local (>1:100.000) Detalhe (>1:1000)	Cartas de documentação, fatores e aptidão	
PUCE	Estudos das relações entre aspectos geomórficos, enfoca os aspectos geomórficos		Classificação taxonômica (Província, Padrão, Unidade, Componente)	Representação das unidades por número
ZERMOS	Baseado em trabalhos de mapeamento geotécnico e problemas. Finalidade – riscos	1:50.000 1:25.000 1:5.000	Zoneamento Relatórios	1 –Bibliografia 2 – Fotointerpretação 3 – estudo e controle em cartas 1:50.000
MATHEWSON E FONT, 1974	Proposta como uma sistematização de estudos de geologia ambiental utilizados em trabalhos de planejamento		1ª ordem: observacionais 2ª ordem: de geologia de engenharia 3ª ordem: interpretativos 4ª ordem: de uso do solo	Apresentam mapas onde a informação geológica é aplicada à adequabilidade de uso.

Figura 2.28 – Principais metodologias utilizadas na elaboração de cartas geotécnicas (Zuquette e Gandolfi, 2004).

2.9.2 – ESCALA DE TRABALHO

Conforme o grau de detalhamento que se deseja obter no trabalho de cartografia geotécnica, a escala escolhida pode variar entre 1:200.000 a 1:500 (Zuquette e Gandolfi, 2004). Entretanto, essa escolha não é feita de maneira aleatória e sim considerando a disposição de dados, a seleção dos atributos, sua heterogeneidade e sua classificação (Borges *et al*., 2015).

A escala deve representar satisfatoriamente a distribuição com a qual os dados adquiridos estão dispersos. Para a fase de avaliação da melhor escala de trabalho a estatística atua como ferramenta fundamental, analisando diversos aspectos dos atributos selecionados.

Borges *et al*. (2015), ao estudarem a relação entre a escala de trabalho das cartas geotécnicas, a área de influência da investigação geotécnica e a variabilidade do atributo, concluíram que a "amostragem está sempre relacionada com a escala de mapeamento". Os autores, por meio de levantamentos bibliográficos que contemplassem estudos geotécnicos e investigações de sondagem entre os anos de 1970 e 2013, conseguiram relacionar a escala com os atributos em estudo. Para isso as informações abaixo de cada autor analisado foram compiladas:

a) Número de sondagens;
b) Valores da média, desvio padrão e coeficiente de variação do atributo (N_{SPT});
c) Área investigada em m² e
d) Escala de trabalho.

A partir dos dados reunidos, os pesquisadores, que obtiveram cartas de várias regiões do Brasil e também do exterior escaladas majoritariamente de forma qualitativa, montaram gráfico de dispersão e analisaram as tendências em função da escala de trabalho versus área de influência da investigação geotécnica, como mostra a Figura 2.29.

Como é possível notar, os trabalhos de nove autores foram relacionados, sendo eles: NBR 8036 (ABNT, 1983), Karacsonyi e Remenyi (1970), Matula e Pasek (1984), Zuquette e Gandolfi (2013), Dias. R. D. (1987), Borges, M. V. (2007), Mascarenha, M. M. A. (2003), Roque, W. V. (2006) e Soares, W. C. (2011). Os pontos das diferentes propostas de relação entre a escala de trabalho e a área de influência da investigação estão compreendidos entre duas retas denominadas: maior variabilidade e menor variabilidade.

O termo "variabilidade", segundo Borges *et al*. (2015), entende-se pela diferença verificada nos resultados gerados de um sistema ou fenômeno devido a constante observação. Essa

disparidade de valores deve ser inserida no processo estatístico a fim de melhor representar o trabalho em desenvolvimento.

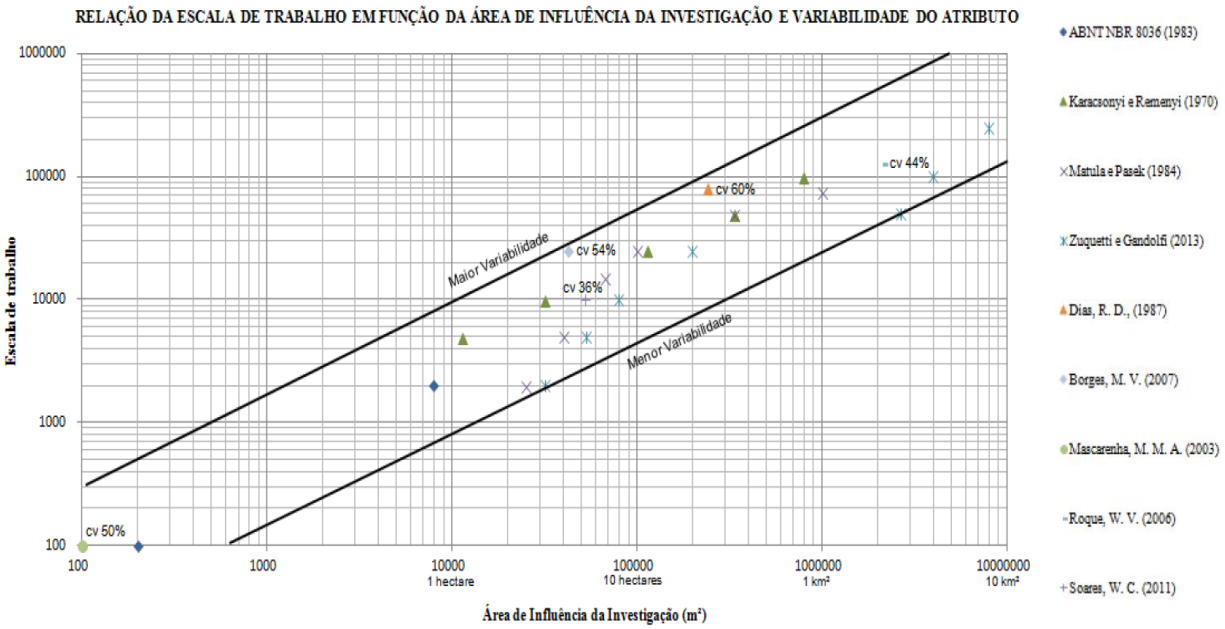


Figura 2.29 - Determinação da escala de trabalho pelos principais pesquisadores (Borges *et. al*., 2015).

Como resultado, Borges *et al*. (2015) verificaram que solos que possuem maior variabilidade em seu atributo necessitam ser mais pesquisados, ou seja, o número de sondagens deve ser maior do que em materiais que apresentem menor variabilidade em suas características geotécnicas. Para auxiliar na tomada de decisão os pesquisadores correlacionaram a escala com a área de investigação da sondagem a ser analisada na carta.

3 – MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e os métodos empregados no desenvolvimento do trabalho no que concerne aos ensaios de campo, laboratório, à produção dos modelos geotécnicos e dos produtos cartográficos.

3.1 – ESTRUTURA DA METODOLOGIA

Realizou-se um estudo localizado em três áreas distintas, áreas chave, dentro do plano diretor da cidade, denominadas: Espaço Cultural, SESC e Parque Sussuapara. A Figura 3.1 identifica o posicionamento das mesmas dentro da área de estudo.



Figura 3.1 – Identificação dos locais utilizados na determinação da relação entre características geotécnicas e geoelétricas.

A escolha das áreas chave se deu pela importância estratégica das mesmas dentro do espaço urbano, envolvendo futuras obras de infraestrutura urbana e por apresentarem, em análises preliminares, perfis geotécnicos distintos e que representam a maioria dos perfis encontrados na cidade. Assim, *a priori*, o estabelecimento das relações entre características geotécnicas e de resistividade elétrica para os perfis dessas áreas permitiria a interpretação de outros perfis encontrados em outros pontos da área de estudo.

O estudo consiste na realização de seções de resistividade elétrica e a posterior realização de sondagens à percussão sobre as seções, com a retirada de amostras para ensaios de laboratório, onde é estabelecida a relação entre classificação geotécnica e valores padrões de resistividade elétrica para cada tipo de solo encontrado.

Após o estabelecimento dessa relação, iniciou-se um novo estudo utilizando a resistividade elétrica, em uma área maior, com o intuito de investigar o subsolo da cidade como um todo. Esse estudo se deu por meio de três linhas de investigação, denominadas linhas Central, Norte e Sul. A Figura 3.2 identifica o posicionamento dessas linhas.

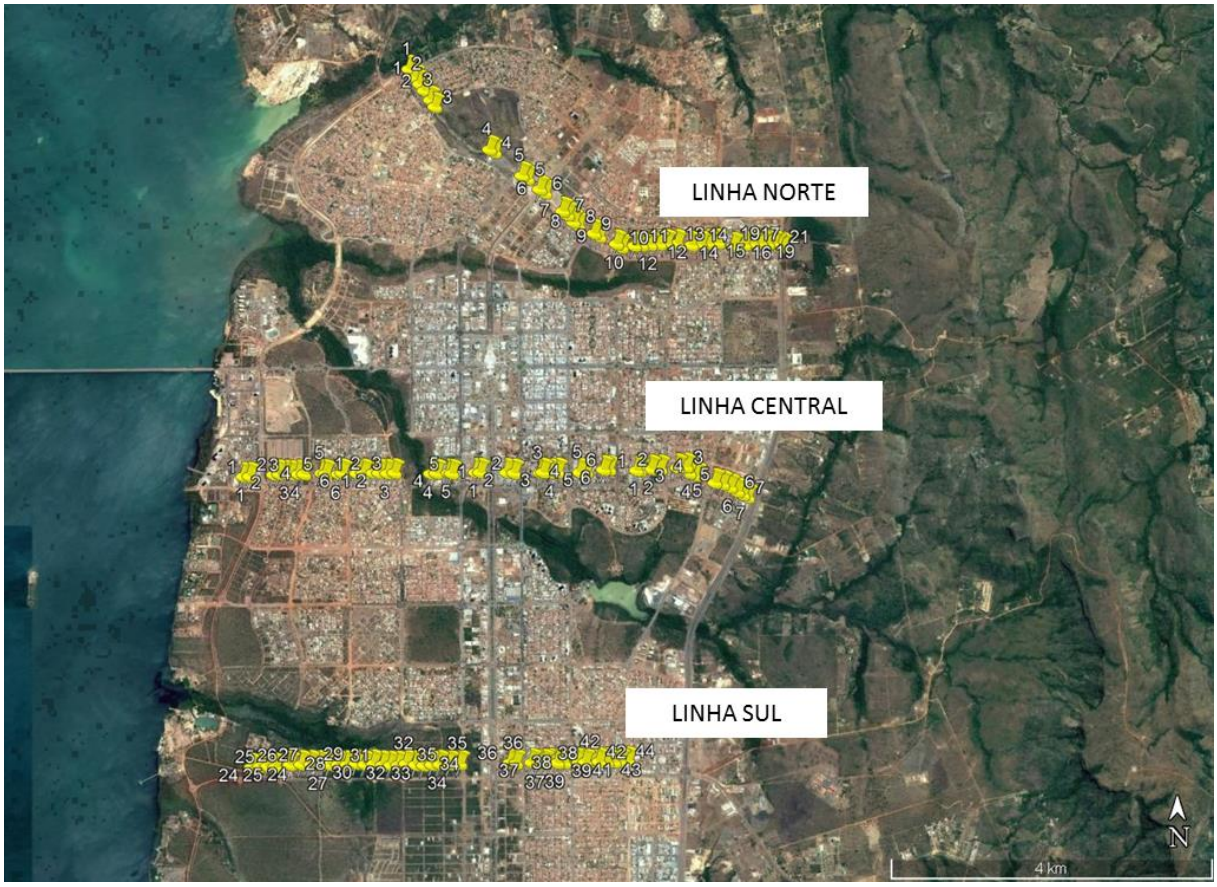


Figura 3.2 – Localização das Linhas Central, Norte e Sul utilizadas na investigação do subsolo da área de estudo.

Paralelamente a esse processo desenvolveram-se modelos geotécnicos por meio do banco de dados de sondagem à percussão. Assim, utilizando-se de ferramentas computacionais criaram-se modelos de N_{SPT}, de tipos de solo e de nível freático para a área de estudo.

Dispondo das investigações de campo por meio de resistividade elétrica, da relação entre tipo de solo e padrões de resistividade elétrica e dos modelos geotécnicos desenvolvidos em ambiente computacional, pôde-se compará-los, verificando sua compatibilidade, capacidade

de agregar informações e de trabalharem simultaneamente ou de forma complementar. A Figura 3.3 apresenta um fluxograma para melhor compreensão do panorama geral da metodologia empregada no trabalho.

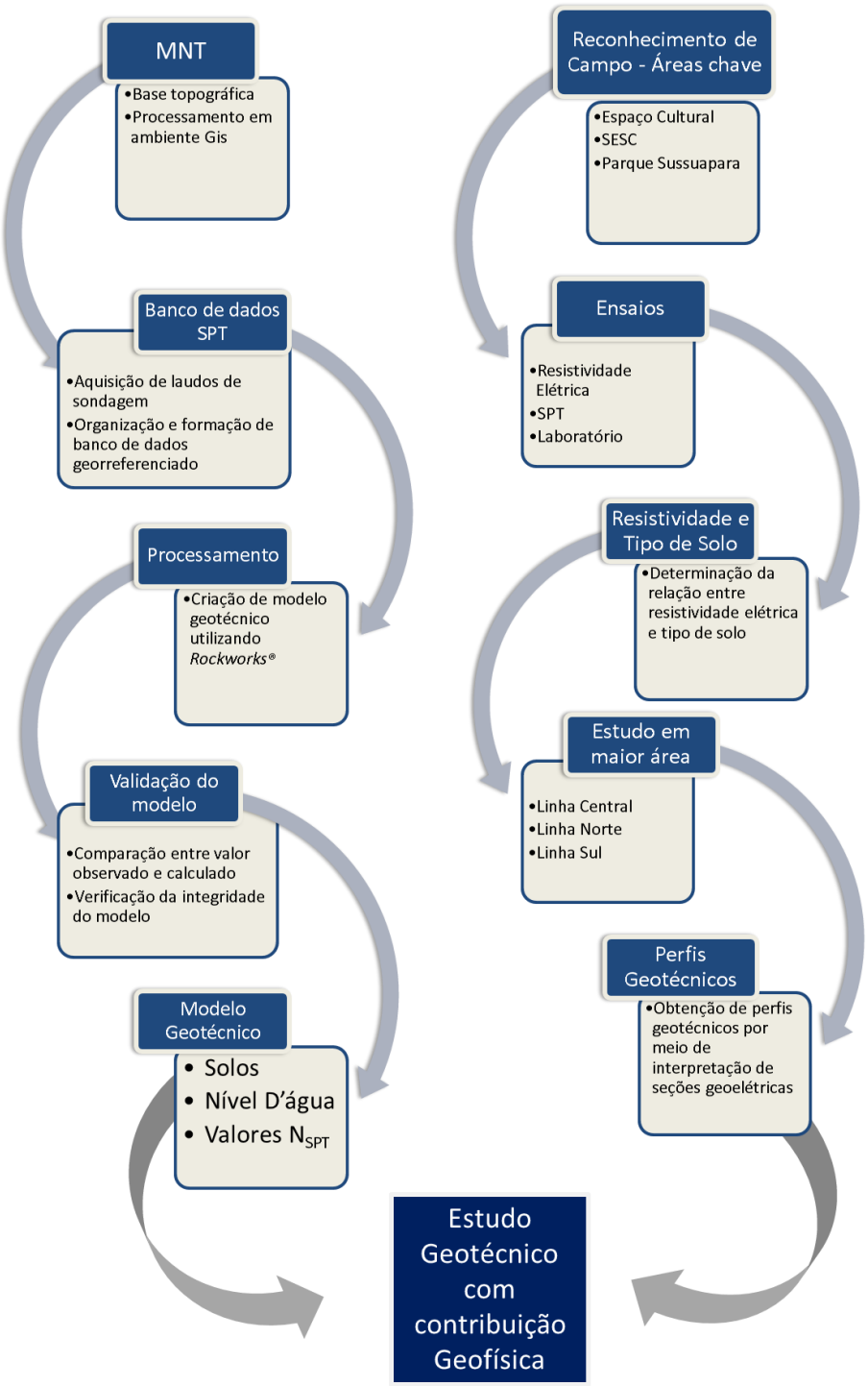


Figura 3.3 – Fluxograma síntese do procedimento de criação dos perfis e dos modelos geotécnicos.

3.2 – RECONHECIMENTO DE CAMPO

Inicialmente foi realizada uma inspeção na área de estudo, percorrendo e vistoriando vários locais, especialmente taludes expostos, valas abertas e obras em execução. Uma planilha de campo foi utilizada para anotar as principais características do material analisado, como: cor, textura, plasticidade e origem do solo. Assim, foi possível criar um panorama geral da área de estudo e proceder ao desenvolvimento do trabalho conforme descrito nos itens a seguir.

3.2.1 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA – ÁREAS CHAVE

O aparelho utilizado na realização deste e de todos os estudos envolvendo resistividade elétrica de campo foi o *Syscal Kid*® da empresa *IRIS INSTRUMENTS*. O mesmo possui dois cabos com 35 m cada e conectores espaçados a cada 3 m, podendo ser configurado no modo *switch* nas configurações dipolo-dipolo e polo-dipolo, por exemplo.

Utilizando toda a extensão do cabo, o espaçamento máximo de 3 m e todos os 24 eletrodos é possível cobrir uma distância de 69 m e atingir uma profundidade de 13 m na configuração dipolo-dipolo, com 9 níveis de investigação.

As análises preliminares dos laudos de sondagem disponíveis indicaram que a maioria dos furos de sondagem apresenta o impenetrável até a profundidade de 12 m. Assim, a profundidade limite que o equipamento empregado é capaz de atingir é compatível com a situação local e os objetivos do trabalho. A Figura 3.4 apresenta o equipamento utilizado.



Figura 3.4 – Foto evidência do equipamento *Syscal Kid*® utilizado nos ensaios.

Os arranjos wenner, dipolo-dipolo e polo-dipolo foram verificados de modo a se decidir qual seria o mais adequado a ser empregado. Todos apresentaram tempo de execução semelhante,

contudo, o arranjo dipolo-dipolo se mostrou mais adequado, com maior quantidade de pontos que o arranjo wenner e maior facilidade de execução que o arranjo polo-dipolo. Assim, optou-se pela utilização do arranjo dipolo-dipolo em todas as campanhas.

Outro fator importante é a variação dos resultados obtidos de acordo com os períodos climáticos. Assim, foram feitos ensaios nos meses de setembro e outubro de 2015, coincidindo com o início do período chuvoso e ensaios em março e abril de 2016, coincidindo com o fim do período chuvoso.

Uma vez determinado o ponto de início, o equipamento era instalado, buscando alinhar o cabo e os eletrodos, evitando possíveis desvios que levassem a erros de interpretação dos resultados. Após o posicionamento eram anotadas as coordenadas de cada eletrodo com a ajuda do GPS. A partir de então o aparelho era configurado e iniciava-se a etapa de checagem dos contatos.

Eventualmente o aparelho indicava a expressão "*bad contact*", o que significava que não havia condutividade suficiente entre algum par de eletrodos. O procedimento adotado era o umedecimento do solo onde o eletrodo estava cravado, com água de abastecimento, até que a checagem fosse concluída com êxito.

Adotou-se numeração algébrica para a identificação das seções, sendo o sentido do ensaio coincidente à ordem crescente de numeração adotada.

No Espaço Cultural o trabalho iniciou-se pelo lado Norte do Córrego Comprido, partindo do ponto mais próximo da margem do córrego e se afastando do mesmo. Foram realizados quatro trechos, sobrepondo sempre a metade da linha a cada mudança de posição do equipamento.

Após a conclusão das linhas no lado Norte, partiu-se para o lado Sul do córrego, iniciando às margens do córrego e avançando para a direção Sul. A Figura 3.5 indica o posicionamento das seções de resistividade elétrica para a região do Espaço Cultural. Os perfis correspondentes aos trechos 01 e 07 (destacados em vermelho) receberam furos de sondagem, cujos resultados são apresentados no Capítulo 4.



Figura 3.5 - Disposição das seções de resistividade elétrica para a região do Espaço Cultural.

A segunda área estudada foi a região do SESC Palmas. Inicialmente fez-se uma seção no Trecho 00 (Figura 3.8), depois partindo para o Trecho 01 sem fazer sobreposição para uma posterior avaliação dos resultados obtidos com e sem sobreposição. Nos demais trechos seguiram-se com sobreposição até a conclusão da área no trecho 05.

A Figura 3.6 indica o posicionamento das seções de resistividade elétrica para a região mencionada. Os perfis correspondentes aos trechos 00 e 03 receberam furos de sondagem e são apresentados no Capítulo 4.

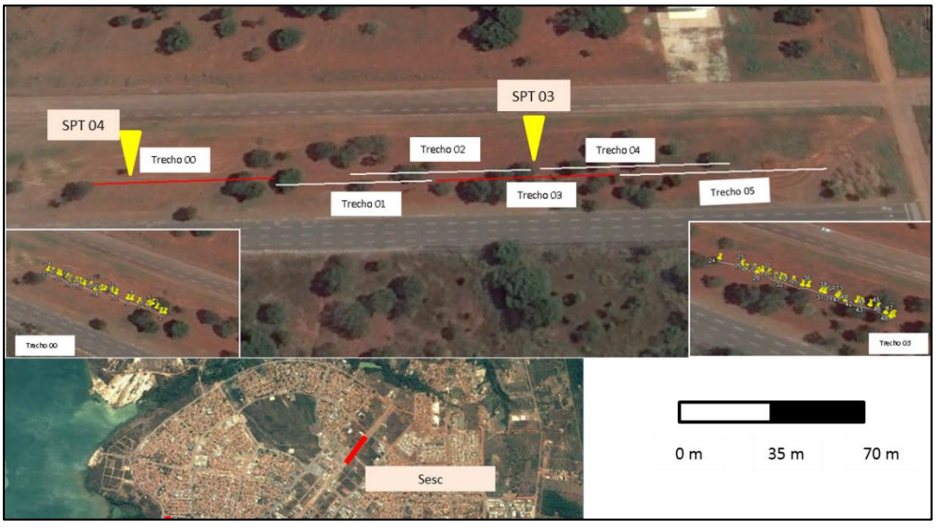


Figura 3.6 - Disposição das seções de resistividade elétrica para a região do SESC.

Posteriormente, foi realizado o ensaio no Parque Sussuapara. Iniciou-se pelo lado Sul do Córrego Sussuapara caminhando para a direção Sul até o Trecho 03. Em seguida, do lado

Norte, iniciou-se o ensaio pela margem do curso d'água caminhando para a direção Norte até se concluir o Trecho 06.

A Figura 3.7 indica o posicionamento das seções de resistividade elétrica para a região do Parque Sussuapara. Os perfis correspondentes aos trechos 01 e 04 receberam furos de sondagem e são apresentados no Capítulo 4.

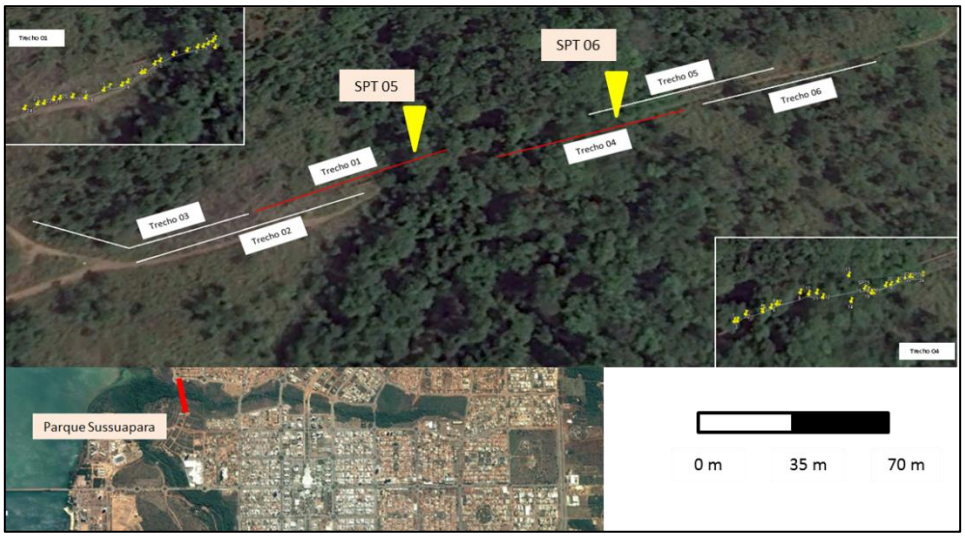


Figura 3.7 - Disposição das seções de resistividade elétrica para a região do Parque Sussuapara.

3.2.2 – SONDAGEM À PERCUSSÃO SPT

Realizaram-se duas sondagens à percussão em cada uma das localidades: Espaço Cultural, SESC e Parque Sussuapara. As mesmas foram locadas com base na avaliação preliminar dos perfis de resistividade elétrica, buscando verificar pontos com maior contraste geoelétrico. Esse conjunto de seis sondagens foi locado de modo a coincidir com o eixo das seções de resistividade elétrica e permitir relacionar esses dois ensaios distintos. A Tabela 3.1 apresenta as coordenadas dos pontos onde foram realizadas as sondagens.

Tabela 3.1 – Coordenadas dos pontos onde foram realizadas as sondagens SPT – Datum Sirgas 2000.

Localização	Identificação	Coordenada X	Coordenada Y
Espaço Cultural	SPT 01	792157	8871085
	SPT02	792164	8870887
SESC	SPT03	793254	8875663
	SPT04	793157	8875551
Parque Sussuapara	SPT05	790390	8874318
	SPT06	790375	8874407

As sondagens foram realizadas de acordo com a NBR 6484 (ABNT, 2001) com uma alteração no que se refere à coleta de amostra. A amostra contida no amostrador foi integralmente armazenada em uma embalagem identificada com o número do furo e a profundidade de coleta e, em seguida, remetida ao laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Tocantins (UFT). A Figura 3.8 ilustra a coleta de amostra a partir do amostrador bipartido.

Os furos foram posicionados com a ajuda de GPS. Uma vez encontrado o ponto correto, o tripé era montado e realizado o furo inicial com trado concha. A haste era então ligada ao amostrador tipo *Raymond* e posicionada no furo. Marcações espaçadas de 15 centímetros eram impressas na haste.

A energia era então aplicada por meio do impacto do peso sobre a cabeça de bater. Utilizou-se cabo de aço e operação manual. Os golpes eram anotados pelo chefe da equipe, que também orientava os operadores quando parar de aplicar os golpes.



Figura 3.8 – Coleta de amostra retida no amostrador bipartido.

3.3 – ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios de laboratório foram realizados com o intuito de determinar as características geotécnicas dos diferentes tipos de solos analisados, permitir a reprodução controlada de suas condições originais em ambiente de laboratório e relacionar a resistividade elétrica com essas características geotécnicas.

As amostras coletadas durante o ensaio de sondagem à percussão foram identificadas, acondicionadas em embalagem hermética e remetidas ao laboratório.

Para melhor compreensão, a Figura 3.9 apresenta o fluxograma de atividades realizadas em laboratório.

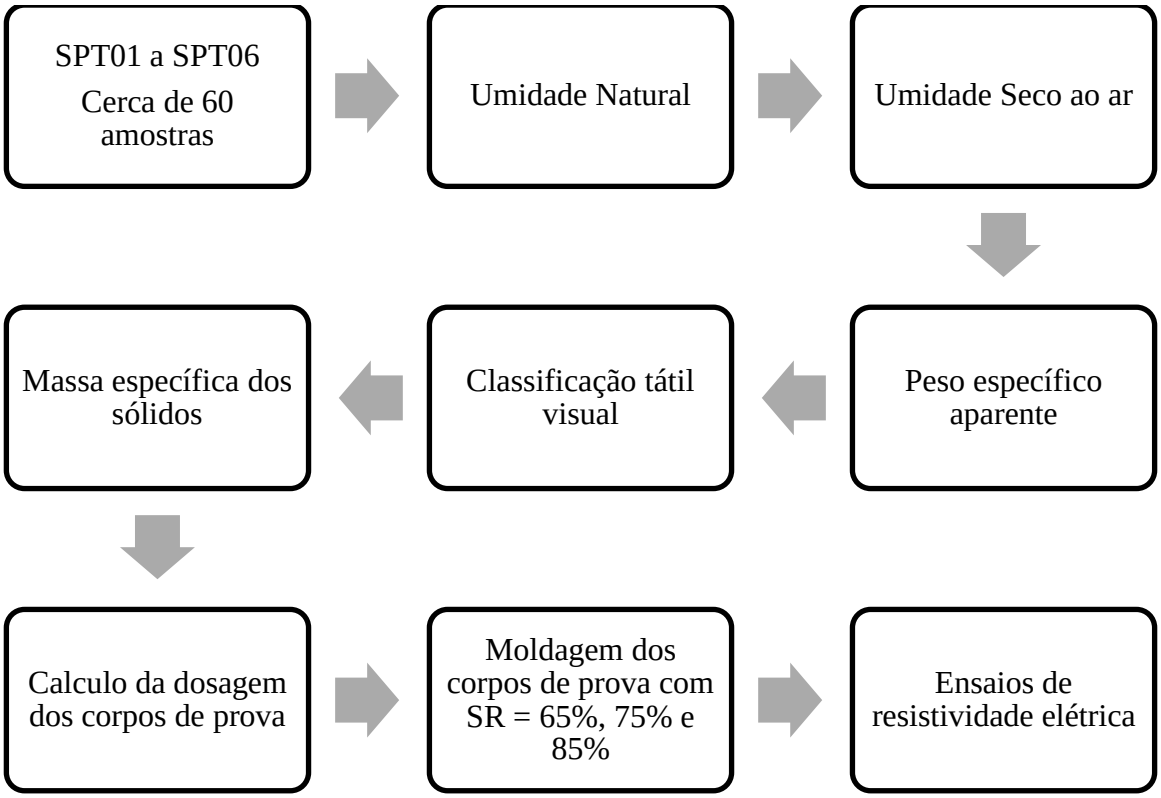


Figura 3.9 – Fluxograma de atividades desenvolvidas no laboratório.

O laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal do Tocantins, utilizado para a realização dos ensaios de caracterização, conta com os equipamentos necessários e em conformidade para a realização das atividades descritas.

Os corpos de prova utilizados na realização de ensaios de resistividade elétrica de laboratório foram moldados com grau de saturação de 65%, 75% e 85%, reproduzindo os valores obtidos para as amostras em campo. Os itens a seguir descrevem os procedimentos realizados com essas amostras.

3.3.1 – ENSAIOS DE CLASSIFICAÇÃO GEOTÉCNICA

Inicialmente realizou-se ensaio de determinação de umidade natural, onde foram coletadas três cápsulas de cada amostra. Após as anotações iniciais de identificação, massa da cápsula e massa do solo úmido, as mesmas foram colocadas em estufa a 105 °C por um período de 24

horas. Após esse período foi obtida a massa de solo seco e realizada a média das umidades calculadas para as três cápsulas, descartando, eventualmente, valores de umidade que excederam 5 % da média.

Colocaram-se as amostras para secagem ao ar. Após alcançar o equilíbrio de umidade foram realizados ensaios para determinar a umidade do material seco ao ar. Seguiu-se o mesmo procedimento descrito no parágrafo anterior.

Foi determinado o peso específico aparente das amostras retidas no amostrador bipartido por meio do ensaio da balança hidrostática, conforme descreve a NBR 10838 (ABNT, 1968). Esse dado reflete a condição inicial de campo, sendo tratado como parâmetro a ser reproduzido em laboratório para os ensaios de resistividade elétrica de laboratório, descritos no item 3.3.2.

Procedeu-se, então, com os ensaios necessários para a classificação geotécnica das amostras. As mesmas foram destorroadas e submetidas ao processo de classificação táctil visual conforme descreve a NBR 7250 (ABNT, 1982). As Figuras 3.10 (a), (b) e (c) ilustram, respectivamente, o processo de destorroamento, a classificação quanto à cor e a verificação da coesão das amostras.



Figura 3.10– (a) Processo de destorroamento (b) Classificação quanto à cor (c) Verificação da coesão.

Em seguida realizaram-se os ensaios para a determinação do peso específico real dos grãos de acordo com a NBR 6508 (ABNT, 1984). Adotando-se o valor encontrado para cada amostra no cálculo da dosagem dos corpos de prova a serem compactados e submetidos a ensaio de resistividade elétrica em laboratório.

Optou-se por considerar a classificação táctil visual como referência na classificação dos solos, contudo também foi realizada uma campanha de ensaios de granulometria, classificando os mesmos em conformidade ao sistema SUCS. Assim várias amostras classificadas como argila, silte, areia e saprólito foram submetidas aos ensaios de limites e granulometria. Os resultados são apresentados no Capítulo 4.

A classificação das amostras de acordo com o sistema SUCS se deu pela realização de ensaios de granulometria com sedimentação, com e sem defloculante, e de limites de liquidez e de plasticidade, conforme prescreve a ASTM D2487 (ASTM, 2011). Para tanto foram processadas uma fração das amostras submetidas ao ensaio de classificação táctil visual. A Tabela 3.2 apresenta a lista das amostras e procedimentos aos quais foram submetidas.

Tabela 3.2 – Amostras submetidas a ensaios de granulometria com sedimentação e limites de consistência.

	Granulometria com sedimentação					Limites de consistência
Classificação táctil visual	Amostras ensaiadas					Amostras ensaiadas
Argila	SPT1-2m	SPT2-1m	SPT3-3m	SPT3-5m	SPT4-3m	SPT2-1m
Silte	SPT1-1m	SPT1-4m	SPT2-2m	SPT2-6m		SPT1-1m
Areia	SPT5-1m	SPT5-6m	SPT6-1m			SPT5-6m
Saprólito	SPT1-9m	SPT2-11m	SPT4-10m	SPT4-11m		SPT4-10m

Após a realização dos ensaios descritos, puderam-se determinar as massas de água e de solo necessárias para moldar os corpos de prova a serem utilizados no ensaio de resistividade elétrica de laboratório. Esse ensaio é descrito no item a seguir.

3.3.2 – ENSAIOS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM LABORATÓRIO

As amostras a serem ensaiadas foram preparadas para reproduzir as condições de umidade e peso específico seco encontradas em campo em três situações de grau de saturação: 65%, 75% e 85%. Desse modo foi possível observar a variação da resistividade elétrica com a umidade do material, dentro dos valores típicos de umidade encontrados em campo.

Para se atingir a umidade desejada em cada corpo de prova foi utilizada água da rede pública. Segundo a empresa responsável pelo abastecimento na cidade a resistividade da água na localidade é em média de 25 Ω.m a uma temperatura de 25°C, já o pH varia entre 6.5 a 7.5.

Com a dosagem calculada, os corpos de prova foram submetidos ao processo de compactação semi-estática, em camada única, em uma prensa hidráulica com célula de carga de cinco toneladas e ligada a um computador para aquisição de dados. A velocidade escolhida foi de 10 mm/min. O cilindro utilizado como molde na compactação apresenta diâmetro interno de 50 mm e 100 mm de altura. O solo é colocado no mesmo com a ajuda de um funil metálico, espalhado cuidadosamente com uma pequena espátula e levado à prensa.

Os diferentes tipos de materiais utilizados preenchem, quando amolgados, alturas diferentes do cilindro metálico, padronizou-se a compactação para iniciar no topo do cilindro. Assim, pode-se observar na Figura B.18, que apresenta a curva de compactação obtida para os solos analisados, que existe um trecho inicial de acomodação variável em relação a cada tipo de solo. Ao final, sempre se obteve o corpo de prova com 50 mm de diâmetro por 50 mm de altura.

A extração é feita na mesma prensa com o auxílio de uma base para encaixar o cilindro e permitir o deslocamento do corpo de prova até que o mesmo se desprenda e repouse sobre uma base flexível. Após a extração, o corpo de prova recebeu uma identificação reproduzindo o número do furo, a profundidade correspondente e o grau de saturação em que foi compactado. Em seguida, o mesmo foi envolto em plástico filme e armazenado em uma caixa de isopor até o momento de ser ensaiado.

A resistividade elétrica em laboratório foi realizada por meio de um circuito elétrico em corrente contínua, em que é possível definir a corrente a ser aplicada e medir a voltagem ou definir a voltagem e medir a corrente resultante. Um multímetro foi inserido ao circuito para confrontar as leituras da fonte, resultando em maior precisão e confiabilidade nas leituras.

O corpo de prova foi colocado entre duas placas de cobre, que por sua vez são fixadas em peças de madeira para garantir o isolamento e a estabilidade necessária para realizar o ensaio. O contato do corpo de prova e a placa de cobre receberam a aplicação de gel eletro-condutor evitando que imperfeições na superfície do corpo de prova interfiram no resultado obtido.

As Figuras 3.11 (a), (b) e (c) apresentam, respectivamente, a fonte de corrente contínua, o multímetro e o capacete empregados na realização do ensaio de resistividade elétrica de laboratório.



Figura 3.11 – (a) Fonte de corrente contínua (b) Multímetro (c) Capacete de contato.

A Figura 3.12 apresenta o esquema do circuito elétrico utilizado para a realização do ensaio.

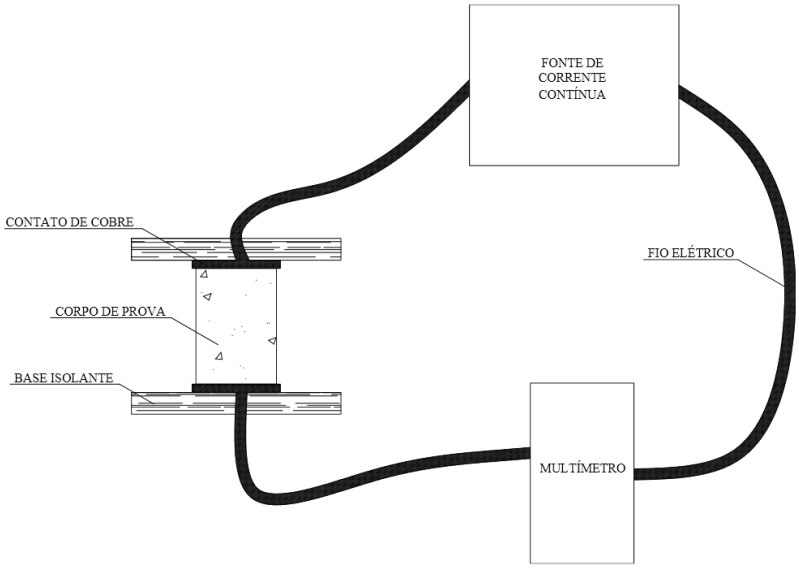


Figura 3.12 – Circuito elétrico utilizado na determinação da resistividade elétrica dos corpos de prova.

Com o circuito montado são iniciadas as leituras, aplicando-se as seguintes diferenças de potencial: 0,5 V; 1,0 V; 2,0 V; 4,0 V; 8,0 V. São lidas, então, as correntes elétricas produzidas para cada diferença de potencial e inseridas imediatamente no computador, permitindo-se assim verificar eventuais erros de leitura, refazendo-as.

A Figura 3.13 apresenta o gráfico que relaciona a corrente elétrica medida em relação à diferença de potencial aplicada em uma das amostras ensaiadas.

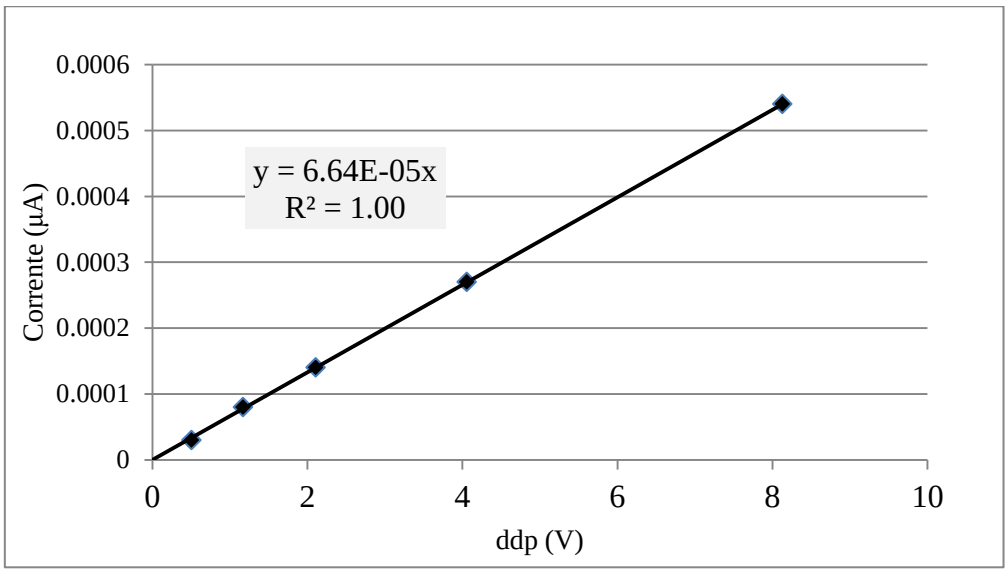


Figura 3.13 – Relação entre corrente elétrica medida e diferença de potencial aplicada.

Pode-se observar que o solo respeita a Lei de Ohm para os níveis de tensão utilizados. Isso significa que existe uma proporcionalidade entre a resistência e a diferença de potencial aplicada, o que implica na aceitação das equações para a determinação da resistividade elétrica, entre outras, que usam a Lei de Ohm como princípio.

A amostra obtida para cada profundidade foi submetida, portanto, a três ensaios de resistividade elétrica, totalizando cerca de 180 ensaios. Como se obtiveram três valores distintos de resistividade elétrica correspondente aos três valores de saturação, resultante da variação do grau de saturação, foi possível determinar a equação da curva de resistividade elétrica para cada profundidade. Essa curva relaciona a resistividade elétrica e a umidade volumétrica, conforme demonstrado por Aquino (2010).

A Figura 3.14 apresenta a curva de resistividade elétrica em relação à umidade volumétrica obtida para uma das amostras ensaiadas.

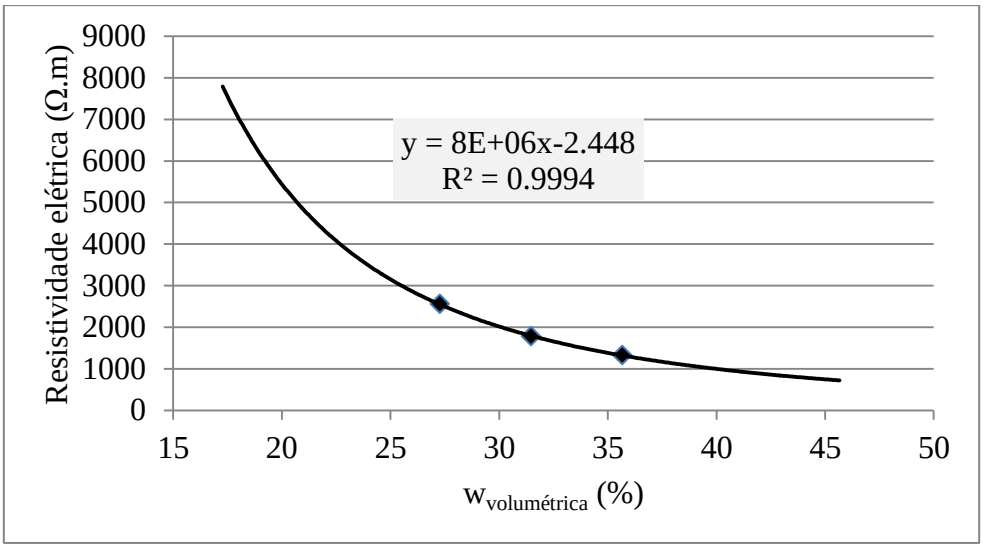


Figura 3.14 – Relação entre resistividade elétrica e umidade volumétrica.

3.3.3 – ENSAIOS DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

As análises de difração de raios-X foram realizadas no laboratório do Instituto de Geociências (IG) da Universidade de Brasília com a utilização de equipamento RIGAKU Ultima IV operando com tubo de cobre e filtro de níquel, sob voltagem de 35 kV e corrente de 15 mA, velocidade de varredura de 4° por minuto no intervalo de 2Θ de 2° a 80°. Foram realizadas análises para a amostra total e fração argila, nas condições glicolada e aquecida.

Ao todo foram analisadas 23 amostras, incluindo fragmentos de rochas encontrados junto ao solo, as quais foram preparadas por meio de processo de trituração e peneiramento para a fração total e sedimentação por meio de centrífuga para a fração argila.

Após a obtenção dos resultados, os mesmos foram submetidos a procedimento de análise quantitativa dos picos com o objetivo de estimar o percentual de ocorrência de cada mineral identificado. Tal procedimento se deu pela contabilização da área do pico de cada mineral e pelo seu cálculo percentual em relação ao somatório da área de todos os picos, como mostra a Equação 3.1.

$$Mineral\ (\%) = \frac{\sum Picos\ do\ mineral}{\sum Picos\ de\ todos\ os\ minerais} \qquad \text{Eq. 3.1}$$

3.4 – RELAÇÃO ENTRE RESISTIVIDADE ELÉTRICA E TIPO DE SOLO

A interpretação geotécnica de perfis eletrorresistivos depende do estabelecimento de uma relação entre o tipo de solo e os valores típicos de resistividade elétrica que esse pode

assumir. Não se trata de uma tarefa simples, pois, essa é uma característica que apresenta grande variação e que está intimamente ligada à umidade volumétrica do solo, bem como a outros fatores que não estão no escopo deste trabalho, tais como: temperatura, pH, tipo de fluido.

Desse modo, é necessário, primeiramente, determinar quais os tipos de solo existentes na área de estudo. O número de tipos deve ser o suficiente para permitir uma interpretação geotécnica útil e não ser exageradamente grande a ponto de impedir uma distinção razoável entre um e outro tipo durante a própria interpretação geotécnica.

Em seguida é necessário verificar se existe uma correlação entre cada tipo de solo e seus respectivos valores de resistividade elétrica que permitam distingui-los. Para tanto, os dados de resistividade elétrica obtidos em laboratório foram submetidos a análises de estatística descritiva revelando a existência de populações distintas.

O estudo das áreas chave possibilitou a reunião de dados de resistividade elétrica e sua comparação com os tipos de solo observados nas sondagens à percussão. A análise estatística desse conjunto de dados, separados por tipo de solo, permitiu a determinação de faixas de valores de resistividade elétrica para cada um dos tipos de solo observados.

Para se determinar a estratigrafia da área de estudo analisou-se cada perfil obtido para as áreas chaves, o que permitiu uma série de observações na busca de padrões de comportamento dos diferentes tipos de solos encontrados.

Assim, se observaram que os solos argilosos são comumente encontrados nas camadas superficiais, os siltosos em profundidades intermediárias, com os saprólitos sendo encontrados próximo à profundidade do impenetrável ao SPT. Já os solos arenosos são encontrados em abundância às margens do Lago de Palmas.

3.5 – PERFIS GEOTÉCNICOS GERADOS A PARTIR DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA

Neste item são apresentados os materiais e os métodos empregados na produção dos perfis geotécnicos para as linhas Central, Norte e Sul, um estudo desenvolvido para contribuir na caracterização geotécnica da área de estudo utilizando técnicas de resistividade elétrica.

3.5.1 – LOCALIZAÇÃO

Foram escolhidos três eixos perpendiculares ao eixo longitudinal da cidade, envolvendo a área mais povoada e urbanizada, alvo de maior interesse a curto e médio prazo no que tange à execução de obras públicas e privadas.

A Tabela 3.3 apresenta as coordenadas dos pontos iniciais e finais de cada um dos três eixos estudados.

Tabela 3.3 – Coordenadas de inicio e fim das Linhas Central, Norte e Sul – Datum Sirgas 2000.

Linha	Coordenada de Início		Coordenada de Fim	
	X	Y	X	Y
Central	789027	8871496	795288	8871192
Norte	791126	8876492	795741	8874274
Sul	789576	8867946	793602	8867948

A linha Central se inicia na Orla 14, na LO-05, cruza a Avenida Theotônio Segurado e é finalizada próxima a TO-050, nas proximidades do Parque Cesamar. A linha Norte é iniciada próximo ao Ribeirão Água Fria e segue a LO-12 cortando a Avenida Theotônio Segurado, sendo encerrada próxima a TO-050, nas proximidades do Parque Sussuapara. Já a linha Sul é iniciada próximo à Praia do Prata, seguindo a LO-19 e cortando a Avenida Theotônio Segurado, sendo encerrada nas proximidades da quadra 812 Sul.

3.5.2 – PROCEDIMENTO DE ENSAIO

Cada linha possui um comprimento médio de aproximadamente 7.000 m, totalizando cerca de 21.000 m de extensão total, tratando-se de uma área urbana, que apresenta cruzamentos, trânsito de veículos e pessoas, corpos d'água, estacionamentos e toda a sorte de obstáculos, não sendo possível executar trechos contínuos, necessitando-se intercalar trechos investigados e trechos não investigados. Para a linha Central se investigou uma extensão total de 1610 m, para a linha Norte uma extensão total de 1120 m e para a linha Sul uma extensão total de 1190 m, totalizando 3920 m de investigação.

Foi utilizada uma prancheta de campo para anotar os dados necessários para identificação de cada linha. Procurou-se identificar cada trecho por meio de uma numeração sequencial, seguida das coordenadas, obtidas por meio de GPS, do ponto inicial, central e final de cada trecho, além do dia e horário de execução do ensaio.

Ao término do dia os dados da prancheta foram fotocopiados e os dados do equipamento recuperados por meio do programa *Prosys II*, que acompanha o equipamento *Syscal Kid*®, sendo então exportados nas extensões "*.dat"* e "*.bin"*. A memória do equipamento é então apagada e o equipamento carregado para ir a campo novamente no dia seguinte.

Como já mencionado, obstáculos como ruas, avenidas, entradas e saídas de estacionamentos, corpos d'água, garagens, entre outros que impedissem a realização do ensaio foram desprezados, realizando os ensaios nos demais locais. Quando possível, evitavam-se esses obstáculos passando para o canteiro central ou para o lado oposto da avenida.

3.5.3 – FILTRAGEM E INTERPRETAÇÃO GEOFÍSICA

Inseriram-se as informações de altimetria ainda na plataforma *Prosys II*. Nessa plataforma foi feita uma filtragem, quando se verificava a consistência dos dados, eliminando "*bad data points*". Essa avaliação pode ser manual ou automática, por meio de rotinas pré-programadas no *software*. Optou-se por fazê-la manualmente, eliminando apenas pontos isolados. A Figura 3.15 ilustra essa plataforma e a verificação da consistência dos dados.

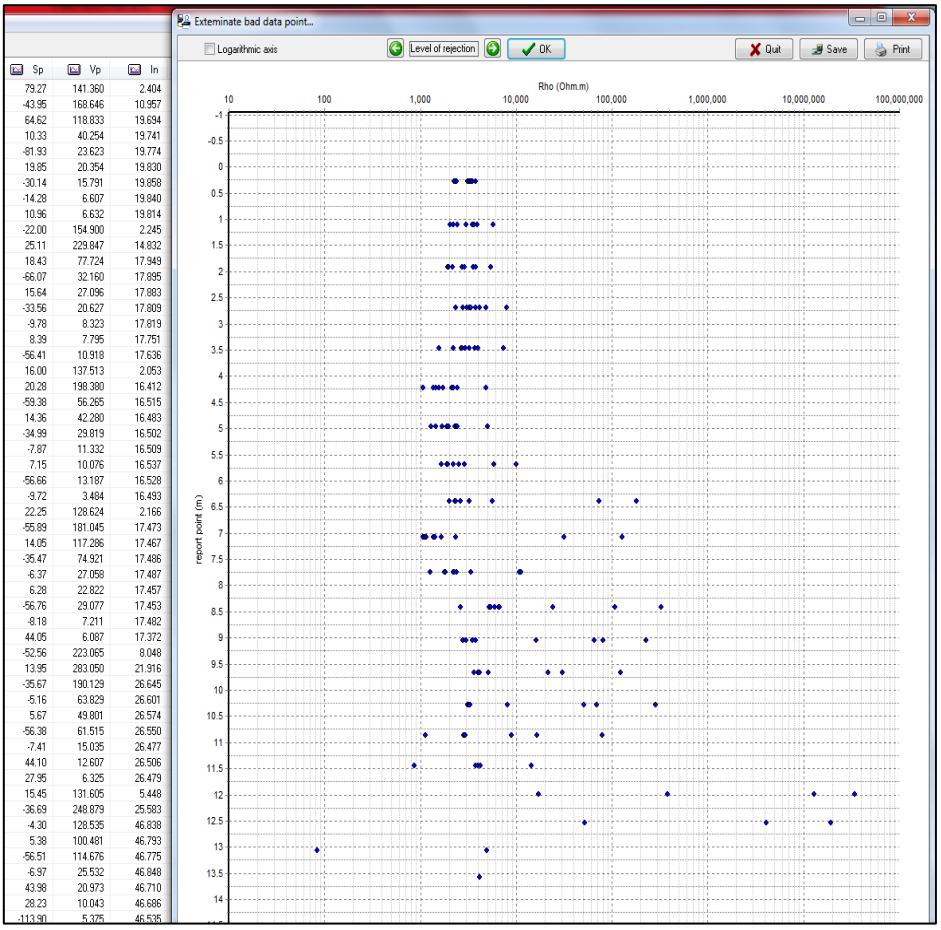


Figura 3.15 – Plataforma *Prosys II*, processo de verificação da consistência dos dados.

Em seguida os dados foram interpolados. Para tanto, utilizaram-se os programas *ZondRes2D*® e *RES2DINV*®.

De maneira resumida o processamento se dá pelo traçado de três perfis: o primeiro reflete os dados obtidos pelo aparelho *Syscal Kid*® em campo; o segundo apresenta um perfil teórico gerado a partir do modelo matemático escolhido; já o terceiro é resultado de processamento pelo método dos mínimos quadrados, fazendo o perfil teórico convergir o mais fielmente possível ao perfil medido.

O método utilizado para o cálculo do perfil interpolado é o de Gauss-Newton, que se trata de um método numérico capaz de resolver problemas de mínimos quadrados não lineares, sem a necessidade de se encontrar as derivadas segundas para tal tarefa.

Para uma visualização limpa do resultado final opta-se pela disposição dos resultados em contornos suavizados, o que permite a análise de transições de um tipo de solo para o outro com mais facilidade, evidenciando seus limites.

Os dados de topografia inseridos transformam a seção de resistividade elétrica alterando a modelagem por meio da malha de elementos finitos utilizada na inversão dos dados. A escala escolhida é fundamental nesse processo de diferenciação de camadas e, como se tratam de estudos amplos, definiu-se de acordo com os maiores e menores valores encontrados dentre todos os perfis, sendo então fixada para o intervalo de 100 Ω.m a 100.000 Ω.m.

Ao final desse processo tem-se um modelo geoelétrico, que relaciona coordenadas X, e Z com um dado valor de resistividade elétrica. Contudo, tal seção necessita de interpretação geotécnica para a obtenção do perfil geotécnico. Sendo este quem traz informações pertinentes para o emprego na engenharia civil.

Para tanto, como já mencionado, definiram-se os seguintes tipos de solo: argilas, siltes, areias e saprólito; bem como os respectivos intervalos de resistividade elétrica que cada um desses solos pode assumir. Assim, basta proceder com a transformação da resistividade elétrica em tipo de solo, agrupando regiões dentro de um mesmo intervalo de resistividade elétrica e atribuindo a elas a classificação adequada do tipo de solo ao qual está associada.

Esse processo conta ainda com algum grau de expectativa de onde uma determinada camada pode se apresentar dentro de um dado perfil, uma vez que a relação de cada tipo de solo é para com um intervalo e não um valor absoluto. Assim, o processo interpretativo leva em

consideração outros fatores, notadamente relacionados com a experiência do analista, além do que simplesmente a faixa de valores possível de se admitir para cada tipo de solo.

Para a representação gráfica de cada tipo de solo e a consequente construção do perfil geotécnico utilizou-se a ferramenta CAD *Draftsight*®, um programa de desenho assistido por computador. Designou-se uma coloração para cada tipo de solo. Assim a argila é representada pela cor vermelha, o silte pela cor laranja, a areia pela cor amarela e o saprólito pela cor rosa. A Figura 3.16 ilustra a transformação de um perfil geoelétrico (a) em um perfil geotécnico (b).

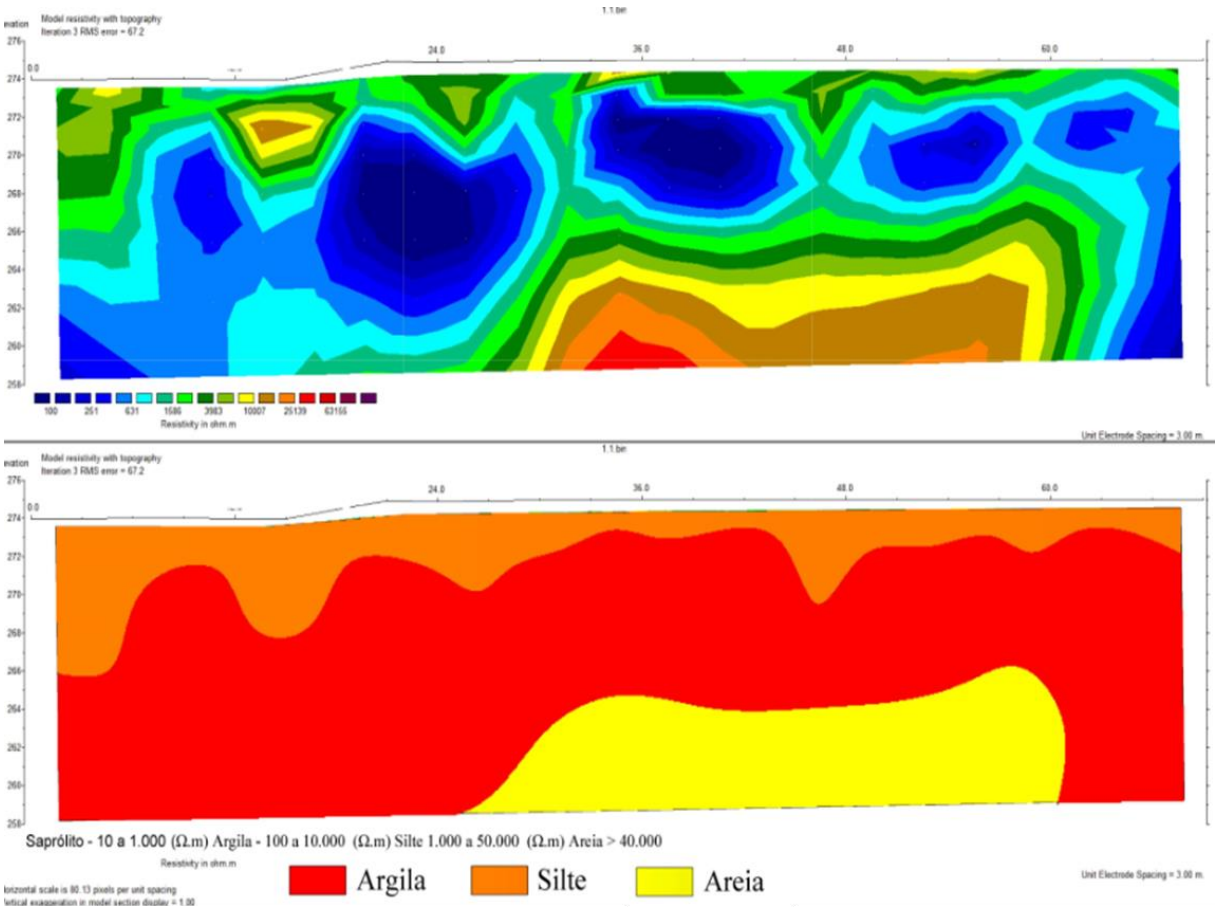


Figura 3.16 – (a) Perfil geoelétrico inicial (b) perfil geotécnico interpretado.

3.5.4 – AMOSTRAGEM A TRADO PARA VERIFICAÇÃO DOS RESULTADOS

Realizou-se uma campanha de simples reconhecimento a trado em pontos localizados nas linhas Central, Norte e Sul.

Empregou-se para tal tarefa um trado mecânico acoplado a caminhão utilizando ponteira de diâmetro igual a 25 cm, com capacidade máxima de se alcançar 10 m de profundidade, tendo

o furo interrompido ao se encontrar obstáculos como camadas pedregulhosas que impedissem o avanço, ou quando se verificava a instabilidade do fuste.

Escolheram-se pontos que coincidissem com a posição dos perfis geoelétricos realizados, podendo-se, assim, aferir os resultados da interpretação geotécnica desses perfis. Ao todo foram realizados doze furos, sendo quatro em cada linha.

O solo retirado é submetido à classificação táctil visual *in situ* e amostras foram conduzidas ao laboratório para ensaio de granulometria expedita (peneiras n° 4, 40 e 200) toda vez que se verifica mudança nas características do solo. A profundidade é controlada por marcações no eixo do trado. Os resultados são apresentados no Capítulo 4 e discutidos no Capítulo 5.

3.6 – MODELAGEM GEOTÉCNICA POR MEIO DE BANCO DE DADOS DE SONDAGENS SPT

Neste item são apresentados os materiais e os métodos utilizados na elaboração de modelos geotécnicos baseados em informações extraídas de banco de dados de sondagens à percussão SPT.

3.6.1 – MODELO NUMÉRICO DE TERRENO

Solicitou-se à Prefeitura de Palmas o acesso às curvas de nível geradas a partir de levantamento aerofotogramétrico realizado na cidade em maio de 2003. A mesma cedeu o arquivo na extensão "*.dxf"*.

Utilizou-se o programa *ArcGis*® para o desenvolvimento do mesmo. Os dados foram georreferenciados para a projeção SIRGAS 2000, na folha 22 S e delimitados de acordo com os limites definidos para o plano diretor da cidade.

O modelo numérico de terreno foi produzido a partir de uma grade irregular, *Triangular Irregular Network* (TIN), criada a partir da realização da triangulação de Delaunay dos pontos obtidos a partir das curvas de nível. A partir do TIN foi gerada uma grade retangular sem o uso de quintico, resultando em um modelo na escala 1:2000.

O produto da interpolação foi então refinado, suavizado no programa *Spring*® com o filtro passa baixa 7x7 com quatro iterações, corrigindo eventuais distorções e fazendo-o convergir corretamente nas junções entre o terreno e os corpos d'água. Do modelo numérico de terreno derivam cartas relacionadas à topografia que são apresentadas no Capítulo 4.

3.6.2 – CAPTAÇÃO E MONTAGEM DO BANCO DE DADOS

Iniciou-se uma campanha de aquisição de dados oriundos de sondagens à percussão. Para tanto foram encaminhados ofícios aos órgãos municipais, estaduais e federais, além das principais construtoras, incorporadoras e empresas ligadas a área de fundações atuantes na Cidade. No ofício foi solicitada a seção de laudos de sondagens contratados por esses órgãos e empresas para a elaboração desse trabalho, garantindo o uso estritamente acadêmico dos mesmos.

Ao final desse processo foram captados cerca de 500 boletins de sondagem, que foram cuidadosamente verificados quanto a sua integralidade de informações, incluindo a localidade, data de execução, profundidade do nível freático, valores de N_{SPT} e descrição do tipo de solo.

Quase a totalidade dos boletins não apresentava coordenadas complementando a localização dos furos, assim recorreu-se à base de dados da Prefeitura, que cedeu a planta digital da cidade em formato ".dxf".

Com a ajuda do programa *Draftsight*® e dispondo do endereço de cada boletim de sondagem e da planta digital da cidade, foi possível buscar manualmente o endereço de cada furo e a sua posterior locação dentro do terreno por meio dos croquis disponíveis no boletim.

Ao final desse processo, utilizando o programa *ArcGis*®, importou-se a localização de cada furo de sondagem, sobrepondo-os no modelo numérico de terreno e posteriormente gerando uma tabela com as coordenadas X, Y e Z na projeção SIRGAS 2000 para cada furo de sondagem disponível.

Com essa tabela em mãos pôde-se cadastrar os dados geotécnicos no programa *Rockworks*®, que é o programa utilizado no processamento dos modelos geotécnicos gerados neste trabalho.

A criação do banco de dados no *Rockworks*® envolveu o cadastramento de cada furo de sondagem com a sua nomenclatura, coordenadas, cota da boca do furo e profundidade total (Figura 3.17).

Para cada furo foram inseridos os valores de N_{SPT} para cada profundidade, bem como a descrição do tipo de solo e a profundidade do nível freático, incluído a data de sua aferição.

A respeito da descrição do tipo de solo, não há uma padronização que permita separar os mesmos em uma quantidade que seja razoável para o processamento de dados considerando a capacidade atual dos computadores. Além disso, muitas dessas diferentes descrições se referem a materiais que apresentam comportamentos muito parecidos, indistinguíveis para a escala de trabalho da engenharia civil.

Assim, foi necessário simplificar a descrição do solo encontrada nos boletins de sondagem. Para tanto, optou-se por utilizar a mesma classificação adotada para a descrição de perfis geotécnicos oriundos de resistividade elétrica, ou seja: argilas, siltes, areias e saprólito. Portanto considerou-se a fração predominante de solo descrita no boletim de sondagem para a composição de sua descrição no banco de dados.

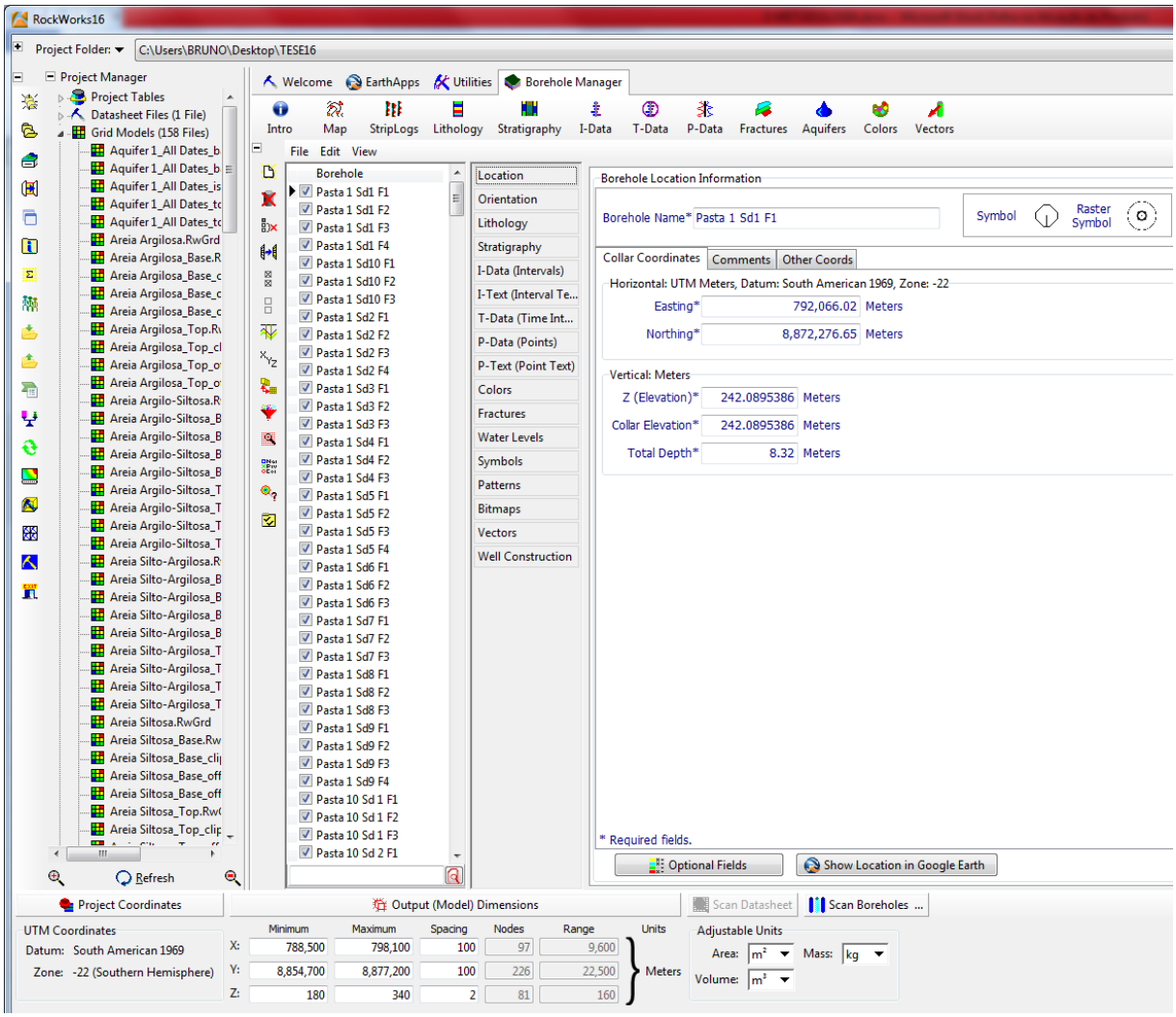


Figura 3.17 – Aspecto do banco de dados geotécnico criado no programa *Rockworks*®.

3.6.3 – DEFINIÇÃO DA ESCALA

A escala de trabalho é fundamental para determinar a aplicabilidade de um modelo. Escalas de detalhe permitem a representação minuciosa da área estudada, porém requerem uma grande densidade de dados. Já as escalas de síntese requerem uma densidade de dados significativamente menor, mas são aplicadas apenas em cartas utilizadas para o reconhecimento geral de uma área.

Segundo Borges *et al*. (2015), a escala de trabalho se relaciona com a área de influência da sondagem SPT e o grau de variabilidade desse atributo (Figura 3.18). A área de estudo em questão possui 11.085 hectares e o banco de dados compõe a quantidade de cerca de 500 sondagens. Assim a área de influência de cada sondagem é de, aproximadamente, 22 hectares.

Utilizando o ábaco proposto por Borges *et al*. (2015) e posicionando o valor da área de influência de cada sondagem no eixo das abcissas, encontra-se como limite inferior a escala de 1:7.000 e como limite superior a escala de 1:80.000.

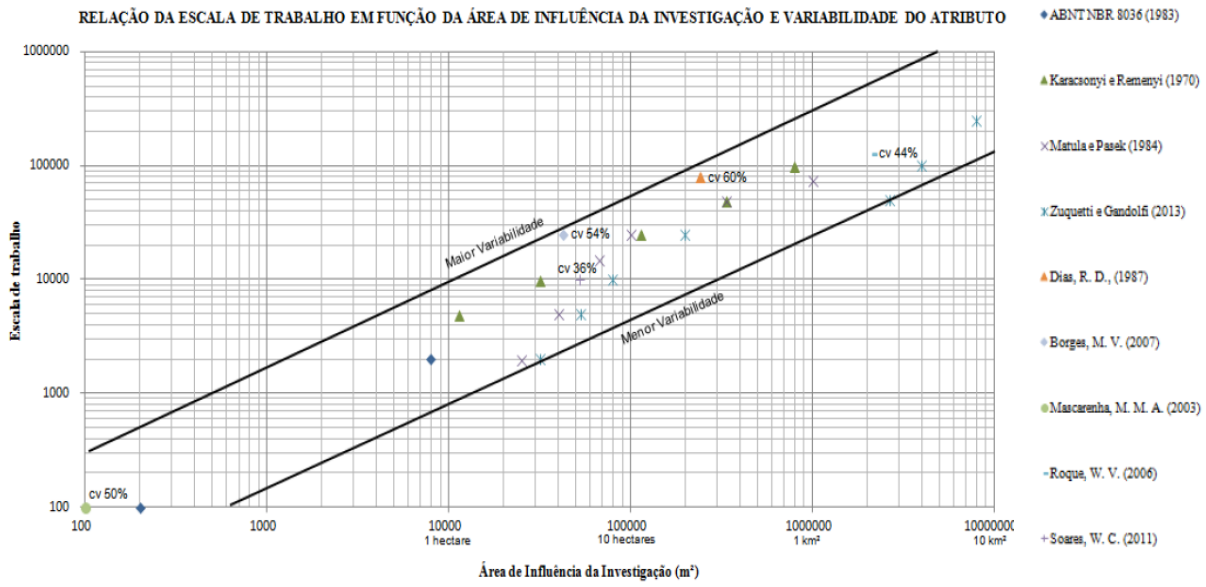


Figura 3.18 – Ábaco utilizado na determinação da escala de trabalho pelos principais pesquisadores. (Borges *et al*., 2015).

A definição da escala dentro desse intervalo depende da análise da variabilidade dos dados. Nesse caso, a análise dos laudos de sondagem mostrou dados pouco variáveis, com valores de N_{SPT} assumindo patamares de até 20 golpes nas camadas iniciais e rapidamente ultrapassando os 50 golpes a partir do saprólito. Assim, a variabilidade foi considerada como média e a

escala pôde ser fixada próximo ao centro dos limites inferior e superior admitidos, assumindo-se, portanto, a escala de 1:25.000.

3.6.4 – PROCESSAMENTO DOS DADOS

Com o banco de dados consolidado procurou-se processar os dados e criar três modelos principais: modelo de solos, modelo de N_{SPT} e modelo de nível freático. Para tanto foram testados vários interpoladores, em destaque a krigagem e o inverso ponderado da distância. Observou-se, contudo, que os melhores resultados foram obtidos com a krigagem, que forneceu superfícies mais suaves e dentro do que se previa em termos de modelo para os objetos representados.

O processamento permite alterar uma série de parâmetros com o objetivo de melhorar o resultado final. Dentre os mais importantes se destaca o semivariograma, que pode ser especificado pelo analista, quando é determinada uma função matemática ou pode ser automático, no qual uma rotina do programa ajusta a melhor configuração para que se atinja o melhor resultado. Escolheu-se a segunda opção, mas solicitando ao programa mostrar o semivariograma usado, sendo esse analisado e alterado pelo analista sempre que necessário. A Figura 3.19 apresenta a tela de processamento em que se pode escolher o interpolador e suas configurações.

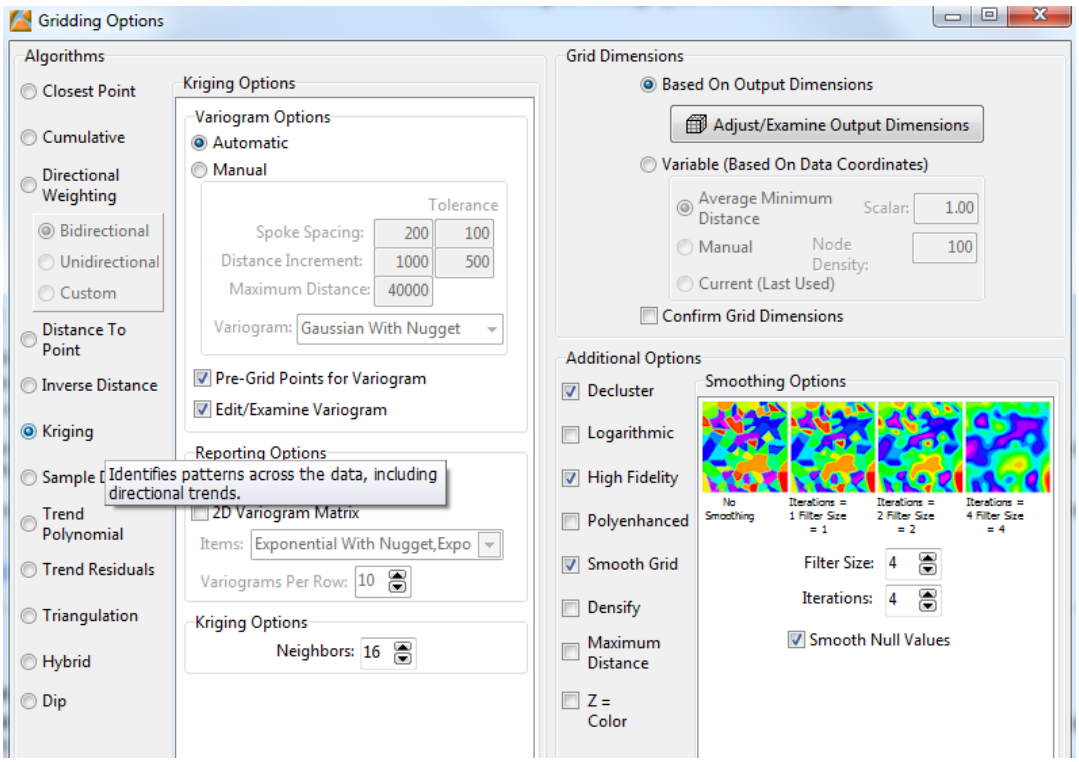


Figura 3.19 – Tela de ajuste do processamento no programa *Rockworks*®.

Após o processamento é gerada uma representação tridimensional do modelo, na qual se pode avaliar qualitativamente sua integridade e representatividade dentro do que se espera para a área e característica espacializada.

Em caso de não aceitação do modelo, são feitos novos ajustes até que o mesmo atenda à necessidade e seja finalmente aceito. Trata-se de um processo iterativo, em que aos poucos se consegue chegar ao resultado pretendido por meio da configuração adequada para tal objetivo.

Com o modelo concluído são extraídas seções, projeções, mapas e outros elementos capazes de ilustrar com clareza os resultados obtidos. Pode-se, ainda, exportar arquivos numéricos e trabalhá-los em outras plataformas como o *ArcGis*®, melhorando a apresentação dos resultados.

A área de estudo apresenta uma grande extensão e uma profundidade relativamente pequena para essa extensão. Assim, representar toda essa área em uma única imagem é inviável. Portanto, neste trabalho optou-se por apresentar os modelos tridimensionais criados por meio de quadriláteros delimitados dentro da área de estudo, são eles: Centro-Leste, Norte, Sul e UFT. A Tabela 3.4 apresenta as coordenadas de seus vértices.

Tabela 3.4 – Coordenadas dos vértices dos Quadriláteros: Centro-Leste, Norte, Sul e UFT.

Quadrilátero	Vértice 1		Vértice 2		Vértice 3		Vértice 4	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
Centro-Leste	791662	8871435	793630	8871629	791662	8873254	793928	8873269
Norte	791274	8874149	792124	8873522	792750	8875610	793481	8875193
Sul	793436	8863367	791527	8863680	793317	8865693	791289	8865842
UFT	788948	8873970	789723	8873821	788813	8872956	789812	8873045

Também são extraídos perfis geotécnicos do modelo de solos sobrepondo as Linhas Central, Norte e Sul da investigação por resistividade elétrica, de modo a analisar as informações de um perfil em relação ao outro.

3.6.5 – VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Segundo Andriotti (2009), a validação não é capaz de garantir a veracidade de um dado modelo, contudo, é uma ferramenta importante na sua concepção, uma vez que permite aferir a consistência do modelo em relação a seus próprios dados.

Para tanto, adota-se a metodologia proposta por Andriotti (2009), que sugere o seguinte procedimento:

1) Retira-se uma amostra qualquer do conjunto original correspondente a um determinado ponto (Zi);

2) Estima-se o novo valor para esse ponto (Zi'), utilizando os demais pontos do conjunto;

3) Calcula-se o erro (Zi – Zi') e (Zi – Zi')/σi;

4) Repete-se o procedimento para todos os pontos disponíveis. A diferença (Zi – Zi') deve tender a zero e a relação (Zi – Zi')/σi deve tender a 1.

Sendo:

Zi – valores disponíveis (amostras)

Zi' – valores estimados

σi – desvio padrão

O programa *Rockworks*® não dispõe de uma ferramenta específica para a realização da validação. Desse modo extraíram-se do mesmo os dados referentes à estatística descritiva de cada modelo e, em seguida, foram realizados os procedimentos descritos acima para cerca de duas dezenas de amostras aleatórias para cada um dos modelos produzidos.

Associado a esse procedimento também foi realizada uma checagem entre o modelo e os furos de sondagem inseridos no mesmo, verificando a consistência das informações, tanto no que tange à descrição de tipo de solo, valores de N_{SPT} e nível freático.

3.7 – PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

Produtos cartográficos são aqueles em forma de carta que trazem informações geográficas e geotécnicas que auxiliam no entendimento da área de estudo. Assim, foram produzidas as seguintes cartas: cota e profundidade do impenetrável ao SPT, cota e profundidade do nível freático, cota e espessura das camadas arenosas, siltosas e argilosas, valores de N_{SPT} para as

profundidades de 2 m, 5 m, 7 m e 10 m, hipsométrica, declividade, curvaturas de perfil e plana e compartimentação geotécnica.

3.7.1 – CARTAS DE COTA E PROFUNDIDADE IMPENETRÁVEL AO SPT

Os ensaios de sondagem à percussão SPT são interrompidos, usualmente, quando se atinge um dos critérios de parada. O nível onde o mesmo ocorre é chamado profundidade do impenetrável. Ao se associar essa profundidade ao modelo numérico de terreno tem-se a cota do impenetrável.

Desse modo, do banco de dados organizado no programa *Rockworks*® extraíram-se todas as sondagens que atingiram o impenetrável, sendo gerada uma tabela X, Y e Z onde os dois primeiros relacionam à posição no plano dentro do sistema de referência e o último fornece a cota do impenetrável, calculada como sendo a cota da boca do furo subtraída da profundidade do impenetrável.

Utilizando o programa *ArcGis*®, importou-se a tabela X, Y, e Z, que foi submetida ao processo de interpolação pelo inverso do quadrado da distância. Em seguida a grade gerada foi fatiada em seis classes de cotas e associadas a um gradiente de cores variando do azul ao vermelho, passando pelo verde e amarelo, sendo o azul relacionado com os menores valores e o vermelho aos valores mais elevados.

A carta de profundidade do impenetrável ao SPT foi produzida a partir da subtração do modelo numérico de terreno pelo modelo de cota do impenetrável ao SPT. Resultando assim em um produto cartográfico que indica diretamente a distribuição da profundidade em que se encontra o impenetrável ao SPT na área de estudo.

3.7.2 – CARTAS DE COTA E PROFUNDIDADE DO NÍVEL FREÁTICO

A carta de nível d'água representa a superfície freática na área de estudo. Para tanto, no programa *Rockworks*® separaram-se as sondagens que apresentavam nível freático, cerca de 200 furos, procedendo com a geração do modelo e a consequente criação de carta de topo do nível freático. Simulações com a inserção dos furos em que não se encontrou nível freático, atribuindo valores profundos para os mesmos, apresentaram resultados semelhantes àqueles obtidos utilizando-se apenas os furos em que se observou nível freático. A Figura 3.20 ilustra o processamento do modelo de aquífero.

A partir das cotas do nível freático pôde-se subtrair a mesma do modelo numérico do terreno, resultando na carta de profundidade do nível d'água.

Para uma padronização da apresentação dos produtos cartográficos os dados calculados no *Rockworks*® foram exportados para o *ArcGis*®, onde foram fatiados e associados a um gradiente de cor monocromático na cor azul, onde os tons mais escuros indicam cotas mais próximas à superfície e tons mais claros indicam cotas mais profundas em relação à superfície.

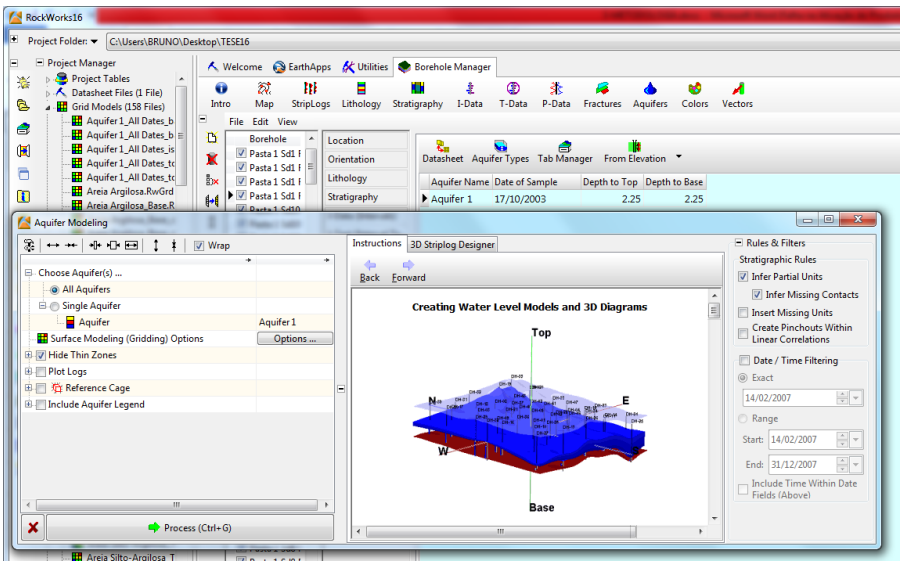


Figura 3.20 – Tela de processamento para obtenção do modelo de aquífero no programa *Rockworks*®.

3.7.3 – CARTAS DE TOPO, BASE E ESPESSURA DE CAMADAS

As cartas de topo e base de camadas de solos arenosos, siltosos e argilosos foram obtidas do modelo de solos do programa *Rockworks*®. Após a obtenção do modelo foram extraídas as superfícies individualmente, na forma de grades.

As grades foram exportadas para o programa *ArcGis*®, onde foram fatiadas em tons monocromáticos de acordo com o tipo de solo, mantendo-se o mesmo padrão adotado neste trabalho, em que a argila é representada pela cor vermelha, a areia pela cor amarela e o silte pela cor laranja. Tons mais escuros indicam cotas mais elevadas e tons mais claros indicam cotas menos elevadas.

A partir das cartas de topo e base de camadas pôde-se determinar a espessura das camadas de cada tipo de solo. É possível, ainda, determinar a profundidade média e a cota média de cada

tipo de solo, contudo as mesmas não serão apresentadas nesse trabalho devido ao elevado número de produtos cartográficos gerados.

As camadas de topo e base do saprólito não foram representadas uma vez que, para a região estudada a presença do saprólito é correlacionada com o impenetrável observado ao ensaio SPT. Assim, não se dispõe de dados de sua base, enquanto que a sua superfície de topo é basicamente a mesma apresentada na carta de cota do impenetrável ao SPT.

3.7.4 – CARTA DE VALORES DE NSPT PARA PROFUNDIDADES DE 2 m, 5 m, 7 m E 10 m

Essas cartas podem ser úteis em estudos que envolvam camadas superficiais do terreno, como fundações rasas e execução de garagens subterrâneas, por exemplo. Cartas para profundidades maiores estão relacionada a obras de fundações profundas, como as estacas escavadas e cravadas.

Para sua realização utilizou-se o modelo de N_{SPT} gerado no programa *Rockworks*®, e, em seguida, extraíram-se grades cortadas a 2, 5, 7 e 10 m a partir do modelo numérico de terreno.

As grades foram exportadas para o programa *ArcGis*®, onde foram fatiadas em classes de valores N_{SPT} e associadas a um gradiente de cor variando do azul ao vermelho, passando pelo verde e pelo amarelo, onde o azul indica os menores valores observados para o N_{SPT} e o vermelho indica os maiores valores. A Figura 3.21 ilustra o processamento do modelo de valores N_{SPT}.

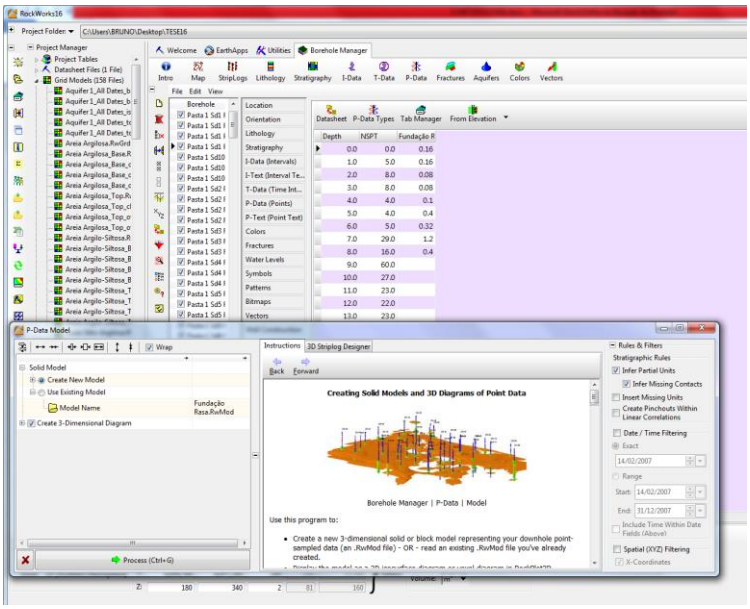


Figura 3.21 – Tela de processamento para obtenção do modelo de N_{SPT} no programa *Rockworks*®.

3.7.5 – CARTA HIPSOMÉTRICA E CURVA HIPSOMÉTRICA

A carta hipsométrica representa a topografia do terreno estudado, foi desenvolvida a partir do modelo numérico do terreno com a ajuda do programa *ArcGis*® por meio de estrutura TIN (*Triangular Irregular Network*) , em seguida transformada em uma grade regular, suavizada, interpolada e classificada.

O terreno analisado apresenta elevação média de 246 m em relação ao nível do mar, entretanto, apresenta cotas que vão desde os 208 m até os 310 m. Para representá-las utilizou-se o gradiente de cores que vão desde o azul até o vermelho, passando pelo verde e o amarelo, sendo o azul atribuído aos menores valores e o vermelho aos valores mais elevados.

A curva hipsométrica, por sua vez, é a relação entre a área acumulada e a altitude a qual ela se limita. Permite avaliar aspectos importantes do relevo, inclusive verificando sua tendência geral a processo erosivo ou sedimentar (ZÃVOIANU, 1985).

A mesma foi traçada utilizando o *Excel*® a partir de dados de topografia extraídos do Modelo Numérico de Terreno.

3.7.6 – CARTA DE DECLIVIDADE

A carta de declividade permite compreender o quão plano ou íngreme é uma determinada área. Mais do que isso, a declividade permite delimitar áreas com características topográficas semelhantes e, quando somadas a outras informações, ajudar na compreensão de fenômenos verificados no local, tais como escorregamentos, processos erosivos, alagamentos, entre outros.

A partir do MNT e utilizando o programa *Spring*® processou-se a declividade, sendo classificada nas seguintes classes: 0 a 2 %, 2 a 5 %, 5 a 10 %, 10 a 15 %, 15 a 25 %, 25 a 50 %, 50 a 100 % e acima de 100 %.

3.7.7 – CARTAS DE CURVATURA PLANA E DE PERFIL

Segundo Hengl e Reuter (2009), o terreno pode ser classificado em formas específicas e de fácil reconhecimento. Essa classificação é importante para entender o processo de criação e amadurecimento do terreno e contribuir para a compreensão e a previsão do comportamento da área em questão.

Assim, no plano pode-se subdividir o terreno em três feições características: plana, convergente e divergente. O perfil, por sua vez, pode ser dividido em: retilíneo, convexo e côncavo.

As cartas de curvatura plana e de perfil foram geradas utilizando o programa *Spring*®, por meio da aplicação de programação utilizando a linguagem "Legal" presente no programa. O código utilizado é apresentado na Figura 3.22.

```
//Calculo da curvatura de Perfil segundo método de Zevenberg e Thorne.
//In "Plinciples of Geographical Information Systems" Burrought & Mcdonnell (1998). Pag. 191.

Numerico alt("CAT_MNT"), cvPr("Curvatura_ZT"), cvPl("Curvatura_ZT"), D("Curvatura_ZT"),
E("Curvatura_ZT"), F("Curvatura_ZT"), G("Curvatura_ZT"), H("Curvatura_ZT");
alt = Recupere (Nome = "CN_1m_PB7x7_3it");
cvPr = Novo (Nome  = "Curv1m_Perfil", ResX=1, ResY=1, Escala=2000, Min=-10, Max=10);
cvPl = Novo (Nome  = "Curv1m_Plana", ResX=1, ResY=1, Escala=2000, Min=-10, Max=10);
D = Novo (Nome="D1m", ResX=1, ResY=1, Escala=2000, Min=-10, Max=10);
E = Novo (Nome="E1m", ResX=1, ResY=1, Escala=2000, Min=-10, Max=10);
F = Novo (Nome="F1m", ResX=1, ResY=1, Escala=2000, Min=-10, Max=10);
G = Novo (Nome="G1m", ResX=1, ResY=1, Escala=2000, Min=-10, Max=10);
H = Novo (Nome="H1m", ResX=1, ResY=1, Escala=2000, Min=-10, Max=10);
Pixel=1;
//
//Calculo das variaveis de apoio > D, E, F, G, H.
D = ((((alt [-1,0] + alt [1,0])/2 - alt [0,0]/Pixel^2);
E = ((((alt [0,1] + alt [0,-1])/2 - alt [0,0]/Pixel^2);
F = (alt [1,1] - alt [-1,1] +alt [-1,-1] - alt [1,-1])/(4*Pixel^2)
G = (alt [1,0] - alt [-1,0])/(2*Pixel);
H = (alt [0,1] - alt [0,-1])/(2*Pixel);
cvPr = (-2*D*G*G+E*H*H+F*G*H))/(G*G+H*H);
cvPl = (-2*D*H*H+E*G*G-F*G*H))/(G*G+H*H);
```

Figura 3.22 – Programa utilizado no processamento das cartas de curvatura plana e de perfil.

3.7.8 – CARTA DE COMPARTIMENTAÇÃO GEOTÉCNICA

A metodologia PUCE é empregada para a compartimentação de unidades geotécnicas e se baseia em um sistema hierárquico, partindo de uma classificação geológica até a caracterização dos componentes do terreno.

Dearman (1991) demonstra a aplicação da metodologia PUCE na definição de unidades geotécnicas a partir de análises morfométricas. Batista *et al*. (2013) aplicam a mesma metodologia no setor Taquari no Distrito Federal com a finalidade de contribuir com planejamento urbano da região.

A compartimentação geotécnica da área de estudo definida para este trabalho se iniciou pela divisão da mesma em províncias, que por sua vez considera características de ordem

geológica. Assim, com base nas informações do CPRM conjuntamente com a análise dos dados de sondagens identificaram-se as províncias existentes.

O Padrão leva em consideração a amplitude de relevo e a densidade de drenagem. A área em questão apresenta uma amplitude de relevo relativamente pequena e pouco variável, restando a densidade de drenagem como fator de diferenciação. Definiram-se três categorias para a densidade de drenagem: baixa, moderada e elevada.

A Unidade considera o tipo de relevo e as principais características do solo, para tanto se definiu áreas com inclinação maior ou menor que 5 % associadas ao tipo de solo: argiloso, siltoso ou arenoso.

A sobreposição de cada nível hierárquico, respeitando os preceitos da metodologia PUCE permitiu a elaboração da compartimentação geotécnica da área de estudo.

4 – RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos durante as campanhas de ensaios de campo e laboratório, bem como aqueles obtidos no processamento dos modelos computacionais e interpretação das seções de resistividade elétrica.

4.1 – ENSAIOS DE CAMPO

Neste item são apresentados os resultados obtidos nos ensaios de sondagem à percussão SPT e resistividade elétrica de campo.

4.1.1 – SONDAGEM À PERCUSSÃO SPT

As sondagens à percussão realizadas nas áreas do Espaço Cultural, SESC e Parque Sussuapara fornecem informações importantes para a interpretação de perfis de resistividade elétrica obtidos para essas áreas. Além disso, as amostras obtidas nessas sondagens permitem a reprodução do comportamento de resistividade elétrica desses materiais em laboratório.

De acordo com a metodologia adotada, as amostras são classificadas pela fração predominante. Assim, a Tabela 4.1 apresenta a síntese dos resultados, para a classificação táctil visual, obtidos em campo nos ensaios de sondagem à percussão. Os laudos completos são apresentados no Apêndice A.1, nas Figuras A.1 a A.6.

Tabela 4.1 – Síntese da classificação táctil visual para as amostras coletadas

Prof.	Espaço Cultural		SESC		Parque Sussuapara	
(m)	SPT01	SPT02	SPT03	SPT04	SPT05	SPT06
1	-	Argila	Argila	Argila	Argila	Argila
2	Argila	Pedregulho	Argila	Argila	Argila	Argila
3	Pedregulho	Silte	Argila	Argila	Argila	Argila
4	Argila	Silte	Argila	Argila	Silte	Argila
5	Argila	Silte	Argila	Silte	Silte	Argila
6	Argila	Silte	Silte	Silte	Silte	Argila
7	Silte	Silte	Silte	Silte	Silte	Argila
8	Silte	Silte	-	Silte	Silte	Argila
9	Silte*	Silte*	-	Silte	Pedregulho	Argila*
10	Silte*	Silte*	-	Silte*		
11				Silte*		
12				Silte*		
13				Silte*		
14				Silte*		

Prof. – profundidade (m), * - saprólito

Os valores de N_{SPT} referentes ao segundo e terceiro trechos de penetração do amostrador é apresentado na Figura 4.1, os laudos completos são apresentados no Apêndice A.1, nas Figuras A.1 a A.6.

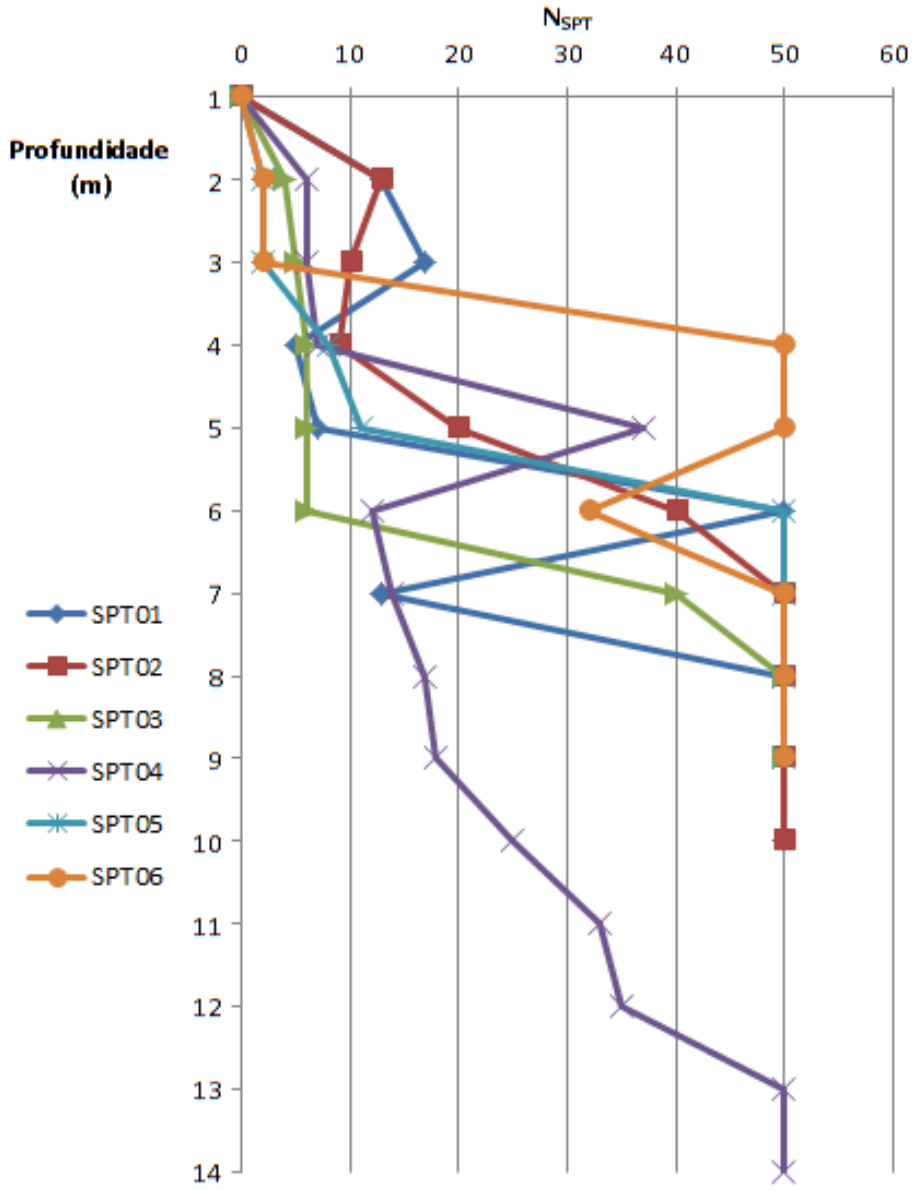


Figura 4.1 – Valores de N_{SPT} obtidos nos ensaios de sondagem à percussão.

No que tange aos resultados obtidos nas sondagens destaca-se o fato de que a maioria dos laudos obtidos aponta a camada impenetrável até os 12 m de profundidade, ou seja, dentro do alcance de 13 m do equipamento de resistividade elétrica empregado.

A classificação táctil visual observada nos boletins de sondagem revela uma presença não predominante, mas ainda sim significativa de material argiloso. Santos (2000), contudo, não

encontrou, nos ensaios de granulometria que realizou na área de estudo, percentuais significativos de argila nas amostras.

A avaliação dos boletins de sondagem também revelou a presença eventual de camadas isoladas de pedregulhos em profundidades variadas, não aparecendo em alguns pontos investigados. Nessas camadas o valor do N_{SPT} se eleva e volta a diminuir quando a camada pedregulhosa é ultrapassada.

É comum a utilização de proteção do furo de sondagem contra o desmoronamento de solo, isso se deve à presença de camadas pouco coesivas e, portanto, suscetíveis ao colapso e ao uso sistemático de lavagem para a ultrapassagem das camadas pedregulhosas encontradas entre 3 e 7 m de profundidade.

4.1.2 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA – ÉPOCA DO ANO E TIPO DE ARRANJO

Sabendo-se da influência da umidade do solo nos resultados de resistividade elétrica realizaram-se ensaios no início da estação chuvosa e ao final da mesma, visando qualificar a influência da chuva no aspecto final das seções de resistividade elétricas. A chuva mensal acumulada para os meses em que ocorreram ensaios de campo é apresentada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Chuva acumulada mensal para os meses em que ocorreram ensaios de campo (INMET, 2017).

Ano	Mês	Chuva acumulada mensal (mm)
2015	Outubro	135
	Novembro	100
	Dezembro	150
2016	Fevereiro	10
	Março	190
	Abril	90
2017	Janeiro	420
	Fevereiro	290
	Março	210

A Figura 4.2 apresenta a seção de campo obtida para o SESC no início do período chuvoso e a Figura 4.3 apresenta a seção de campo obtida nessa mesma localidade para o final do período chuvoso.

De maneira geral, pode-se observar que existe um contraste maior, dentro da mesma seção, nos períodos mais úmidos, ou seja, no final do período chuvoso. Contudo, o aspecto geral das seções é semelhante àquelas obtidos no período de menor umidade, ou seja, no início do período chuvoso.

As seções calculadas a partir da diferença entre a resistividade elétrica observada entre o início e o fim do período chuvoso se encontram no Apêndice A.2. De modo geral, os solos arenosos apresentam uma maior diferença entre as resistividades observadas no início e no final do período chuvoso.

Outro fator importante na obtenção das seções de resistividade elétrica é o tipo de arranjo empregado, a Figura 4.4 apresenta uma seção obtida com o arranjo dipolo-dipolo, a Figura 4.5 apresenta uma seção obtida com o arranjo polo-dipolo. A totalidade das seções obtidas para os períodos de início e fim de período chuvoso estão no Apêndice A.2, nas Figuras A.7 a A.21.

No que se refere ao arranjo empregado, as seções com arranjo dipolo-dipolo apresentam resultados mais interessantes para a pesquisa, demonstrando melhores contrastes na escala adotada (100 Ω.m a 63.000 Ω.m) que aqueles verificados com o arranjo polo-dipolo.

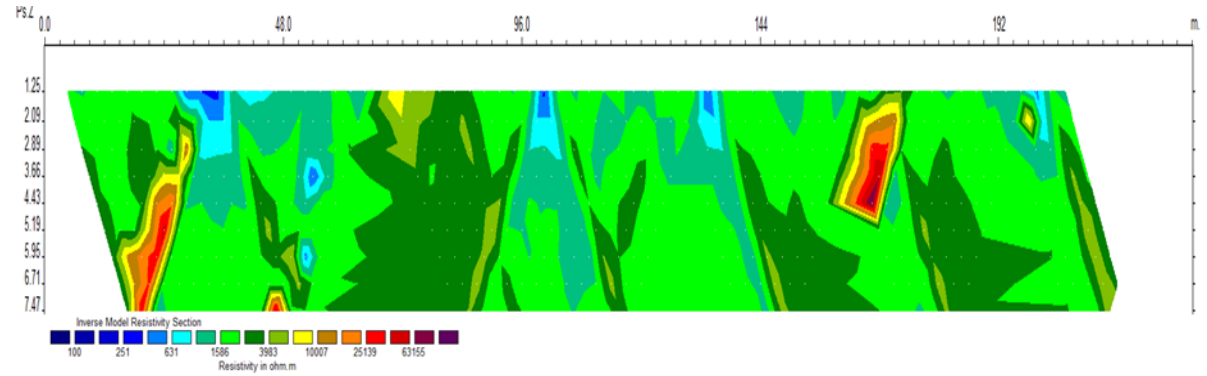


Figura 4.2 – Seção de resistividade elétrica obtida para o SESC no início do período chuvoso (Novembro, 2015).

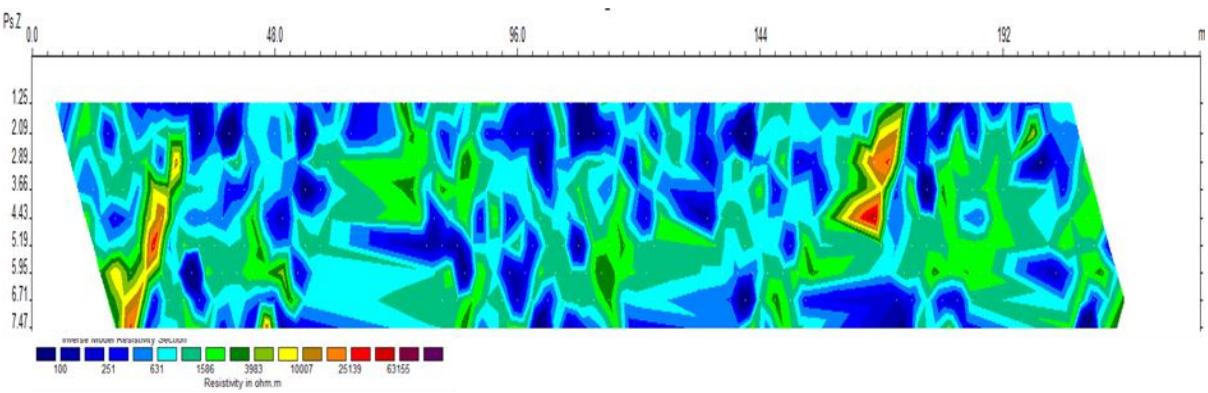


Figura 4.3 – Seção de resistividade elétrica obtida para o SESC no final do período chuvoso (Março, 2016).

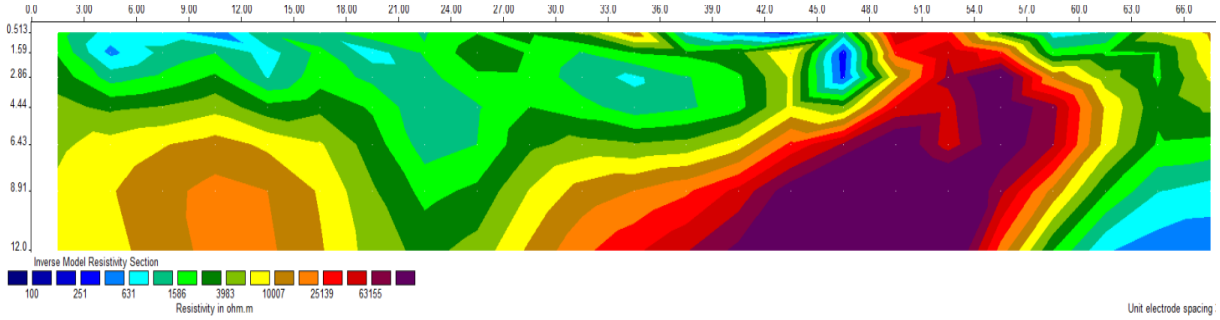


Figura 4.4 – Seção de resistividade elétrica obtida para a linha Central com o método dipolo-dipolo (Fevereiro, 2017).

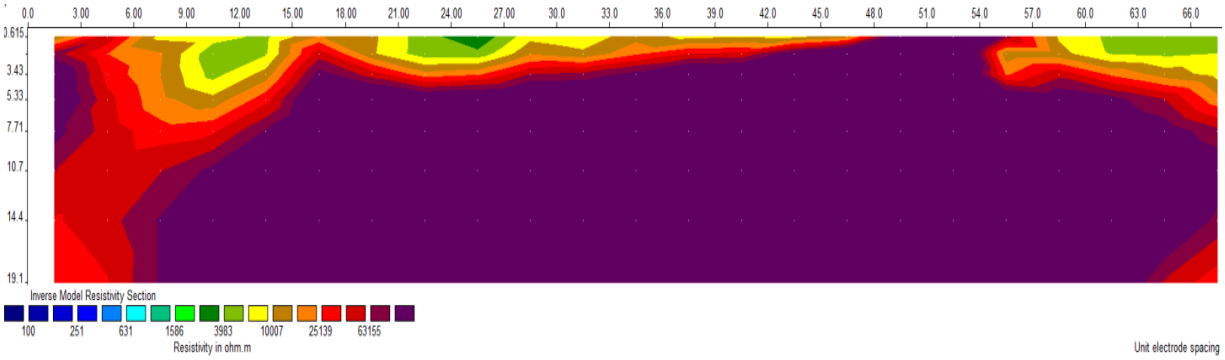


Figura 4.5 – Seção de resistividade elétrica obtida para a linha Central com o método polo-dipolo (Fevereiro, 2017).

4.1.3 RESISTIVIDADE ELÉTRICA – ÁREAS CHAVE

Traçaram-se seções de resistividade elétrica para as áreas do Espaço Cultural, SESC e Parque Sussuapara. Essas áreas, como já mencionado, são de interesse econômico para a cidade e, por se tratar de um estudo localizado, foi utilizado para relacionar características geoelétricas com a descrição geotécnica apresentada nos boletins de sondagem.

As Figuras 4.6 (a) e 4.6 (b) apresentam, respectivamente, as seções de resistividade elétrica obtidas para a área do Espaço Cultural, no início do período chuvoso, para os Trechos 07 e 01 e as correspondentes sondagens SPT realizadas.

As seções apresentam a topografia extraída do Modelo Numérico de Terreno associada com as cotas da subsuperfície apresentada. Determinou-se a posição dos eletrodos com a ajuda de sistema GPS.

As sondagens permitem retirar amostras de cada camada e avaliá-las individualmente em vários ensaios, obtendo assim a relação de suas características geotécnicas com suas propriedades geoelétricas.

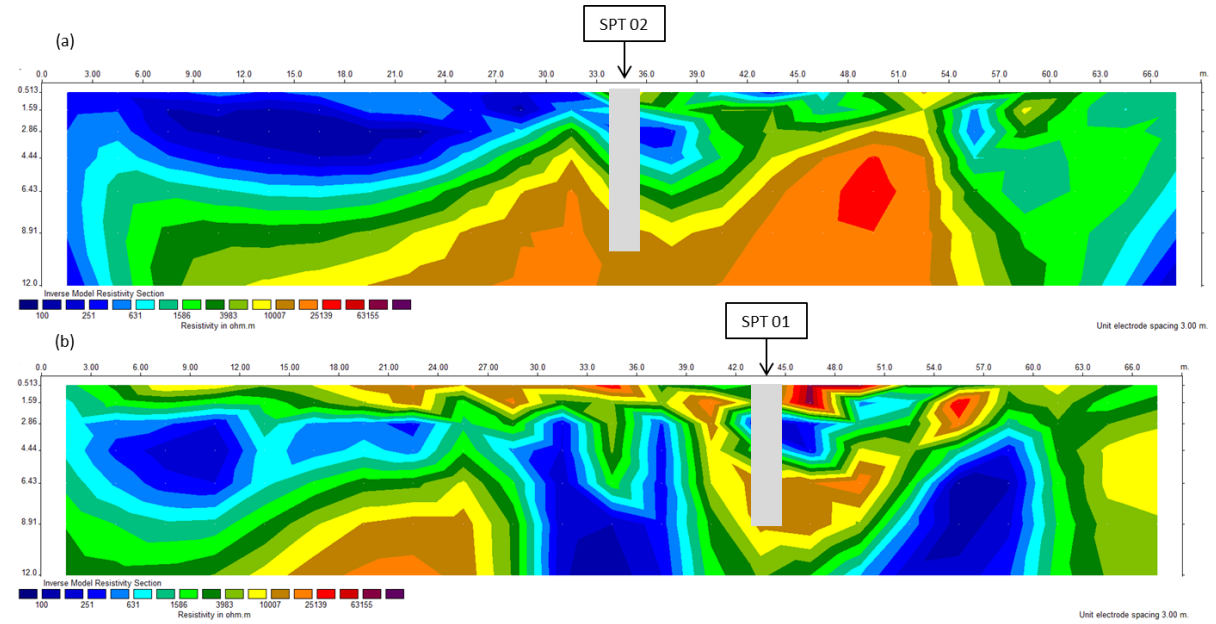


Figura 4.6 (a) e 4.6 (b) - Seções de resistividade elétrica para a região do Espaço Cultural, Trecho 07 (a) e Trecho 01(b).

As Figuras 4.7 (a) e 4.7 (b) apresentam, respectivamente, as seções de resistividade elétrica obtidos para a área do SESC, no início do período chuvoso, para os Trechos 03 e 00 e as correspondentes sondagens SPT realizadas.

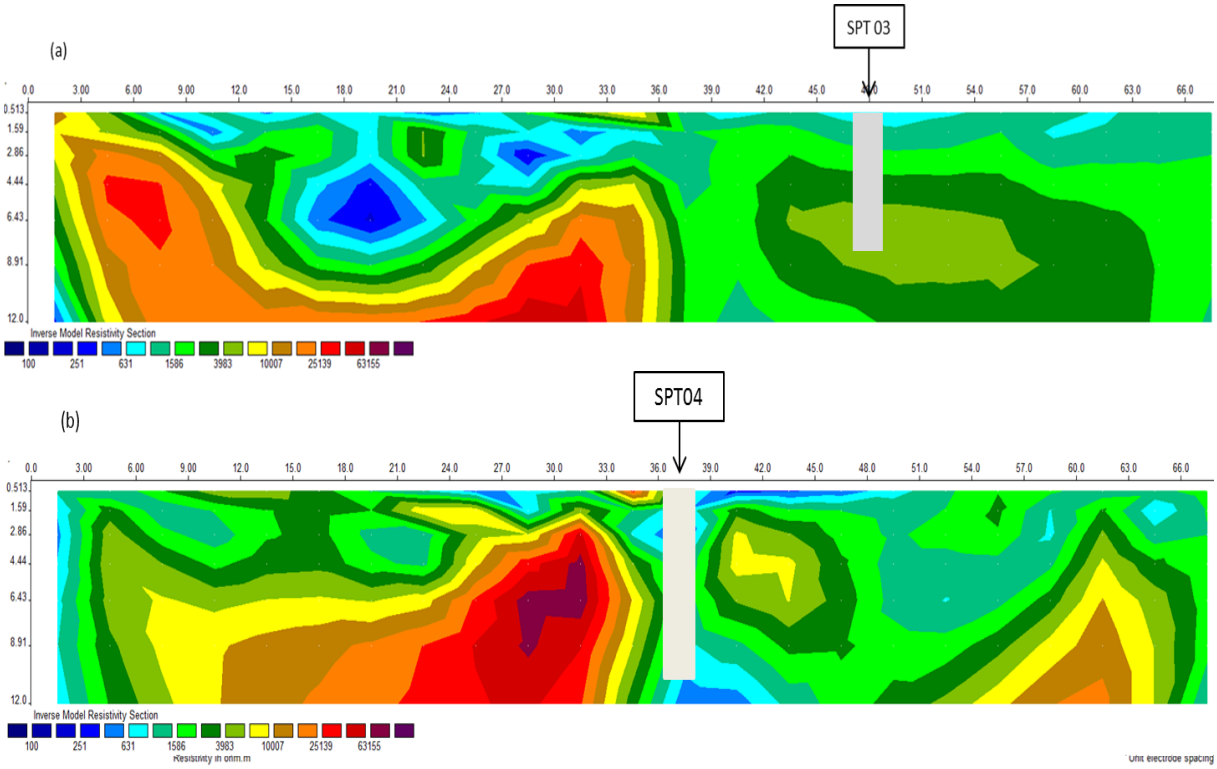


Figura 4.7 - Seção de resistividade aparente para a região do SESC, Trecho 03 (a) e Trecho 00 (b).

As Figuras 4.8 (a) e 4.8 (b) apresentam, respectivamente, as seções de resistividade elétrica obtidas para a área do Parque Sussuapara, no início do período chuvoso para os Trechos 01 e 04 e as correspondentes sondagens SPT realizadas.

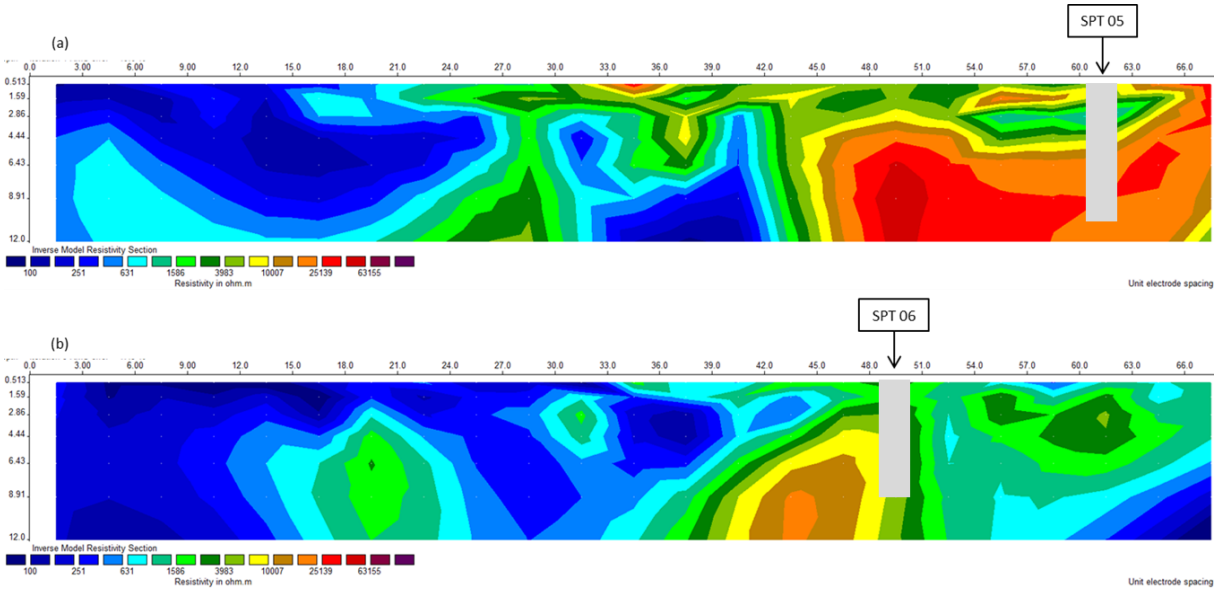


Figura 4.8 - Seção de resistividade aparente para a região do Parque Sussuapara, Trecho 01 (a) e Trecho 04 (b).

4.1.4 SEÇÕES DE RESISTIVIDADE ELÉTRICAS PARA AS LINHAS CENTRAL, NORTE E SUL

Definindo-se a relação entre o comportamento geoelétrico dos principais solos e a sua descrição geotécnica nos laudos de sondagem e, sendo considerada a influência do período climático, realizaram-se as investigações nas linhas Central, Norte e Sul, durante os meses de janeiro, fevereiro e março de 2017. Esses são estudos em uma área maior, com o objetivo de colaborar com os modelos geotécnicos oriundos do banco de dados de sondagens à percussão.

As Figuras 4.9, 4.10 e 4.11 apresentam, respectivamente, uma seção de resistividade elétrica obtidas para as linhas Central, Norte e Sul. As seções foram obtidas no final do período chuvoso. A totalidade dos perfis é encontrada no Apêndice A.3 nas Figuras A.22 a A.78.

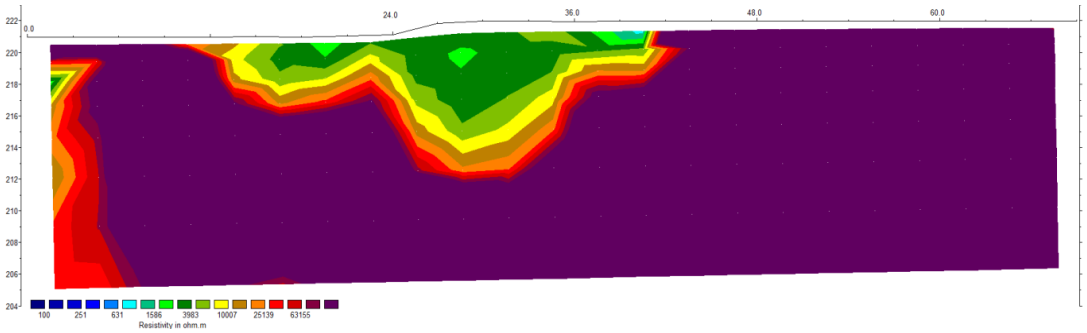


Figura 4.9 – Seção de resistividade elétrica obtido na linha Central.

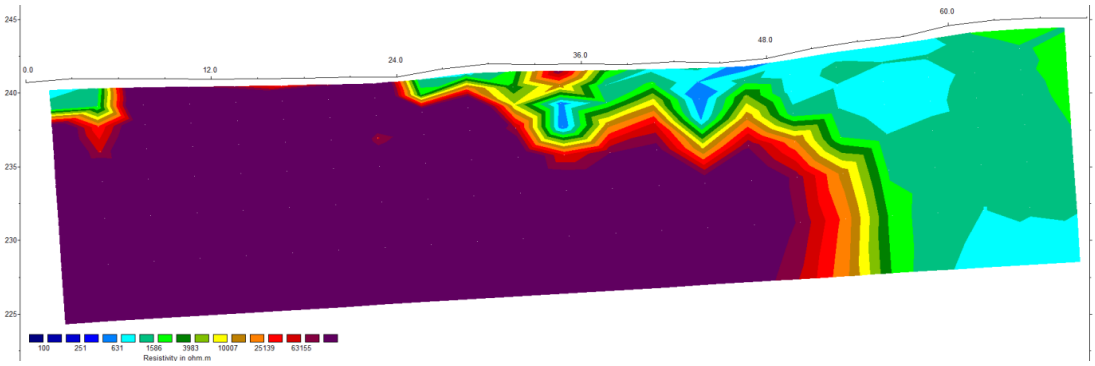


Figura 4.10 – Seção de resistividade elétrica obtido na linha Norte.

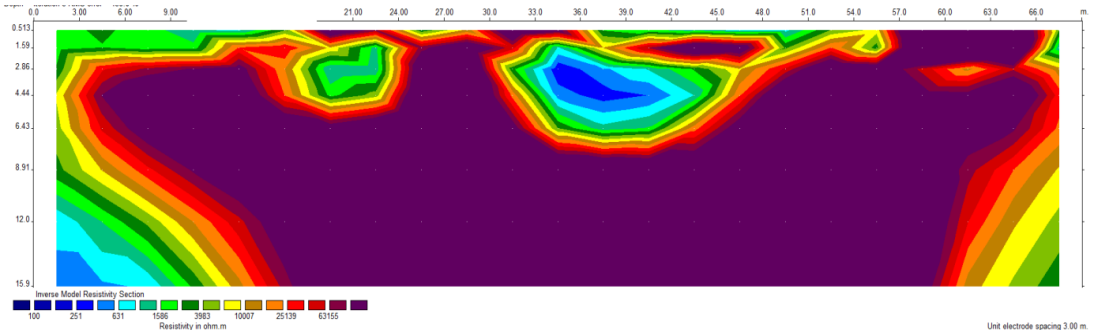


Figura 4.11 – Seção de resistividade elétrica obtido na linha Sul.

4.2 – ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Neste item são apresentados os resultados obtidos para os ensaios realizados no Laboratório de Mecânica dos Solos da UFT, no laboratório de difratometria por raios-X do IG da UnB, além dos ensaios de resistividade elétrica em ambiente de laboratório.

4.2.1 – CARACTERIZAÇÃO TÁCTIL VISUAL

Encaminharam-se as amostras obtidas nas sondagens à percussão ao laboratório para ensaios de caracterização táctil visual, obtenção de parâmetros para moldagem de corpos de prova, resistividade elétrica e difração de raios-X.

As Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 apresentam a classificação das amostras de acordo com os resultados de caracterização táctil visual para as amostras obtidas nas sondagens SPT 01 e 02, SPT 03 e 04 e SPT 05 e 06, respectivamente.

Os resultados obtidos para os procedimentos de laboratório, necessários para se chegar à classificação das amostras, são apresentados no Apêndice B.1, nas Tabelas B.1 a B.6. Ressalta-se que os resultados obtidos são significativamente distintos daqueles apresentados

pela empresa que realizou as sondagens, isso porque a mesma não segue com rigor os procedimentos descritos na NBR 7250 (ABNT, 1982).

Tabela 4.3 – Classificação das amostras obtidas nas sondagens SPT01 e 02

Prof.	SPT 01	SPT 02
1	Silte arenoso com pedregulho roxo medianamente compacto	Argila arenosa com pedregulho marrom claro rija
2	Argila arenosa com pedregulho marrom rija	Silte pouco argiloso roxo claro rijo
3	Argila arenosa com pedregulho marrom rija	Sem amostra
4	Silte arenoso amarelo pouco compacto	Silte pouco argiloso roxo claro médio
5	Argila arenosa amarela média	Silte pouco argiloso roxo claro duro
6	Pedregulho siltoso muito compacto roxo	Silte pouco argiloso roxo claro duro
7	Silte argiloso com pedregulho marrom claro muito compacto	Silte pouco argiloso roxo claro duro
8	Argila arenosa com pedregulho marrom rija	Silte arenoso com pedregulho muito compacto amarelo escuro
9	Silte pouco arenoso amarelo muito compacto	Silte pouco arenoso com pedregulho amarelo muito compacto
10	-	Areia siltosa marrom muito compacta
11	-	Silte pouco arenoso muito compacto roxo

Prof. – profundidade (m)

Tabela 4.4 – Classificação das amostras obtidas nas sondagens SPT 03 e 04

Prof.	SPT 03	SPT 04
1	Argila arenosa com pedregulho vermelha mole	Argila arenosa com pedregulho vermelha média
2	Argila arenosa com pedregulho vermelha mole	Argila arenosa com pedregulho vermelha média
3	Argila arenosa com pedregulho vermelha mole	Argila arenosa com pedregulho vermelha média
4	Argila arenosa com pedregulho vermelha média	Argila arenosa com pedregulho vermelha média
5	Argila arenosa com pedregulho vermelha média	Argila siltosa com pedregulho dura vermelho claro
6	Argila arenosa com pedregulho vermelha média	Silte pouco arenoso medianamente compacto roxo claro
7	Argila arenosa com pedregulho vermelha dura	Silte pouco arenoso medianamente compacto roxo claro
8	Argila arenosa com pedregulho vermelha dura	Silte pouco arenoso medianamente compacto roxo claro
9	Pedregulho muito compacto vermelho	Silte pouco arenoso medianamente compacto amarelo
10	-	Silte pouco arenoso compacto roxo claro
11	-	Silte pouco arenoso compacto amarelo claro

Prof. – profundidade (m)

Tabela 4.5 – Classificação das amostras obtidas nas sondagens SPT 05 e 06

Prof.	SPT 05	SPT 06
1	Areia pouco argilosa pouco compacta preta	Areia pouco argilosa pouco compacta preta
2	Silte arenoso pouco compacto amarelo	Pedregulho arenoso pouco compacto marrom claro
3	Silte arenoso pouco compacto amarelo	Pedregulho arenoso pouco compacto marrom claro
4	Pedregulho arenoso pouco compacto marrom claro	Pedregulho arenoso compacto marrom claro
5	Pedregulho arenoso compacto marrom claro	Pedregulho arenoso compacto marrom claro
6	Pedregulho arenoso compacto marrom claro	Pedregulho arenoso compacto marrom claro
7	Pedregulho siltoso compacto amarelo	Pedregulho arenoso compacto marrom
8	Silte arenoso compacto amarelo	Pedregulho arenoso compacto marrom claro
9	Pedregulho siltoso compacto amarelo	Silte arenoso compacto amarelo
10	Silte compacto roxo	-
11	Silte compacto roxo	-

Prof. – profundidade (m)

4.2.2 – ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO FÍSICA

As análises granulométricas dos materiais são fundamentais na determinação do comportamento esperado dos mesmos, notadamente no que se referem às respostas obtidas nos ensaios de resistividade elétrica. A Tabela 4.6 apresenta a média dos resultados obtidos nos ensaios de granulometria para os solos classificados pela análise táctil visual como argila, silte e areia. Apesar do termo saprólito não remeter-se a um tipo de solo, mas a uma origem, o mesmo se encontra associado aos demais por ser um material com características distintas e relevantes para a pesquisa.

Tabela 4.6 – Média e desvio padrão dos resultados dos ensaios de granulometria para os solos classificados como argila, silte areia e saprólito na análise táctil visual.

Fração (mm)	Classificação obtida na análise táctil visual			
	Argila	Silte	Areia	Saprólito
4,75 < Pedregulho < 60	8,9% (2,7)*	0,07 % (0,01)*	12,6 % (1,8)*	16,3 % (3,7)*
2,0 < Areia grossa < 4,75	5,6 % (1,9)*	0,9 % (1,0)*	2,2 % (0,7)*	10,9 % (1,8)*
0,425 < Areia média < 2,0	5,9 % (4.7)*	10,5 % (1,6)*	19,0 % (3,2)*	1,2 % (0,5)*
0,075 < Areia fina < 0,425	45,4 % (7,2)*	50,5 % (9,5)*	54,2 % (7,4)*	3,8 % (1,3)*

0,005 < Silte < 0,075	16,5 % (3,8)*	28,0 % (4,0)*	10,4 % (1,9)*	44,6 % (5,0)*
Argila < 0,005	17,7 % (3,3)*	10,1 % (1,4)*	1,6 % (0,5)*	23,2 % (4,6)*

* desvio padrão

Os limites de consistência obtidos para cada tipo de solo são apresentados na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 – Valores de limites de consistência dos solos estudados.

Tipo de Solo	W_L (%)	W_P (%)	IP (%)
Argila	34,3	27,1	7,2
Silte	25,4	18,6	6,8
Areia	-	-	NP
Saprólito*	-	-	NP

NP – não plástico; *O material se apresenta como predominantemente arenoso sem o uso de defloculante, por isso o resultado "NP" típico de materiais granulares

A análise granulométrica mostra que os solos classificados como argilosos na caracterização táctil visual possuem em média 57% de areia sendo 45 % areia fina e que, apesar do baixo percentual de argila, se comporta como tal em termos de resistência a seco e apresenta limites de consistência semelhantes aos observados em latossolos de outras localidades do Brasil Central.

Para os solos classificados como siltosos na caracterização táctil visual ocorre algo semelhante, sendo compostos majoritariamente por areia fina, porém, apresenta comportamento correspondente a um silte, com limites de consistência baixos. Já a areia e o saprólito, apresentam concordância entre a granulometria e a análise táctil visual, sendo classificados como materiais não plásticos.

A moldagem dos corpos de prova para ensaios de resistividade elétrica em laboratório, simulando o peso específico de campo e controlando o grau de saturação, requer a determinação das umidades seca ao ar ($W_{ar\ (\%)}$), peso específico aparente seco ($\gamma_{d\ kN/m^3}$), índice de vazios (e) e massa específica dos sólidos (ρ_s).

As Tabelas 4.8 a 4.13 apresentam os resultados dos ensaios de umidade natural, peso específico aparente seco e índice de vazios obtidos para as sondagens SPT01 a SPT06. Os

resultados completos dos ensaios de caracterização são encontrados no Apêndice B.1, nas Figuras B.1 a B.6.

Devido ao processo de avanço do SPT ser por lavagem as amostras apresentam umidade natural bastante elevada, devendo ser consideradas apenas para fins de controle e não representa o estado natural do material. Algumas amostras de solo seco ao ar podem apresentar valores de umidade elevados devido ao índice de umidade do ar no período em que foi ensaiada, já que o laboratório não dispõe de climatização.

Tabela 4.8 – Resultados obtidos para a umidade, peso específico, índice de vazios, saturação e porosidade para a sondagem SPT01

Prof. (m)	w_{ar} (%)	w_{nat} (%)	γ_n (kN/m³)	γd (kN/m³)	e	PES (kN/m³)	SR (%)	n (%)
1	3.91	18.04	18.61	15.77	0.78	28.00	65.09	43.69
2	3.12	11.23	20.08	18.05	0.51	27.30	59.85	33.87
3	2.09	13.09	22.85	20.21	0.38	27.80	96.81	27.32
4	2.72	21.21	20.80	17.16	0.65	28.40	91.97	39.58
5	2.37	25.28	20.01	15.97	0.77	28.30	92.69	43.56
6	4.77	25.27	19.04	15.20	0.83	27.80	84.74	45.33
7	1.75	17.56	22.53	19.16	0.52	29.10	98.57	34.14
8	3.41	20.01	21.23	17.69	0.60	28.30	94.42	37.49
9	0.35	21.90	18.85	15.46	0.88	29.10	72.27	46.86

W_{ar} – umidade seco ao ar; W_{nat} – umidade natural; γ_n – peso específico aparente; γ_d – peso específico seco; e – índice de vazios; PES – peso específico dos sólidos; SR – grau de saturação; n - porosidade

Tabela 4.9 – Resultados obtidos para a umidade, peso específico, índice de vazios, saturação e porosidade para a sondagem SPT02

Prof. (m)	w_{ar} (%)	w_{nat} (%)	γ_n (kN/m³)	γd (kN/m³)	e	PES (kN/m³)	SR (%)	n (%)
1	1.38	23.76	19.24	15.55	0.79	27.80	83.80	44.08
2	0.58	24.81	19.78	15.85	0.77	28.10	90.18	43.60
3	-	-	-	-	-	-	-	-
4	0.70	19.18	20.68	17.35	0.63	28.30	86.03	38.69
5	2.21	19.74	20.49	17.11	0.64	28.00	86.87	38.89
6	0.95	22.76	20.50	16.70	0.66	27.80	95.18	39.93
7	0.85	21.43	20.55	16.92	0.61	27.20	95.99	37.78
8	1.00	22.78	20.50	16.70	0.64	27.30	97.93	38.84
9	1.55	21.66	20.50	16.85	0.63	27.50	94.24	38.73
10	1.31	12.39	20.51	18.25	0.52	27.80	65.81	34.36
11	1.10	21.27	20.73	17.09	0.62	27.70	94.96	38.29

W_{ar} – umidade seco ao ar; W_{nat} – umidade natural; γ_n – peso específico aparente; γ_d – peso específico seco; e – índice de vazios; PES – peso específico dos sólidos; SR – grau de saturação; n - porosidade

Tabela 4.10 – Resultados obtidos para a umidade, peso específico, índice de vazios, saturação e porosidade para a sondagem SPT03

Prof. (m)	w_{ar} (%)	w_{nat} (%)	γ_n (kN/m³)	γd (kN/m³)	e	PES (kN/m³)	SR (%)	n (%)
1	2.33	27.20	17.62	13.85	1.02	28.00	74.57	50.53
2	1.84	22.13	19.72	16.15	0.76	28.40	82.82	43.15
3	1.29	19.76	19.99	16.69	0.68	28.00	81.67	40.39
4	3.31	24.34	19.33	15.55	0.81	28.20	84.33	44.87
5	1.53	25.05	18.85	15.07	0.86	28.00	81.80	46.16
6	2.19	25.83	18.43	14.65	0.92	28.10	79.02	47.88
7	2.14	25.44	18.89	15.06	0.86	28.00	82.89	46.22
8	9.09	31.46	18.90	14.38	0.94	27.90	93.32	48.47
9	8.43	31.95	18.90	14.32	0.95	28.00	93.69	48.84

W_{ar} – umidade seco ao ar; W_{nat} – umidade natural; γ_n – peso específico aparente; γ_d – peso específico seco; e – índice de vazios; PES – peso específico dos sólidos; SR – grau de saturação; n - porosidade

Tabela 4.11 – Resultados obtidos para a umidade, peso específico, índice de vazios, saturação e porosidade para a sondagem SPT04

Prof. (m)	w_{ar} (%)	w_{nat} (%)	γ_n (kN/m³)	γd (kN/m³)	e	PES (kN/m³)	SR (%)	n (%)
1	2.78	17.92	20.90	17.72	0.60	28.40	84.49	37.59
2	2.65	18.10	20.57	17.42	0.66	29.00	78.93	39.94
3	2.47	17.27	19.15	16.33	0.78	29.00	64.55	43.69
4	2.06	20.95	19.94	16.49	0.69	27.90	84.43	40.91
5	1.69	28.96	16.85	13.07	1.17	28.30	70.29	53.83
6	1.04	21.72	18.50	15.20	0.87	28.40	71.02	46.48
7	0.99	24.66	18.75	15.04	0.83	27.50	81.87	45.31
8	1.27	20.04	18.75	15.62	0.73	27.10	73.89	42.36
9	1.19	28.12	19.33	15.09	0.84	27.70	93.18	45.53
10	0.70	24.08	19.75	15.92	0.76	28.00	88.82	43.15
11	0.87	20.43	20.30	16.86	0.66	28.00	86.53	39.80

W_{ar} – umidade seco ao ar; W_{nat} – umidade natural; γ_n – peso específico aparente; γ_d – peso específico seco; e – índice de vazios; PES – peso específico dos sólidos; SR – grau de saturação; n - porosidade

Tabela 4.12 – Resultados obtidos para a umidade, peso específico, índice de vazios, saturação e porosidade para a sondagem SPT05

Prof. (m)	w_{ar} (%)	w_{nat} (%)	γ_n (kN/m³)	γd (kN/m³)	e	PES (kN/m³)	SR (%)	n (%)
1	4.28	21.33	-	16.50	0.67	27.50	87.99	40.00
2	4.43	23.63	-	16.50	0.65	27.20	99.11	39.34
3	2.98	22.08	-	16.50	0.64	27.00	93.68	38.89
4	0.77	15.17	-	17.50	0.54	26.90	75.97	34.94
5	3.07	18.52	-	17.50	0.63	28.50	83.97	38.60
6	4.02	16.36	-	17.50	0.55	27.20	80.28	35.66
7	0.73	10.52	-	17.50	0.56	27.30	51.29	35.90
8	0.99	10.10	19.68	17.88	0.32	28.00	87.83	24.36

9	0.60	13.65	20.52	18.06	0.47	26.50	77.34	31.87
10	0.96	24.43	19.84	15.94	0.69	27.00	95.13	40.95
11	1.09	23.18	20.30	16.37	0.63	26.70	99.80	38.28

W_{ar} – umidade seco ao ar; W_{nat} – umidade natural; γ_n – peso específico aparente; γ_d – peso específico seco; e – índice de vazios; PES – peso específico dos sólidos; SR – grau de saturação; n - porosidade

Tabela 4.13 – Resultados obtidos para a umidade, peso específico, índice de vazios, saturação e porosidade para a sondagem SPT06

Prof. (m)	w_{ar} (%)	w_{nat} (%)	γ_n (kN/m³)	γd (kN/m³)	e	PES (kN/m³)	SR (%)	n (%)
1	2.70	17.59	18.12	15.41	0.78	27.50	61.65	43.97
2	2.95	17.31	-	16.50	0.59	26.30	76.65	37.26
3	3.69	18.97	-	16.50	0.62	26.80	81.44	38.43
4	1.77	12.89	-	17.50	0.54	26.90	64.55	34.94
5	0.99	13.28	-	17.50	0.58	27.60	63.51	36.59
6	1.52	21.87	-	16.50	0.66	27.40	90.71	39.78
7	1.19	13.94	-	16.50	0.64	27.10	58.80	39.11
8	0.84	12.76	-	17.50	0.57	27.50	61.41	36.36
9	1.53	7.34	20.22	18.84	0.48	27.80	42.89	32.24
10	-	-	-	-	-	-	-	-
11	0.87	20.43	20.30	16.86	0.63	27.40	89.49	38.48

W_{ar} – umidade seco ao ar; W_{nat} – umidade natural; γ_n – peso específico aparente; γ_d – peso específico seco; e – índice de vazios; PES – peso específico dos sólidos; SR – grau de saturação; n - porosidade

Em caso de ausência de amostra indeformada, para as quais não se tem o peso específico natural, estimaram-se valores de peso específico com base na descrição táctil visual das amostras, possibilitando a continuidade dos ensaios.

4.2.3 – ANÁLISES DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

A composição mineralógica do solo auxilia na compreensão de seu comportamento, desse modo, as análises de difração de raios-X permitem determinar a ocorrência dos argilominerais presentes nas amostras e, com alguma acurácia, seu percentual de ocorrência.

A Tabela 4.14 apresenta o percentual dos principais argilominerais identificados nas amostras analisadas. Os laudos completos são encontrados no Apêndice B.2, nas Figuras B.7 a B.17.

Pode-se observar que os principais argilominerais encontrados são a caulinita, ilita, gibbsita, goethita e o mineral quartzo. A variação dos percentuais de cada argilomineral ao longo dos pontos amostrados e da profundidade, bem como sua implicação na compreensão da área de estudo, é abordada no Capítulo 5 - Análise de Resultados.

Tabela 4.14 – Percentual de argilominerais encontrados nas análises de difração de raios-X

Amostra	Fração	Caulinita (%)	Ilita (%)	Gibbsita (%)	Goethita (%)	Quartzo (%)
SPT01	Total	42	5	8	12	33
5m	Argila	80	11	3	4	2
SPT02	Total	45	13	7	14	22
1m	Argila	85	7	3	5	1
SPT02	Total	53	17	0	8	22
4m	Argila	91	6	0	1	2
SPT02	Total	42	26	2	6	24
11m	Argila	91	7	0	1	1
SPT03	Total	59	1	13	18	9
5m	Argila	84	1	6	6	2
SPT03	Total	60	0	4	24	12
6m	Argila	94	0	3	3	0
SPT04	Total	17	0	55	13	15
1m	Argila	39	0	53	8	0
SPT04	Total	62	5	2	21	10
5m	Argila	89	7	2	3	0
SPT04	Total	54	23	0	9	15
7m	Argila	90	10	0	0	0
SPT05	Total	23	1	29	15	32
1m	Argila	65	0	21	14	0
SPT06	Total	22	2	26	15	35
2m	Argila	60	1	26	13	0

4.2.4 – RESISTIVIDADE ELÉTRICA EM LABORATÓRIO

Com os dados necessários para se calcular a massa de solo e água para formar um corpo de prova de 50 mm de diâmetro e 50 mm de altura e reproduzir a densidade de campo, variando-se o grau de saturação entre 65 %, 75 % e 85 % conforme descrito na metodologia, fez-se a dosagem e posterior compactação semi-estática dos mesmos.

A Figura 4.12 apresenta a relação entre a máxima força aplicada na compactação semi-estática e o grau de saturação das amostras argilosas. Os histogramas que apresentam a frequência dos máximos valores atingidos na compactação para cada tipo de solo são apresentados no Apêndice B.3, na Figura B.18 a B.21.

Pode-se observar que o menor grau de saturação provoca um maior atrito entre as partículas, requerendo maior energia para se chegar ao mesmo volume do que na condição de maior

saturação, onde a água atua lubrificando as partículas reduzindo a energia necessária para se chegar ao mesmo peso específico seco.

Com os corpos de prova nas condições predeterminadas puderam-se realizar os ensaios de resistividade elétrica de laboratório, conforme descrito no Capítulo 3. Assim, obtiveram-se valores de resistividade elétrica para cada tipo de solo e grau de saturação (65 %, 75 % e 85 %).

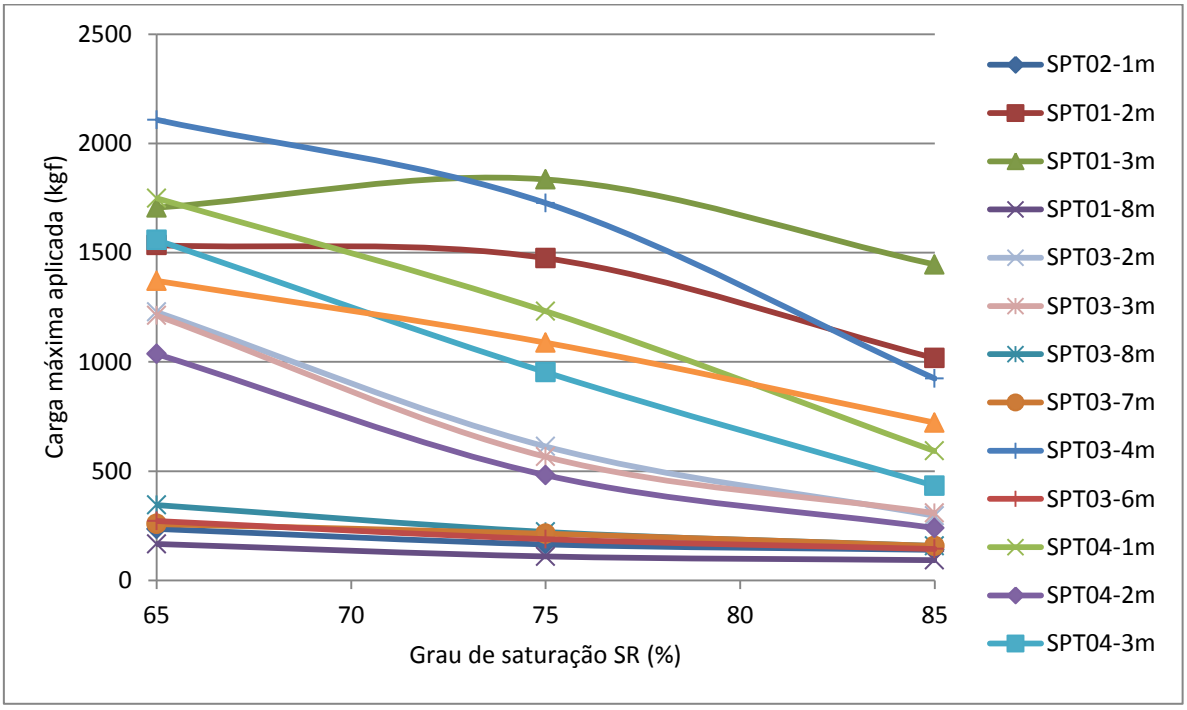


Figura 4.12 – Relação entre o grau de saturação e a máxima força aplicada para as amostras argilosas.

Ao se agrupar os dados por tipo de solo construíram-se seus histogramas e curvas de distribuição normal, podendo-se, assim, analisar o comportamento estatístico dos dados obtidos para as cerca de 180 amostras obtidas.

A Figura 4.13 apresenta o histograma e a curva de distribuição normal para os dados de resistividade elétrica obtidos para os solos argilosos nas condições de grau de saturação em 65 %, 75 % e 85 %, na qual é possível se observar uma moda próxima a 1.000 Ω.m, com um histograma pouco assimétrico e valores de até 6.000 Ω.m.

A Figura 4.14 apresenta o histograma e a curva de distribuição normal para os dados de resistividade elétrica obtidos para os solos siltosos nas condições de grau de saturação em 65 %, 75 % e 85 %, na qual é possível se observar uma moda próxima a 1.500 Ω.m, com um histograma relativamente simétrico e valores de até 4.000 Ω.m.

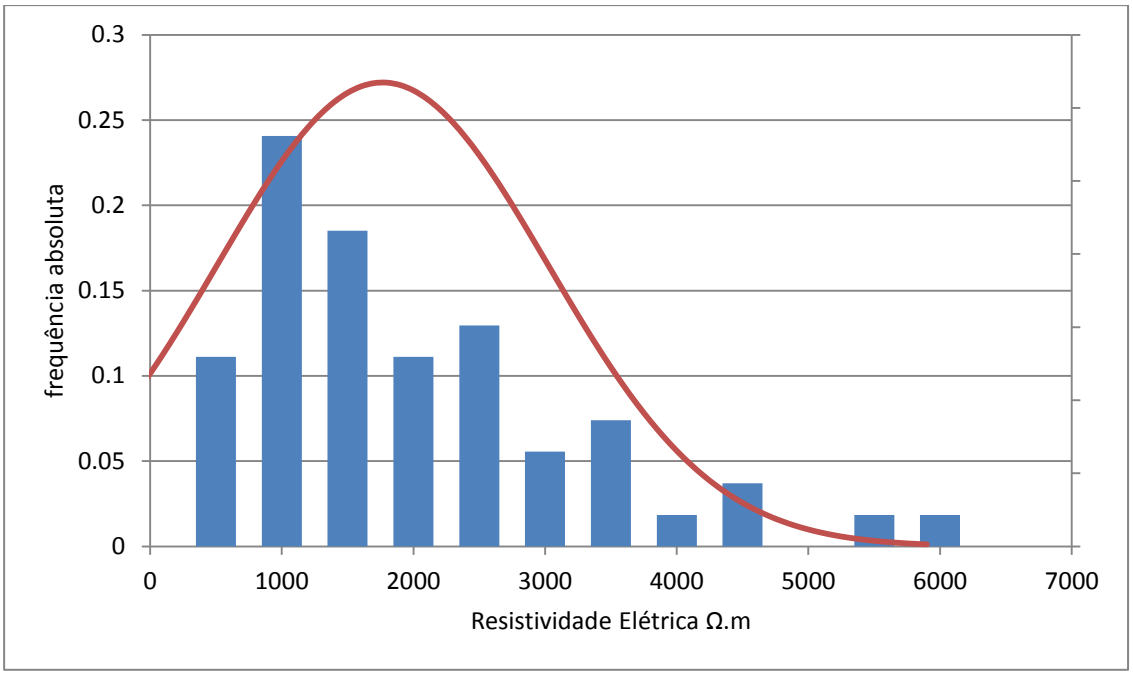


Figura 4.13 – Histograma e curva de distribuição normal para as amostras argilosas ensaiadas em laboratório.

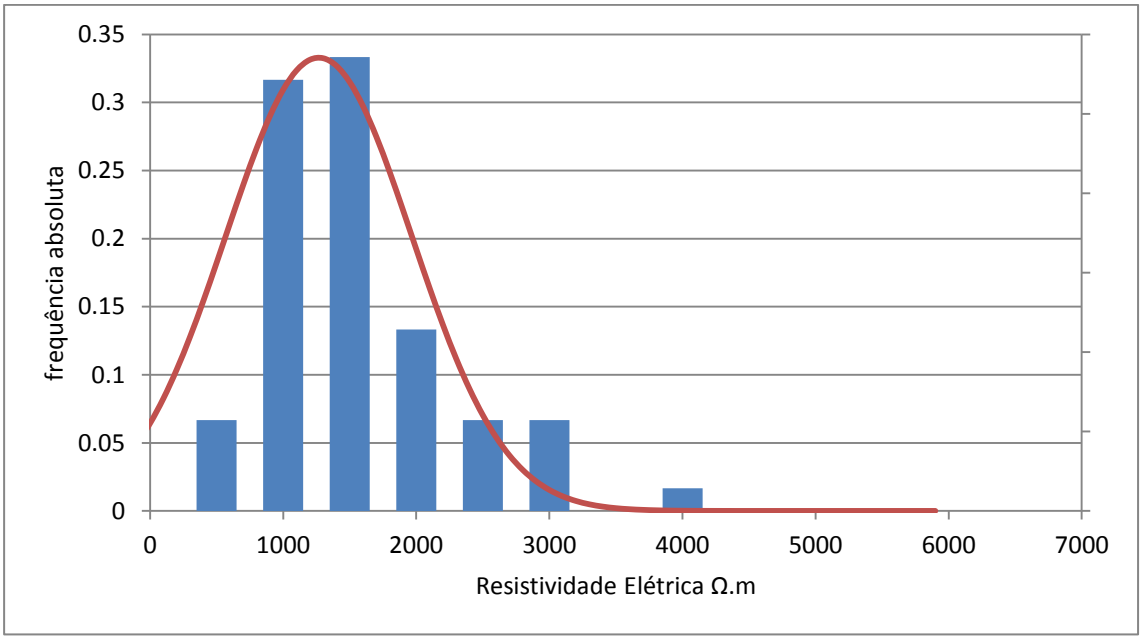


Figura 4.14 – Histograma e curva de distribuição normal para as amostras siltosas ensaiadas em laboratório.

A Figura 4.15 apresenta o histograma e a curva de distribuição normal para os dados de resistividade elétrica obtidos para os solos arenosos nas condições de grau de saturação em 65 %, 75 % e 85 %, na qual é possível se observar a ocorrência de duas populações, a primeira com média da ordem de 1.500 Ω.m e a segunda com média próxima a 3.000 Ω.m. Associa-se

a primeira com concreções lateríticas na dimensão areia e a segunda com areias quartzosas encontradas próximas ao Lago de Palmas.

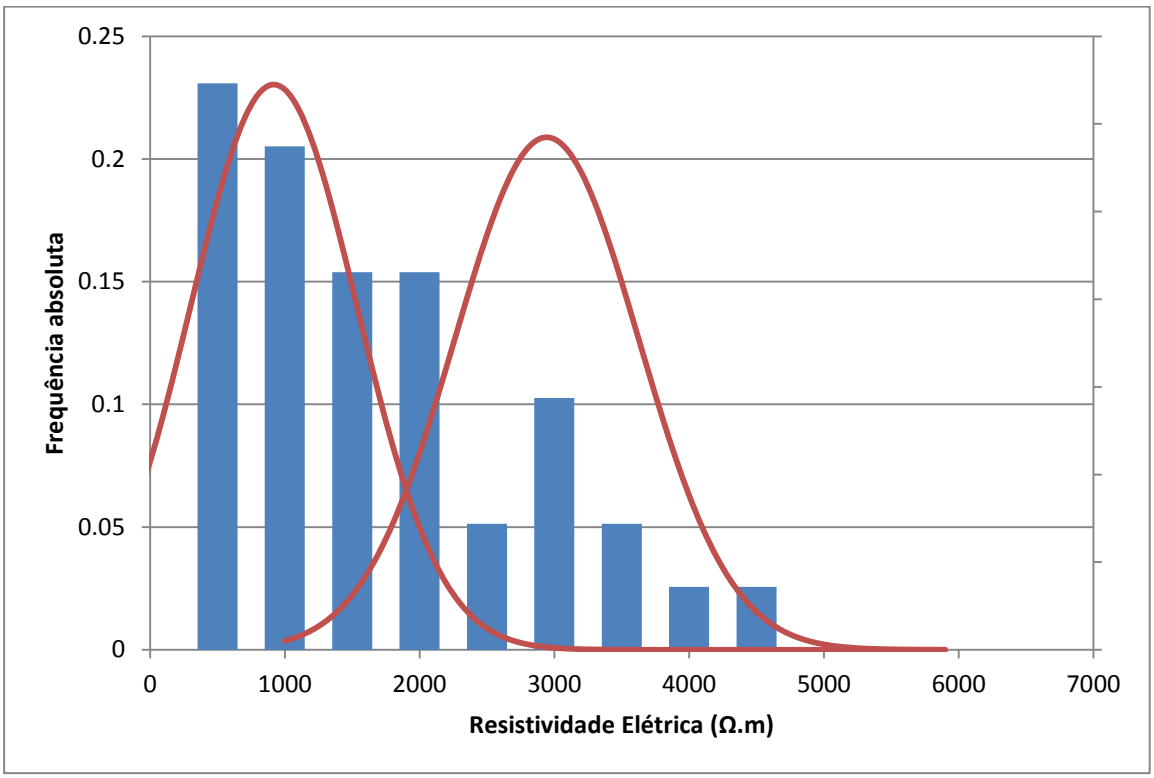


Figura 4.15 – Histograma e curva de distribuição normal para as amostras arenosas ensaiadas em laboratório.

4.3 – RELAÇÃO ENTRE RESISTIVIDADE ELÉTRICA E TIPO DE SOLO

Com base nos resultados obtidos em laboratório realizou-se a interpretação das seções de resistividade elétrica obtidas nas áreas chave, assim, puderam-se realizar análises que culminaram na determinação da relação entre cada tipo de solo e a faixa de valores de resistividade elétrica atribuídas ao mesmo.

A Figura 4.16 apresenta o histograma e a curva de distribuição normal para os solos argilosos. Pode-se observar que os valores de resistividade elétrica desse tipo de solo vão desde valores próximos a zero até cerca de 8.000 Ω.m.

A Figura 4.17 apresenta o histograma e a curva de distribuição normal para os solos siltosos. Pode-se observar que os valores de resistividade elétrica desse tipo de solo vão desde próximos a zero até cerca de 35.000 Ω.m.

A Figura 4.18 apresenta o histograma e a curva de distribuição normal para os solos arenosos. Pode-se observar que os valores de resistividade elétrica desse tipo de solo são

significativamente maiores que os observados nos solos argilosos e siltosos, chegando até cerca de 70.000 Ω.m.

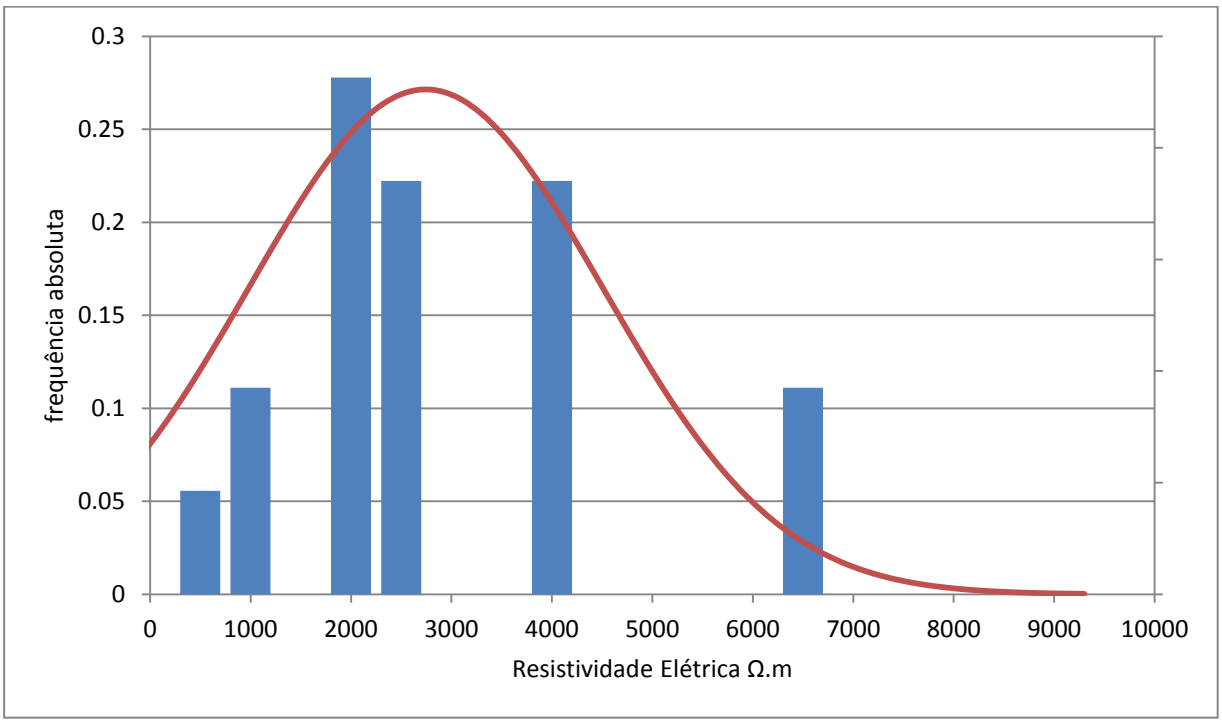


Figura 4.16 – Histograma e curva de distribuição normal solos argilosos encontrados nas análises de campo.

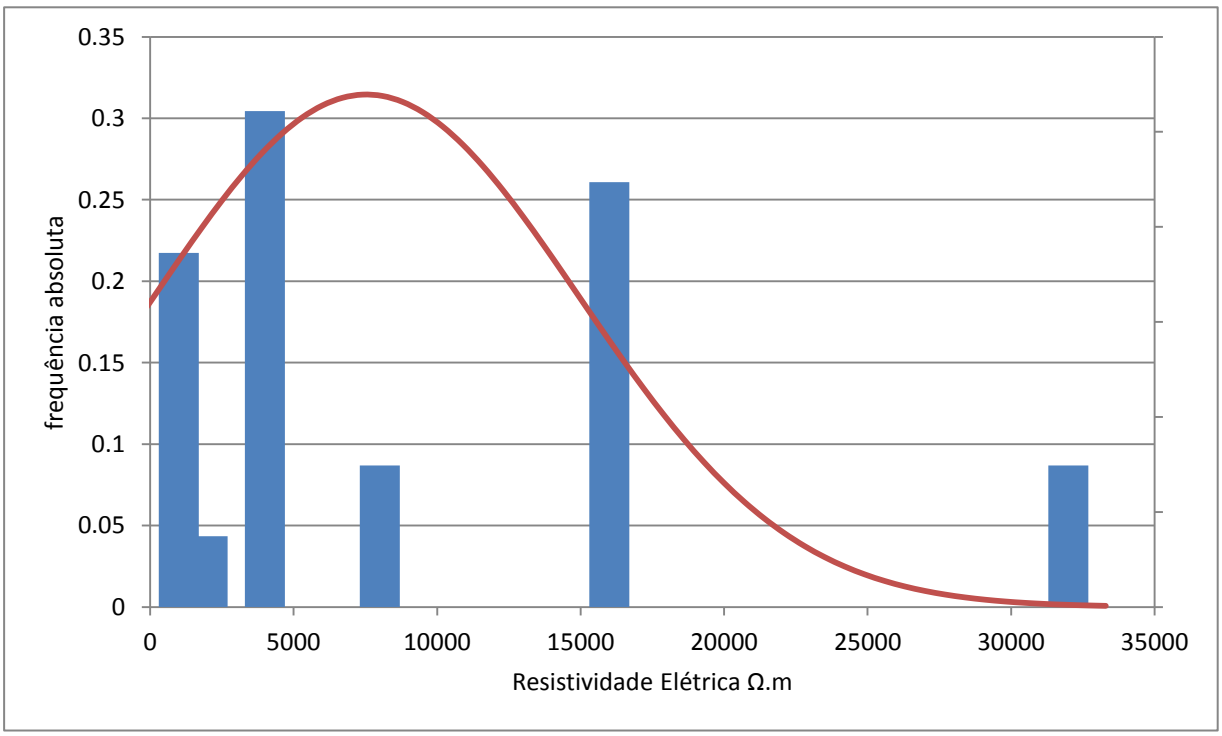


Figura 4.17 – Histograma e curva de distribuição normal para solos siltosos encontrados nas análises de campo.

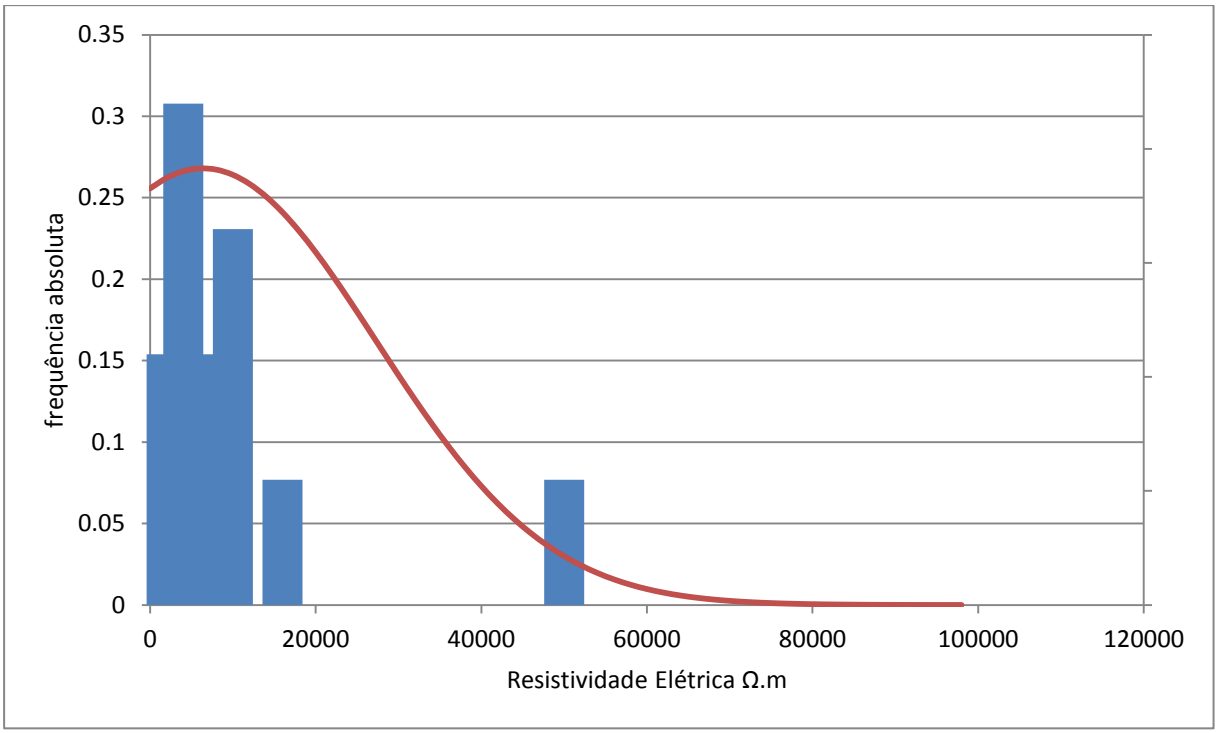


Figura 4.18 – Histograma e curva de distribuição normal para solos arenosos encontrados nas análises de campo.

As amostras de saprólito não somaram número suficiente para uma análise estatística adequada, desse modo, a faixa de valores estimada para o saprólito foi determinada por estimativa. Optou-se por extrapolar os limites superiores dos valores típicos de resistividade elétrica observados para cada tipo de solo, de modo a se ter uma margem de segurança ao se ampliar a área de estudo. A relação entre tipo de solo e a respectiva faixa de valores é apresentada na Tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Relação entre tipo de solo e intervalo esperado de resistividade elétrica.

Tipo de solo	Intervalo (Ω.m)
Saprólito	10 a 1.000
Argilas	100 a 10.000
Siltes	1000 a 50.000
Areias	> 40.000

Pode-se observar que ocorre sobreposição de valores de resistividade elétrica para os solos identificados na área de estudo. Isso se dá pelo fato da resistividade elétrica observada em materiais granulares, como os solos, depender significativamente da conexão do líquido entre essas partículas, restando ao mineral pouca influência na passagem da corrente elétrica, uma vez que esse é altamente resistivo quando comparado com o liquido intersticial. Assim, a

condição que esse material se apresenta, no que se refere à umidade, tem grande influência na resistividade elétrica observada.

4.4 – MODELOS GEOTÉCNICOS

A interpolação dos dados de sondagens, como mostrado no Capítulo 3 permitiu a criação do modelo geotécnico para a área de estudo. A Figura 4.19 apresenta os histogramas para os dados de sondagem SPT. Os dados foram agrupados de acordo com a profundidade: 1 a 2 m, 3 a 5 m, 6 a 10 m e mais de 11 m. Assim, pode-se observar a frequência de ocorrência dos valores de N_{SPT} para cada faixa de profundidade.

Devido às dimensões da área de estudo delimitaram-se quadriláteros específicos para representar o modelo produzido, sendo eles: os quadriláteros Centro-Leste, Norte, Sul e UFT (Figura 4.20). Desse modo, é possível ver com mais detalhes as informações trazidas em três dimensões.

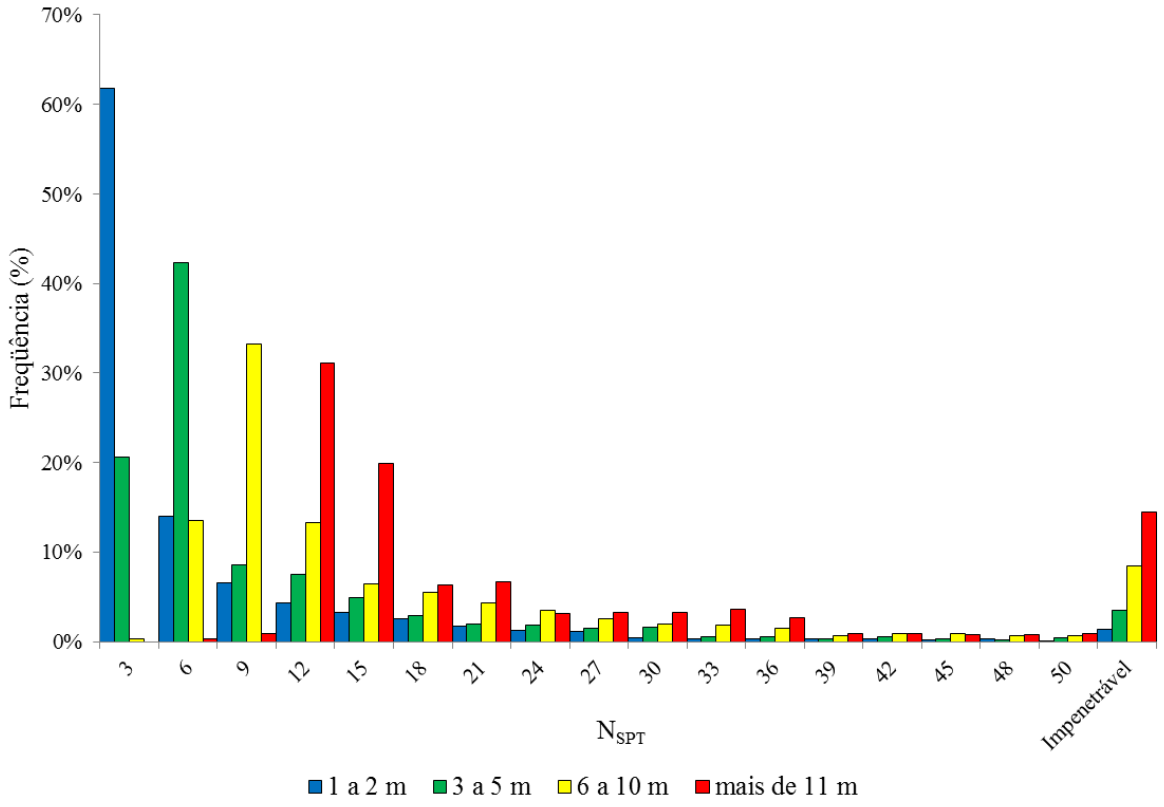


Figura 4.19 – Histogramas para os dados de N_{SPT}.



Figura 4.20 – Localização dos quadriláteros: Norte, Centro-Leste, Sul e UFT.

4.4.1 – QUADRILÁTERO CENTRO-LESTE

O quadrilátero Centro-Leste abrange a região mais densamente ocupada da cidade, compreendendo a principal zona comercial, além dos principais edifícios da administração pública. A Figura 4.21 ilustra a localização do quadrilátero Centro-Leste utilizado para demonstrar o modelo nessa porção da área de estudo.


Figura 4.21 – Localização do quadrilátero centro-leste.

As sondagens contidas nessa região são apresentadas na Figura 4.22, onde N, S, W e E indicam os pontos cardeais e as cores indicam a classificação táctil visual, conforme especificado no Capítulo 3.

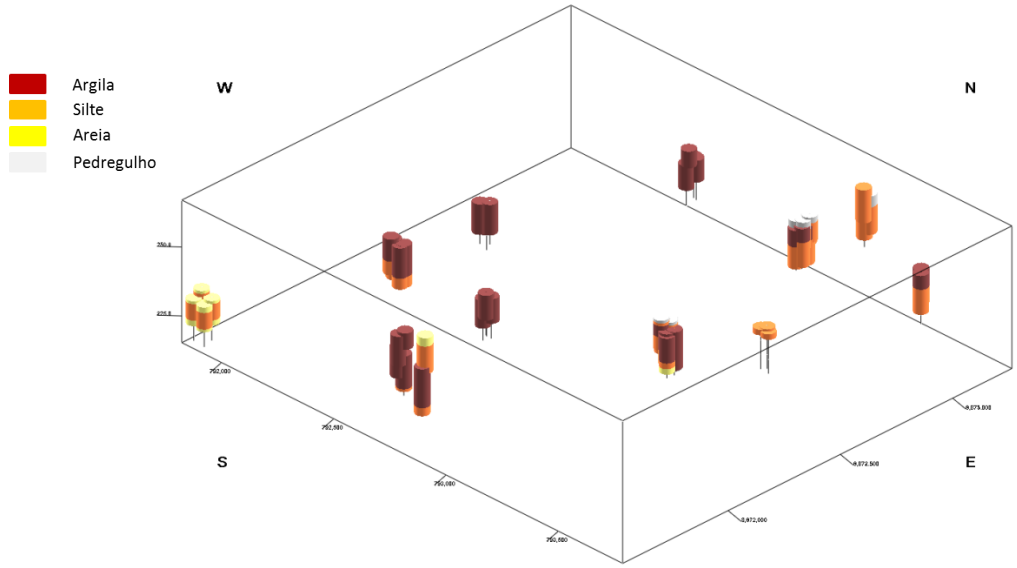


Figura 4.22 – Disposição das sondagens encontradas no quadrilátero Centro-Leste.

O modelo de solos é apresentado na Figura 4.23, onde se pode observar a predominância de material argiloso nas primeiras camadas, mais espessa na porção central, e de material siltoso nas camadas inferiores, aflorando em nordeste.

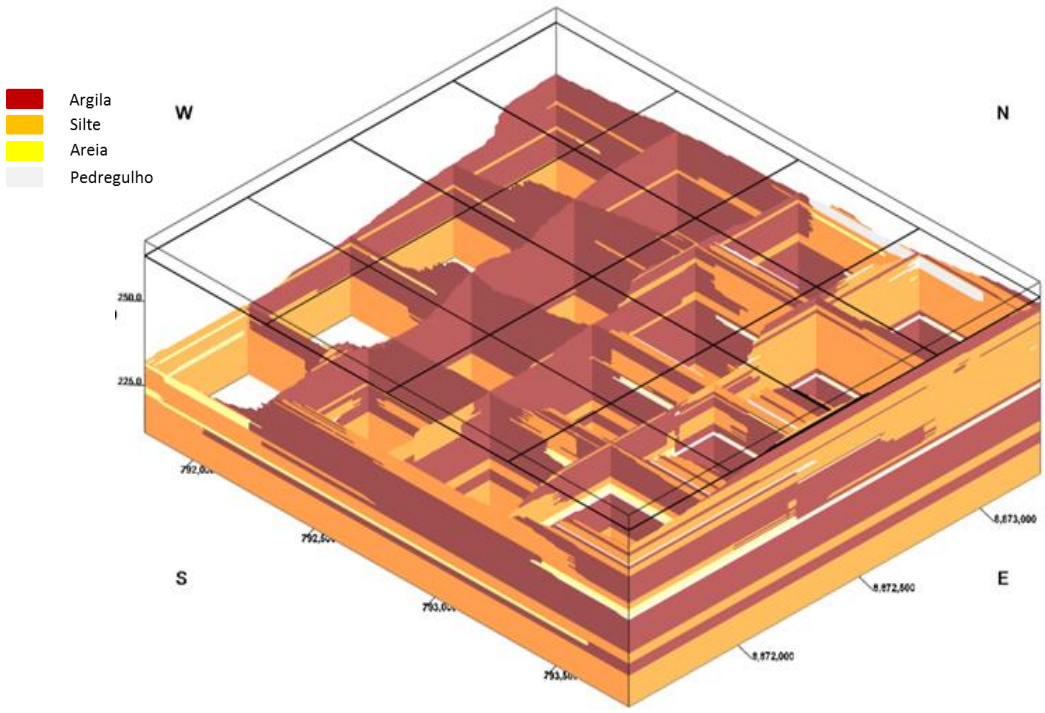


Figura 4.23 – Modelo de seções para os solos do quadrilátero Centro-Leste.

A Figura 4.24 apresenta o modelo N_{SPT} para o quadrilátero Centro-Leste. Nesse modelo podemos observar a ocorrência de valores mais elevados de N_{SPT} na região nordeste, ocorrendo em menor intensidade também em sudeste e sudoeste. Os menores valores são encontrados em noroeste.

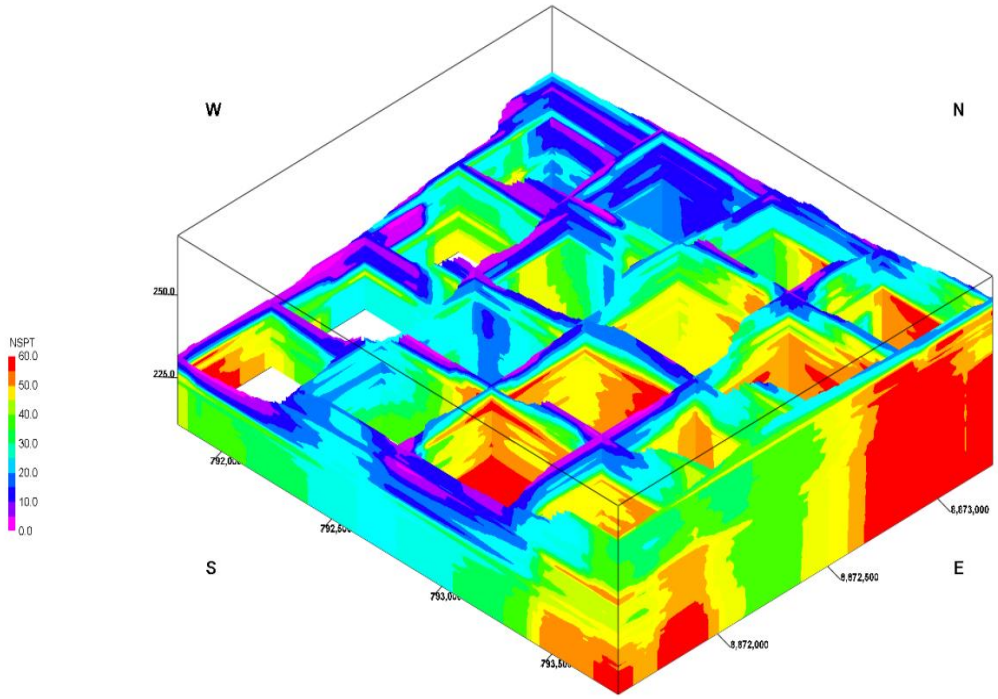


Figura 4.24 – Modelo de seções para valores de N_{SPT} para o quadrilátero centro-leste.

4.4.2 – QUADRILÁTERO NORTE

O quadrilátero Norte abrange um trecho da Avenida Theotônio Segurado, onde se situam vários edifícios públicos relevantes. Ademais, é cortado pelo Córrego Sussuapara, que marca uma mudança significativa de relevo.

Trata-se de uma de uma área relativamente elevada, majoritariamente plana, mas com a porção próxima ao córrego Sussuapara com uma declividade acentuada.

A Figura 4.25 apresenta a localização do quadrilátero Norte utilizado para demonstrar o modelo nessa porção da área de estudo.



Figura 4.25 – Localização do quadrilátero Norte.

As sondagens contidas nessa região são apresentadas na Figura 4.26, onde N, S, W e E indicam os pontos cardeais e as cores indicam a classificação táctil visual, conforme especificado no Capítulo 3.

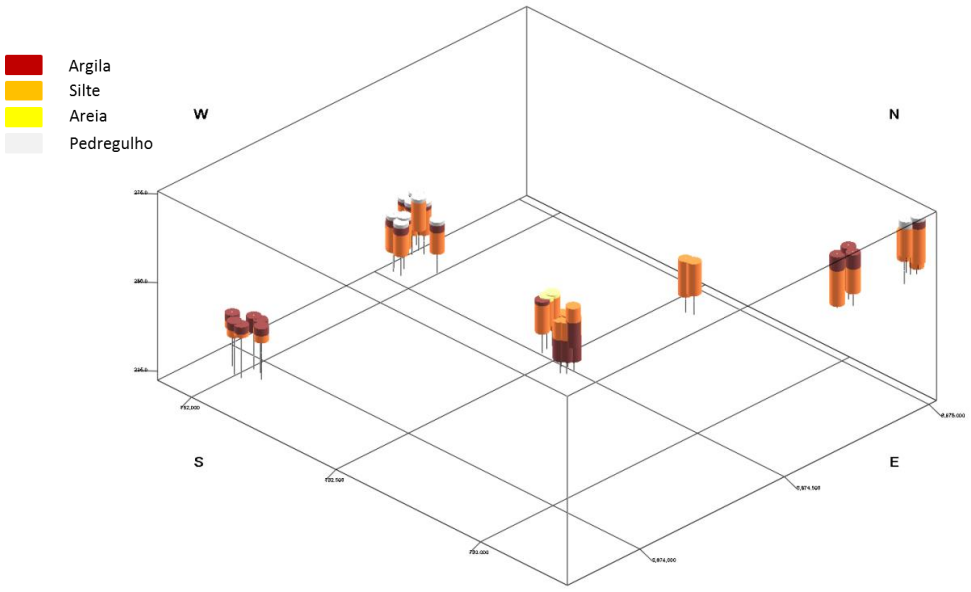


Figura 4.26 – Disposição das sondagens encontradas no quadrilátero Norte.

A Figura 4.27 apresenta o modelo de solos para o quadrilátero Norte. Pode-se observar a predominância de camadas siltosas, entremeadas por camada argilosa, mais espessa na porção leste.

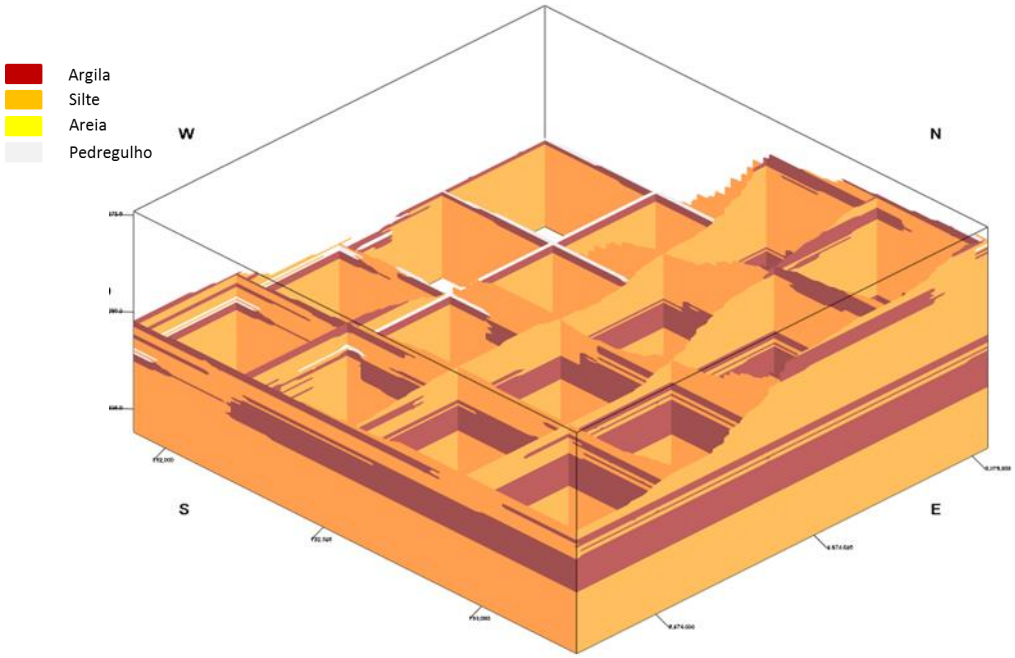


Figura 4.27 – Modelo de seções para os solos do quadrilátero Norte.

A Figura 4.28 apresenta o modelo N_{SPT} para o quadrilátero Norte. Pode-se observar a ocorrência de valores elevados de N_{SPT} logo nas primeiras camadas, notadamente na porção leste. Já a porção nordeste aparenta uma maior heterogeneidade.

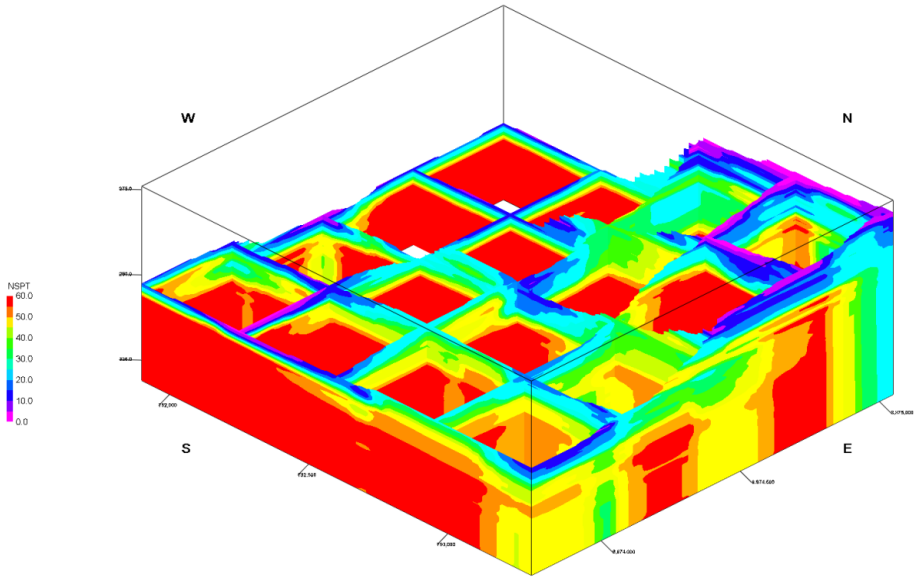


Figura 4.28 – Modelo de seções para valores de N_{SPT} para o quadrilátero Norte.

4.4.3 – QUADRILÁTERO SUL

O quadrilátero Sul compreende um trecho da Avenida Theotônio Segurado, ligando os acessos rodoviários e aeroviários da cidade. A Figura 4.29 apresenta a localização do quadrilátero Sul utilizado para demonstrar o modelo nessa porção da área de estudo.



Figura 4.29 – Localização do quadrilátero Sul.

As sondagens contidas nessa região são apresentadas na Figura 4.30, onde N, S, W e E indicam os pontos cardeais e as cores indicam a classificação táctil visual, conforme especificado no Capítulo 3.

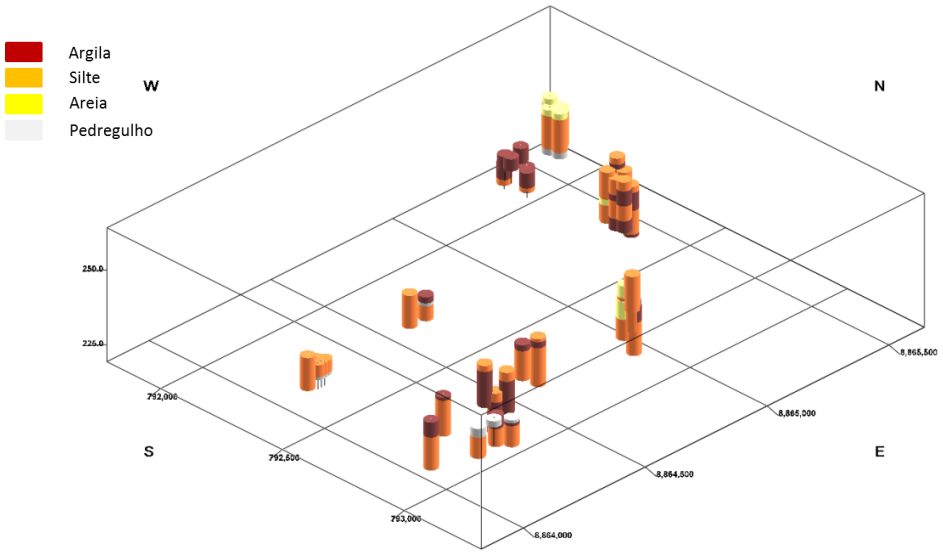


Figura 4.30 – Disposição das sondagens encontradas no quadrilátero Sul.

O modelo de solos é apresentado na Figura 4.31, onde se pode observar a ocorrência de uma camada arenosa que aumenta de espessura na direção Oeste. Pode-se ainda observar a predominância de material siltoso com a presença de camadas argilosas na base e no topo, em alguns pontos.

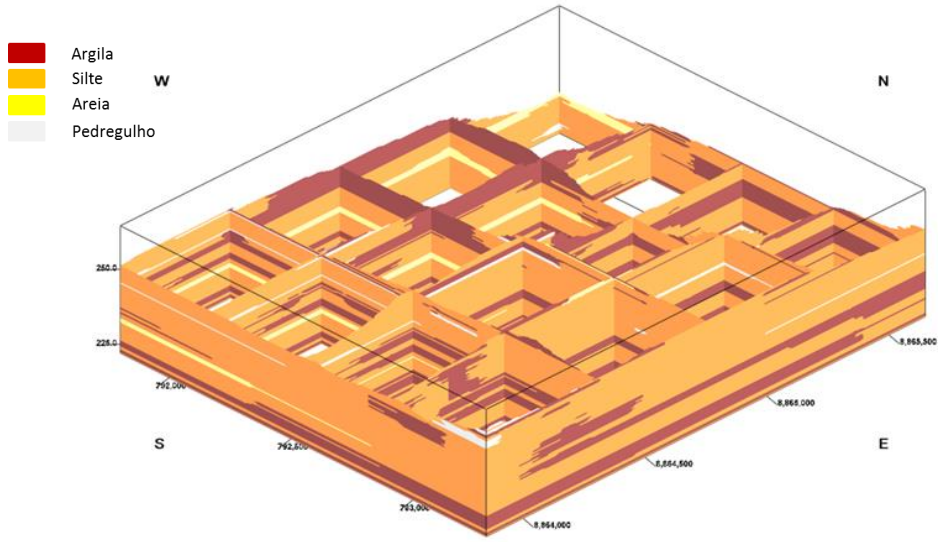


Figura 4.31 – Modelo de seções para os solos do quadrilátero Sul.

A Figura 4.32 apresenta o modelo N_{SPT} para o quadrilátero Sul. Nesse modelo podemos observar a ocorrência de valores mais elevados de N_{SPT} na região Sul, em contraponto aos valores mais baixos que aparecem na região Norte.

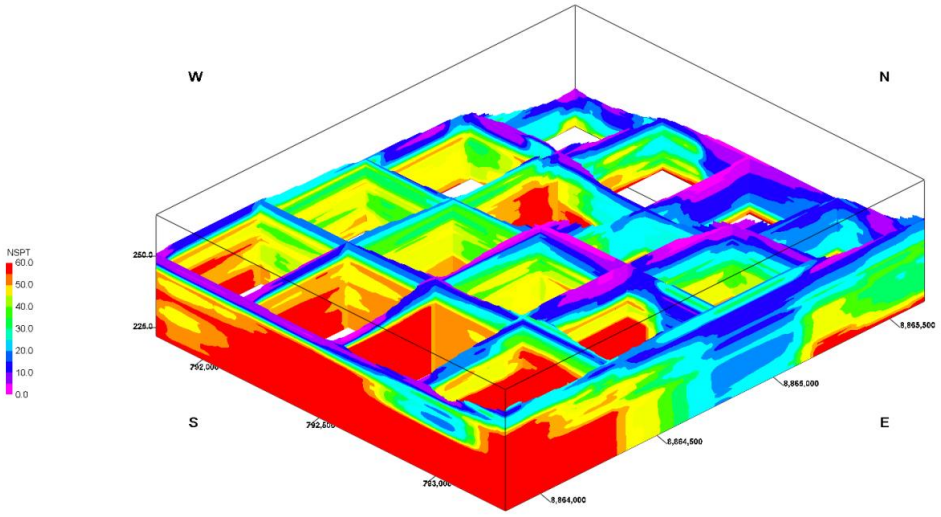


Figura 4.32 – Modelo de seções para valores de N_{SPT} para o quadrilátero Sul.

4.4.4 – QUADRILÁTERO UFT

O quadrilátero UFT compreende a área onde se localiza a Universidade Federal do Tocantins (UFT) e o Câmpus da Universidade Estadual do Tocantins (UNITINS), além disso, é a região de acesso da cidade à BR 153. A Figura 4.33 apresenta a localização da UFT utilizada para demonstrar o modelo nessa porção da área de estudo.



Figura 4.33 – Localização do quadrilátero UFT.

As sondagens contidas nessa região são apresentadas na Figura 4.34, onde N, S, W e E indicam os pontos cardeais e as cores indicam a classificação táctil visual, conforme especificado no Capítulo 3.

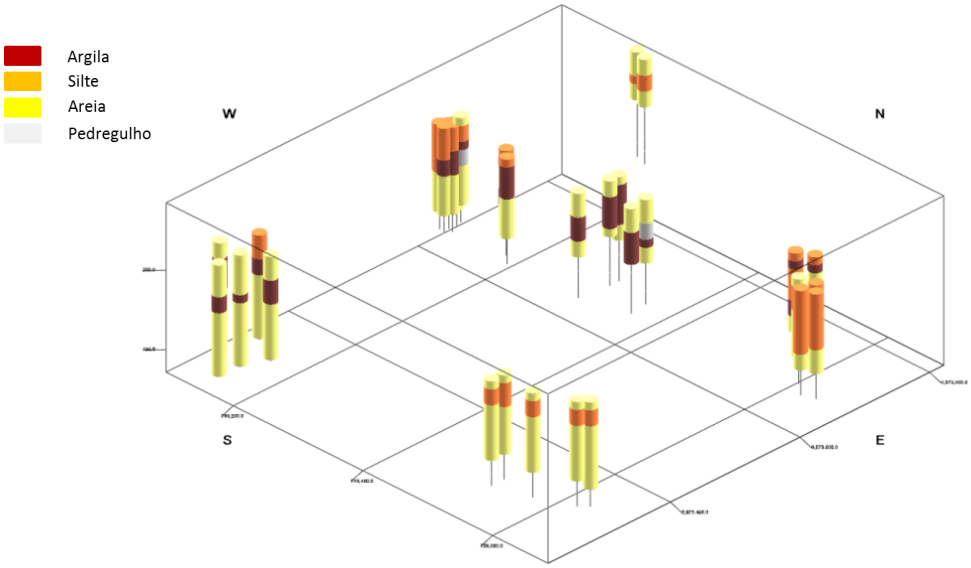


Figura 4.34 – Disposição das sondagens encontradas no quadrilátero UFT.

O modelo de solos apresenta uma predominância de material arenoso, com a presença de camadas superficiais siltosas ou argilosas, conforme mostra a Figura 4.35.

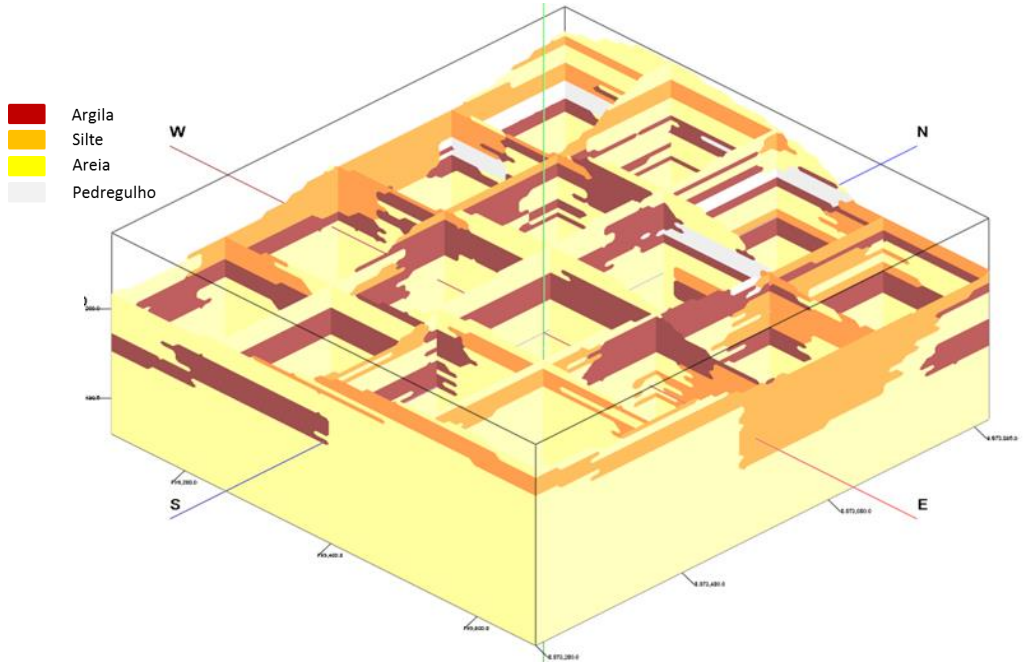


Figura 4.35 – Modelo de seções para os solos do quadrilátero UFT.

A Figura 4.36 apresenta o modelo N_{SPT} para o quadrilátero UFT. Pode-se observar a ocorrência de regiões com valores elevados, cercadas de regiões com valores baixos de N_{SPT}, indicando, provavelmente, um processo de intemperismo do material original.

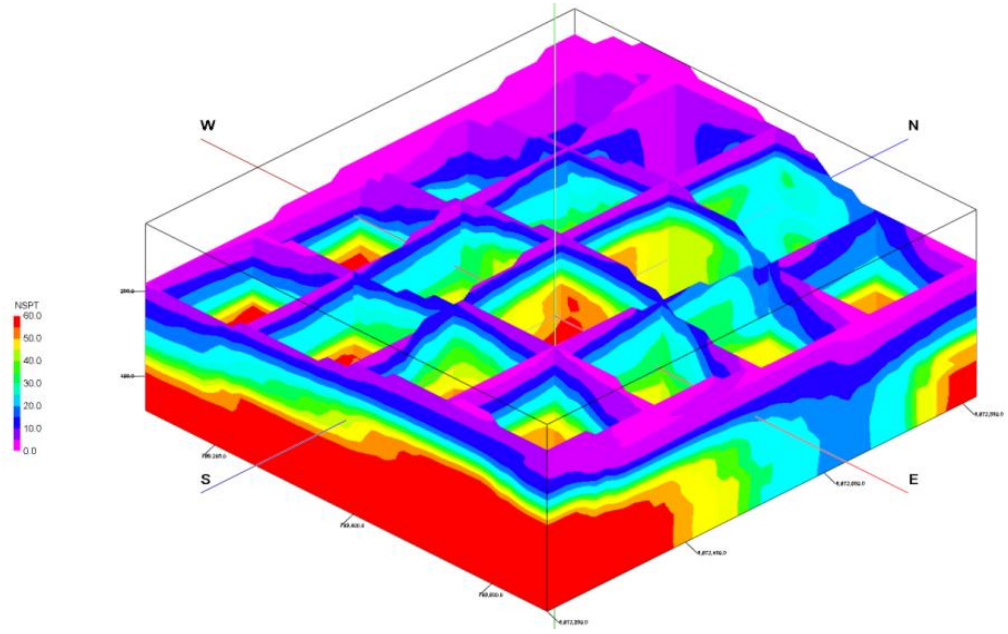


Figura 4.36 – Modelo de seções para valores de N_{SPT} para o quadrilátero UFT.

4.5 – PERFIS GEOTÉCNICOS

Neste item são apresentados os resultados obtidos para as interpretações geotécnicas das seções de resistividade elétrica das áreas chave e das linhas Central, Norte e Sul. São apresentados ainda os resultados das investigações a trado, utilizadas na verificação das interpretações geotécnicas dos perfis geoelétricos obtidos para as linhas Central, Norte e Sul.

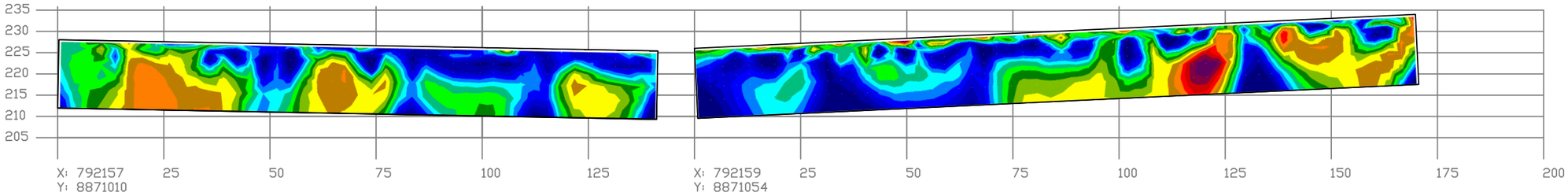
4.5.1 – ÁREAS CHAVE

Com o intuito de compreender a relação entre os dados geotécnicos fornecidos pelos laudos de sondagem e as seções de resistividade elétrica, utilizaram-se os estudos realizados nas áreas do Espaço Cultural, Parque Sussuapara e SESC, início do período chuvoso, conforme descrito no Capítulo 3.

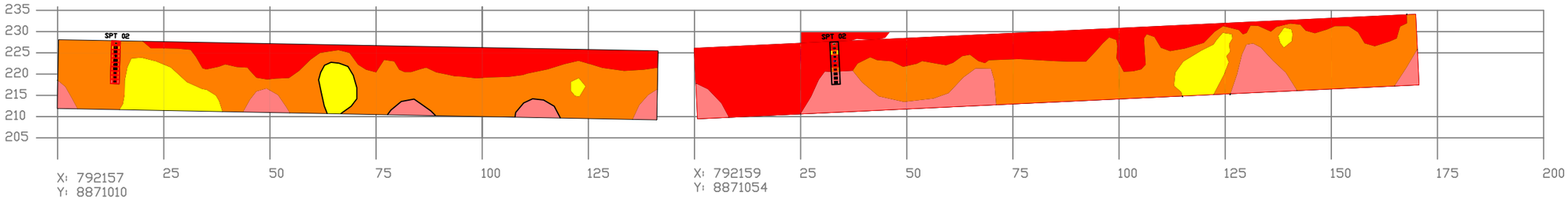
Assim, traçaram-se os perfis geotécnicos para cada uma dessas áreas utilizando-se a relação estabelecida entre a resistividade elétrica e seu correspondente tipo de solo. A Figura 4.37 apresenta os perfis geotécnicos para o Espaço Cultural e para o Parque Sussuapara, enquanto a Figura 4.38 apresenta a seção geotécnico traçado para o SESC.

As seções obtidas para o Espaço Cultural e Parque Sussuapara são interrompidas por cursos d'água, por isso sua divisão em dois trechos. Essas duas áreas apresentam materiais com diferentes resistividades elétricas no mesmo horizonte, indicando a deposição sazonal de materiais de diferentes granulometrias ao longo do tempo e conforme o regime de escoamento desses dois cursos d'água. A seção obtida para o SESC apresenta uma maior homogeneidade, destacando a variação do topo da camada base, mais profunda ou mais rasa, essa camada é identificada como impenetrável ao SPT.

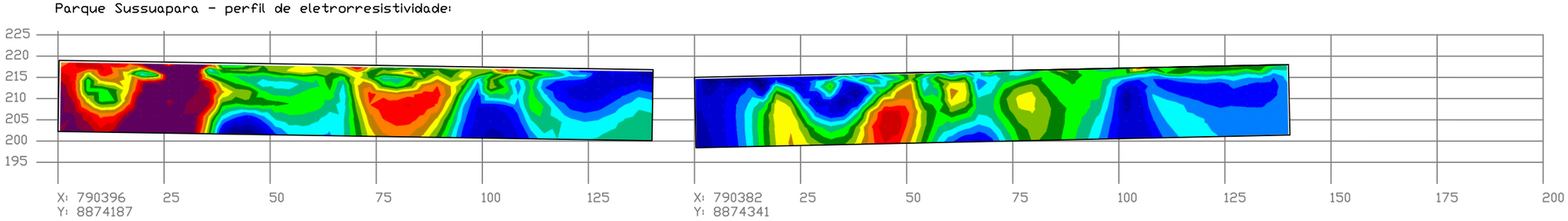
Espaço Cultural - perfil de eletrorresistividade:



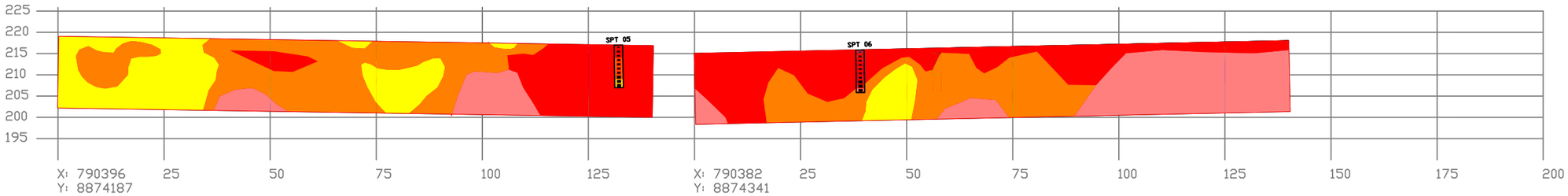
Espaço Cultural - perfil geotécnico:



Parque Sussuapara - perfil de eletrorresistividade:

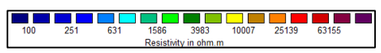


Parque Sussuapara - perfil geotécnico:



Legenda:

- Saprólito
- Argila
- Silte
- Areia



Relação entre solo e resistividade:

Saprólito	10 a 1.000
Argila**	100 a 10.000
Silte	1000 a 50.000
Areia*	> 40.000

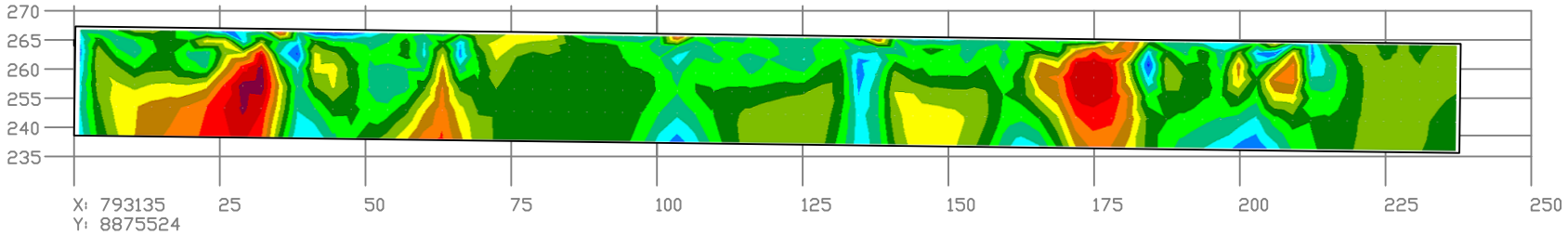
* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

**Areia argilosa na classificação granulométrica

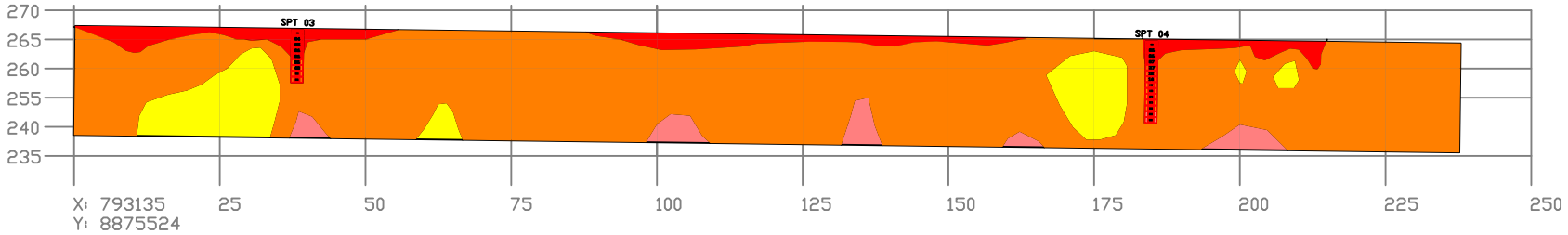


Figura 4.37 – Perfis geotécnicos para o Espaço Cultural e Parque Sussuapara.

Sesc - perfil de eletrorresistividade:



Sesc - perfil geotécnico:



Relação entre solo e resistividade:

Saprólito	10 a 1.000
Argila**	100 a 10.000
Silte	1000 a 50.000
Areia*	> 40.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

**Areia argilosa na classificação granulométrica

Legenda:

- Saprólito
- Argila
- Silte
- Areia

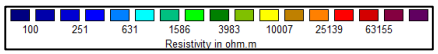




Figura 4.38 - Perfil geotécnico para o SESC.

4.5.2 – LINHAS CENTRAL, NORTE E SUL

Com a relação entre a resistividade elétrica e o tipo de solo estabelecida e aplicada em uma área relativamente pequena, se aplicou esta relação para toda a área de estudo. Assim, conforme descrito na metodologia, foram investigadas as linhas Central, Norte e Sul, no fim do período chuvoso. Esses são seguimentos que cortam o plano diretor transversalmente e abrangem as regiões mais povoadas da cidade.

A linha Central é iniciada na Orla 14, na LO-05, cruza a Avenida Theotônio Segurado e é finalizada próximo a TO-050, nas proximidades do Parque Cesamar. A linha Norte é iniciada próximo ao Ribeirão Água Fria e segue a LO-12 cortando a Avenida Theotônio Segurado, sendo encerrada próximo a TO-050, nas proximidades do Parque Sussuapara. Já a linha Sul é iniciada próximo à Praia do Prata, seguindo a LO-19 e cortando a Avenida Theotônio Segurado, sendo encerrada nas proximidades da quadra 812 Sul. A Figura 4.39 apresenta o trecho inicial da linha Central. Os demais trechos são encontrados no Apêndice C, nas Figuras C.1 a C.8.

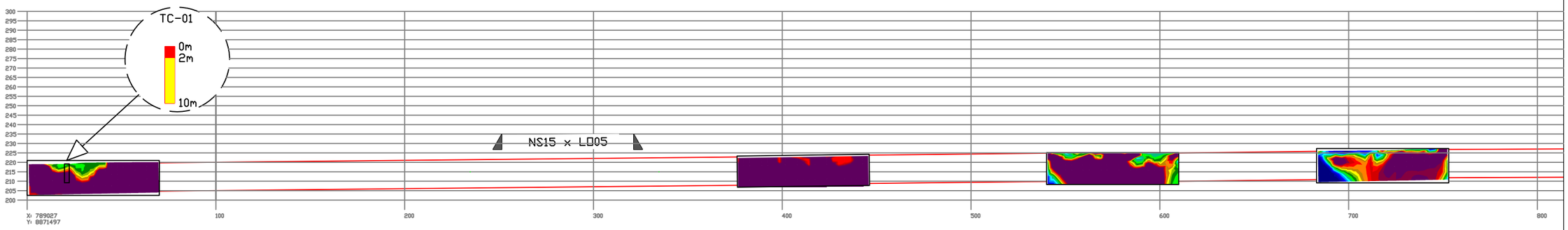
Análises mais aprofundadas estão demonstradas no Capítulo 5 – Análise de Resultados, mas pode-se observar na linha Central a predominância de material arenoso com a presença de muitos pedregulhos desde seu início a Oeste até próximo ao seu cruzamento com o córrego Brejo Comprido, onde aparecem solos argilosos. Em seguida observamos uma mudança para material siltoso e argiloso, eventualmente encontrando-se camadas superficiais arenosas. Ao passo que se aproxima da TO-050 a camada de saprólito aparece com maior frequência. A Figura 4.40 apresenta o trecho inicial da linha Norte. Os demais trechos são encontrados no Apêndice C, nas Figuras C.9 a C.13.

Quanto à linha Norte destaca-se a predominância de material siltoso, pouco depois de seu início a Oeste até o cruzamento com a Av. NS-04, onde passam a ocorrer camadas significativas de material arenoso, sendo substituídas por camadas siltosas e argilosas a partir da Av. NS-10.

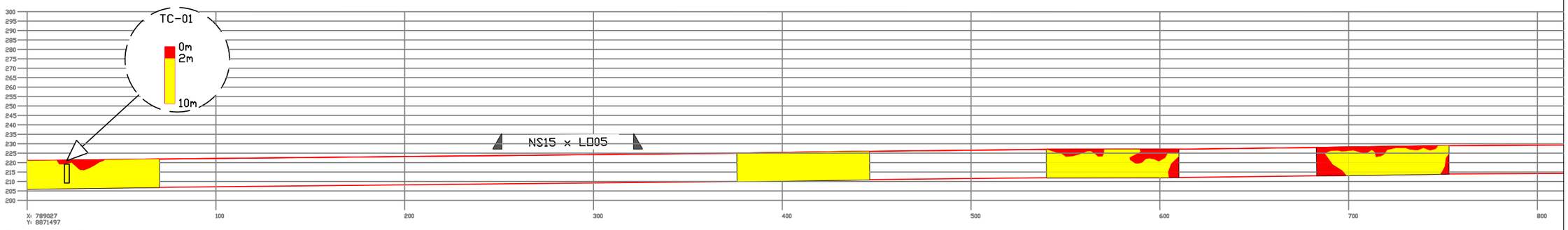
A linha Sul se inicia a Oeste com a ocorrência de camadas argilosas e siltosas. À Oeste da Avenida Theotônio Segurado são observadas camadas superficiais de material arenoso, que por sua vez dá lugar a uma matriz predominantemente siltosa, com ocorrência de camada superficial argilosa e a presença constante do saprólito na base. A Figura 4.41 apresenta o trecho inicial da linha Sul. Os demais trechos são encontrados no Apêndice C, nas Figuras C.14 a C.18.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

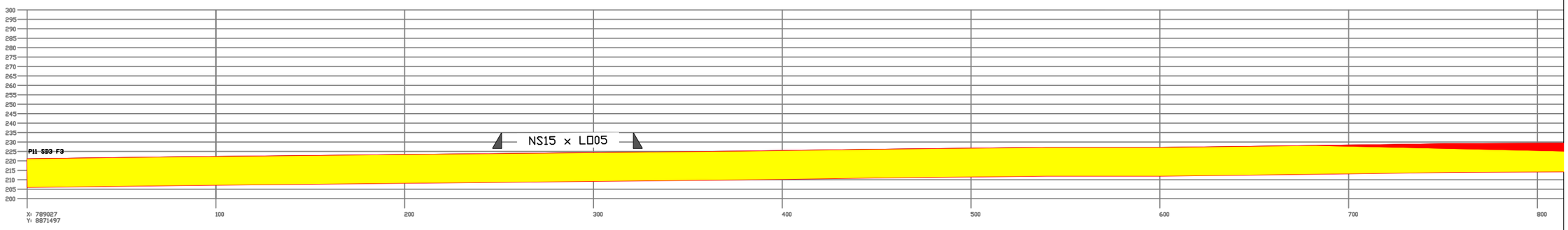
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

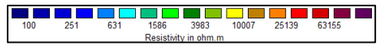


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

**Areia argilosa na classificação granulométrica

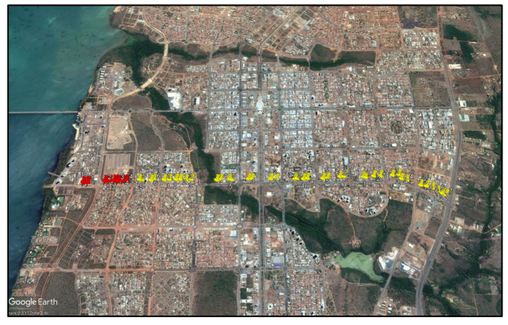
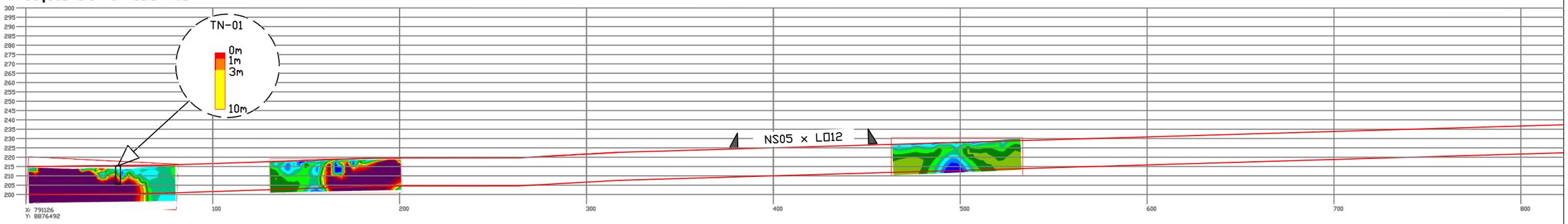


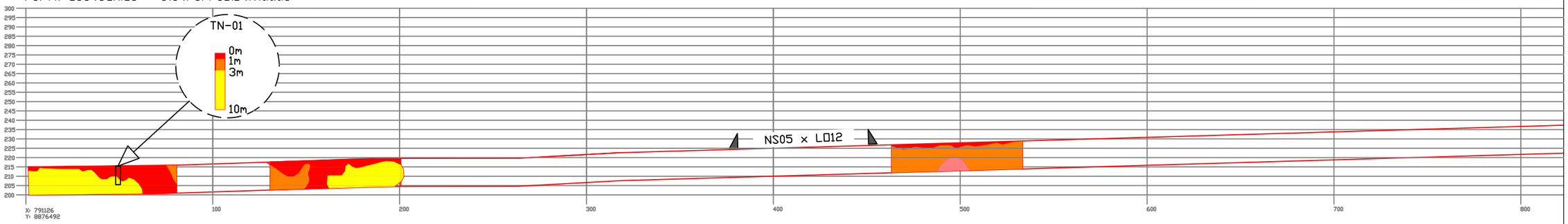
Figura 4.39 - Perfil geotécnico para o trecho inicial da linha Central.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

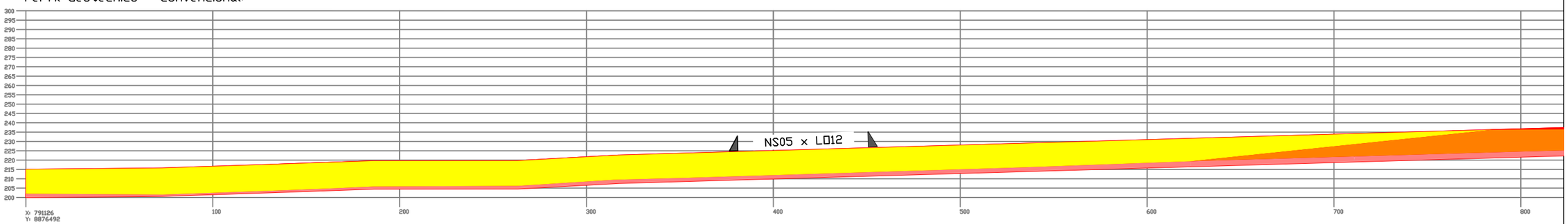
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:



Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte

100 251 631 1586 3983 10007 25139 63155
Resistivity in ohm.m

Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

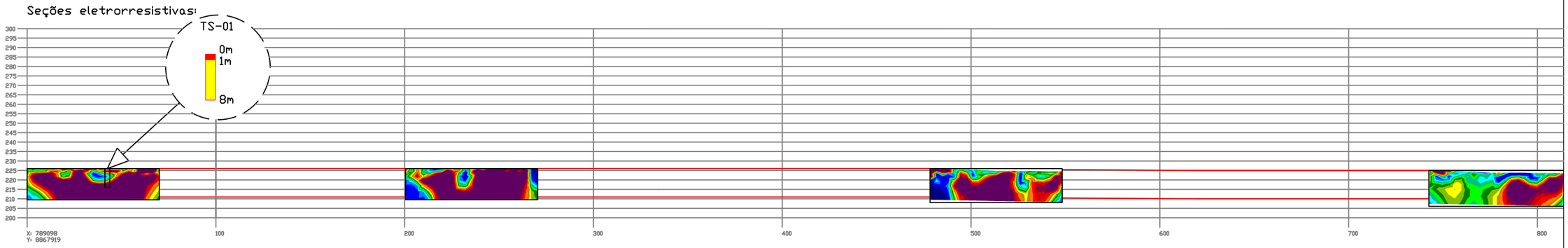
**Areia argilosa na classificação granulométrica



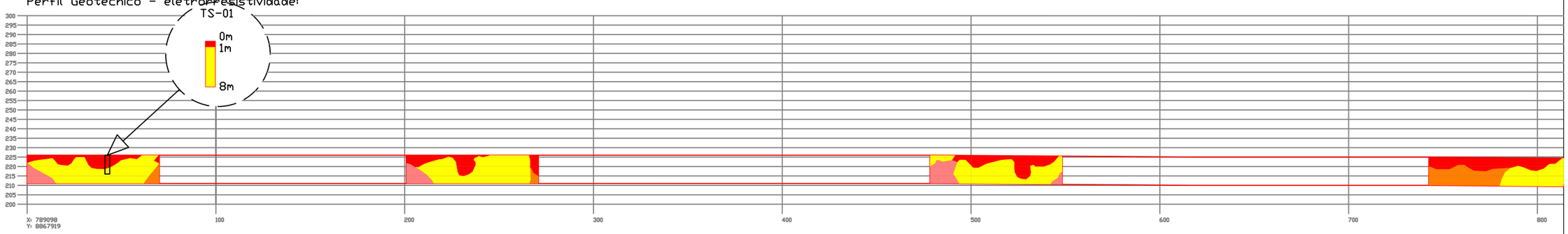
Figura 4.40 - Perfil geotécnico para o trecho inicial da linha Norte.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

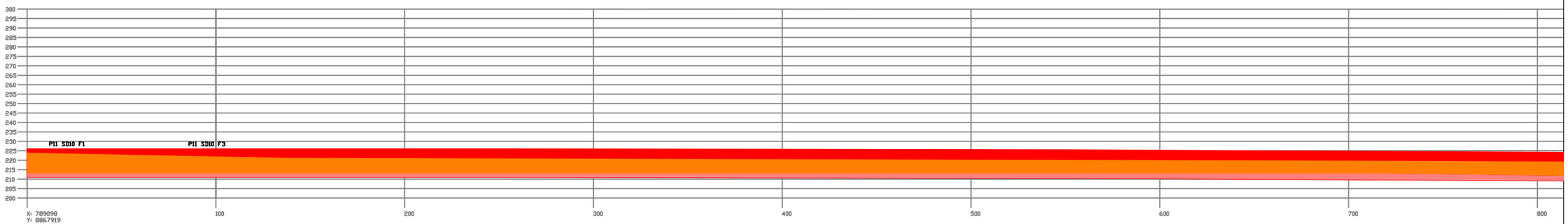
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

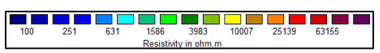


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

**Areia argilosa na classificação granulométrica



Figura 4.41- Perfil geotécnico para o trecho inicial da linha Sul.

4.5.3 – INVESTIGAÇÃO A TRADO

As investigações a trado foram utilizadas para verificar os resultados obtidos pela interpretação geotécnica de seções de resistividade elétrica. Assim, a caracterização táctil visual de campo e o ensaio de granulometria expedita permitiram avaliar o tipo de solo encontrado em cada localidade amostrada.

A Tabela 4.16 apresenta a relação entre o ponto amostrado e a classificação táctil visual e o resultado da granulometria expedita.

Tabela 4.16 – Resultados para a investigação de reconhecimento a trado.

Identificação		Classificação Táctil Visual	Percentual Granulométrico (%)				
			Pedregulho	Areia Grossa	Areia Média	Areia Fina	Silte e Argila
TN-01	0-1 m	argila	14	11	18	31	27
	1-3 m	silte	0	4	14	43	40
	3-10 m	areia	13	4	26	40	17
TN-02	0-1 m	argila	16	9	15	31	29
	1-10 m	silte	0	2	15	35	49
TN-03	0-5 m	areia	14	1	26	46	13
TN-04	0-5 m	areia	12	2	24	46	16
TC-01	0-2 m	argila	17	10	20	27	26
	2-10 m	areia	14	2	23	43	18
TC-02	0-1 m	argila	15	9	19	29	27
	1-7 m	areia	15	2	29	44	11
TC-03	0-5 m	areia	11	3	27	41	18
TC-04	0-1 m	argila	15	10	17	30	28
	1-6 m	areia	17	5	29	42	8
	6-10 m	silte	1	2	14	34	50
TS-01	0-1 m	argila	16	5	34	31	29
	1-8 m	areia	15	4	27	46	9
TS-02	0-1 m	argila	17	11	18	30	24
	1-3 m	silte	1	1	10	36	52
	3-5 m	areia	12	3	26	45	14
TS-03	0-1 m	argila	15	8	19	30	28
	1-5 m	silte	0	3	11	34	52
	5-7 m	areia	16	2	27	39	16
TS-04	0-1 m	argila	16	8	20	29	27
	1-7 m	silte	0	3	15	32	50

4.6 PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

Os produtos cartográficos oriundos do Modelo Numérico de Terreno e dos modelos geotécnicos contribuem para o entendimento da área de estudo, detalhando seu relevo,

características do nível freático, posição de camadas de solo e variação do N_{SPT} em relação à profundidade.

4.6.1 COTA E PROFUNDIDADE DO IMPENETRÁVEL AO ENSAIO SPT

A engenharia de fundações requer uma série de informações iniciais para a estimativa de custos e análise de viabilidade de projetos. Dentre essas informações estão a cota e a profundidade do impenetrável ao ensaio SPT.

Nesse sentido, as cartas mostram que existe uma tendência geral em se acompanhar a topografia. Excetuando-se em algumas regiões no centro norte da área de estudo onde a profundidade do impenetrável é notadamente menor e em regiões próximas ao Lago de Palmas onde a profundidade é um pouco maior que a média geral (Figuras 4.42 e 4.43).

4.6.2 COTA E PROFUNDIDADE DO NÍVEL FREÁTICO

A presença ou não do lençol freático, bem como a sua correta determinação é objeto de estudo de diversas áreas. Na engenharia civil o lençol freático é determinante em projetos de saneamento, de fundações, drenagem urbana, além do estudo do fluxo de contaminantes, por exemplo.

As cartas de cota e de profundidade do lençol freático mostram que o Lago de Palmas é o grande receptor do fluxo subsuperficial, com os córregos Comprido e especialmente o Sussuapara tendo pouca influência nesse sentido. Fato que não se aplica ao Ribeirão Taquaruçu, que exerce forte influência sobre as áreas adjacentes (Figuras 4.44 e 4.45).

4.6.3 COTAS E ESPESSURAS DE DIFERENTES TIPOS DE SOLOS

O conhecimento do tipo de solo presente no subsolo é importante para qualquer obra geotécnica, onde se incluem, focando nas cidades, as obras de infraestrutura urbana. Nesse sentido as cartas de cotas e espessura das camadas de solos mostram um panorama da área de estudo capaz de subsidiar estudos preliminares voltados às obras de infraestrutura.

De maneira geral temos a predominância de material arenoso (Figuras 4.46 e 4.47). nas proximidades da margem do Lago de Palmas, onde esse tipo de material se apresenta em maior área contínua e em maiores espessuras.

As argilas (Figuras 4.48 e 4.49). estão concentradas nas áreas de influência dos córregos Comprido e Sussuapara, além do Ribeirão Taquaruçu, mas também são encontradas em áreas localizadas na porção Leste da área de estudo.

Os materiais siltosos (Figuras 4.50 e 4.51). são aqueles com presença mais disseminada, presentes em maior ou menor quantidade praticamente em todas as áreas, variando apenas em espessura e em contiguidade.

4.6.4 CARTAS DE VALORES N_{SPT}

O SPT é o ensaio mais difundido no Brasil na investigação geotécnica de campo. Seus resultados são utilizados diretamente ou correlacionados com as mais diversas propriedades e características dos solos para a obtenção de estimativas que traduzam o comportamento dos solos.

Assim, a apresentação das cartas com valores N_{SPT} possibilita a análise preliminar de obras de fundações, saneamento, transporte e infraestrutura em geral.

Nas cartas apresentadas é possível observar que na porção mais ao Sul da área de estudo são encontrados valores comparativamente elevados de N_{SPT} já a partir de 2 m (Figura 4.52), fato que também pode ser relacionado com regiões localizadas ao Norte. No entanto, às margens do Lago de Palmas predominam valores comparativamente menores de N_{SPT} até a profundidade de 5 m (Figura 4.53).

As profundidades de 7 m (Figura 4.54) e 10 m (Figura 4.55) evidenciam a pouca profundidade do impenetrável, com boa parte da área já apresentando valores acima de 50 golpes, notadamente ao Norte e ao Sul da área. Por outro lado, a região Oeste apresenta valores intermediários de N_{SPT} nessas profundidades.

Deve-se ressaltar que as cartas apresentadas não devem ser utilizadas para substituir as investigações geotécnicas, que são indispensáveis para quaisquer obras de engenharia. Ao contrário, as cartas têm o intuito de orientar campanhas de ensaios racionais e efetivas, contribuindo para a elaboração de projetos concisos e coerentes com a realidade.

Carta Altimétrica do Impenetrável (m) - Palmas-TO

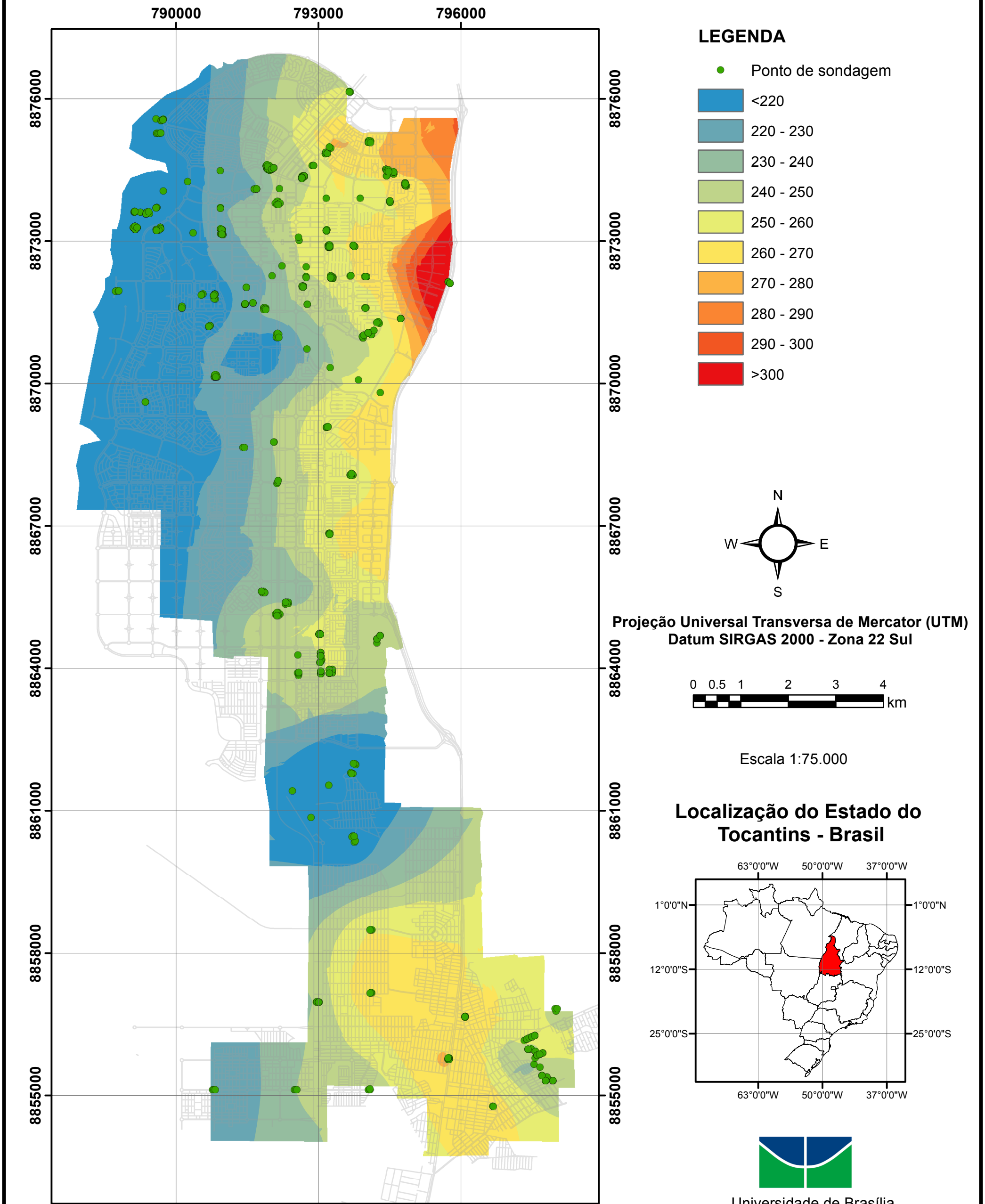
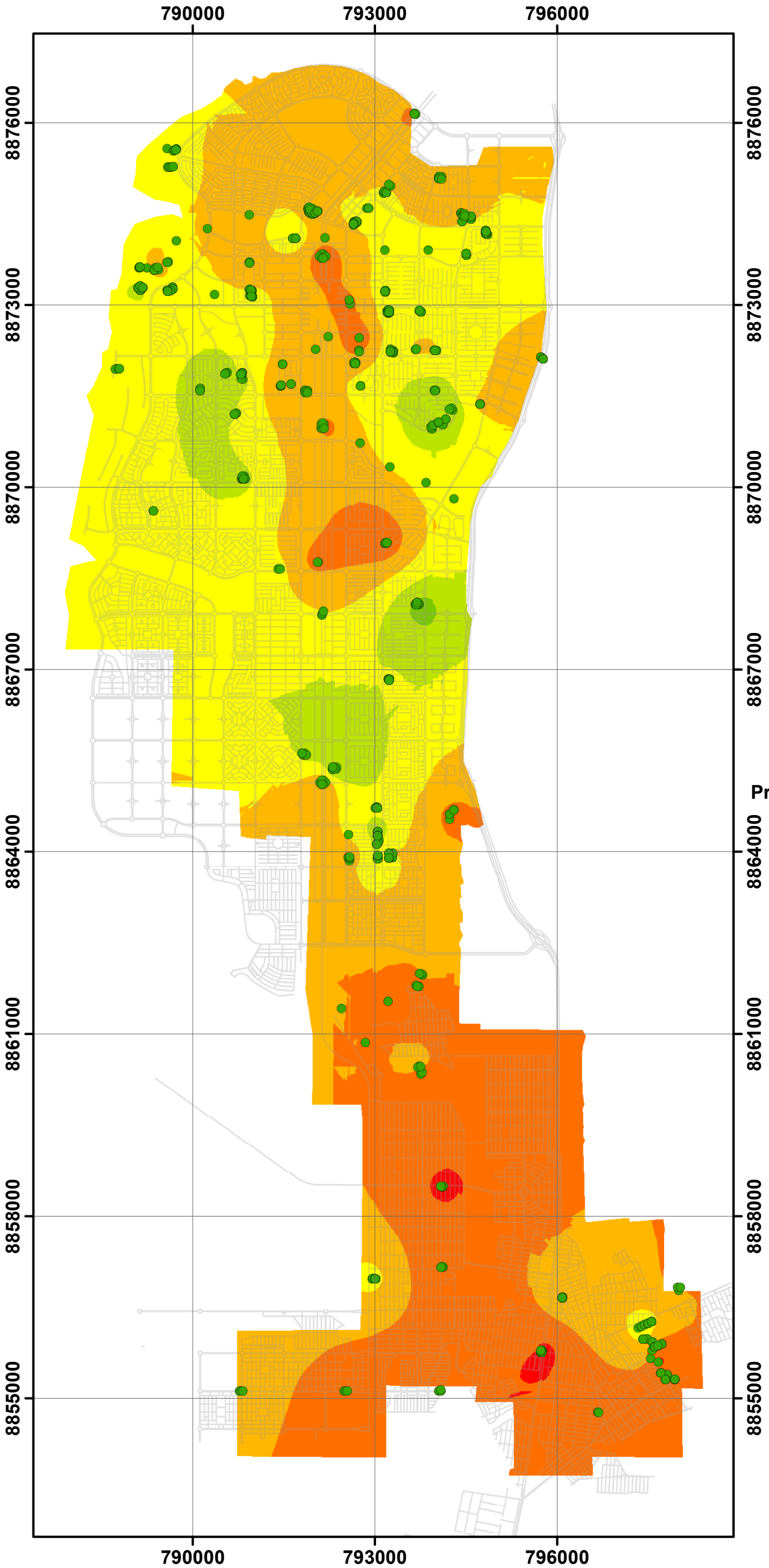


Figura 4.42 - Cotas da superfície impenetrável ao SPT

Carta de Profundidade do Impenetrável (m) - Palmas-TO



LEGENDA

- Ponto de sondagem
- <3
- 3 a 6
- 6 a 9
- 9 a 12
- 12 a 15
- 15 a 18
- >18

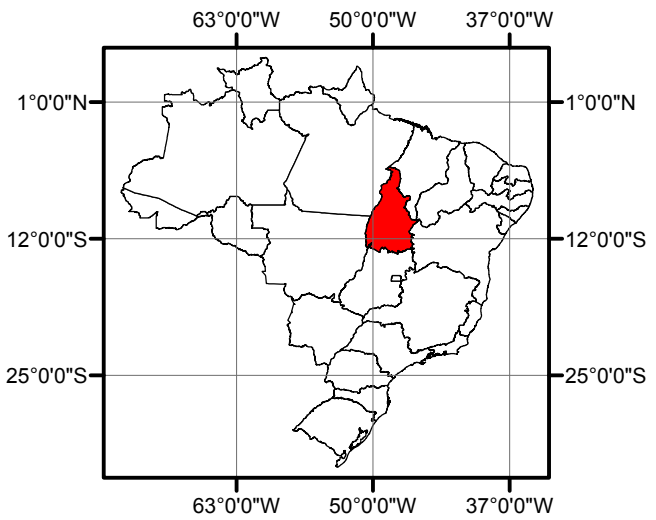
N
W E
S

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul

0 0.5 1 2 3 4
km

Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

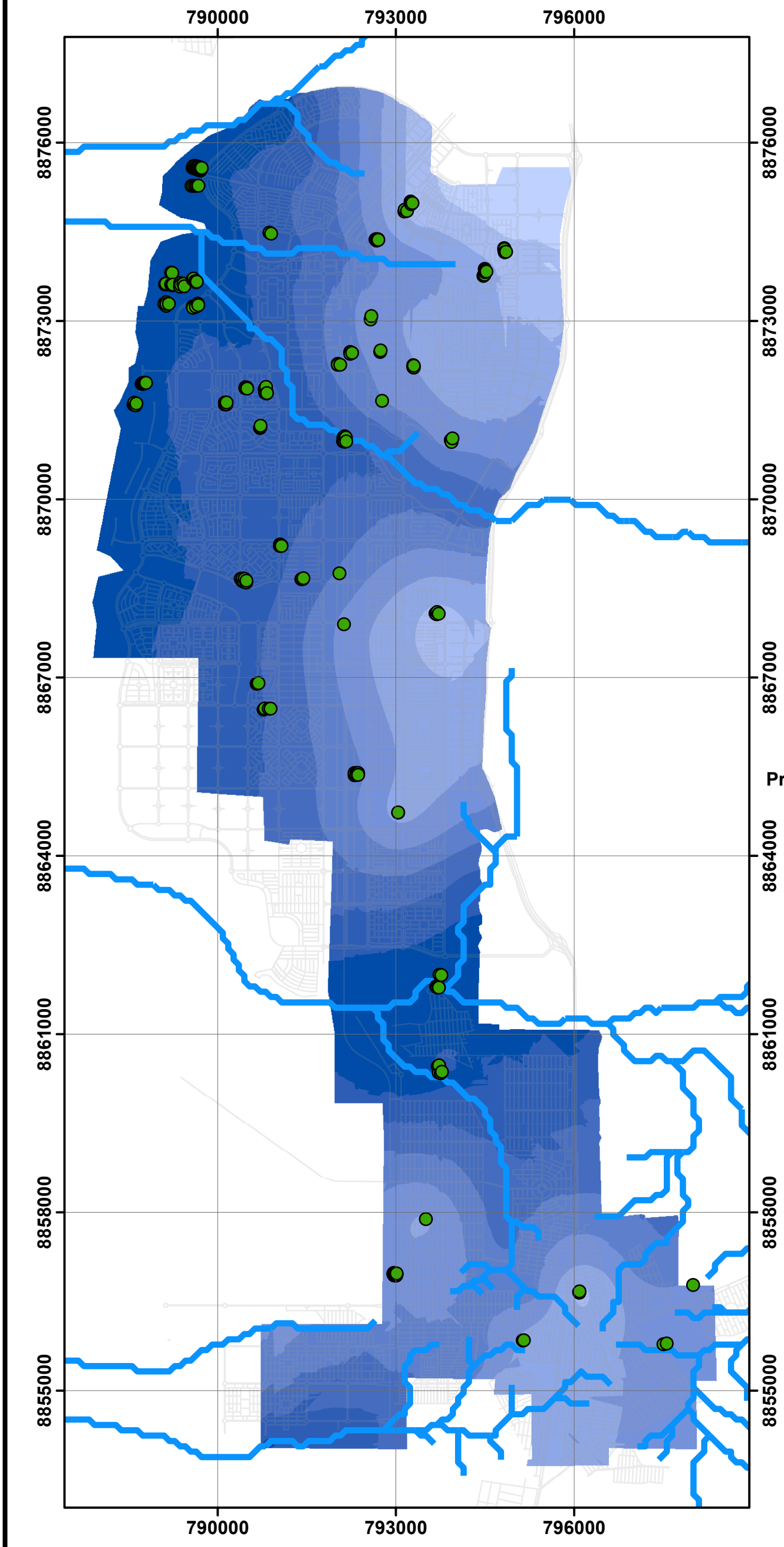


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

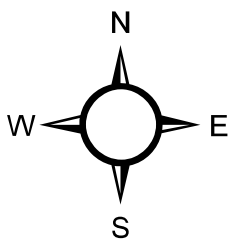
Figura 4.43 - Profundidade do impenetrável ao SPT

Carta Altimétrica do N.A. (m) - Palmas-TO

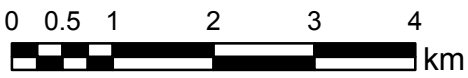


LEGENDA

- Pontos de sondagem
- Hidrografia de Palmas
- <215
- 215 - 225
- 225 - 235
- 235 - 245
- 245 - 255
- 255 - 265
- 265 - 275
- >275

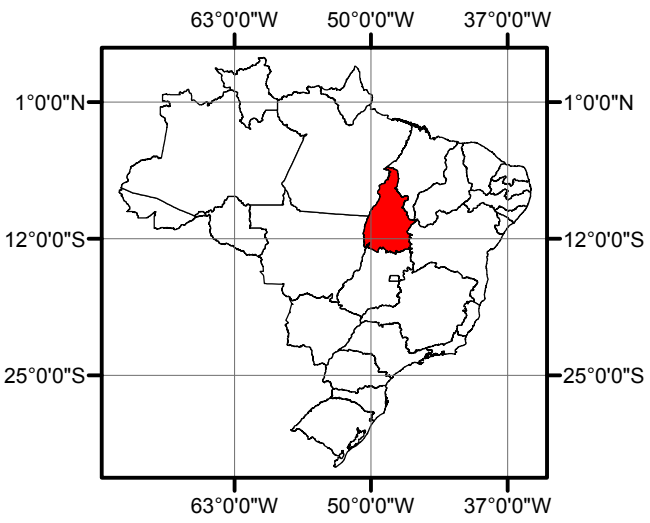


Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul



Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

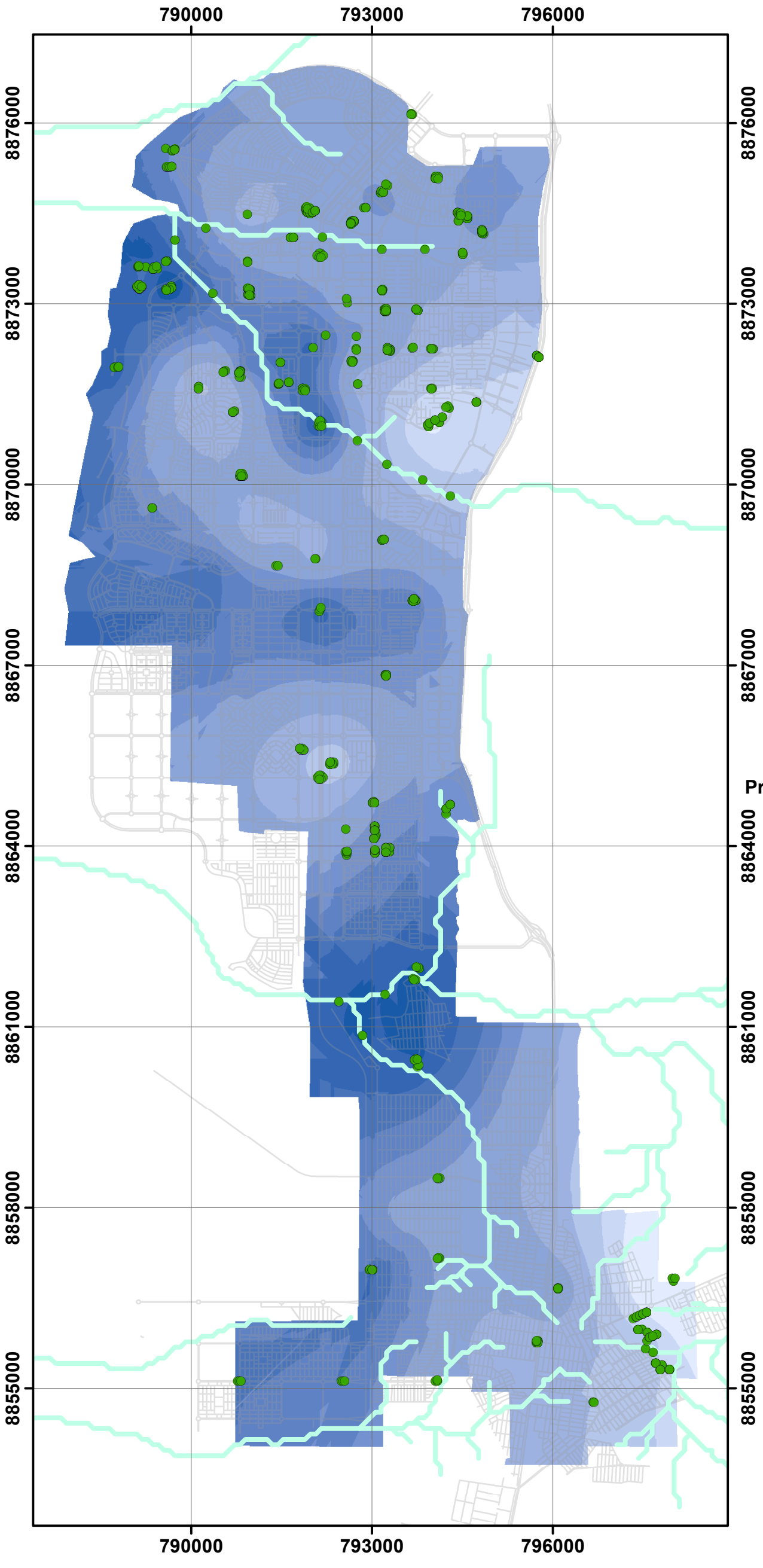


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

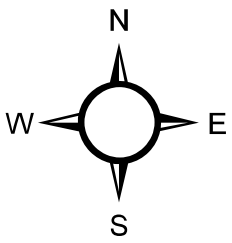
Figura 4.44 - Cota da superfície freática

Carta de Profundidade do NA (m) - Palmas-TO

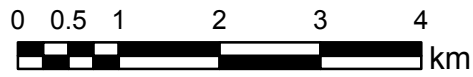


LEGENDA

- Ponto de sondagem
- Hidrografia
- <2
- 2 a 3
- 3 a 4
- 4 a 5
- 5 a 6
- 6 a 8
- 8 a 10
- 10 a 12
- 12 a 14
- >14

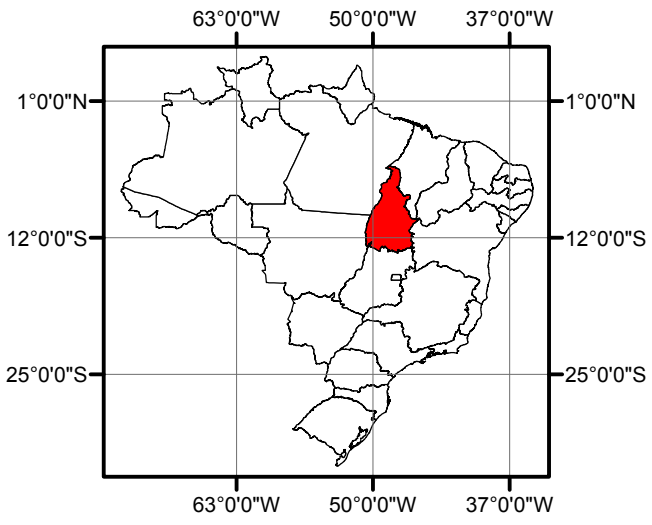


Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul



Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

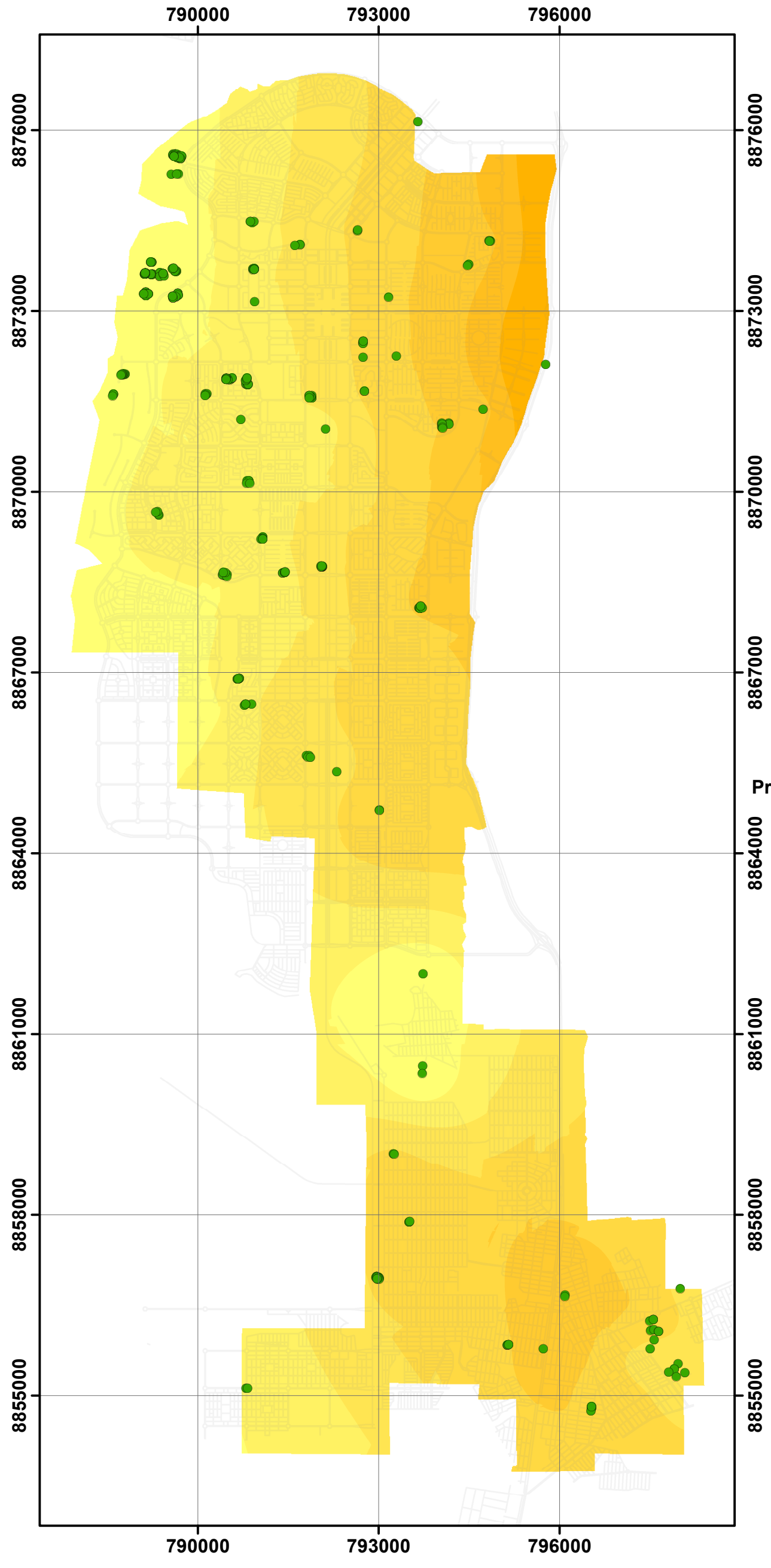


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

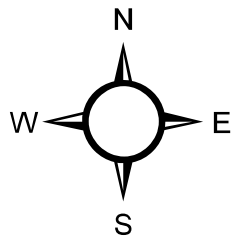
Figura 4.45 - Profundidade do nível freático

Carta Altimétrica do Topo da Camada de Solo Arenoso (m) - Palmas-TO

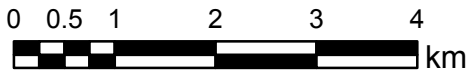


LEGENDA

- Ponto de sondagem
- <220
- 220 - 235
- 235 - 250
- 250 - 265
- 265 - 280
- 280 - 295
- >295

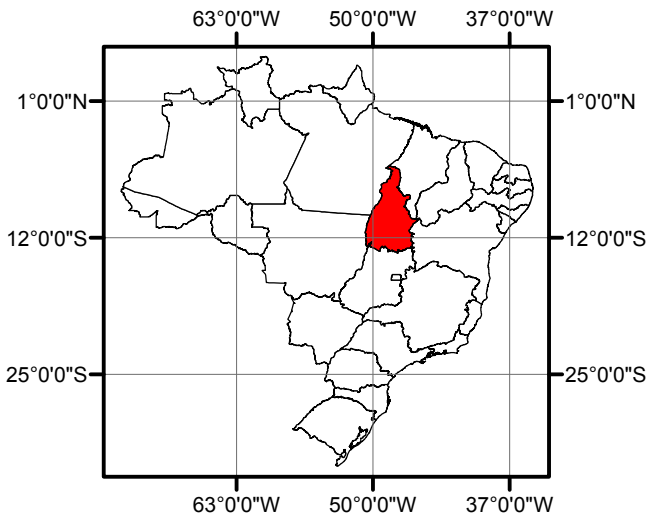


Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul



Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

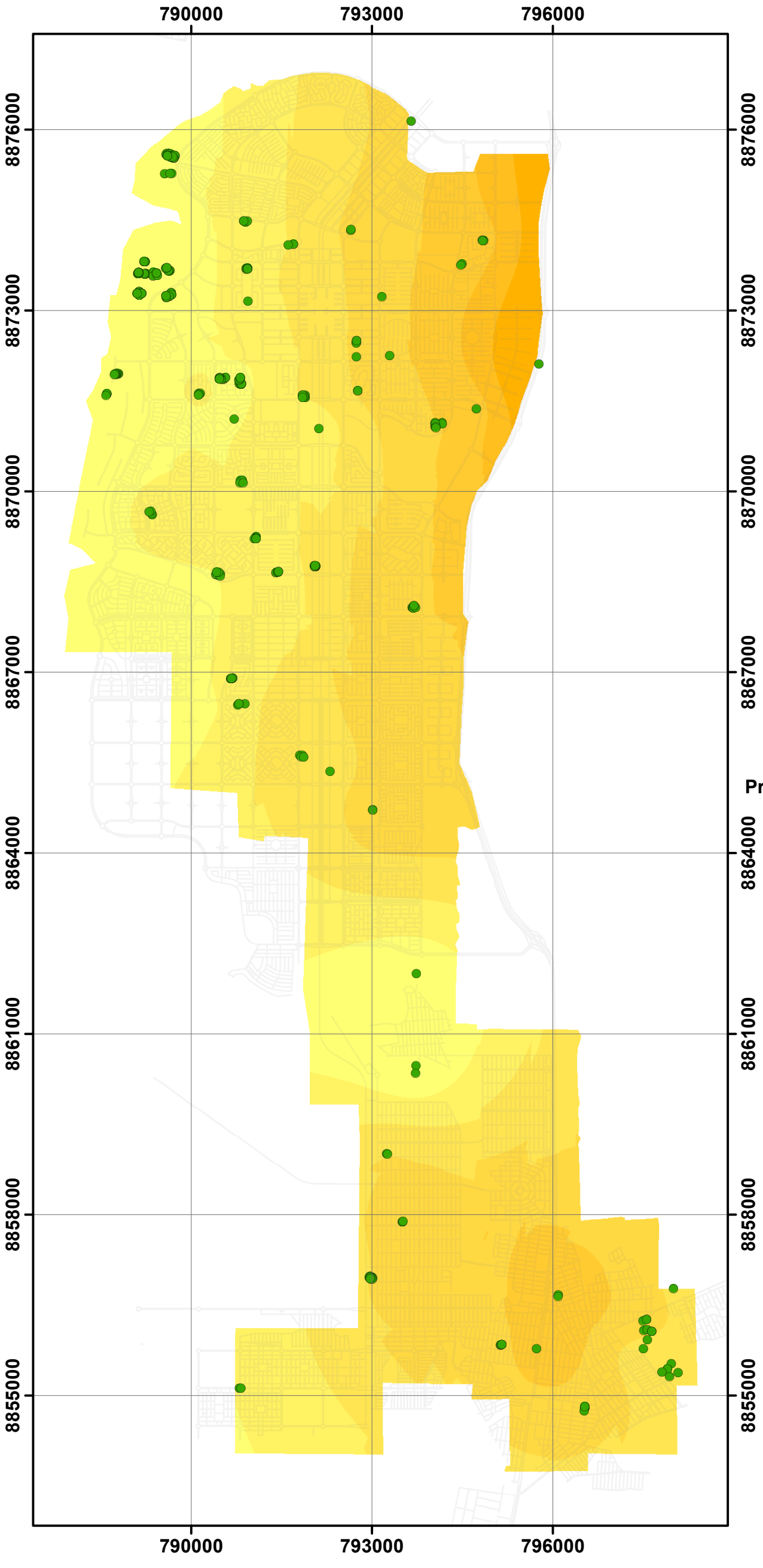


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

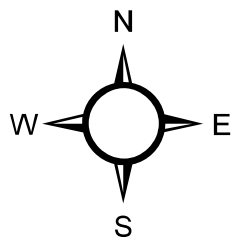
Figura 4.46 - Cotas do topo da camada arenosa

Carta Altimétrica da Base da Camada de Solo Arenoso (m) - Palmas-TO

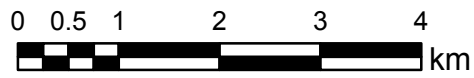


LEGENDA

- Ponto de sondagem
- <220
- 220 - 235
- 235 - 250
- 250 - 265
- 265 - 280
- 280 - 295
- >295

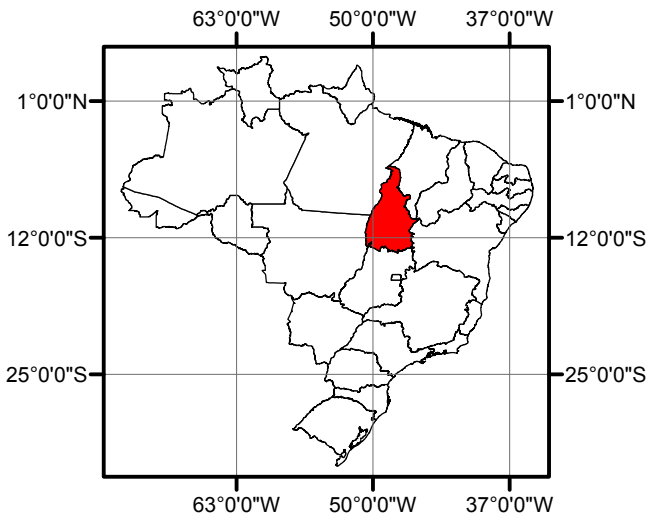


Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul



Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

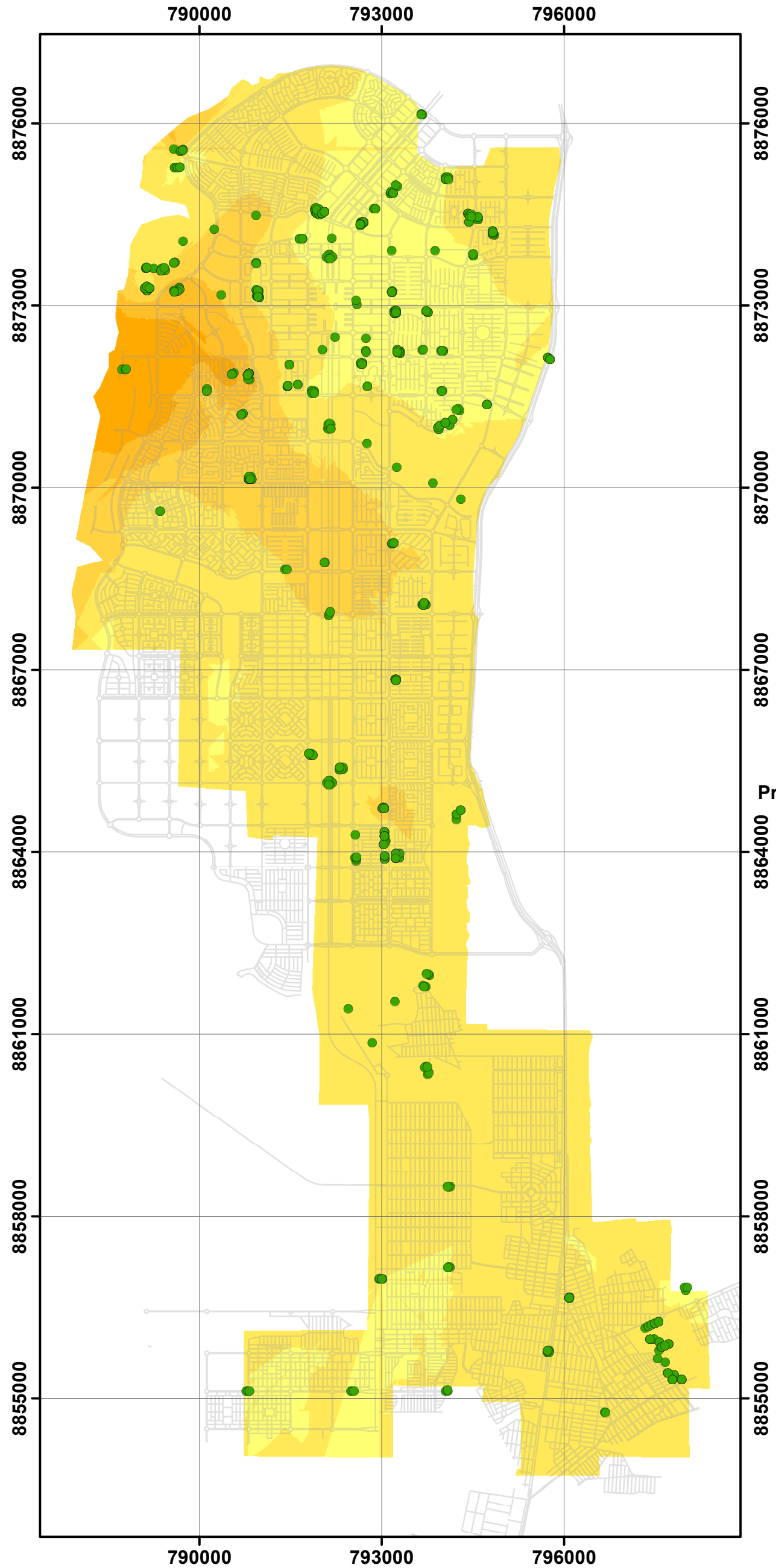


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

Figura 4.47 - Cota da base da camada arenosa

Carta de Espessura da Camada Arenosa (m) - Palmas-TO



LEGENDA

- Ponto de sondagem
- <2
- 2 a 3
- 3 a 4
- 4 a 5
- >5

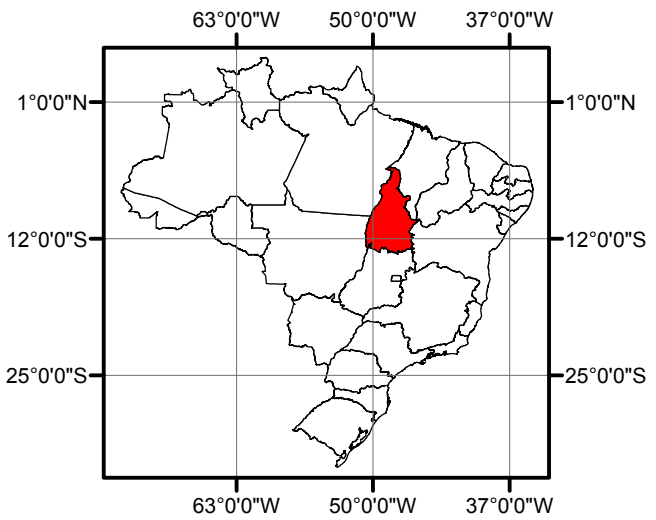
N
W E
S

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul

0 0.5 1 2 3 4
km

Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

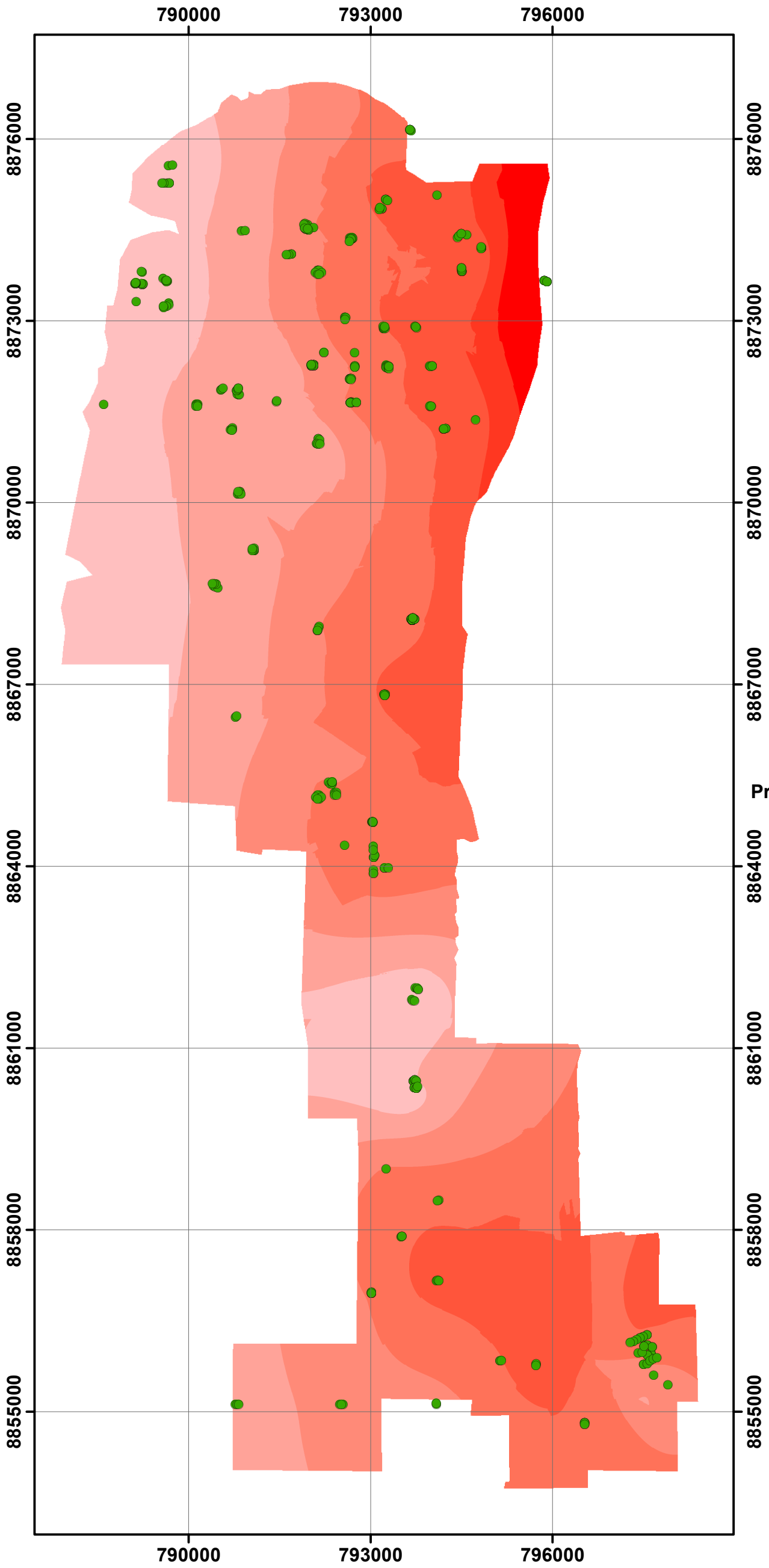


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

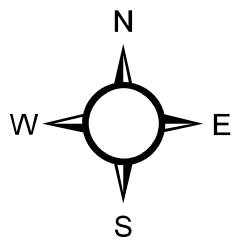
Figura 4.48 - Espessura da camada arenosa

Carta Altimétrica do Topo da Camada de Solo Argiloso (m) - Palmas-TO

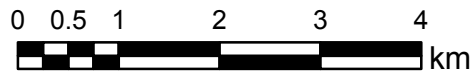


LEGENDA

- Ponto de sondagem
- <220
- 220 - 235
- 235 - 250
- 250 - 265
- 265 - 280
- 280 - 295
- >295

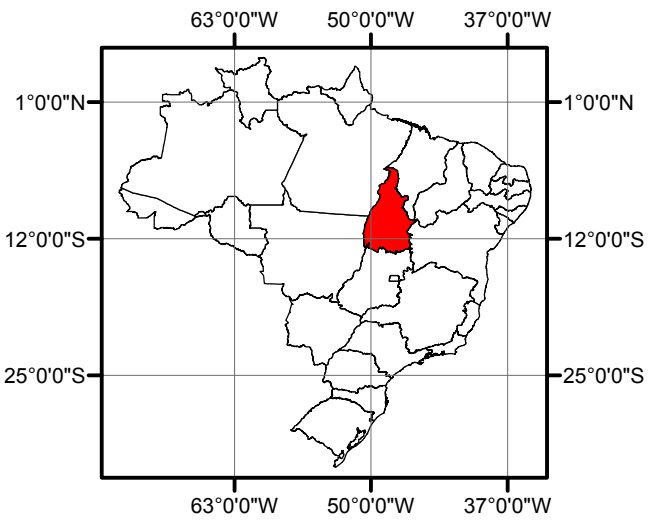


Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul



Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

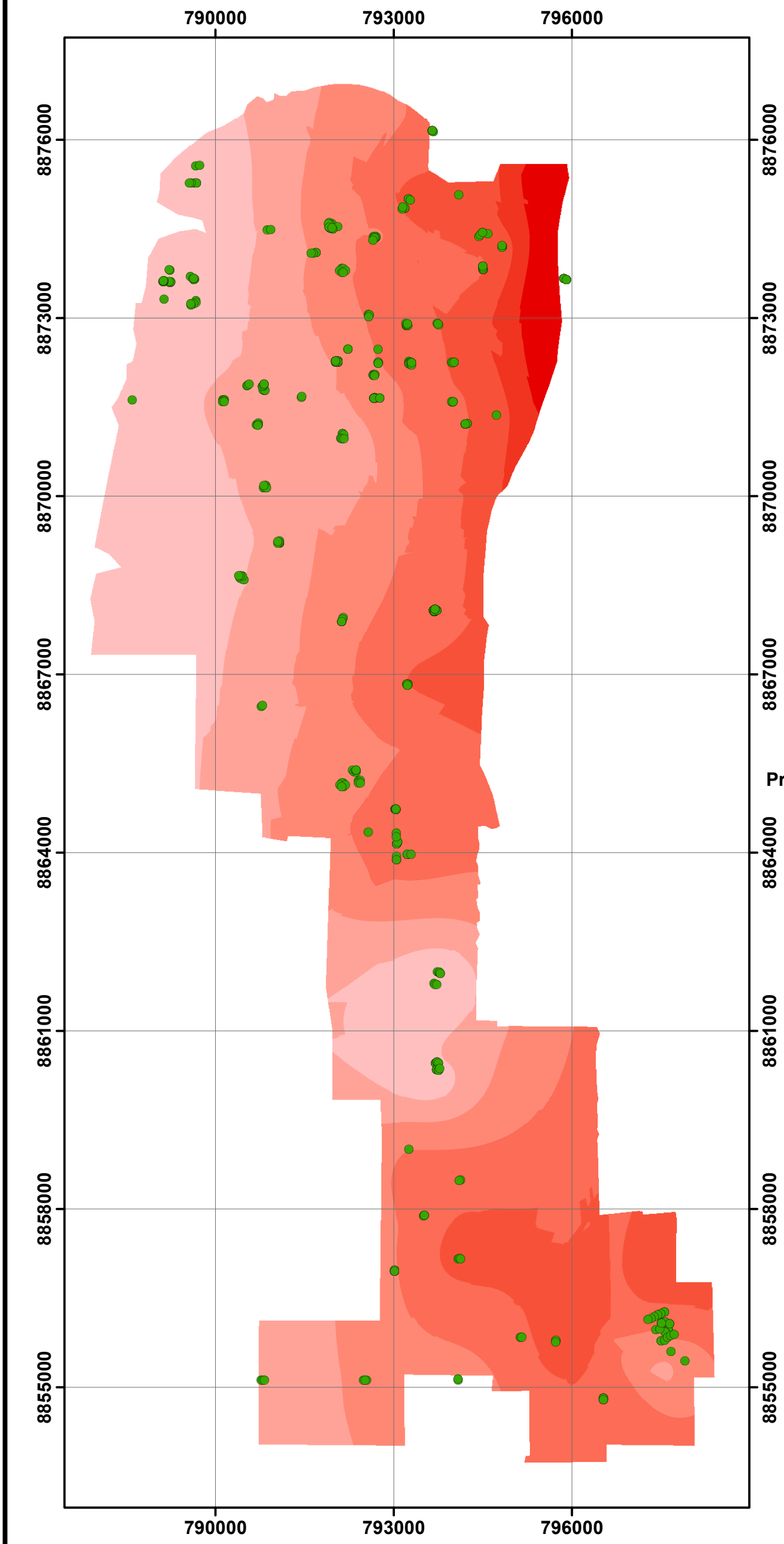


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

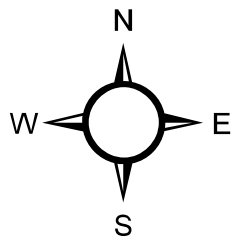
Figura 4.49 - Cotas do topo da camada argilosa

Carta Altimétrica da Base da Camada de Solo Argiloso (m) - Palmas-TO

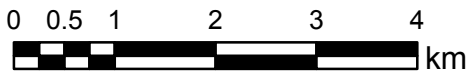


LEGENDA

- Ponto de sondagem
- <220
- 220 - 235
- 235 - 250
- 250 - 265
- 265 - 280
- 280 - 295
- >295

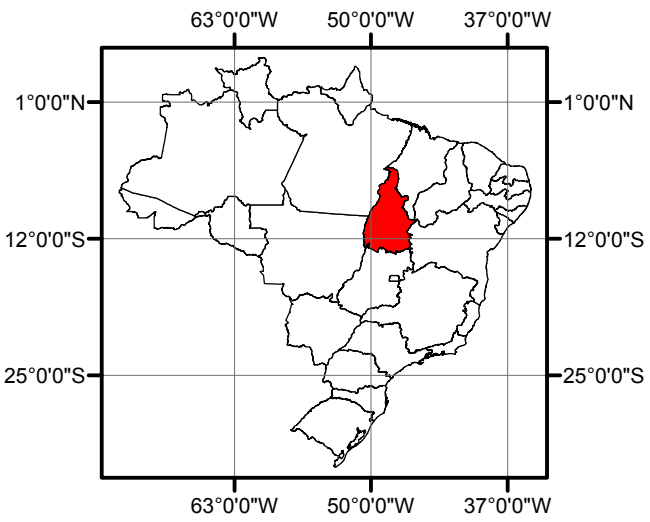


Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul



Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

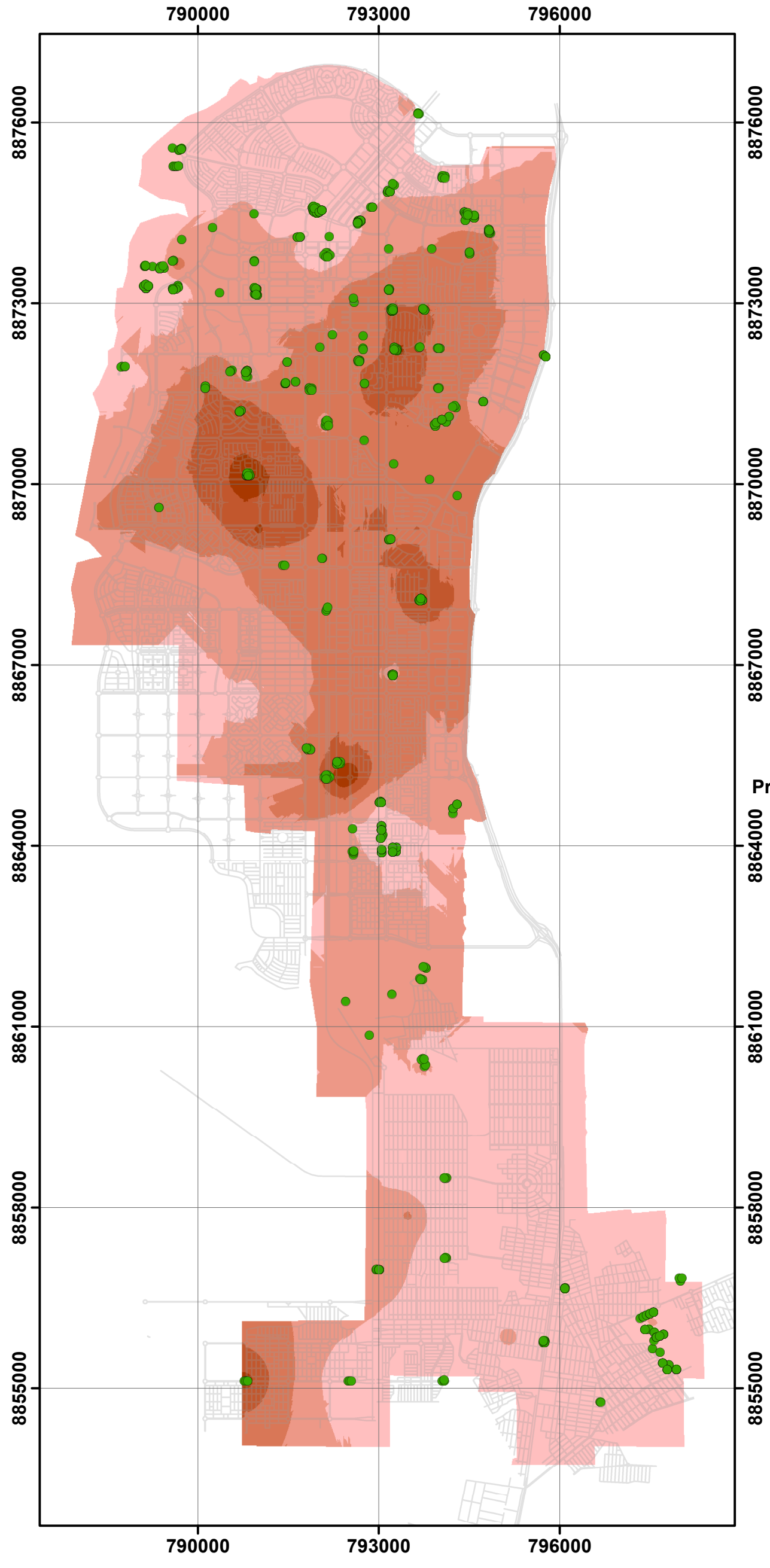


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

Figura 4.50 - Cotas da base da camada argilosa

Carta de Espessura da Camada Argilosa (m) - Palmas-TO



LEGENDA

- Ponto de sondagem
- <3
- 3 a 4
- 4 a 5
- 5 a 6
- >6

N
W E
S

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul

0 0.5 1 2 3 4
km

Escala 1:75.000

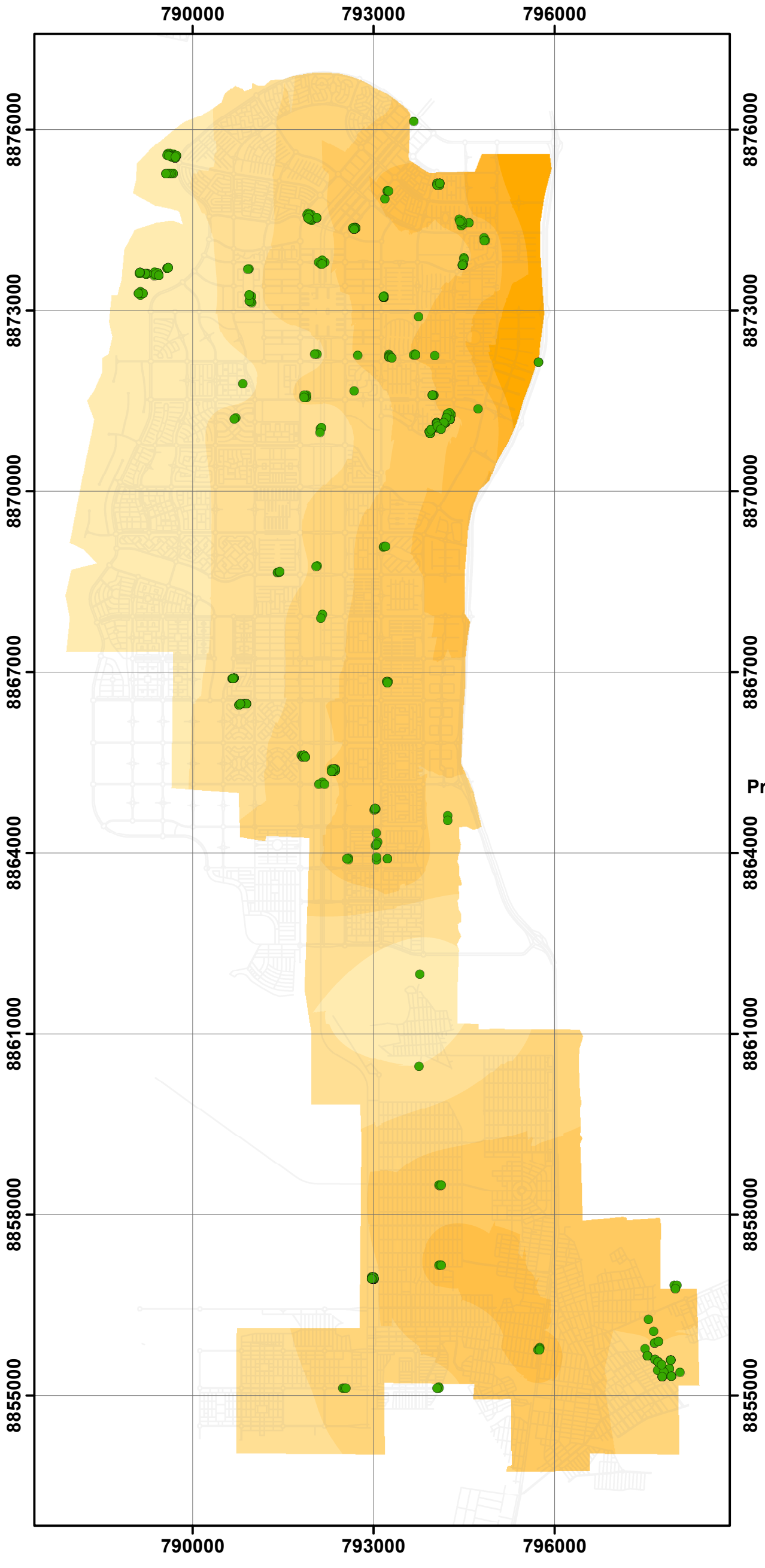
Localização do Estado do Tocantins - Brasil

Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

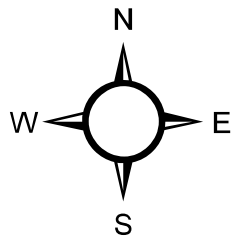
Figura 4.51 - Espessura da camada argilosa

Carta Altimétrica do Topo da Camada de Solo Siltoso (m) - Palmas-TO

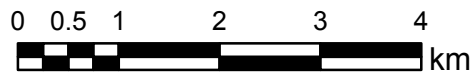


LEGENDA

- Ponto de sondagem
- <220
- 220 - 235
- 235 - 250
- 250 - 265
- 265 - 280
- 280 - 295
- >295

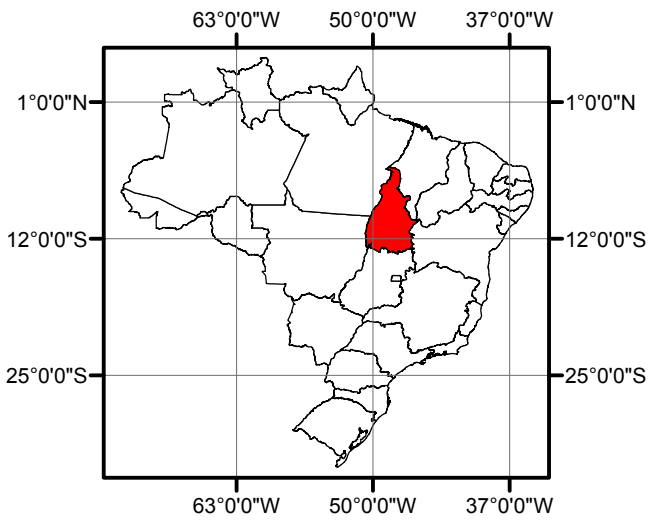


Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul



Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

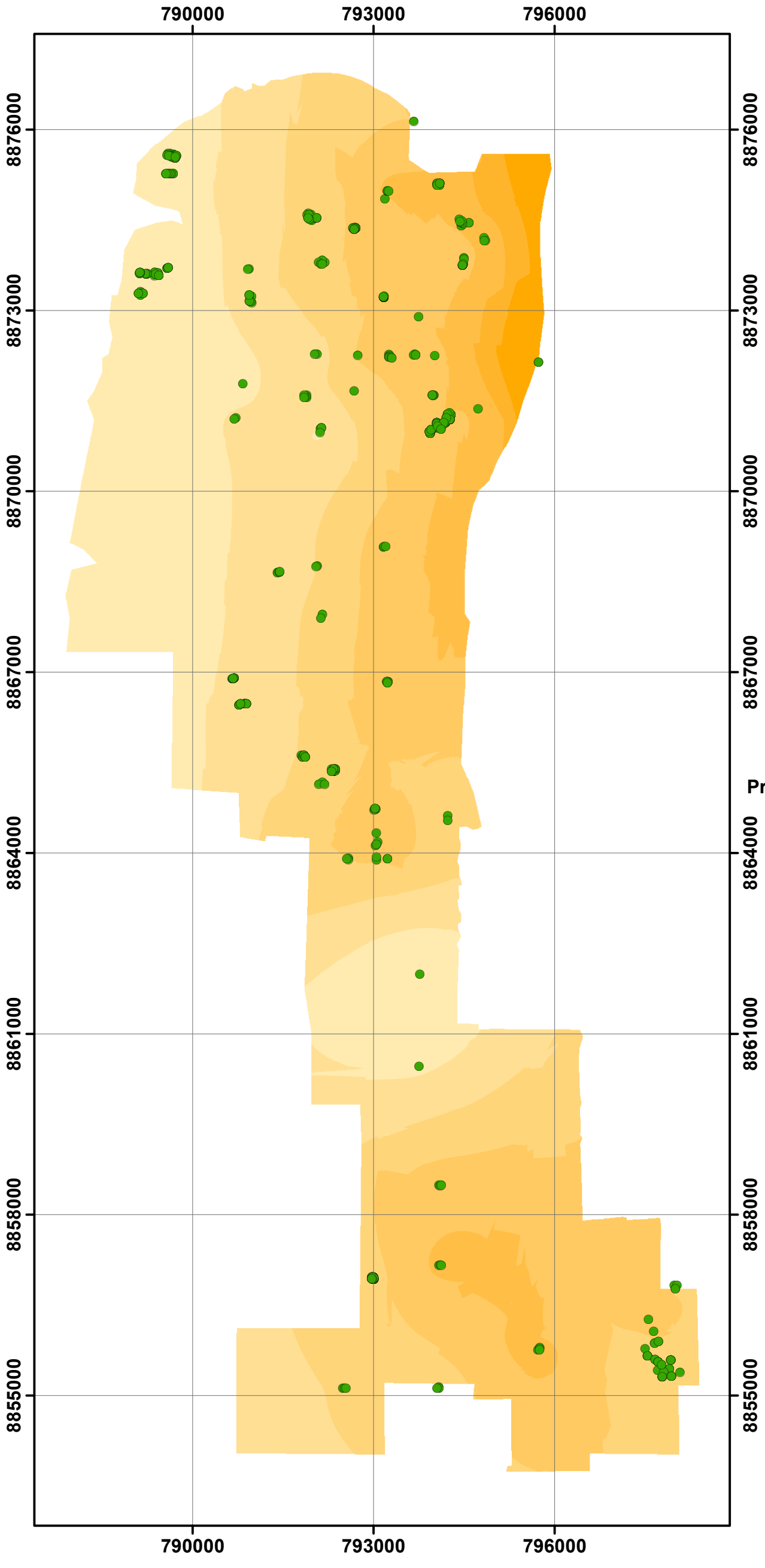


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

Figura 4.52 - Cotas do topo da camada siltosa

Carta Altimétrica da Base da Camada de Solo Siltoso (m) - Palmas-TO



LEGENDA

- Ponto de sondagem
- <220
- 220 - 235
- 235 - 250
- 250 - 265
- 265 - 280
- 280 - 295
- >295

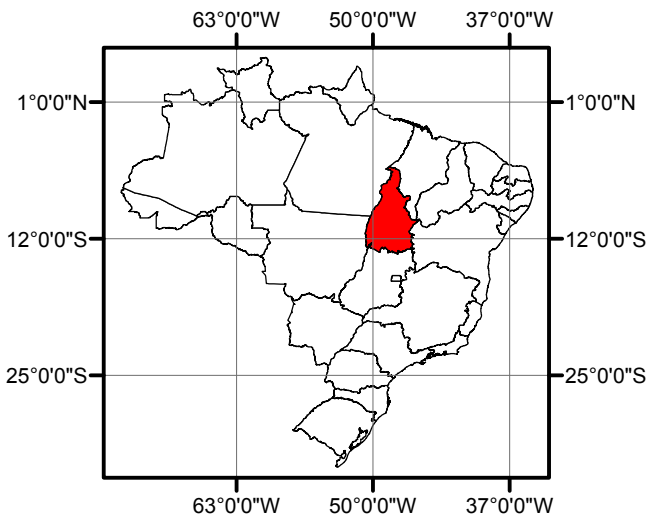
N
W E
S

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul

0 0.5 1 2 3 4
km

Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

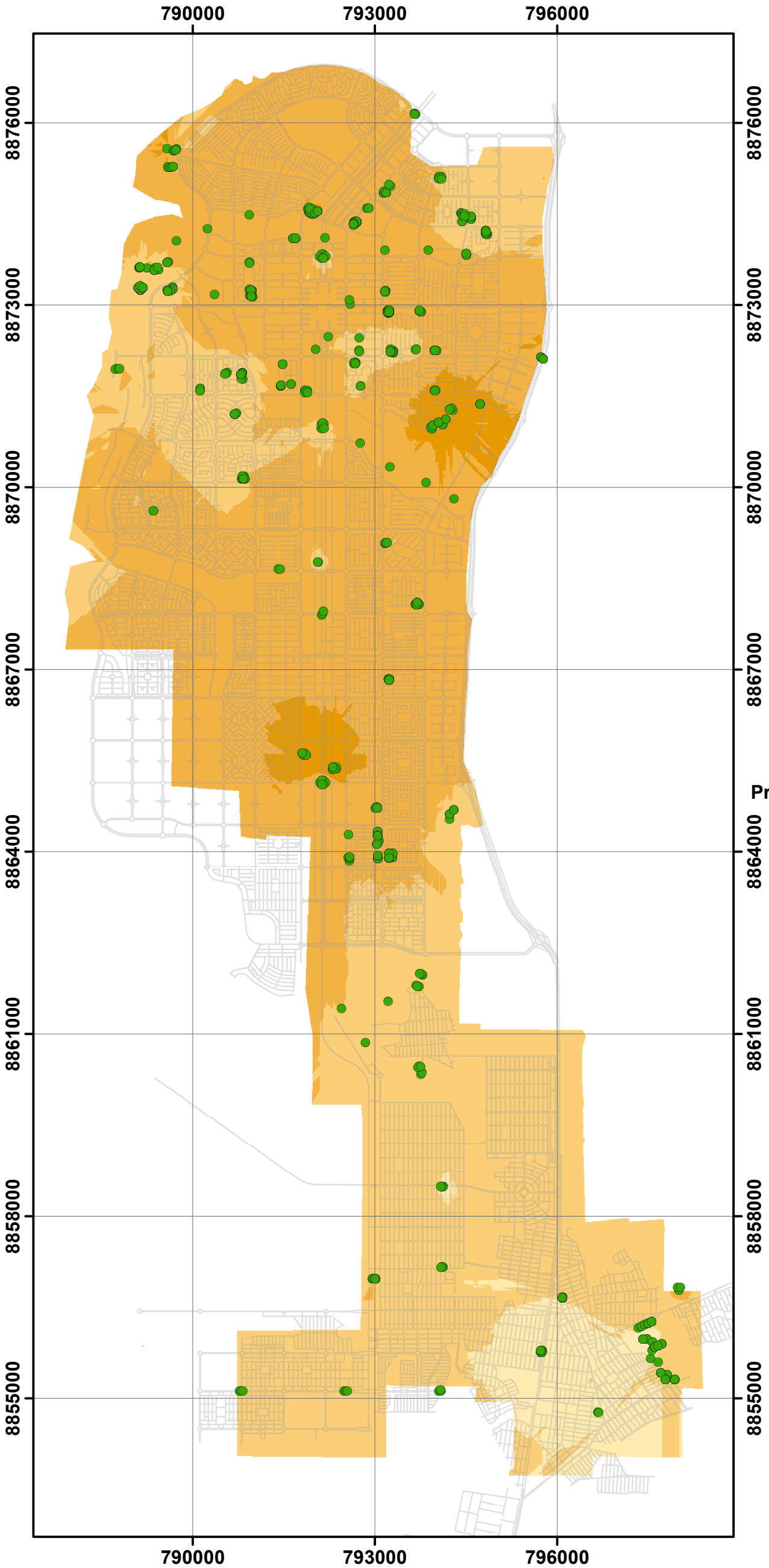


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

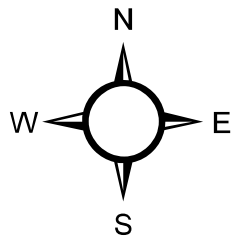
Figura 4.53 - Cotas da base da camada siltosa

Carta de Espessura da Camada Siltosa (m) - Palmas-TO

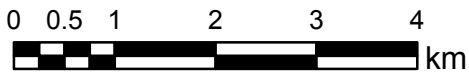


LEGENDA

- Ponto de sondagem
- <2
- 2 a 3
- 3 a 4
- >4

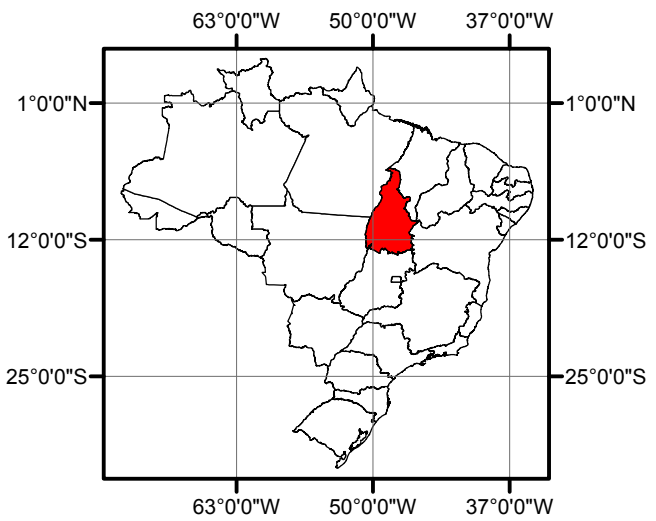


Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul



Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

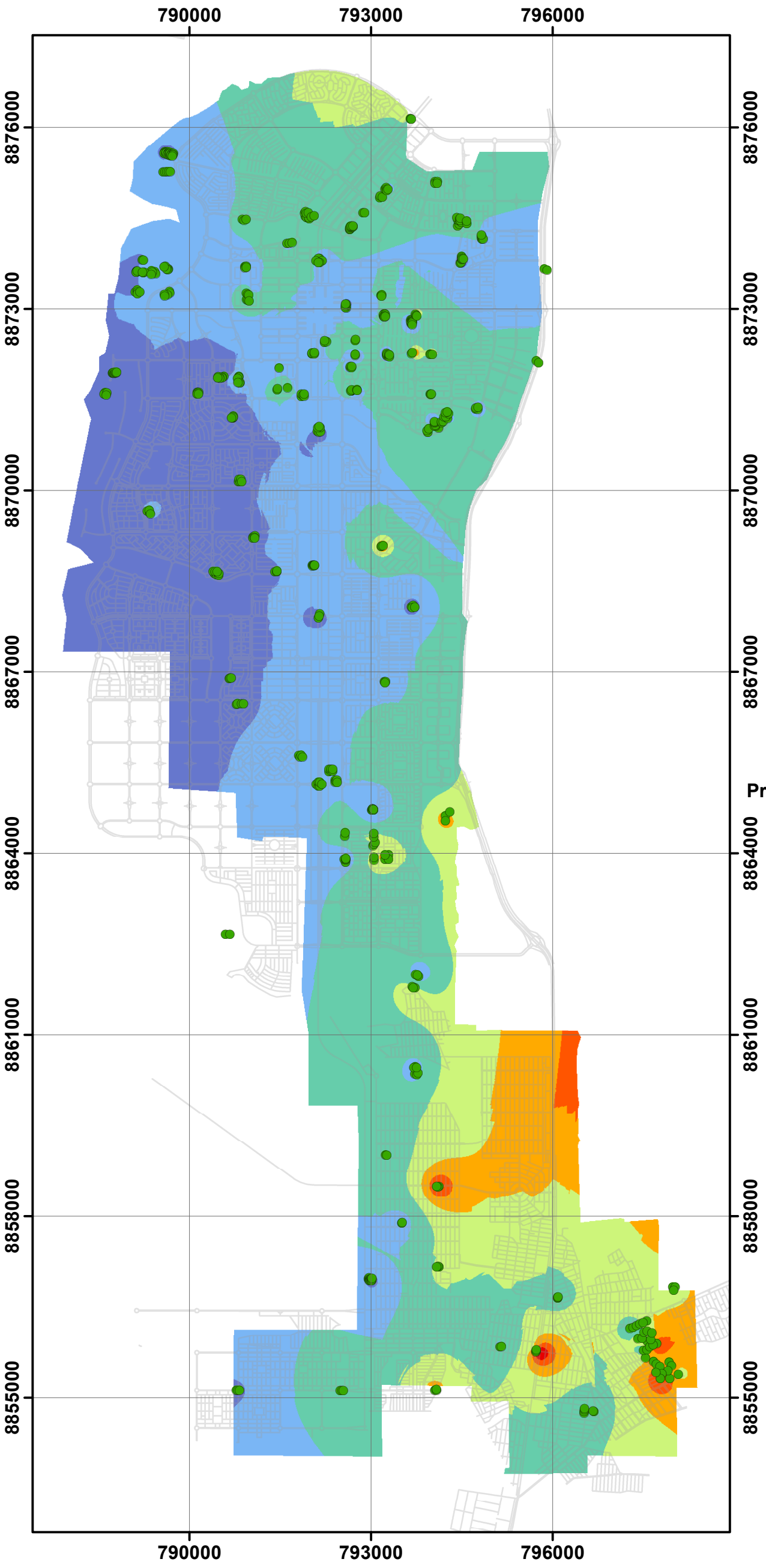


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

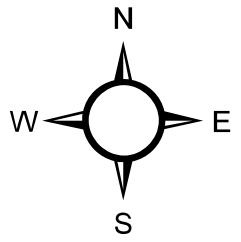
Figura 4.54 - Espessura da camada siltosa

Carta de Valores NSPT (Prof. 2m) - Palmas-TO

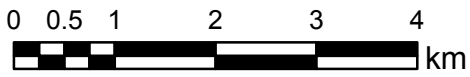


LEGENDA

- Ponto de sondagem
- <5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- >50

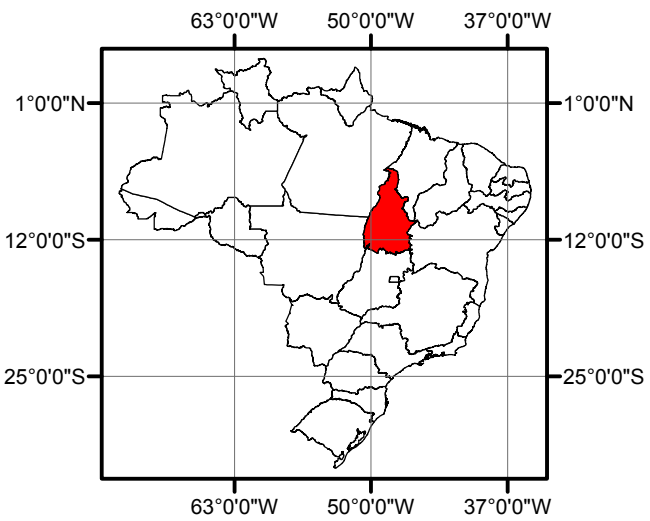


Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul



Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

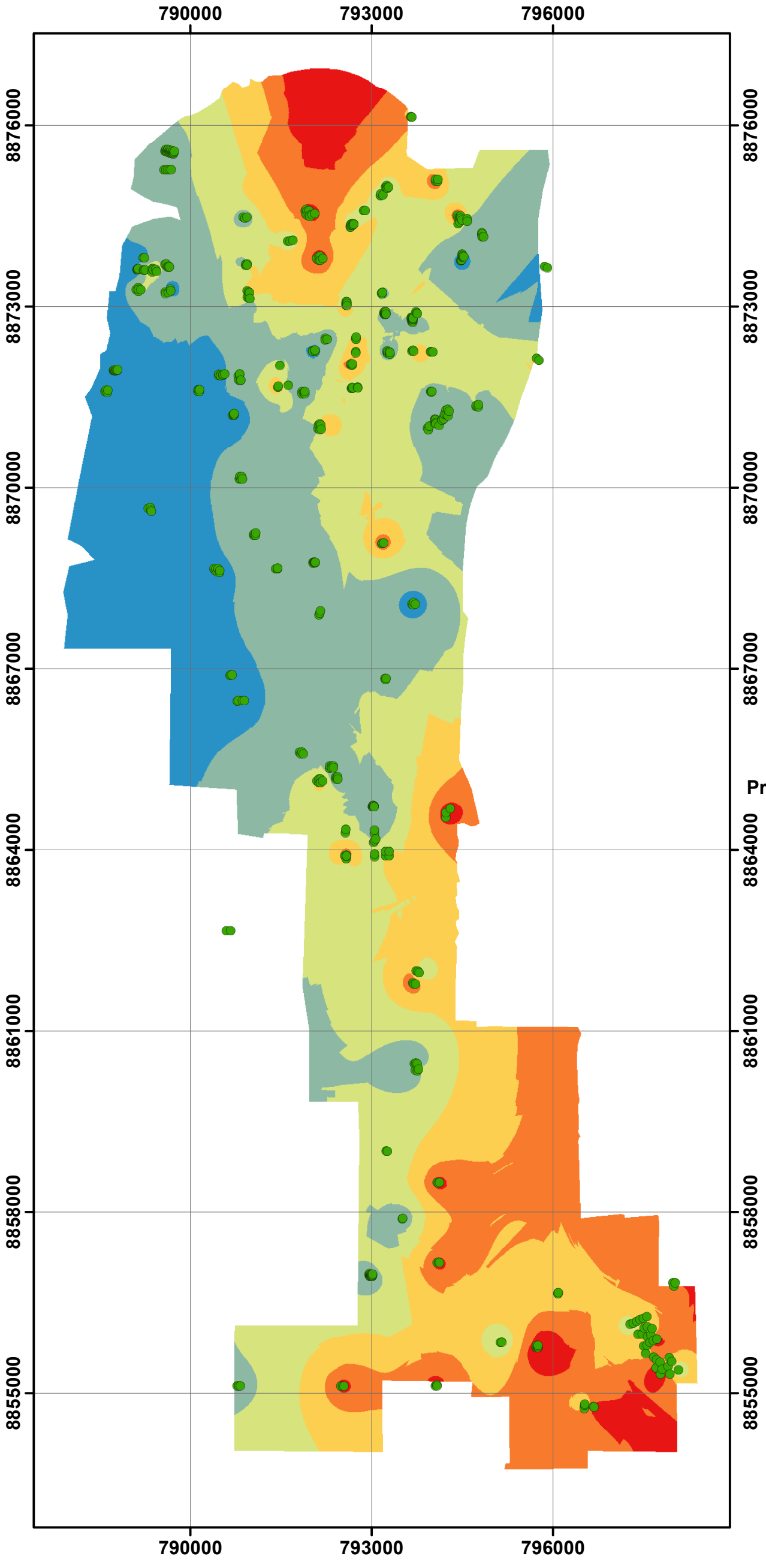


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

Figura 4.55 - Valores de NSPT a 2 m de profundidade

Carta de Valores NSPT (Prof. 5m) - Palmas-TO



LEGENDA

- Ponto de sondagem
- <10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- >50

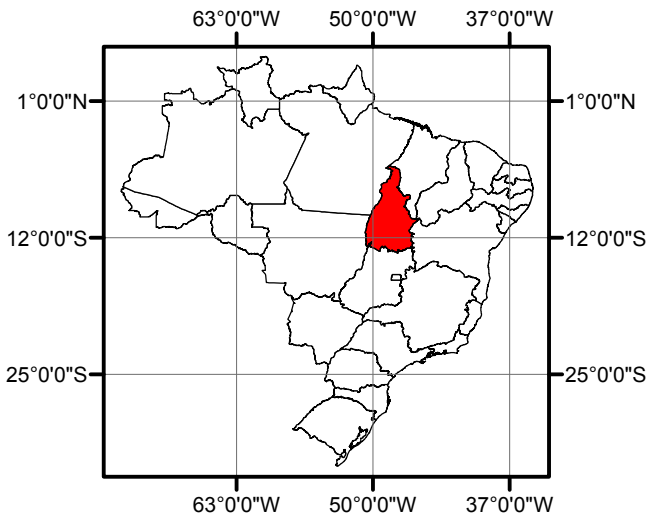
N
W E
S

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul

0 0.5 1 2 3 4
km

Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

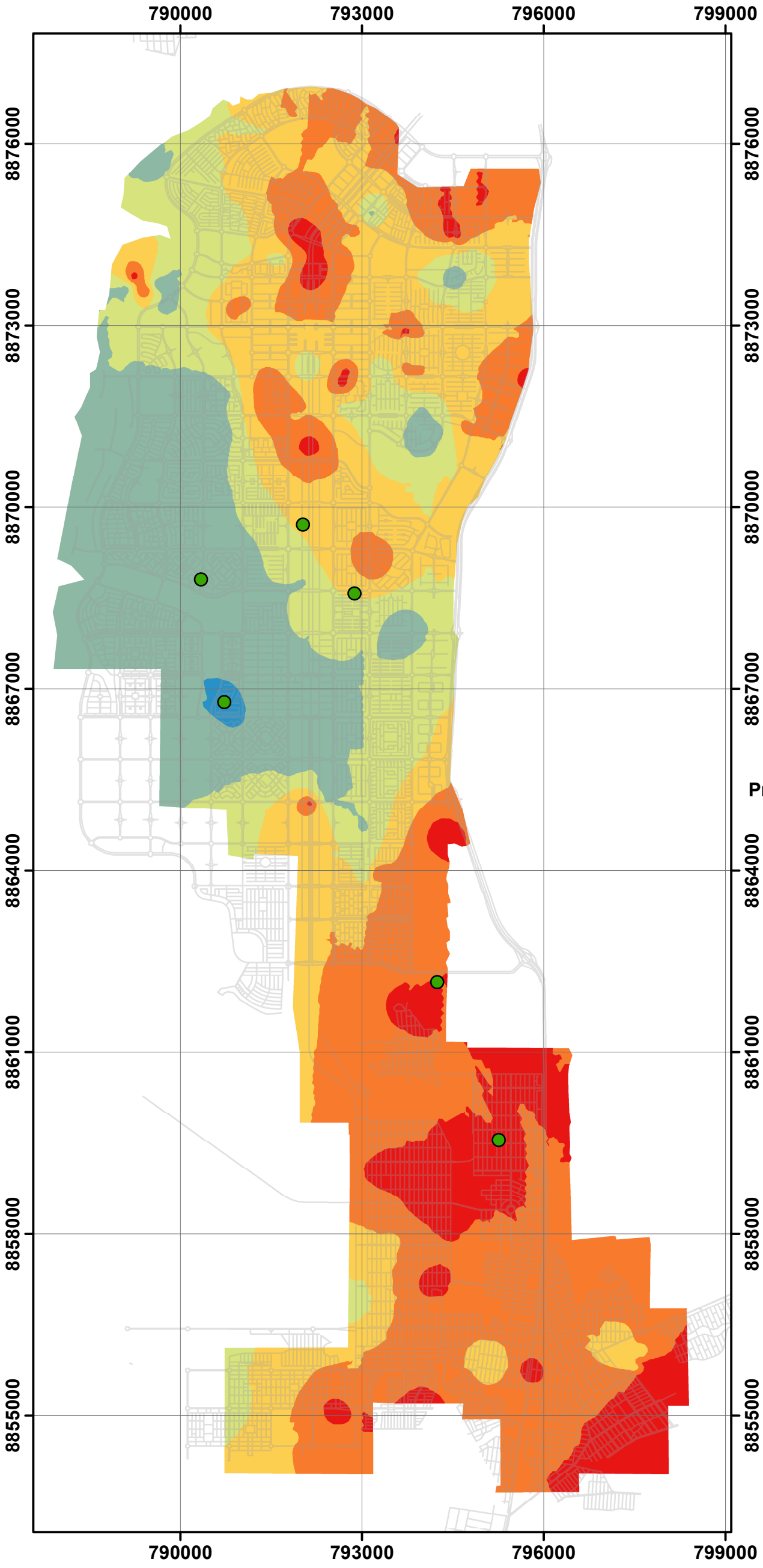


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

Figura 4.56 - Valores de NSPT a 5 m de profundidade

Carta de Valores NSPT (Prof 7m) - Palmas - TO



LEGENDA

- Sondagem
- <10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- >50

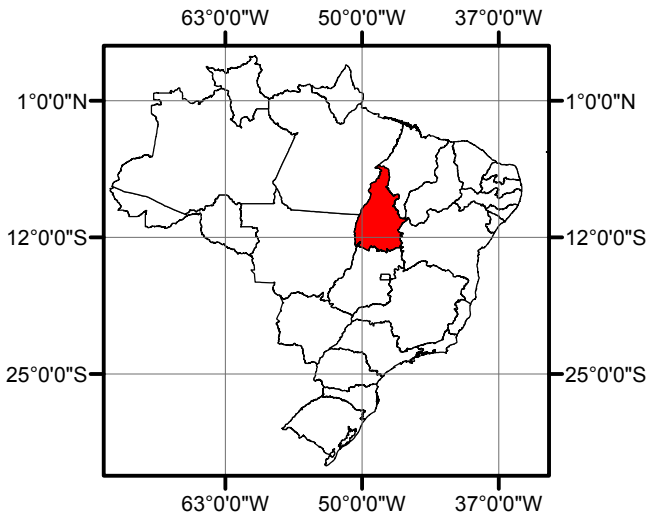
N
W
E
S

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul

0 0.5 1 2 3 4
km

Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

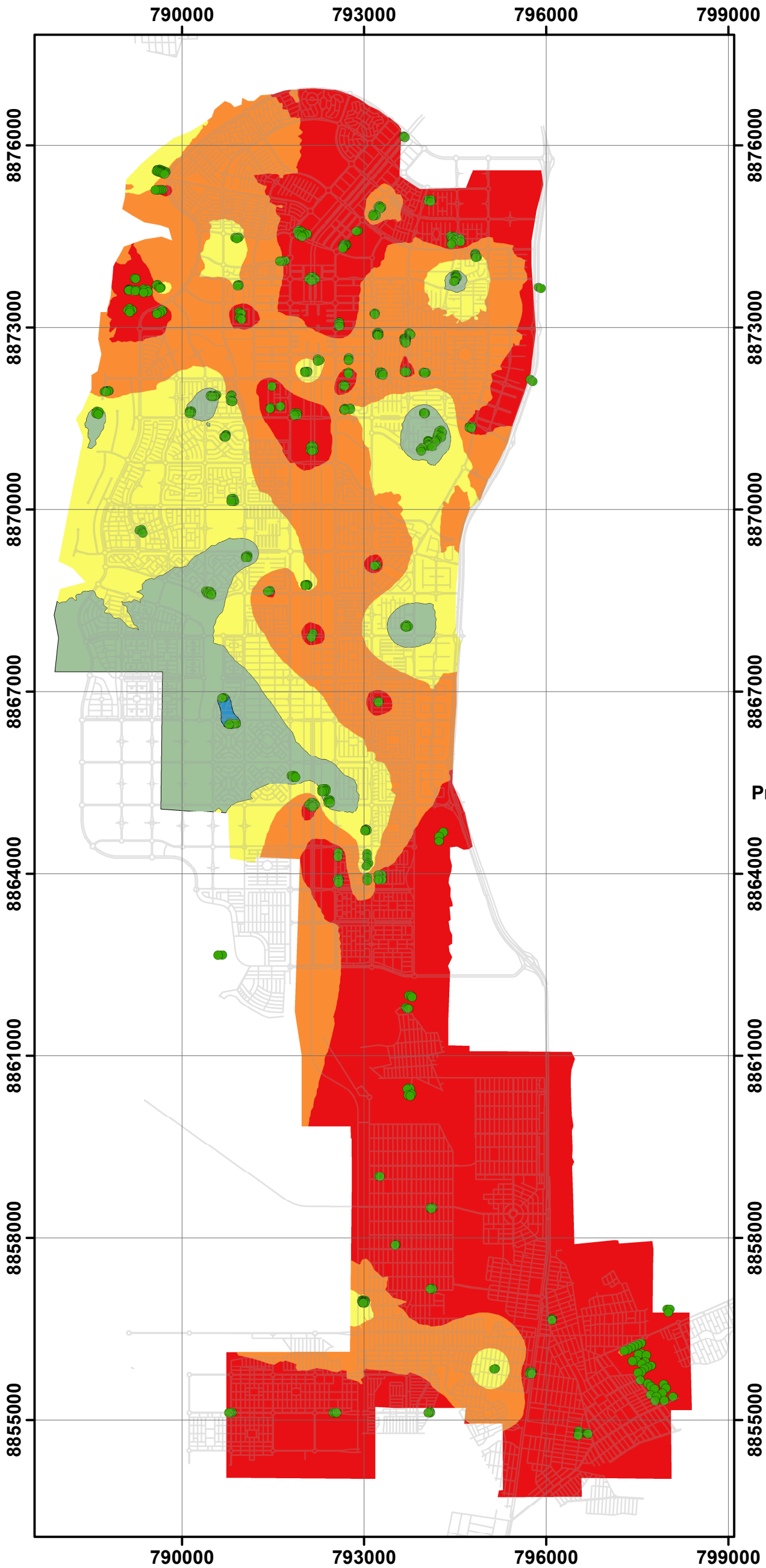


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

Figura 4.57 - Valores de NSPT a 7 m de profundidade

Carta de Valores NSPT (Prof 10m) - Palmas - TO



LEGENDA

- Sondagem
- <10
- 10 - 20
- 20 - 30
- 30 - 40
- 40 - 50
- >50

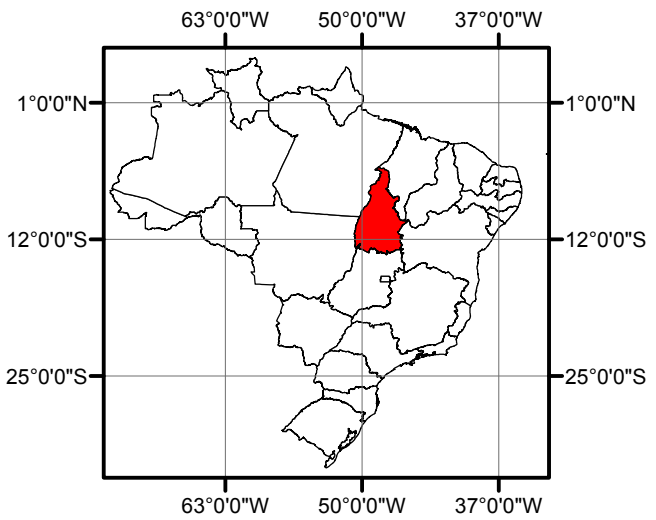
N
W E
S

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul

0 0.5 1 2 3 4
km

Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil



Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

Figura 4.58 - Valores de NSPT a 10 m de profundidade

4.6.5 HIPSOMETRIA

Cartas hipsométricas estão presentes em praticamente todos os trabalhos de cartografia. A partir delas podem ser observadas as feições do terreno, como pontos de elevação, depressão e presença de corpos d'água, por exemplo.

A carta hipsométrica desenvolvida para a área de estudo colaborou na compreensão do aspecto geral do terreno e subsidiou o desenvolvimento de todas as demais cartas fornecendo a cota do nível do terreno (Figura 4.56).

4.6.6 DECLIVIDADE

A carta de declividade evidencia o relevo suave da área de estudo, mas revela aspectos importantes do terreno, tal como a diferença na declividade entre as margens Norte e Sul dos córregos que cortam a cidade (Figura 4.57).

Os cursos d'água que apresentam direção Leste-Oeste, ortogonal ao Lago de Palmas apresentam a margem norte com uma declividade significativamente maior que aquelas observadas em suas margens Sul.

De maneira geral, contudo, a declividade é suave para a maior parte da área, sendo um critério a ser considerado em eventuais análises de suscetibilidade ao alagamento.

4.6.7 CURVATURAS PLANA E DE PERFIL

As curvaturas planas e de perfil mostram um relevo muito homogêneo na maior parte da área de estudo, mas com concentrações de feições acidentadas nas proximidades dos cursos d'água que cortam a cidade. No extremo Sul da cidade, por outro lado, observam-se feições bastante distintas, com poucas áreas planas ou retilíneas, revelando que se trata de uma área com características bem particulares em relação ao restante da cidade (Figuras 4.58 e 4.59).

4.6.8 CARTA DE COMPARTIMENTAÇÃO GEOTÉCNICA

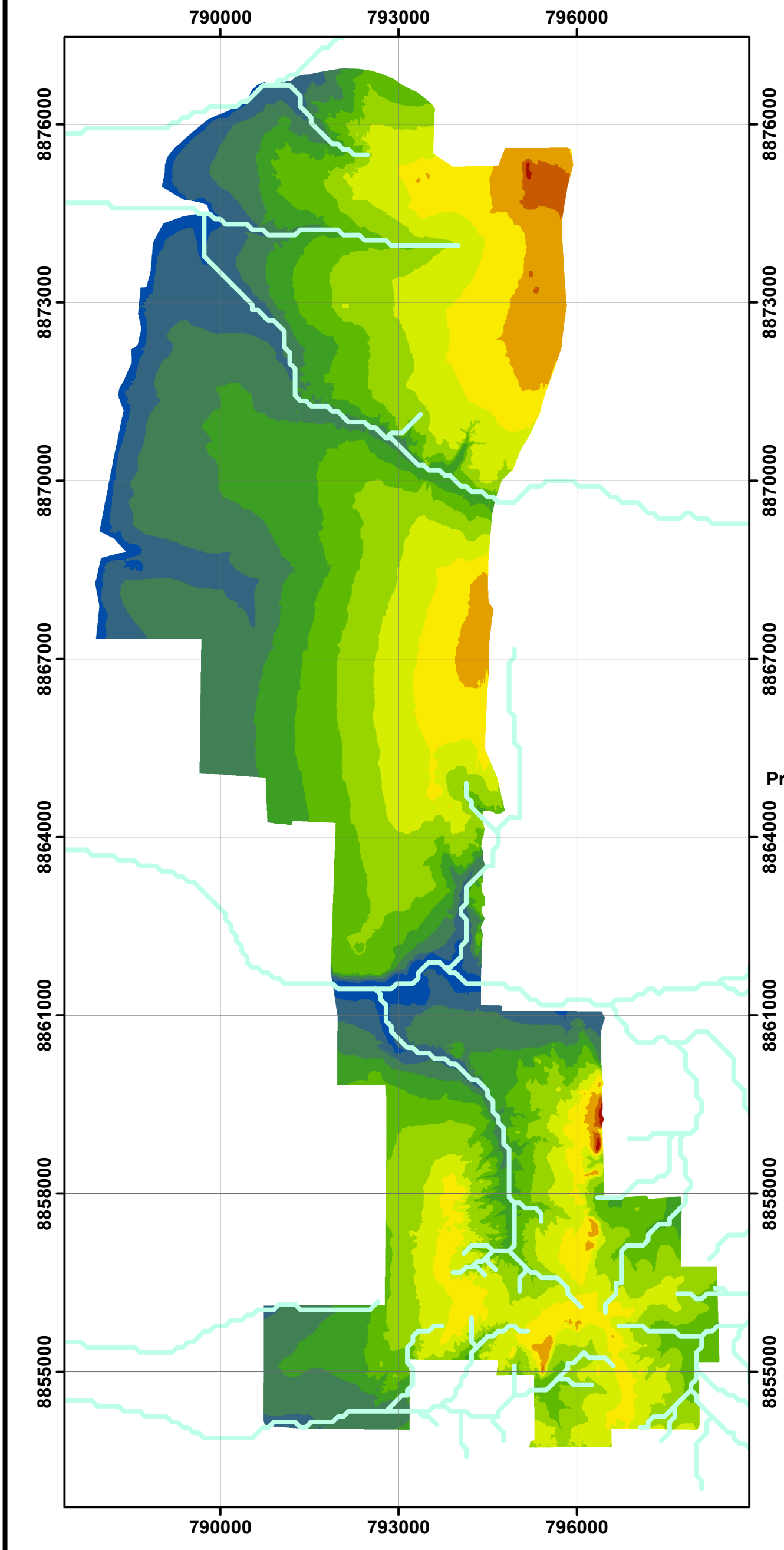
Cartas de compartimentação geotécnica são utilizadas na identificação de porções do terreno com características geotécnicas similares, o que permite fazer avaliações de diversas naturezas e finalidades.

Encontraram-se três Províncias na área de estudo: Embasamento Cristalino (Extremo Sul), Formação Pimenteiras (Centro-Leste) e os Terraços Fluviais (Oeste).

Quanto aos Padrões, Podem ser notadas três classes: Baixa densidade de drenagem (Porção predominante), Moderada densidade de drenagem (Sul do Córrego Comprido) e Elevada densidade de drenagem (Próximo aos cursos d'água e extremo Sul).

Às unidades encontradas indicam uma relação entre a ocorrência de solos arenosos com declividades baixas e uma relação entre declividades mais acentuadas com solos argilosos e siltosos (Figura 4.60).

Carta Hipsométrica - Palmas-TO



LEGENDA

Hidrografia

Hipsometria

- <210
- 210 a 220
- 220 a 230
- 230 a 240
- 240 a 250
- 250 a 260
- 260 a 270
- 270 a 280
- 280 a 290
- 290 a 300
- >300

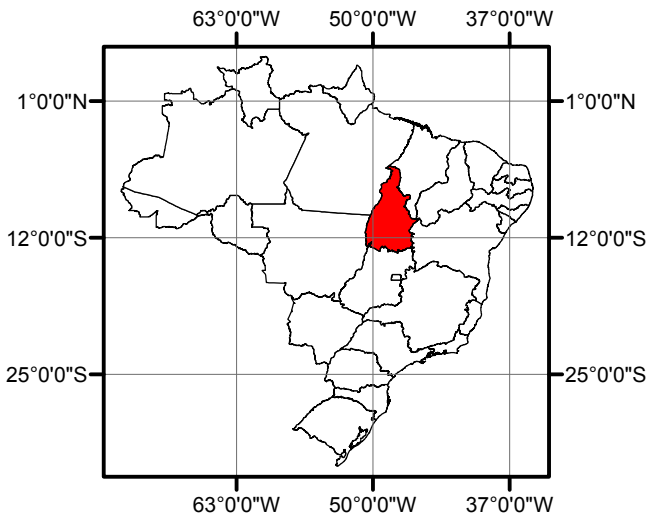
N
W E
S

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul

0 0.5 1 2 3 4
km

Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

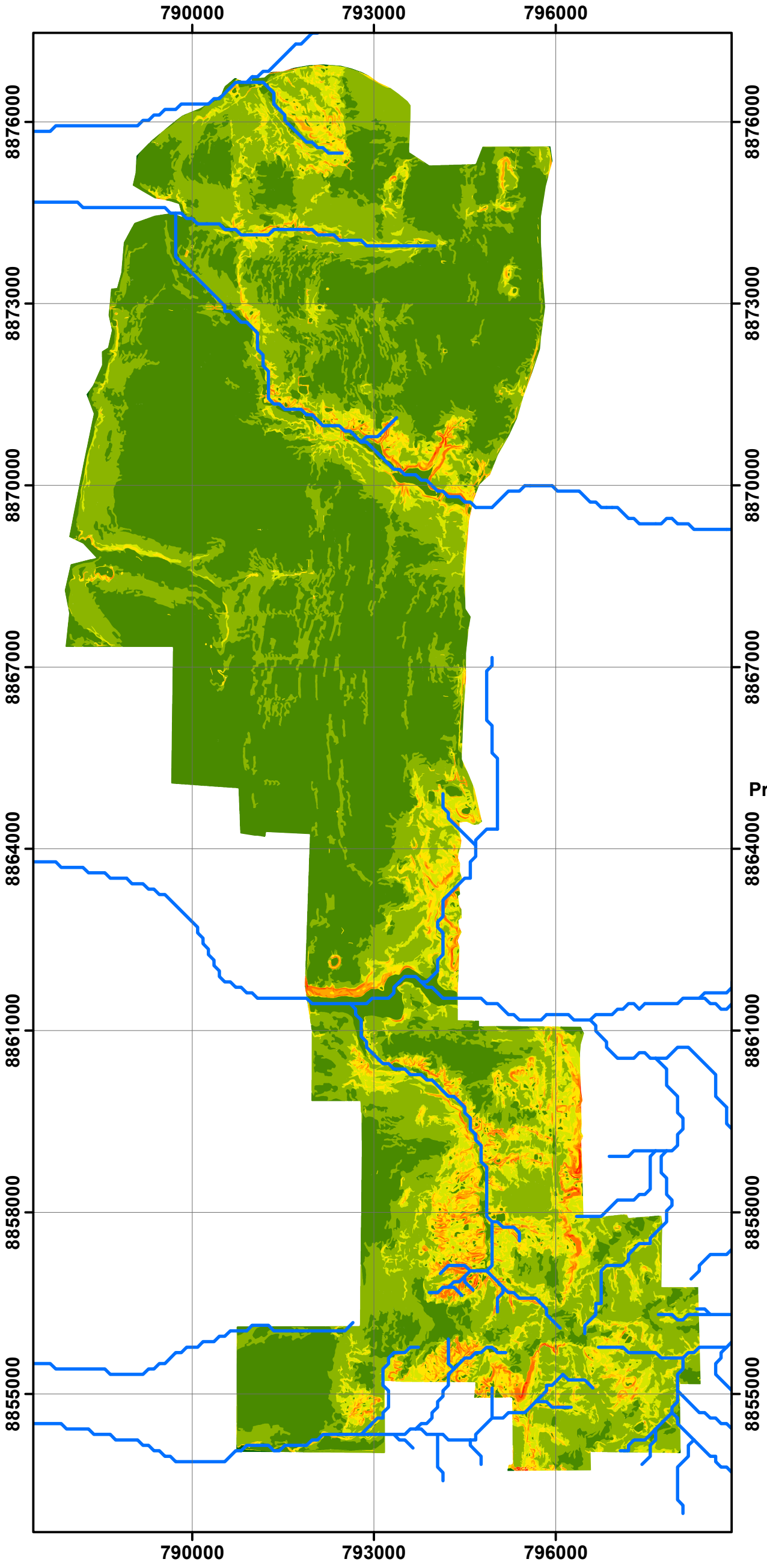


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

Figura 4.59 - Carta hipsométrica

Carta de Declividade - Palmas-TO

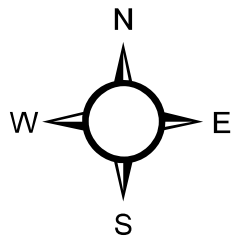


LEGENDA

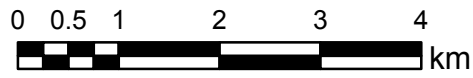
Hidrografia

Declividade

- 0 a 2 % - 1600 ha - 13,4%
- 2 a 5 % - 5550 ha - 46,4%
- 5 a 10 % - 3600 ha - 30,1%
- 10 a 15 % - 500 ha - 4.2%
- 15 a 25 % - 400 ha - 3,3%
- 25 a 50 % - 200 ha - 1,7%
- 50 a 100 % - 100 ha - 0.8%
- > 100% - 10 ha - 0.1%

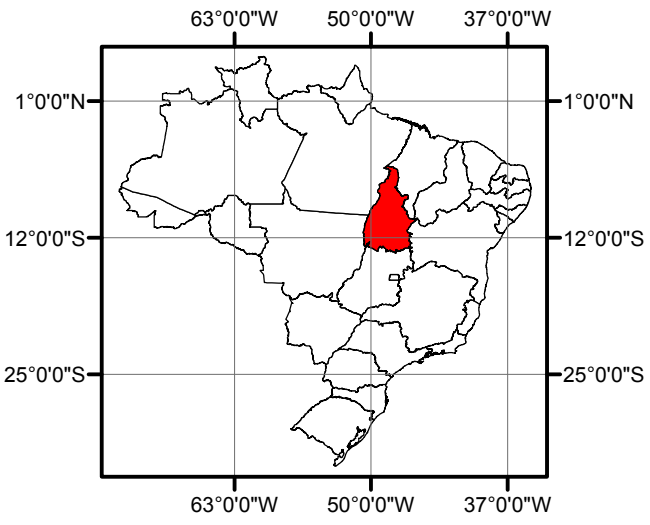


Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul



Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil



Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

Figura 4.60 - Carta de declividade

Carta de Curvatura Vertical - Palmas-TO

790000 793000 796000

8876000 8873000 8870000 8867000 8864000 8861000 8858000 8855000

LEGENDA

- Hidrografia
- Convexo
- Retilíneo
- Côncavo

N W E S

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul

0 0.5 1 2 3 4 km

Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

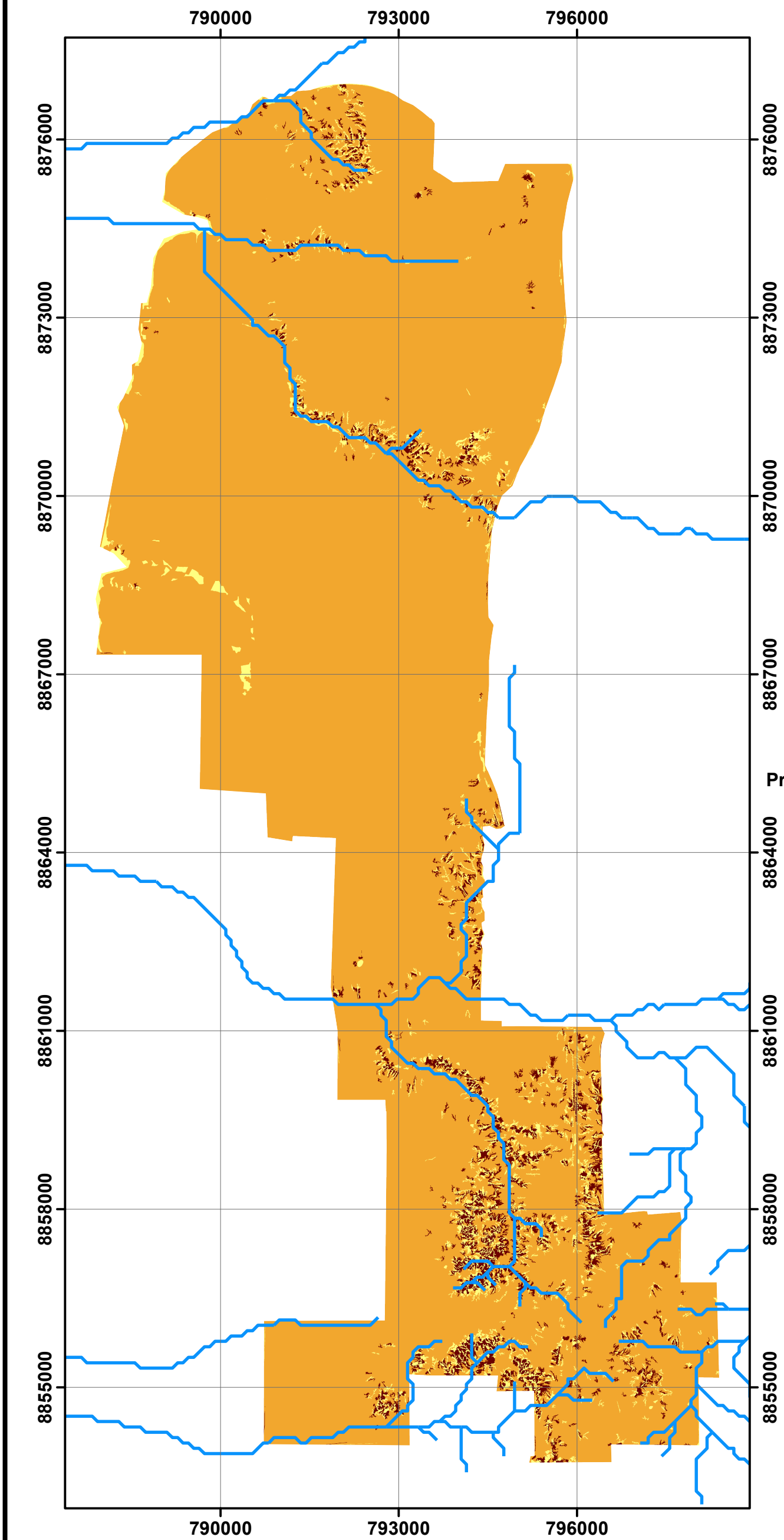
63°0'0"W 50°0'0"W 37°0'0"W
1°0'0"N 12°0'0"S 25°0'0"S

Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

Figura 4.61 - Carta de curvatura vertical

Carta de Curvatura Plana - Palmas-TO



LEGENDA

- Hidrografia
- Convergente
- Plana
- Divergente

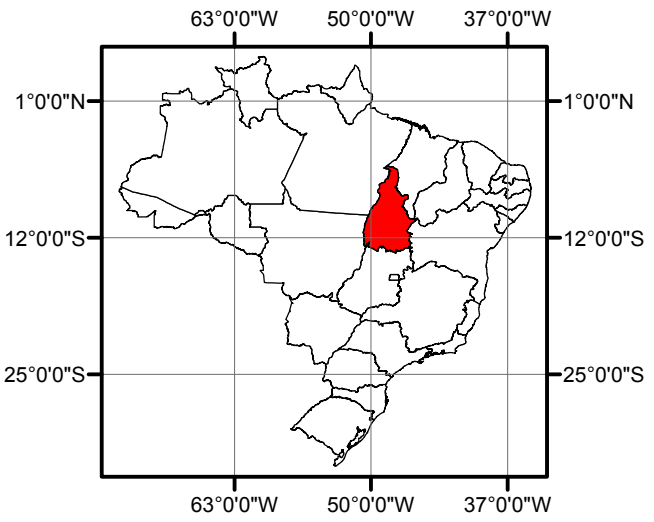
N
W E
S

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul

0 0.5 1 2 3 4
km

Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil

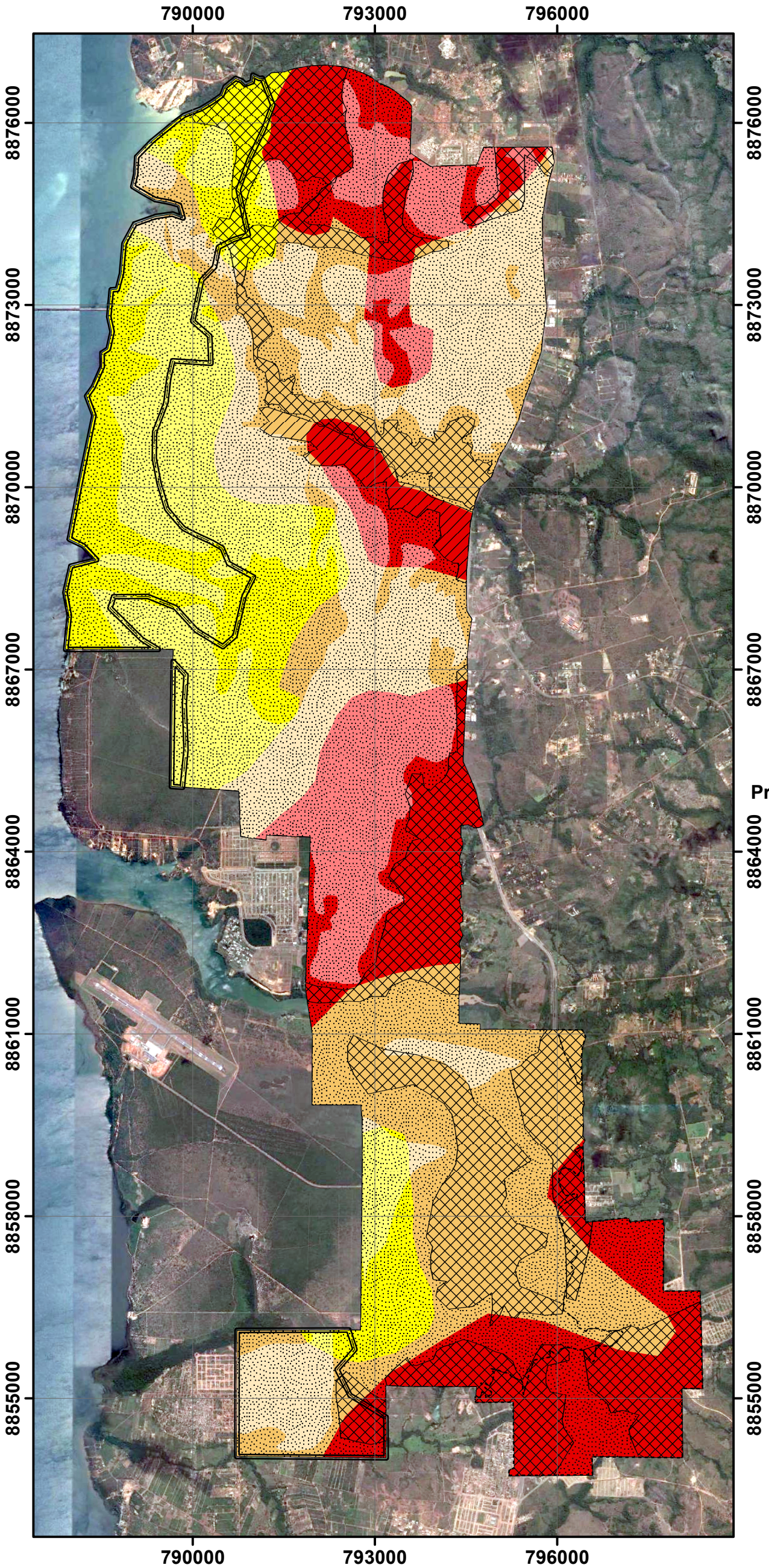


Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

Figura 4.62 - Carta de curvatura plana

Carta de Unidades Geotécnicas - Palmas-TO



LEGENDA

Provincia

- Embasamento Cristalino
- Formação Pimenteiras
- Terraços Fluviais do rio Tocantins

Padrão

- Densidade de Drenagem Baixa
- Densidade de Drenagem Moderada
- Densidade de Drenagem Elevada

Unidade

- Incl. <5% arenoso
- Incl. >5% arenoso
- Incl. <5% argiloso (D)
- Incl. >5% argiloso (D)
- Incl. <5% siltoso
- Incl. >5% siltoso

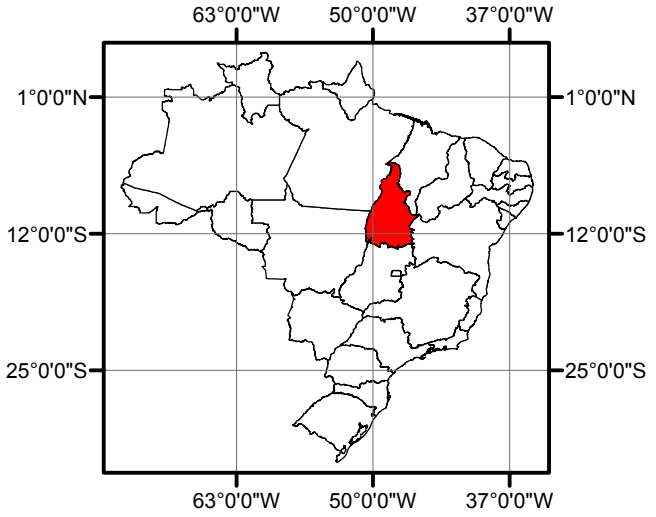
N
W E
S

Projeção Universal Transversa de Mercator (UTM)
Datum SIRGAS 2000 - Zona 22 Sul

0 0.5 1 2 3 4
km

Escala 1:75.000

Localização do Estado do Tocantins - Brasil



Universidade de Brasília
Pós-Graduação em Geotecnia

Autor: Bruno Carrilho de Castro

Figura 4.63 - Carta de unidades geotécnicas

5 – ANÁLISE DE RESULTADOS

Neste capítulo são apresentadas as análises dos resultados obtidos, sendo abordados aspectos que se relacionam com a caracterização geotécnica da área de estudo, discutindo a composição do subsolo, valores N_{SPT} e características do lençol freático; considerações sobre a relação entre os ensaios de resistividade elétrica de campo e de laboratório; discussões sobre a interpretação dos perfis geotécnicos obtidos e ponderações sobre os modelos e cartas geotécnicas produzidas.

5.1 – CARACTERIZAÇÃO GEOTÉCNICA DA ÁREA DE ESTUDO

A análise dos dados presentes nos boletins de sondagem traz informações importantes sobre o subsolo, sobretudo quando essas estão organizadas na forma de banco de dados. Assim, estudos estatísticos realizados sobre esses dados podem ajudar na compreensão de importantes características geotécnicas.

A Figura 5.1 apresenta o histograma para a profundidade do impenetrável ao N_{SPT}, com base no total de aproximadamente 500 amostras analisadas.

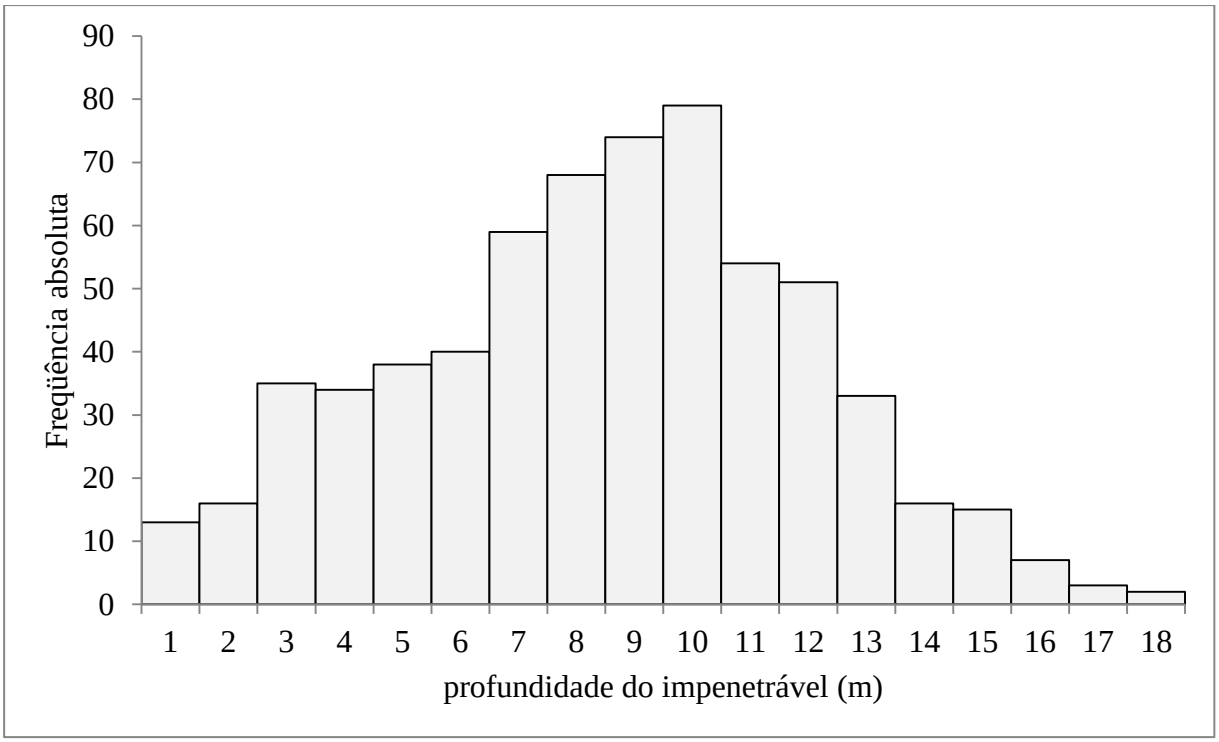


Figura 5.1 – Histograma para o impenetrável ao N_{SPT} da área de estudo.

A profundidade impenetrável ao N_{SPT} para a área de estudo é relativamente baixa, com uma média igual a 8,5 m e uma moda de 10m. Observa-se, ainda, uma variação relativamente

pequena para essa característica, com um desvio padrão de 3,5 m. Ou seja, 70 % da área possui impenetrável entre 5 e 12 m de profundidade em relação à cota do terreno.

Essa informação impacta significativamente na tomada de decisões de engenharia já que implica dizer que, em boa parte da área, as sondagens à percussão serão interrompidas entre 5 e 12 metros. Significa ainda que as fundações profundas serão assentes em profundidades dessa ordem de grandeza e que, portanto, orçamentos preliminares devem considerar essas informações em suas estimativas.

A escolha do tipo de fundação é fortemente influenciada pela presença ou ausência de lençol freático, uma vez que várias soluções em fundações são impraticáveis abaixo dele. Assim, a Figura 5.2 apresenta o histograma para a profundidade do nível d'água, calculado com base nos 212 furos onde se encontraram lençol freático.

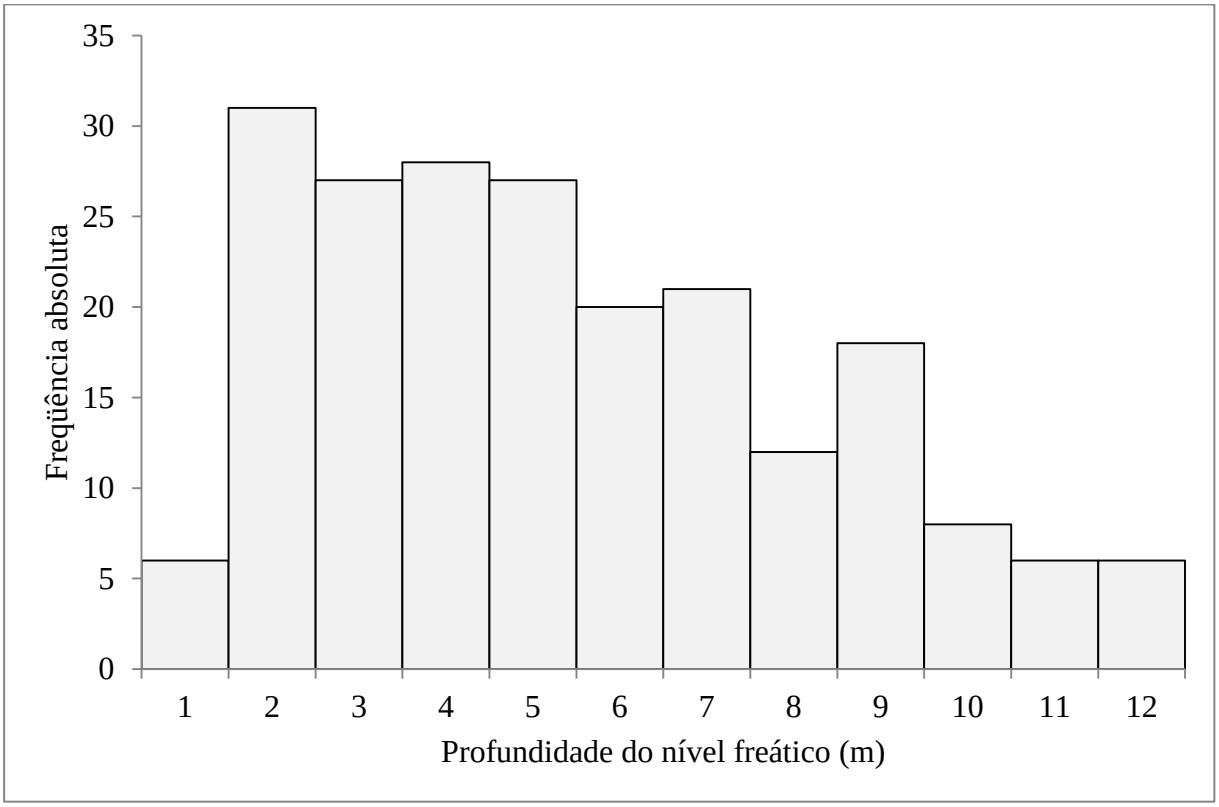


Figura 5.2 – Histograma para a profundidade do nível freático considerando dados de todos os meses do ano.

O histograma para o nível freático apresenta uma assimetria, se deslocando significativamente para a esquerda do gráfico. O valor médio é de 5,2 m de profundidade, com um desvio padrão de 3,0 m. Ou seja, cerca de 70 % da área apresenta lençol freático entre 2,2 m e 8,2 m de profundidade.

A Figura 5.3 apresenta o histograma para a profundidade dos 282 furos de sondagem onde não se alcançou o nível freático.

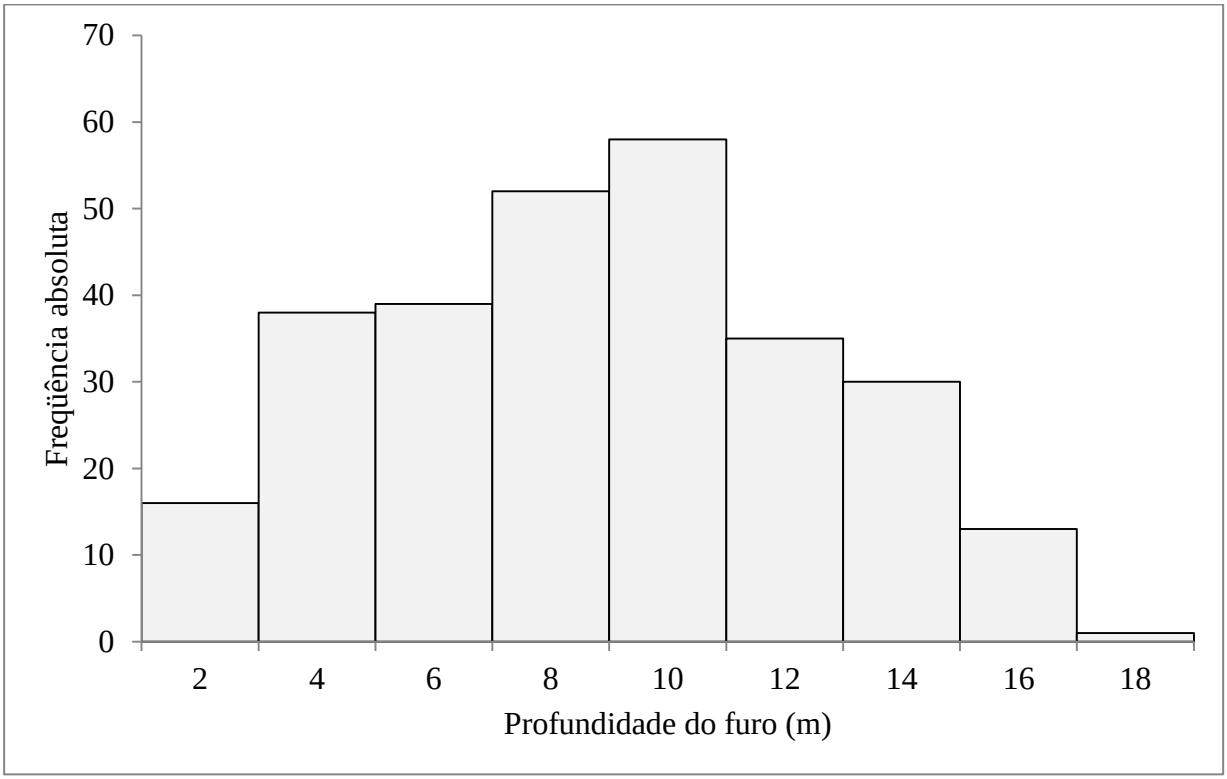


Figura 5.3 – Histograma para a profundidade de furos onde não se encontrou o lençol freático.

Assim, em boa parte da área de estudo são inviabilizadas soluções em fundações como o tubulão a céu aberto, que é amplamente utilizada em boa parte do Brasil. Outras soluções, como hélice contínua, tornam-se interessantes mesmo para número e profundidade de estacas que em outros locais não seriam.

Em um aspecto negativo, a pouca profundidade do lençol implica em uma susceptibilidade à sua contaminação, especialmente em áreas em que se tenham solos arenosos nas camadas superficiais, pois a chegada de um contaminante ao lençol freático se dará de forma rápida e acentuada.

Uma preocupação em relação ao lençol freático é a sua sazonalidade, ou seja, a sua variação entre as estações seca e chuvosa. Assim, a Figura 5.4 apresenta o histograma para a profundidade do lençol freático para dados colhidos durante os meses chuvosos.

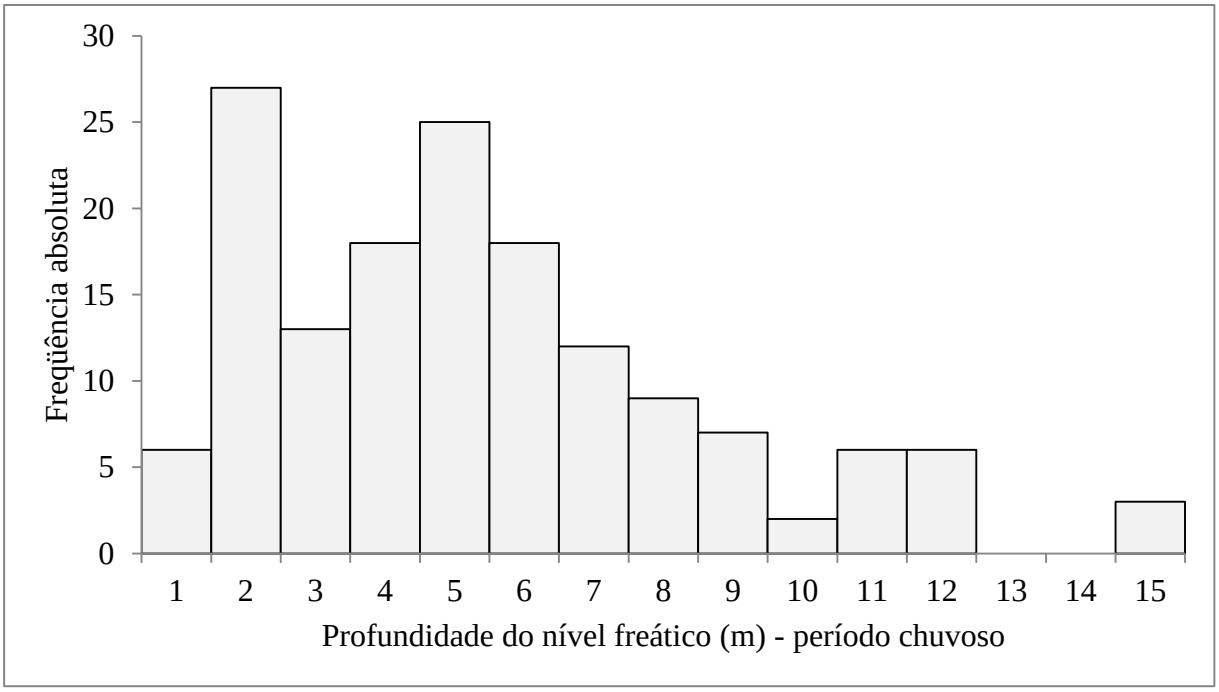


Figura 5.4 – Histograma para a profundidade do nível freático considerando dados dos meses chuvosos.

Para os meses chuvosos, a média para a profundidade do nível freático é de 5,0 m e o desvio padrão é de 3,0 m. Ou seja, em relação ao conjunto completo de dados, praticamente não há diferença entre os valores observados em todos os meses do ano para aqueles observados apenas nos meses chuvosos.

Quanto à forma do histograma, contudo, observam-se diferenças. O histograma apresenta um aspecto bimodal, com um pico em dois metros e outro pico em 5 metros, o que indica a possibilidade de haver duas populações distintas para o conjunto de dados analisados.

Pode-se correlacionar o indício da existência de duas populações distintas apontado na Figura 5.4 com a existência de dois grupos marcantes na área de estudo, uma composta predominantemente por solos arenosos e outra composta essencialmente por solos argilosos e siltosos.

Os Terraços Fluviais, devido a sua matriz arenosa, apresentam boa drenagem, absorvendo e transportando rapidamente a água oriunda de precipitações, enquanto que na Formação Pimenteiras, pelo fato de ser constituída de uma matriz argilosa e siltosa, ocorre o oposto, a capacidade de drenagem é significativamente menor, requerendo um tempo maior para que a água das chuvas seja percolada até os cursos d'água via subsuperfície.

A Figura 5.5 apresenta o histograma para a profundidade do nível freático observada nos meses de estiagem. É possível observar que a forma do gráfico indica dois picos, o primeiro em 3 m e o outro em 9 m.

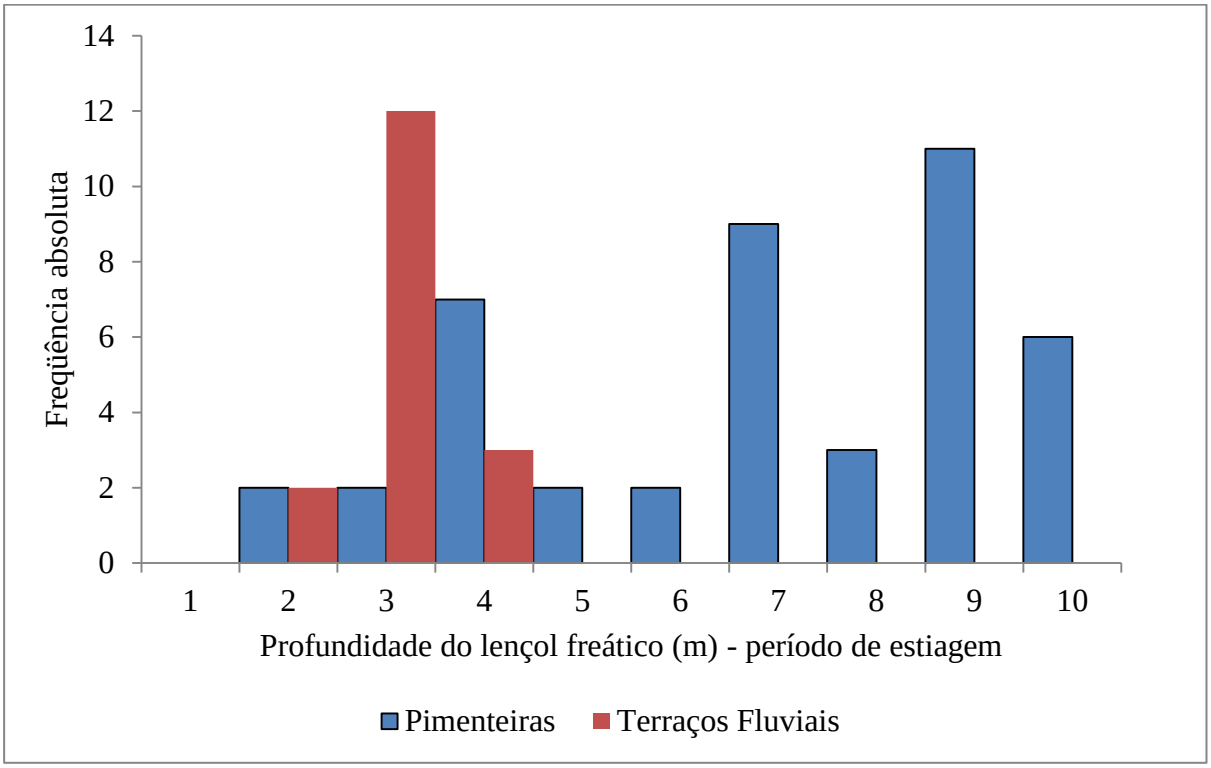


Figura 5.5 – Histograma para a profundidade do nível freático considerando dados dos meses secos.

Para os meses de estiagem, a média passa a ser de 5,4 m e o desvio padrão se reduz para 2,6 m. Ou seja, em cerca de 70% da área o nível freático se encontra entre 2,8 m e 8,0 m. O aspecto bimodal do histograma reforça a tese de que a existência de duas matrizes de solos distintas influi nas características do lençol freático.

Em relação aos tipos de solos identificados na área de estudo pode-se afirmar, a partir da análise dos modelos de solos desenvolvidos com base no banco de dados de sondagens à percussão, que há um equilíbrio entre os percentuais de solos argilosos, siltosos e arenosos, com cada um representando cerca de 30 % do total.

Contudo, vale ressaltar que essa classificação considera os resultados da análise táctil visual, ligada ao comportamento do solo, e não à análise granulométrica, relacionada com a dimensão dos grãos identificados nas amostras. A Figura 5.6 apresenta a distribuição relativa dos principais tipos de solo encontrados na área de estudo com base na espacialização tridimensional realizada com o programa *Rockworks*®.

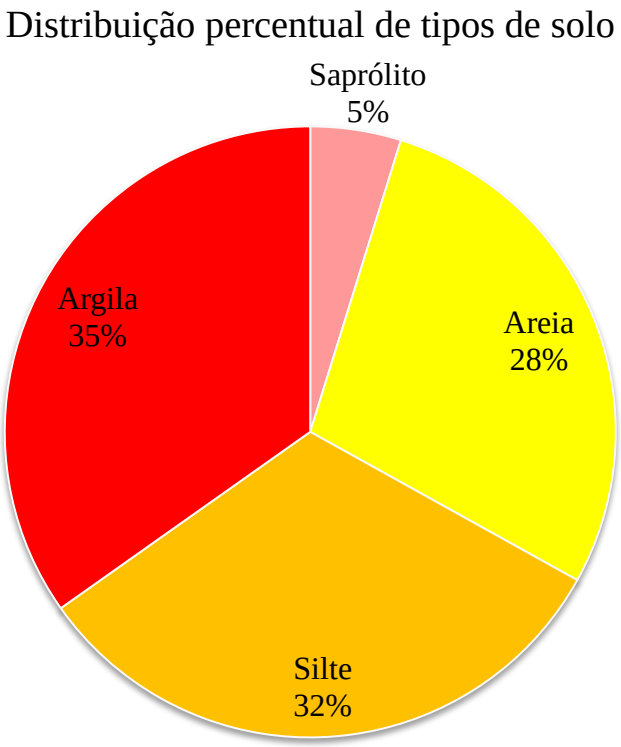


Figura 5.6 – Distribuição relativa entre os principais tipos de solos encontrados na área de estudo.

5.2 – RELAÇÃO ENTRE RESISTIVIDADE ELÉTRICA DE CAMPO E DE LABORATÓRIO

Neste item são apresentadas as considerações a respeito da relação observada entre os dados de resistividade elétrica obtida nas condições de campo e de laboratório para amostras coletadas.

A caracterização geoelétrica de um material, seja solo ou rocha, apresenta algumas dificuldades, especialmente ligadas à variabilidade desses materiais. Pequenas alterações no fraturamento de rochas, temperatura e umidade implicam em diferenças significativas na resistividade elétrica observada.

Consequentemente, é comum se encontrarem na bibliografia valores destoantes para um mesmo tipo de material. Um exemplo pode ser citado quando se comparam os valores apresentados por Grandjean *et al*. (2009) e Aquino (2010). Ambos realizaram estudos com materiais argilosos e o primeiro obteve resultados de resistividade entre 5 Ω.m e 500 Ω.m, enquanto que o segundo obteve valores entre 2.800 Ω.m e 20.000 Ω.m.

A resistividade elétrica aparenta amplificar pequenas diferenças entre materiais que recebem classificações semelhantes na mecânica dos solos. Assim, existe uma dificuldade em se encontrar valores de referência para um determinado tipo de material, requerendo a realização de estudos locais para o estabelecimento dessas relações.

Tais diferenças se devem à influência do líquido intersticial e da conecção entre vazios do solo na resistividade elétrica. Essas características, por sua vez, estão relacionadas com a origem de cada material, assim, materiais classificados de maneira semelhante, mas com origens distintas, apresentarão comportamentos diferentes no que se refere à resistividade elétrica.

Nesse âmbito, os ensaios de laboratório auxiliaram no estabelecimento das relações entre o tipo de solo e os valores característicos de resistividade elétrica observados. Além disso, a comparação entre os dados obtidos em campo e laboratório permite aferir se os dados obtidos em laboratório são compatíveis com aqueles obtidos em campo.

As amostras de laboratório foram compactadas de modo a apresentarem grau de saturação de 65 %, 75 % e 85 %, com índices de vazios representando aqueles observados em campo (entre 0.32 e 1.17). Assim, para cada tipo de solo variou-se o grau de saturação e fixou-se o índice de vazios. Os gráficos apresentados neste item relacionam, para cada profundidade, os valores de resistividade elétrica de campo com aqueles obtidos em laboratório na condição de grau de saturação que mais se aproxima daquele verificado em campo. Ou seja, para solos, na condição de campo, com grau de saturação próximo a 65 %, utilizaram-se os resultados obtidos em laboratório para as amostras ensaiadas com 65 % de grau de saturação. Para amostras, na condição de campo, com grau de saturação próximos a 75 % utilizaram-se os resultados obtidos em laboratório para as amostras ensaiadas com 75 % de grau de saturação. Já para as amostras com grau de saturação próximos a 85 %, na condição de campo, utilizaram-se os resultados obtidos em laboratório para as amostras ensaiadas com 85 % de grau de saturação.

A Figura 5.7 apresenta a relação entre a resistividade elétrica obtida em laboratório e aquela obtida em campo, para o furo SPT 01.

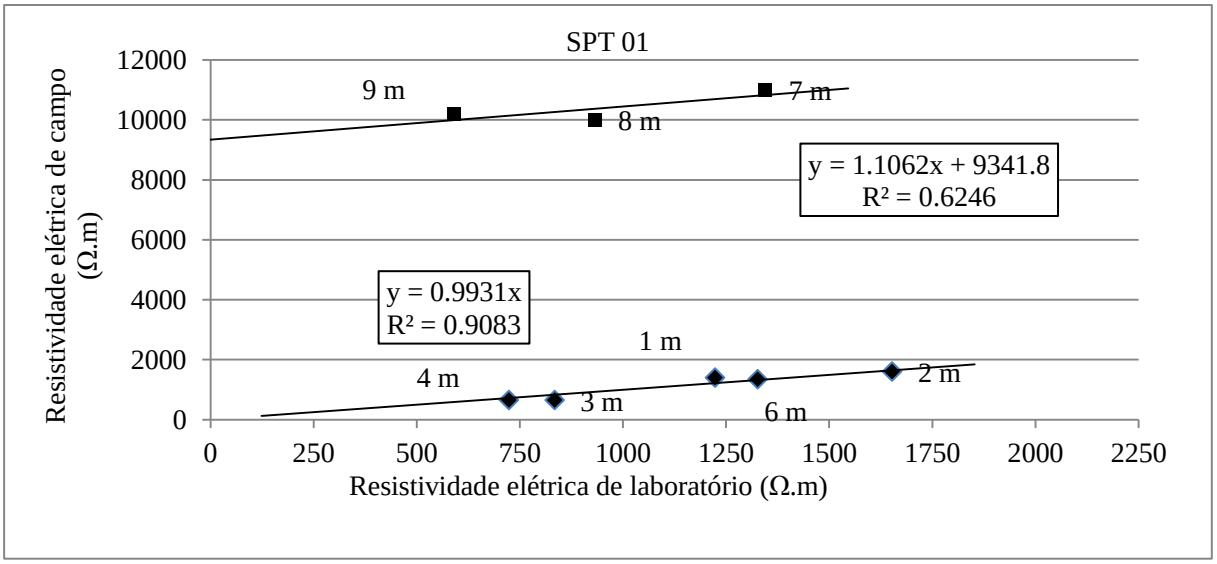


Figura 5.7 – Relação entre resistividade elétrica obtida em campo e aquela obtida em laboratório para o furo SPT 01.

Para o furo SPT 01, para as profundidades de até 6 m, os valores obtidos em campo são ligeiramente inferiores àqueles obtidos em laboratório, e o coeficiente de determinação (R^2) indica uma relação forte entre eles e podendo ser ajustados por uma equação linear. Para as profundidades a partir de 7 m, observa-se um comportamento distinto, com os valores de campo apresentando um acréscimo de cerca de 9.000 Ω.m em relação àqueles observados em laboratório. Isso se dá, provavelmente pela presença de material pedregulhosos nessas amostras.

A Figura 5.8 apresenta a relação entre a resistividade elétrica obtida em laboratório e aquela obtida em campo, para o furo SPT 02.

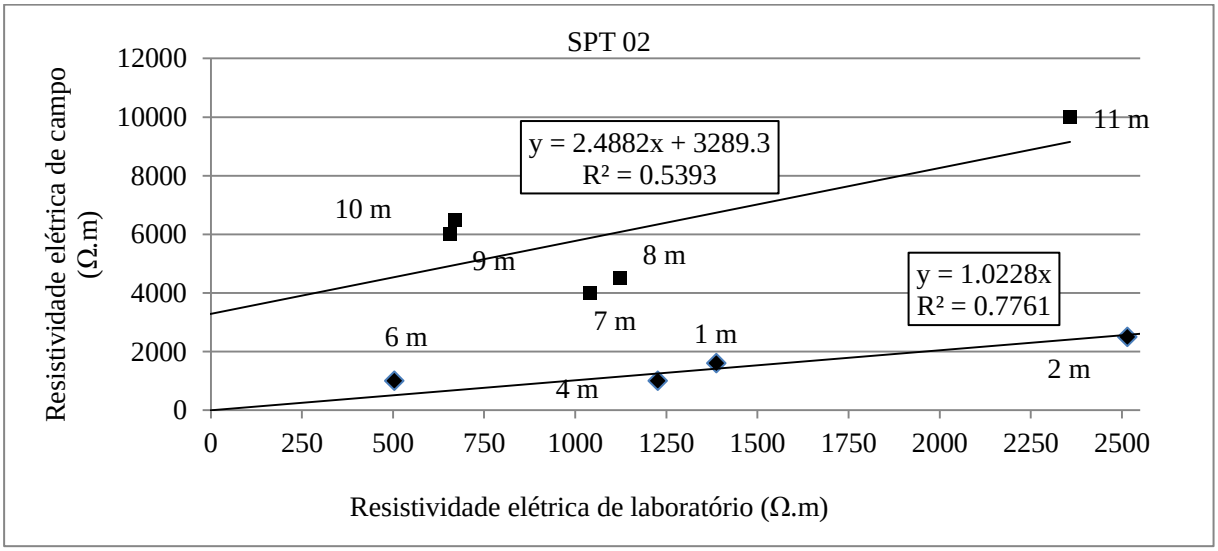


Figura 5.8 – Relação entre resistividade elétrica obtida em campo e aquela obtida em laboratório para o furo SPT 02.

Para o furo SPT 02, até os 6 m de profundidade, o coeficiente R^2 indica uma relação medianamente forte entre as duas medidas, permitindo aos valores um ajuste linear. Os valores observados em laboratório são ligeiramente menores que aqueles observados em campo. A partir dos 7 m de profundidade os valores de campo apresentam um acréscimo de cerca de 3.000 Ω.m em relação aos valores obtidos em laboratório, assim como verificado no SPT 01.

Considera-se que há um ajuste aceitável para os valores encontrados em campo e laboratório para as amostras coletadas no furo SPT 02, com ambas retratando o mesmo material dentro de uma variação tolerável. As diferenças observadas podem ser explicadas por uma eventual imprecisão na determinação das condições geotécnicas de campo, como o peso específico e a umidade, por exemplo. Ou ainda, pela quebra da estrutura do solo no processo de compactação.

A Figura 5.9 apresenta a relação entre a resistividade elétrica obtida em laboratório e aquela obtida em campo, para o furo SPT03. Nela podemos observar que os valores obtidos em campo apresentam uma razão próximas a 1.0 em relação àqueles obtidos em laboratório. O coeficiente R^2 indica uma relação medianamente forte entre os dados.

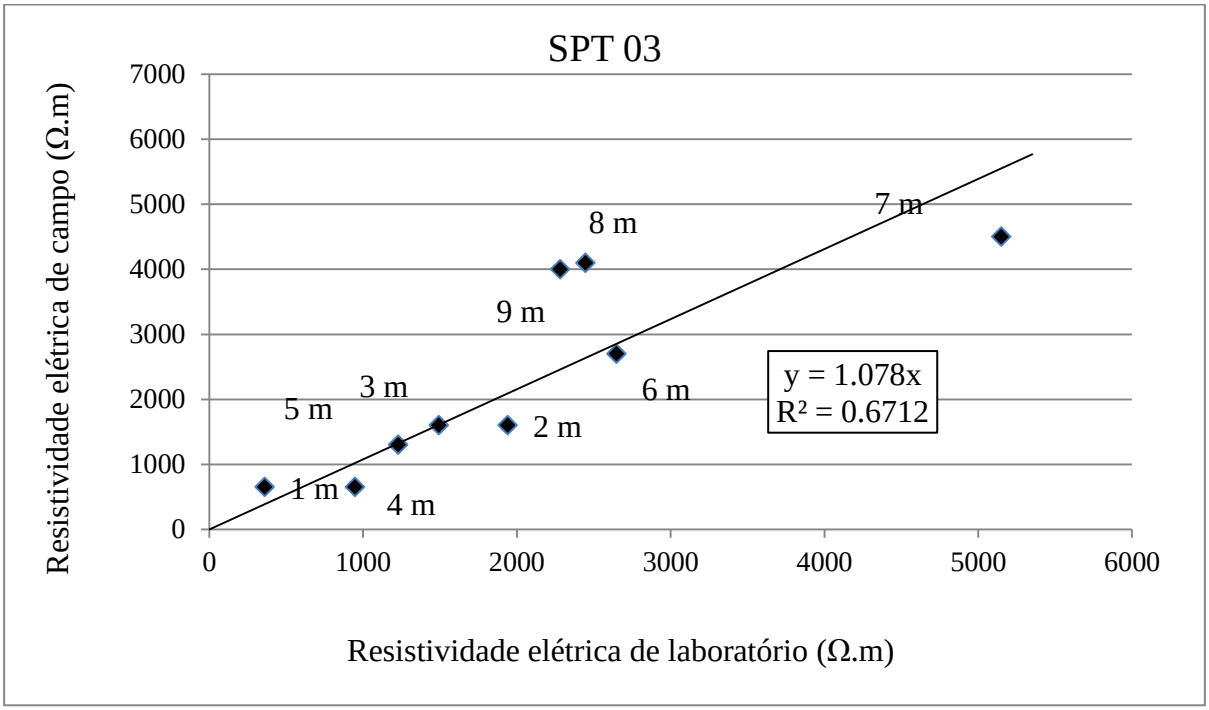


Figura 5.9 – Relação entre resistividade elétrica obtida em campo e aquela obtida em laboratório para o furo SPT 03.

A Figura 5.10 apresenta a relação entre a resistividade elétrica obtida em laboratório e aquela obtida em campo, para o furo SPT 04.

Para o furo SPT 04 podemos observar que há uma relação linear entre os dados obtidos em laboratório e aqueles obtidos em campo, com o coeficiente R^2 indicando uma relação forte entre os dados.

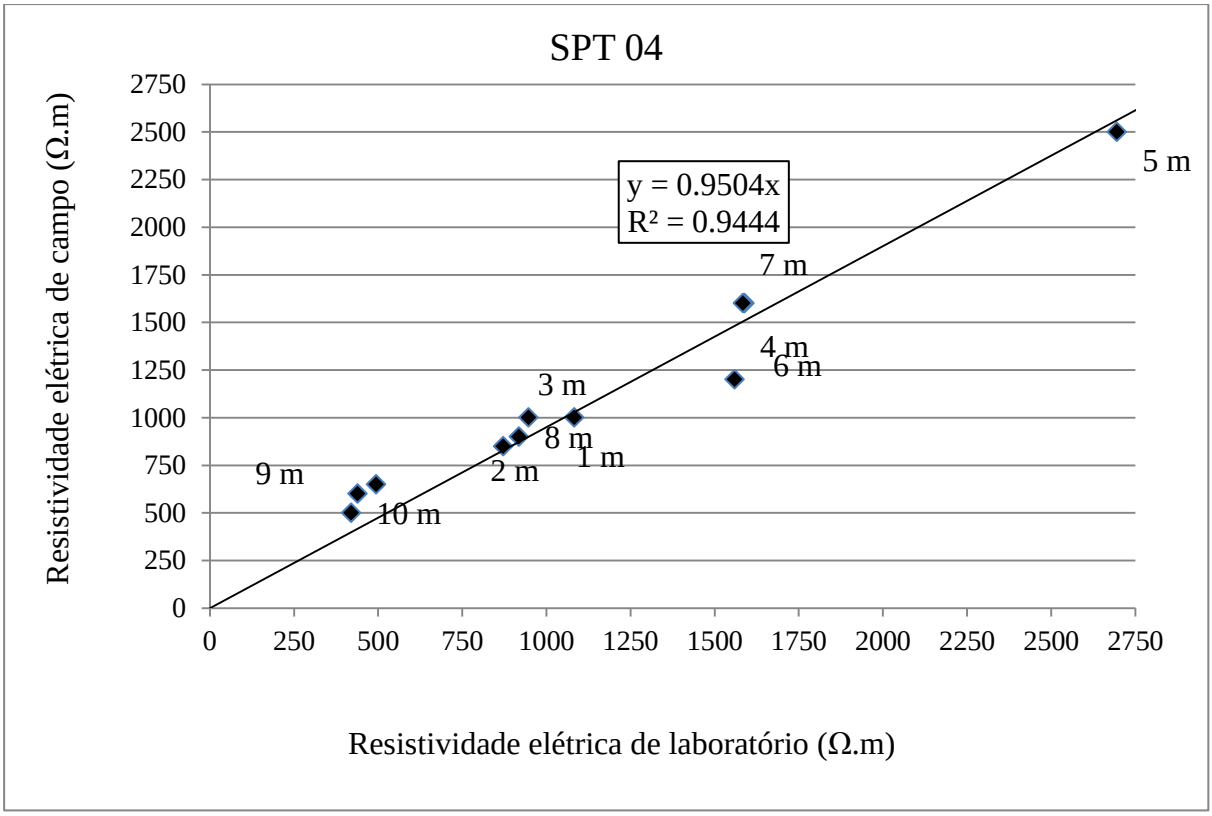


Figura 5.10 – Relação entre resistividade elétrica obtida em campo e aquela obtida em laboratório para o furo SPT 04.

A razão observada é próxima a 1.0, assim, considera-se que, tanto os dados de campo quanto os dados de laboratório se relacionam de modo satisfatório e representam o mesmo solo. Atribuem-se as variações observadas às imprecisões na determinação de características geotécnicas das amostras em campo, ou ainda, pela quebra da estrutura do solo no processo de compactação.

A Figura 5.11 apresenta a relação entre a resistividade elétrica obtida em laboratório e aquela obtida em campo, para o furo SPT 05.

Para o furo SPT 05, observa-se a que existe uma relação linear entre os dados oriundos de ensaio de resistividade elétrica de campo e de laboratório. O ajuste linear fornece um coeficiente R^2 que remete a uma relação medianamente forte entre os dados cruzados. Já a

equação relaciona-os com uma razão bem próxima a 1.0. Apenas os resultados obtidos para a profundidade de 8m não se mostraram adequados.

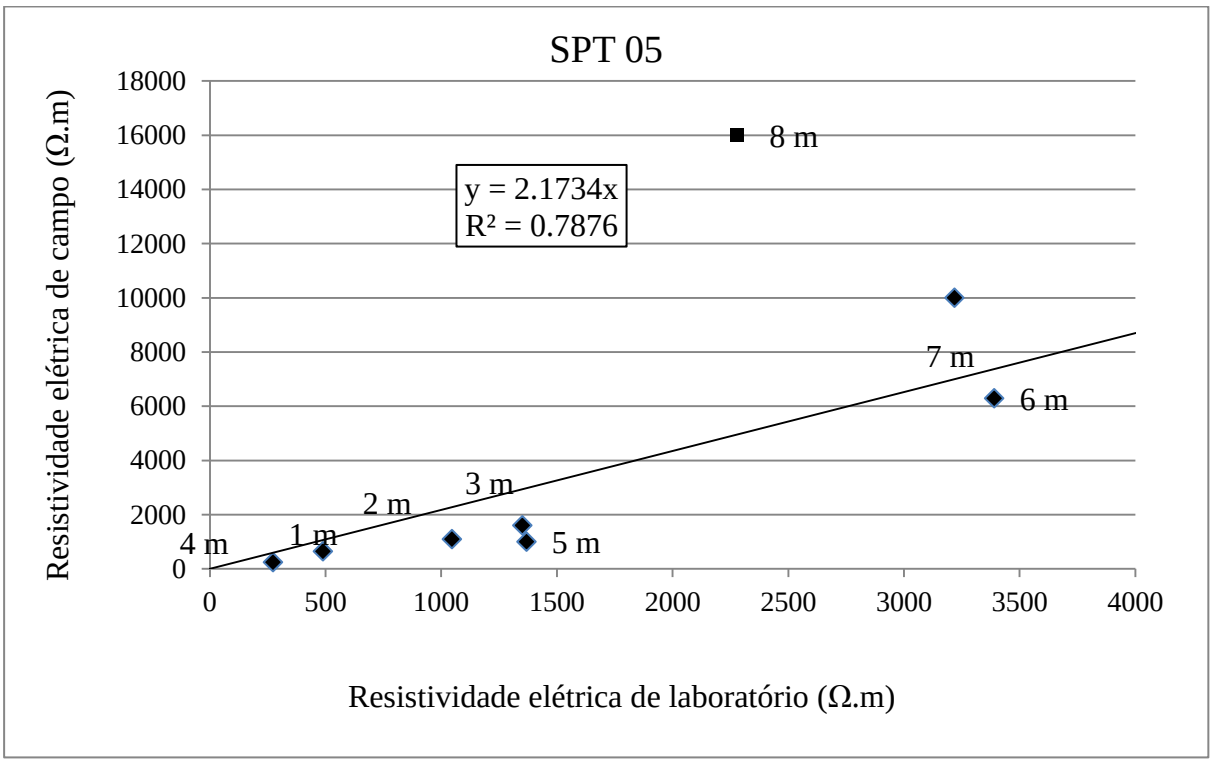


Figura 5.11 – Relação entre resistividade elétrica obtida em campo e aquela obtida em laboratório para o furo SPT 05.

Assim, considera-se que existe, de fato, uma relação entre os dados obtidos em campo e laboratório, com ambos descrevendo os mesmos tipos de solo dentro de variações razoáveis. As variações observadas podem ser atribuídas à imprecisão na determinação de propriedades geotécnicas das amostras retiradas de campo ou devido à quebra da estrutura do solo no processo de compactação.

A Figura 5.12 apresenta a relação entre a resistividade elétrica obtida em laboratório e aquela obtida em campo, para o furo SPT 06.

Para o furo SPT 06 observa-se que o ajuste dos dados de campo e de laboratório pode ser realizado por meio de uma equação linear, com um coeficiente R^2 indicando uma relação medianamente forte entre os mesmos.

Assim, avaliando as relações entre resistividade elétrica de campo e de laboratório apresentadas para os SPT01 a SPT06 pode-se afirmar que se obtiveram resultados semelhantes em ambas as metodologias empregadas, o que confere confiabilidade aos

resultados, e possibilita concluir que os solos encontrados na área de estudo apresentam, de fato, as faixas de variação de resistividade elétrica estipuladas.

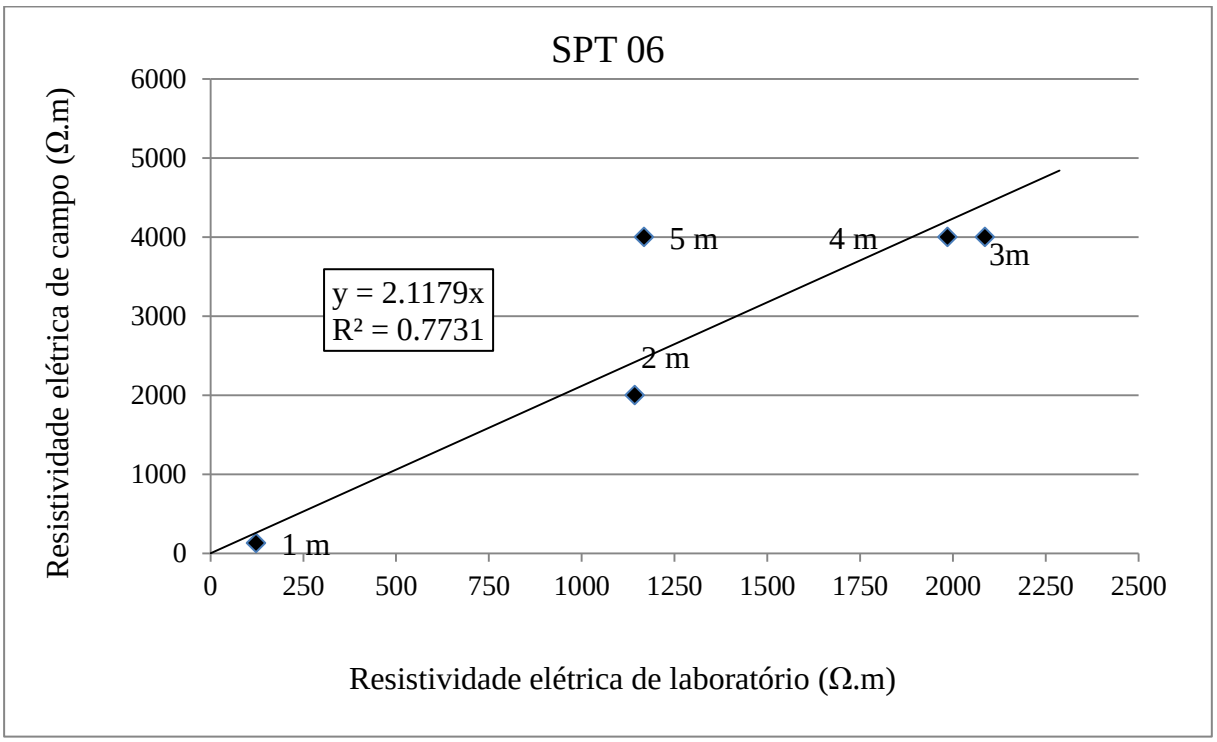


Figura 5.12 – Relação entre resistividade elétrica obtida em campo e aquela obtida em laboratório para o furo SPT 06.

5.3 – ANÁLISE DOS PERFIS GEOTÉCNICOS

Neste item são apresentadas as considerações acerca dos perfis geotécnicos elaborados para todas as localidades estudadas.

5.3.1 – ÁREA DO ESPAÇO CULTURAL

A área do Espaço Cultural se situa no eixo da Avenida Theotônio Segurado e é cortada pelo Córrego Comprido, assim temos dois trechos: um ao Sul e outro ao Norte do referido curso d'água.

As seções de resistividade elétricas, obtidos no início do período chuvoso, mostram que ambos os trechos apresentam semelhanças significativas, onde valores menores de resistividade elétrica são observados com maior frequência à medida que se aproxima do curso d'água e que se encontram regiões isoladas com valores de resistividade elétrica elevadas em um mesmo horizonte, cerca de 6 metros de profundidade.

No que se refere à interpretação geotécnica, atribui-se a ocorrência de concreções lateríticas aos bolsões de resistividade elevada. Já a presença de materiais argilosos saturados é atribuída

aos locais de resistividade mais baixa, quando localizado na parte superior da seção, ou saprólito, quando encontrado na linha do impenetrável ao SPT.

O horizonte impenetrável mostrou uma variação relativamente alta para o comprimento investigado, ora sendo detectado e ora desaparecendo, o que indica um processo erosivo, provocado provavelmente por paleo-canais. As Figuras 5.13 (a) e (b) ilustram a seção de resistividade elétrica e o perfil geotécnico obtidos para a margem Sul na área do Espaço Cultural.

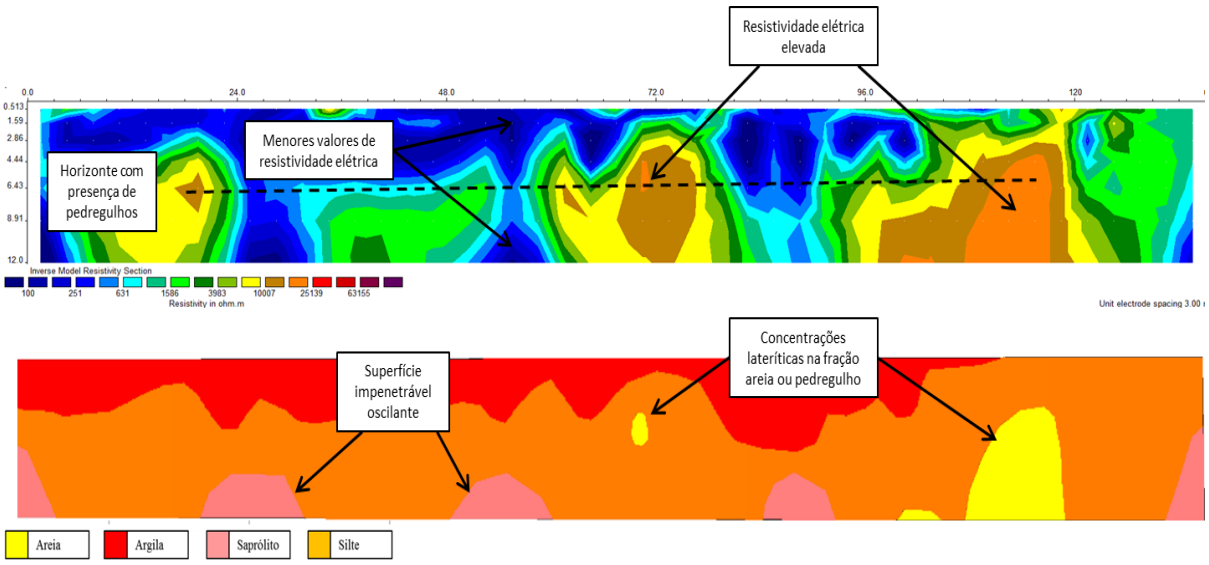


Figura 5.13 – (a) Seção de resistividade elétrica para a área do Espaço Cultural, margem Sul (b) Perfil geotécnico para a área do Espaço Cultural, margem Sul.

A margem Norte do Córrego comprido apresenta aspectos muito semelhantes ao da margem Sul, não havendo considerações a serem acrescentadas.

5.3.2 – ÁREA DO SESC

A área do SESC está localizada no eixo da Avenida Theotônio Segurado, na parte Norte da cidade, em um dos pontos de maior altitude em relação ao nível do mar. Apresenta pequena declividade e nenhum curso d'água nas proximidades.

A seção de resistividade elétrica, obtido no início do período chuvoso, mostra nas primeiras camadas uma predominância de valores de resistividade elétrica mais baixos, sendo sucedida por uma camada com resistividade elétrica intermediária. Essa camada com valores intermediários contém áreas isoladas com concentrações de valores mais elevados, localizados especialmente em um horizonte restrito entre 5 m e 7 m de profundidade. As

camadas inferiores apresentam três regiões com valores baixos de resistividade elétrica, que ascendem até a metade da seção.

A interpretação geotécnica realizada caracterizou as camadas inicias como material argiloso e os materiais de resistividade elétrica intermediária como siltoso. Nessa camada siltosa existem ocorrências de conglomerados de concreções lateríticas na granulação variando entre areia e pedregulho, ocasionando as regiões de resistividade elétrica com valores elevados.

Na parte inferior o que se observa é a variação da profundidade do impenetrável, novamente associado com a ocorrência de saprólito. Essa camada se mostra ainda mais sinuosa que a observada para o Espaço Cultural, se elevando até a metade da seção em determinados locais. As Figuras 5.14 (a) e (b) ilustram as seções de resistividade elétrica e o perfil geotécnico obtidos para a área do SESC.

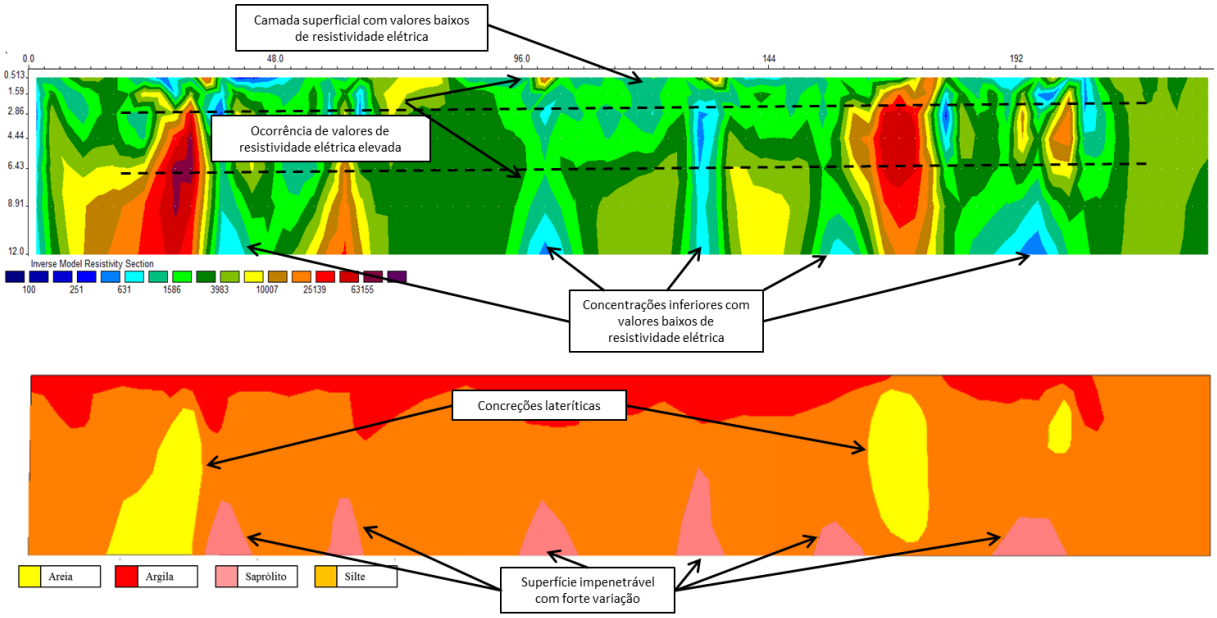


Figura 5.14 – (a) Seção de resistividade elétrica para a área do SESC (b) Perfil geotécnico para a área do SESC.

5.3.3 – ÁREA DO PARQUE SUSSUAPARA

O Parque Sussuapara se estende de Leste, próximo a TO-050, até Oeste quando se encontra com o Lago de Palmas. A área de realização do ensaio é localizada no cruzamento da Avenida NS-15 com o referido parque. A área é cortada pelo Córrego Sussuapara e foram realizados dois perfis, um ao Sul e outro a Norte do curso d'água.

A seção Sul, obtida no início do período chuvoso, apresenta uma variação significativa de valores de resistividade elétrica quando se compara a porção próxima ao curso d'agua ao

ponto mais ao Sul, sendo observados valores baixos de resistividade elétrica próximo ao córrego e valores elevados quando se afasta do mesmo.

No trecho intermediário é observada uma concentração de valores elevados de resistividade elétrica. Na parte inferior da seção é observada a ocorrência de valores baixos de resistividade elétrica.

A interpretação geotécnica da seção identifica os valores elevados de resistividade elétrica como pedregulhos quartzosos, seixos em geral. Os valores mais baixos e próximos à superfície são identificados como solos argilosos, enquanto que aqueles em profundidade são identificados como saprólitos.

É notável a variação significativa de valores observados na seção de resistividade elétrica ao longo de poucos metros. Isso se dá por se tratar do vale de um córrego com regime hídrico muito variável, que oscila entre períodos de fluxo laminar e turbulento, com energia suficiente para carrear materiais como pedregulhos. As Figuras 5.15 (a) e (b) ilustram as seções de resistividade elétrica e o perfil geotécnico obtidos para a área do Parque Sussuapara, na porção Sul.

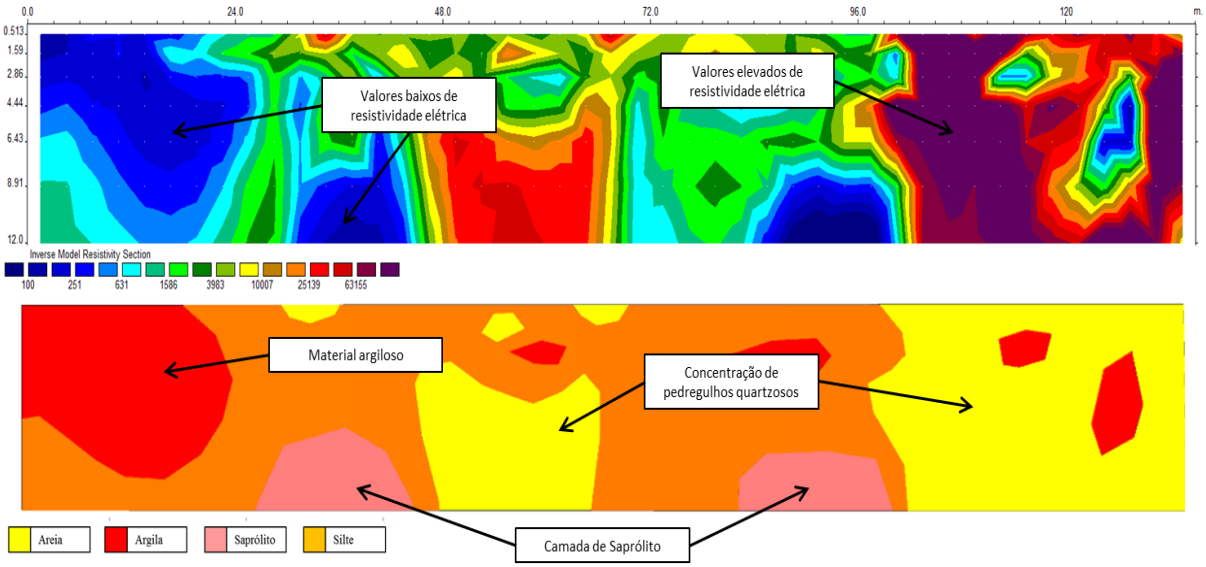


Figura 5.15 – (a) Seção de resistividade elétrica para a área do Parque Sussuapara, margem Sul (b) Perfil geotécnico para a área do Parque Sussuapara, margem Sul.

A seção localizada ao Norte do Córrego Sussuapara, obtida no início do período chuvoso, apresenta diferenças consideráveis em relação ao do lado Sul. É significativamente menos presente regiões com elevados valores de resistividade elétrica, predominando valores

intermediários e baixos, tanto quando próximo ao curso d'água quanto mais ao Norte, quando se afasta do córrego.

A análise geotécnica relaciona a ocorrência de pedregulhos quartzosos aos locais de resistividade elevada, a presença de materiais argilosos na camada superficial, onde são observados valores baixos de resistividade elétrica e a presença de saprólito a camadas pouco profundas ao Norte, onde são observados valores reduzidos de resistividade elétrica desde a base até quase o topo da seção investigado.

A inclinação da camada de saprólito indica que esse ponto é o limite atual do processo erosivo provocado pelo curso d'água na camada mais resistente de solo sedimentar que embasa toda a área da cidade. As Figuras 5.16 (a) e (b) ilustram as seções de resistividade elétrica e o perfil geotécnico obtidos para a área do Parque Sussuapara, na porção Norte.

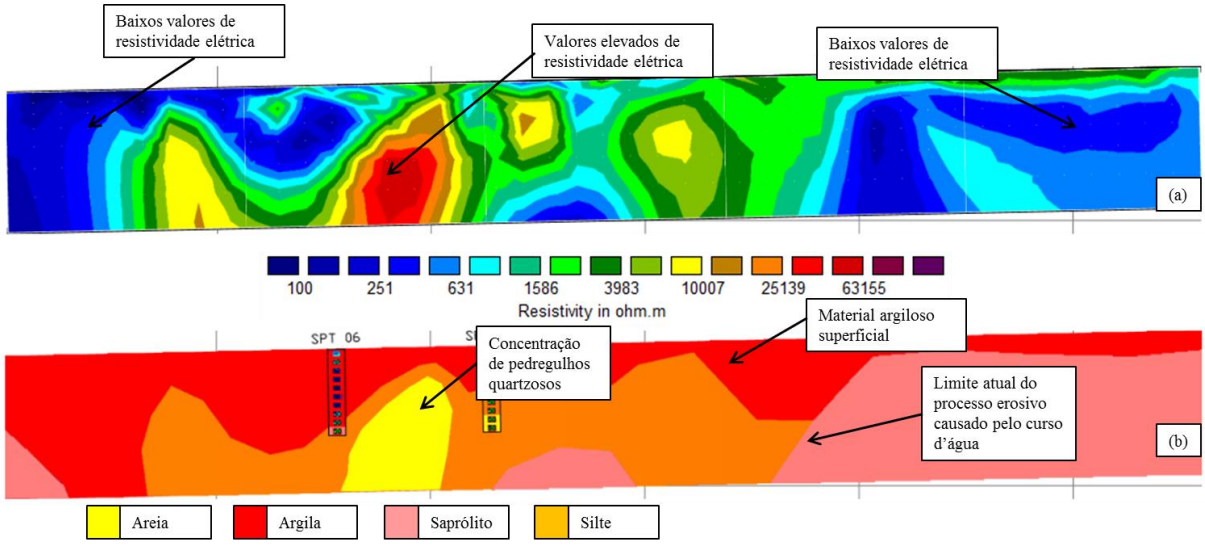


Figura 5.16 – (a) Seção de resistividade elétrica para a área do Parque Sussuapara, margem Norte (b) Perfil geotécnico para a área do Parque Sussuapara, margem Norte.

5.3.4 – LINHA CENTRAL

A linha Central se estende de Oeste, próximo ao Lago de Palmas, à Leste, próximo a TO-050, pela Avenida LO-05. Os perfis foram obtidos no final d período chuvoso.

A região entre o Lago e a Avenida NS-15 apresenta um seção de resistividade elétrica que mostra predominância de valores de resistividade elétrica elevados e uma pequena porção localizada próxima à superfície com valores menores. A interpretação geotécnica da seção associa os valores elevados de resistividade elétrica à ocorrência de solos arenosos e pedregulhosos de composição quartzosa e aos valores menores à ocorrência de solos

argilosos. O perfil geotécnico oriundo da espacialização dos dados de sondagens mostra a presença apenas de material arenoso, isso se deve ao fato da espessura da camada argilosa detectada na resistividade elétrica ser muito pequena e, portanto, incompatível com a escala da espacialização dos dados de sondagens.

As Figuras 5.17 (a), (b) e (c) mostram, respectivamente, a seção de resistividade elétrica, o perfil de interpretação geotécnica e o perfil geotécnico oriundo da espacialização dos dados de sondagens para o trecho localizado entre o Lago e a Av. NS-15 na Linha Central.

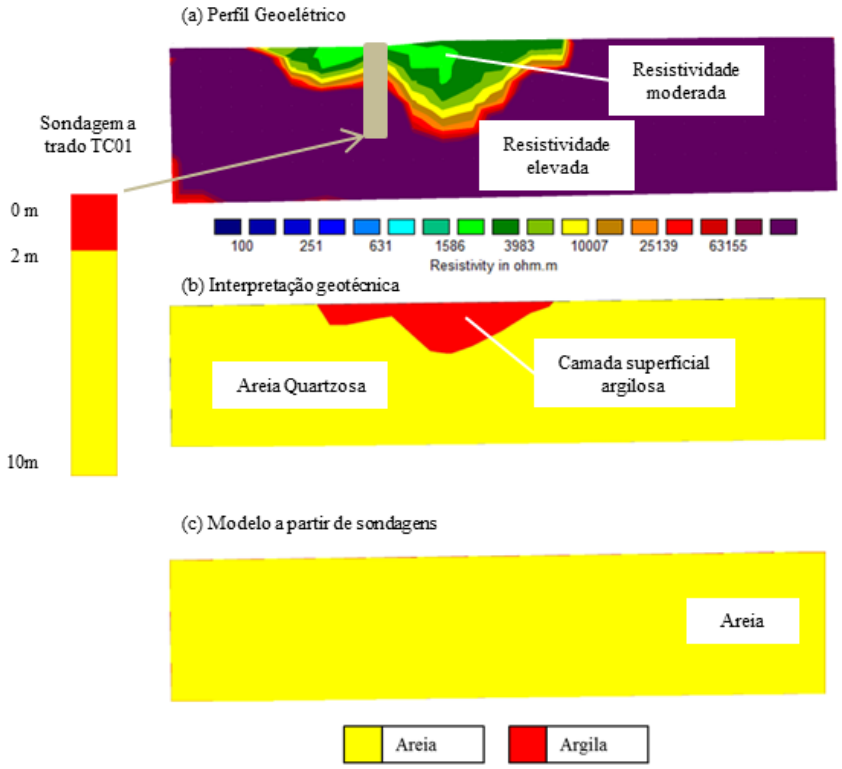


Figura 5.17 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho entre o Lago e a Av. NS-15, Linha Central.

A investigação a trado (TC01) revela uma camada de cerca de 2 m de profundidade de material argiloso, de cor escura inicialmente, logo assumindo uma coloração clara, com a presença de areia e pedregulho.

A partir dos 2 m de profundidade segue-se um material arenoso com o surgimento de pedregulhos de quartzo com forma ovalada até quase os 10 m, quando o furo foi interrompido.

Assim, pode-se dizer que a interpretação geotécnica da seção de resistividade elétrica se relaciona bem com o perfil geotécnico obtido pela espacialização dos dados de sondagens.

Deve-se relevar, contudo, a diferença entre materiais superficiais, já que tendem a ter espessuras muito variáveis, ocorrências inconstantes, e o ensaio de sondagem à percussão desprezar uma parte significativa dessa camada.

As Figuras 5.18 (a), (b) e (c) mostram, respectivamente, a seção de resistividade elétrica, o perfil de interpretação geotécnica e o perfil geotécnico oriundo da espacialização dos dados de sondagens para o trecho localizado entre a Av. NS-07 e a Av. NS-05 na Linha Central.

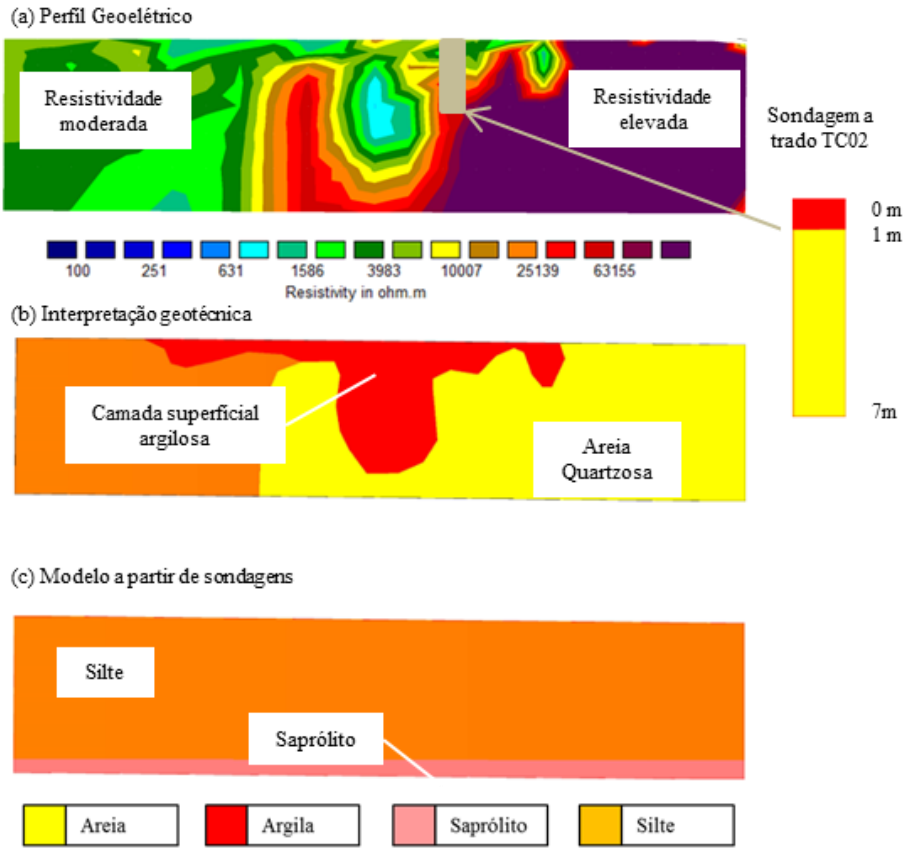


Figura 5.18 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho entre a Av. NS-07 e a Av. NS-05, Linha Central.

A seção de resistividade elétrica desse trecho apresenta indícios de uma transição brusca entre dois ou mais tipos de solo. A interpretação geotécnica, por sua vez, identifica uma camada superficial argilosa que pode se aprofundar na parte central da seção, dividindo o material arenoso a Leste e o material siltoso a Oeste.

O perfil geotécnico obtido pela espacialização das sondagens mostra um perfil siltoso embasado por uma camada de saprólito.

A investigação a trado (TC02) mostra uma camada inicial de pequena espessura com material de características argilosas, seguida por um material arenoso com presença de pedregulhos quartzosos. Não se verifica a presença de material predominantemente siltoso e o avanço se dá até pouco menos de 7 m.

Esse trecho em questão se localiza muito próximo ao Córrego Brejo Comprido. A seção de resistividade elétrica revolto dá a ideia de um processo de formação de alta energia, o que condiz com o local em si, sujeito a fluxos intensos em chuvas torrenciais, capazes de carregar sedimentos de grandes dimensões, intercalado com fluxos laminares, que depositam materiais finos como siltes e argilas.

Espera-se para essa área um perfil próximo ao que revela a interpretação geotécnica e não uma seção homogênea como mostra o perfil oriundo da espacialização de sondagens. A má representatividade dessa área em questão pode ser explicada pela grande variação do solo em um pequeno espaço, o que seria impossível representar com um número comumente realizado de sondagens a percussão.

As Figuras 5.19 (a), (b) e (c) mostram, respectivamente, a seção de resistividade elétrica, o perfil de interpretação geotécnica e o perfil geotécnico oriundo da espacialização dos dados de sondagens para o trecho localizado entre a Av. NS-05 e a Av. NS-01 na Linha Central.

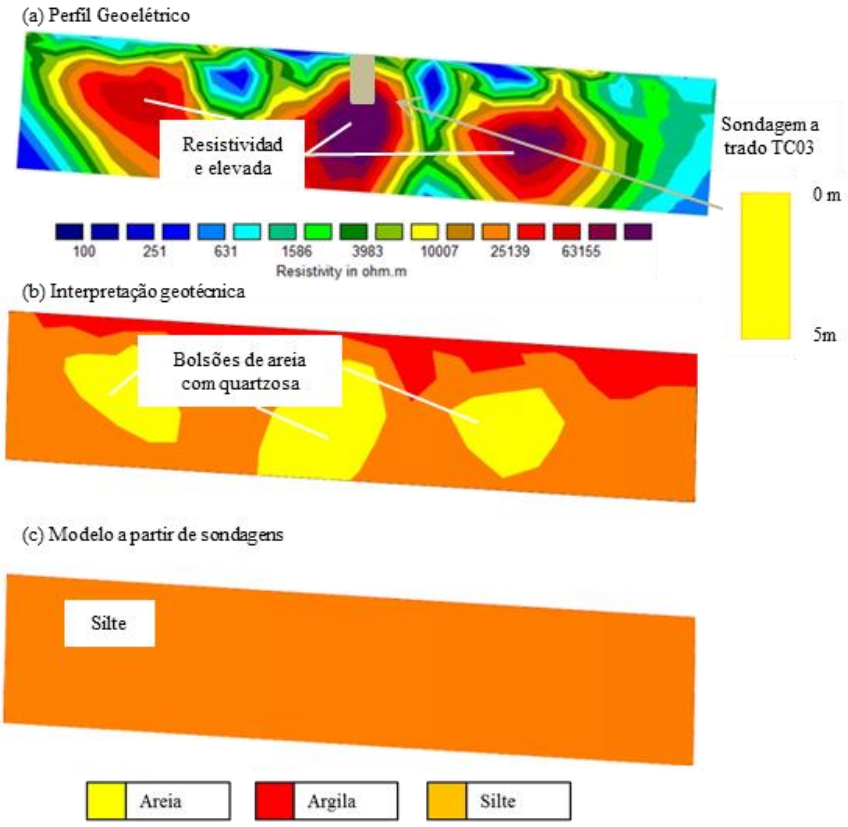


Figura 5.19 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho entre a Av. NS-05 e a Av. NS-01, Linha Central.

A seção de resistividade elétrica mostra três bolsões com materiais de alta resistividade elétrica imersos em materiais de resistividade moderada a baixa. A interpretação geotécnica associa os bolsões de resistividade elevada com a presença de materiais grosseiros, como areias e pedregulhos, e os materiais superficiais como argilosos e os demais como siltosos.

O perfil geotécnico oriundo da espacialização de sondagens, por sua vez, mostra uma seção composta unicamente por material siltoso.

A investigação a trado (TC03) revela, até a profundidade de 5 m, a ocorrência de material predominantemente arenoso, ressalvados poucos centímetros da camada inicial, orgânica, com folhas e raízes.

A área em questão está na margem oposta do Córrego Brejo Comprido, e as mesmas considerações feitas anteriormente são aplicáveis aqui. Onde, esperam-se perfis com a presença de materiais dispostos de maneira dinâmica, dada a natureza do local.

As Figuras 5.20 (a), (b) e (c) mostram, respectivamente, a seção de resistividade elétrica, o perfil de interpretação geotécnica e o perfil geotécnico oriundo da espacialização dos dados de sondagens para o trecho localizado entre a Av. NS-10 e a TO-050 na Linha Central.

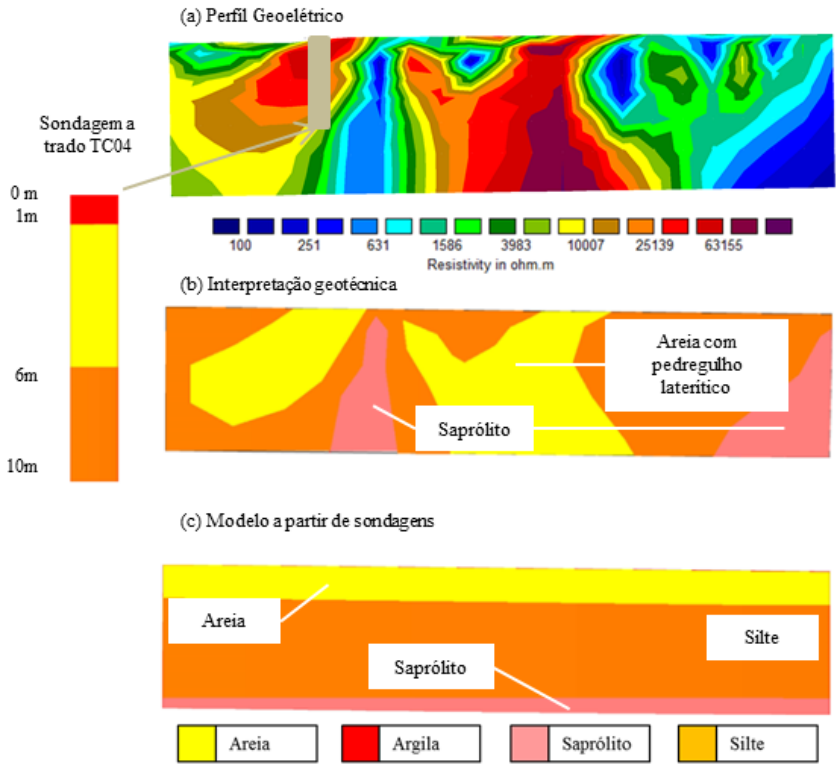


Figura 5.20 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho entre a Av. NS-10 e a TO-050, Linha Central.

A seção de resistividade elétrica apresenta uma área central e outra superficial com elevados valores de resistividade elétrica e regiões bem definidas com valores baixos de resistividade elétrica. A interpretação geotécnica associa os valores elevados à ocorrência de material pedregulhoso de origem laterítica e os baixos valores à presença de saprólito, cercados por material siltoso.

O perfil geotécnico oriundo da espacialização de sondagens mostra uma camada arenosa seguida de uma camada siltosa e posteriormente pelo saprólito.

A investigação a trado (TC04) mostra uma camada superficial argilosa, seguida por uma camada arenosa e finalmente por uma camada siltosa.

A área em questão apresenta uma declividade relativamente elevada, incomum para a área de estudo como um todo, encontra-se próxima ao Parque Cesamar, e pode ser observado, eventualmente, o afloramento de saprólito, intercalado por vastas áreas cobertas por pedregulhos lateríticos. Assim, considera-se que o perfil de espacialização de sondagens representa razoavelmente bem o aspecto geral do perfil em questão, mas que a interpretação geoelétrica ressalta a dinâmica da intercalação desse material.

5.3.5 – LINHA NORTE

A linha Norte se estende de Oeste, próximo ao Lago de Palmas, a Leste, próximo a TO-050, pela Avenida LO-012. De acordo com o modelo de espacialização de sondagens, apresenta característica predominantemente arenosa entre a Av. NS-15 e a Av. NS-05, transitando para um perfil predominantemente siltoso, com a presença eventual de materiais argilosos e arenosos. Os perfis foram obtidos no final do período chuvoso.

As Figuras 5.21 (a), (b) e (c) mostram, respectivamente, a seção de resistividade elétrica, o perfil de interpretação geotécnica e o perfil geotécnico oriundo da espacialização dos dados de sondagens para o trecho localizado entre a Av. NS-15 e a Av. NS-05 na Linha Norte.

A seção de resistividade elétrica mostra uma porção significativa com valores de elevada resistividade elétrica e uma porção a Leste com valores significativamente menores de resistividade elétrica. A interpretação geotécnica associa os valores elevados à ocorrência de areias e pedregulhos quartzosos e os valores menores à ocorrência de siltes e argilas.

O perfil oriundo da espacialização de sondagens apresenta uma predominância de material arenoso embasada por uma camada de saprólito.

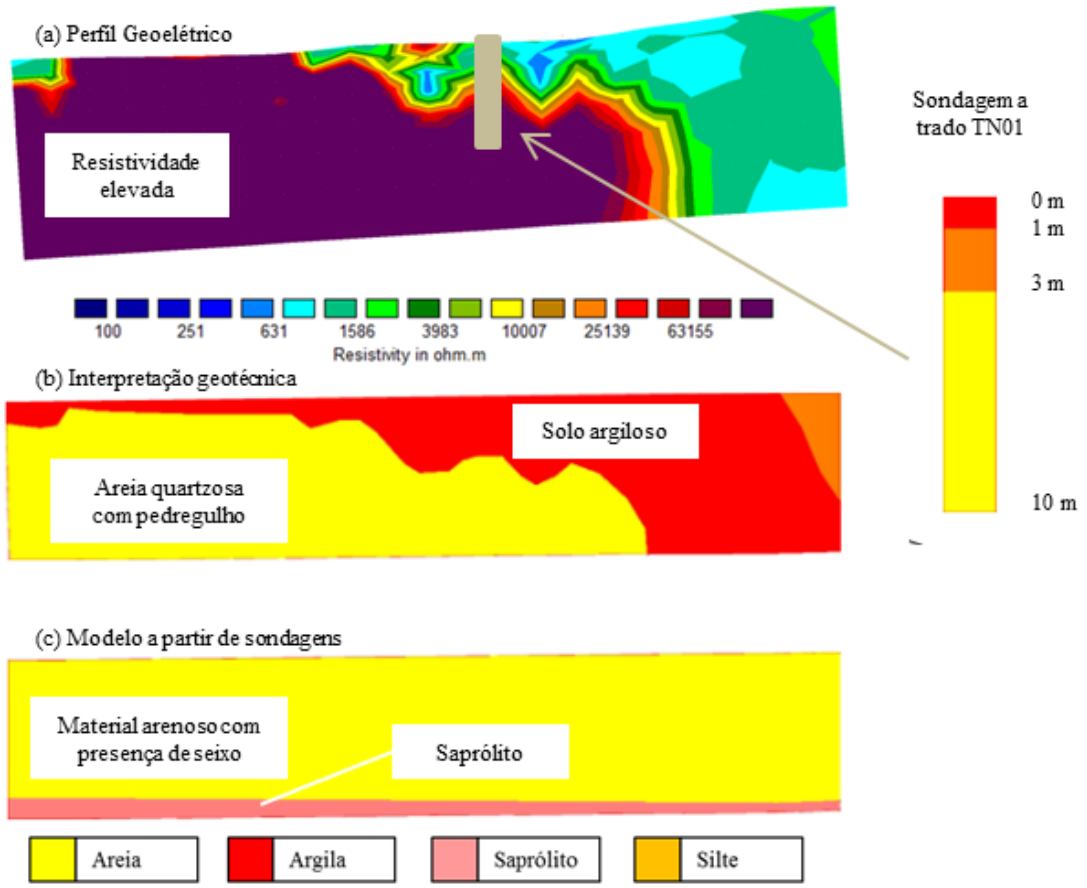


Figura 5.21 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho entre a Av. NS-15 e a NS-05, Linha Norte.

A investigação a trado (TN01) identifica uma camada superficial de material argiloso, seguida por uma camada siltosa, até aproximadamente 3 m de profundidade, onde, a partir da qual se observa material arenoso com a presença de seixos ovalados de diversas dimensões.

O modelo oriundo da espacialização de sondagens apresenta uma deficiência de dados nessa porção específica, pois se trata de uma área cercada por parques e áreas de proteção permanente. Mesmo assim, ele consegue identificar a matriz de solo arenoso que é predominante na localidade, o que revela que essa área em questão é também mais uniforme, se comparada às porções Sul e central da cidade. A interpretação geotécnica identifica camadas argilosas e siltosas que, provavelmente, ocuparam espaços erodidos de uma base arenosa.

As Figuras 5.22 (a), (b) e (c) mostram, respectivamente, a seção de resistividade elétrica, o perfil de interpretação geotécnica e o perfil geotécnico oriundo da espacialização dos dados de sondagens para o trecho localizado entre a Av. NS-05 e a Av. NS-01 na Linha Norte.

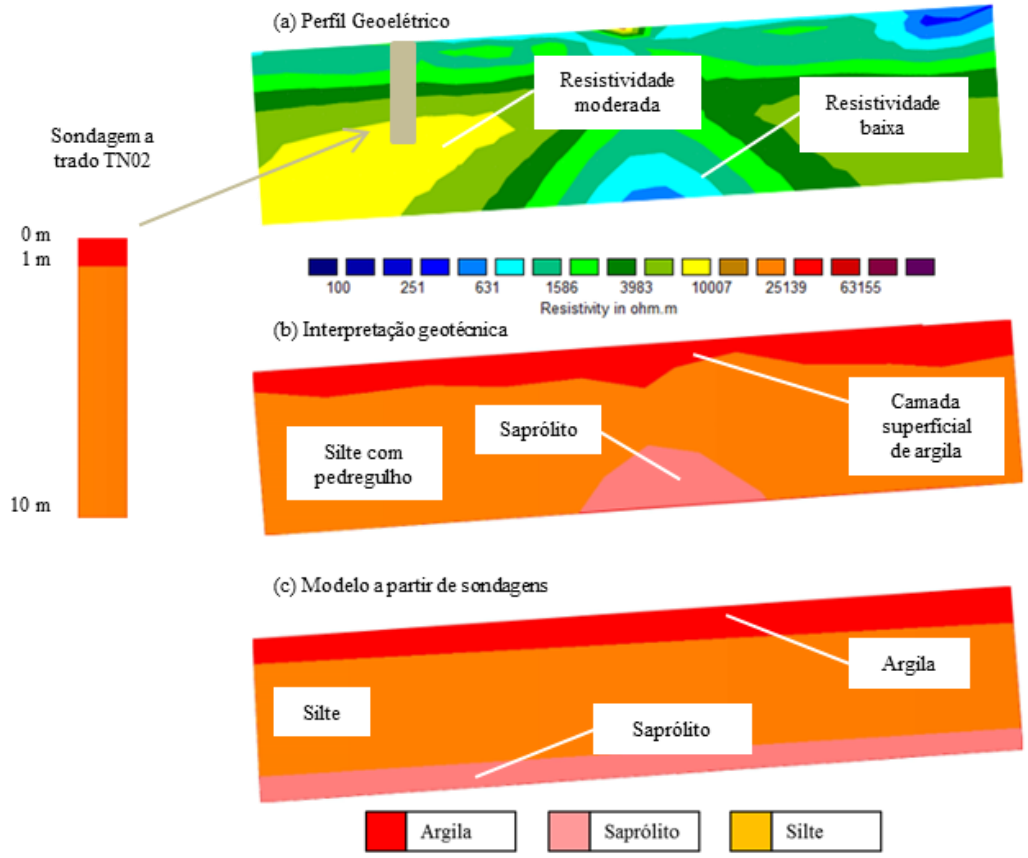


Figura 5.22 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho entre a Av. NS-05 e a NS-01, Linha Norte.

A seção de resistividade elétrica mostra a ocorrência de materiais com valores baixos e moderados de resistividade elétrica em todo a seção. A interpretação geotécnica relaciona os valores baixos, localizados na parte inferior, ao saprólito, os valores moderados ao silte e os mais baixos, localizados na parte superior, à argila.

O perfil oriundo da espacialização de sondagens identifica um perfil bastante semelhante, reproduzindo uma linearidade maior entre as camadas listadas, mas com uma estratigrafia muito similar.

A investigação a trado (TN02) mostra uma camada inicial argilosa, com pequenos pedregulhos, seguida por uma camada siltosa com cores variadas, ficando mais claras à medida que o furo se aprofunda.

Podemos inferir, que em áreas mais homogêneas os perfis traçados pela espacialização de sondagens e aqueles derivados da interpretação de seções de resistividade elétricas tendem a ser bastante similares.

As Figuras 5.23 (a), (b) e (c) mostram, respectivamente, a seção de resistividade elétrica, o perfil de interpretação geotécnica e o perfil geotécnico oriundo da espacialização dos dados de sondagens para o trecho localizado próximo à Av. NS-06 na Linha Norte.

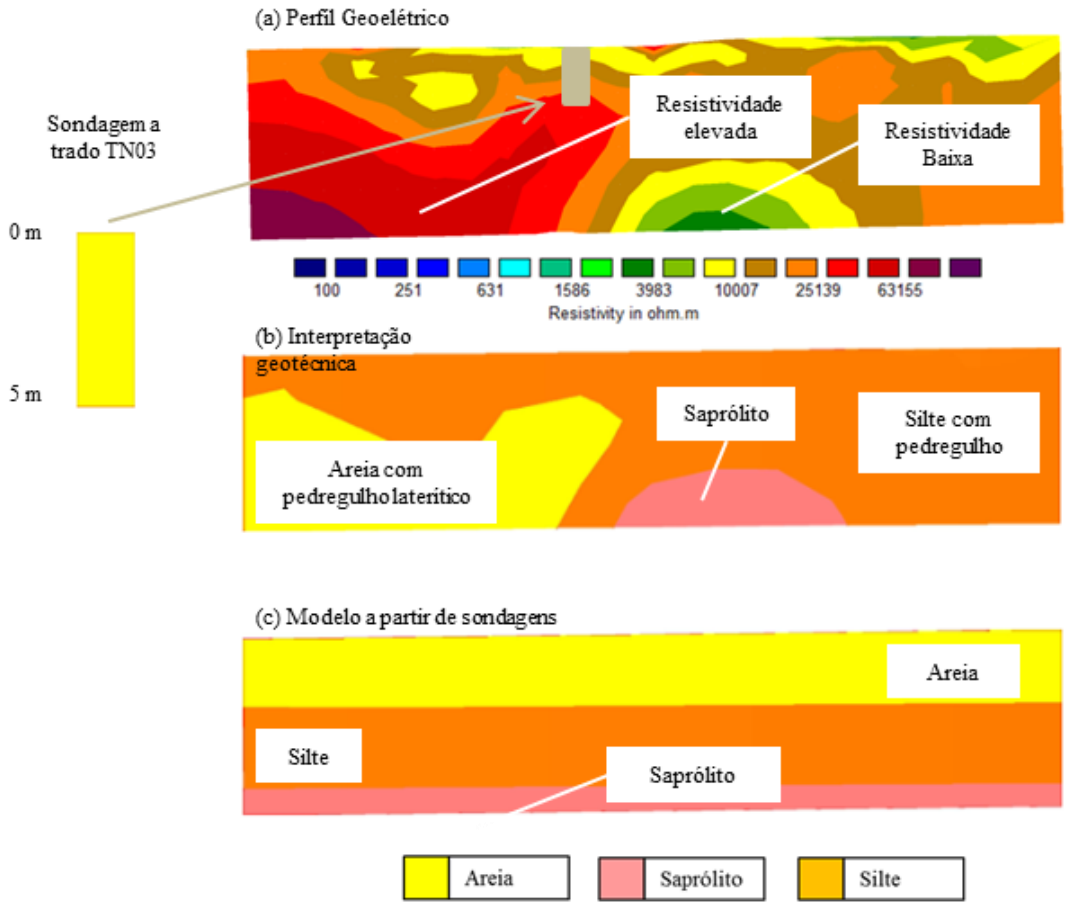


Figura 5.23 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho próximo à Av. NS-06, Linha Norte.

A seção de resistividade elétrica apresenta uma região localizada na parte inferior esquerda (Oeste) com valores elevados de resistividade elétrica, uma região central inferior com valores reduzidos e o restante com valores intermediários a elevados. A interpretação geotécnica relaciona os valores elevados à ocorrência de pedregulho laterítico, os valores baixos ao saprólito e o intermediário ao silte.

O perfil oriundo da espacialização de dados de sondagem indica a ocorrência de camada arenosa na superfície, sucedida por uma camada siltosa e por uma camada de saprólito.

A investigação a trado (TN03) mostra uma predominância de pedregulho laterítico, com areia e finos na cor avermelhada, os últimos em pequena quantidade.

Pode-se inferir que o perfil oriundo da espacialização de sondagens identifica os elementos componentes do perfil, tendo sido confirmado pela investigação a trado, mas é notável, como mostra a seção de resistividade elétrica, que os limites entre os diferentes materiais não é linear, podendo sofrer grandes variações dependendo do local em questão.

As Figuras 5.24 (a), (b) e (c) mostram, respectivamente, a seção de resistividade elétrica, o perfil de interpretação geotécnica e o perfil geotécnico oriundo da espacialização dos dados de sondagens para o trecho localizado próximo à Av. NS-08 na Linha Norte.

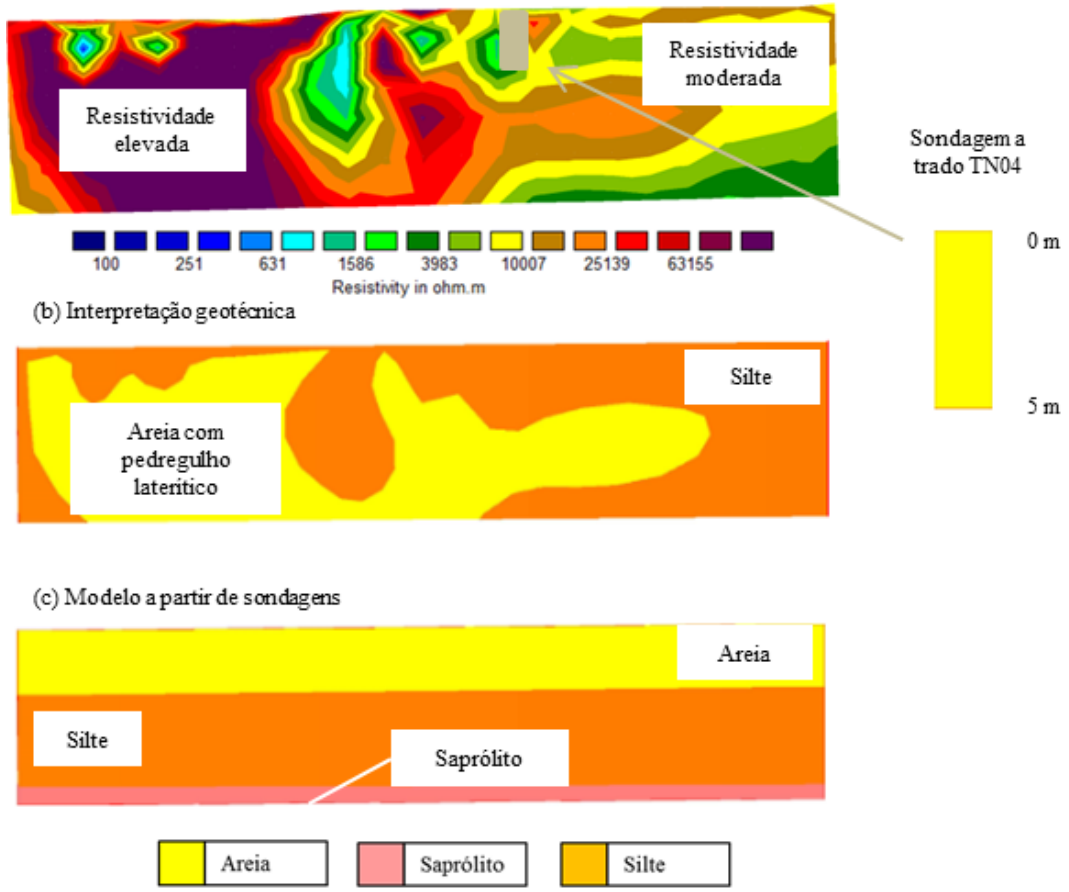


Figura 5.24 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Trecho próximo à Av. NS-08, Linha Norte.

A seção de resistividade elétrica mostra uma porção esquerda (Oeste) com valores elevados de resistividade elétrica, com o restante da seção apresentando valores baixos e intermediários. A interpretação geotécnica associa os valores elevados à ocorrência de materiais arenosos e pedregulhosos de origem laterítica e os valores intermediários com

material siltoso. Os valores baixos correspondem a trechos muito pequenos, sendo, provavelmente, siltes com algum percentual mais elevado de argila.

O perfil oriundo da espacialização de dados de sondagem indica a ocorrência de camada arenosa na superfície, sucedida por uma camada siltosa e por uma camada de saprólito.

A investigação a trado (TN04) mostra uma predominância de pedregulho laterítico, com areia e finos na cor avermelhada, os últimos em pequena quantidade.

O perfil oriundo da espacialização de sondagens identifica praticamente os mesmos materiais observados no perfil de interpretação geotécnica, contudo, os dois diferem na disposição dessas camadas, com o primeiro apresentando estratigrafia linear e o segundo uma estratigrafia irregular.

5.3.6 – LINHA SUL

A Linha Sul se estende de Oeste, próximo ao Lago de Palmas, a Leste, próximo a TO-050, pela Avenida LO-019. Os perfis foram obtidos no final d período chuvoso.

Próximo à Praia do Prata a seção de resistividade elétrica mostra uma concentração de valores de resistividade elétrica elevados com a presença de valores intermediários na camada superficial e mais baixos nas laterais. À medida que se caminha na direção da TO-050 a ocorrência de materiais de elevada resistividade elétrica é reduzida, dando lugar a materiais com resistividade elétrica baixa e moderada. Chama a atenção a heterogeneidade dos perfis obtidos para a Linha Sul, com a ocorrência de zonas bem definidas apresentando características geoelétrica bastante distintas.

As Figuras 5.25 (a), (b) e (c) mostram, respectivamente, a seção de resistividade elétrica, o perfil de interpretação geotécnica e o perfil geotécnico oriundo da espacialização dos dados de sondagens para o trecho localizado próximo a Praia do Prata na Linha Sul.

A seção de resistividade elétrica apresenta uma predominância de valores elevados de resistividade elétrica, com áreas isoladas apresentando valores intermediários e reduzidos. A interpretação geotécnica aponta a ocorrência de uma camada superficial argilosa, seguida por uma porção central arenosa, confinada entre materiais argilosos e o saprólito.

O perfil oriundo da espacialização de sondagens aponta uma camada superficial argilosa, seguida por uma camada siltosa e embasada pelo saprólito.

A investigação a trado (TS01) apresenta uma camada inicial argilosa seguida de uma camada arenosa, com a presença de pedregulhos quartzosos.

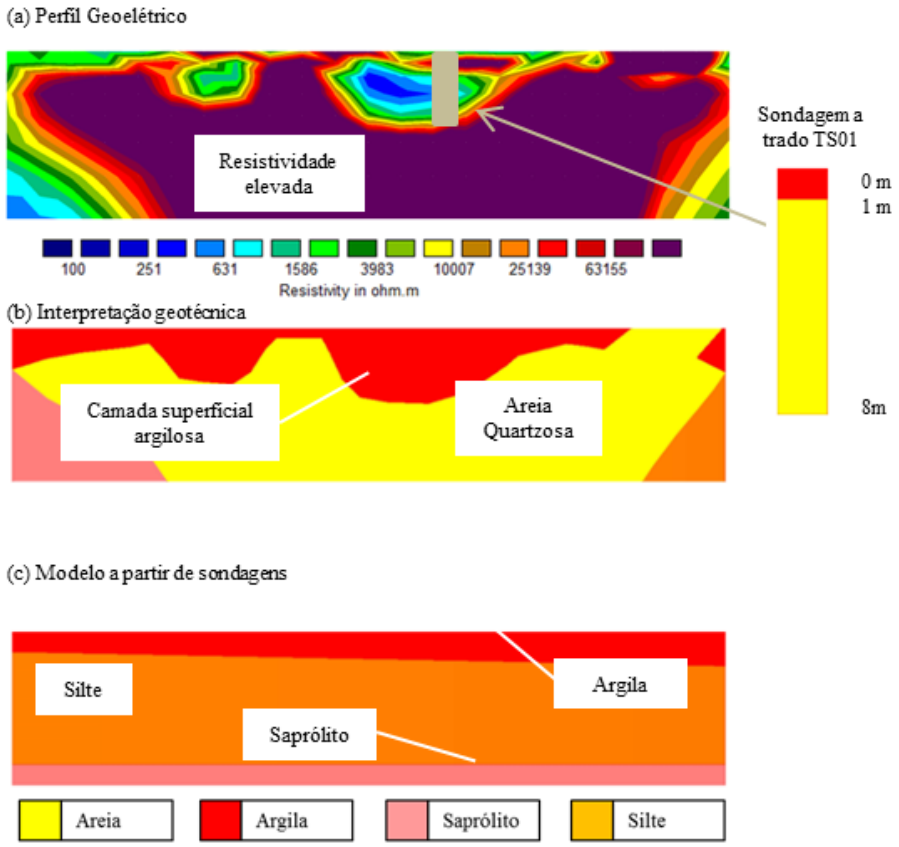


Figura 5.25 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Próximo à Praia do Prata, Linha Sul.

A área em questão possui uma baixa densidade de sondagens, cercada por matas e sem a presença de edificações. Assim, não foi possível, para a espacialização de sondagens, representar a heterogeneidade claramente observada na seção de resistividade elétrica e refletida na interpretação geotécnica.

As Figuras 5.26 (a), (b) e (c) mostram, respectivamente, a seção de resistividade elétrica, o perfil de interpretação geotécnica e o perfil geotécnico oriundo da espacialização dos dados de sondagens para o trecho localizado na altura das quadras 5, na Linha Sul.

A seção de resistividade elétrica apresenta uma seção heterogênea, com valores baixos a moderados de resistividade elétrica. A interpretação geotécnica relaciona os valores baixos de

resistividade, próximos à superfície, a materiais arenosos, e, aqueles em maior profundidade, ao saprólito. Pequenas áreas com resistividade elevada são associadas a materiais arenosos.

O perfil oriundo da espacialização de sondagens apresenta uma seção homogênea composta por material siltoso.

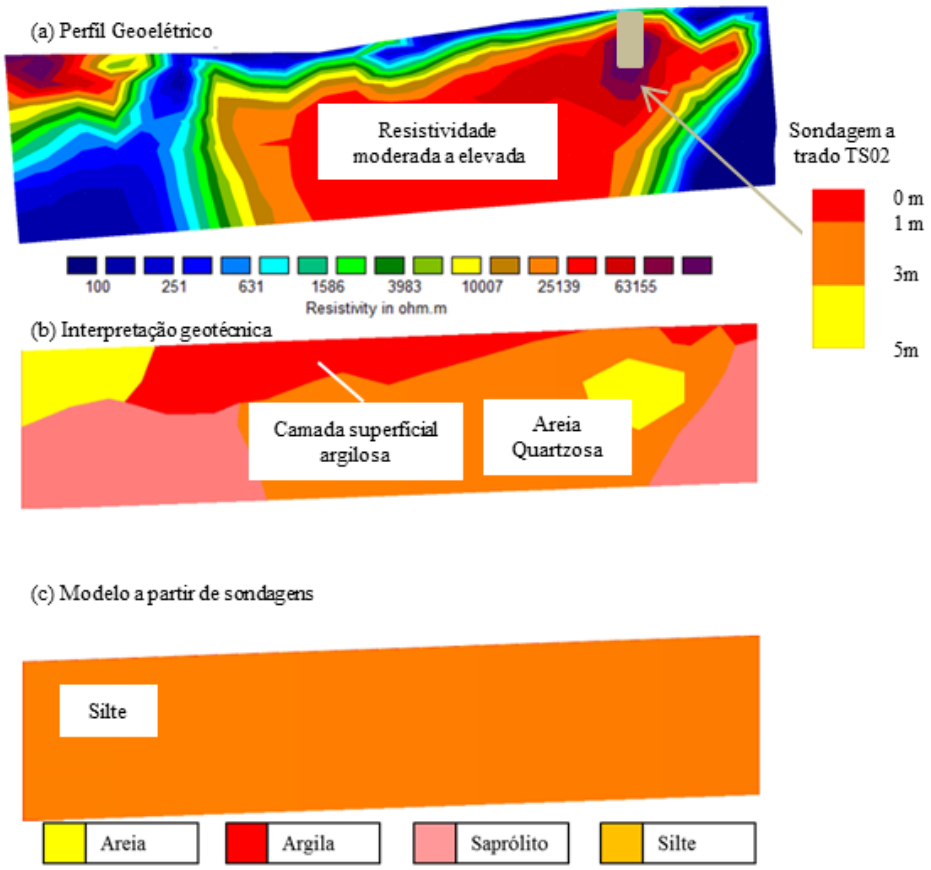


Figura 5.26 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Altura das quadras 5, Linha Sul.

A sondagem a trado (TS02) revela uma camada superficial argilosa, com pouca matéria orgânica, seguida de uma camada de material siltoso com a presença de pequenos pedregulhos, sucedida por uma camada arenosa, composta majoritariamente por areia fina a média e com a presença de pedregulhos quartzosos.

A região em questão é próxima à cabeceira de uma drenagem, a declividade é um pouco maior do que aquela habitualmente observada na área de estudo como um todo, mas ainda assim pouco acentuada. De modo que não se espera energia suficiente para o transporte de materiais muito grosseiros.

Assim, considera-se que a seção de resistividade elétrica e a interpretação geotécnica decorrente do mesmo são condizentes com o que se espera dessa área. Já o perfil derivado da

especialização de sondagens não seria capaz de representar essa variação de materiais, dada a intensidade de mudança de tipos de solo verificada em uma linha com 70 m de comprimento.

As Figuras 5.27 (a), (b) e (c) mostram, respectivamente, a seção de resistividade elétrica, o perfil de interpretação geotécnica e o perfil geotécnico oriundo da espacialização dos dados de sondagens para o trecho localizado na altura das quadras 3.

A seção de resistividade elétrica mostra a ocorrência de duas áreas com resistividade elevada, cercadas por regiões com valores baixos e intermediários. A interpretação geotécnica associa os valores elevados a materiais arenosos, os valores menores, localizados na superfície, a materiais argilosos, os valores menores, localizados em profundidades intermediárias, a siltes e os valores baixos, localizados nos extremos inferiores da seção, ao saprólito.

O perfil oriundo da espacialização de sondagens apresenta uma espessa camada de silte seguida por uma camada de saprólito.

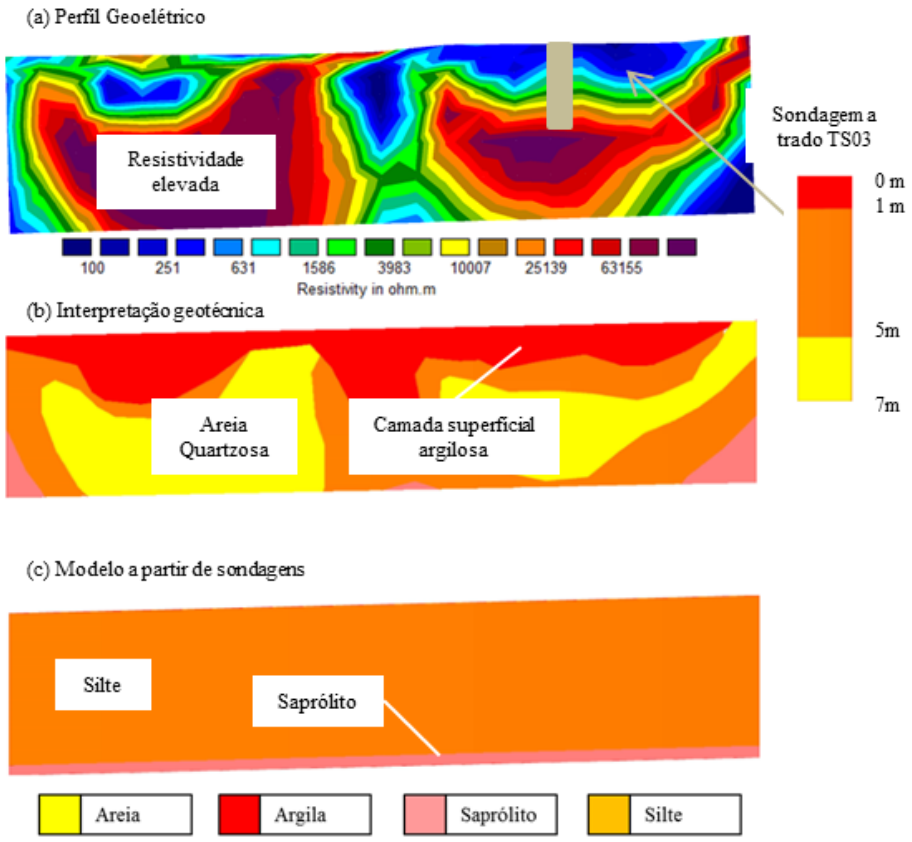


Figura 5.27 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Altura das quadras 3, Linha Sul.

A investigação a trado (TS03) mostra a ocorrência de material argiloso na superfície, seguido por uma camada de material siltoso com pequenos pedregulhos quartzosos, seguida por uma camada arenosa, também com a presença de pedregulhos.

O perfil em questão mostra um processo de formação com energia moderada, com a presença maior de materiais grosseiros, embora a presença de materiais finos como a argila e o silte ainda seja marcante. O perfil oriundo da espacialização das sondagens se mostra não adequado para representar a ocorrência de bolsões de materiais granulares encontrados.

As Figuras 5.28 (a), (b) e (c) mostram, respectivamente, a seção de resistividade elétrica, o perfil de interpretação geotécnica e o perfil geotécnico oriundo da espacialização dos dados de sondagens para o trecho localizado próximo a NS-01.

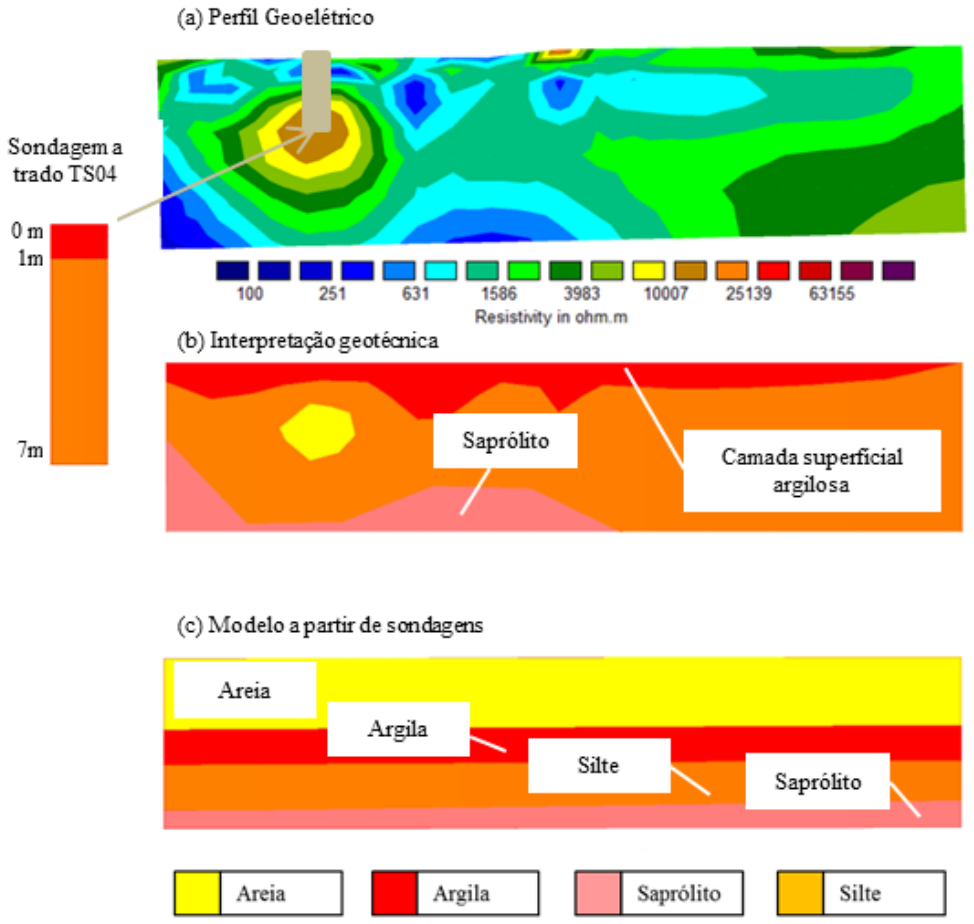


Figura 5.28 – (a) Seção de resistividade elétrica (b) Perfil de interpretação geotécnica (c) Perfil geotécnico oriundo do banco de dados de sondagens. Próximo à NS-01.

A seção de resistividade elétrica mostra valores bastante inferiores em relação aos verificados anteriormente, contudo, ainda é possível observar áreas com diferenças marcantes. A interpretação geotécnica apresenta um perfil majoritariamente composto por materiais finos

(siltes e argilas) além da ocorrência de saprólito na base do perfil e de um bolsão de material granular localizado no lado esquerdo em profundidade intermediária.

O perfil oriundo da espacialização de sondagens mostra uma maior complexidade do perfil, devido ao fato de a área em questão estar mais bem representada por sondagens. Contudo, os limites entre as camadas são lineares, não demonstrando oscilações entre os diferentes materiais ao longo do pequeno trecho analisado.

A investigação a trado (TS04) apresenta a presença de material argiloso na camada superficial seguido por uma espessa camada siltosa. Não foi encontrado material arenoso, apesar de se encontrarem pedregulhos lateríticos na argila e no silte.

Pode-se inferir que o perfil em questão apresenta características distintas dos anteriormente avaliados para a Linha Sul, já que não se encontram materiais de origem quartzosa e materiais finos são predominantes.

5.3.7 – ANÁLISE DAS INTERPRETAÇÕES GEOTÉCNICAS

A comparação entre os resultados dos perfis obtidos pela interpretação geotécnica de seções de resistividade elétricas e aqueles obtidos pela espacialização de sondagens a percussão mostra que, quando se tem dados de sondagens suficientes, ambos os meios podem representar a subsuperfície, porém, cada um com a sua escala.

A campanha de investigação a trado permitiu validar a predição de ambos os modelos e pode-se dizer que os trados TC01, TC02, TC03, TN01, TS01, TS02, TS03 E TS04 corroboram com a predição dos perfis obtidos pela interpretação geotécnica das seções geoelétricas, enquanto que os trados TN03 e TN04 são condizentes com o previsto nos perfis obtidos por meio do modelo de espacialização de sondagens SPT. Já os trados TC04 e TN02 são condizentes com a predição de ambos os perfis.

Apesar dos dados obtidos na campanha de investigação a trado corroborar, de maneira geral, com a predição dos perfis, algumas diferenças importantes foram observadas, especialmente quanto à espessura das camadas, que, por vezes, não é próxima daquela prevista. Tal fato pode ser explicado em parte por alguma imprecisão na locação dos ensaios a trado, mas também implicam na necessidade de atualização das faixas de valores de resistividade elétrica para cada tipo de solo.

As Tabelas 5.1 a 5.3 apresentam a relação entre as faixas de resistividade elétrica esperadas e aquelas observadas para cada camada de solo analisada na campanha de investigação a trado nas linhas Norte, Central e Sul, respectivamente.

Tabela 5.1 – Comparativo entre valores de resistividade elétrica esperada e observada na campanha de investigação a trado, Linha Norte.

Trado	Camada	Tipo de solo encontrado	Resistividade esperada	Resistividade observada
TN-01	1	argila	100-10.000	600-1.000
	2	silte	10.000-50.000	1.000-1.600
	3	silte	10.000-50.000	1.600-10.000
	4	areia	> 40.000	40.000-100.000
	5	areia	> 40.000	40.000-100.000
	6	areia	> 40.000	40.000-100.000
	7	areia	> 40.000	40.000-100.000
	8	areia	> 40.000	40.000-100.000
	9	areia	> 40.000	40.000-100.000
	10	areia	> 40.000	40.000-100.000
TN-02	1	argila	100-10.000	1.000-1.600
	2	silte	10.000-50.000	1.000-1.600
	3	silte	10.000-50.000	1.600-2.500
	4	silte	10.000-50.000	2.500-4.000
	5	silte	10.000-50.000	4.000-6.500
	6	silte	10.000-50.000	4.000-6500
	7	silte	10.000-50.000	6.500-10.000
	8	silte	10.000-50.000	6.500-10.000
	9	silte	10.000-50.000	6.500-10.000
	10	silte	10.000-50.000	6.500-10.000
TN-03	1	areia	> 40.000	6.500-10.000
	2	areia	> 40.000	6.500-10.000
	3	areia	> 40.000	10.000-16.000
	4	areia	> 40.000	16.000-25.000
	5	areia	> 40.000	25.000-40.000
TN-04	1	areia	> 40.000	6.500-10.000
	2	areia	> 40.000	16.000-25.000
	3	areia	> 40.000	10.000-16.000
	4	areia	> 40.000	6.500-10.000
	5	areia	> 40.000	6.500-10.000

Tabela 5.2 – Comparativo entre valores de resistividade elétrica esperada e observada na campanha de investigação a trado, Linha Central.

Trado	Camada	Tipo de solo encontrado	Resistividade esperada	Resistividade observada
TC-01	1	argila	100-10.000	1.600-2.500
	2	argila	100-10.000	2.500-4.000
	3	areia	> 40.000	6.500-10.000
	4	areia	> 40.000	25.000-40.000

	5	areia	> 40.000	40.000-100.000
	6	areia	> 40.000	40.000-100.000
	7	areia	> 40.000	40.000-100.000
	8	areia	> 40.000	40.000-100.000
	9	areia	> 40.000	40.000-100.000
	10	areia	> 40.000	40.000-100.000
	1	argila	100-10.000	2.500-4.000
	2	areia	> 40.000	4.000-6.500
	3	areia	> 40.000	10.000-16.000
TC-02	4	areia	> 40.000	25.000-40.000
	5	areia	> 40.000	40.000-10.0000
	6	areia	> 40.000	40.000-10.0000
	7	areia	> 40.000	40.000-10.0000
	1	areia	> 40.000	1.600-2.500
	2	areia	> 40.000	10.000-16.000
TC-03	3	areia	> 40.000	25.000-40.000
	4	areia	> 40.000	40.000-100.000
	5	areia	> 40.000	40.000-100.000
	1	argila	100-10.000	40.000-65.000
	2	areia	> 40.000	40.000-65.000
	3	areia	> 40.000	25.000-40.000
	4	areia	> 40.000	25.000-40.000
TC-04	5	areia	> 40.000	25.000-40.000
	6	areia	> 40.000	16.000-25.000
	7	silte	10.000-50.000	16.000-25.000
	8	silte	10.000-50.000	10.000-16.000
	9	silte	10.000-50.000	6.500-10.000
	10	silte	10.000-50.000	4.000-6.500

Tabela 5.3 – Comparativo entre valores de resistividade elétrica esperada e observada na campanha de investigação a trado, Linha Sul.

Trado	Camada	Tipo de solo encontrado	Resistividade esperada	Resistividade observada
	1	argila	100-10.000	1.600-2.500
	2	areia	> 40.000	40.000-100.000
	3	areia	> 40.000	650-1.000
TS-01	4	areia	> 40.000	400-650
	5	areia	> 40.000	400-650
	6	areia	> 40.000	4.000-6.500
	7	areia	> 40.000	40.000-65.000
	8	areia	> 40.000	40.000-100.000
	1	argila	100-10.000	400-650
	2	silte	10.000-50.000	6.500-10.000
TS-02	3	silte	10.000-50.000	25.000-40.000
	4	areia	> 40.000	40.000-100.000
	5	areia	> 40.000	40.000-100.000
TS-03	1	argila	100-10.000	250-400

	2	silte	10.000-50.000	400-650
	3	silte	10.000-50.000	650-1.000
	4	silte	10.000-50.000	1.600-2.500
	5	silte	10.000-50.000	6.500-10.000
	6	areia	> 40.000	10.000-16.000
	7	areia	> 40.000	25.000-40.000
TS-04	1	argila	100-10.000	400-650
	2	silte	10.000-50.000	400-650
	3	silte	10.000-50.000	1.600-2.500
	4	silte	10.000-50.000	2.500-4.000
	5	silte	10.000-50.000	6.500-10.000
	6	silte	10.000-50.000	10.000-16.000
	7	silte	10.000-50.000	10.000-16.000

A análise estatística dos dados apresentados nas Tabelas 5.1 a 5.3 possibilitam a reavaliação da relação entre os tipos de solo e as faixas de valores de resistividade elétrica correspondente aos mesmos. Assim, as Figuras 5.29, 5.30 e 5.31 apresentam o histograma e a curva de distribuição normal para os solos argilosos, siltosos e arenosos, respectivamente.

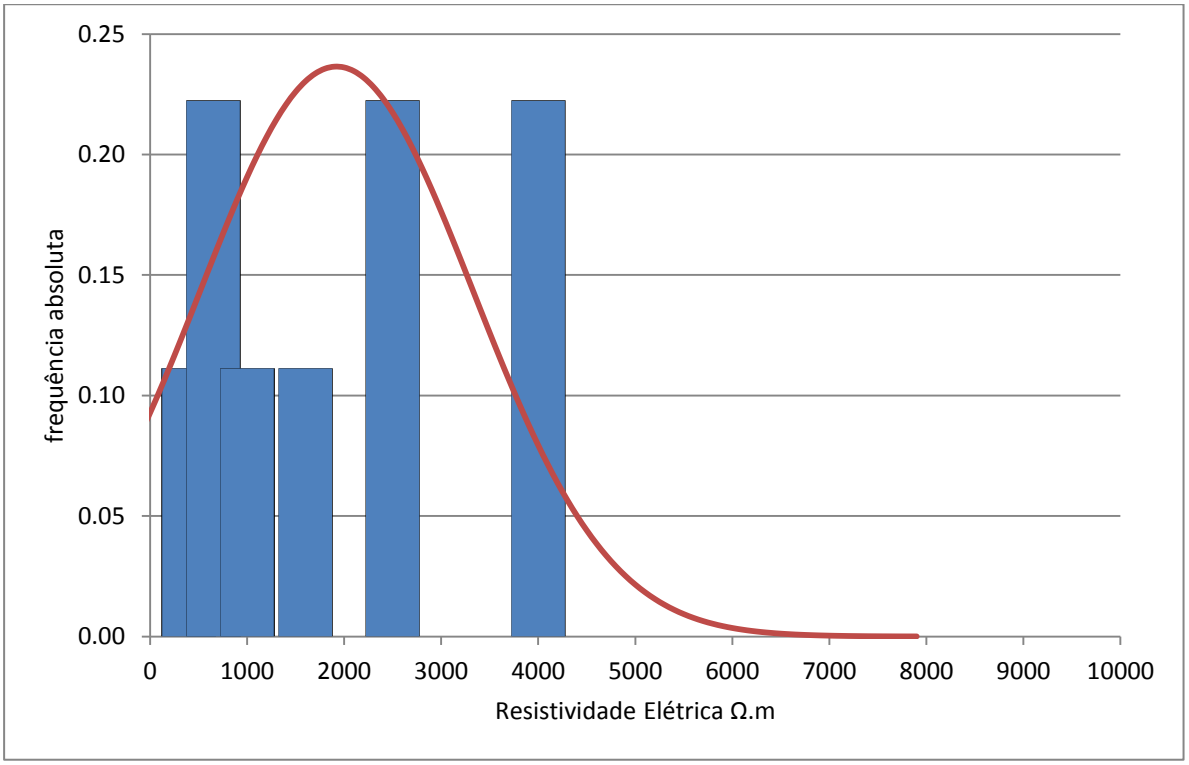


Figura 5.29 – Curva de distribuição normal e histograma para os perfis de investigação a trado, solos argilosos.

Os histogramas e as curvas de distribuição normal obtidos por meio da campanha de amostragem a trado permitiu reavaliar os intervalos inicialmente assumidos de resistividade

elétrica para cada tipo de solo. Desse modo, puderam-se reduzir os intervalos atribuídos para os solos siltosos e argilosos, bem como estabelecer um limite para os solos arenosos.

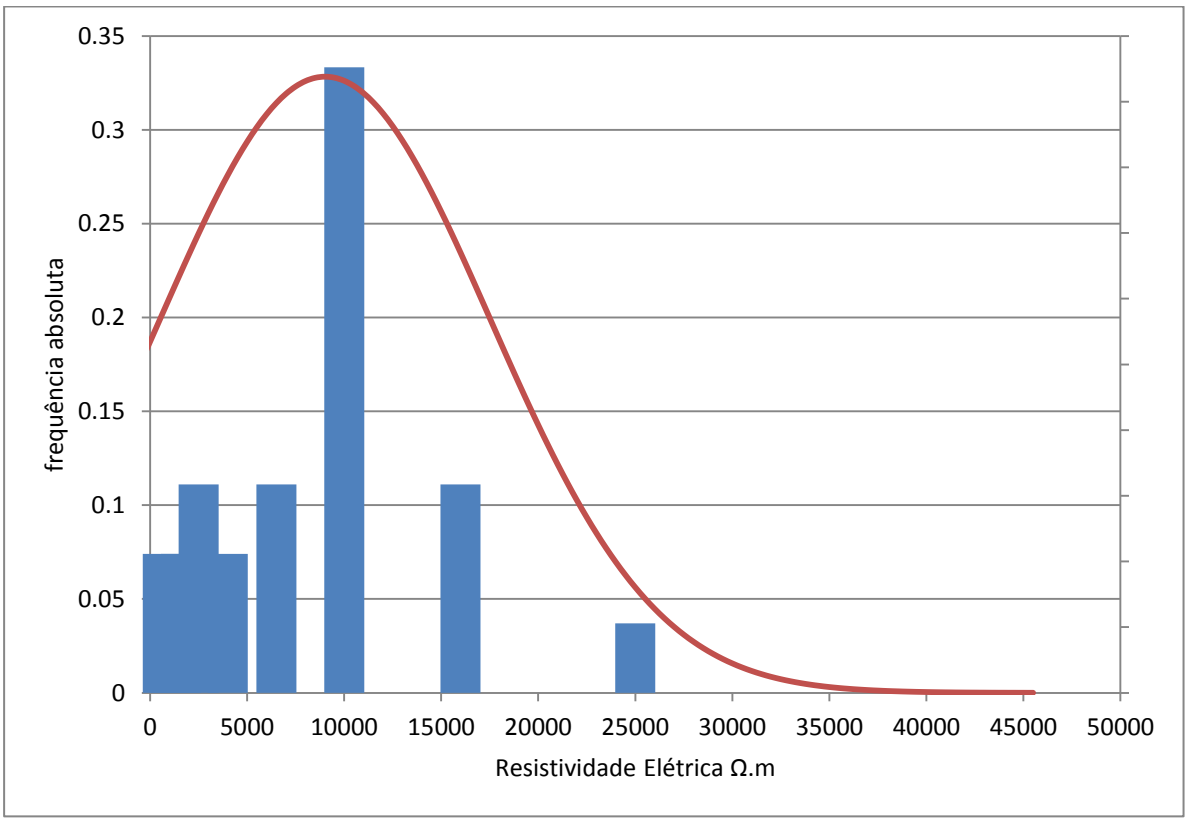


Figura 5.30 – Curva de distribuição normal e histograma para os perfis de investigação a trado, solos siltosos.

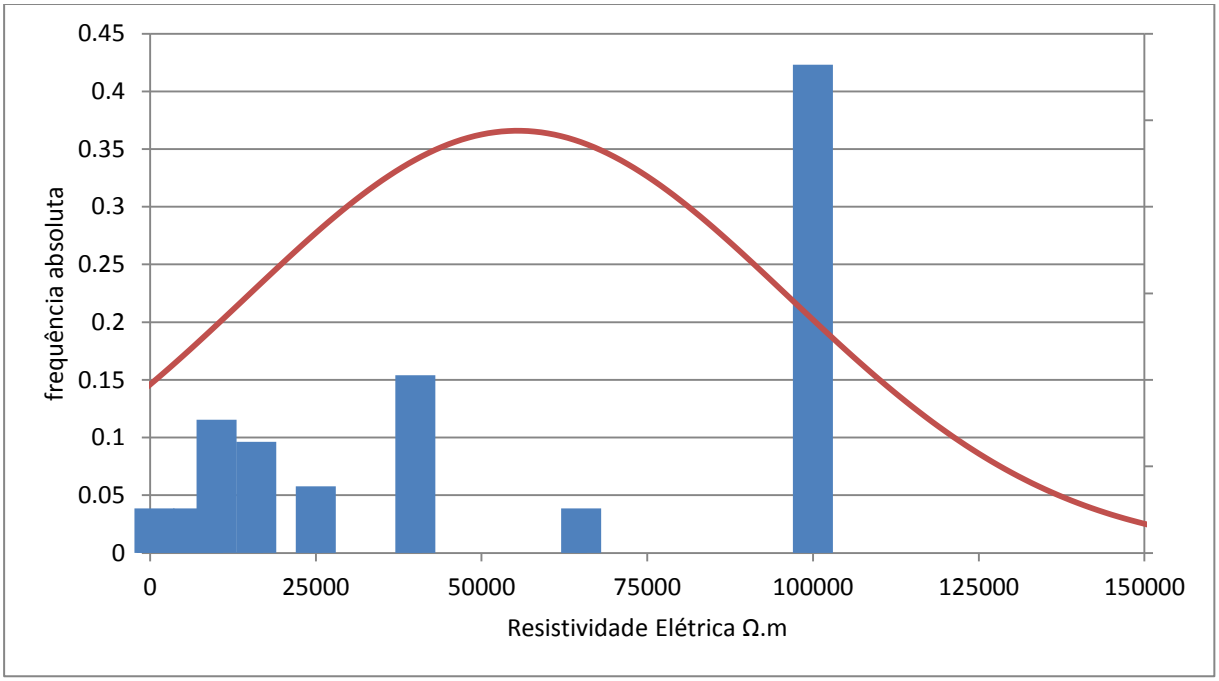


Figura 5.31 – Curva de distribuição normal e histograma para os perfis de investigação a trado, solos arenosos.

Por meio das curvas de distribuição normal e histogramas apresentados nas Figuras 5.29 a 5.31 pode-se verificar que para os solos argilosos o limite superior dos valores de resistividade elétrica pode ser atualizado para 6.000 Ω.m, para os solos siltosos o limite superior pode ser ajustado para 30.000 Ω.m e para os solos arenosos o limite superior pode ser ajustado para 150.000 Ω.m e o inferior para 10.000 Ω.m. Os dados não permitem reavaliar os demais limites inferiores e nem aqueles correspondentes ao saprólito, assim os mesmos são mantidos. A Tabela 5.4 apresenta os valores ajustados para a relação entre o tipo de solo e a resistividade elétrica.

Tabela 5.4 – Relação ajustada entre tipo de solo e intervalo esperado de resistividade elétrica.

Tipo de solo	Intervalo (Ω.m)
Saprólito	10 a 1.000
Argilas	100 a 6.000
Siltes	1.000 a 30.000
Areias	10.000 a 150.000

5.4 – ANÁLISE DOS MODELOS GEOTÉCNICOS E PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

Neste item são apresentadas as considerações pertinentes aos modelos geotécnicos de solos, de valores N_{SPT} e de nível freático, além de comentários relacionados aos produtos cartográficos elaborados.

5.4.1 – PERFIS GEOTÉCNICOS OBTIDOS PELA ESPACIALIZAÇÃO DOS DADOS DE SONDAGENS

A espacialização dos dados de sondagens mostra a compartimentação da cidade em três grandes grupos que afloram à superfície, são eles: os solos argilosos, siltosos e arenosos. Os solos argilosos e siltosos se espalham de Centro a Leste da cidade, ocupando boa parte da área total, sendo que os solos argilosos se concentram em nichos, especialmente próximo aos cursos do Córrego Taquaruçu e do Córrego Comprido.

Já os solos arenosos são predominantes na porção Oeste da cidade, em uma faixa que se estende da Praia do Prata até a Praia das Arnos, adentrando até as proximidades da Avenida Theotônio Segurado.

A área Central da Capital, onde se situa boa parte dos prédios da administração estadual e a maior parte da rede comercial e de serviços da cidade, apresenta uma cobertura variando entre solos argilosos e siltosos, intercalando-se até o alcance da superfície impenetrável ao SPT. Eventualmente podem ser encontradas camadas ferruginosas, de pequena espessura, que podem prejudicar a drenagem das águas superficiais.

A área Norte da Cidade apresenta variação significativa na topografia e na composição do subsolo. A porção Oeste, próxima ao Lago, apresenta cotas menos elevadas e nela predominam os solos siltosos, ocorrendo ainda solos arenosos com a presença de concentrações de pedregulhos quartzosos.

Na altura da quadra 405 Norte é iniciada uma mudança topográfica, com aclive mais acentuado na direção Leste. Concomitantemente à alteração topográfica ocorrem mudanças na composição do solo, que passa a apresentar-se predominantemente siltoso, com ocorrência significativa de porções argilosas. Em áreas isoladas são encontradas concentrações de pedregulhos lateríticos, chegando mesmo a aflorar em alguns pontos.

A área Sul da Cidade é bastante extensa e, assim apresenta significativa variação. Entre o Córrego Taquaruçu e o Córrego Comprido os solos arenosos de composição quartzosa predominam a Oeste. Na altura da Avenida NS-03 é observada uma alteração, com a predominância de solos siltosos. Significativas porções de solos argilosos também são notadas, especialmente ao longo do Parque Cesamar e dos córregos Comprido e Taquaruçu.

Solos arenosos são observados a Leste e também próximos a Av. Theotônio Segurado. Esse material é de origem laterítica e registra, eventualmente, a presença de camadas impermeáveis que dificultam a infiltração das águas superficiais.

5.4.2 – MODELO DE VALORES N_{SPT}

O modelo de valores N_{SPT} mostra uma distinção entre as áreas de influência dos cursos d'água e as demais áreas da cidade. Nas proximidades dos córregos Taquaruçu e Comprido e também na cabeceira do Córrego Sussuapara são observados valores baixos de N_{SPT} na superfície e nas primeiras camadas de solo. Situação que se altera somente quando se atingem camadas de pedregulhos elevando o N_{SPT} da camada, ou quando se atinge a camada de saprólito e o impenetrável.

As áreas a Oeste, notadamente aquelas compostas por material arenoso, apresentam valores baixos de N_{SPT}, o que indica serem materiais de baixa compacidade e que é compatível com

seu processo de formação, sedimentar e geologicamente recente. Por outro lado, as áreas mais elevadas apresentam valores mais altos de N_{SPT}, podendo inclusive apresentar impenetrável no primeiro metro de ensaio.

Boa parte da região próxima ao Córrego Sussuapara apresenta valores elevados de N_{SPT}, isso pode ser explicado por se tratar de um curso d'água situado em uma área com uma declividade um pouco mais acentuada, provocando a exposição de camadas de saprólito e também depositando materiais mais grosseiros, como pedregulhos, ambos os materiais com resposta mais elevada ao ensaio SPT.

5.4.3 – MODELO DE NÍVEL FREÁTICO

O modelo freático mostra que há pequena variação do nível d'água entre as estações do ano, com as áreas formadas por solos siltosos e arenosos sendo fortemente influenciadas pelos cursos d'água, como o Córrego Taquaruçu e o Córrego Comprido. Enquanto que as áreas mais próximas ao Lago de Palmas e com composição arenosa concentram seu fluxo na direção do Lago.

Isso mostra que o processo de absorção e percolação da água das chuvas é significativamente mais lento nas áreas compostas por solos argilosos e siltosos do que nas áreas formadas de solos arenosos. Ou seja, as áreas ao Centro e Leste da cidade apresentam baixa capacidade de drenar e escoar as águas das chuvas, enquanto que as áreas a Oeste apresentam uma excelente capacidade de drenagem e escoamento dessas águas.

5.4.4 PRODUTOS CARTOGRÁFICOS

As cartas elaboradas a partir dos modelos geotécnicos procuram melhorar o entendimento geotécnico da área de estudo, apresentando os dados de maneira isolada, permitindo sua análise independente.

A carta hipsométrica (Figura 4.56) mostra o relevo da área de estudo, nela podemos observar que nas proximidades do Lago, cuja cota máxima é 212 m, as cotas do terreno estão situadas entre 208 e 220 m. A passagem entre os 220 e 230 m é marcante na parte Norte, com curvas de nível bastante próximas indicando um segmento com declividade mais acentuada que os demais. Na porção Sul essa transição se dá de uma maneira mais suave que na porção Norte.

A curva hipsométrica (Figura 5.32) mostra uma área em processo final de amadurecimento, sem potencial de erosão, passando para uma tendência geral de processo de deposição sedimentar.

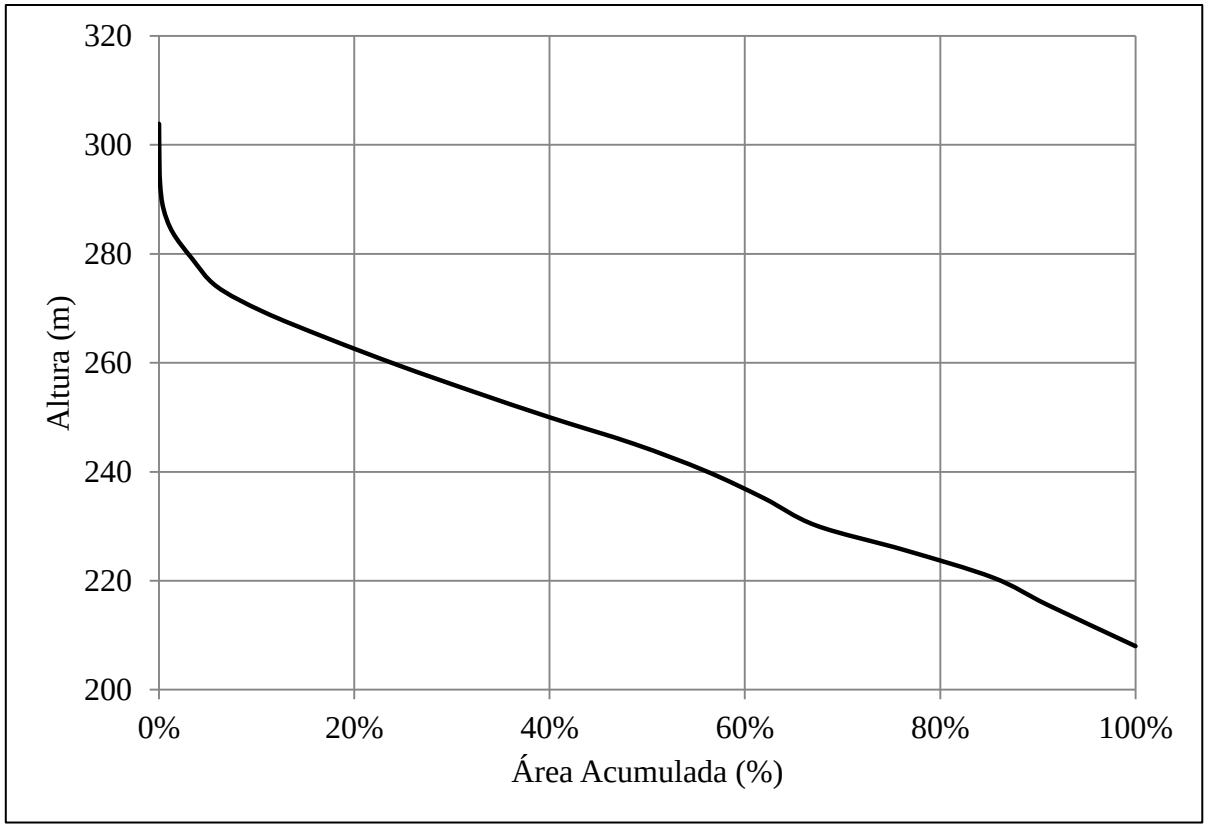


Figura 5.32 – Curva hipsométrica para a área de estudo.

A transição entre altimetrias está associada à mudança na matriz de solo, onde até os 220 m de altitude a predominância é de solos arenosos com composição quartzosa, e a partir dos 230 m tem-se a predominância de solos siltosos, com ocorrências de solos argilosos.

As Figuras 5.33 e 5.34 mostram perfis de elevação para a porção Norte e Central da área de estudo, indicando a mudança de matriz de solos.

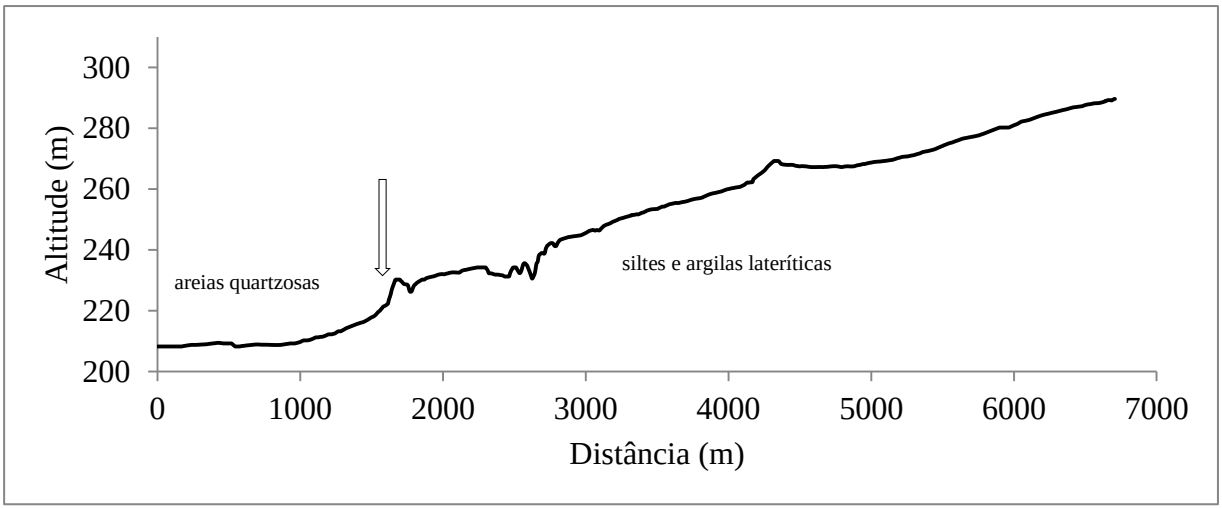


Figura 5.33 – Perfil topográfico para a porção Norte da área de estudo.

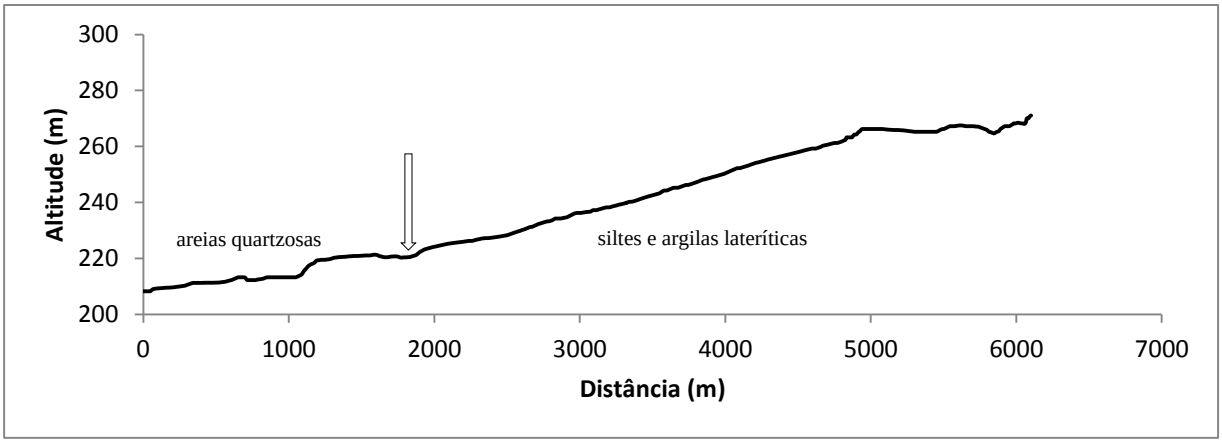


Figura 5.34 – Perfil topográfico para a porção Central da área de estudo.

As cartas de curvaturas plana e de perfil (Figuras 4.58 e 4.59) auxiliam na compreensão do relevo da área de estudo e, principalmente, fornece subsídios para trabalhos futuros que envolvam análises de susceptibilidades geotécnicas.

Outro aspecto de destaque, ressaltado na carta de declividade (Figura 4.57) e de curvaturas plana e de perfil, é a distinção entre o extremo Sul da cidade e o restante da área de estudo. No extremo Sul, onde estão localizados os setores Aureny e em que reside parte significativa da população de Palmas, o relevo é consideravelmente mais dissecado, com porções elevadas e íngremes, sendo uma região com potencial para processos erosivos.

A carta de cota impenetrável ao SPT (Figura 4.42) mostra que o impenetrável tende a acompanhar a superfície do terreno, ressalvando algumas regiões cujos perfis geotécnicos revelam a presença de materiais pedregulhosos ou o afloramento de saprólito e as áreas de influência dos Terraços Fluviais do rio Tocantins, que apresentam o impenetrável mais profundo.

As cartas de topo e base de camadas (Figuras 4.46 a 4.51) mostram superfícies das camadas de solos arenosos, argilosos e siltosos. Podemos observar que as camadas de solos siltosos e argilosos são predominantes, especialmente do centro ao Leste da área de estudo.

Os solos arenosos estão localizados na área de influência dos processos de cheia do Rio Tocantins, possuem composição quartzosa e se apresentam na granulometria de areia e seixos. Os solos arenosos encontrados fora dessa área são formados por concreções lateríticas e a única semelhança que tem com os primeiros é a dimensão dos grãos.

As cartas de valores N_{SPT} (Figuras 4.52 a 4.22) de acordo com a profundidade mostram que a maior parte da área apresenta valores bastante reduzidos para pequenas profundidades o que

inviabilizam a execução de fundações com cargas elevadas utilizando sapatas, com exceção de algumas áreas concentradas na porção Sudeste da área de estudo.

Nas porções Norte e Leste da cidade as fundações rasas tendem a ser compatíveis com cargas médias e baixas, uma vez que se obtêm valores de até 20 golpes a profundidades inferiores a 5,0 m. Contudo, as áreas localizadas especialmente próximas ao Lago apresentam valores de N_{SPT} muito reduzidos para pequenas profundidades, requerendo fundações profundas para sustentar edificações de múltiplos pavimentos.

6 – CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas ao término do trabalho, abordando os pontos mais significativos a serem ressaltados com base no que foi desenvolvido ao longo do mesmo, bem como as sugestões para as pesquisas futuras.

6.1 – CONCLUSÕES

A reunião e organização das informações contidas nos boletins de sondagens SPT, coletados na área de estudo, permitiram a criação de um banco de dados georreferenciado. Assim, a Cidade dispõe, ao final deste trabalho, de uma base de dados geotécnicos.

A análise preliminar das informações contidas no banco de dados permitiu identificar os principais tipos de solos encontrados na área de estudo. Os ensaios de laboratório realizados nas amostras coletadas no âmbito da campanha de investigação das áreas chave permitiram a verificar que se encontram na área de estudo solos argilosos, siltosos, arenosos, além de um embasamento de saprólito. A classificação granulométrica, por outro lado, mostrou que os solos argilosos e os solos siltosos são compostos em maior parte por grãos na dimensão areia, assim como os próprios solos arenosos. Já os saprólitos são constituídos majoritariamente por grãos na dimensão de siltes. Os limites de consistência mostram que os solos encontrados apresentam baixa plasticidade.

As análises de difração de raios-X apontam a predominância dos argilominerais caulinita e ilita, que apresentam características pouco expansivas para a escala da engenharia civil. Encontra-se também, o argilomineral goethita, o que explica os valores de massa específica dos solidos encontrados, um pouco acima do inicialmente esperado. O quartzo é outro mineral significativamente presente nas amostras analisadas.

A espacialização dos dados organizados no banco de dados de sondagens, utilizando o programa *Rockworks*® permitiu a criação de modelos geotécnicos de tipo de solo, nível freático e valores N_{SPT} para a área de estudo.

As informações extraídas dos modelos geotécnicos juntamente com as características topográficas da área de estudo são apresentadas na forma de cartas, que descrevem a área de estudo do ponto de vista físico e geotécnico.

A análise das cartas geotécnicas nos permite observar que o lençol freático sofre grande influência do Lago de Palmas, com o córrego Brejo Comprido e o ribeirão Taquaruçu exercendo influência local. Observa-se, ainda, que os solos arenosos predominam nas

margens do Lago de Palmas, com os solos siltosos e argilosos predominando na porção Centro-Leste da mesma. Os valores N_{SPT} são menores às margens do Lago de Palmas e maiores na porção Centro-Leste da Cidade. Assim, verifica-se uma relação entre as características geotécnicas e as características geológicas da região, onde, nas margens do Lago de Palmas encontram-se os Terrações Fluviais do Rio Tocantins e na porção Centro-Leste se encontra a formação Pimenteiras.

Do ponto de vista físico, trata-se de uma área com declividade moderada, com a maior parte da área apresentando declividade de até 10 %. Nas margens Norte dos córregos que cortam a área de estudo, contudo, encontram-se declividades acentuadas, da ordem de 100 %. A carta hipsométrica mostra que as áreas mais elevadas se encontram na porção Leste da Cidade, com uma constante diminuição da cota à medida que se aproxima do Lago de Palmas, à Oeste. As cartas de curvatura mostram um relevo predominantemente plano e retilíneo, contudo, o extremo Sul da área de estudo se mostra sensivelmente diferente, com relevo acidentado.

De modo geral, as cartas apresentadas auxiliam na compreensão das características da área de estudo e são de especial interesse para a engenharia civil, sendo importantes no planejamento da Cidade. As mesmas podem ser utilizadas para se obter uma perspectiva geral da área de estudo e se avaliar possibilidades, contudo, não substituem estudos geotécnicos específicos, fundamentais em quaisquer projetos de engenharia.

A campanha de investigação de resistividade elétrica realizada nas áreas chave permitiu, juntamente com a análise dos ensaios de caracterização das amostras coletadas com o SPT, a determinação de uma relação inicial entre cada um dos principais tipos de solo encontrados e uma faixa de valores de resistividade elétrica que aquele material poderia assumir.

A expansão dos resultados obtidos para as linhas Central, Norte e Sul, que cortam toda a Cidade, permitiu interpretar as seções geoelétricas e transformá-las em perfis geotécnicos. A comparação com os perfis extraídos dos modelos geotécnicos desenvolvidos a partir da espacialização do banco de dados de sondagens permitiu avaliar ambos os modelos. A campanha de amostragem a trado, por sua vez, permitiu aferir quais os materiais eram de fato encontrados nos pontos analisados e, assim, balizar a comparação entre ambos.

A análise dos resultados obtidos com a campanha de amostragem a trado permitiu reavaliar os valores de resistividade elétrica atribuídos inicialmente a cada tipo de solo, aperfeiçoando, assim, os valores apresentados neste trabalho.

Observa-se que os modelos desenvolvidos a partir da interpretação geotécnica de seções de resistividade elétrica apresentam uma quantidade significativamente elevada de detalhes, o que, por um lado, traz uma grande quantidade de informações e, por outro, pode levar a interpretações equivocadas, levando o analista a deduzir a ocorrência de materiais distintos quando, na verdade, do ponto de vista mecânico, apresentam o mesmo comportamento.

Já os modelos desenvolvidos a partir da espacialização de dados de sondagens mostram-se demasiadamente generalizados em áreas em que se encontram pouca densidade de dados, o que pode levar a interpretações equivocadas.

Assim, entende-se que a criação de modelos geotécnicos por meio da espacialização de dados de sondagens é importante, contudo, deve-se ter cautela em sua aplicação, utilizando-os apenas para se ter uma perspectiva geral da área de estudo, especialmente em áreas com baixa densidade de dados. Nesse cenário, a investigação por meio de resistividade elétrica pode ser aplicada para melhorar o conhecimento geotécnico dessas áreas, uma vez que acrescenta detalhes importantes aos perfis.

Campanhas de resistividade elétrica podem ser utilizadas para se obter informações mais detalhadas em uma área já modelada com dados oriundos de sondagens SPT. Permitindo a visualização de detalhes da subsuperfície e reorientando campanhas de ensaios que esclareçam eventuais dúvidas na área estudada.

Em áreas restritas é viável a utilização da eletrorresistividade para orientar ensaios de sondagem SPT, priorizando pontos de maior dúvida ou de maior interesse visando uma finalidade específica.

Situações de escassez de informações são comuns em diversas cidades brasileiras. Assim, o emprego da metodologia apresentada neste trabalho para a cidade de Palmas-TO pode ser aprimorado e replicado em outras regiões em situação semelhante e contribuir, como se espera, para o desenvolvimento econômico e social da região.

6.2 – SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Sugere-se que o banco de dados geotécnico criado para a cidade de Palmas-TO seja mantido e aprimorado à medida que novas investigações sejam realizadas na cidade, podendo ser incorporado a outros bancos de dados, como geológico, hidrológico, ambiental e outros, de modo que sua capacidade de fornecer informações seja potencializada em conformidade com as mudanças sofridas no ambiente urbano em relação aos mais diversos aspectos.

Para tanto, é fundamental o engajamento de instituições de ensino e pesquisa locais, dos órgãos públicos, especialmente das esferas estadual e municipal, de empresas privadas como as concessionárias de saneamento e a gestora da UHE Lajeado.

Os produtos cartográficos apresentados podem ser aprimorados a partir do incremento do banco de dados. Sugere-se a elaboração de cartas de capacidade de carga, contribuindo para a orientação de futuras alterações no Plano Diretor da Cidade.

Em relação aos estudos de eletrorresistividade, sugere-se que pesquisas futuras busquem relacionar os tipos de solos encontrados em cada região e os valores de resistividade elétrica observados, incrementando as referências de valores de resistividade elétrica característicos dos solos brasileiros.

Sugere-se, ainda, a realização de estudos que relacionem ensaios de resistividade elétrica de campo e de laboratório, de modo a esclarecer eventuais diferenças que possam reduzir a dispersão entre os valores medidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEL, L.S (2011). **Mapeamento Geotécnico e Caracterização dos Materiais Naturais de Construção da Província de Maputo, Moçambique [Distrito Federal].** Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Brasília – DF, 280 p.

ABNT (1968). Norma Técnica NBR 10838. **Determinação da massa específica aparente de amostras indeformadas, com emprego da balança hidrostática.** ABNT, Rio de Janeiro, RJ. 4p.

ABNT (1982). Norma Técnica NBR 7250. **Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos.** ABNT, Rio de Janeiro, RJ. 3p.

ABNT (1983). **Norma Técnica NBR 8036: Programação de Sondagens de Simples Reconhecimento dos Solos para Fundações de Edifícios**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT, Rio de Janeiro RJ, 18p.

ABNT (1984). Norma Técnica NBR 6508. **Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica.** ABNT, Rio de Janeiro, RJ. 6p.

ABNT (2001). Norma Técnica NBR 6484. **Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**, ABNT, Rio de Janeiro, RJ. 12p.

ABU-HASSANEIN, Z. S., BENSON, C. H. (1996). **Electrical Resistivity Of Compacted Clays**. In: J. Geotech. Eng., 122 (5), 397-406p.

ALTUN, S., GOKTEPE, B., SEZER, A (2013). **Geoestatistical Interpolation for Modelling SPT Data in Northern Izmir**. Sãdhanã, vol. 38, Part 6, Indian Academy of Sciences, 1451-1468p.

ALVES, P.C (2009). **Cartografia Geotécnica Para Obras Subterrâneas: Condições de Construção de Garagens Subterrâneas e Metrô no Plano Piloto de Brasília**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 168 p.

AMARO G. J. L., VILLAS R. N., KOTSHOUBEY B. (2012). **Estudo Petrográfico E Geoquímico Dos Ironstones Da Base Da Formação Pimenteiras, Borda Oeste Da Bacia Do Parnaíba, Tocantins**. Revista Brasileira de Geociências, volume 42(2), 373-396p.

ANDRIOTTI, J.L.S (2009). **Fundamentos de Estatística e Geoestatística.** Editora Universidade do Vale do Rio dos Sinos – Unisinos. Coleção Manual Universitário – ISBN 85-7431-171-5, Segunda Reimpressão, São Leopoldo - RS, 165p.

AQUINO, F.R. (2010). **Estudo Comparativo Entre a Resistividade Elétrica e Características Geotécnicas de um Solo Argiloso Compactado**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 117 p.

ARCHIE, G. E. (1941). **The Electrical Resistivity Log as an Aid in Determining Some Reservoir Characteristics**. Trans. Am. Inst. Min. Eng., Vol. 146, 54-62p.

ASTM D 2487 (2011). **Standard Pratice of Classification of Soils for Engineering Purpouse (Unified Soil Classification Sistem**. ASTM International, West Conshohocken, PA, 12p.

BATISTA, P.H.L., AZEVEDO, G.F., SOUZA, N.M. (2013). **Geoprocessamento Aplicado na Análise Morfométrica e Avaliação do Terreno na Região do Taquari, Distrito Federal, DF, Utilizando a Metodologia PUCE**. 14° Congresso Brasileiro de Geologia e Engenharia Ambiental. Rio de Janeiro, 10p.

BELCHER, D.J. (1954). **Relatório Técnico sobre a nova capital da República**. Relatório Belcher. Segunda Edição. Companhia do Desenvolvimento do Planalto Central – CODEPLAN. Brasília/DF. 287p.

BEZERRA, J.E. (2014). **Aplicação de Técnicas Geoestatísticas no Processo de Otimização de Projetos de Fundações Profundas Estaqueadas**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD – 123/2014, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 244p.

BORGES M. V. (2007). **Contribuição de um Sistema de Dados Georreferenciados Baseado em Geomorfologia e Pedologia ao Estudo de Fundações na cidade de Rio Branco, Acre**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 349p.

BORGES, M.V., SOUZA, N.M., SILVA JUNIOR, E.E.A. (2015). **Relação Da Escala De Trabalho Das Cartas Geotécnicas Versus Área De Influencia Das Sondagens E Variabilidade Do Atributo**. Anais do 15° Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental.Bento Gonçalves, 6p.

BORGES, W.R. (2007). **Caracterização Geofísica de Alvos Rasos com Aplicações no Planejamento Urbano e Meio Ambiente: Estudo Sobre o Sítio Controlado do IAG/USP**. Tese (doutorado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, SP, 256p**.**

CÂMARA MUNICIPAL DE PALMAS (1990). **Lei Complementar n° 45 de 1990**. Diário Oficial do Município, Palmas, 84p.

CÂMARA MUNICIPAL DE PALMAS (1992). **Lei N.º 371/92, de 04 de Novembro de 1.992**. Diário Oficial do Município, Palmas, 102p.

CÂMARA MUNICIPAL DE PALMAS (1993). **Lei N° 386, de 17 de fevereiro de 1993**. Diário Oficial do Município, Palmas, 76p.

CÂMARA MUNICIPAL DE PALMAS (2006). **Lei Complementar N°14 De 07 De Novembro De 2006**. Diário Oficial do Município, Palmas, 95p.

CAMPOLUNGHI, M.P.,CAPELLI, P., FUNINCIELLO, R., LANZINI, M. (2007) **Geotechnical Studies for Foundation Settlement in Holocenic Alluvial Deposits in the City of Rome (Italy).** Engineering Geology, Elsevier, 9-35p.

CAPUTO, H. P. (1996). **Mecânica dos Solos e Suas Aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 6ª edição.

CARVALHEDO, W. R.; LIRA, E. R. (2009). **Palmas Ontem e Hoje: do Interior do Cerrado ao Portal da Amazônia**. Observatorium, v. 1, p. 51-73.

CARVALHO, T.R.R. (2014). **Suscetibilidade a Processos Geodinâmicos e Aptidão à Urbanização na Bacia do rio Maracujá, Ouro Preto, MG**. Tese (Mestrado em Geotecnia) – Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 142p.

CASTRO, B.C. **Modelo Geomecânico Para os Principais Solos de Brasília**. (2011) Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 179p.

CPRM. **Banco de Dados GeoBank**. Disponível em: http://geobank.sa.cprm.gov.br/. Data de acesso: 10 de fevereiro de 2016.

CULSHAW, M.G., PRICE, S.J (2011). **The Contribuition of Urban Geology to the Development, Regeneration and Conservation of Cities.** British Geological Survey, 77p.

DAS, B. M. (2007). **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thomsom Learning, 561 p.

DEARMAN, W.R.; MATULA, M. (1976). **Environmental Aspects of Engineering Geological Mapping**. Bulletin of the International Assossiation of Engineering Geology, Krefeld, 6p.

DEARMAN,W.R. (1991). **Engineering Geological Map**. Butterworth-Heinemann Ltd. London, 396p.

DIAS, R. D. (1987). **Aplicação de Pedologia e Geotecnia no Projeto de Fundações de Linhas de Transmissão**. Tese de Doutorado, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ. 349p.

DONG, M., NEUKUM, C., HU, H., AZZAN, R. (2014). **Real 3D Geotechnical Modeling in Engineering Geology: A Case Study From the Inner City of Aachen, Germany.** Bull Eng. Geol. Environ., Berlim. Alemanha, 281-300p.

FOLLE, D. (2002). **O Estudo Geoestatístico de Sondagens SPT Para Geração de Mapas Auxiliares em Obras de Engenharia.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 217p.

FOLLE, D. (2009). **Análise e Aplicações da Geoestatística no Contexto Geológico Geotécnico Urbano.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 232 p.

FOLLE, D., Costa, J.F.C.L., Renard, D., Koppe, J.C., Zingano, A.C. (2008). **3-D Soil-Resistance Maps in the Presence of Strong Vertical Trend.** Engineering Geology, Elsevier, 46-53p.

FONTELES, H.R.N. (2003). **Caracterização Geotécnica do Subsolo da Porção Nordeste do Município de Fortaleza (CE) com Base em Geoestatística**. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 146p.

GOOGLE (2016). **Google Earth**. Município de Palmas. Disponível em: <www.maps.google.com.>. Acesso em: 12 de março de 2016.

GRANDJEAN, G., COUSIN I., SEGER M., THIESSON J., LAMBOT S., VAN WESEMAEL B., STEVENS A., SAMYN K., BITRI A., BERNARDIE S. (2009). **From Geophysical Parameters To Soil Characteristics**. Report N°BRGM/FP7-DIGISOIL-D2.1, 52 p.

GRANT, K., FINLAYSON, A. (1978). **The Application of Terrain Analysis to Urban Regional Planning**. In: INTERNATIONA CONGRESS OF THEIAEG, 3., Madrid, 1978. Proceedings... Madrid: IAEG. 79-91p.

GUIMARÃES, E. M. (1999). **Minicurso: Mineralogia dos Argilo-Minerais.** XXVII Congresso Brasileiro de Ciências do Solo**.** Departamento de Mineralogia e Petrologia/IG/UnB. Brasília.

HACK, R., ORLIC, B., OZ, U.T.L.U., S.; ZHU, S., RENGERS, N. (2006). **Three and More Dimensional Modelling in Geo-Engineering.** Bull Eng Geol Environ, 143-153p.

HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J. (2009). **Fundamentos de Física - Eletromagnetismo**. 9ª edição. Rio de Janeiro, RJ. LTC, 355p.

HASUI, Y., CARNEIRO, C.D.R., ALMEIDA, F. F. M., BARTORELLI, A. (2012). **Geologia do Brasil**. Primeira Edição, Beca-BALL edições. São Paulo – SP, 906p.

HENGL, T., REUTER, H.I. (2009). **Geomorphometry, Concepts**, **Software, Applications. Developments in Soil Science**. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, 772p.

IBGE (2017). **Censo Demográfico**. Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, dados referentes ao município de Palmas, disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/. Data de acesso: 10 de outubro de 2017.

INMET (2017). **Banco de Dados do Instituto Nacional de Meteorologia.** < http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep > acessado em abril de 2017.

IPEA (2010)**. Infraestrutura social e urbana no Brasil: Subsídios para uma agenda de pesquisa e formulação de políticas públicas** / Instituto de Pesquisa Econômica aplicada. Brasília: IPEA, 898p.

IRIS INSTRUMENTS (2016). **Syscal Kid Switch-24**. Visto em: http://www.iris-instruments.com/ acesso: 17/04/2016.

JASSO, J.A.S., ARRIETA, J.C.M., NIÑO, E.A., LEÓN, I.N., GONZÁLEZ, J.M. (2017). **Seismic Site Effects in the Central Zone of Monterrey Metropolitan Area (Northeast Mexico) From a Geotechical Multidisciplinary Assessment**. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 13p.

KARACSONYI, S., REMMENYI, P. (1970). **The Significance of the explorations Connected with the Town Development in the engineering Geological Mapping**. In: Cong. Da IAEG, Paris 10p.

KEAREY, P., Brooks, M., Hill, I. (2009)**. Geofísica da Exploração**. Oficina de textos, São Paulo, 422 p.

KOLATHAYAR, S., SITHARAM, T.G., VIPIN, K.S.(2014). **Probabilistic Liquefacion Potencial Evaluation for India and Adjoing Areas**. India Geotech Journal, 269-277p.

LANDIM, P.M.B. (2000). **Introdução aos Métodos de Estimação Espacial para Confecção de Mapas**. Unesp, São Paulo, SP, 18 p.

LOLLO, J.A. (1996). **O Uso da Técnica de Avaliação do Terreno no Processo de Elaboração do Mapeamento Geotécnico: Sistematização e Aplicação na Quadrícula de Campinas**. São Carlos: EESC/USP. 2v. Tese – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 267p.

LOLLO, J.A., Elis, V.R., PRADO, R. (2011). **Use of electrical resistivity to identify collapsible soils in Brazil**. Bulletin of Engineering Geology & the Environment. 70, 2, 299-307, May 2011. ISSN: 14359537, 299-307p.

MACIEJ, S.K., TUCHOLKA, M.P. (2014). **Determination of the Correlation between the electrical resistivity of non cohesive soils and the dregree of compactation.** Journal of Applied Geophysics, Elsevier, 43-50p.

MARACHE, A., BREYSSE, D., PIETTE, C., THIERRY, P. (2009). **Geotechnical modeling at the city scale using statistical and geostatistical tools: The Pessac case (France)**. Engineering Geology, Elsevier, 67-76p.

MASCARENHA, M.M.A. (2003). **Influência do Reccarregamento e da Sucção na Capacidade de Carga de Estacas Escavadas em Solos Porosos Colapsíveis**., Dissertação de Mestrado, Programa de Pós Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 141 p.

MASOUD, A.A., AAL, A.K.A. (2017).**Three-Dimensional Geotechnical Modeling of the Soils Riyadh City, KSA**. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 17p.

MATULA, M; PASEK, J. (1884). **Engineering Geological Maps in the Czechoslovak Socialist Republic**. In: INT. GEOL. CONG. New Delhi, 22p,

McNEILL, J.D. (1980). **Eletromagnetics Terrain Condutivity Measurement at Low Induction Numbers**. Tech. Note TN-6, Geonics Ltd, Mississauga, Ont,. Canadá, 13p.

PALACIOS, I.V., ESPINOSA, V.I., IRIGARAY, C., CHACÓN, J. (2014). **Geotechnical Map of Holocene Alluvial Sil Deposits in the Metropolitan Area of Granada (Spain): a GIS Approac**h. Bull Eng. Geol. Environ., 177-192p.

RASPA, G., MOSCATELLI, M., STIGLIANO, F., PATERA, A. MARCONI, F., FOLLE, D., VALLONE, R., MANCINI, M., CAVINATO, G.P., MILLI, S., COSTA, J.F.C.L. (2008). **Geotechnical characterization of the upper Pleistocene–Holocene alluvial deposits of Roma (Italy) by means of multivariate geostatistics: Cross-validation results.** Engineering Geology, Elsevier, 251-268p.

RIENZO, F., ORESTE, P., PELIZZA, S (2009). **3D GIS Supporting Underground Urbanisation in the City of Turin (Italy).** Geotech Geol Eng, Published online, 539-547p.

ROQUE, W. V. (2006). **Mapeamento Geoambiental da Área Urbana de Manaus-AM.** Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 162 p.

ROYSE, K.R., RUTTER, H.K., ENTWISLE, D.C. (2009). **Property Attribution of 3D Geological models in the Thames Gateway, London: New Ways of Visualing Geoscientific Information.** Bull Eng Geol Environ, British Geological Survey, 68p.

SANTOS, L.M. (2000). **Cartografia Geotécnica Regional do Município de Palmas/TO: área a oeste do meridiano 48° W. Gr**. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM – 072ª/00, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 150 p.

SECRETARIA DE INFRAESTRUTURA DE PALMAS (2010)**. Projeto Zoneamento Agroecológico do Tocantins**. Prefeitura de Palmas. SIG Palmas, 43p.

SILVA, C.P.L. (2007). **Cartografia Geotécnica de Grande Escala: Estudo de Caso Brasília – Área Tombada pela UNESCO**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 121 p.

SILVA, C.P.L. (2011). **Cartografia Geotécnica Tridimensional do Setor Noroeste de Brasília**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD – 072/2011, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 265 p.

SILVA, C.P.L., SOUZA, N.M. (2008). **Uso de Sondagens com Ensaio SPT para Mapeamento Geotécnico Tridimensional**. In: XI Congresso Nacional de Geotecnia e IV Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia, 2008, Coimbra. XI IV GEO. Coimbra: Sociedade Portuguesa de Geotecnia, v. I. p. 93-100.

SILVA, C.P.L., SOUZA, N.M., SILVA, C. M. (2012). **Modelo Tridimensional de Capacidade de Carga - Estudo de Caso**. In: XVI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2012, Porto de Galinhas - PE. COBRAMSEG 2012. São Paulo - SP: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica - ABMS, p. 1-11.

SOARES, W.C. (2011). **Banco de Dados Geológico-Geotécnicos com Base em Sondagens à Percussão e Uso de SIG: Análise Espacial da Profundidade do Lençol Freático e do N_{SPT} Para Obras de Fundação em João Pessoa – PB.** Tese de Doutorado Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 215p.

TALAMINI NETO, E (2001). **Caracterização Geotécnica Para o Solo de Curitiba Para o Planejamento e Ocupação do Espaço Subterrâneo**. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 223p.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. (1990). **Applied Geophysics**. Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 770p.

TODO H., YAMAMOTO, K., MIMURA, M., YASUDA, S. (2013). **Japan's Nation-Wide Eletronic Geotechnical Database Systems by Japanese Geotechnical Society**. Geotech. Geol. Eng, Published online, 941-963p.

VELOZO, R. (2006). **Caracterização Geológico-Geotécnica do Lixão Desativado de São Carlos-SP, com Auxílio da Geofísica.** Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 177p.

VIANA DA FONSECA, A., RIOS SILVA, S., CRUZ, N. (2008) **Geotechnical Caracterization by In Situ and Lab Tests to the Back-Analysis of a Supported Excavation in Metro do Porto.** Geotech Geol Eng, Published online, 251-264p.

YAMAMOTO, J.K., LANDIM, P.M.B.(2013). **Geoestatística: Conceitos e Aplicações.** São Paulo: Oficina de Textos, 215p.

YAN, M., MIAO, L., CUI, Y. (2012) **Electrical Resistivity Features of Compacted Expansive Soils**. Marine Georesources & Geotechnology. 30, 2, 167-179p, ISSN: 1064119X.

ZÃVOIANU, I. (1985). **Morphometry of Drainage Basins**. Second revised edition of the Romanian book: Morfometria Bazinelor Hidrografice. Elsevier Science Publishers, Amsterdam, The Netherlands, 237p.

ZUQUETTE, L.V., GANDOLFI, N. (2004). **Cartografia Geotécnica.** Oficina de Textos, São Paulo, 190p.

APÊNDICE A – ENSAIOS DE CAMPO

São apresentados os laudos de sondagem referentes aos ensaios executados.

A.1 – SONDAGENS À PERCUSSÃO

As Figuras A.1 a A.6 apresentam os laudos de sondagens referentes aos ensaios executados.

Interessado:	**Bruno Carrilho - UFT**	**Furo:**	**SP 01**
Obra:	**Pesquisa Geotécnica**	**Folha:**	**04**
Local obra:	**Av. Teotônio Segurado próximo ao Espaço Cultural - Palmas-TO**	**Data do Laudo:**	**10/03/16**

Descrições do amostrador: Diâmetro externo = 2 1/2" Peso batente= 65 Kg Diâmetr o do Revestimento = 2 1/2"

Diâmetro interno =1 3/8" Altura da queda = 75 cm Diâm etro da Haste = 1"

Profun-didade	Nº da Amostra	N.A. 24 h	1º+2º2º+3º1º e 2º penetração 15	2ª e 3ª penetração* 15	10 20 30 40 50	Consistência / **Compacidade	Recupera-ção	Descrição do Solo
-1,00	01						50%	Camada vegetal.
-2,00	02		13	13		mediamente compacta**	27%	Argila siltosa pouco arenosa de cor marrom.
-3,00	03		15	17		rija*	28%	Pedregulho laterítico pouco argiloso arenoso de cor vermelho amarelado.
-4,00	04		5	5		pouco compacta**	31%	Argila siltosa pouco arenosa com presença de pedregulho laterítico de cor marrom.
-5,00	05		7	7		pouco compacta**	30%	
-6,00	06		50/10			muito compacta**	-	
-7,00	07		10	13		rija*	23%	Silte argiloso pouco arenoso de cor amarela com traços cinza.
-8,00	08		50/10			muito compacta**	10%	Silte arenoso de cor vermelho.
-9,00	09		50/10			muito compacta**	15%	
-10,00	10		50/13			dura*	15%	Silte pouco argiloso arenoso de cor rosa.
-11,00	11							
-12,00	12							
-13,00	13							
-14,00	14							
-15,00	15							
-16,00	16							
-17,00	17							
-18,00	18							
19,00	19							

Nível d'água :	**3,30 m**	**Cota do Furo - GPS:**	
Data do N.A.:	**11/11/15**	**Prof. da sondagem:**	**9,13 m**
Sondador:	**Samuel**	**Coordenadas:**	**22 L 0792159**
Engº Resp.: Marcos Coelho Milhomem - Crea TO 211129/D		**Equip: GPS12 Garmin**	**UTM 8871081**

Figura A.1 – Boletim de sondagem SPT 01.

Interessado:	**Bruno Carrilho - UFT**	**Furo:**	**SP 02**
Obra:	**Pesquisa Geotécnica**	**Folha:**	**05**
Local obra:	**Av. Teotônio Segurado próximo ao Espaço Cultural - Palmas-TO**	**Data do Laudo:**	**10/03/16**

Descrições do amostrador: Diâmetro externo = 2 1/2" Peso batente= 65 Kg Diâmetr o do Revestimento = 2 1/2"

Diâmetro interno =1 3/8" Altura da queda = 75 cm Diâm etro da Haste = 1"

Profun-didade	Nº da Amostra	N.A. 24 h	1º+2º 15	2º+3º 15	1º e 2º penetração / 2ª e 3ª penetração (10 20 30 40 50)	*Consistência / **Compacidade	Recupera-ção	Descrição do Solo
-1,00	01						42%	Argila arenosa de cor marrom.
-2,00	02		14	13		rija*	20%	Pedregulho laterítico pouco argiloso e arenoso de cor vermelho amarelado.
-3,00	03		10	10		média*	29%	Silte pouco argiloso e arenoso de cor vermelho.
-4,00	04		8	9		média*	30%	
-5,00	05		19	20		compacta**	26%	Silte arenoso pouco argiloso de cor rosa com traços cinzas.
-6,00	06		30	40		dura*	13%	Silte pouco argiloso e arenoso de cor variegado.
-7,00	07		50/30			muito compacta**	8%	Silte arenoso pouco argiloso de cor rosa.
-8,00	08		50/30			muito compacta**	6%	
-9,00	09		50/30			dura*	13%	Silte argiloso pouco arenoso com presença de pedregulho laterítico de cor variegado.
-10,00	10		50/25			dura*	13%	
-11,00	11							
-12,00	12							
-13,00	13							
-14,00	14							
-15,00	15							
-16,00	16							
-17,00	17							
-18,00	18							
19,00	19							
-20,00	20							Observação: Furo revestido até 4,0 metros

Nível d'água :	**5,00 m**	**Cota do Furo - GPS:**	
Data do N.A.:	**17/11/15**	**Prof. da sondagem:**	**9,25 m**
Sondador:	**Samuel**	**Coordenadas:**	**22 L 0793546**
Engº Resp.: Marcos Coelho Milhomem - Crea TO 211129/D		**Equip: GPS12 Garmin**	**UTM 8894221**

Figura A.2 – Boletim de sondagem SPT 02.

Interessado:	**Bruno Carrilho - UFT**	**Furo:**	**SP 03**
Obra:	**Pesquisa Geotécnica**	**Folha:**	**06**
Local obra:	**Av. Teotônio Segurado próximo ao SESC - Palmas-TO**	**Data do Laudo:**	**10/03/16**

Descrições do amostrador: Diâmetro externo = 2 1/2" Peso batente= 65 Kg Diâmetr o do Revestimento = 2 1/2"

Diâmetro interno =1 3/8" Altura da queda = 75 cm Diâm etro da Haste = 1"

Profun-didade	Nº da Amostra	N.A. 24 h	1º+2º 15	2º+3º 15	1º e 2º penetração / 2ª e 3ª penetração (10 20 30 40 50)	*Consistência / **Compacidade	Recupera-ção	Descrição do Solo
-1,00	01						23%	Argila pouco arenosa de cor vermelha.
-2,00	02		4	4		mole*	13%	
-3,00	03		5	5		mole*	12%	
-4,00	04		6	6		média*	27%	
-5,00	05		6	6		média*	18%	
-6,00	06		6	6		média*	39%	Silte arenoso pouco argiloso com pedregulho laterítico de cor vermelho amarelado.
-7,00	07		39/30	33/25		dura*	26%	
-8,00	08		50/15			dura*		Amostra lavada.
-8,13	09		50/13			dura*		
								Observação: Furo revestido até 6,0 metros

Nível d'água :	**Não foi alcançado**	**Cota do Furo - GPS:**	**282,00 m**
Data do N.A.:	**18/11/15**	**Prof. da sondagem:**	**8,13 m**
Sondador:	**Samuel**	**Coordenadas:**	**22L 0793258**
Engº Resp.: Marcos Coelho Milhomem - Crea TO 211129/D		**Equip: GPS12 Garmin**	**UTM 8875659**

Figura A.3 – Boletim de sondagem SPT 03.

Interessado:	**Bruno Carrilho - UFT**	**Furo:**	**SP 04**
Obra:	**Pesquisa Geotécnica**	**Folha:**	**07**
Local obra:	**Av. Teotônio Segurado próximo ao SESC - Palmas-TO**	**Data do Laudo:**	**24/112015**

Descrições do amostrador: Diâmetro externo = 2 1/2" Peso batente= 65 Kg Diâmetro do Revestimento = 2 1/2"
Diâmetro interno =1 3/8" Altura da queda = 75 cm Diâme tro da Haste = 1"

Profun-didade	Nº da Amostra	N.A. 24 h	1º+2º 15	2º+3º 15	1ª e 2ª penetração / 2ª e 3ª penetração (10 20 30 40 50)	Consistência / **Compacidade	Recuperação	Descrição do Solo
-1,00	01						40%	
-2,00	02		6	6		média*	35%	Argila pouco arenosa de cor vermelha
-3,00	03		7	6		média*	22%	
-4,00	04		7	7		média*	13%	
-5,00	05		50	37		dura*	10%	Silte Arenoso pouco argiloso com laterita cor vermelha amarelada
-6,00	06		11	12		rija*	17%	
-7,00	07		16	14		rija*	13%	Silte Argiloso arenoso com presença de laterita cor rosa escuro
-8,00	08		14	17		rija*	23%	Silte pouco argiloso arenoso cor variegada
-9,00	09		14	18		rija*	21%	
-10,00	10		19	25		dura*	17%	
-11,00	11		20	33		dura*	16%	
-12,00	12		25	35		dura*	14%	
-13,00	13		50/30			dura*	8%	
-13,25	14		50/25			dura*	6%	

Nível d'água :	**Não foi alcançado**	**Cota do Furo - GPS:**	**312,00m**
Data do N.A.:	**20/11/15**	**Prof. da sondagem:**	**13,25m**
Sondador:	**Samuel**	**Coordenadas:**	**22L 0793154**
Engº Resp.: Marcos Coelho Milhomem - Crea TO 211129/D		**Equip: GPS12 Garmin**	**UTM 8875555**

Figura A.4 – Boletim de sondagem SPT 04.

Interessado:	**Bruno Carrilho - UFT**	**Furo:**	**SP 05**
Obra:	**Pesquisa Geotécnica**	**Folha:**	**07**
Local obra:	**Parque Sussuapara**	**Data do Laudo:**	**10/03/16**

Descrições do amostrador: Diâmetro externo = 2 1/2" | Peso batente= 65 Kg | Diâmetro do Revestimento = 2 1/2"

Diâmetro interno =1 3/8" | Altura da queda = 75 cm | Diâme tro da Haste = 1"

Profun-didade	Nº da Amostra	N.A. 24 h	1º+2º 15	2º+3º 15	1ª e 2ª penetração / 2ª e 3ª penetração (10 20 30 40 50)	Consistência / **Compacidade	Recuperação	Descrição do Solo
-1,00	01						18%	Argila pouco arenosa de cor cinza.
-2,00	02		2/45	1/15		muito mole*	15%	
-3,00	03		2/30	1/15		dura*	14%	Argila siltosa com pedregulho de quartzo.
-4,00	04		8	8		média*	12%	Silte arenoso pouco argiloso de cor amarelada.
-5,00	05		9	11		rija*	11%	
-6,00	06		50/30	29/15		dura*	15%	Silte arenoso com pedregulho de quartzo e seixo de cor amarelada.
-7,00	07		50/30	27/15		dura*	13%	
-8,00	08		25	40/26		dura*	12%	
-8,18	09		50/18	13/03		dura*	4%	Pedregulho de graduação grossa de cor variegada.
								Lavagem de 10 min. Avançou 03cm.
								Lavagem de 10 min. Avançou 02cm.
								Lavagem de 10 min. Avançou 02cm.

Nível d'água :	**Não foi alcançado**	**Cota do Furo - GPS:**	**220,00 m**
Data do N.A.:	**04/01/16**	**Prof. da sondagem:**	**8,25 m**
Sondador:	**Samuel**	**Coordenadas:**	**22L 0790384**
Engº Resp.: Marcos Coelho Milhomem - Crea TO 211129/D		**Equip: GPS12 Garmin**	**UTM 8874389**

Figura A.5 – Boletim de sondagem SPT 05.

Interessado:	**Bruno Carrilho - UFT**	**Furo:**	**SP 06**
Obra:	**Pesquisa Geotécnica**	**Folha:**	**07**
Local obra:	**Parque Sussuapara**	**Data do Laudo:**	**10/03/16**

Descrições do amostrador: Diâmetro externo = 2 1/2" Peso batente= 65 Kg Diâmetro do Revestimento = 2 1/2"
Diâmetro interno =1 3/8" Altura da queda = 75 cm Diâme tro da Haste = 1"

Profun-didade	Nº da Amostra	N.A. 24 h	1º+2º 15	15	2º+3º1º e 2º penetração 2ª e 3ª penetração 10 20 30 40 50	Consistência / **Compacidade	Recuperação	Descrição do Solo
-1,00	01						30%	Argila arenosa de cor marrom.
-2,00	02		2	2		muito mole*	40%	Argila com pedregulho de laterita de graduação fina de cor amarelada.
-3,00	03		2	2		muito mole*	12%	
-4,00	04		50/08	20/08		dura*	13%	Argila com pedregulho de quartzo de graduação grossa de cor variegada.
-5,00	05		50/19	15/04		dura*	11%	
-6,00	06		24	32		dura*	13%	Argila silte arenosa de cor variegada.
-7,00	07		50/22	21/07		dura*	10%	
-8,00	08		50/25	35/10		dura*	14%	Argila siltosa com pedregulho de graduação grossa d e cor variegada.
-8,17	09		50/17	10/02		dura*	5%	
								Lavagem de 10 min. Avançou 03cm.
								Lavagem de 10 min. Avançou 03cm.
								Lavagem de 10 min. Avançou 02cm.

Nível d'água :	**1,23 m**	**Cota do Furo - GPS:**	**226,00 m**
Data do N.A.:	**04/01/16**	**Prof. da sondagem:**	**8,25 m**
Sondador:	**Samuel**	**Coordenadas:**	**22L 0790375**
Engº Resp.: Marcos Coelho Milhomem - Crea TO 211129/D		**Equip: GPS12 Garmin**	**UTM 8874409**

Figura A.6 – Boletim de sondagem SPT 06.

A.2 – PERFIS DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA – ÁREAS CHAVE

As Figuras A.7 a A.21 apresentam os perfis de resistividade elétrica para as áreas do Espaço Cultural, Sesc e Parque Sussuapara, nos períodos chuvoso e de estiagem, respectivamente.

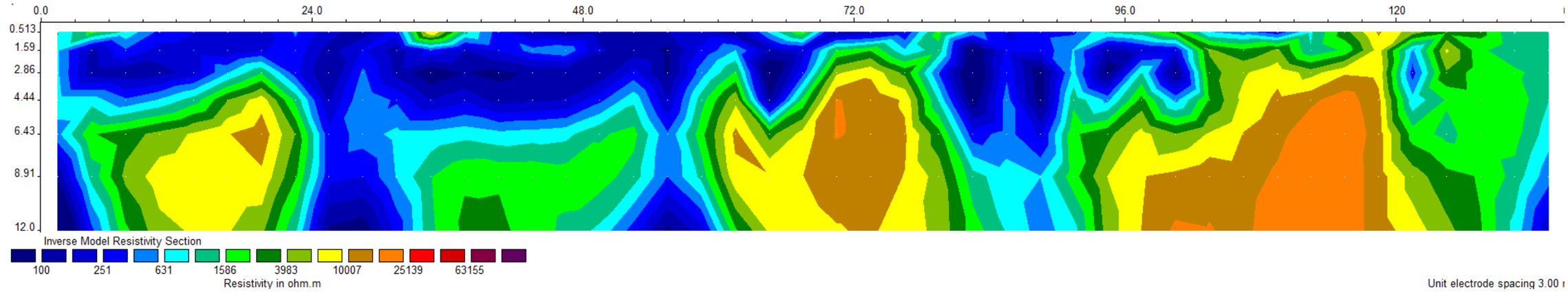


Figura A.7– Seção de resistividade elétrica obtida para o Espaço Cultural no início do período chuvoso, parte Sul.

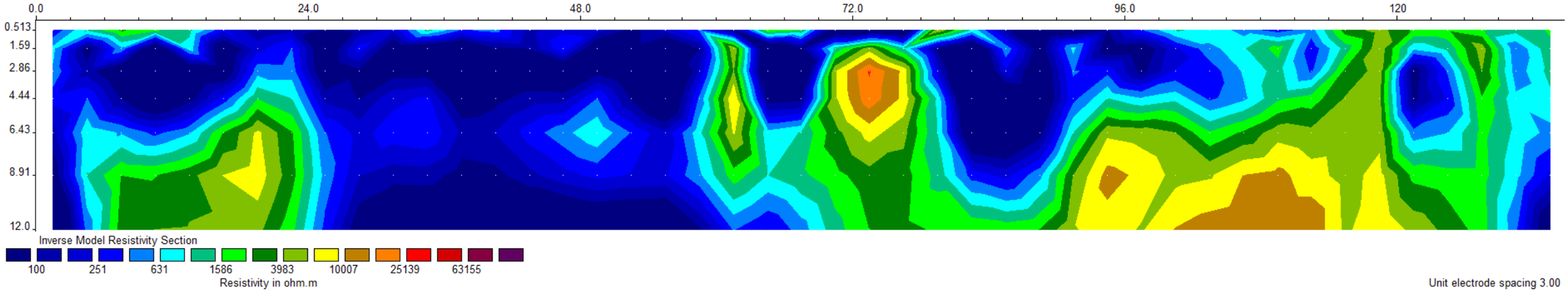


Figura A.8– Seção de resistividade elétrica obtida para o Espaço Cultural no final do período chuvoso, parte Sul.

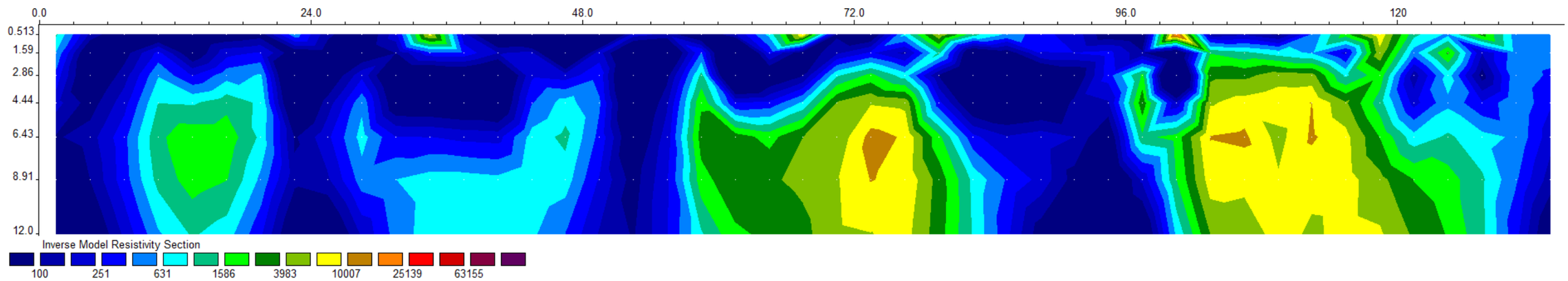


Figura A.9– Seção das diferenças observadas para eletrorresistividade entre o início e o final do período chuvoso para o Espaço Cultural, parte Sul.

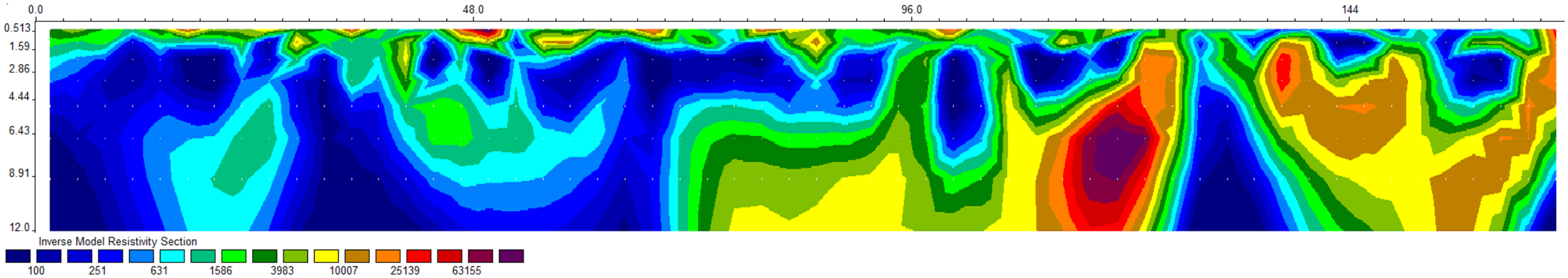


Figura A.10– Seção de resistividade elétrica obtida para o Espaço Cultural no inicio do período chuvoso, parte Norte.

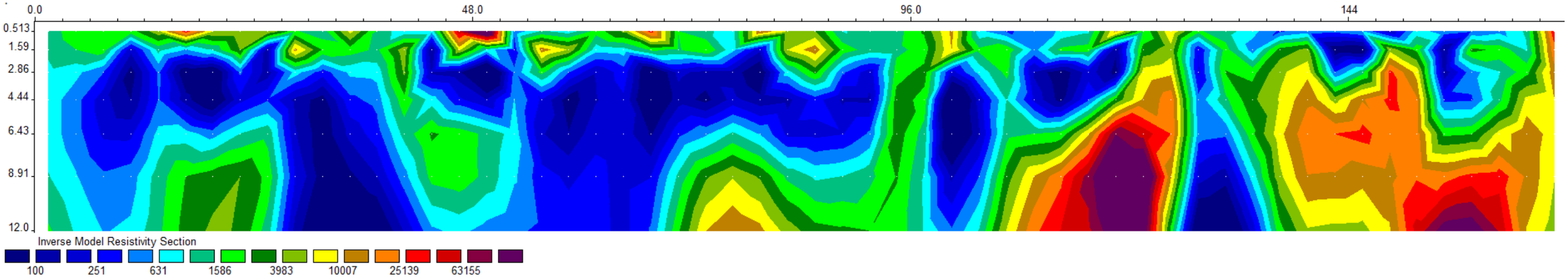


Figura A.11– Seção de resistividade elétrica obtida para o Espaço Cultural no final do período chuvoso, parte Norte.

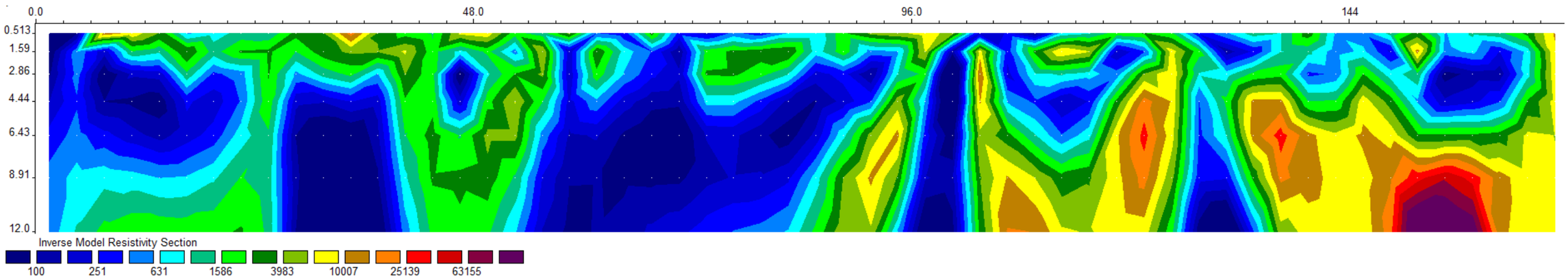


Figura A.12– Seção das diferenças observadas para eletrorresistividade entre o início e o final do período chuvoso para o Espaço Cultural, parte Norte.

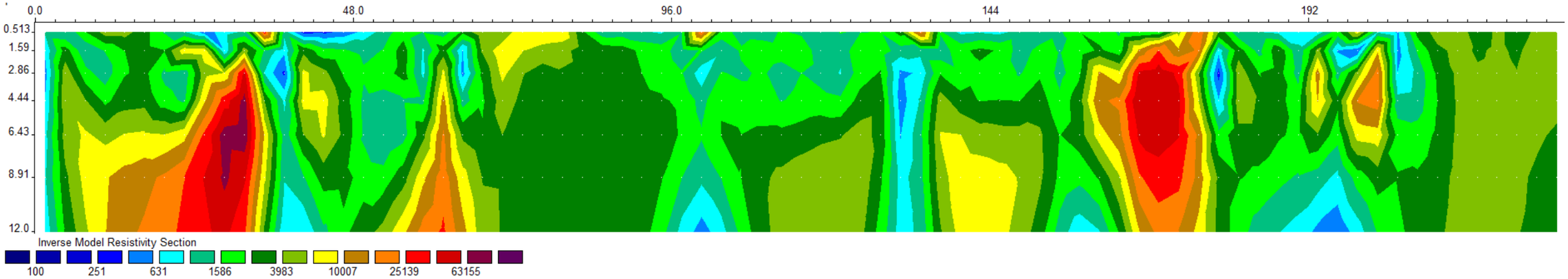


Figura A.13– Seção de resistividade elétrica obtida para o Sesc no início do período chuvoso.

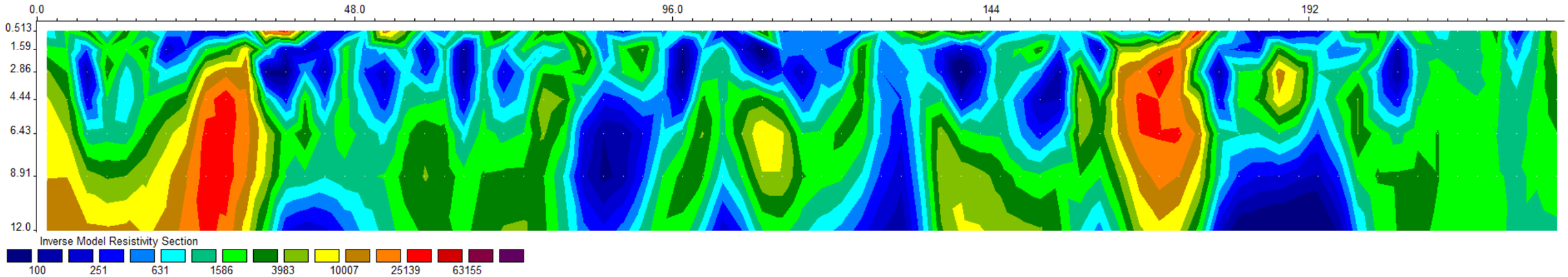


Figura A.14– Seção de resistividade elétrica obtida para o Sesc no final do período chuvoso.

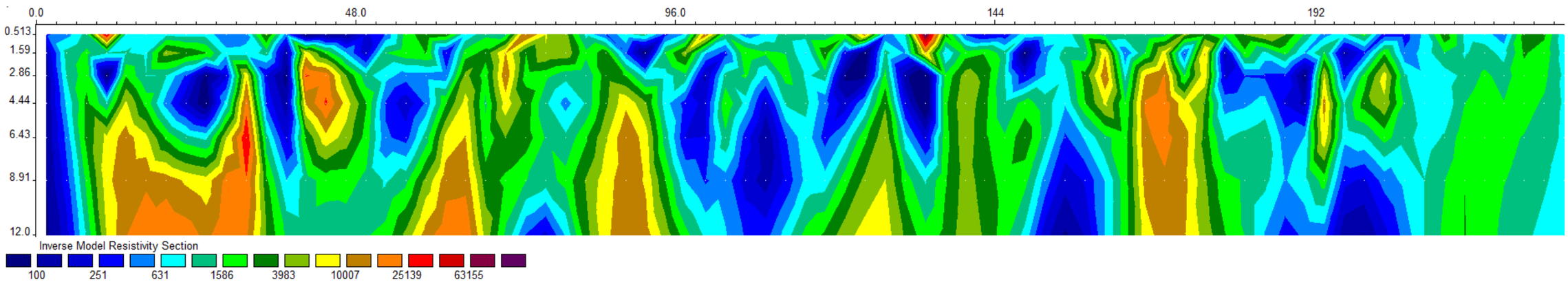


Figura A.15– Seção das diferenças observadas para eletrorresistividade entre o início e o final do período chuvoso para o SESC.

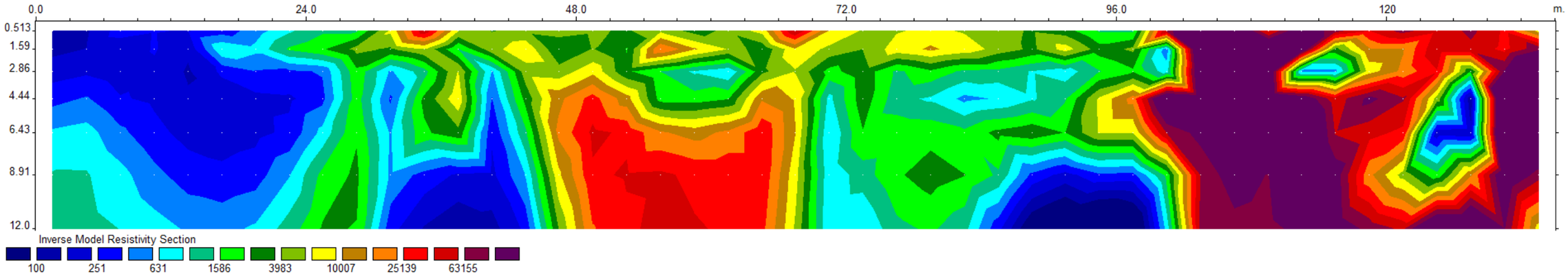


Figura A.16– Seção de resistividade elétrica obtida para o Parque Sussuapara no início do período chuvoso, parte Sul.

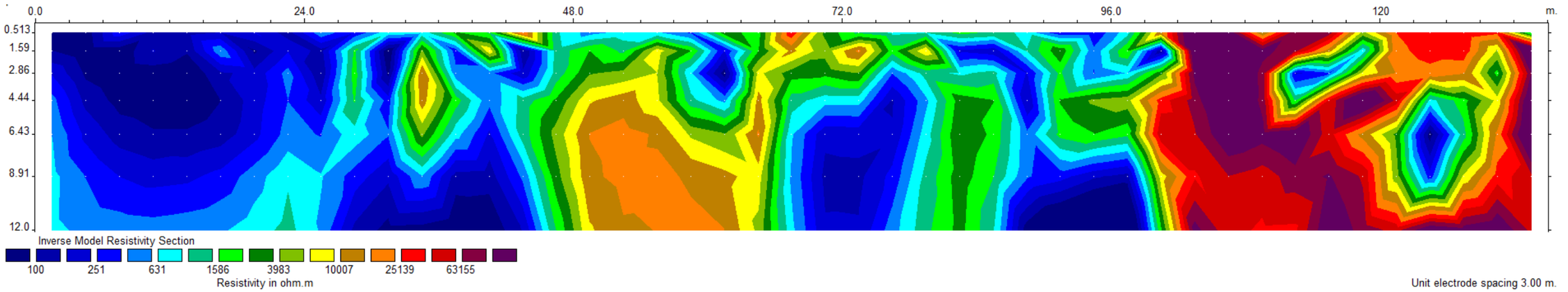


Figura A.17– Seção de resistividade elétrica obtida para o Parque Sussuapara no final do período chuvoso, parte Sul.

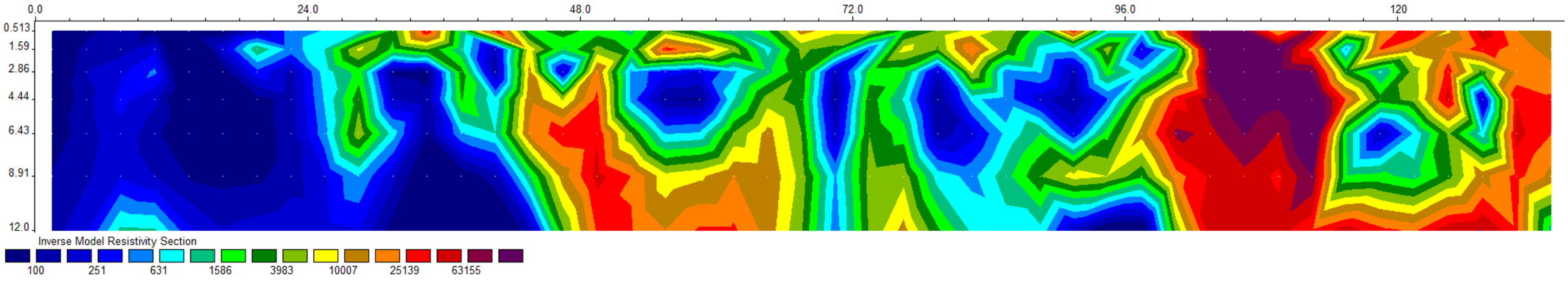


Figura A.18– Seção das diferenças observadas para eletrorresistividade entre o início e o final do período chuvoso para o Parque Sussuapara, parte Sul.

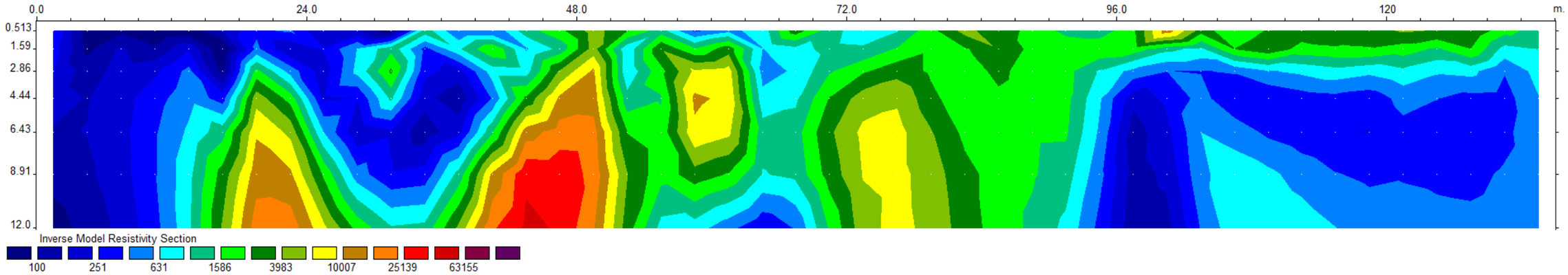


Figura A.19– Seção de resistividade elétrica obtida para o Parque Sussuapara no início do período chuvoso, parte Norte.

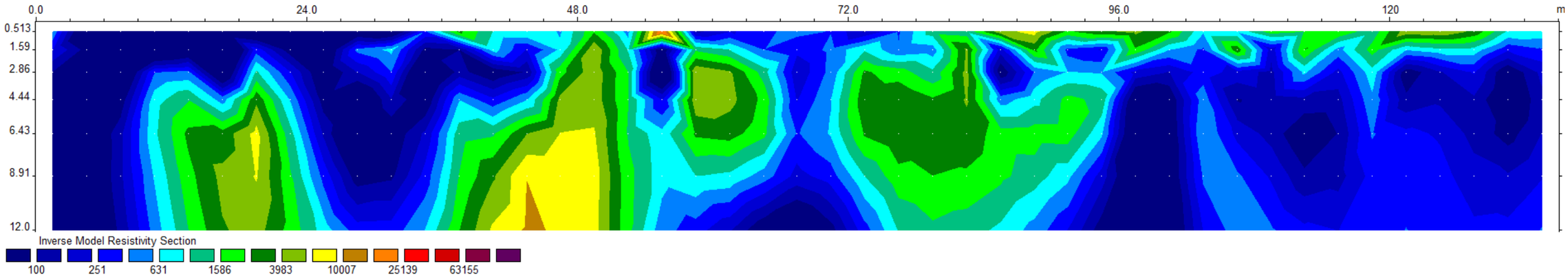


Figura A.20– Seção de resistividade elétrica obtida para o Parque Sussuapara no final do período chuvoso, parte Norte.

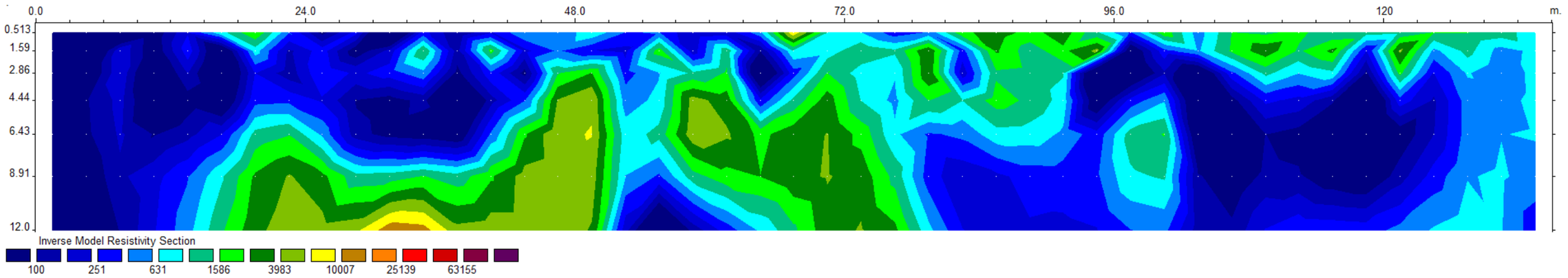


Figura A.21– Seção das diferenças observadas para eletrorresistividade entre o início e o final do período chuvoso para o Parque Sussuapara, parte Norte.

A.3 – SEÇÕES DE RESISTIVIDADE ELÉTRICA – EIXOS TRANSVERSAIS

Nesse item são apresentados os perfis de resistividade elétrica para as Linhas Central, Norte e Sul.

A.3.1 – LINHA CENTRAL

As Figuras A.22 a A.45 apresentam as seções de resistividade elétrica para a linha Central.

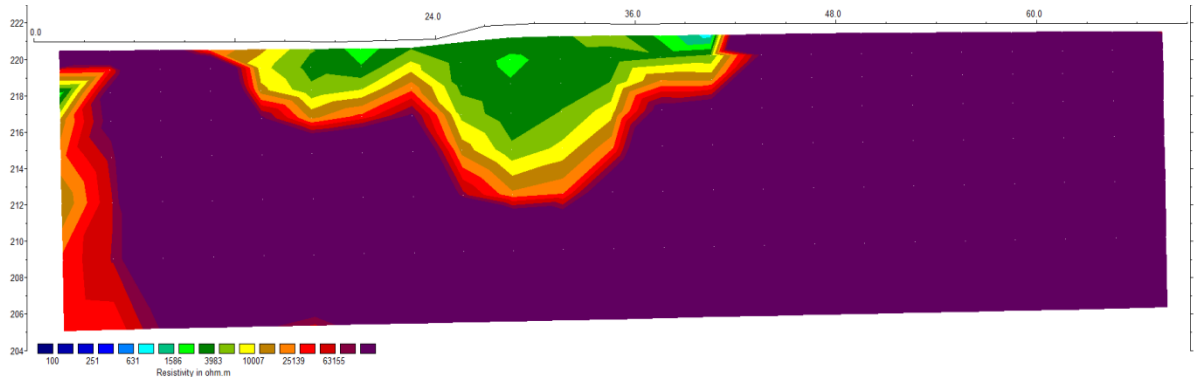


Figura A.22 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 01.

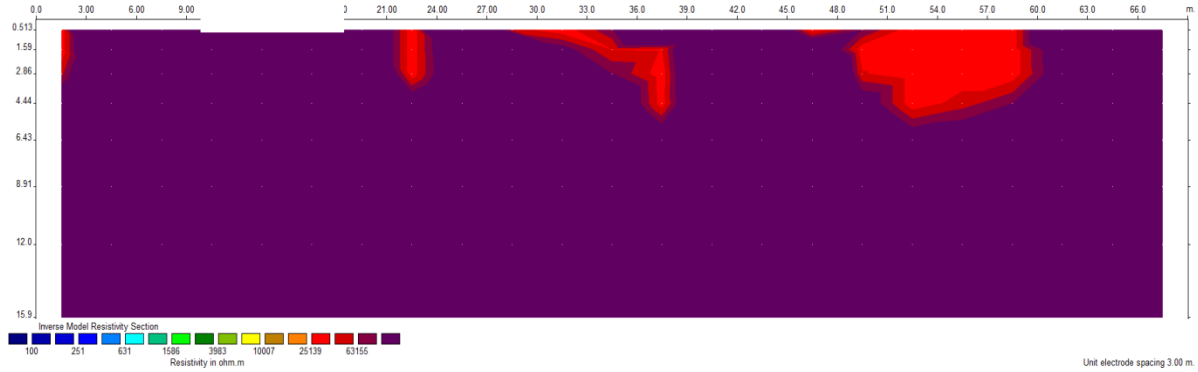


Figura A.23 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 02.

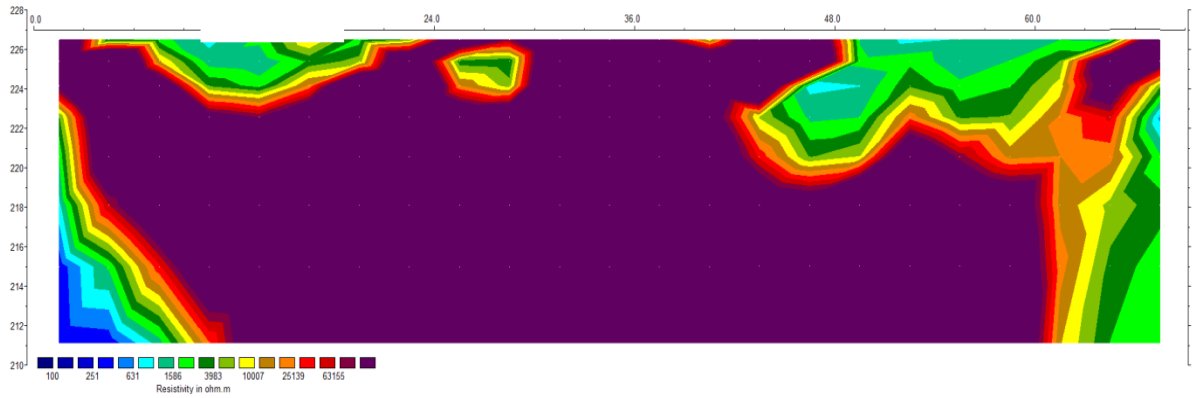


Figura A.24 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 03.

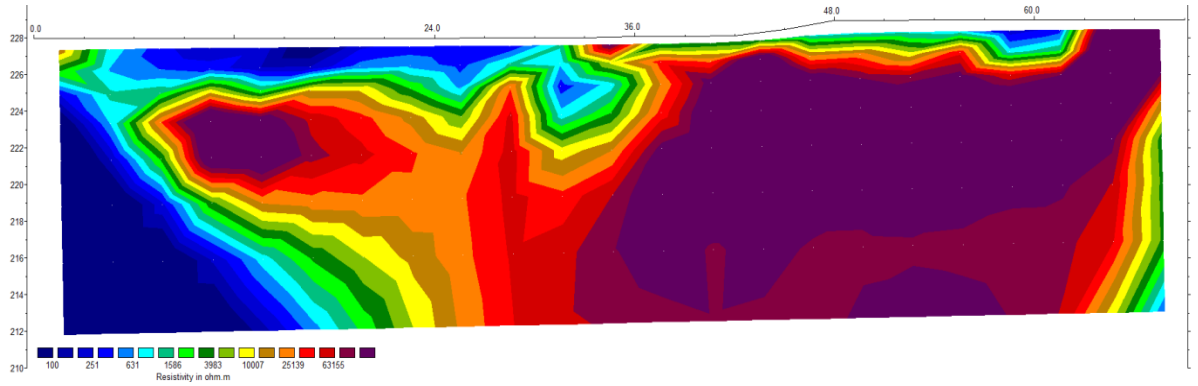


Figura A.25 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 04.

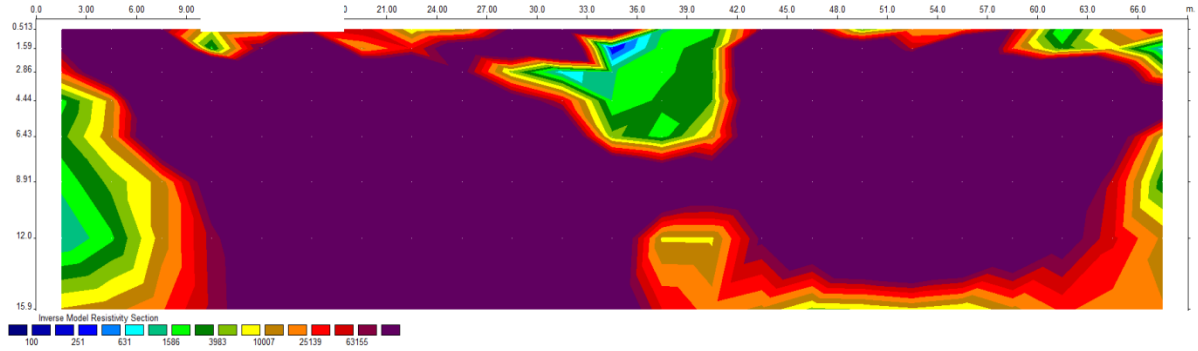


Figura A.26 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 05.

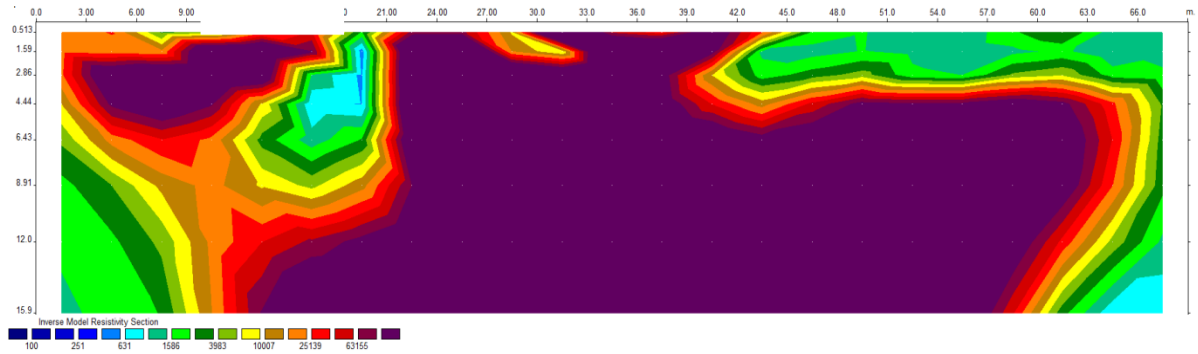


Figura A.27 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 06.

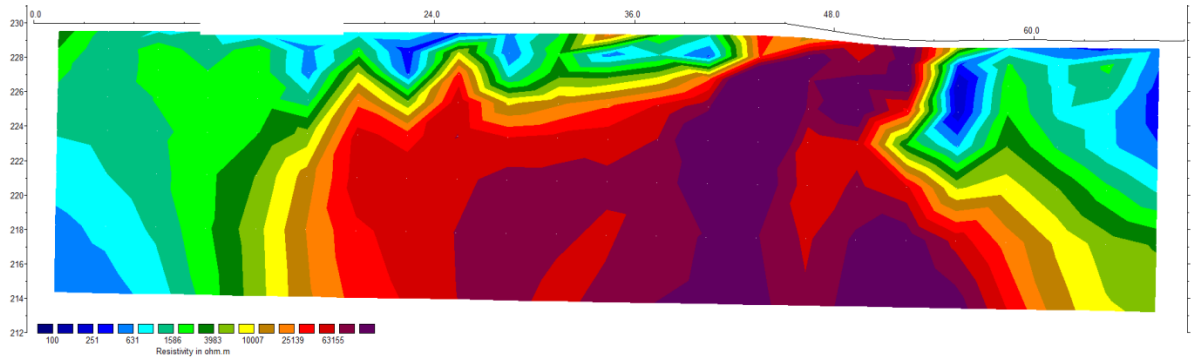


Figura A.28 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 07.

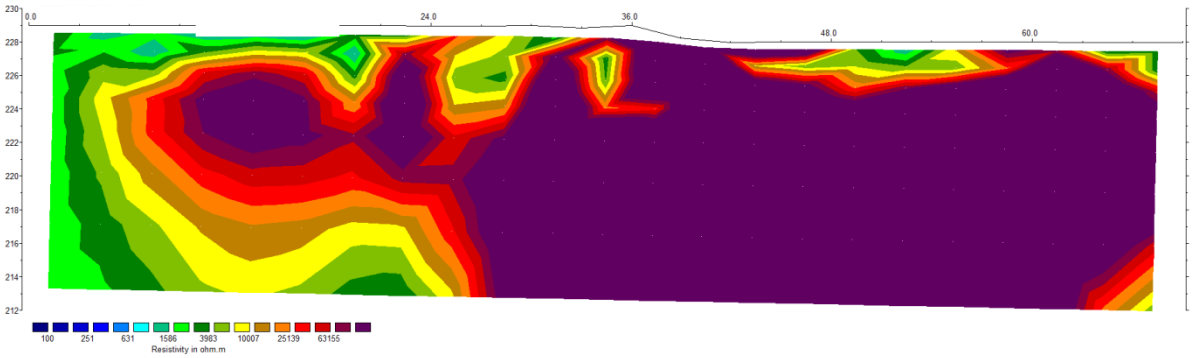


Figura A.29 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 08.

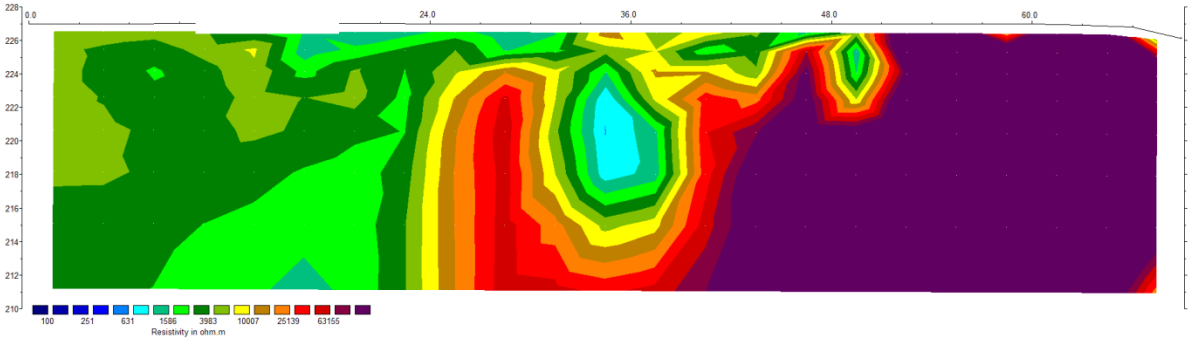


Figura A.30 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 09.

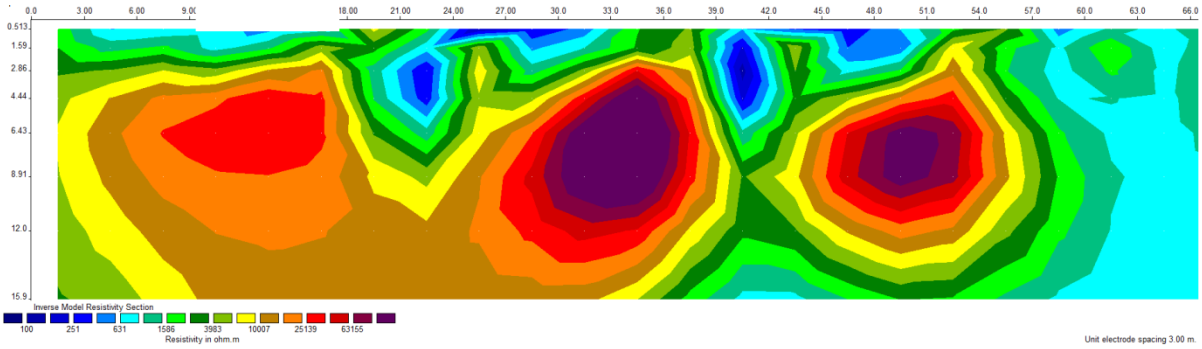


Figura A.31 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 10.

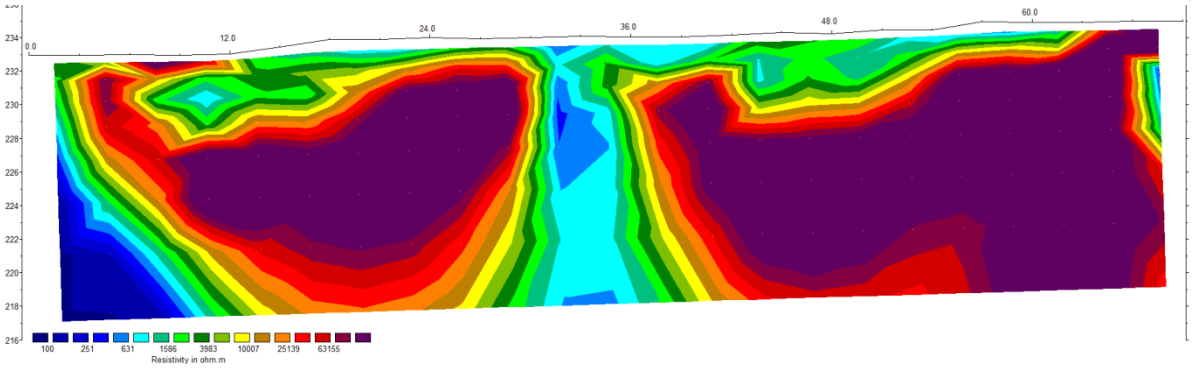


Figura A.32 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 11.

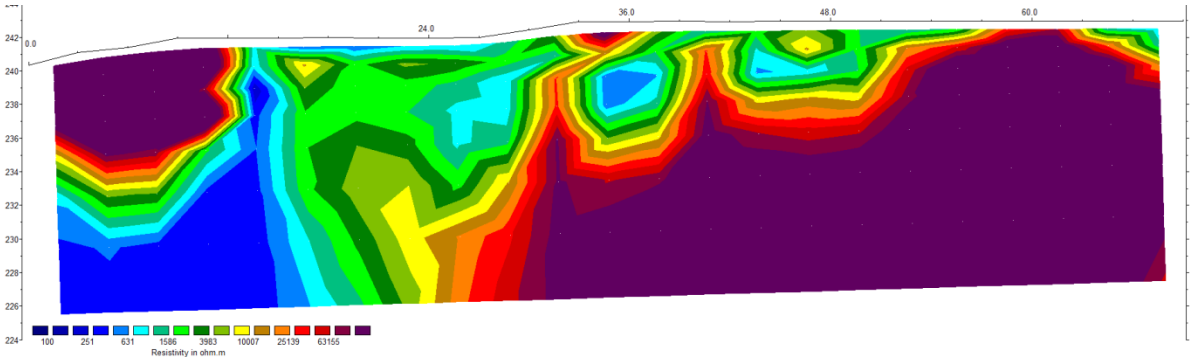


Figura A.33 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 12.

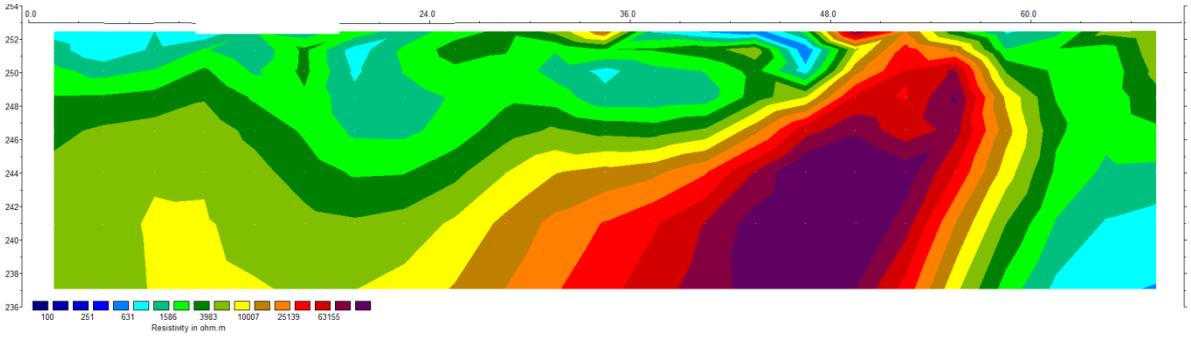


Figura A.34 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 13.

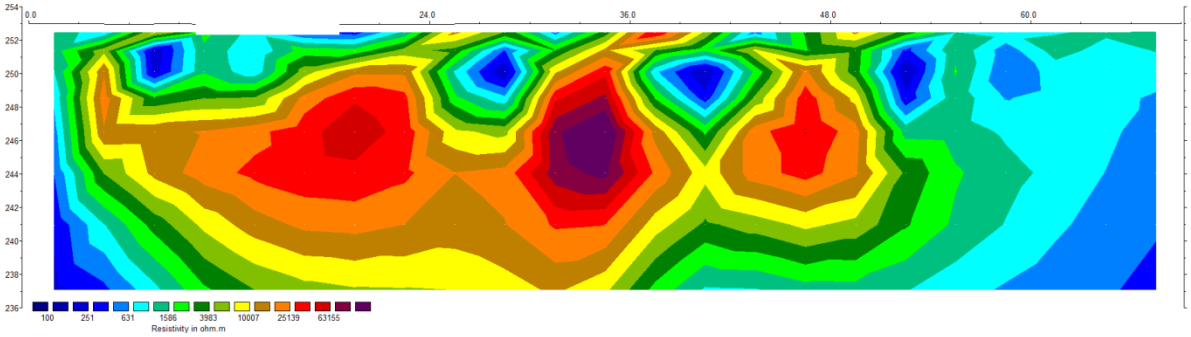


Figura A.35 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 14.

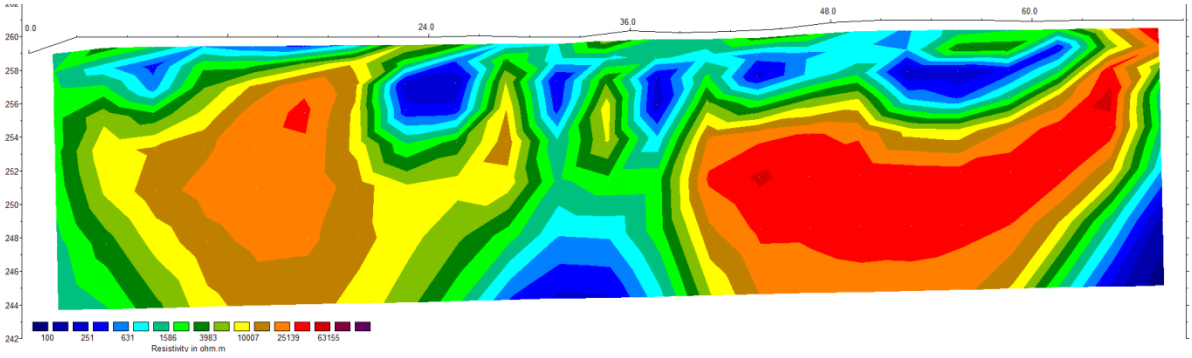


Figura A.36 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 15.

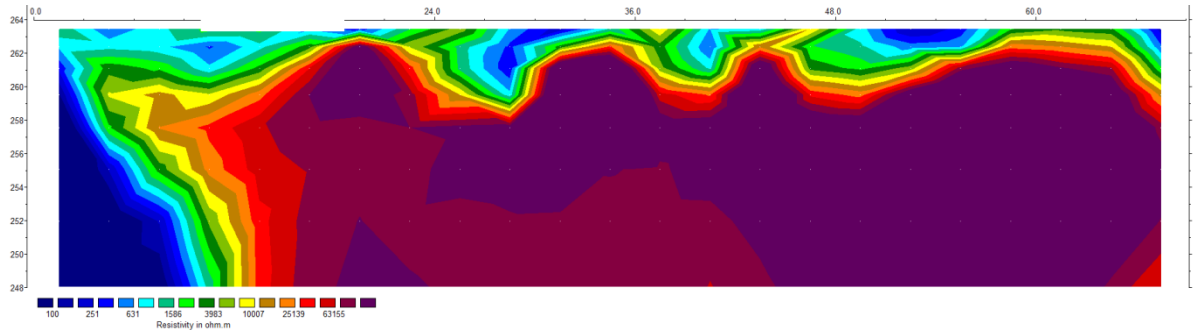


Figura A.37 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 16.

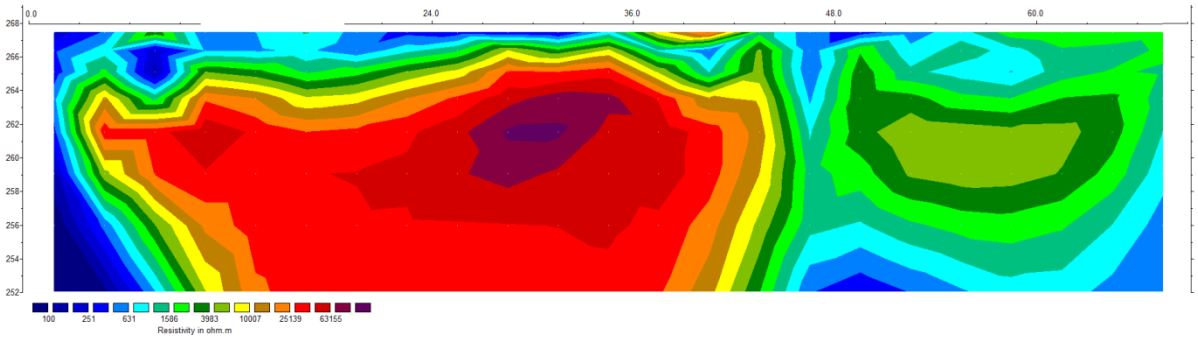


Figura A.38 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 17.

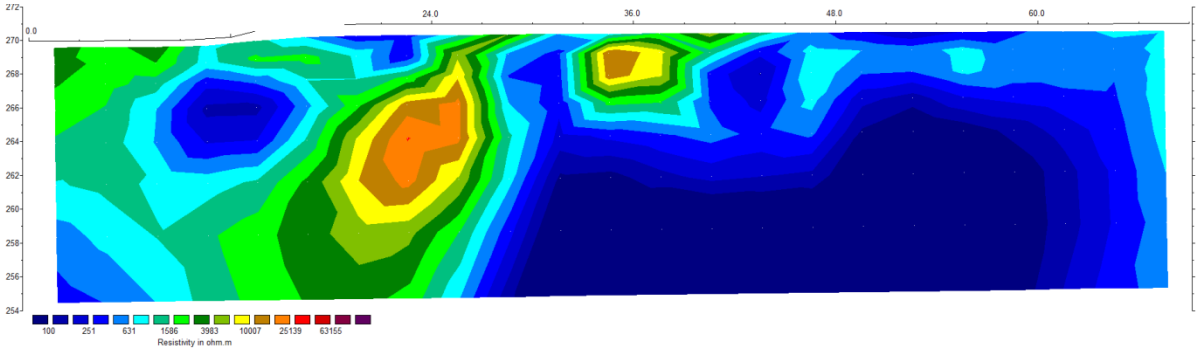


Figura A.39 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 18.

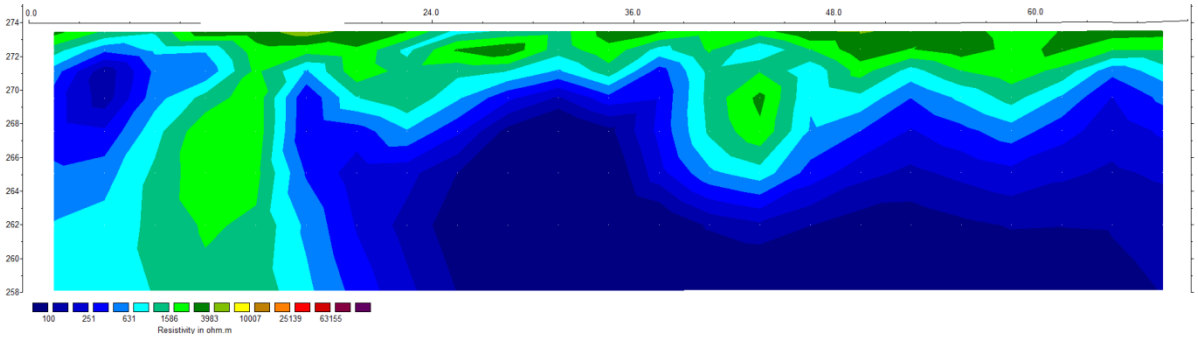


Figura A.40 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 19.

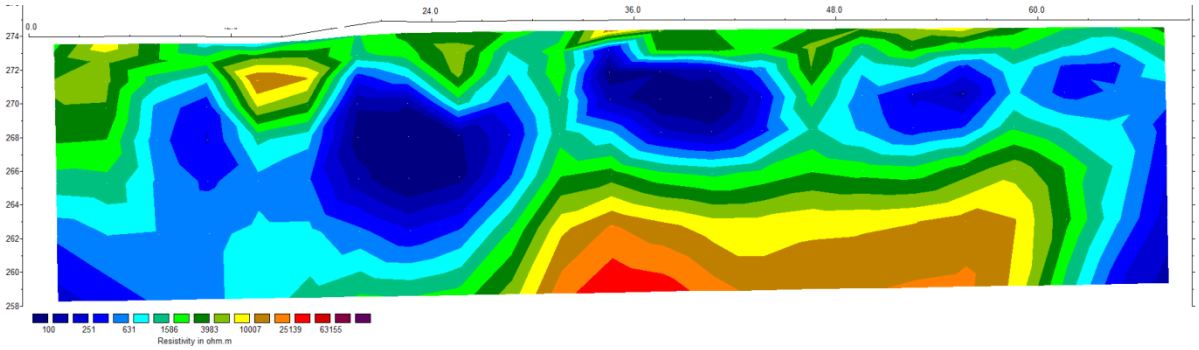


Figura A.41 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 20.

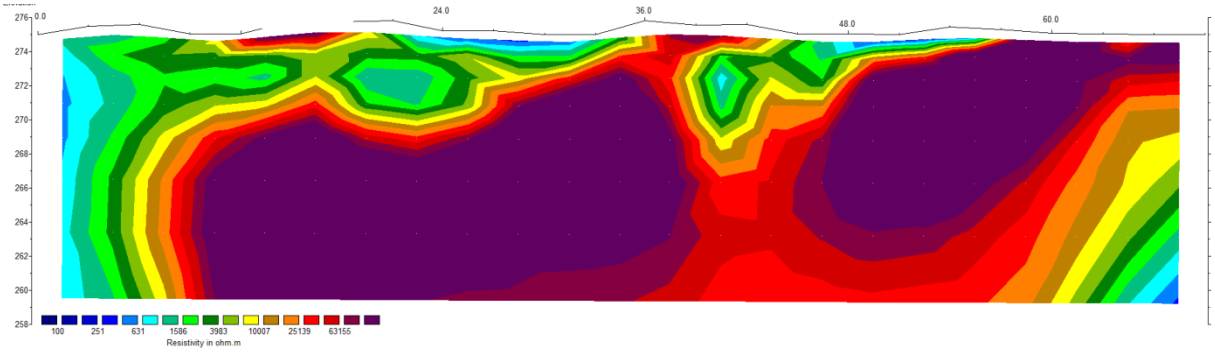


Figura A.42 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 21.

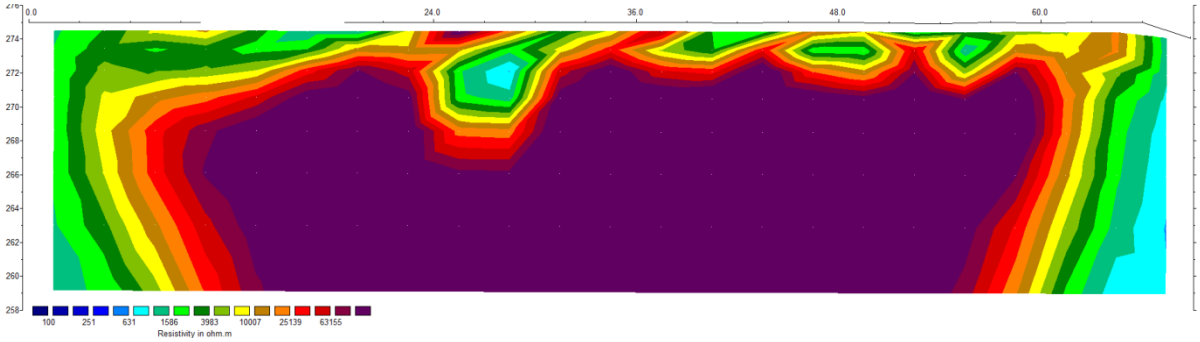


Figura A.43 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 22.

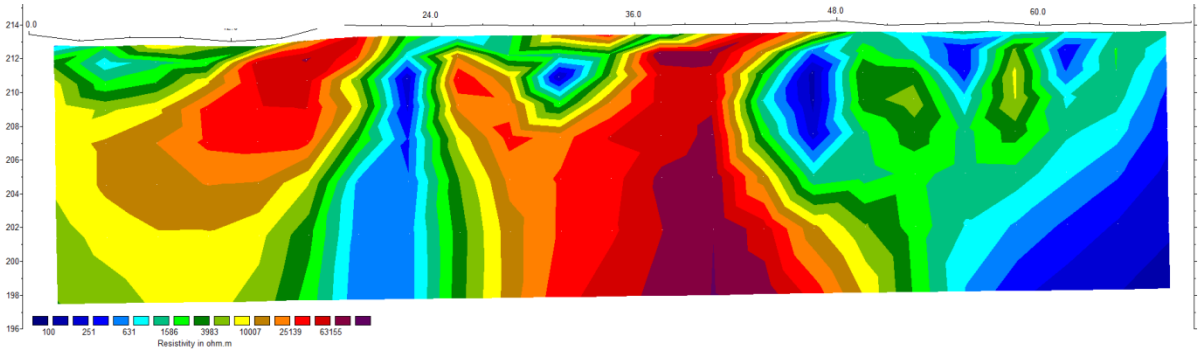


Figura A.44 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 23.

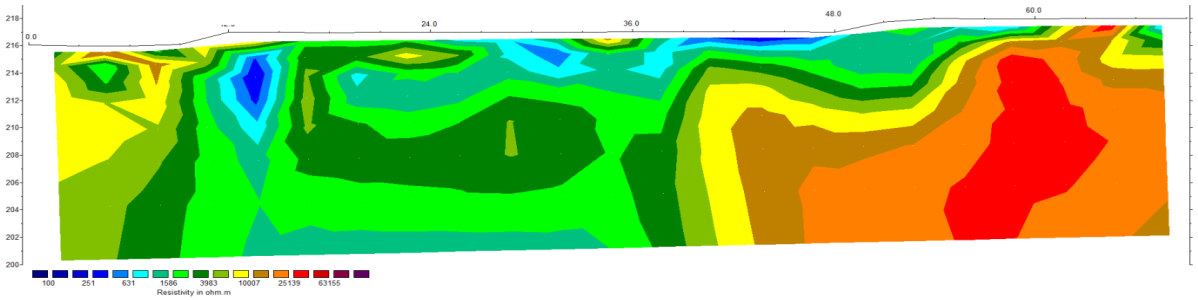


Figura A.45 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Central – trecho 24.

A.3.2 – LINHA NORTE

As Figuras A.46 a A.61 apresentam as seções de resistividade elétrica para a linha Norte.

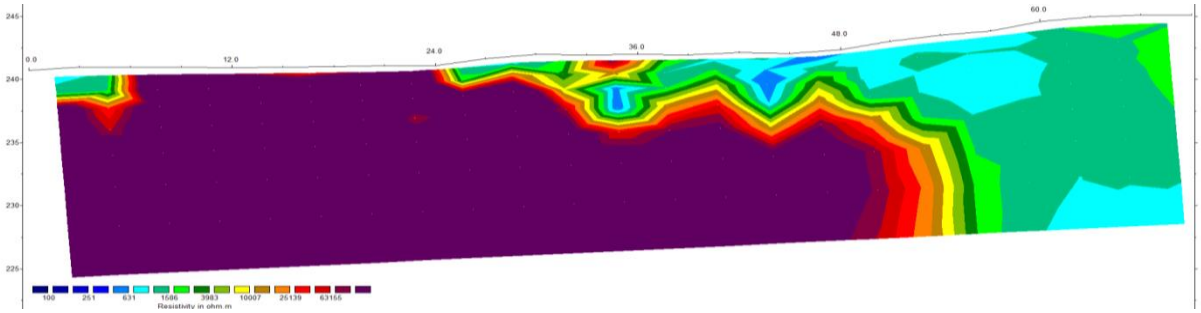


Figura A.46 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 01.

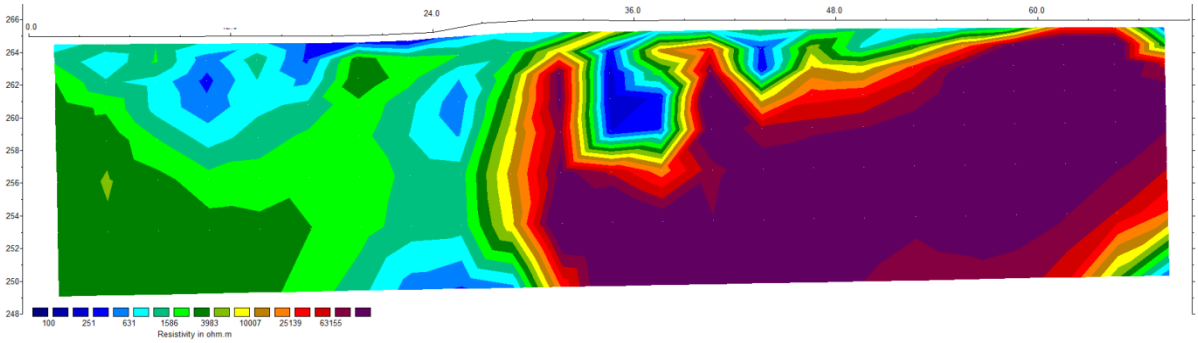


Figura A.47 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 02.

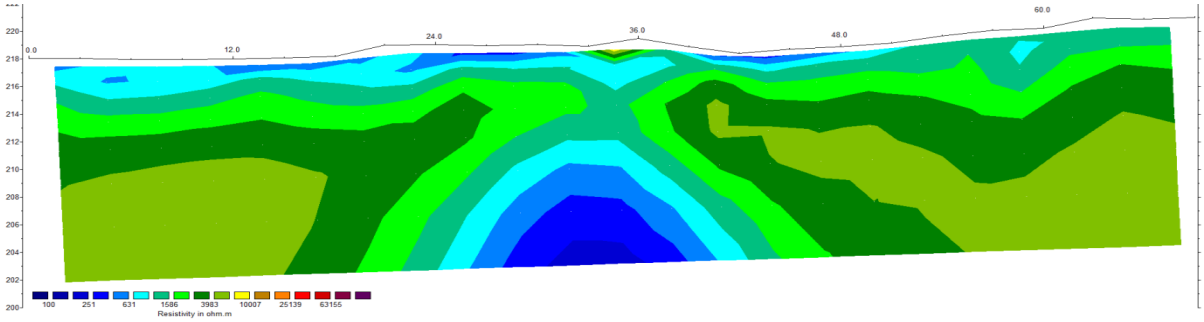


Figura A.48 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 03.

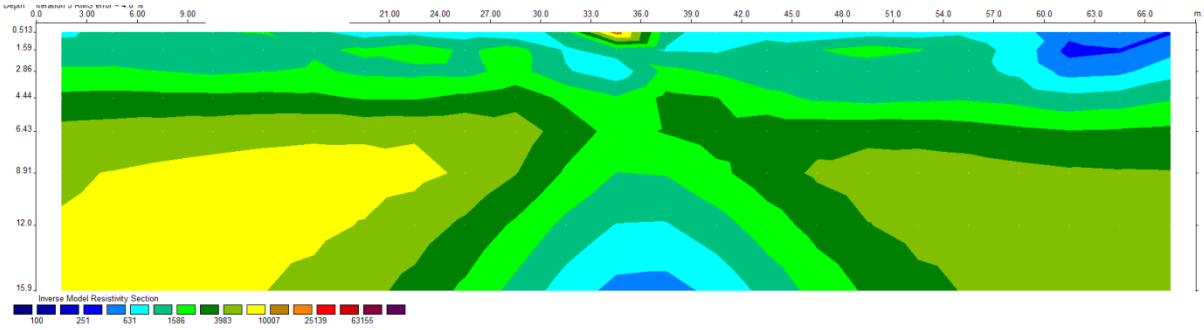


Figura A.49 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 04.

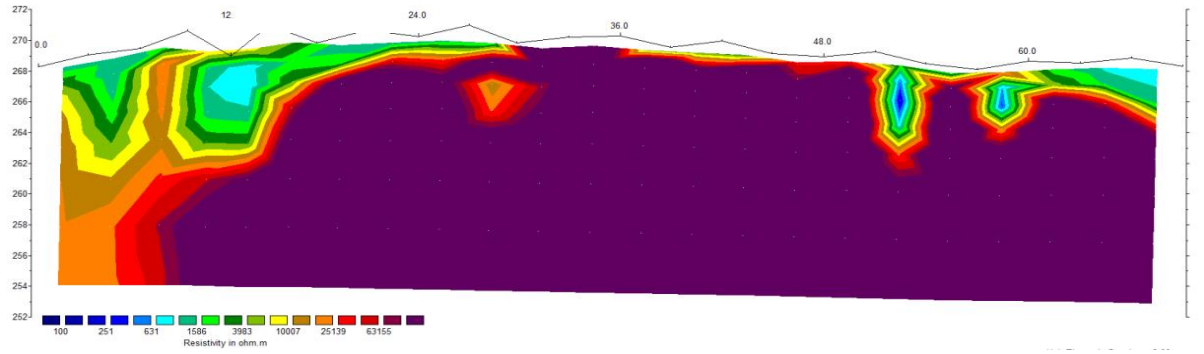


Figura A.50 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 05.

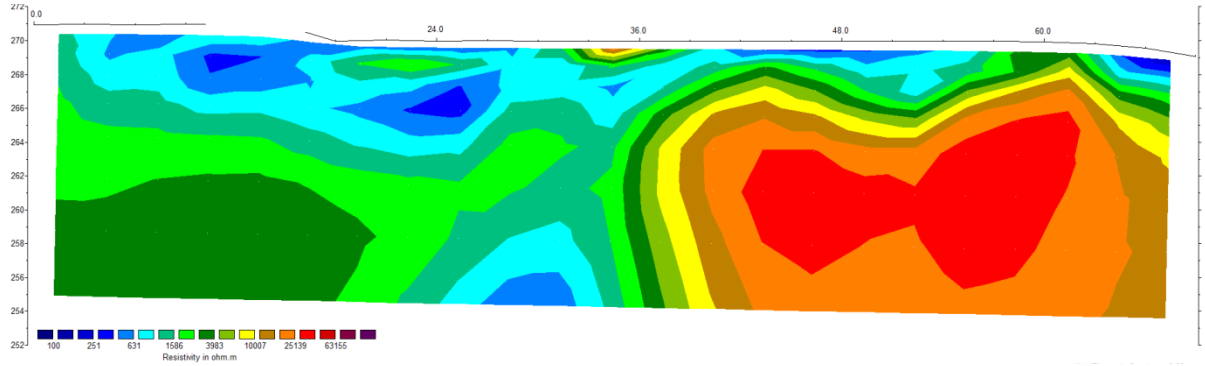


Figura A.51 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 06.

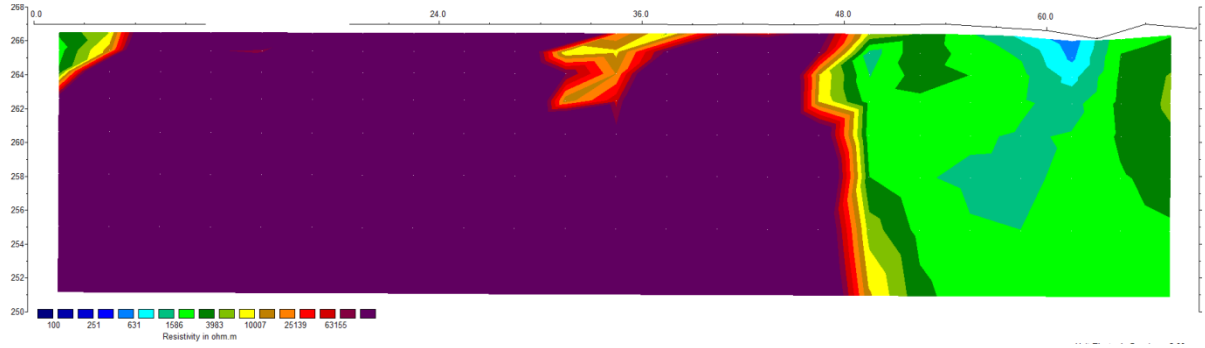


Figura A.52 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 07.

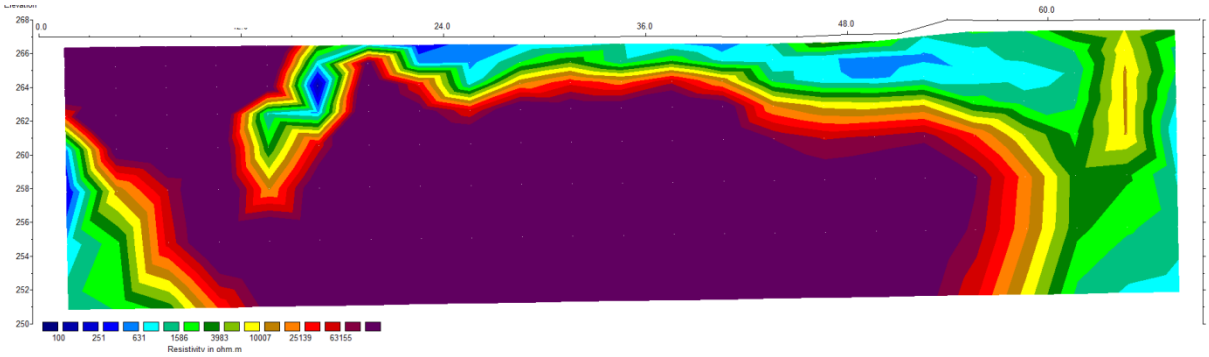


Figura A.53 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 08.

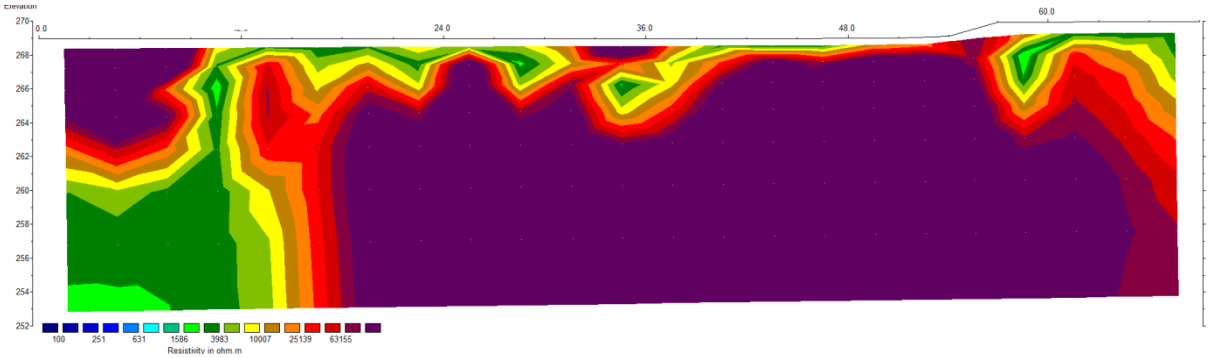


Figura A.54 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 09.

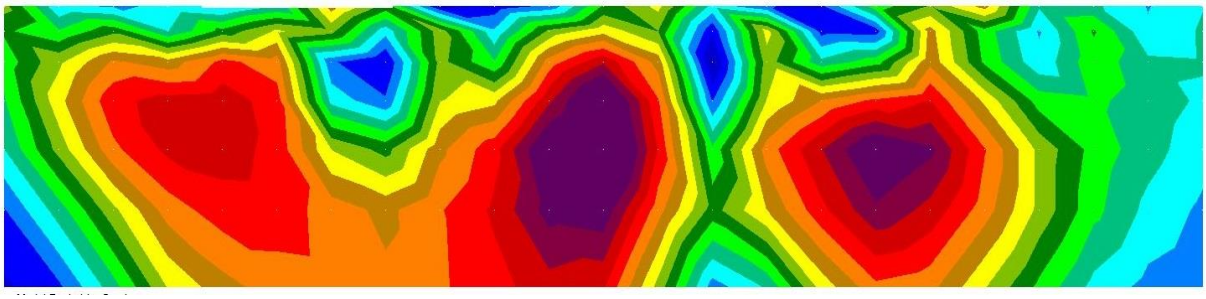


Figura A.55 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 10.

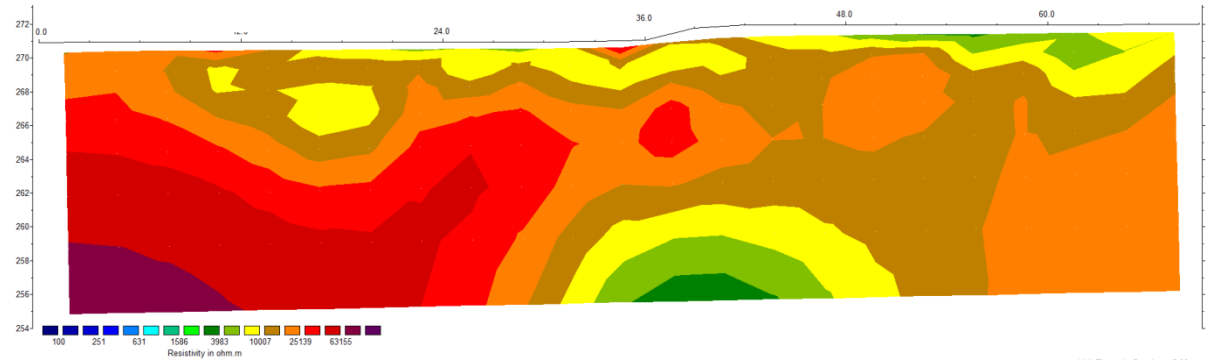


Figura A.56 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 11.

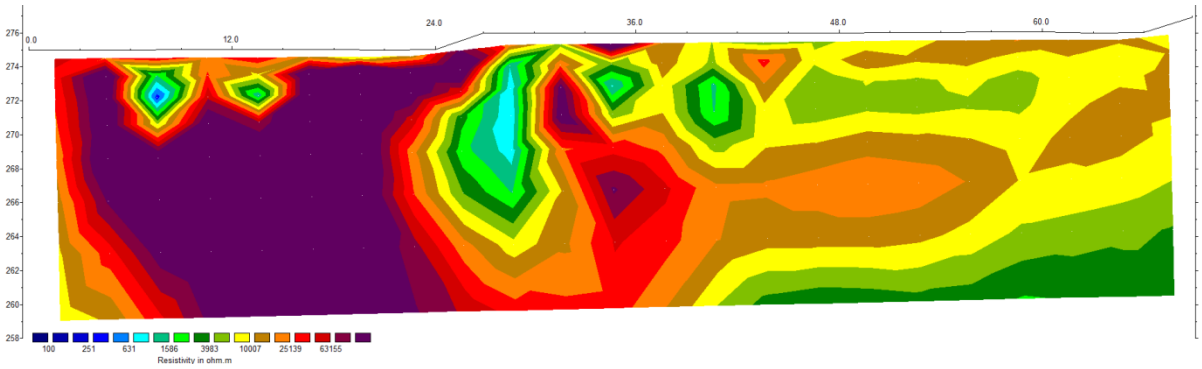


Figura A.57 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 12.

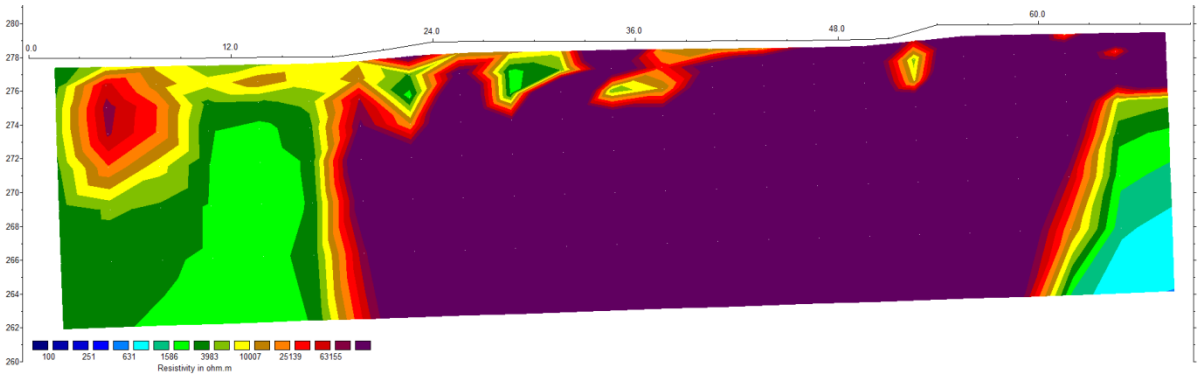


Figura A.58 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 13.

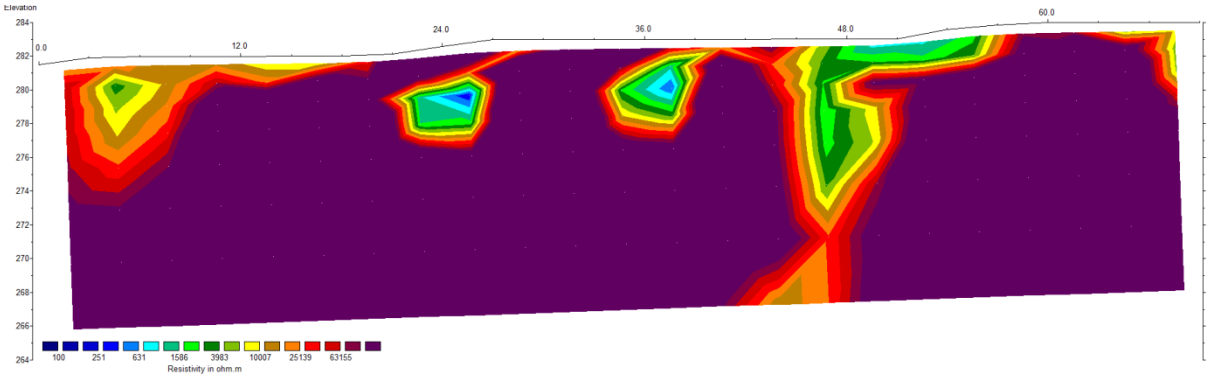


Figura A.59 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 14.

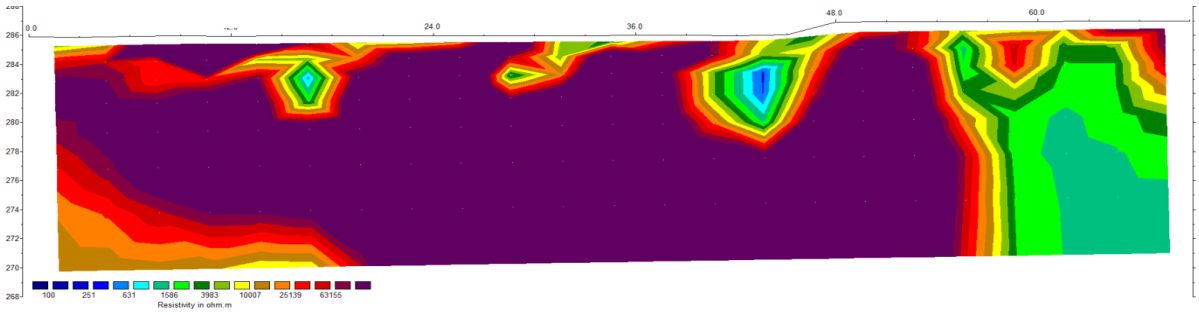


Figura A.60 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 15.

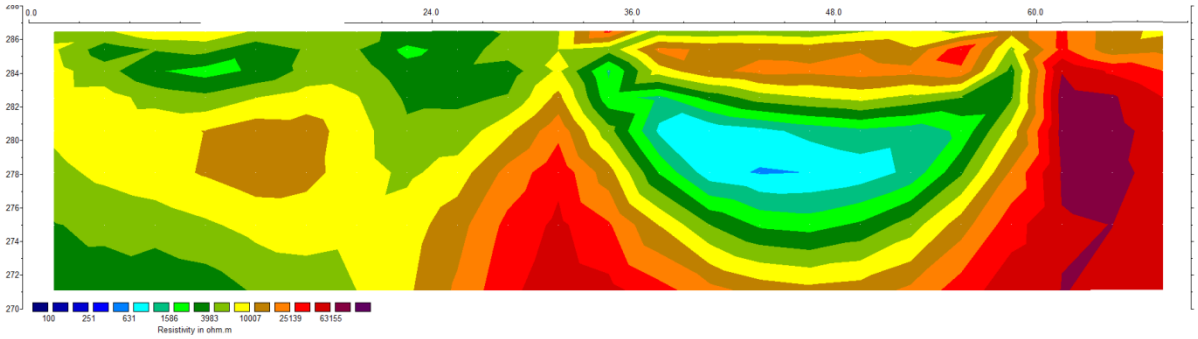


Figura A.61 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Norte – trecho 16.

A.3.3 – LINHA SUL

As Figuras A.62 a A.78 apresentam as seções de resistividade elétrica para a linha Sul.

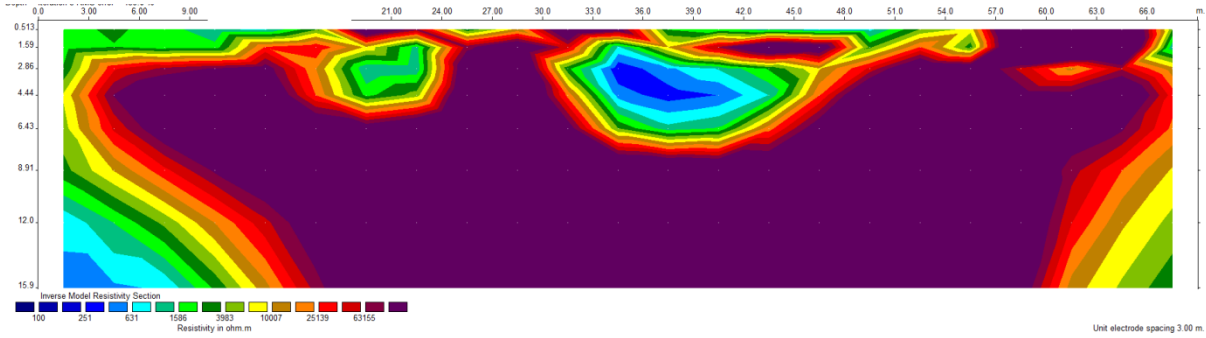


Figura A.62 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 01.

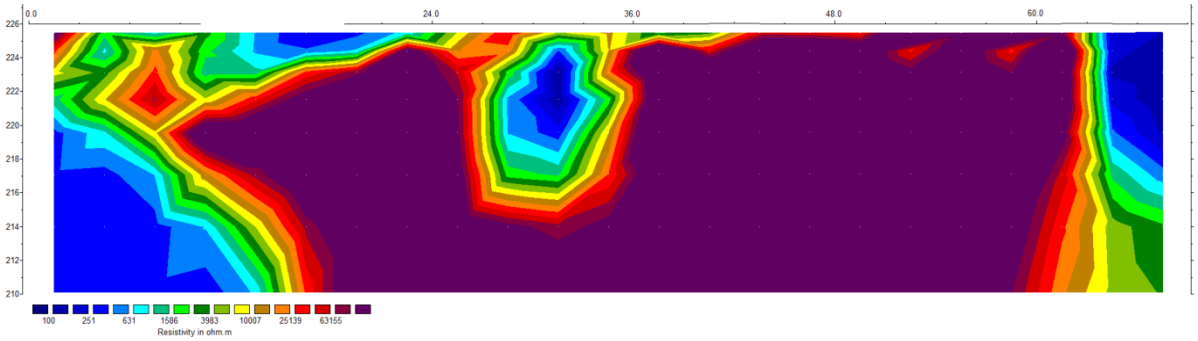


Figura A.63 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 02.

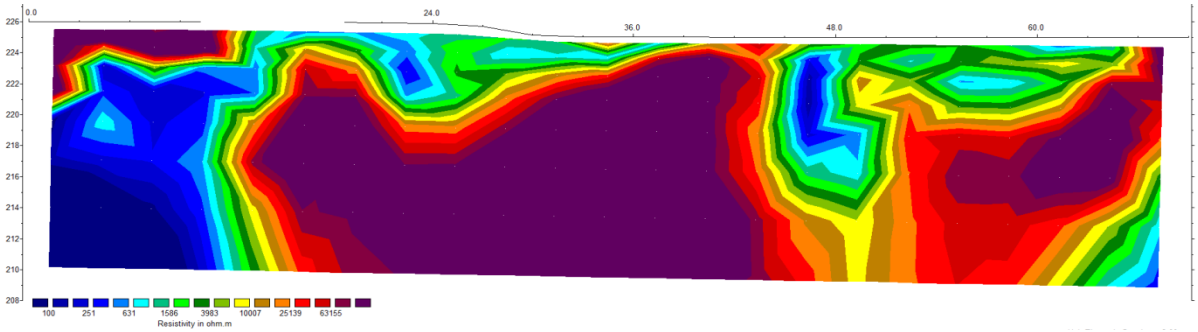


Figura A.64 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 03.

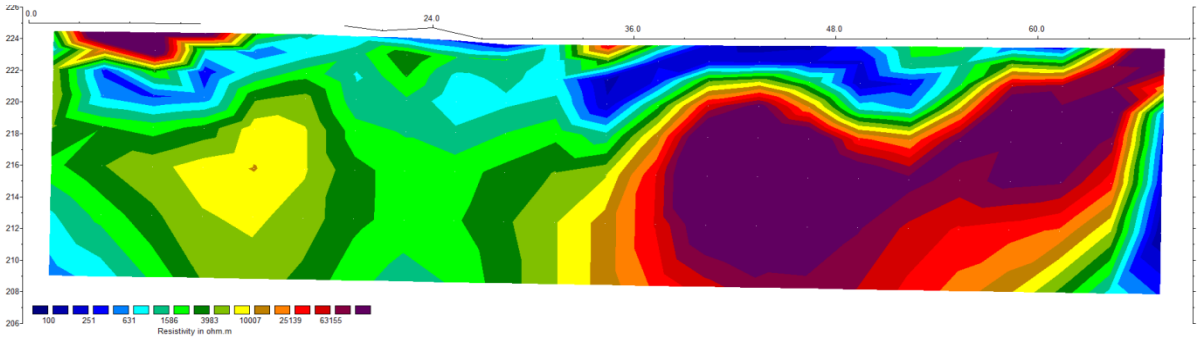


Figura A.65 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 04.

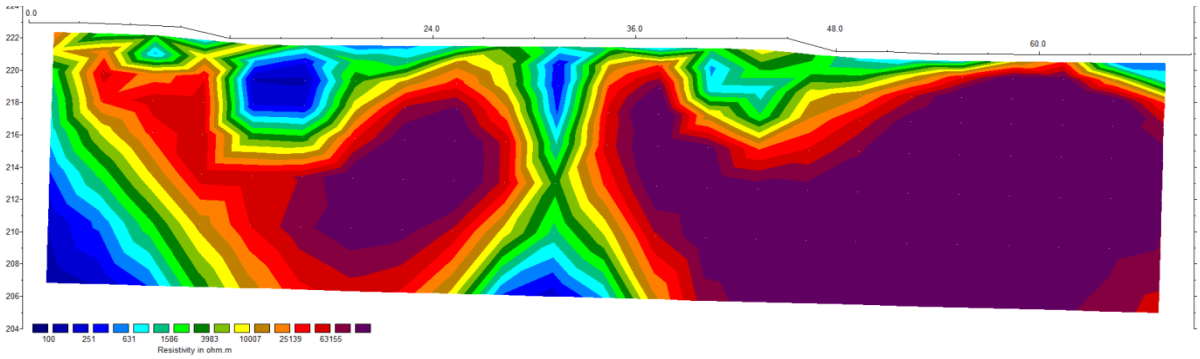


Figura A.66 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 05.

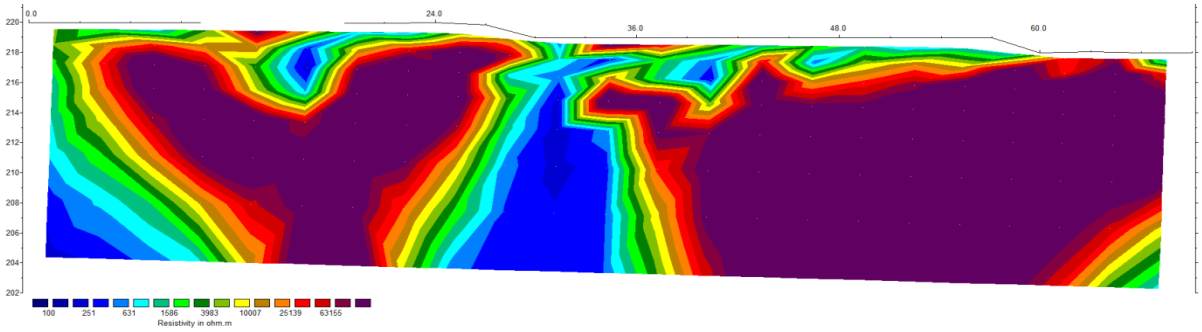


Figura A.67 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 06.

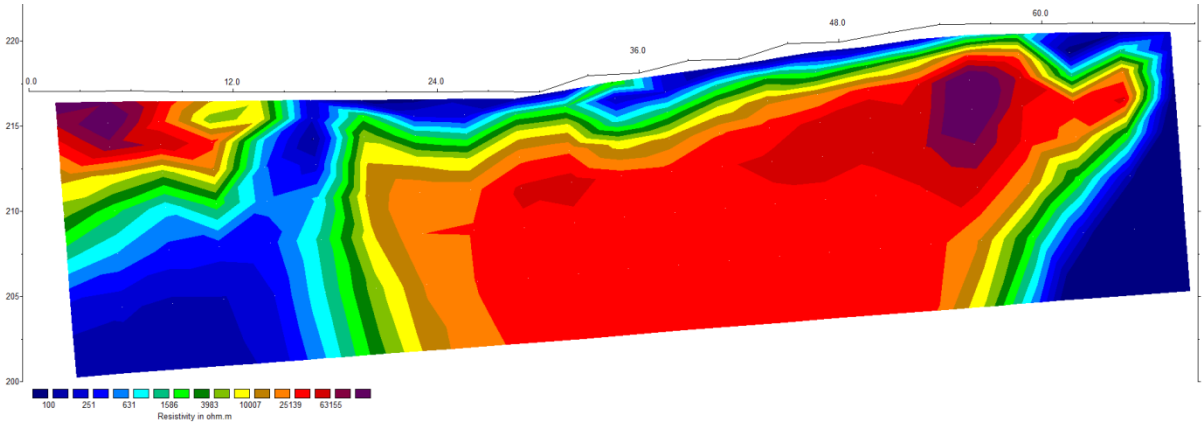


Figura A.68 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 07.

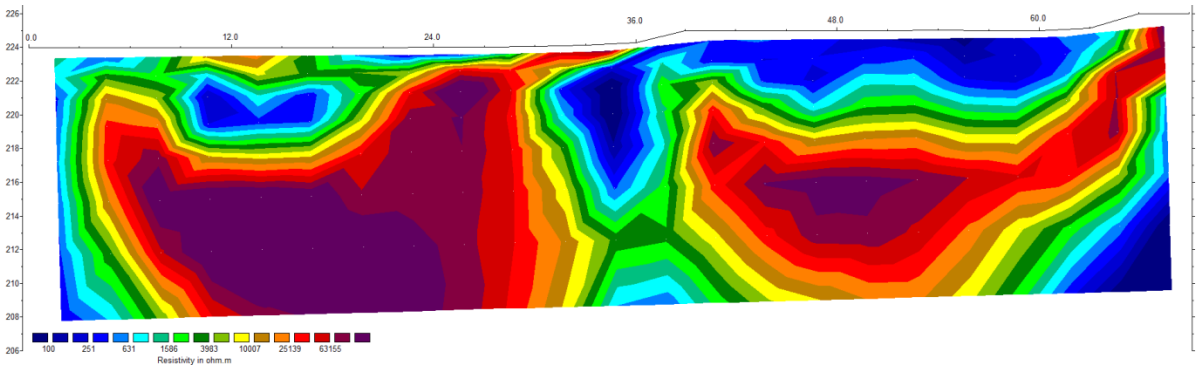


Figura A.69 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 08.

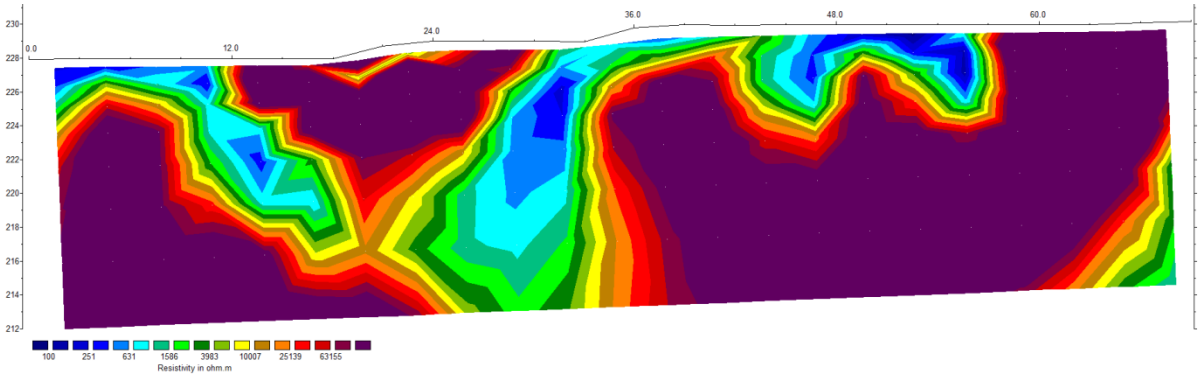


Figura A.70 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 09.

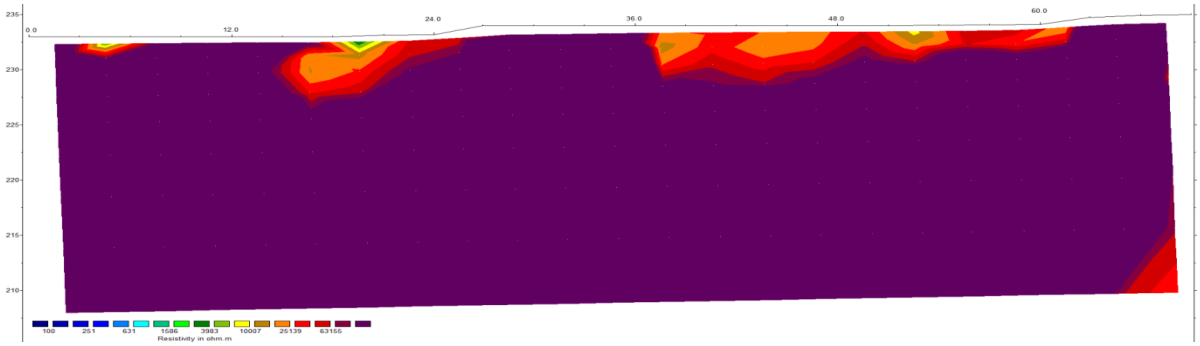


Figura A.71 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 10.

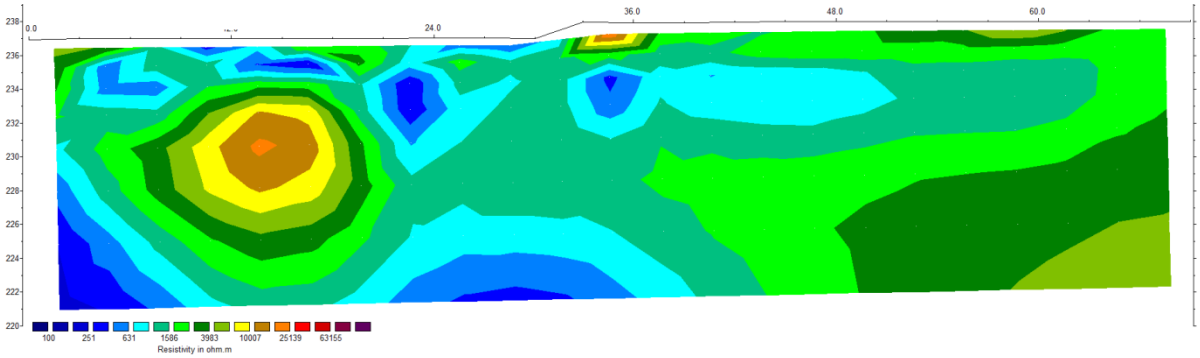


Figura A.72 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 11.

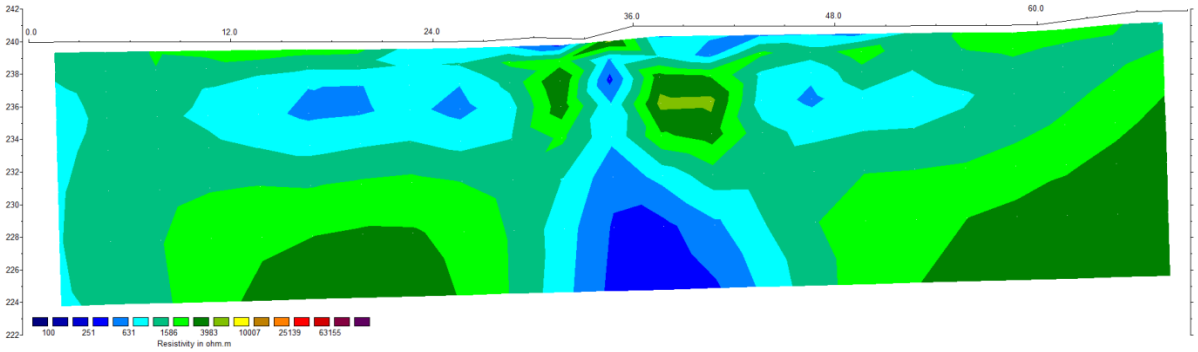


Figura A.73 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 12.

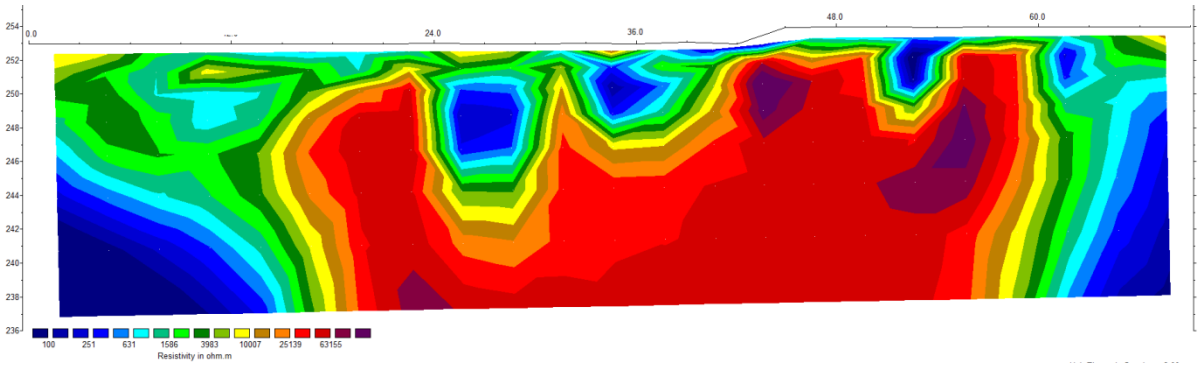


Figura A.74 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 13.

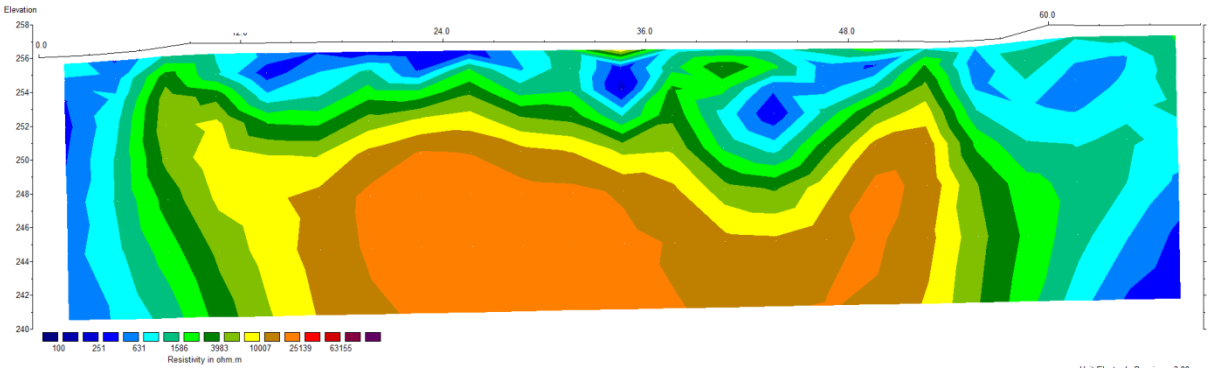


Figura A.75 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 14.

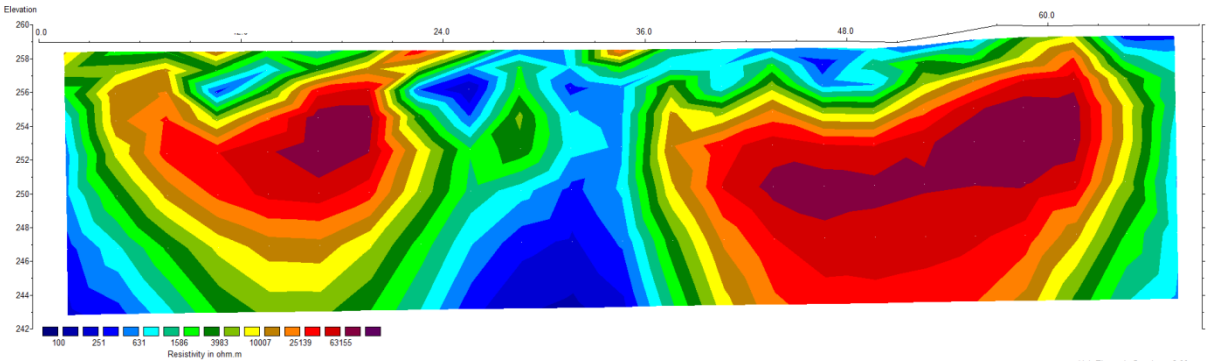


Figura A.76 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 15.

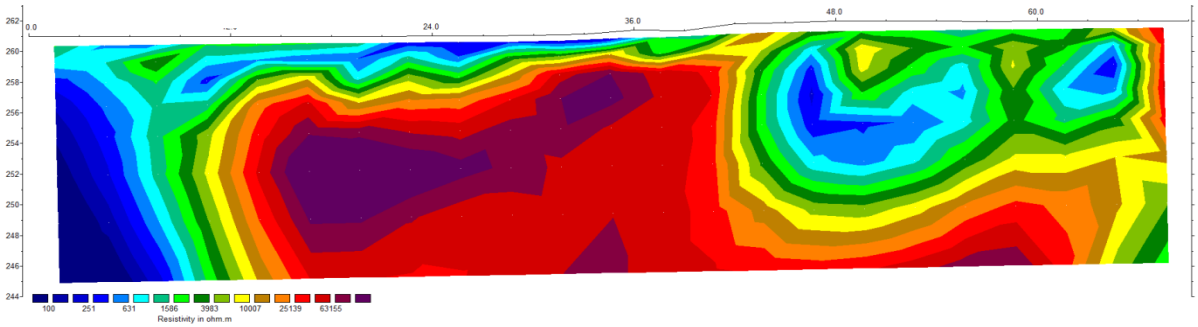


Figura A.77 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 16.

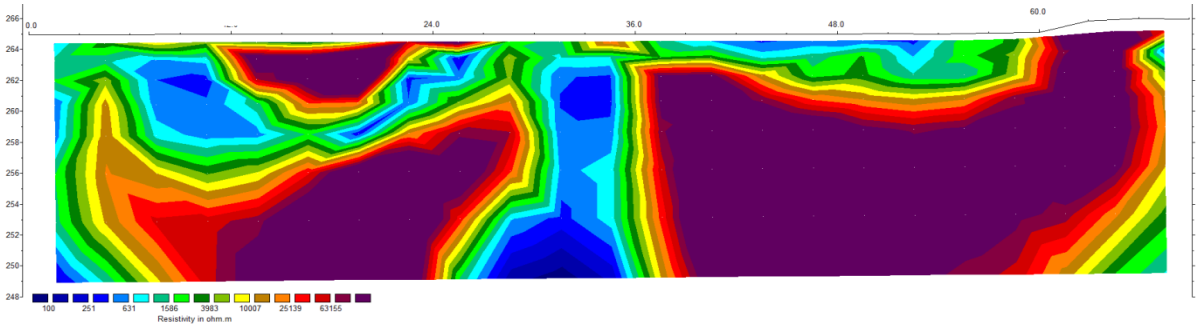


Figura A.78 – Seção de resistividade elétrica obtida para a Linha Sul – trecho 17.

Apêndice B – ENSAIOS DE LABORATÓRIO

São apresentados os resultados obtidos referentes aos ensaios de laboratório.

B.1 – CARACTERIZAÇÃO

As Tabelas B.1 a B.6 apresentam os resultados dos procedimentos necessários para a classificação táctil visual das amostras, segundo a NBR 7250 (ABNT, 1982).

Tabela B.1 – Resultados dos ensaios de laboratório para classificação táctil visual, SPT01

Prof. (m)	Exame visual	Dilatância	Torrão seco ao ar	Cor	Consistência/Compacidade	Classificação
1	Finos com pedregulho	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	roxo	medianamente compacto	Silte arenoso com pedregulho roxo medianamente compacto
2	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	marrom	rija	Argila arenosa com pedregulho marrom rija
3	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	marrom	rija	Argila arenosa com pedregulho marrom rija
4	Finos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	amarelo	pouco compacto	Silte arenoso amarelo pouco compacto

5	Finos	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	amarelo	média	Argila arenosa amarela média
6	Grossos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	roxo	muito compacto	Pedregulho siltoso muito compacto roxo
7	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com baixa pressão	marrom claro	muito compacto	Silte argiloso com pedregulho marrom claro muito compacto
8	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação rápida	Desagrega com forte pressão	marrom	rija	Argila arenosa com pedregulho marrom rija
9	Finos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	amarelo	pouco compacto	Silte pouco arenoso amarelo muito compacto

Tabela B.2 – Resultados dos ensaios de laboratório para classificação táctil visual, SPT02

Prof. (m)	Exame visual	Dilatância	Torrão seco ao ar	cor	consistência/compacidade	Classificação
1	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	marrom claro	rija	Argila arenosa com pedregulho marrom claro rija
2	Finos	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com baixa pressão	roxo claro	rija	Silte pouco argiloso roxo claro rijo
3	-	-	-	-	-	sem amostra
4	Finos	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com baixa pressão	roxo claro	média	Silte pouco argiloso roxo claro médio
5	Finos	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com baixa pressão	roxo claro	dura	Silte pouco argiloso roxo claro duro
6	Finos	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com baixa pressão	roxo claro	dura	Silte pouco argiloso roxo claro duro
7	Finos	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com baixa pressão	roxo claro	dura	Silte pouco argiloso roxo claro duro
8	Finos com pedregulho	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	amarelo escuro	muito compacto	Silte arenoso com pedregulho muito compacto amarelo escuro
9	Finos com pedregulho	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	amarelo	muito compacto	Silte pouco arenoso com pedregulho amarelo muito compacto
10	Grossos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	marrom	muito compacto	Areia siltosa marrom muito compacta
11	Finos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	roxo	muito compacto	Silte pouco arenoso muito compacto roxo

Tabela B.3 – Resultados dos ensaios de laboratório para classificação táctil visual, SPT03

Prof. (m)	Exame visual	Dilatância	Torrão seco ao ar	cor	consistência/compacidade	Classificação
1	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	vermelho	mole	Argila arenosa com pedregulho vermelha mole
2	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	vermelho	mole	Argila arenosa com pedregulho vermelha mole
3	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	vermelho	mole	Argila arenosa com pedregulho vermelha mole
4	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	vermelho	média	Argila arenosa com pedregulho vermelha média
5	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	vermelho	média	Argila arenosa com pedregulho vermelha média
6	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	vermelho	média	Argila arenosa com pedregulho vermelha média
7	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	vermelho	dura	Argila arenosa com pedregulho vermelha dura
8	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	vermelho	dura	Argila arenosa com pedregulho vermelha dura
9	Grossos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	vermelho	muito compacto	Pedregulho muito compacto vermelho

Tabela B.4 – Resultados dos ensaios de laboratório para classificação táctil visual, SPT04

Prof. (m)	Exame visual	Dilatância	Torrão seco ao ar	cor	consistência/compacidade	Classificação
1	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	vermelho	média	Argila arenosa com pedregulho vermelha média

2	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	vermelho	média	Argila arenosa com pedregulho vermelha média
3	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	vermelho	média	Argila arenosa com pedregulho vermelha média
4	Finos com pedregulho	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação lenta	Desagrega com forte pressão	vermelho	média	Argila arenosa com pedregulho vermelha média
5	Finos com pedregulho	Amostra brilhante e quebradiça, reação lenta	Desagrega com pressão moderada	vermelho	dura	Argila siltosa com pedregulho dura vermelho claro
6	Finos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	roxo claro	medianamente compacto	Silte pouco arenoso medianamente compacto roxo claro
7	Finos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	roxo claro	medianamente compacto	Silte pouco arenoso medianamente compacto roxo claro
8	Finos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	roxo claro	medianamente compacto	Silte pouco arenoso medianamente compacto roxo claro
9	Finos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	amarelo	medianamente compacto	Silte pouco arenoso medianamente compacto amarelo
10	Finos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	roxo claro	compacto	Silte pouco arenoso compacto roxo claro
11	Finos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	amarelo	compacto	Silte pouco arenoso compacto amarelo claro

Tabela B.5 – Resultados dos ensaios de laboratório para classificação táctil visual, SPT05

Prof. (m)	Exame visual	Dilatância	Torrão seco ao ar	cor	consistência/compacidade	Classificação
1	Grossos	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação rápida	Desagrega com pressão moderada	preto	compacta	Areia pouco argilosa pouco compacta preta
2	Finos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	amarelo	pouco compacto	Silte arenoso pouco compacto amarelo
3	Finos	Amostra brilhante e quebradiça,	Desagrega com baixa pressão	amarelo	pouco compacto	Silte arenoso pouco compacto amarelo

		reação rápida				
4	Grossos	Amostra brilhante e muito quebradiça, reação rápida	Desagrega ao toque	marrom claro	compacto	Pedregulho arenoso pouco compacto marrom claro
5	Grossos	Amostra brilhante e muito quebradiça, reação rápida	Desagrega ao toque	marrom claro	compacto	Pedregulho arenoso compacto marrom claro
6	Grossos	Amostra brilhante e muito quebradiça, reação rápida	Desagrega ao toque	marrom claro	compacto	Pedregulho arenoso compacto marrom claro
7	Grossos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	amarelo	compacto	Pedregulho siltoso compacto amarelo
8	Finos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	amarelo	compacto	Silte arenoso compacto amarelo
9	Grossos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	amarelo	compacto	Pedregulho siltoso compacto amarelo
10	Finos	Amostra brilhante e pouco quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	roxo	compacto	Silte compacto roxo
11	Finos	Amostra brilhante e pouco quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	roxo	compacto	Silte compacto roxo

Tabela B.6 – Resultados dos ensaios de laboratório para classificação táctil visual, SPT06

Prof. (m)	Exame visual	Dilatância	Torrão seco ao ar	cor	consistência/compacidade	Classificação
1	Grossos	Amostra brilhante pouco quebradiça, reação rápida	Desagrega com pressão moderada	preto	pouco compacto	Areia pouco argilosa pouco compacta preta
2	Grossos	Amostra brilhante e muito quebradiça, reação rápida	Desagrega ao toque	marrom claro	pouco compacto	Pedregulho arenoso pouco compacto marrom claro
3	Grossos	Amostra brilhante e muito quebradiça, reação rápida	Desagrega ao toque	marrom claro	pouco compacto	Pedregulho arenoso pouco compacto marrom claro

4	Grossos	Amostra brilhante e muito quebradiça, reação rápida	Desagrega ao toque	marrom claro	pouco compacto	Pedregulho arenoso compacto marrom claro
5	Grossos	Amostra brilhante e muito quebradiça, reação rápida	Desagrega ao toque	marrom	compacto	Pedregulho arenoso compacto marrom claro
6	Grossos	Amostra brilhante e muito quebradiça, reação rápida	Desagrega ao toque	marrom	compacto	Pedregulho arenoso compacto marrom claro
7	Grossos	Amostra brilhante e muito quebradiça, reação rápida	Desagrega ao toque	marrom	compacto	Pedregulho arenoso compacto marrom
8	Grossos	Amostra brilhante e muito quebradiça, reação rápida	Desagrega ao toque	marrom	compacto	Pedregulho arenoso compacto marrom claro
9	Finos	Amostra brilhante e quebradiça, reação rápida	Desagrega com baixa pressão	amarelo	compacto	Silte arenoso compacto amarelo

A Figura B.1 apresenta os resultados obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT01.

1,0 m		
Silte arenoso com pedregulho roxo medianamente compacto		
Peso específico aparente	**18.61**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**15.77**	**kN/m³**
Umidade natural	**18.04**	**%**
Umidade Seco ao ar	**3.91**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.80**	**g/cm³**



2,0 m		
Argila arenosa com pedregulho marrom rija		
Peso específico aparente	**20.08**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**18.05**	**kN/m³**
Umidade natural	**11.23**	**%**
Umidade Seco ao ar	**3.12**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.73**	**g/cm³**



3,0 m		
Argila arenosa com pedregulho marrom rija		
Peso específico aparente	**22.85**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**20.21**	**kN/m³**
Umidade natural	**13.09**	**%**
Umidade Seco ao ar	**2.09**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.78**	**g/cm³**



4,0 m			
Silte arenoso amarelo pouco compacto			
Peso específico aparente	**20.80**	**kN/m³**	
Peso específico aparente seco	**17.16**	**kN/m³**	
Umidade natural	**21.21**	**%**	
Umidade Seco ao ar	**2.72**	**%**	
Massa específica real dos grãos	2.84	**g/cm³**	
5,0 m			
Argila arenosa amarela média			
Peso específico aparente	**20.01**	**kN/m³**	
Peso específico aparente seco	**15.97**	**kN/m³**	
Umidade natural	**25.28**	**%**	
Umidade Seco ao ar	**2.37**	**%**	
Massa específica real dos grãos	**2.83**	**g/cm³**	
6,0 m			
Pedregulho siltoso muito compacto roxo			
Peso específico aparente	**19.04**	**kN/m³**	
Peso específico aparente seco	**15.20**	**kN/m³**	
Umidade natural	**25.27**	**%**	
Umidade Seco ao ar	**4.77**	**%**	
Massa específica real dos grãos	**2.78**	**g/cm³**	
7,0 m			
Silte argiloso com pedregulho marrom claro muito compacto			
Peso específico aparente	**22.53**	**kN/m³**	
Peso específico aparente seco	**19.16**	**kN/m³**	
Umidade natural	**17.56**	**%**	
Umidade Seco ao ar	**1.75**	**%**	
Massa específica real dos grãos	**2.91**	**g/cm³**	
8,0 m			
Argila arenosa com pedregulho marrom rija			
Peso específico aparente	**21.23**	**kN/m³**	
Peso específico aparente seco	**17.69**	**kN/m³**	
Umidade natural	**20.01**	**%**	
Umidade Seco ao ar	**3.41**	**%**	
Massa específica real dos grãos	**2.83**	**g/cm³**	
9,0 m			
Silte pouco arenoso amarelo muito compacto			
Peso específico aparente	**18.85**	**kN/m³**	
Peso específico aparente seco	**15.46**	**kN/m³**	
Umidade natural	**21.90**	**%**	
Umidade Seco ao ar	**0.35**	**%**	
Massa específica real dos grãos	**2.91**	**g/cm³**	

Figura B.1 - Resultados de caracterização obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT01.

A Figura B.2 apresenta os resultados obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT02.

1,0 m		
Argila arenosa com pedregulho marrom claro rija		
Peso específico aparente	**19.24**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**15.55**	**kN/m³**
Umidade natural	**23.76**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.38**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.78**	**g/cm³**
2,0 m		
Silte pouco argiloso roxo claro rijo		
Peso específico aparente	**19.78**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**15.85**	**kN/m³**
Umidade natural	**24.81**	**%**
Umidade Seco ao ar	**0.58**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.81**	**g/cm³**
3,0 m		
Peso específico aparente		**kN/m³**
Peso específico aparente seco		**kN/m³**
Umidade natural		**%**
Umidade Seco ao ar		**%**
Massa específica real dos grãos		**g/cm³**
4,0 m		
Silte pouco argiloso roxo claro médio		
Peso específico aparente	**20.68**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**17.35**	**kN/m³**
Umidade natural	**19.18**	**%**
Umidade Seco ao ar	**0.70**	**%**
Massa específica real dos grãos	2.83	**g/cm³**
5,0 m		
Silte pouco argiloso roxo claro duro		
Peso específico aparente	**20.49**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**17.11**	**kN/m³**
Umidade natural	**19.74**	**%**
Umidade Seco ao ar	**2.21**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.80**	**g/cm³**
6,0 m		
Silte pouco argiloso roxo claro duro		
Peso específico aparente	**20.50**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.70**	**kN/m³**
Umidade natural	**22.76**	**%**
Umidade Seco ao ar	**0.95**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.78**	**g/cm³**











7,0 m		
Silte pouco argiloso roxo claro duro		
Peso específico aparente	**20.55**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.92**	**kN/m³**
Umidade natural	**21.43**	**%**
Umidade Seco ao ar	**0.85**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.72**	**g/cm³**
8,0 m		
Silte arenoso com pedregulho muito compacto amarelo escuro		
Peso específico aparente	**20.50**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.70**	**kN/m³**
Umidade natural	**22.78**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.00**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.73**	**g/cm³**
9,0 m		
Silte pouco arenoso com pedregulho amarelo muito compacto		
Peso específico aparente	**20.50**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.85**	**kN/m³**
Umidade natural	**21.66**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.55**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.75**	**g/cm³**
10,0 m		
Areia siltosa marrom muito compacta		
Peso específico aparente	**20.51**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**18.25**	**kN/m³**
Umidade natural	**12.39**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.31**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.78**	**g/cm³**
11,0 m		
Silte pouco arenoso muito compacto roxo		
Peso específico aparente	**20.73**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**17.09**	**kN/m³**
Umidade natural	**21.27**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.10**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.77**	**g/cm³**











Figura B.2 - Resultados de caracterização obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT02.

A Figura B.3 apresenta os resultados obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT03.

1,0 m		
Argila arenosa com pedregulho vermelha mole		
Peso específico aparente	**17.62**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**13.85**	**kN/m³**
Umidade natural	**27.20**	**%**
Umidade Seco ao ar	**2.33**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.80**	**g/cm³**
2,0 m		
Argila arenosa com pedregulho vermelha mole		
Peso específico aparente	**19.72**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.15**	**kN/m³**
Umidade natural	**22.13**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.84**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.84**	**g/cm³**
3,0 m		
Argila arenosa com pedregulho vermelha mole		
Peso específico aparente	**19.99**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.69**	**kN/m³**
Umidade natural	**19.76**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.29**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.80**	**g/cm³**
4,0 m		
Argila arenosa com pedregulho vermelha média		
Peso específico aparente	**19.33**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**15.55**	**kN/m³**
Umidade natural	**24.34**	**%**
Umidade Seco ao ar	**3.31**	**%**
Massa específica real dos grãos	2.82	**g/cm³**
5,0 m		
Argila arenosa com pedregulho vermelha média		
Peso específico aparente	**18.85**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**15.07**	**kN/m³**
Umidade natural	**25.05**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.53**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.80**	**g/cm³**
6,0 m		
Argila arenosa com pedregulho vermelha média		
Peso específico aparente	**18.43**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**14.65**	**kN/m³**
Umidade natural	**25.83**	**%**
Umidade Seco ao ar	**2.19**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.81**	**g/cm³**













7,0 m		
Argila arenosa com pedregulho vermelha dura		
Peso específico aparente	**18.89**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**15.06**	**kN/m³**
Umidade natural	**25.44**	**%**
Umidade Seco ao ar	**2.14**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.80**	**g/cm³**
8,0 m		
Argila arenosa com pedregulho vermelha dura		
Peso específico aparente	**18.90**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**15.06**	**kN/m³**
Umidade natural	**31.46**	**%**
Umidade Seco ao ar	**9.09**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.79**	**g/cm³**
9,0 m		
Pedregulho muito compacto vermelho		
Peso específico aparente	**18.90**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**14.32**	**kN/m³**
Umidade natural	**31.95**	**%**
Umidade Seco ao ar	**8.43**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.80**	**g/cm³**



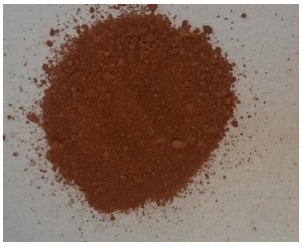




Figura B.3 - Resultados de caracterização obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT03.

A Figura B.4 apresenta os resultados obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT04.

1,0 m		
Argila arenosa com pedregulho vermelha média		
Peso específico aparente	**20.90**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**17.72**	**kN/m³**
Umidade natural	**17.92**	**%**
Umidade Seco ao ar	**2.78**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.84**	**g/cm³**
2,0 m		
Argila arenosa com pedregulho vermelha média		
Peso específico aparente	**20.57**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**17.42**	**kN/m³**
Umidade natural	**18.10**	**%**
Umidade Seco ao ar	**2.65**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.90**	**g/cm³**
3,0 m		
Argila arenosa com pedregulho vermelha média		
Peso específico aparente	**19.15**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.33**	**kN/m³**
Umidade natural	**17.27**	**%**
Umidade Seco ao ar	**2.47**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.90**	**g/cm³**







4,0 m		
Argila arenosa com pedregulho vermelha média		
Peso específico aparente	**19.94**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.49**	**kN/m³**
Umidade natural	**20.95**	**%**
Umidade Seco ao ar	**2.06**	**%**
Massa específica real dos grãos	2.79	**g/cm³**
5,0 m		
Argila siltosa com pedregulho dura vermelho claro		
Peso específico aparente	**16.85**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**13.07**	**kN/m³**
Umidade natural	**28.96**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.69**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.83**	**g/cm³**
6,0 m		
Silte pouco arenoso medianamente compacto roxo claro		
Peso específico aparente	**18.50**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**15.20**	**kN/m³**
Umidade natural	**21.72**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.04**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.84**	**g/cm³**
7,0 m		
Silte pouco arenoso medianamente compacto roxo claro		
Peso específico aparente	**18.75**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**15.04**	**kN/m³**
Umidade natural	**24.66**	**%**
Umidade Seco ao ar	**0.99**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.75**	**g/cm³**
8,0 m		
Silte pouco arenoso medianamente compacto roxo claro		
Peso específico aparente	**18.75**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**15.62**	**kN/m³**
Umidade natural	**20.04**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.27**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.71**	**g/cm³**
9,0 m		
Silte pouco arenoso medianamente compacto amarelo		
Peso específico aparente	**19.33**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**15.09**	**kN/m³**
Umidade natural	**28.12**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.19**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.77**	**g/cm³**
10,0 m		
Silte pouco arenoso compacro roxo claro		
Peso específico aparente	**19.75**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**15.92**	**kN/m³**
Umidade natural	**24.08**	**%**
Umidade Seco ao ar	**0.70**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.80**	**g/cm³**















11,0 m		
Silte pouco arenoso compacto amarelo claro		
Peso específico aparente	**20.30**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.86**	**kN/m³**
Umidade natural	**20.43**	**%**
Umidade Seco ao ar	**0.87**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.80**	**g/cm³**



Figura B.4 - Resultados de caracterização obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT04.

A Figura B.5 apresenta os resultados obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT05.

1,0 m		
Peso específico aparente	-	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.50**	**kN/m³**
Umidade natural	**21.33**	**%**
Umidade Seco ao ar	**4.28**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.75**	**g/cm³**
2,0 m		
Peso específico aparente	-	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.50**	**kN/m³**
Umidade natural	**23.63**	**%**
Umidade Seco ao ar	**4.43**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.72**	**g/cm³**
3,0 m		
Peso específico aparente	-	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.50**	**kN/m³**
Umidade natural	**22.08**	**%**
Umidade Seco ao ar	**2.98**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.70**	**g/cm³**
4,0 m		
Peso específico aparente	-	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**17.50**	**kN/m³**
Umidade natural	**15.17**	**%**
Umidade Seco ao ar	**0.77**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.69**	**g/cm³**
5,0 m		
Peso específico aparente	-	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**17.50**	**kN/m³**
Umidade natural	**18.52**	**%**
Umidade Seco ao ar	**3.07**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.85**	**g/cm³**











6,0 m		
Peso específico aparente	-	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**17.50**	**kN/m³**
Umidade natural	**16.36**	**%**
Umidade Seco ao ar	**4.02**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.72**	**g/cm³**
7,0 m		
Peso específico aparente	-	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**17.50**	**kN/m³**
Umidade natural	**10.52**	**%**
Umidade Seco ao ar	**0.73**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.73**	**g/cm³**
8,0 m		
Peso específico aparente	**19.68**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**17.88**	**kN/m³**
Umidade natural	**10.10**	**%**
Umidade Seco ao ar	**0.99**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.80**	**g/cm³**
9,0 m		
Silte pouco arenoso medianamente compacto amarelo		
Peso específico aparente	**20.52**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**18.06**	**kN/m³**
Umidade natural	**13.65**	**%**
Umidade Seco ao ar	**0.60**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.65**	**g/cm³**
10,0 m		
Peso específico aparente	**19.84**	
Peso específico aparente seco	**15.94**	**kN/m³**
Umidade natural	**24.43**	**%**
Umidade Seco ao ar	**0.96**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.70**	**g/cm³**
11,0 m		
Peso específico aparente	**20.30**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.37**	**kN/m³**
Umidade natural	**23.18**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.09**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.67**	**g/cm³**













Figura B.5 - Resultados de caracterização obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT05.

A Figura B.6 apresenta os resultados obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT06.

1,0 m		
Peso específico aparente	**18.12**	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**15.41**	**kN/m³**
Umidade natural	**17.59**	**%**
Umidade Seco ao ar	**2.70**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.75**	**g/cm³**
2,0 m		
Peso específico aparente	-	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.50**	**kN/m³**
Umidade natural	**17.31**	**%**
Umidade Seco ao ar	**2.95**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.63**	**g/cm³**
3,0 m		
Peso específico aparente	-	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.50**	**kN/m³**
Umidade natural	**18.97**	**%**
Umidade Seco ao ar	**3.69**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.68**	**g/cm³**
4,0 m		
Peso específico aparente	-	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**17.50**	**kN/m³**
Umidade natural	**12.89**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.77**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.69**	**g/cm³**
5,0 m		
Peso específico aparente	-	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**17.50**	**kN/m³**
Umidade natural	**13.28**	**%**
Umidade Seco ao ar	**0.99**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.76**	**g/cm³**
6,0 m		
Peso específico aparente	-	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.50**	**kN/m³**
Umidade natural	**21.87**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.52**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.74**	**g/cm³**
7,0 m		
Peso específico aparente	-	**kN/m³**
Peso específico aparente seco	**16.50**	**kN/m³**
Umidade natural	**13.94**	**%**
Umidade Seco ao ar	**1.19**	**%**
Massa específica real dos grãos	**2.71**	**g/cm³**















8,0 m		
Peso específico aparente	-	kN/m³
Peso específico aparente seco	17.50	kN/m³
Umidade natural	12.76	%
Umidade Seco ao ar	0.84	%
Massa específica real dos grãos	2.75	g/cm³
9,0 m		
Silte pouco arenoso medianamente compacto amarelo		
Peso específico aparente	20.22	kN/m³
Peso específico aparente seco	18.84	kN/m³
Umidade natural	7.34	%
Umidade Seco ao ar	1.53	%
Massa específica real dos grãos	2.78	g/cm³
10,0 m		
Peso específico aparente		kN/m³
Peso específico aparente seco		kN/m³
Umidade natural		%
Umidade Seco ao ar		%
Massa específica real dos grãos		g/cm³
11,0 m		
Peso específico aparente	20.30	kN/m³
Peso específico aparente seco	16.86	kN/m³
Umidade natural	20.43	%
Umidade Seco ao ar	0.87	%
Massa específica real dos grãos	2.74	g/cm³





Figura B.6 - Resultados de caracterização obtidos para as amostras extraídas na sondagem SPT06.

B.2 – ANÁLISE DE DIFRAÇÃO DE RAIOS-X

As Figuras B.7 a B.17 apresentam os resultados das análises obtidos para a difração de raios-X.

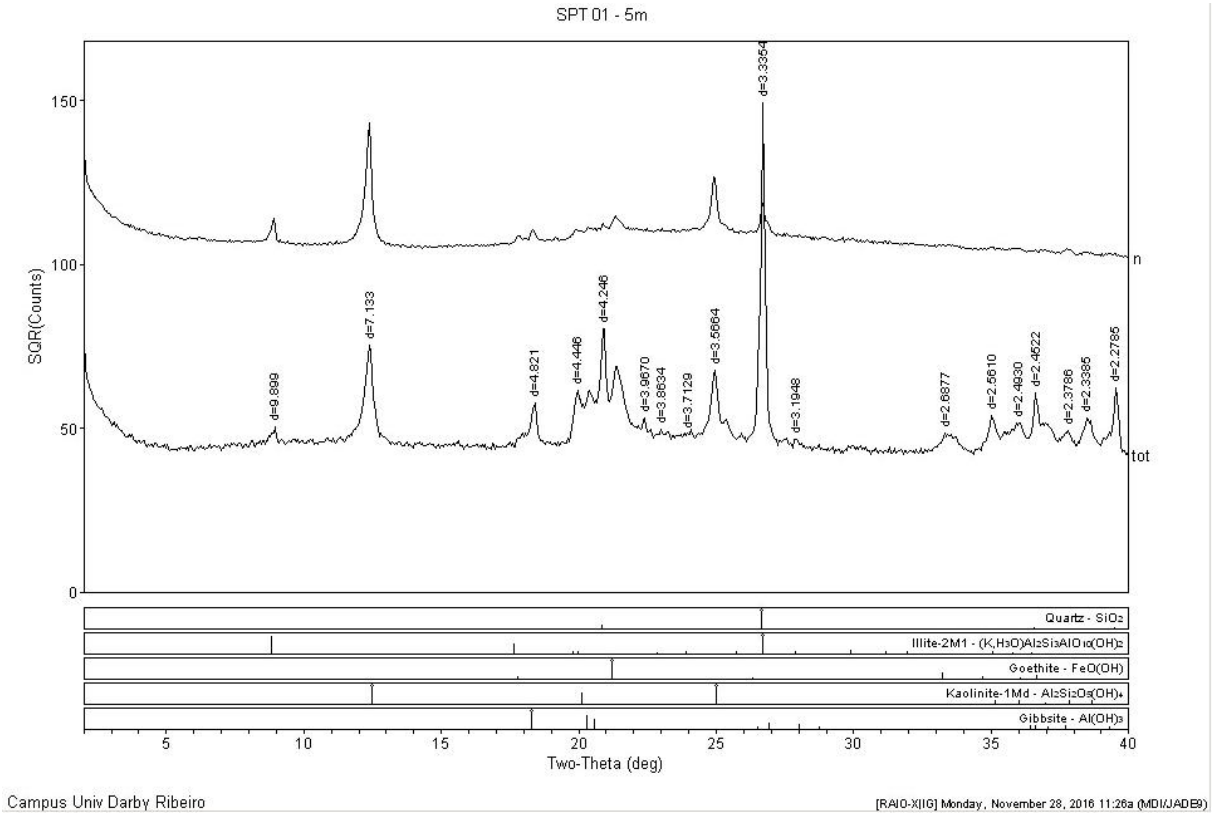


Figura B.7 – Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT01 a 5 m de profundidade.

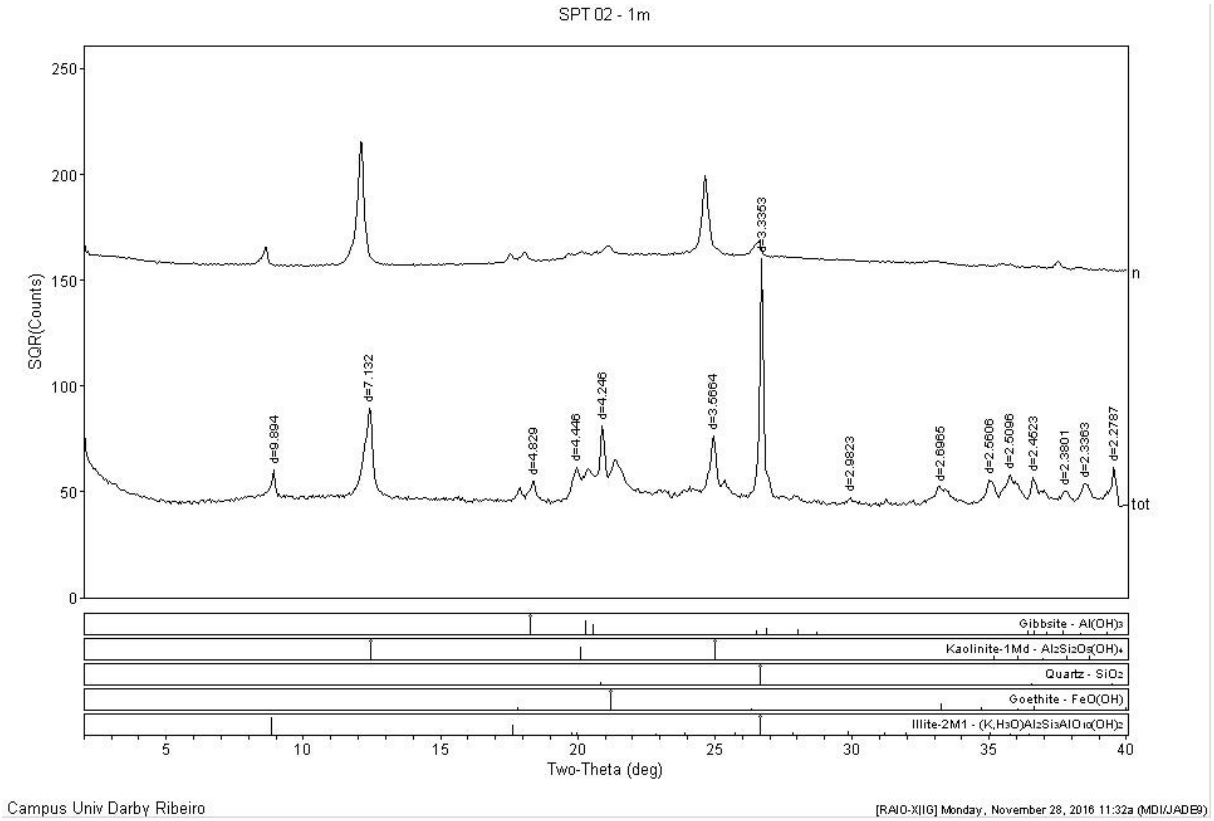


Figura B.8 – Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT02 a 1 m de profundidade.

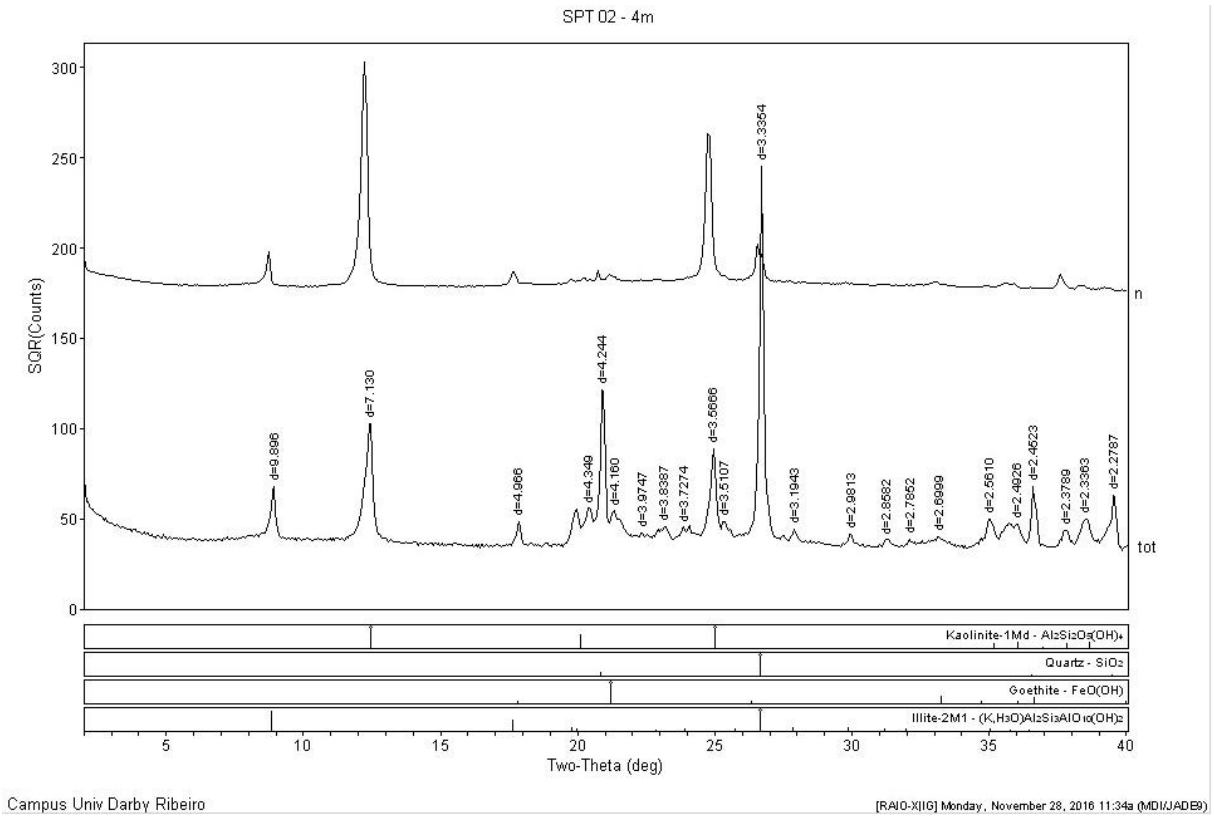


Figura B.9 – Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT02 a 4 m de profundidade.

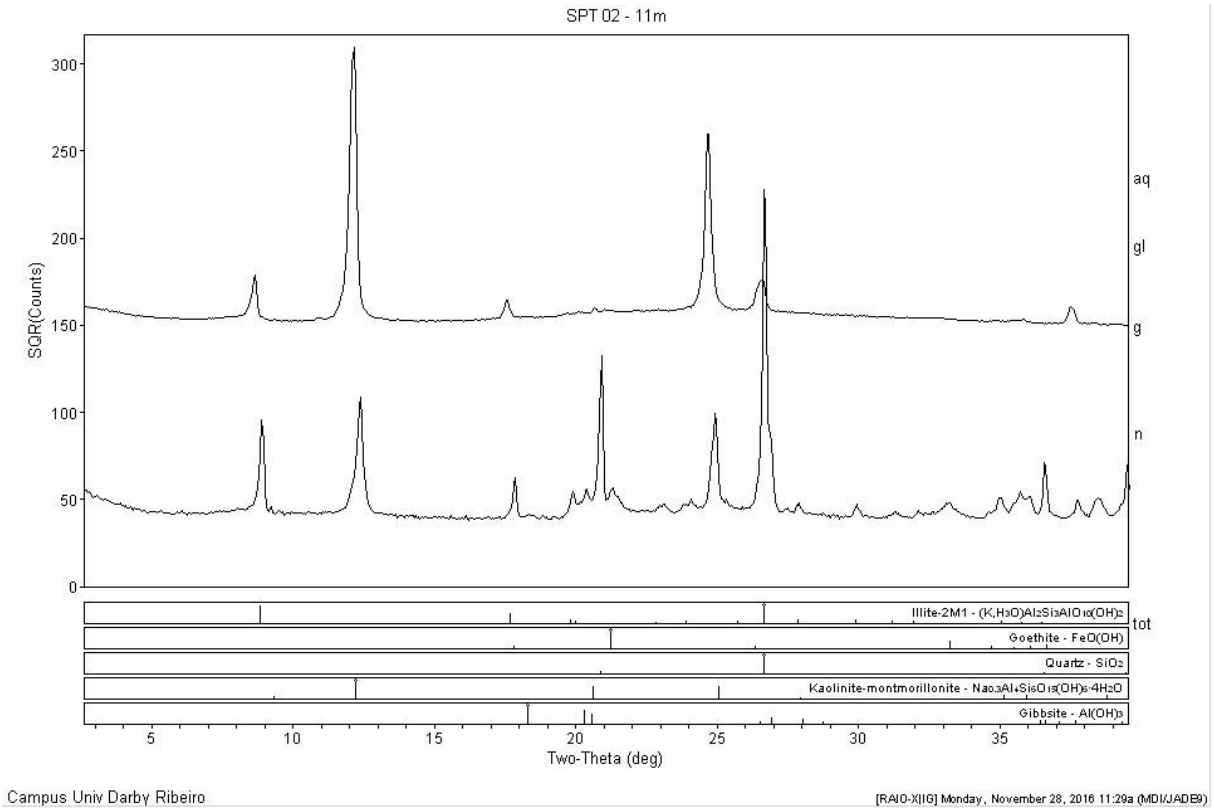


Figura B.10 – Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT02 a 11 m de profundidade.

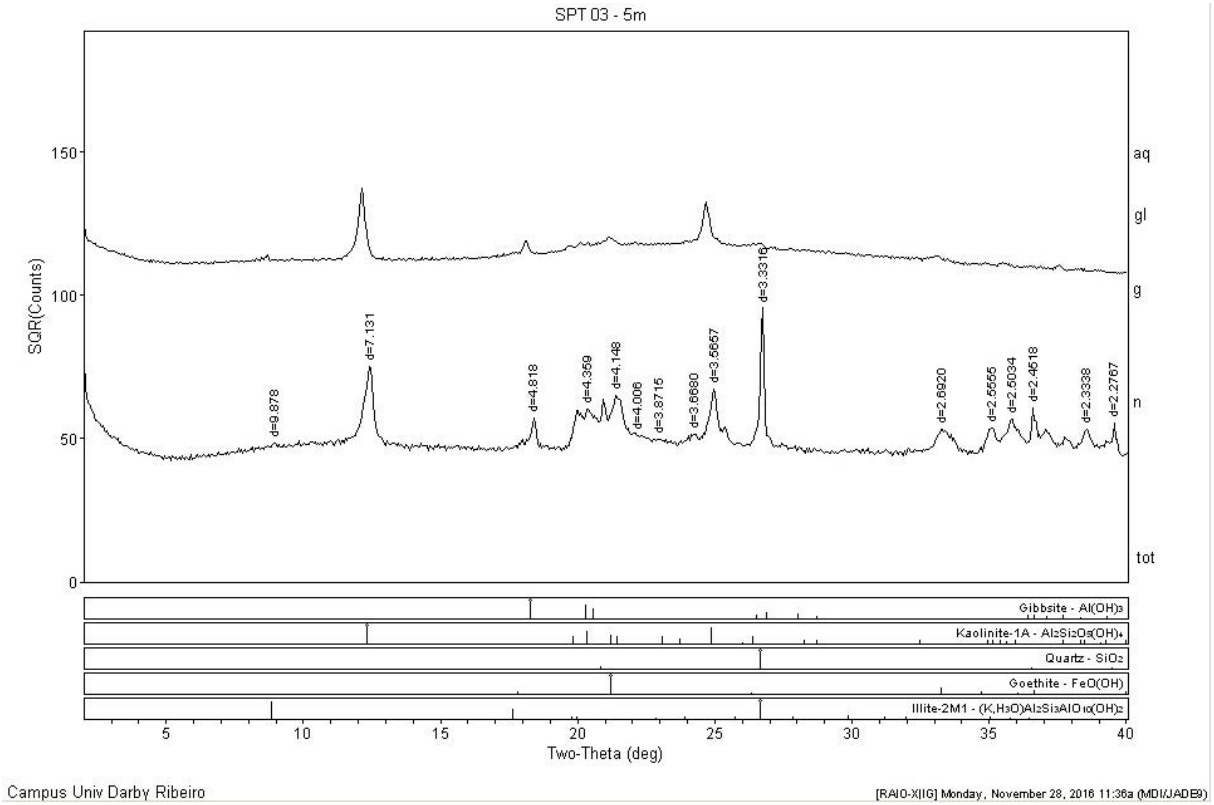


Figura B.11 – Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT03 a 5 m de profundidade.

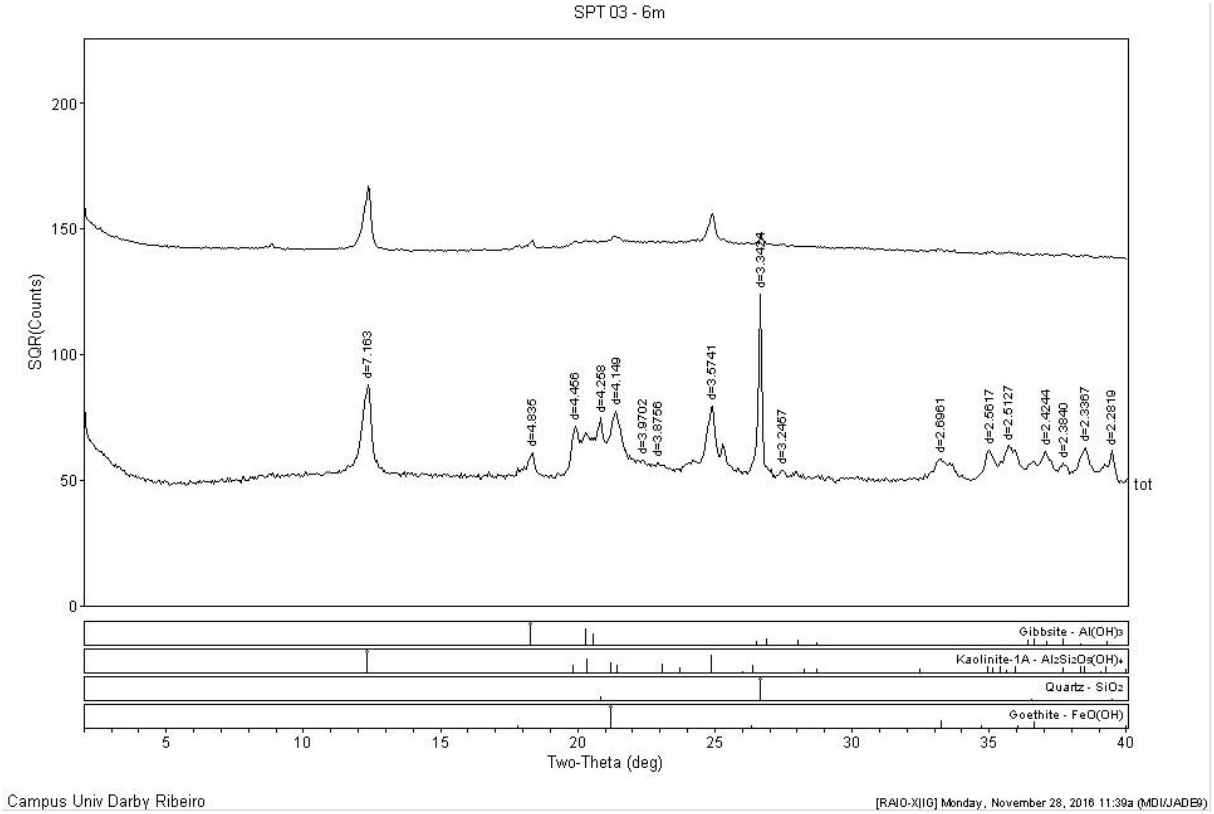


Figura B.12– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT03 a 6 m de profundidade.

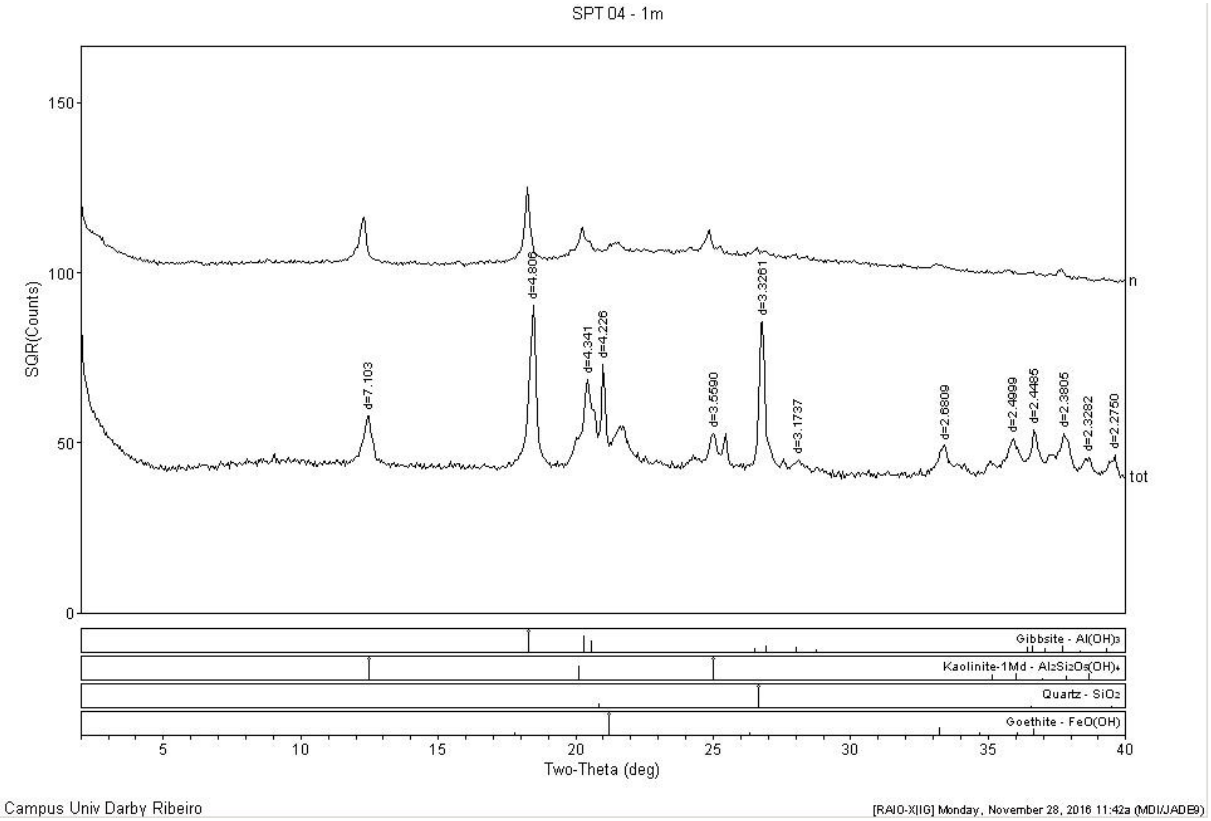


Figura B.13– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT04 a 1 m de profundidade.

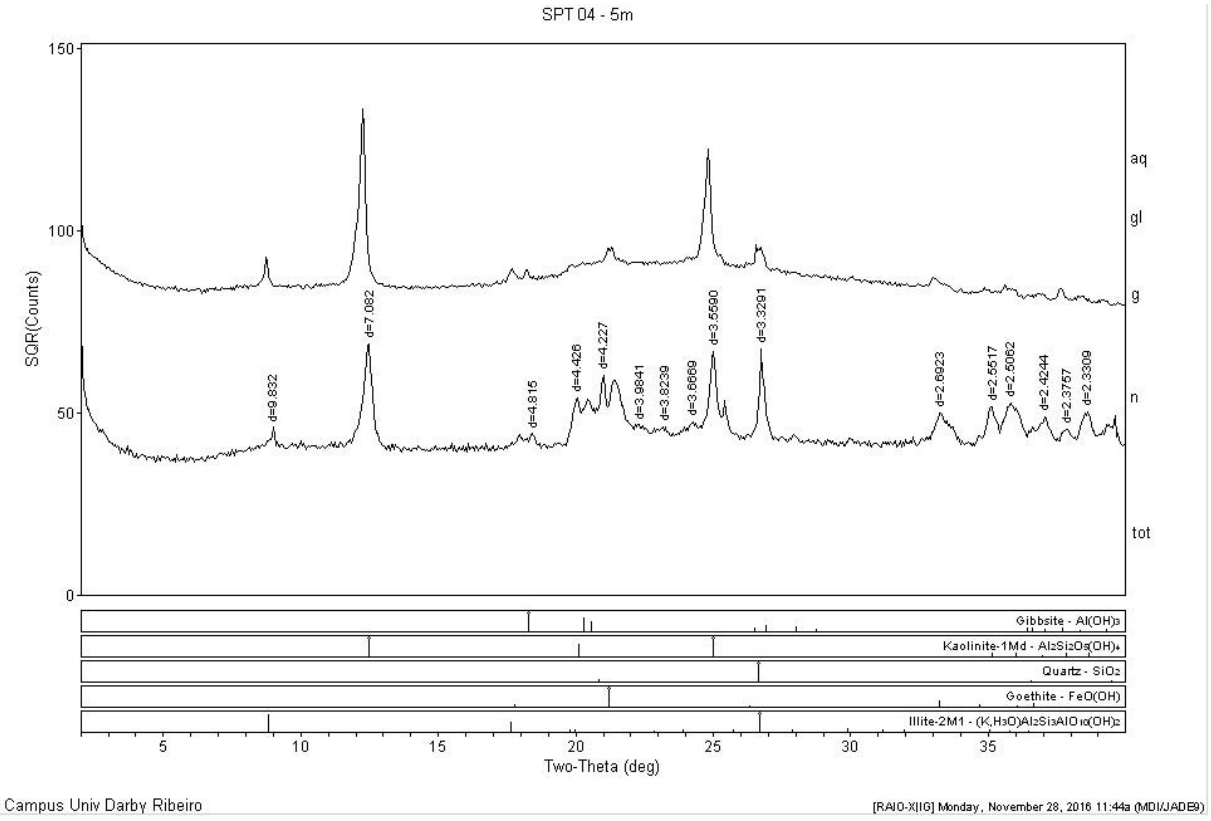


Figura B.14– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT04 a 5 m de profundidade.

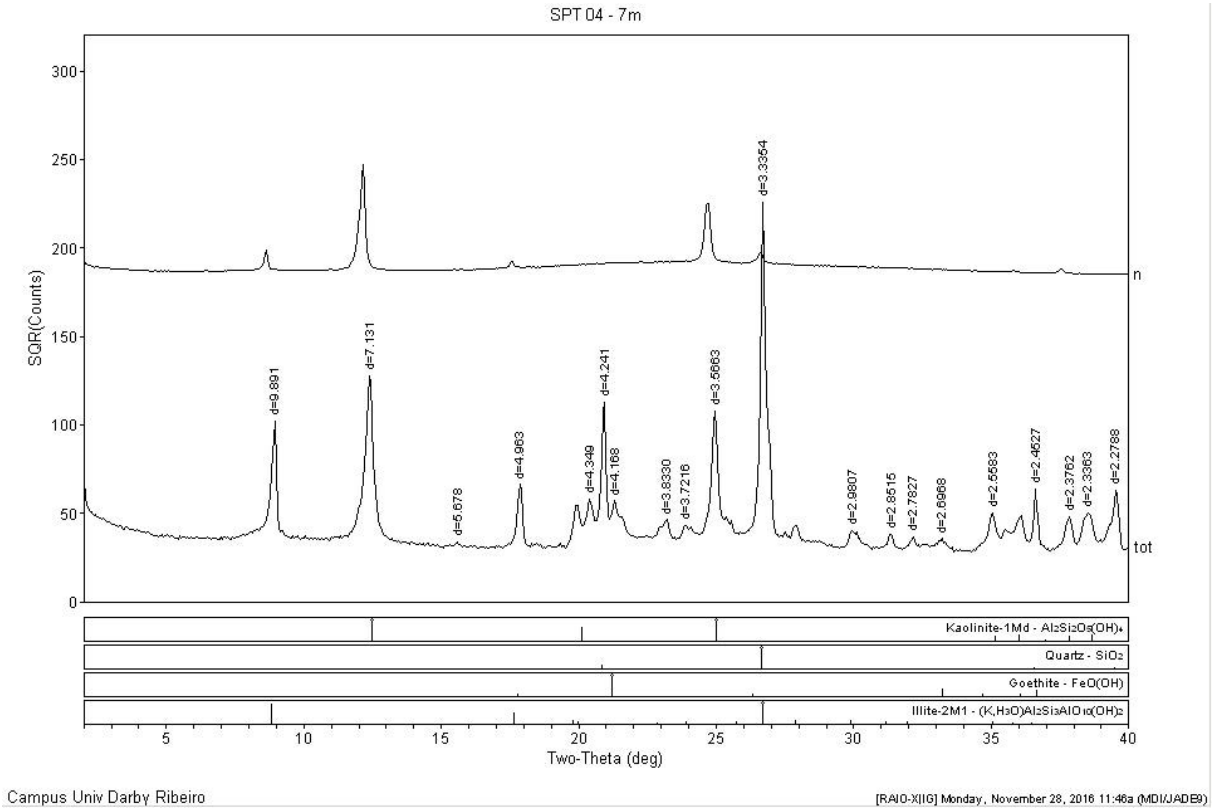


Figura B.15– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT04 a 7 m de profundidade.

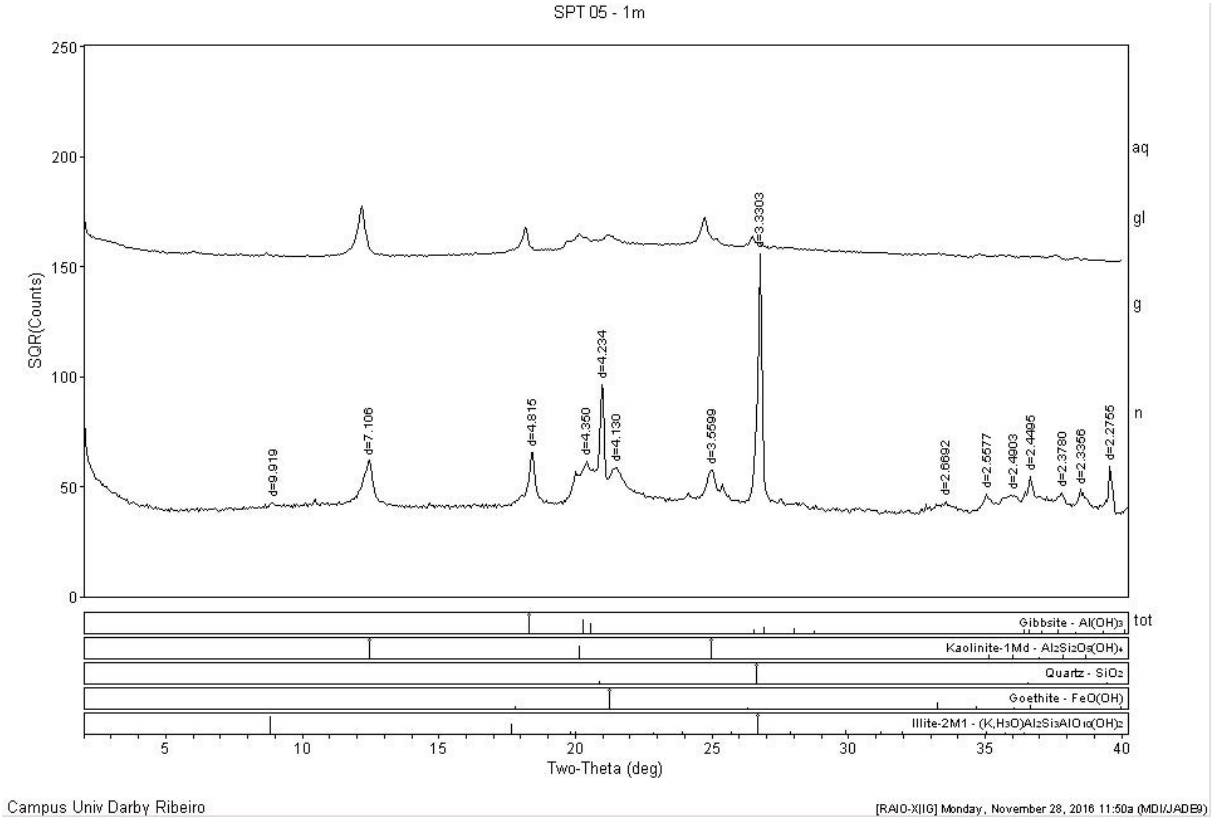


Figura B.16– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT05 a 1 m de profundidade.

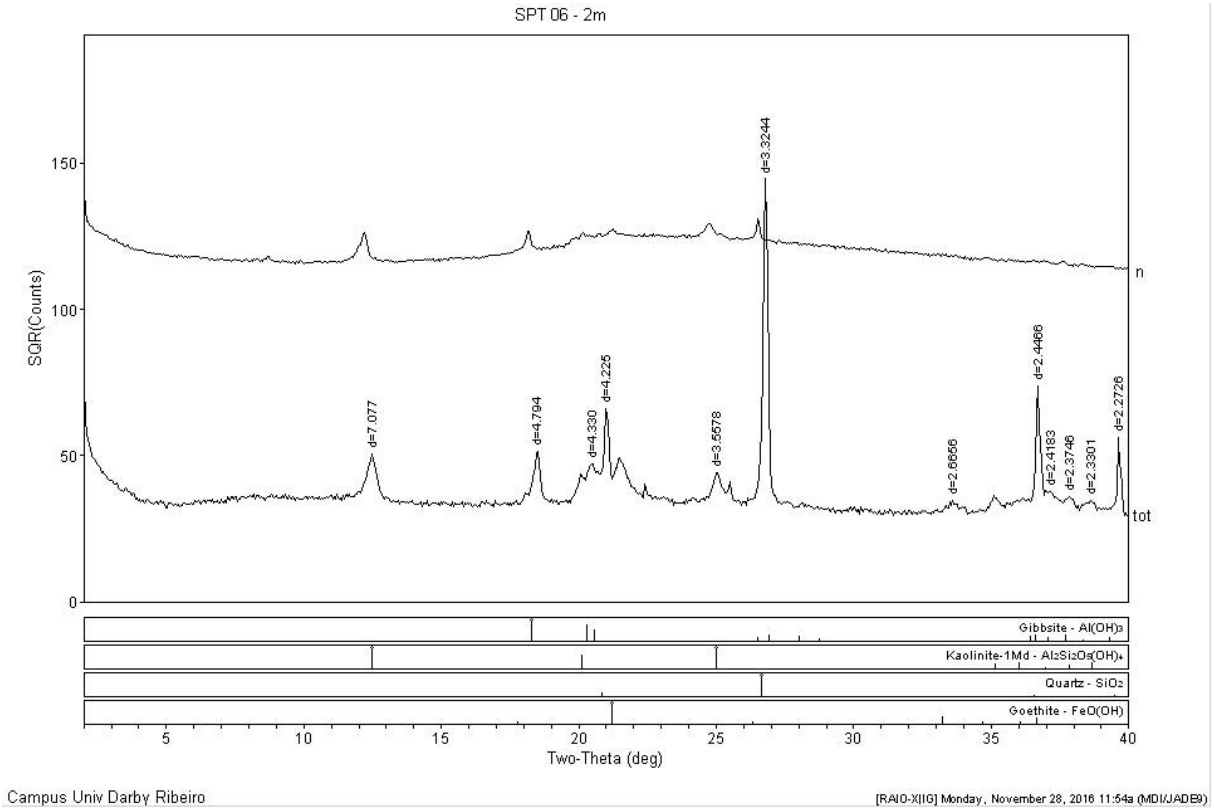


Figura B.17– Análise de difração de raios-x para as frações total e argila para a amostra SPT06 a 2 m de profundidade.

B.3 – resistividade elétrica em laboratório

As Figuras B.18 a B.21 apresentam o histograma para as maiores forças de compactação semi-estática, obtidas no processo de manufatura dos corpos de prova para os ensaios de resistividade elétrica em laboratório, aplicadas para cada tipo de solo, separadas por grau de saturação.

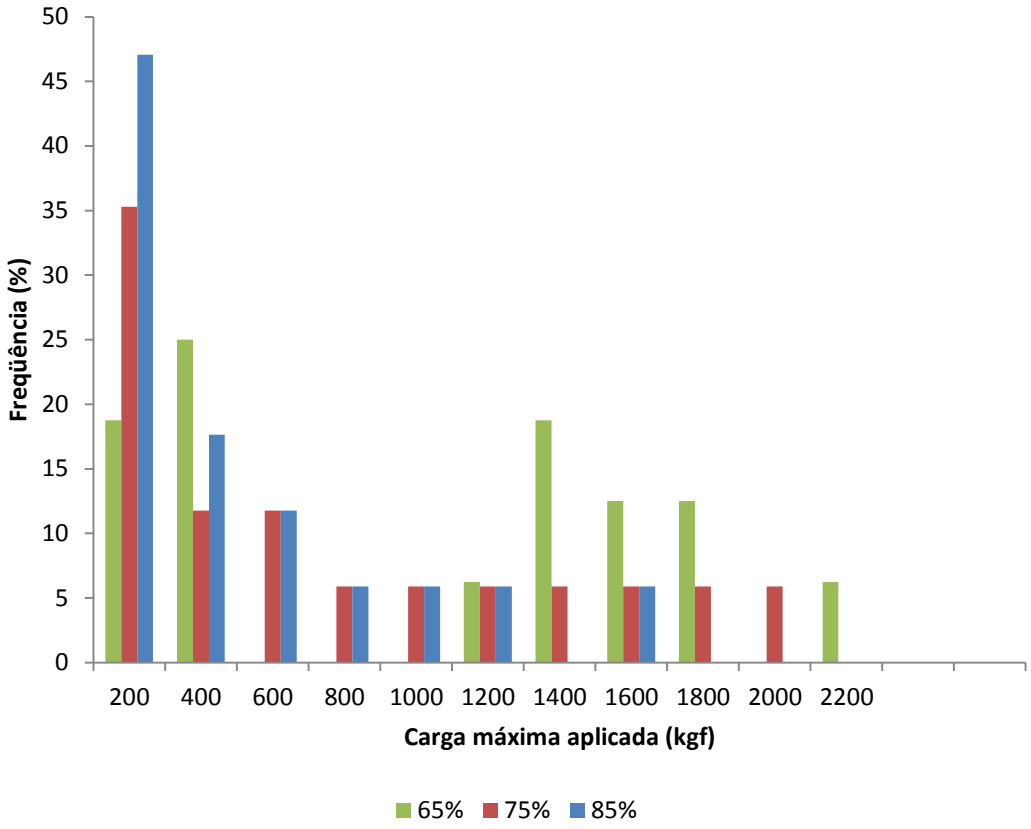


Figura B.18 – Histograma para máximas cargas aplicadas na compactação dos solos argilosos.

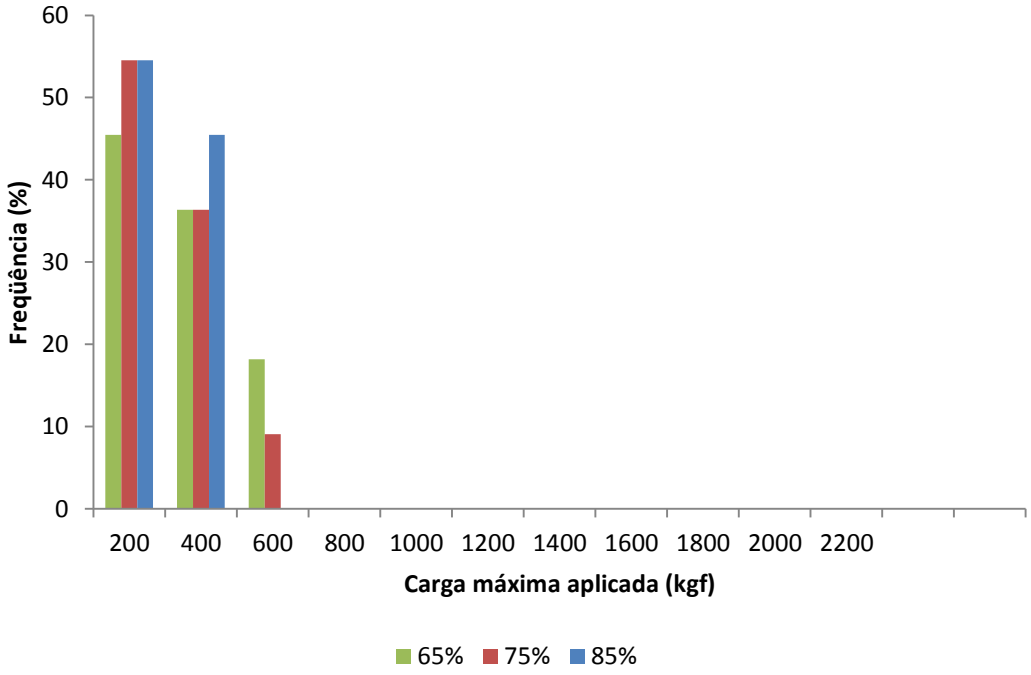


Figura B.19 – Histograma para máximas cargas aplicadas na compactação dos solos siltosos.

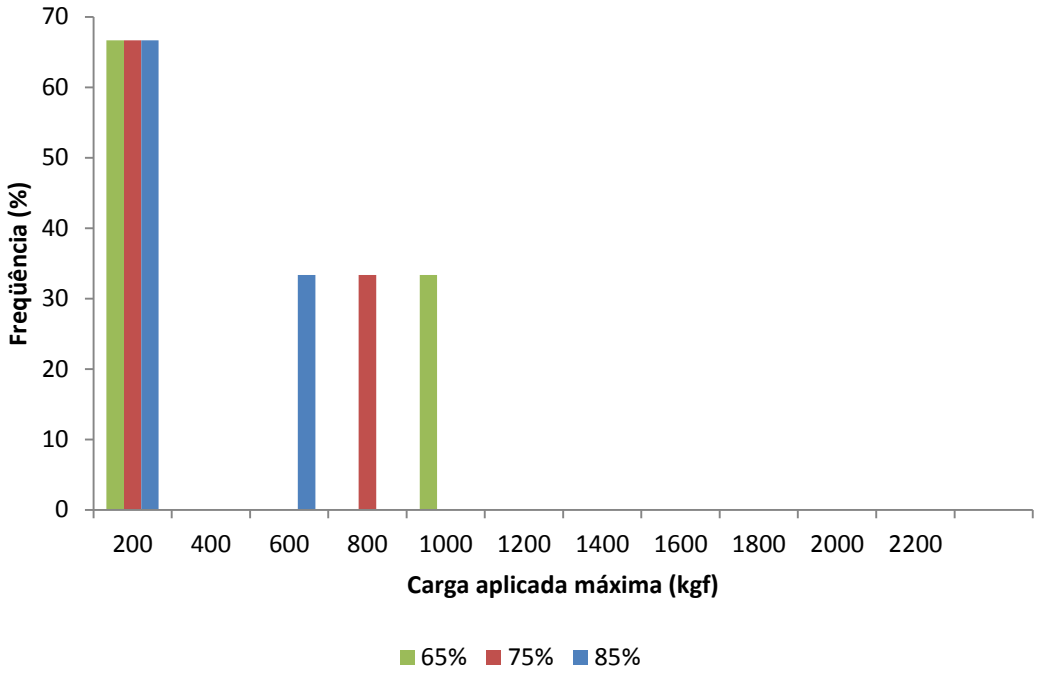


Figura B.20 – Histograma para máximas cargas aplicadas na compactação dos solos arenosos.

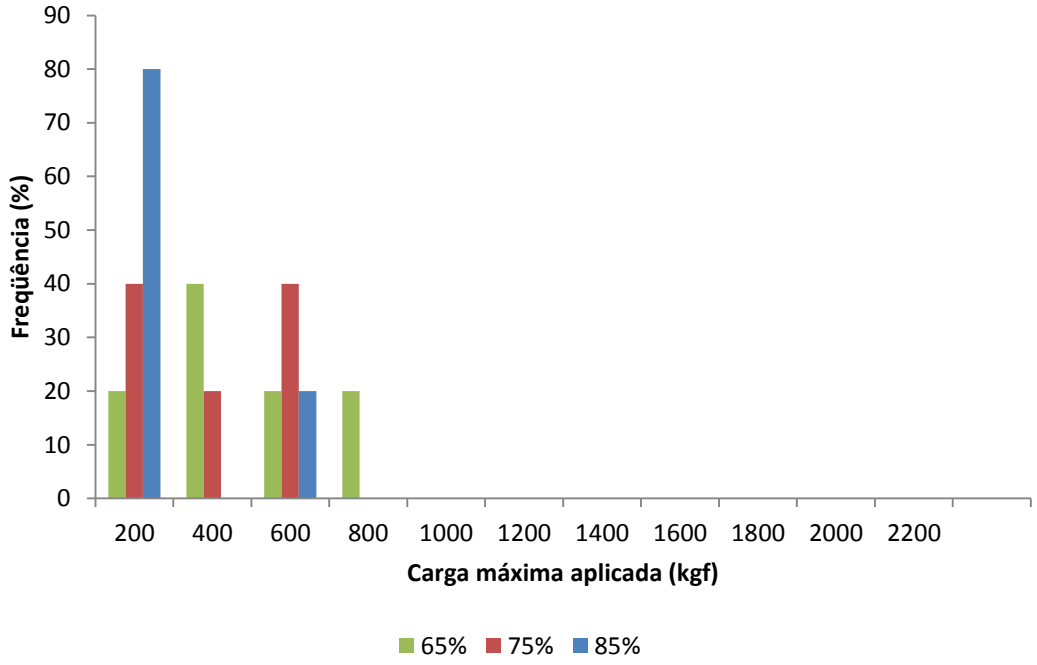


Figura B.21– Histograma para máximas cargas aplicadas na compactação dos saprólitos.

A Tabela B.7 apresenta os dados obtidos para a resistividade elétrica para todas as amostras ensaiadas.

Tabela B.7. Resultados obtidos para os ensaios de resistividade elétrica em laboratório.

Amostra		Tipo de Solo	Saturação (%)	$w_{volumétrica}$ (%)	Resistividade (Ω.m)
SPT01	1m	Silte arenoso com pedregulho roxo medianamente compacto	65	28	1224
			75	32	936
			85	36	659
SPT01	2m	Argila arenosa com pedregulho marrom rija	65	22	1653
			75	26	1144
			85	29	883
SPT01	3m	Argila arenosa com pedregulho marrom rija	65	19	1401
			75	22	954
			85	25	835
SPT01	4m	Silte arenoso amarelo pouco compacto	65	24	1590
			75	28	1109
			85	32	724
SPT01	5m	Argila arenosa amarela média	65	27	3047
			75	31	2699
			85	36	2167
SPT01	6m	Pedregulho siltoso muito compacto roxo	65	27	2558
			75	31	1777
			85	36	1327
SPT01	7m	Silte argiloso com pedregulho marrom claro muito compacto	65	26	1786
			75	30	1346
			85	34	724
SPT01	8m	Argila arenosa com pedregulho marrom rija	65	27	2256
			75	31	1653
			85	35	933
SPT01	9m	Silte pouco arenoso amarelo muito compacto	65	28	1366
			75	33	969
			85	37	591
SPT02	1m	Argila arenosa com pedregulho marrom claro rija	65	28	1388
			75	33	1020
			85	37	883
SPT02	2m	Silte pouco argiloso roxo claro rijo	65	28	2515
			75	32	1417
			85	36	1024
SPT02	4m	Silte pouco argiloso roxo claro médio	65	24	2109
			75	28	1540
			85	31	1227
SPT02	6e7m	Silte pouco argiloso roxo	65	29	1040
			75	33	772

		claro duro	85	37	504
SPT02	8m	Silte arenoso com pedregulho muito compacto amarelo escuro	65	25	1123
			75	29	791
			85	32	617
SPT02	9m	Silte pouco arenoso com pedregulho amarelo muito compacto	65	25	932
			75	29	656
			85	32	489
SPT02	10m	Areia siltosa marrom muito compacta	65	22	672
			75	25	490
			85	29	352
SPT02	11m	Silte pouco arenoso muito compacto roxo	65	25	2358
			75	28	1523
			85	32	1079
SPT03	1m	Argila arenosa com pedregulho vermelha mole	65	32	362
			75	37	324
			85	42	283
SPT03	2m	Argila arenosa com pedregulho vermelha mole	65	27	1948
			75	31	1196
			85	35	897
SPT03	3m	Argila arenosa com pedregulho vermelha mole	65	26	1493
			75	30	1001
			85	33	791
SPT03	4m	Argila arenosa com pedregulho vermelha média	65	26	2305
			75	30	1445
			85	33	948
SPT03	5m	Argila arenosa com pedregulho vermelha média	65	29	2230
			75	34	1754
			85	38	1229
SPT03	6m	Argila arenosa com pedregulho vermelha média	65	29	4190
			75	34	3020
			85	38	2648
SPT03	7m	Argila arenosa com pedregulho vermelha dura	65	30	5151
			75	35	4347
			85	40	3724
SPT03	8m	Argila arenosa com pedregulho vermelha dura	65	30	2446
			75	34	2065
			85	39	1778
SPT03	9m	Pedregulho muito compacto vermelho	65	30	2282
			75	34	1961
			85	39	1526
SPT04	1m	Argila arenosa com pedregulho	65	23	1083
			75	27	694

		vermelha média	85	30	452
		Argila arenosa	65	24	872
SPT04	2m	com pedregulho	75	28	527
		vermelha média	85	31	397
		Argila arenosa	65	26	947
SPT04	3m	com pedregulho	75	30	604
		vermelha média	85	35	435
		Argila arenosa	65	26	3207
SPT04	4m	com pedregulho	75	30	2077
		vermelha média	85	34	1560
		Argila siltosa	65	34	5949
SPT04	5m	com pedregulho	75	39	3383
		dura vermelho claro	85	45	2696
		Silte pouco	65	29	3991
		arenoso	75	34	2207
SPT04	6m	medianamente			
		compacto roxo claro	85	38	1589
		Silte pouco	65	29	1585
		arenoso	75	34	1023
SPT04	7m	medianamente			
		compacto roxo claro	85	39	632
		Silte pouco	65	28	2537
		arenoso	75	32	1516
SPT04	8m	medianamente			
		compacto roxo claro	85	37	919
		Silte pouco	65	29	1239
		arenoso	75	34	654
SPT04	9m	medianamente			
		compacto amarelo	85	38	439
		Silte pouco	65	27	1276
SPT04	10m	arenoso	75	32	589
		compacro roxo claro	85	36	420
		Silte pouco	65	25	1131
SPT04	11m	arenoso	75	29	675
		compacto amarelo claro	85	33	494
		Areia pouco	65	23	273
SPT05	1m	argilosa pouco	75	27	149
		compacta preta	85	30	108
SPT05	2m	Silte arenoso	65	24	2866
		pouco compacto	75	28	1340

		amarelo	85	31	1047
		Silte arenoso	65	26	2680
SPT05	3m	pouco compacto	75	30	1762
		amarelo	85	35	1352
		Pedregulho	65	26	989
SPT05	4m	arenoso pouco	75	30	660
		compacto marrom claro	85	34	490
		Pedregulho	65	34	2603
SPT05	5m	arenoso	75	39	1777
		compacto marrom claro	85	45	1369
		Pedregulho	65	29	3391
SPT05	6m	arenoso	75	34	1180
		compacto marrom claro	85	38	842
		Pedregulho	65	29	3219
SPT05	7m	siltoso	75	34	1966
		compacto amarelo	85	39	1371
		Silte arenoso	65	28	2280
SPT05	8m	compacto	75	32	1067
		amarelo	85	37	763
			65	25	1390
SPT05	13m	Silte compacto roxo	75	29	1043
			85	33	779
		Areia pouco	65	23	123
SPT06	1m	argilosa pouco	75	27	103
		compacta preta	85	30	94
		Pedregulho	65	24	1143
SPT06	2m	arenoso pouco	75	28	934
		compacto marrom claro	85	31	625
		Pedregulho	65	26	3856
SPT06	3m	arenoso pouco	75	30	2633
		compacto marrom claro	85	35	2087
		Pedregulho	65	29	4153
SPT06	4m	arenoso	75	34	2651
		compacto marrom claro	85	38	1986
		Pedregulho	65	28	1168
SPT06	5m	arenoso	75	32	622
		compacto marrom claro	85	37	533

Apêndice C – Perfis geotécnicos

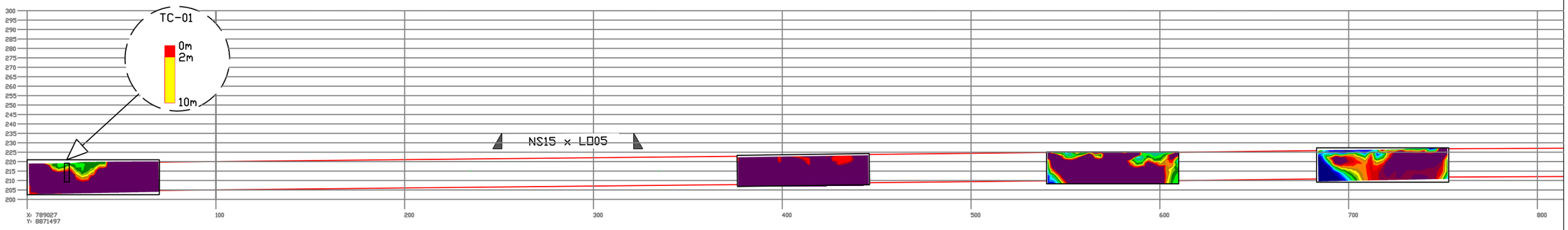
As Figuras C.1 a C.8 apresentam os perfis geotécnicos para a linha Central, desenvolvidos a partir de seções eletrorresistivas.

As Figuras C.9 a C.13 apresentam os perfis geotécnicos para a linha Norte, desenvolvidos a partir de seções eletrorresistivas.

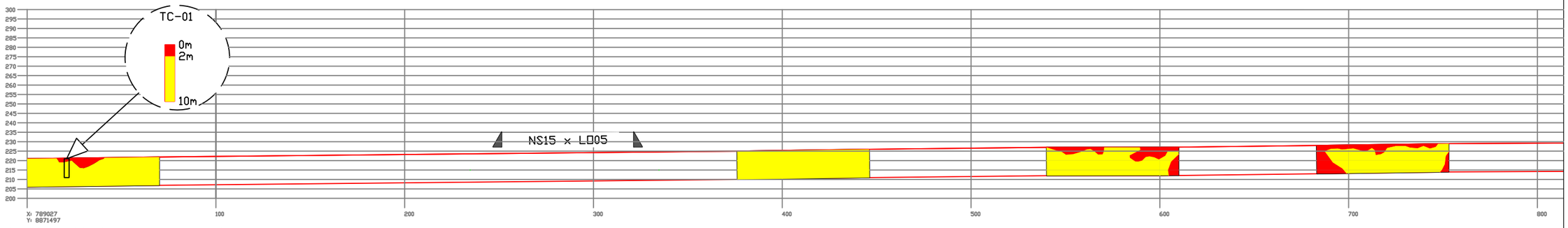
As Figuras C.14 a C.18 apresentam os perfis geotécnicos para a linha Sul, desenvolvidos a partir de seções eletrorresistivas.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

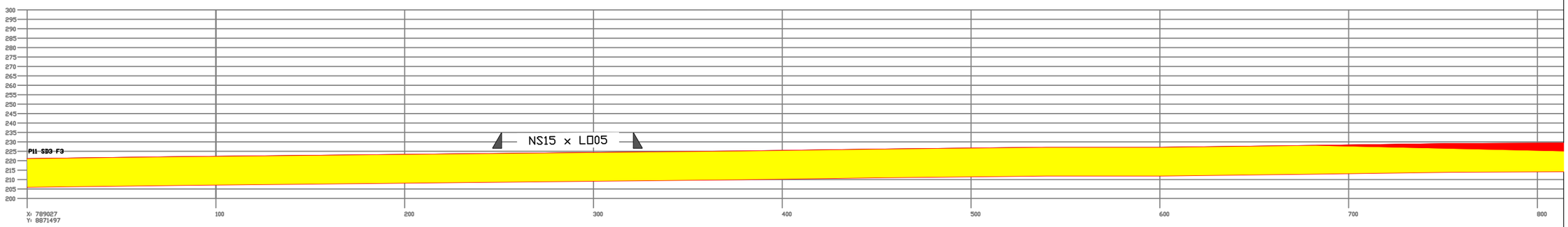
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

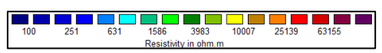


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

**Areia argilosa na classificação granulométrica

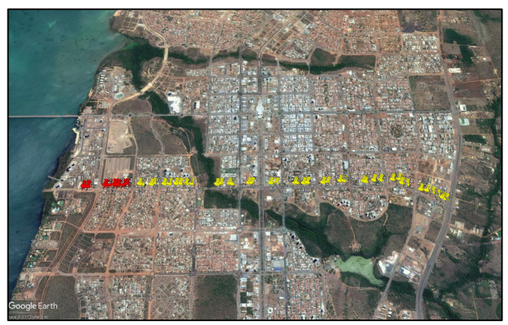
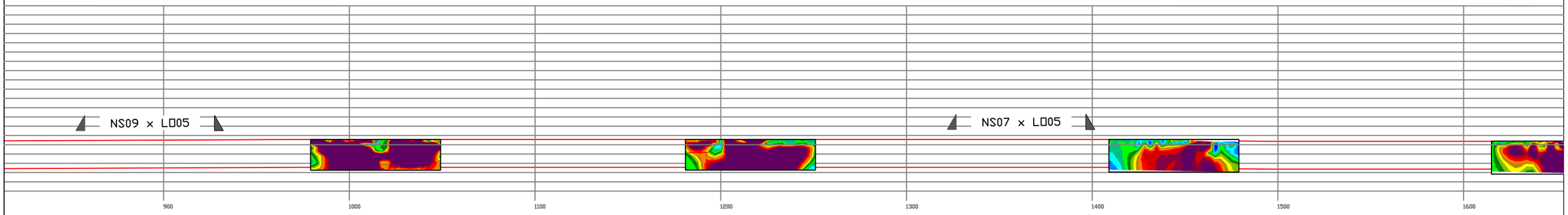


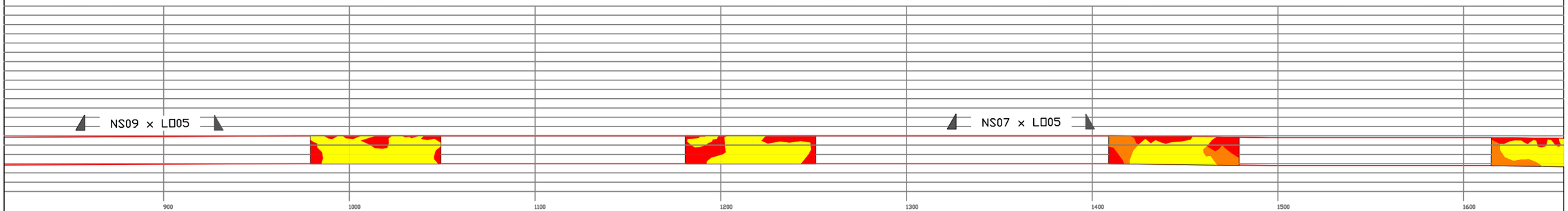
Figura C.1- Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Central.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

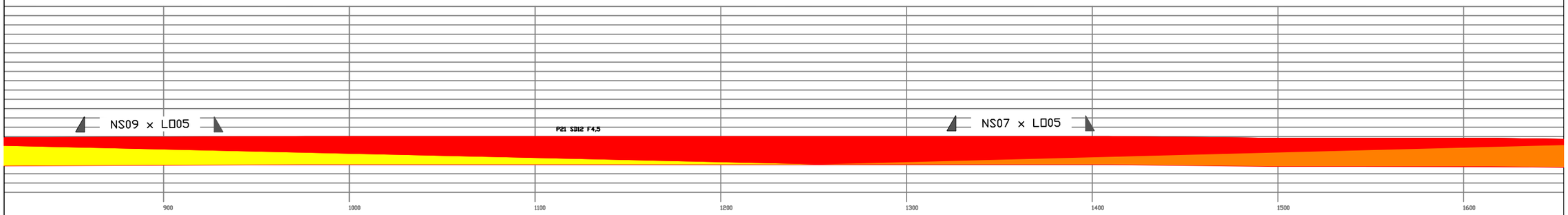
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

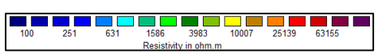


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

**Areia argilosa na classificação granulométrica

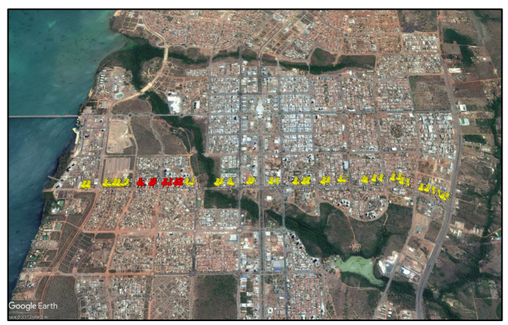
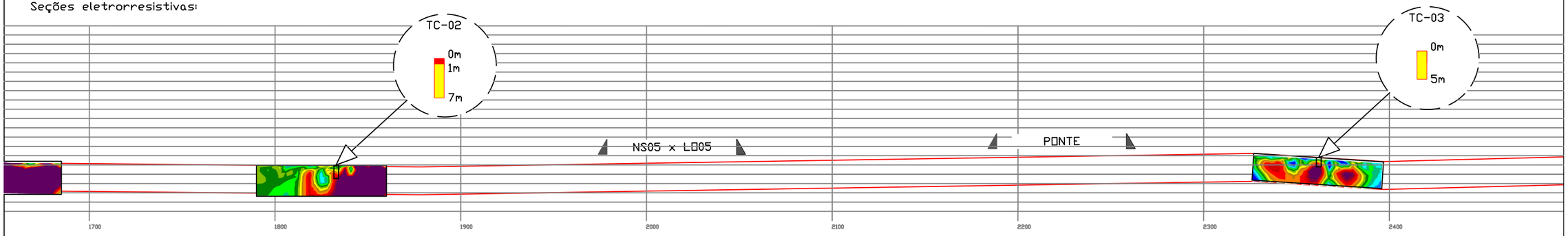


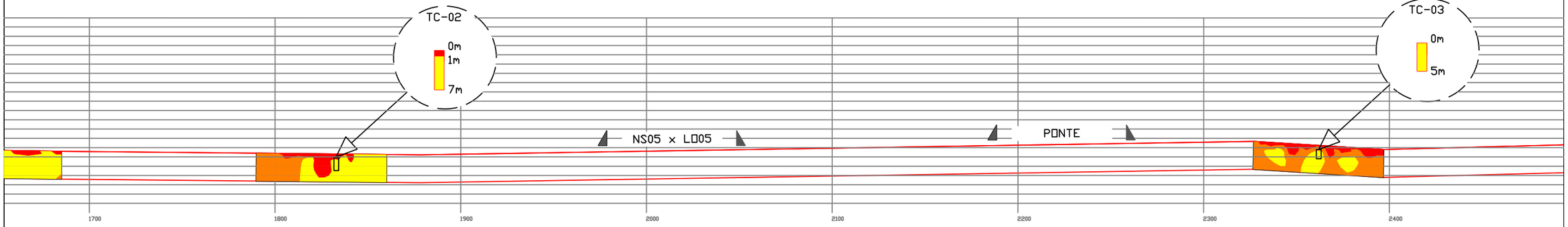
Figura C.2- Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Central.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

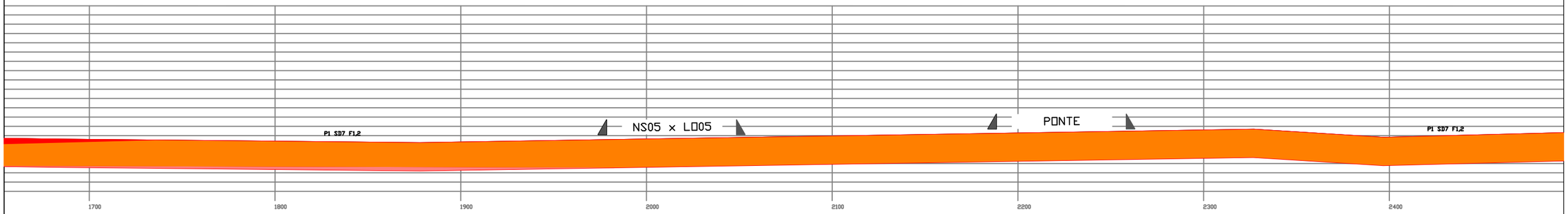
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

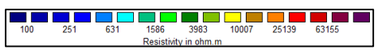


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

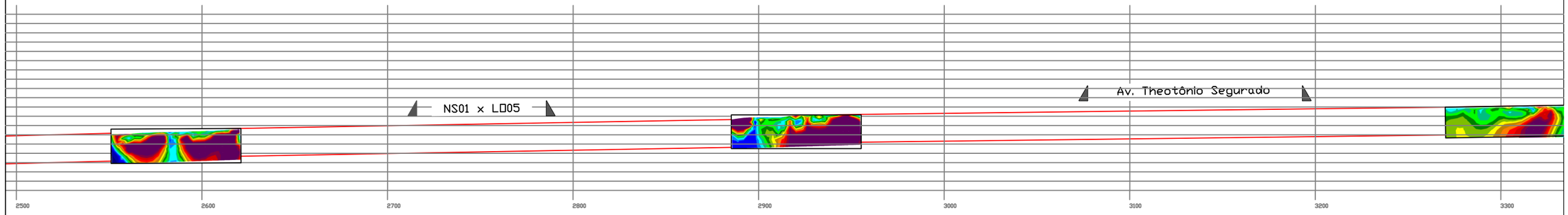
**Areia argilosa na classificação granulométrica



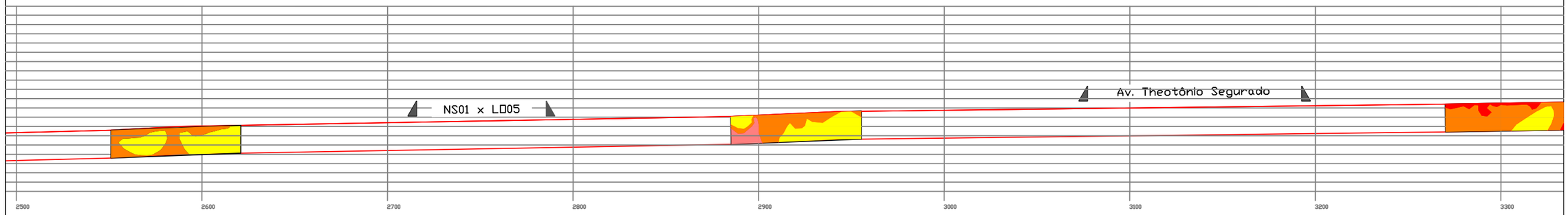
Figura C.3- Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Central.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

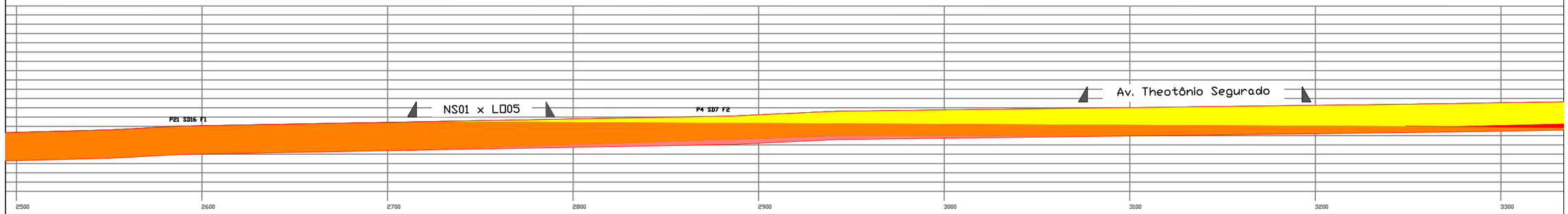
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

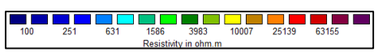


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

**Areia argilosa na classificação granulométrica

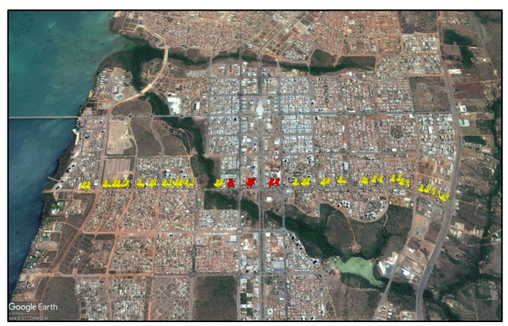
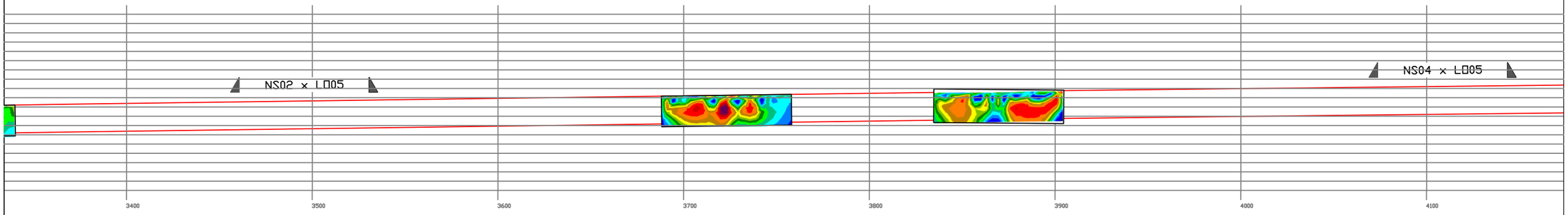


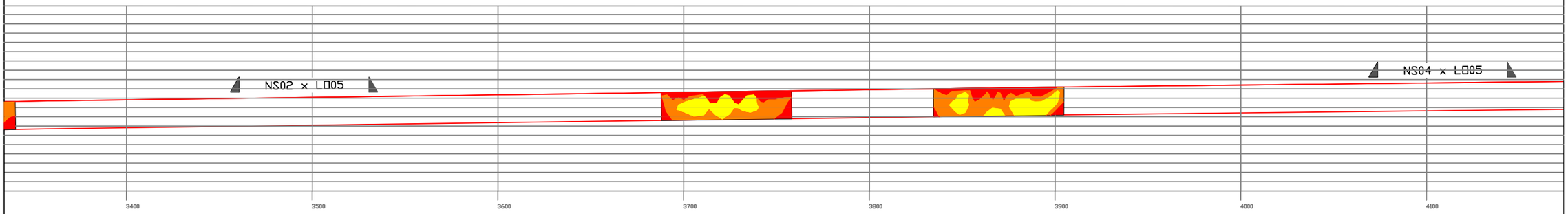
Figura C.4– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Central.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

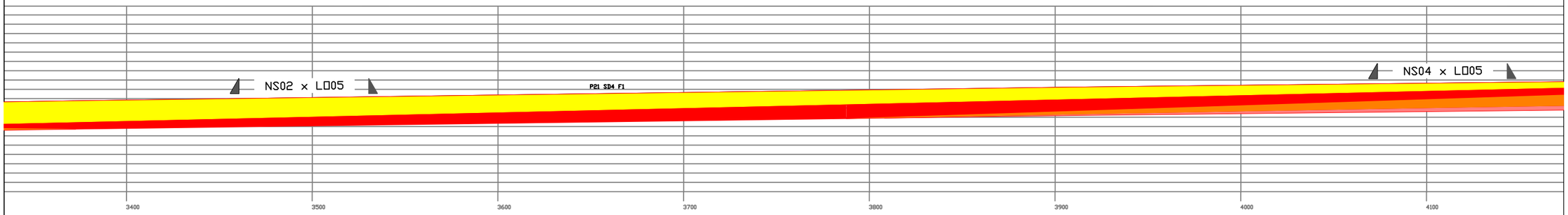
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

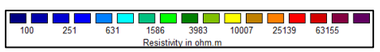


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

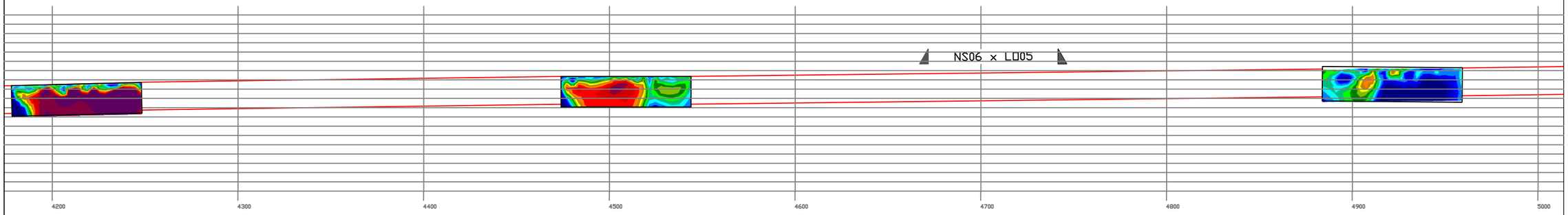
**Areia argilosa na classificação granulométrica



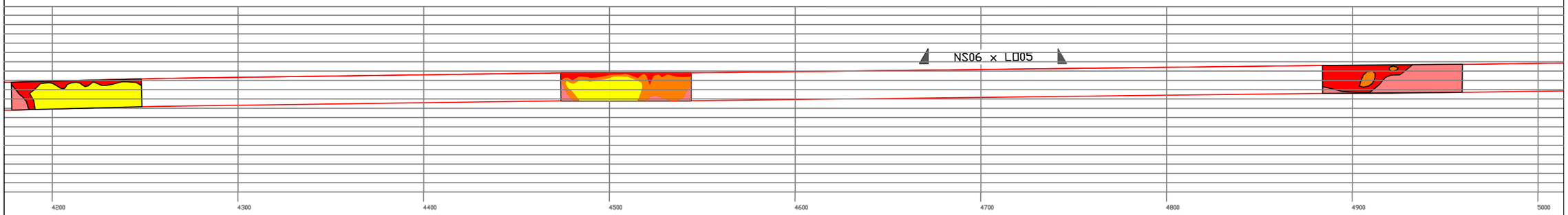
Figura C.5– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Central.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

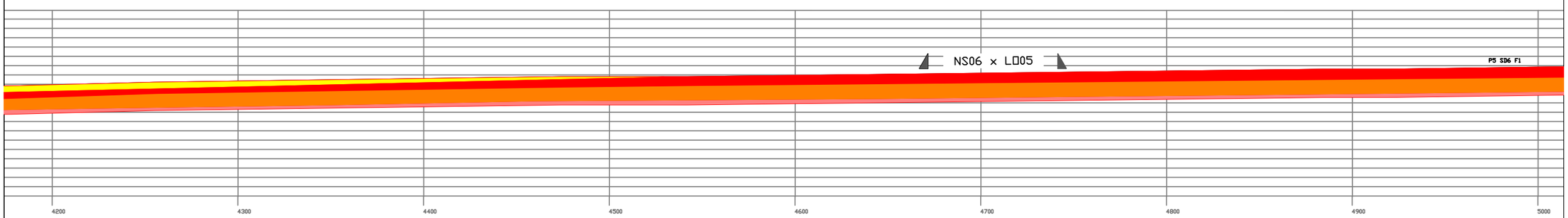
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

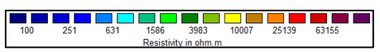


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

**Areia argilosa na classificação granulométrica

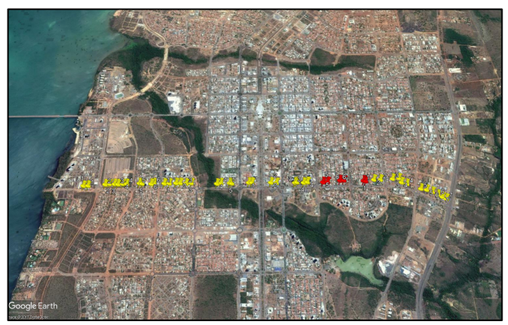
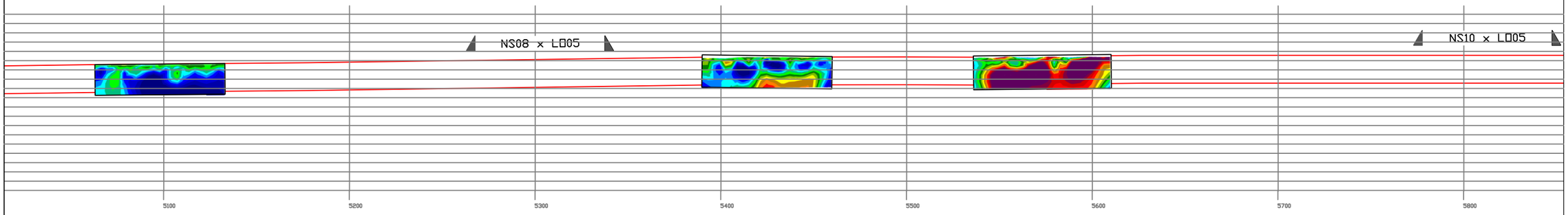


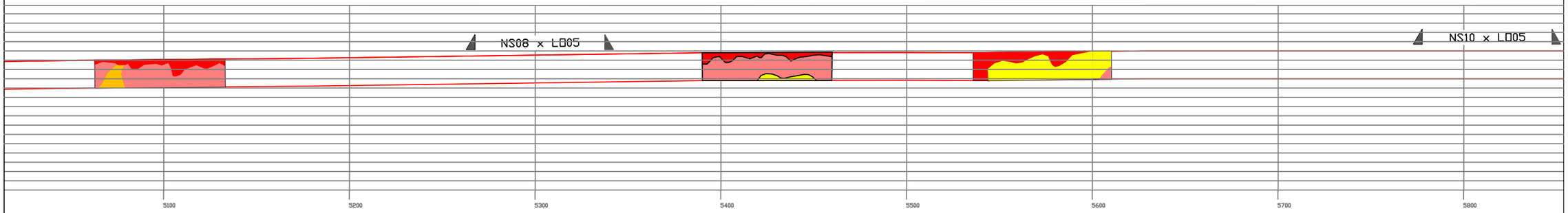
Figura C.6- Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Central.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

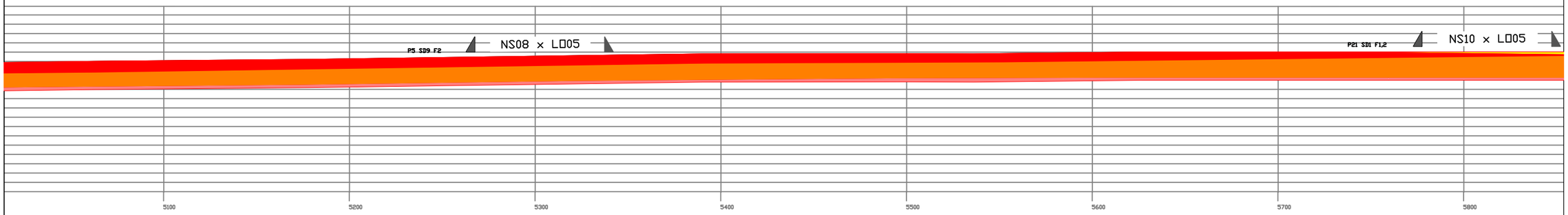
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

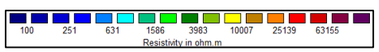


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

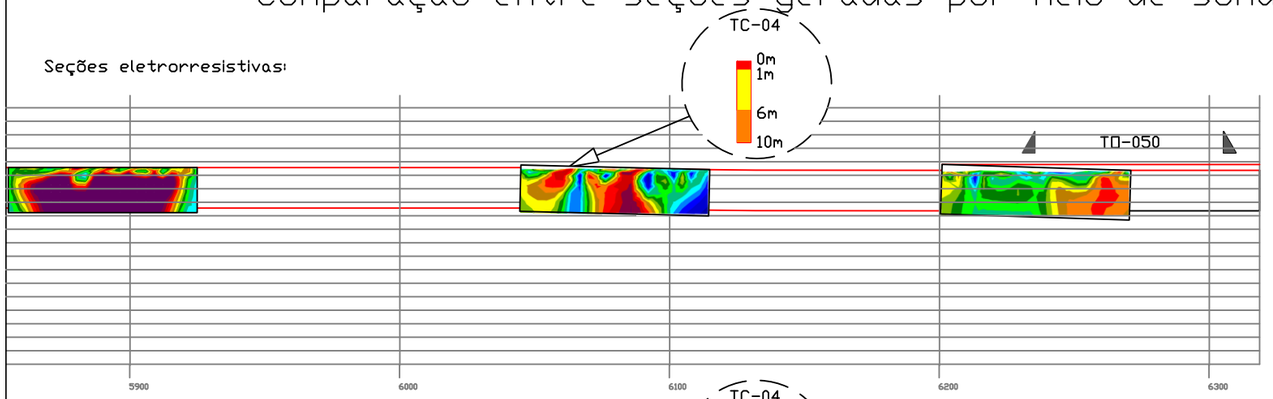
**Areia argilosa na classificação granulométrica



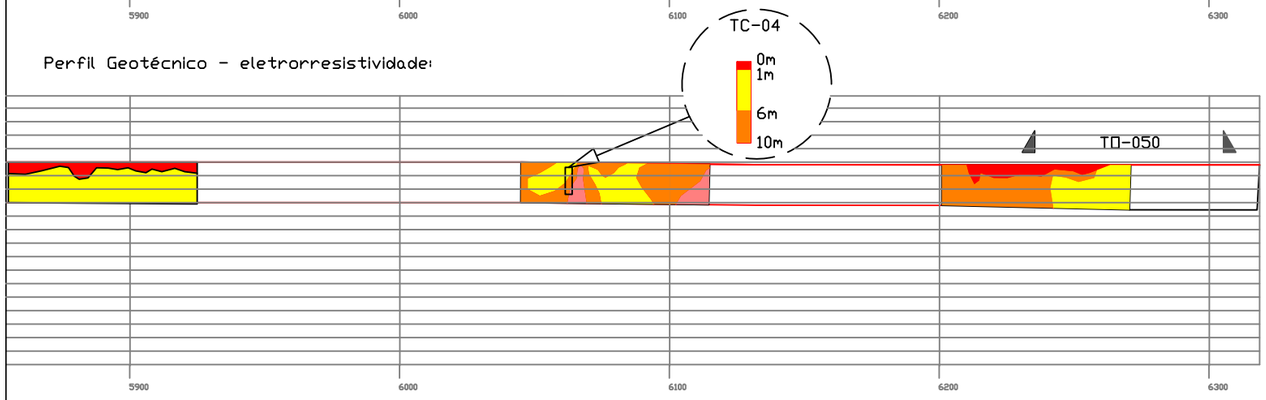
Figura C.7– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Central.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

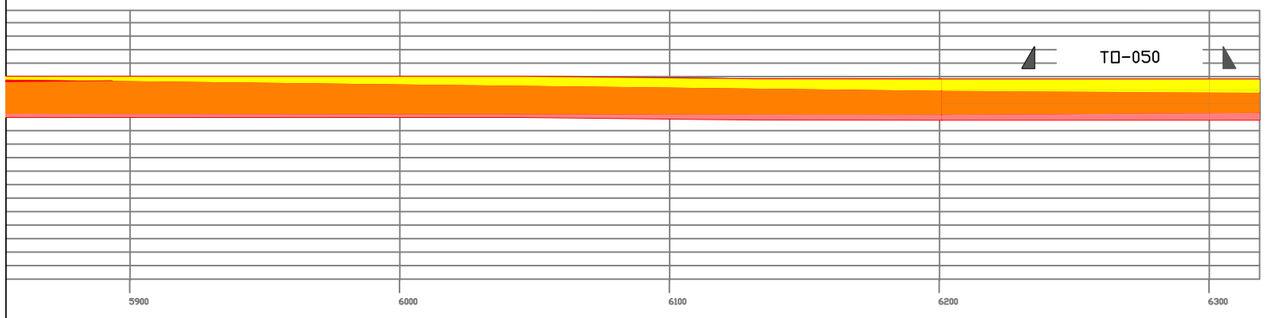
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

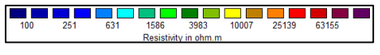


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

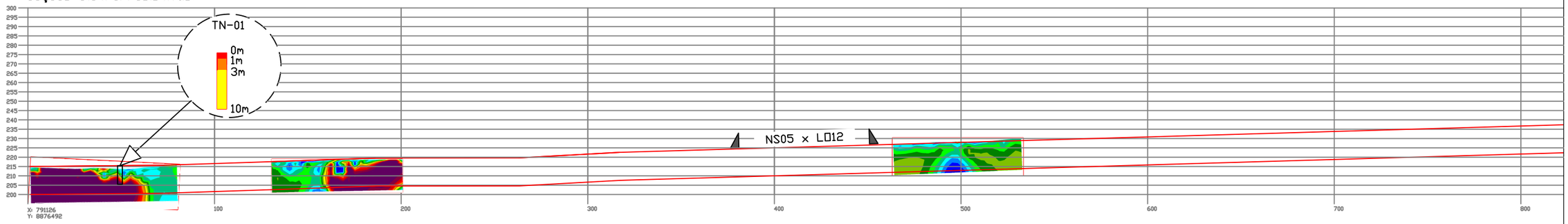
**Areia argilosa na classificação granulométrica



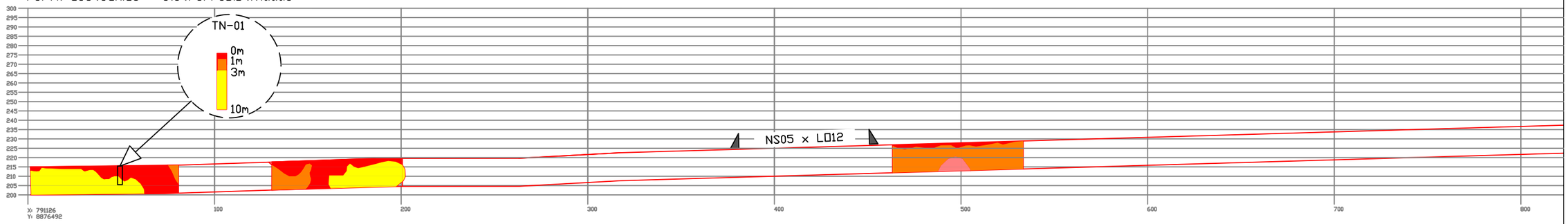
Figura C.8- Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Central.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

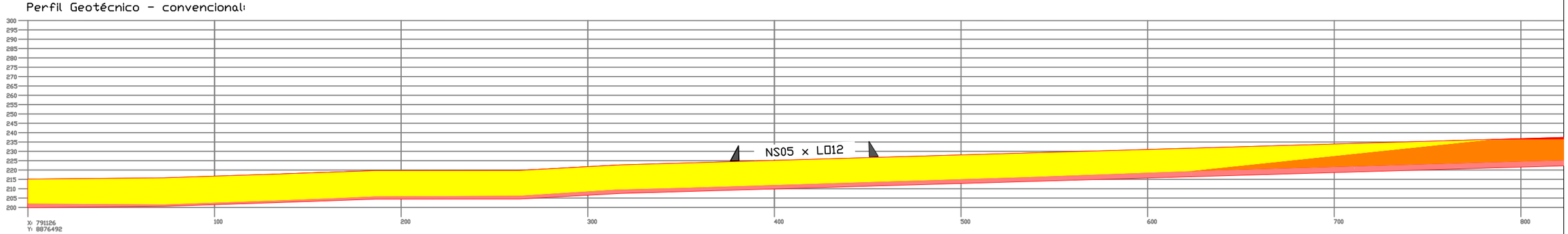
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

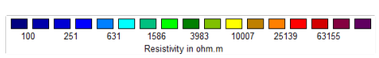


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

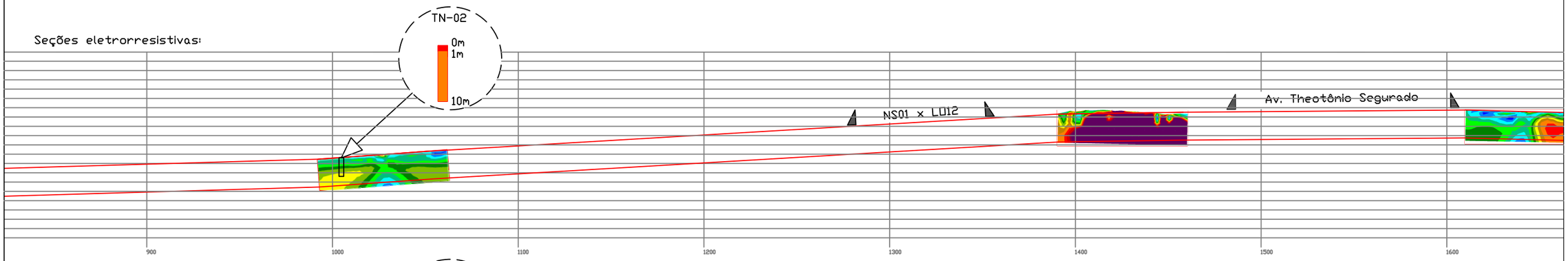
**Areia argilosa na classificação granulométrica



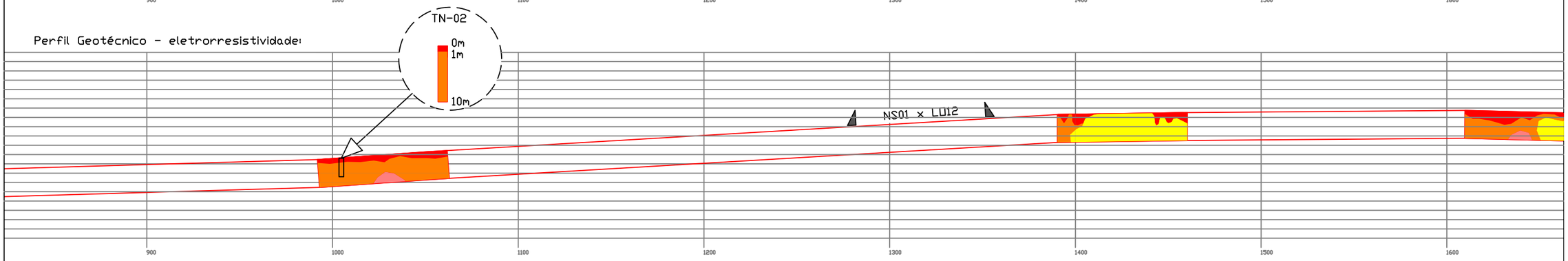
Figura C.9- Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Norte.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

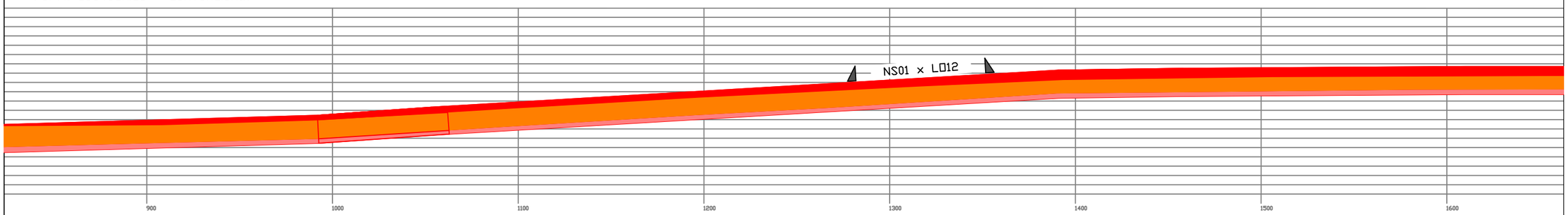
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

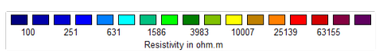


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

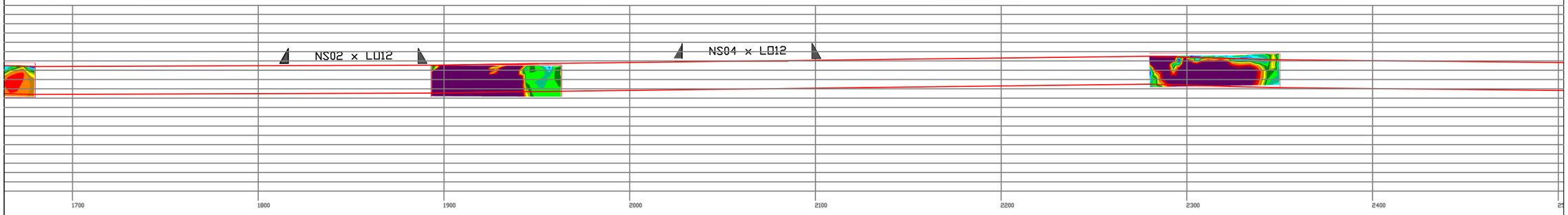
**Areia argilosa na classificação granulométrica



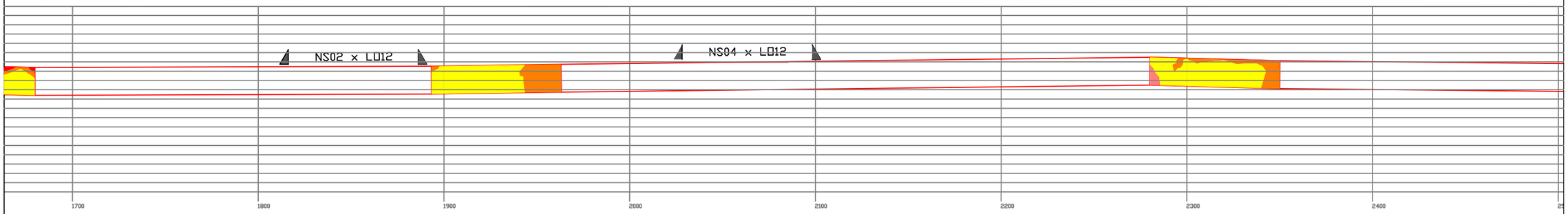
Figura C.10– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Norte.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

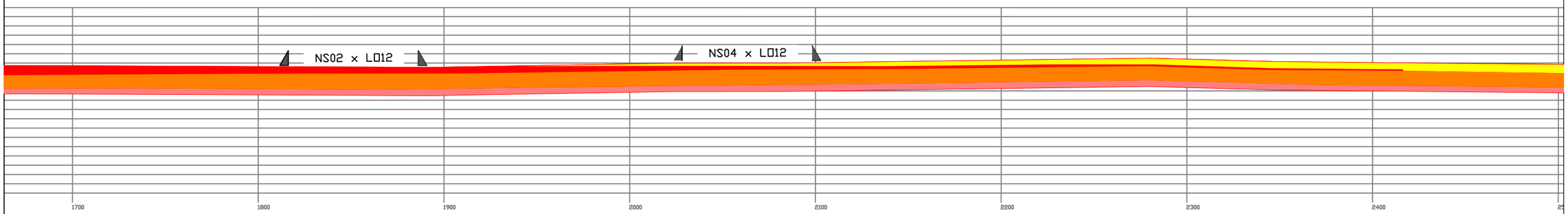
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

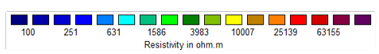


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

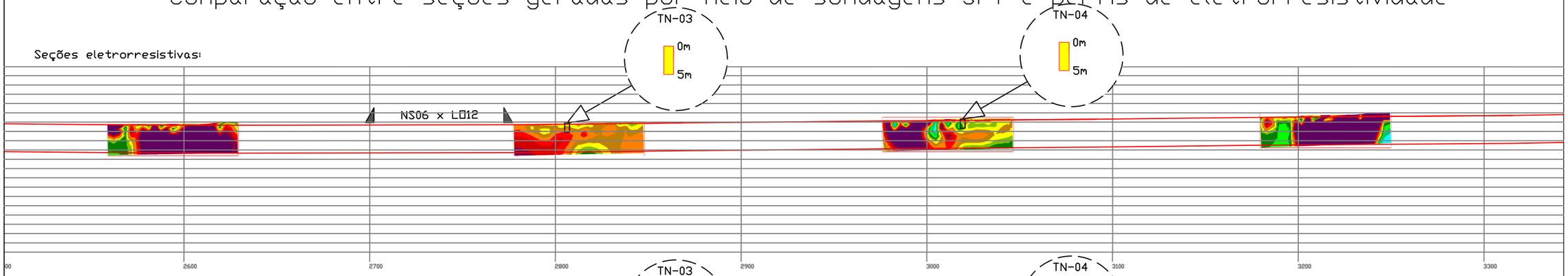
**Areia argilosa na classificação granulométrica



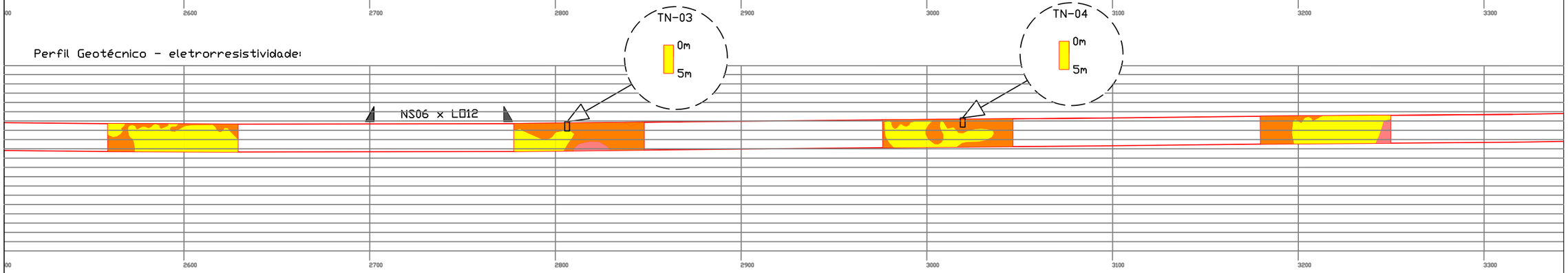
Figura C.11– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Norte.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

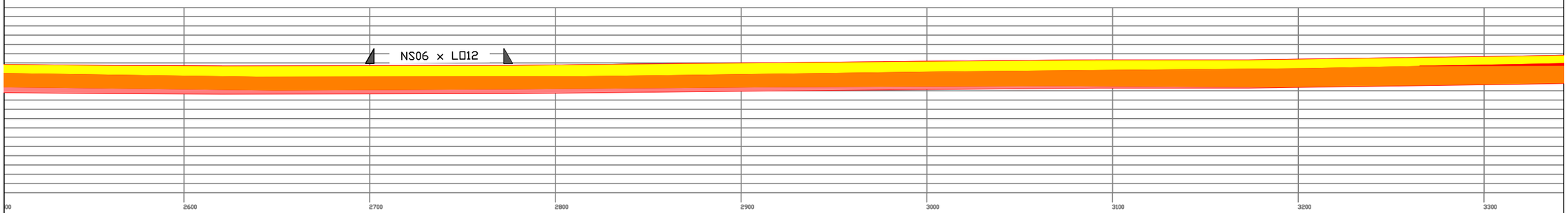
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

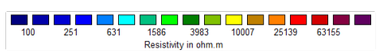


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

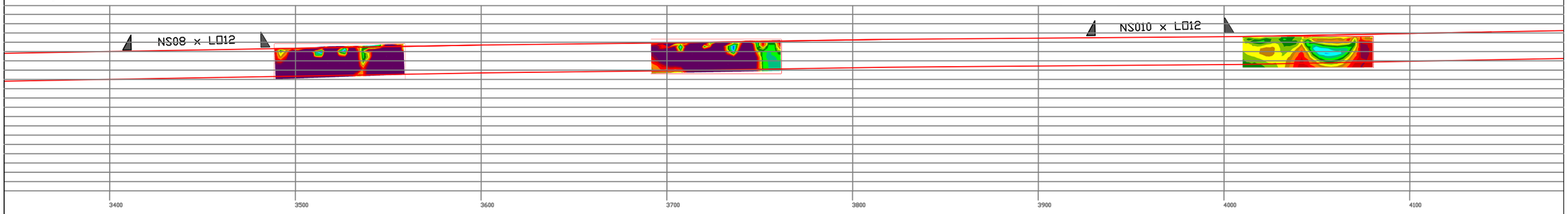
**Areia argilosa na classificação granulométrica



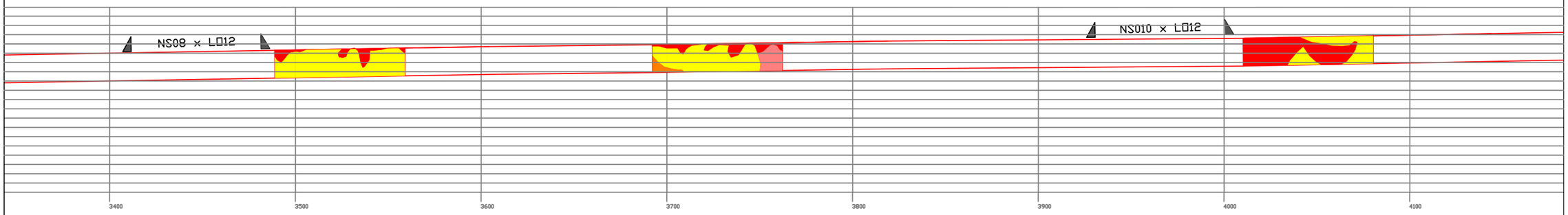
Figura C.12– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Norte.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

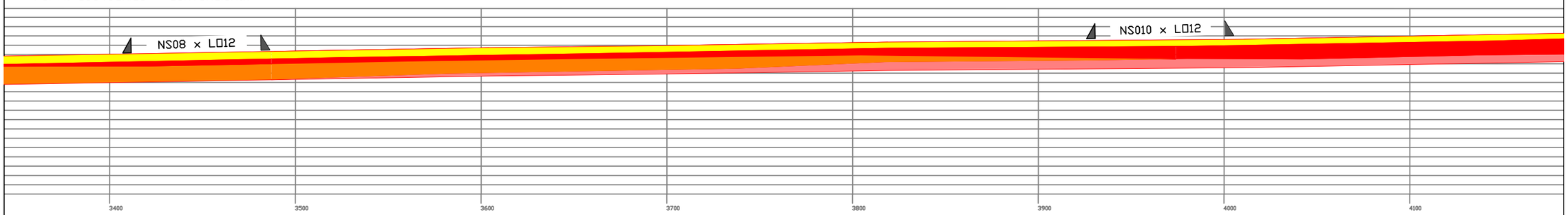
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

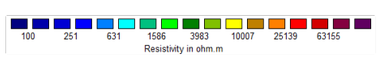


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

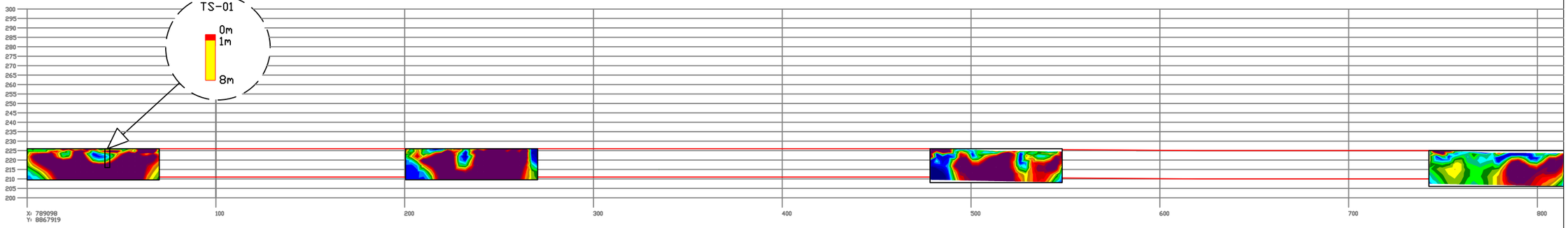
**Areia argilosa na classificação granulométrica



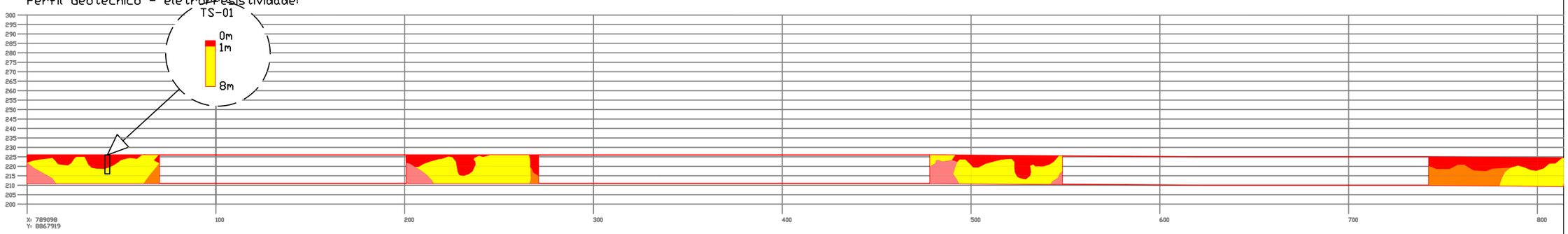
Figura C.13– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Norte.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

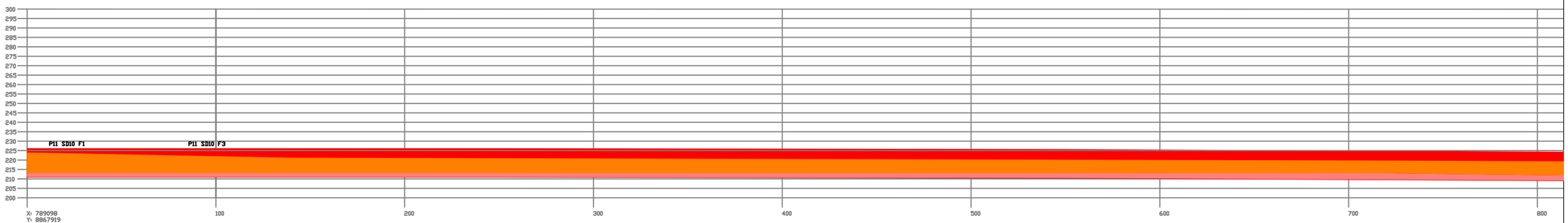
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

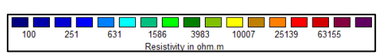


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

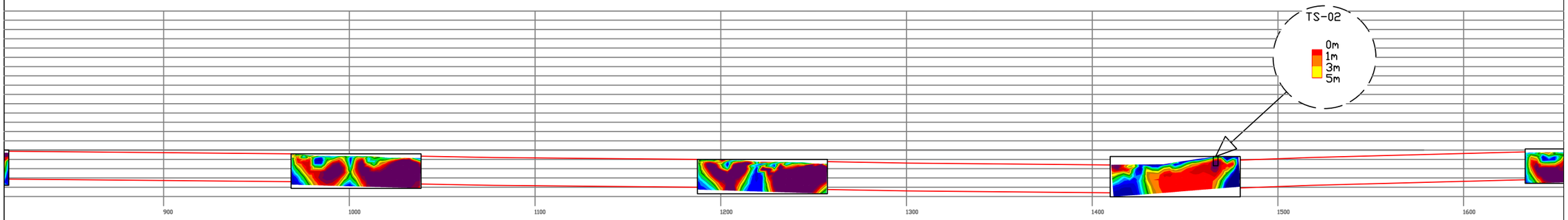
**Areia argilosa na classificação granulométrica



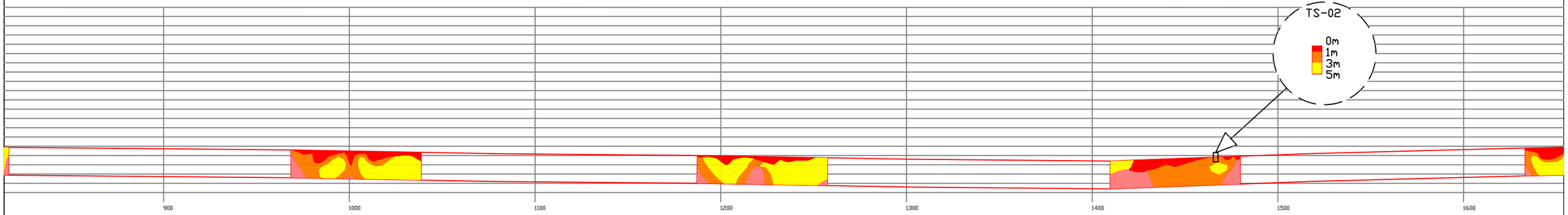
Figura C.14- Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Sul.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

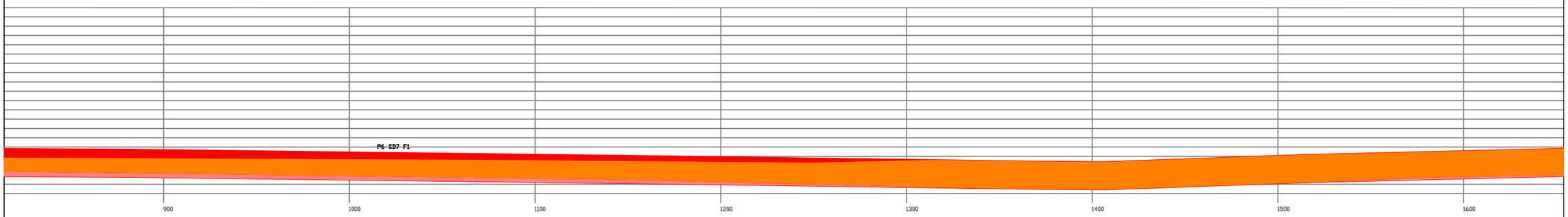
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

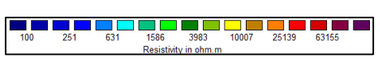


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

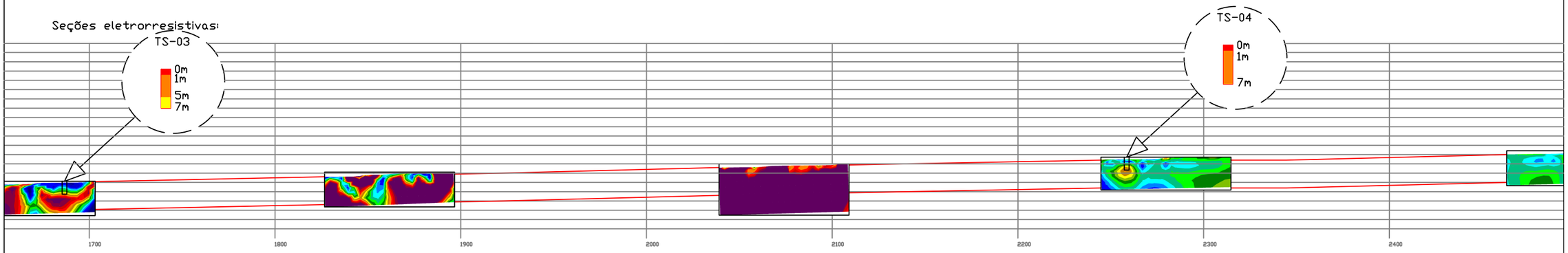
**Areia argilosa na classificação granulométrica



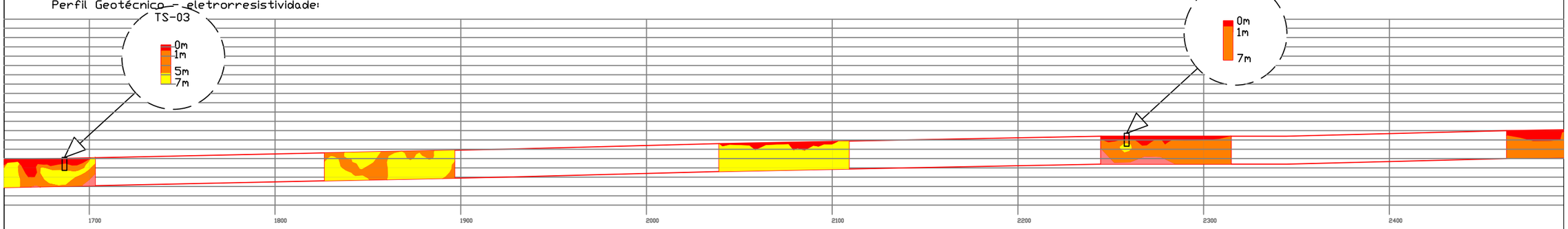
Figura C.15- Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Sul.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

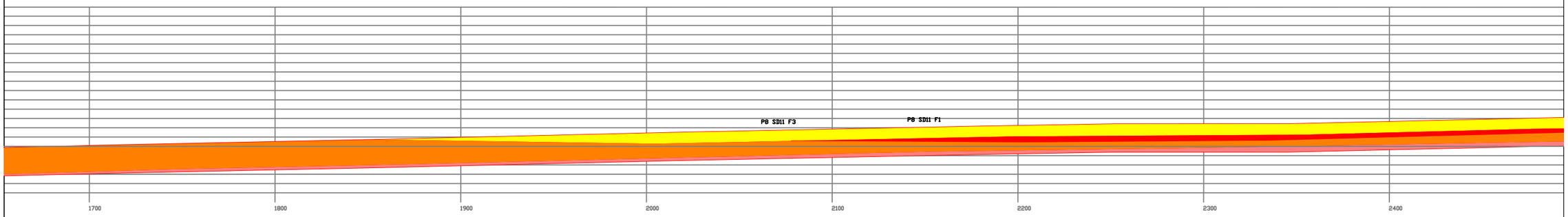
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico – eletrorresistividade:

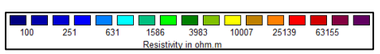


Perfil Geotécnico – convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

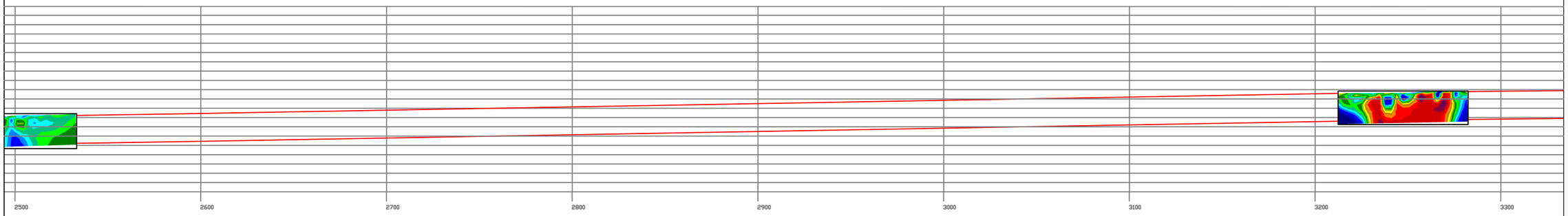
**Areia argilosa na classificação granulométrica



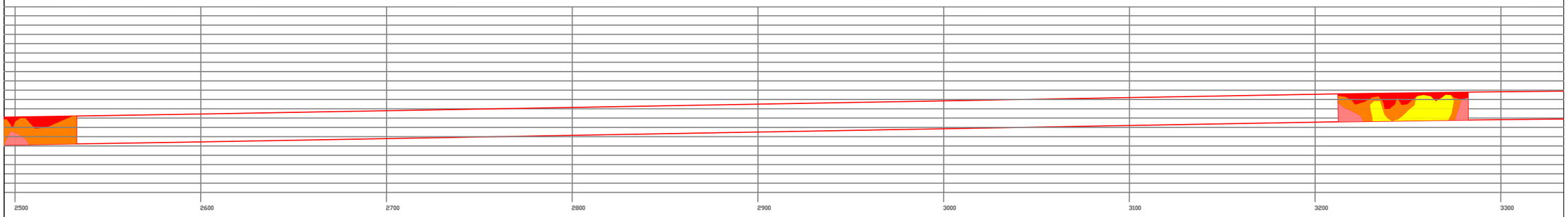
Figura C.16– Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Sul.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

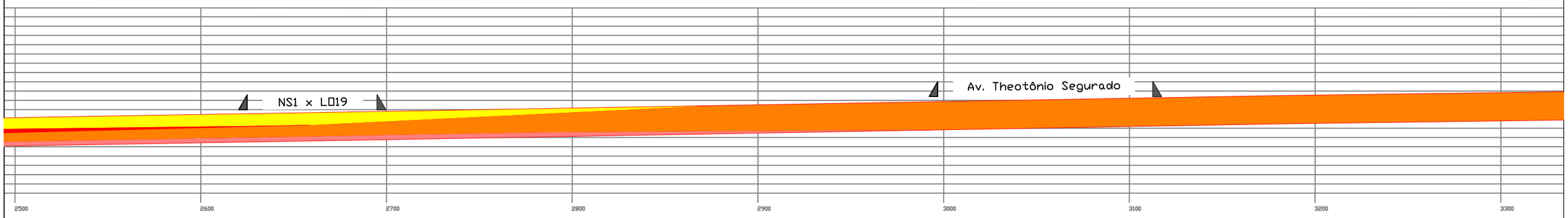
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

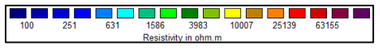


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

**Areia argilosa na classificação granulométrica

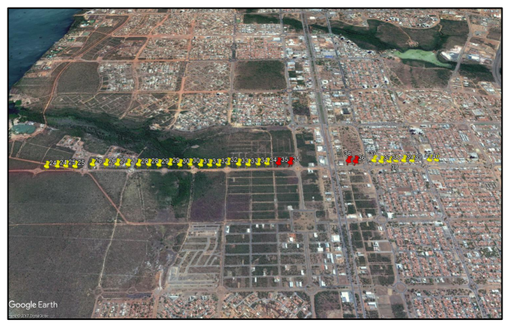
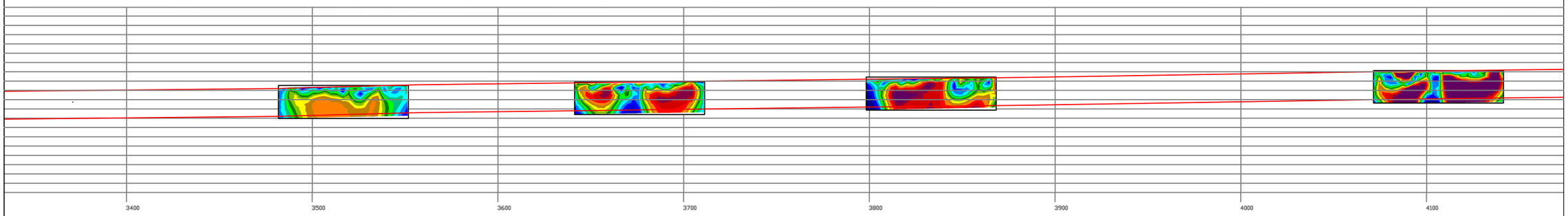


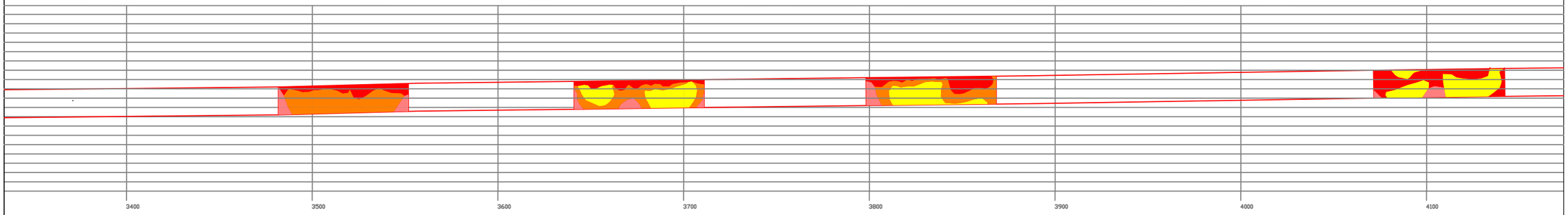
Figura C.17- Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Sul.

Comparação entre seções geradas por meio de sondagens SPT e perfis de eletrorresistividade

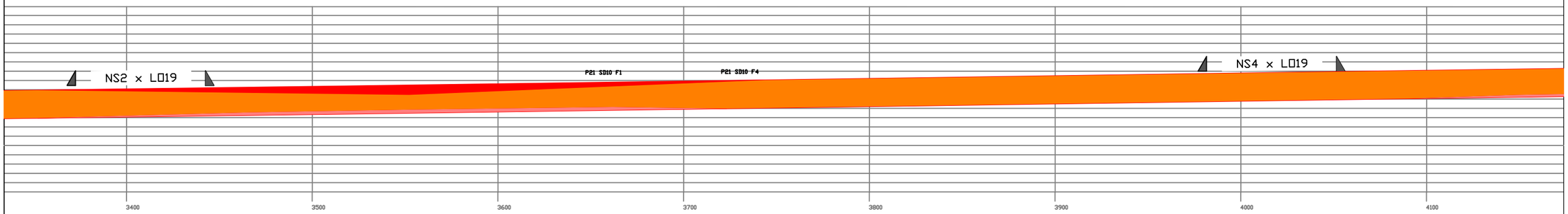
Seções eletrorresistivas:



Perfil Geotécnico - eletrorresistividade:

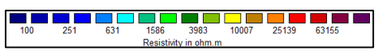


Perfil Geotécnico - convencional:



Legenda:

- Areia
- Argila
- Saprólito
- Silte



Relação entre solo e resistividade:

Areia*	> 40.000
Argila**	100 a 10.000
Saprólito	10 a 1.000
Silte	1000 a 50.000

* Areia quartzosa ou argila com concreções lateríticas com granulometria de tamanho areia

**Areia argilosa na classificação granulométrica



Figura C.18- Perfis Geotécnicos gerados a partir de seções eletrorresistivas para a linha Sul.