



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TRANSPORTES E
GESTÃO TERRITORIAL

Margott Felisbino

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO E CARTAS DE APTIDÃO PARA FUNDAÇÕES DO
MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ/SC**

Florianópolis

2021

Margott Felisbino

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO E CARTAS DE APTIDÃO PARA FUNDAÇÕES DO
MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ/SC**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial.
Orientador: Prof. Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Felisbino, Margott

Mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundações
do município de São José/SC / Margott Felisbino ;
orientador, Rafael Augusto dos Reis Higashi, 2021.
183 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia de Transportes e Gestão Territorial,
Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia de Transportes e Gestão Territorial. 2.
Mapeamento geotécnico. 3. Cartas de Aptidão para Fundação.
4. SIG. 5. Geoestatística. I. Higashi, Rafael Augusto dos
Reis. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes e Gestão
Territorial. III. Título.

Margott Felisbino

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO E CARTAS DE APTIDÃO PARA FUNDAÇÕES DO
MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ/SC**

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Everton da Silva, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Murilo da Silva Espíndola, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Orlando Martini de Oliveira, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Transportes e Gestão Territorial.

Profa. Ana Maria Benciveni Franzoni, Dra.

Coordenadora do Curso

Prof. Rafael Augusto dos Reis Higashi, Dr.

Orientador

Florianópolis, 2021.

Este trabalho é dedicado à minha mais que preciosa filha Olívia,
ao meu esposo e meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu Deus por ser a minha luz e a minha salvação, Àquele em que sempre pude confiar e que sempre cuidou de mim.

Ao meu orientador professor Dr. Rafael Augusto dos Reis Higashi pelo suporte, paciência, cobrança e todas as muitas mensagens respondidas com paciência, didática e rapidez.

Aos meus queridos pais Maria Isabel e Wilson. Vocês me deram TUDO e amo muito vocês. Mãe, muito obrigada por cuidar da minha joia mais preciosa para que eu pudesse me dedicar aos estudos.

Ao meu amado esposo Ismael Paulo, pelo carinho, cuidado e companheirismo. Por toda a ajuda, fosse aprendendo um comando novo no software, fosse cuidando da nossa amada filha ou simplesmente sendo meu ombro.

À minha querida Olívia, minha princesinha. Filha, muito obrigada por ser paciente com a mamãe.

Às minhas irmãs Shahla e Sarah, por todo o apoio e muitas risadas. À Sarinhah, por me ajudar tabelando um bom punhado de dados.

Ao professor Dr. Jorge Yamamoto, que dispôs do seu tempo para auxiliar no uso do Geovisual, tirando dúvidas em qualquer momento do dia, da forma mais compreensiva possível.

Às empresas de sondagem, pela sessão dos relatórios referentes ao município de São José, SC.

Por fim, agradeço a todos que de alguma maneira, mesmo que pequena, contribuíram para a conclusão deste trabalho.

Nada é suficientemente bom. Então vamos fazer o que é certo, dedicar o melhor de nossos esforços para atingir o inatingível, desenvolver ao máximo os dons que Deus nos concedeu, e nunca parar de aprender. (Ludwig van Beethoven)

RESUMO

Este trabalho resulta da aplicação do mapeamento geotécnico para geração de cartas de aptidão a determinados tipos de fundação frente às tensões admissíveis do solo. O estudo foi realizado para o município de São José/SC, com foco na zona de expansão urbana, onde ainda há considerável oferta de parcelas do solo disponível para construção e pouquíssimas informações a respeito da qualidade do solo para esse fim. Para a caracterização geotécnica foi utilizada a metodologia Davison Dias (1995). Dentre as informações geradas por meio dos recursos de geoprocessamento e como resultados parciais do estudo, foram elaborados o Modelo Digital do Terreno (MDT), mapas de hidrografia, declividade, geologia, litologia e pedologia. As informações do mapa geotécnico preliminar foram cruzadas com a base de dados SPT elaborada. Com essas informações foram avaliadas e corrigidas as inconsistências e gerado o mapa geotécnico do local. Os laudos de sondagem foram utilizados para, além da obtenção do mapeamento geotécnico em si, elaboração de cartas de aptidão para fundações, utilizando-se geoestatística, sendo geradas superfícies estimativas do lençol freático e do impenetrável à percussão, cartas de tensões admissíveis para fundações rasas, superfícies resistentes para fundações profundas e, ainda, cartas de isovalores. Os resultados mostraram-se válidos por possibilitar a aplicação prática de manipulação e modelagem da base de dados em ambiente SIG, mostrando zonas favoráveis à implementação de determinado tipo de fundação frente características gerais e por oportunizar resultados estratégicos para tomada de decisão no âmbito público, favorecendo políticas de uso e ocupação do solo, e privado, orientando e fornecendo informações em linguagem técnica para profissionais da área de fundações e geólogos.

Palavras-chave: Mapeamento Geotécnico. SIG. Geoestatística. Cartas de Aptidão para Fundação.

ABSTRACT

This work results from the application of the geotechnical mapping for the generation of letters of aptitude to certain types of foundations in front of the permissible stresses of the soil. The study was carried out for the municipality of São José / SC, focusing on the urban expansion zone, where there is still a considerable supply of land parcels available for construction and very little information on soil quality for this purpose. For the geotechnical characterization, Davison Dias (1995) methodology was used. Among the information generated through the geoprocessing resources and as partial results of the study, the Digital Terrain Model (MDT), hydrography, slope, geology, lithology and pedology maps were elaborated. The information from the preliminary geotechnical map was crossed with the elaborated SPT database. With this information it was possible to evaluate possible inconsistencies, to correct them and to generate the geotechnical map of the place. The drilling reports were used to, in addition to obtaining the geotechnical mapping itself, prepare maps of aptness for foundations, using geostatistics, generating surface estimates of the water table and impenetrable to percussion, allowable stress maps for shallow foundations, resistant surfaces for deep foundations and isovalue maps. The results proved to be valid because it allows the practical application of manipulation and modeling of the database in GIS environment, presenting zones favorable to the implantation of a certain type of foundation against general characteristics, and for providing strategic results for decision making in the public sphere, favoring land use and occupation policies, and private, guiding and providing information in technical language for professionals in foundations and geologists.

Keywords: Geotechnical Engineering Mapping. GIS. Foundation Suitability Maps.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Etapas de geoprocessamento para construção de um mapeamento geotécnico..... | 21 |
| Figura 2 - Resumo da metodologia Davison Dias (1987). | 27 |
| Figura 3 - Geologia e estudos relacionados. Fonte: Adaptado de Ángeles (2008). | 34 |
| Figura 4 - Exemplo de laudo de sondagem SPT. | 40 |
| Figura 5 - Classificação dos diferentes tipos de Fundação. Fonte: Baseado em da Silva (2003). | 42 |
| Figura 6 - Sistema sapata-solo e bulbo de tensões. | 44 |
| Figura 7 - Equilíbrio estático da fundação. Fonte: Aoki, Menegotto e Cintra (2002)..... | 45 |
| Figura 8 - Processo de desenvolvimento da krigagem ordinária. | 49 |
| Figura 9 - Procedimento esquemático para desenvolvimento da krigagem. Fonte: Yamamoto (2013). | 51 |
| Figura 10 - Localização do município de São José/SC. | 55 |
| Figura 11 - Hidrografia do município de São José. Fonte: SDS, 2010. | 56 |
| Figura 12 - Mapa cadastral do município de São José. Fonte: PMSJ, 2020. | 58 |
| Figura 13 - Modelo digital do terreno com sombreado de vale de São José. Fonte: Baseado em SDS, 2010. | 59 |
| Figura 14 - Mapa de declividade. Fonte: Baseado em SDS, 2010. | 61 |
| Figura 15 - Mapa litológico do município de São José. Fonte: Baseado em Ministério das Cidades, 2017. | 62 |
| Figura 16 - Mapa litológico simplificado do município de São José. Fonte: Baseado em Ministério das Cidades, 2017. | 67 |
| Figura 17 - Mapa pedológico do município de São José. Fonte: Adaptado de Epagri, 2007. . | 68 |
| Figura 18 - Fluxograma referente à metodologia utilizada. | 73 |
| Figura 19 - Fluxo de criação do MDT. | 75 |
| Figura 20 - Sequência de geração do MDT. | 76 |
| Figura 21 – Sequência de geração do mapa de declividades..... | 77 |
| Figura 22 - Exemplo de edição de feições..... | 79 |
| Figura 23 - Processo de construção do mapa Litológico..... | 80 |
| Figura 24 - Fluxo de criação do Mapa de projeção da mancha urbana. | 82 |
| Figura 25 - Processo básico para geração do mapa geotécnico preliminar. | 82 |
| Figura 26 - Criação do mapa geotécnico preliminar. | 83 |
| Figura 27 - Fluxo de criação da base de dados georreferenciada. | 87 |

| | |
|---|-----|
| Figura 28 - Captura de tela do ArcGIS para georreferenciamento da tabela de pontos SPT. ... | 88 |
| Figura 29 - Fluxo para correção das unidades geotécnicas potencialmente incoerentes..... | 89 |
| Figura 30 - Pontos SPT encontrados na unidade geotécnica preliminar. | 90 |
| Figura 31 - Segmento do laudo 2013-07-200-03..... | 91 |
| Figura 32 - Unidade geotécnica Gleissolo substrato sedimentos quaternários após edições. ... | 92 |
| Figura 33 - Unidade geotécnica preliminar Gleissolos substrato depósitos coluvionares. | 93 |
| Figura 34 - Unidade geotécnica Gleissolo substrato sedimentos quaternários após novas edições. | 93 |
| Figura 35 - Unidade geotécnica preliminar Gleissolo substrato granito. | 94 |
| Figura 36 - Laudo 2018-06-288-02. | 95 |
| Figura 37 - Laudo 2007-08-236-03. | 95 |
| Figura 38 - Unidade geotécnica preliminar Gleissolo substrato granodiorito..... | 96 |
| Figura 39 - Trecho do laudo 2015-12-185-01. | 97 |
| Figura 40 - Unidade geotécnica preliminar Gleissolo substrato gnaiss, migmatito. | 98 |
| Figura 41 - Unidade geotécnica preliminar Gleissolo substrato tonalito. | 98 |
| Figura 42 - Ocorrência da unidade geotécnica Argissolo vermelho-amarelo substrato depósito de encosta. | 99 |
| Figura 43 - Unidade geotécnica preliminar Neossolos quartzarênicos substrato granodiorito. | 100 |
| Figura 44 - Laudo 2010-03-060-12. | 101 |
| Figura 45 - Unidade geotécnica preliminar Neossolos quartzarênicos substrato sedimentos quaternários. | 102 |
| Figura 46 – Laudo 2016-11-172-06. | 103 |
| Figura 47 - Laudo 2015-09-180-04b. | 103 |
| Figura 48 - Laudo 2005-11-258-03. | 104 |
| Figura 49 - Laudo 2014-11-198-06. | 104 |
| Figura 50 - Laudo 2008-10-063-01. | 105 |
| Figura 51 - Laudo 2014-03-104-01. | 105 |
| Figura 52 - Laudo 2011-09-094-01. | 106 |
| Figura 53 - Laudo 2012-06-128-02. | 106 |
| Figura 54 - Laudo 2000-05-061-03. | 107 |
| Figura 55 - Laudo 2018-04-158-03. | 107 |
| Figura 56 - Laudo 2000-02-076-01. | 108 |
| Figura 57 - Laudo 2003-08-274-01. | 108 |

| | |
|---|-----|
| Figura 58 - Tela inicial do aplicativo Geovisual. | 113 |
| Figura 59 - Arquivo base para análise geoestatística dos dados..... | 114 |
| Figura 60 - Histograma de valores de NA obtidos pela ferramenta Geovisual..... | 114 |
| Figura 61 - Mapa do variograma experimental, indicando as direções de maior e menor continuidade. | 116 |
| Figura 62 - Variograma do NA com as direções de maior e menor continuidade. | 116 |
| Figura 63 - Semivariogramas ajustados..... | 117 |
| Figura 64 - Dados de saída da krigagem. | 118 |
| Figura 65 - Evolução da mancha urbana do município de São José. | 120 |
| Figura 66 - Mapa geotécnico preliminar do município de São José. | 121 |
| Figura 67 - Mapa geotécnico do município de São José. | 122 |
| Figura 68 - Unidades geotécnicas e suas respectivas áreas em km ² | 123 |
| Figura 69 - Base de dados de sondagens SPT georreferenciada. | 128 |
| Figura 70 - Superfície estimada do lençol freático do município de São José, considerando-se a profundidade..... | 131 |
| Figura 71 - Desvio padrão - Superfície estimada do lençol freático do município de São José, considerando-se a profundidade. | 132 |
| Figura 72 - Superfície estimada do lençol freático do município de São José, considerando-se a altitude. | 133 |
| Figura 73 - Desvio padrão - Superfície estimada do lençol freático do município de São José, considerando-se a altitude. | 134 |
| Figura 74 - Carta de profundidade de impenetrável do solo estimada de São José, considerando-se a profundidade..... | 136 |
| Figura 75 - Desvio padrão - Profundidade de impenetrável do solo estimada de São José, considerando-se a profundidade. | 137 |
| Figura 76 - Carta de profundidade de impenetrável do solo estimada de São José, considerando-se a cota de altitude..... | 138 |
| Figura 77 - Desvio padrão - Profundidade de impenetrável do solo estimada de São José, considerando-se a altitude. | 139 |
| Figura 78 - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 1m. | 142 |
| Figura 79 - Desvio padrão - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 1m. | 143 |
| Figura 80 - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 2m. | 144 |

| | |
|--|-----|
| Figura 81 - Desvio padrão - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 2m. | 145 |
| Figura 82 - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 3m. | 146 |
| Figura 83 - Desvio padrão - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 3m. | 147 |
| Figura 84 - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 4m. | 148 |
| Figura 85 - Desvio padrão - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 4m. | 149 |
| Figura 86 - Superfície resistente para estacas pré-moldadas com diâmetro menor que 30cm. | 152 |
| Figura 87 - Desvio padrão - Superfície resistente para estacas pré-moldadas com diâmetro menor que 30cm. | 153 |
| Figura 88 - Superfície resistente para estacas pré-moldadas com diâmetro maior ou igual que 30cm. | 154 |
| Figura 89 - Desvio padrão - Superfície resistente para estacas pré-moldadas com diâmetro maior ou igual que 30cm. | 155 |
| Figura 90 - Superfície resistente para estacas tipo hélice-contínua. | 156 |
| Figura 91 - Desvio padrão - Superfície resistente para estacas tipo hélice-contínua. | 157 |
| Figura 92 - Superfície resistente para estacas tipo raiz. | 158 |
| Figura 93 - Desvio padrão - Superfície resistente para estacas tipo raiz. | 159 |
| Figura 94 - Isovalores de N_{spt} a 1m de profundidade. | 161 |
| Figura 95 - Desvio padrão - Isovalores de N_{spt} a 1m de profundidade. | 162 |
| Figura 96 - Isovalores de N_{spt} a 4m de profundidade. | 163 |
| Figura 97 - Desvio padrão - Isovalores de N_{spt} a 4m de profundidade. | 164 |
| Figura 98 - Isovalores de N_{spt} a 7m de profundidade. | 165 |
| Figura 99 - Desvio padrão - Isovalores de N_{spt} a 7m de profundidade. | 166 |
| Figura 100 - Isovalores de N_{spt} a 10m de profundidade. | 167 |
| Figura 101 - Desvio padrão - Isovalores de N_{spt} a 10m de profundidade. | 168 |
| Figura 102 - Isovalores de N_{spt} a 13m de profundidade. | 169 |
| Figura 103 - Desvio padrão - Isovalores de N_{spt} a 13m de profundidade. | 170 |
| Figura 104 - Isovalores de N_{spt} a 16m de profundidade. | 171 |
| Figura 105 - Desvio padrão - Isovalores de N_{spt} a 16m de profundidade. | 172 |
| Figura 106 - Isovalores de N_{spt} a 18m de profundidade. | 173 |
| Figura 107 - Desvio padrão - Isovalores de N_{spt} a 18m de profundidade. | 174 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|-----|
| Quadro 1 - Sistema brasileiro de classificação dos solos (2018) e equivalência (1999)..... | 36 |
| Quadro 2 - Profundidade do bulbo de tensões conforme tipo de sapata. Fonte: Baseado em Cintra <i>et al.</i> (2011). | 43 |
| Quadro 3 - Limites de N_{spt} para execução de estacas considerando a utilização de equipamentos convencionais sem adoção de recursos especiais. Fonte: Baseado em Cintra et al (2011). | 45 |
| Quadro 4 - Classificação geológica, litologia e características básicas. Fonte: Baseado em Sbroglia e Sanchez, 2017..... | 65 |
| Quadro 5 - Dados adquiridos e suas respectivas configurações..... | 74 |
| Quadro 6 - Classificação quanto à declividade. Fonte: Adaptado de Embrapa, 1999. | 78 |
| Quadro 7 - Classificação geotécnica preliminar..... | 83 |
| Quadro 8 - Sistema de padronização de identificação do ponto na base de dados..... | 85 |
| Quadro 9 - Unidades geotécnicas finais. | 109 |
| Quadro 10 - Percentual de pontos que possuem valor de N_{spt} por profundidade..... | 112 |
| Quadro 11 - Parâmetros da modelagem dos semivariogramas..... | 117 |
| Quadro 12 - Resumo das unidades geotécnicas..... | 123 |
| Quadro 13 - Área por tensão admissível para fundações superficiais. | 141 |
| Quadro 14 - Área por profundidade da superfície resistente para fundações profundas..... | 151 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------------|--|
| ABNT | Associação Brasileira de Normas Técnicas |
| ASTM | <i>American Society for Testing and Materials</i> |
| Embrapa | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| Epagri | Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina |
| IBGE | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística |
| INPE | Instituto nacional de pesquisas espaciais |
| IPT | Instituto de pesquisas tecnológicas |
| isoSPT | Curvas que representam regiões de mesmo valor de N_{spt} , isovalores de N_{spt} |
| MDT | Modelo Digital do Terreno |
| NBR | Norma Brasileira |
| NA | Nível d'água |
| SHP | <i>Shapefile</i> , extensão utilizada pelo <i>ArcGIS®</i> |
| SIG | Sistema de Informação Geográfica (<i>Geographic Information System – GIS</i>) |
| SiBCS | Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos |
| SIRGAS2000 | Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas |
| SPT | Sondagem a percussão (acrônimo de <i>Standard Penetration Test</i>) |
| TIN | Rede Triangular Irregular (acrônimo de <i>Triangulated Irregular Network</i>) |
| UFSC | Universidade Federal de Santa Catarina |
| UTM | Universal Transversa de Mercator |
| WGS-84 | <i>World Geodetic System</i> |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|------------|--|
| A_p | Área de ponta da estaca |
| C | Coefficiente característico do solo |
| ca | Depósito de encosta |
| CX | Cambissolo háplico |
| de | Depósito de encosta |
| g1 | Granito |
| g2 | Granodiorito |
| gn, m | Gnaisse, migmatito |
| GX | Gleissolo háplico |
| L | Comprimento da estaca |
| NA | Nível do lençol freático |
| N_l | Média dos N_{spt} ao longo do fuste |
| N_p | Média dos N_{spt} na camada de ponta, imediatamente acima e imediatamente abaixo |
| N_{spt} | Índice de resistência à penetração do ensaio SPT. Número de golpes correspondente à cravação de 30 cm do amostrador-padrão, após a cravação inicial de 15 cm |
| PVA | Argissolo vermelho-amarelo |
| R | Capacidade de carga |
| sq | Sedimentos quaternários |
| U | Perímetro da estaca |
| α | Coefficientes relacionados ao tipo de fundação |
| β | Coefficientes relacionados ao tipo de fundação |
| σ_a | Tensão admissível |
| σ_r | Tensão resistente |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1 | OBJETIVOS..... | 16 |
| 1.1.1 | Objetivo geral | 16 |
| 1.1.2 | Objetivos específicos..... | 16 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 17 |
| 2.1 | SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS..... | 17 |
| 2.1.1 | Estrutura de dados de um SIG..... | 18 |
| 2.1.1.1 | Dados tipo vetor | 19 |
| 2.1.1.2 | Dados tipo matricial | 20 |
| 2.1.2 | Etapas de um SIG..... | 21 |
| 2.2 | MAPEAMENTO GEOTÉCNICO | 22 |
| 2.2.1 | Metodologias de mapeamento geotécnico | 23 |
| 2.2.1.1 | Metodologia da <i>International Association of Engineering Geology</i> – IAEG (1976) | 24 |
| 2.2.1.2 | Metodologia francesa | 24 |
| 2.2.1.3 | Metodologia Zuquette | 25 |
| 2.2.1.4 | Metodologia Davison Dias | 25 |
| 2.2.2 | Aplicações do mapeamento geotécnico..... | 27 |
| 2.2.2.1 | Planejamento urbano | 27 |
| 2.2.2.2 | Estudos de erodibilidade | 28 |
| 2.2.2.3 | Estudos de estabilidade de encostas | 28 |
| 2.2.2.4 | Estudos de compressibilidade dos solos..... | 29 |
| 2.2.2.5 | Estudos de pavimentações..... | 29 |
| 2.2.2.6 | Estudos de fundações | 30 |
| 2.3 | CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA, PEDOLÓGICA E GEOTÉCNICA..... | 33 |
| 2.3.1 | Geologia e litologia | 33 |
| 2.3.2 | Pedologia | 34 |

| | | |
|--------------|--|-----------|
| 2.3.3 | Banco de dados de sondagens SPT | 39 |
| 2.3.3.1 | O ensaio SPT | 39 |
| 2.3.3.2 | Banco de dados de sondagens SPT | 40 |
| 2.3.4 | Elementos de fundação | 42 |
| 2.3.4.1 | Fundações superficiais | 42 |
| 2.3.4.2 | Fundações profundas | 44 |
| 2.4 | GEOESTATÍSTICA | 46 |
| 2.4.1 | Krigagem não linear | 49 |
| 2.5 | INSERÇÃO DA PESQUISA NO CENÁRIO ACADÊMICO | 52 |
| 3 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 54 |
| 3.1 | LOCALIZAÇÃO..... | 54 |
| 3.2 | HIDROGRAFIA | 56 |
| 3.3 | DIVISÃO POLÍTICA E DEMOGRAFIA | 57 |
| 3.4 | RELEVO E DECLIVIDADE..... | 59 |
| 3.5 | GEOLOGIA E LITOLOGIA | 61 |
| 3.5.1 | Sedimentos Cenozoicos Inconsolidados ou Pouco Consolidados Depositados em Meio Aquoso | 63 |
| 3.5.2 | Sedimentos Cenozoicos Inconsolidados do tipo Coluvião | 64 |
| 3.5.3 | Séries Graníticas Subalcalinas | 64 |
| 3.5.4 | Granitoides Intensamente Deformados: Ortognaisses | 64 |
| 3.5.5 | Litologia | 65 |
| 3.6 | PEDOLOGIA | 68 |
| 3.6.1 | Neossolos Quartzarênicos | 69 |
| 3.6.2 | Gleissolos Hápicos | 69 |
| 3.6.3 | Cambissolos Hápicos | 70 |
| 3.6.4 | Argissolos Vermelho-Amarelos | 71 |
| 4 | MATERIAIS E MÉTODO | 72 |
| 4.1 | LEVANTAMENTO DE DADOS PREEXISTENTES..... | 74 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 4.2 | DADOS GRÁFICOS – EDIÇÃO E PROCESSAMENTO | 74 |
| 4.2.1 | Mapa cadastral | 75 |
| 4.2.2 | Modelo digital do terreno | 75 |
| 4.2.3 | Mapa de declividades | 77 |
| 4.2.4 | Litologia..... | 78 |
| 4.2.5 | Pedologia | 80 |
| 4.2.6 | Análise temporal de evolução da mancha urbana..... | 81 |
| 4.2.7 | Geotécnico preliminar..... | 82 |
| 4.3 | LAUDOS DE SONDAGEM SPT..... | 85 |
| 4.3.1 | Composição da base de dados | 85 |
| 4.3.2 | Georreferenciamento da base de dados..... | 86 |
| 4.4 | CONSOLIDAÇÃO DO MAPA GEOTÉCNICO..... | 88 |
| 4.4.1 | Cambissolos de substrato sedimentos quaternários..... | 89 |
| 4.4.2 | Gleissolos de substrato depósitos coluvionares..... | 92 |
| 4.4.3 | Gleissolos substrato granito, granodiorito, gnaiss, migmatito e tonalito | 94 |
| 4.4.4 | Argissolos vermelho-amarelos substrato sedimentos quaternários..... | 99 |
| 4.4.5 | Neossolos quartzarênicos substrato granodiorito | 99 |
| 4.4.6 | Neossolos quartzarênicos substrato sedimentos quaternários | 101 |
| 4.4.7 | Avaliação das unidades com urbanização encontradas..... | 102 |
| 4.5 | SUPERFÍCIES ESTIMADAS E CARTAS DE APTIDÃO | 109 |
| 4.5.1 | Análise preliminar dos dados | 112 |
| 4.5.2 | Tratamento dos dados..... | 113 |
| 4.5.3 | Teste de hipótese e transformação gaussiana | 114 |
| 4.5.4 | Semivariograma experimental e modelagem do semivariograma..... | 115 |
| 4.5.5 | Krigagem ordinária dos valores gaussianos e transformada reversa | 118 |
| 5 | RESULTADOS..... | 119 |
| 5.1 | EVOLUÇÃO DA MANCHA URBANA..... | 120 |

| | | |
|--------------|---|------------|
| 5.2 | GEOTÉCNICO | 121 |
| 5.2.1 | Solos de origem sedimentar | 124 |
| 5.2.2 | Solos de origem residual | 125 |
| 5.3 | MAPA DE LOCAÇÃO DOS PONTOS | 128 |
| 5.4 | SUPERFÍCIE ESTIMADA DO LENÇOL FREÁTICO..... | 129 |
| 5.5 | CARTAS DE APTIDÃO PARA FUNDAÇÕES..... | 135 |
| 5.5.1 | Profundidade impenetrável do solo estimada..... | 135 |
| 5.5.2 | Tensões admissíveis | 140 |
| 5.5.3 | Superfície resistente | 149 |
| 5.5.4 | Cartas de isovalores de N_{spt}..... | 160 |
| 6 | CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 175 |
| 6.1 | CONCLUSÕES..... | 175 |
| 6.2 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 177 |
| | REFERÊNCIAS | 178 |

1 INTRODUÇÃO

O município de São José está localizado na porção litorânea do estado de Santa Catarina, faz parte da região metropolitana de Florianópolis e vem sofrendo forte expansão urbana nos últimos anos.

Rogério (2009) afirma que devido à construção da BR 101, no início dos anos 70, integrando o litoral do Estado de norte a sul com os Estados do Paraná e Rio Grande do Sul, o município de São José dinamizou seu contexto econômico com o recém-criado Distrito Industrial. O município vem sofrendo várias modificações, influenciadas também pelo desenvolvimento da cidade de Florianópolis. Surgindo uma tendência de ocupação humana, sendo um ponto de ligação entre Florianópolis, Palhoça, Biguaçu. Com essa expansão urbana surgem novos problemas que influenciam na condição da qualidade de vida da população, mas por outro lado, surge um mercado comerciário atacadista e varejista, novos loteamentos, resultando num intenso crescimento.

Naturalmente, obras de maior porte vêm sendo realizadas cotidianamente, incluindo loteamentos de ocupação industrial, loteamentos residenciais em áreas de expansão urbana, variados tipos de infraestrutura urbana como traçado de novas vias e até mesmo, projetos de geração de energia eólica de menor escala. Ainda, pode-se citar este Município como nono no ranking em edificações mais verticalizadas do país.

Neste contexto é que se enquadra o desenvolvimento de um mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundações do Município, em ambiente moderno e de fácil atualização, como um SIG – Sistema de Informações Geográficas.

Através da cartografia geotécnica e um SIG é possível cruzar informações de laudos de sondagem SPT. A união do estudo do relevo, com origem e formação dos solos, associada a informações da subsuperfície permite a estimativa do comportamento geomecânico do local, dada uma determinada hipótese.

A cartografia geotécnica, associada a cartas de tensões admissíveis ou estimativas de comprimento de estacas pode auxiliar em diferentes estudos para escolha de fundações, trazendo soluções mais econômicas e mais seguras. O Plano Diretor do Município pode direcionar a localização de empreendimentos de grande porte, obras públicas ou de impacto social como construções de parques e conjuntos habitacionais, sendo norteado por uma base de dados capaz de estimar o comportamento dos solos, otimizando-se consideravelmente custos e evitando-se potenciais problemas técnicos e de execução.

A própria origem de uma das metodologias de mapeamento geotécnico mais utilizadas no Sul do país é o estudo de fundações. Davison Dias (1987) utilizou-se do mapeamento geotécnico para o estudo de fundações de torres de linhas de transmissão em sua tese de doutorado.

Cabe ressaltar que o objetivo de um mapeamento geotécnico é estimar o comportamento das unidades geotécnicas encontradas, não servindo de parâmetro para o desenvolvimento de qualquer projeto estrutural de fundação, mas sim como fundamental ferramenta de auxílio técnico.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver cartas geotécnicas de aptidão para fundações para a zona de expansão urbana e vazios urbanos do município de São José/SC, tendo como base o mapeamento geotécnico em um SIG associado a uma base de dados de sondagens SPT.

1.1.2 Objetivos específicos

São os objetivos específicos pretendidos:

- Desenvolver o mapeamento geotécnico de São José, a partir da pedologia e geologia local;
- Compreender e caracterizar a geotecnia do Município, tendo como referência a base de dados produzida;
- Elaborar cartas de aptidão para fundações, que auxiliem em estudos futuros para desenvolvimento de diretrizes de crescimento e reordenamento urbano;
- Validar os dados obtidos, com base na compatibilização das análises qualitativa e quantitativa.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Faz-se nesta seção, uma abordagem sobre conceitos utilizados para o desenvolvimento dessa dissertação, com ênfase em sistemas de informações georreferenciadas, mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundações, apresentando-se questões teóricas atuais consideradas relevantes para o estudo.

2.1 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Os Sistemas de Informações Georreferenciadas ou Sistemas de Informações Geográficas (SIGs) são usualmente aceitos como sendo uma tecnologia que possui o ferramental necessário para realizar análises com dados espaciais e, portanto, oferece, ao ser implementada, alternativas para o entendimento da Geotecnologia, ao lado do Processamento Digital de Imagens (PDI) e da Geoestatística (SILVA, 2003).

Segundo Eastman (1998) *apud* Bortoluzzi (2004) um Sistema de Informações Geográficas abrange um conjunto de elementos gráficos (espaciais), e de atributos (alfanuméricos), os quais formam o centro do sistema. Esses elementos são trabalhados por sistemas computacionais (softwares e hardwares) que permitem as operações de geoprocessamento onde se pode ao longo do processo, chegar aos resultados desejados.

Para Higashi (2006), uma das características básicas do SIG é tratar relações espaciais entre objetos geográficos, como quando se pretende cruzar mapas ou informações espaciais. Para o procedimento dessa prática é necessário que, no processo de integração, sejam consideradas as relações entre as classes de cada tema, as quais se denominam relações topológicas. Os mapas correspondem às informações espaciais georreferenciadas, planos de informações, temas ou *layers*. As classes correspondem a objetos geográficos como pontos, linhas ou polígonos.

Sistemas de Informações Geográficas trabalham, portanto, com diversos tipos de dados georreferenciados, podendo superpor mapas, imagens de satélites e obtendo assim, a possibilidade de interpretação do objeto em estudo.

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) contém funções para análise geográfica. Adicionalmente à criação de bandas (buffers) definidas pelo usuário ou regularmente espaçadas, cria-se banda que cerca um certo valor, tal como bandas que cercam 1.000 e 2.000 pessoas em torno de uma central de bombeiros, em estudo. Pode-se, também, computar o cruzamento de dados (ou overlay) quando se criam bandas. Outra nova ferramenta permite criar áreas de influência, entidades de um mapa que cercam a área mais próxima a cada ponto num

layer ou conjunto selecionado. Esta é uma maneira rápida de estimar-se a área de atuação para lojas de varejo, delegacias de polícia, postos de saúde, escolas ou restaurantes (MAY, 2008).

O objetivo geral de um Sistema de Informações Geográficas é, portanto, servir de instrumento eficiente para todas as áreas do conhecimento que fazem uso de mapas, possibilitando integrar em uma única base de dados informações representando vários aspectos do estudo de uma região; permitir a entrada de dados de diversas formas; combinar dados de diferentes fontes, gerando novos tipos de informações; gerar relatórios e documentos gráficos de diversos tipos entre outros (ROSA e BRITO, 1996 *apud* SANTO, 2004).

Longley *et al.* (2013) apresenta inúmeras vantagens em se utilizar de banco de dados para armazenar informações geográficas em relação aos conjuntos de dados tradicionais, baseados em arquivos, tais como:

- A reunião de todos os dados em um único local reduz a redundância;
- Os custos de manutenção diminuem por causa da melhor organização e da duplicação reduzida de dados;
- As aplicações tornam-se independentes dos dados, de forma que múltiplas aplicações podem utilizar os mesmos dados e podem evoluir separadamente ao longo do tempo;
- O conhecimento do usuário pode ser transferido entre aplicações mais facilmente porque o banco de dados permanece constante;
- O compartilhamento de dados é facilitado, e uma visão corporativa de dados pode ser fornecida a todos os gestores e usuários;
- A segurança e os padrões para dados e para acesso aos dados podem ser estabelecidos e aplicados;
- Os SGBDs são mais adequados para gerenciar um grande número de usuários simultâneos trabalhando com grandes quantidades de dados.

2.1.1 Estrutura de dados de um SIG

É importante que um sistema de informações georreferenciadas seja o mais eficiente possível. Para a correta análise dos dados é necessário que eles sejam também inseridos de forma adequada.

Para Eastman (1998) *apud* Bortoluzzi (2004), as formas *raster* e vetor são as duas formas básicas de representação gráfica em meio computacional, havendo muitos softwares que

trabalham especificamente com uma das formas, enquanto outros permitem a combinação das duas.

Enquanto objetos discretos são facilmente descritos através de pontos, linhas ou polígonos, para a representação de campos contínuos são necessárias alternativas de implementação. Longley *et al.* (2013) mostra seis alternativas:

- Capturar o valor variável em cada ponto amostral de uma grade regular, como, por exemplo, altitudes espaçadas em 30 metros em um modelo digital de altitude (*Digital Elevation Model – DEM*);
- Capturar o valor da variável de campo em cada ponto amostral de um conjunto irregularmente distribuído de pontos (por exemplo, variação da temperatura de superfície obtida em estações meteorológicas);
- Capturar um único valor da variável para uma célula regular (por exemplo, valores de radiação refletida em uma cena de sensoriamento remoto);
- Capturar um único valor da variável sobre uma área de formato irregular (por exemplo, uma classe de cobertura vegetal ou o nome do proprietário de um lote);
- Capturar a variação linear da variável de campo sobre um triângulo irregular (por exemplo, a altitude capturada em uma rede triangular irregular ou TIN);
- Capturar as isolinhas de uma superfície, como linhas digitalizadas (por exemplo, curvas de nível digitalizadas representando altitude).

Destes modelos de representação, o primeiro e o terceiro referem-se a dados matriciais e os demais a dados vetoriais.

2.1.1.1 Dados tipo vetor

Dados do tipo vetorial são aqueles em que seus limites constituintes são formados por pontos. Os pontos, com coordenadas x e y ligadas a um plano cartesiano, como coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*).

Em uma representação vetorial, todas as linhas são capturadas como pontos ligados por linhas perfeitamente retas (LONGLEY *et al.*, 2013).

Esses dados são dispostos em conjunto de maneira gradativa, tal que, segundo Bortoluzzi (2004), os pontos, são os elementos fundamentais, os arcos são as linhas que ligam os pontos e os polígonos são áreas formadas por conjunto de arcos. Os nós correspondem a pontos que ligam arcos, ou pontos finais dos arcos.

Segundo Silva (1999) são várias as formas como os dados vetoriais podem ser estruturados e classificados, de acordo com a sua natureza. Assim tem-se as entidades pontuais, lineares e poligonais. As entidades pontuais podem ser representadas por um único par de coordenadas. As entidades lineares podem ser representadas por dois ou mais pares de coordenadas. As entidades poligonais correspondem a um conjunto de entidades lineares, cujos pares de coordenadas inicial e final são os mesmos. As entidades poligonais podem ser estruturadas em diferentes formatos, os mais comuns são: modelo total, modelo topológico, modelo espaguete, *Dual Independent Map Encoding* (DIME), modelo relacional e *Digital Line Graphs* (DLG).

2.1.1.2 Dados tipo matricial

As estruturas matriciais (*raster*) usam uma grade regular sobre a qual é inserido o elemento que está sendo representado. A cada célula atribui-se um código referente ao atributo estudado, de tal forma que o computador saiba a que elemento ou objeto pertence determinada célula.

Os dados utilizados em um SIG podem ser originários de diversas fontes, genericamente classificadas em primárias (que incluem levantamentos topográficos convencionais, levantamentos aerofotogramétricos e produtos do sensoriamento remoto) e em secundárias, envolvendo mapas e estatísticas, as quais são derivadas das fontes primárias (TEIXEIRA, MORETTI e CHRISTOFOLLI, 1992 *apud* DOMINGUES, 2005).

Exemplos típicos de dados *raster* são matrizes de elevação, classes de uso do solo, dados geológicos, geofísicos, geoquímicos, e toda a espécie de dados produzida por scanners multiespectrais (SILVA, 1999).

Dados matriciais frequentemente são vetorizados. Desta forma, perímetro de terrenos, manchas urbanas ou limites municipais podem ser definidos através da utilização de algoritmos de *software* que constroem linhas simples (modelo espaguete, por exemplo) a partir dos valores originais dos pixels.

2.1.2 Etapas de um SIG

A Figura 1 mostra simplificada as etapas de um geoprocessamento de dados.



Figura 1 - Etapas de geoprocessamento para construção de um mapeamento geotécnico.

A aquisição de dados pode se dar por métodos indiretos, como mapas de ruas, fotografias aéreas, mapas geológicos; por métodos diretos, que representam os ensaios realizados em campo; ou ainda por bancos de dados específicos.

Segundo Teixeira, Moretti e Christofolli (1992) *apud* Bortoluzzi (2004) o pré-processamento envolve a manipulação dos dados de modo que possam entrar em um SIG. As funções do pré-processamento permitem modificar os dados como um todo, visando os seguintes objetivos:

- Mudança de escala;
- Mudança de projeção cartográfica;
- Mudança de estrutura (matricial-vetorial);
- União de base de dados;
- Conversão entre tipos de arquivos (analógico-digital).

Na etapa de gerenciamento de dados ocorre a inserção dos mesmos em um software para, como o próprio título sugere, gerenciar os mesmos.

Segundo Goodchild (1995) *apud* May (2008) a maioria dos SIG identificam uma base de dados na qual todos os objetos têm uma localização geográfica precisa junto com software para desempenhar funções de entrada, manipulação, análise e saída.

Quanto a manipulação e análise, para Bortoluzzi (2004) esta etapa consiste em examinar quantitativa e qualitativamente os dados de entrada e os resultantes do processamento, e a partir deles gerar novas informações.

Em um Sistema de Informação Geográfica, os mapas constituem-se em uma expressão gráfica de uma ou mais camadas de dados geográficos (*layers*). As tabelas de dados (ou *dataviews*) mostram o conteúdo de dados não gráficos (alfanuméricos) residentes no formato interno de banco de dados do SIG, ou de outro sistema gerenciador de banco de dados. Os gráficos ilustram as tendências de um ou mais itens de dados de uma tabela de dados,

descrevendo as suas características de interesse. As matrizes armazenam dados, distâncias e resultados de tabulações cruzadas de dados (MAY, 2008).

Nesse contexto, cita-se o arquivo tipo *shapefile*, que pode ser caracterizado como um formato de armazenamento vetorial digital com a localização geométrica e informações de atributos associadas.

Um arquivo em formato *shapefile*, segundo Esri (1998), consiste em um arquivo principal, um arquivo de índice e uma tabela de banco de dados. O principal arquivo é um acesso direto, arquivo de comprimento de registro variável em que cada registro descreve uma forma com uma lista de seus vértices. No arquivo de índice, cada registro contém o deslocamento do registro do arquivo principal correspondente do início do arquivo principal. A tabela banco de dados contém atributos de recurso com um registro por recurso. O relacionamento um-para-um entre geometria e atributos é baseado no número de registro. O arquivo dBASE deve estar na mesma ordem dos registros no arquivo principal.

2.2 MAPEAMENTO GEOTÉCNICO

Segundo De Miranda (2005), as primeiras referências da utilização de técnicas de mapeamento geotécnico para planejamento e ocupação têm início em 1902 com a caracterização geotécnica do substrato geológico de Nova Iorque (EUA), a partir de dados de aproximadamente 1.400 furos de sondagem. Ainda que os primeiros relatos sejam na América, foi na Europa que a cartografia geotécnica ganhou forte expressão, principalmente após a segunda Guerra Mundial.

Em 1913 Langen apresentou na feira de Leipzig, Alemanha, documentos gráficos que apontavam, por meio de símbolos e cores, as áreas inundáveis com variáveis do lençol freático e aos locais ativos ou abandonados de extração de materiais para construção, que foram úteis para orientar o crescimento das cidades de Erfurt e Danzing, entre outras.

Ainda após a Segunda Guerra estudos geotécnicos em cidades alemãs como as de Stuttgart, Ulm e Göttingen auxiliaram na reconstrução das mesmas. Cita-se também o planejamento urbano e territorial da Tchecoslováquia em 1947 e o desenvolvimento de obras e a ocupação regional na Polônia em 1961.

Após a consolidação e o aprimoramento da metodologia de mapeamento geotécnico, passou-se ao processo de automatização de elaboração de cartas e mapas. Na década de 1990, quando a informática fornece ferramentas mais confiáveis, como os Sistemas de Informação Geográfica e os Sistemas de Gerenciamento de Banco de Dados, procurou-se utilizar mais essas

ferramentas, para melhor integrar, numa única base de dados, informações sobre o meio físico e melhorar a elaboração de cartas e mapas geotécnicos (BASTOS, 2005).

No Brasil, segundo Mafra Jr. (2007) nas décadas de 1960 e 70, surgem trabalhos consistentes, baseados em metodologias estrangeiras. A década de 80 foi marcada pelo surgimento de metodologias brasileiras, como a do IPT, a da Escola de Engenharia de São Carlos, e a desenvolvida na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, a partir do trabalho de Davison Dias (1987).

Desde então, esses trabalhos têm sido consolidados e aprimorados, discutidos em simpósios e congressos específicos da área de mapeamento geotécnico.

Segundo Higashi (2006) o mapeamento geotécnico pode ser definido como uma metodologia, em que sob a forma de um mapa são representadas as principais características geomecânicas do solo, podendo ser utilizado na previsão do comportamento de polígonos de solos chamados de unidades geotécnicas, o que possibilita a sua aplicação em projetos ambientais e de engenharia.

O mapa geotécnico é um tipo de mapa geológico que representa todos os componentes geológicos de significância para o planejamento do solo e para projetos, construções e manutenções quando aplicados a engenharia civil e de minas (UNESCO, 1976).

A cartografia geotécnica busca a integração de dados físicos, como relevo (indicando áreas suscetíveis a instabilidades e declividade do terreno), geologia de engenharia e todo o comportamento de rochas e solos, aspectos ambientais, como desmatamento e consequentes erosões, e ainda, aspectos políticos referentes a divisas entre municípios, leis municipais entre outros.

Um bom mapa geotécnico é considerado o modelo mais ilustrativo do ambiente geológico, servindo às finalidades de engenharia e outras (MATULA, 1976).

2.2.1 Metodologias de mapeamento geotécnico

Segundo Bastos (2005) a maioria dos países desenvolveu metodologias para elaboração de mapas geotécnicos, sobretudo, os europeus; cada uma com suas características próprias e, muitas vezes, abordando um aspecto específico da geotecnia, por exemplo, a metodologia Zermos, aplicada na França para caracterização de zonas de movimento de massa (erosão, subsidência e sismos); outras metodologias, mais abrangentes, abordando aspectos gerais da geotecnia como no caso das metodologias da IAEG (Associação Internacional de Geologia de Engenharia), PUCE (australiana) e Francesa.

Hoje é crescente o número de pesquisas relacionadas a novas técnicas de mapeamento geotécnico. A seguir serão citadas algumas das mais importantes metodologias internacionais e nacionais.

2.2.1.1 Metodologia da *International Association of Engineering Geology* – IAEG (1976)

Esta metodologia teve início através de uma comissão formada por alguns membros da IAEG em 1968 e seus resultados foram apresentados em 1970. Esta forma de trabalho sugere uma orientação para o mapeamento que possa ser adequada à maioria dos países e na qual os meios para a sua confecção também sejam adequados socioeconômica e tecnicamente (HIGASHI, 2006).

De Miranda (2005) relata os fatores e feições que devem ser considerados. São os seguintes:

- Caráter das rochas e dos solos;
- Condições hidrogeológicas;
- Condições geomorfológicas;
- Fenômenos geodinâmicos.

Nesta metodologia os mapas podem ser classificados quanto à finalidade, ao conteúdo, à escala e à litogênese. Por apresentar essa série de classificações é que se pode dizer que é uma metodologia que se adequa a qualquer país, compatibilizando o número de informações com a exigência da metodologia.

Determinados princípios norteiam a metodologia da IAEG: o mapa geotécnico deve retratar informações objetivas e necessárias para avaliação das características geotécnicas; deve ser feito o possível para prever as variações de situações geológicas; as informações devem ser apresentadas de forma a facilitar o entendimento por profissionais de outras áreas; os mapas geotécnicos podem ter como base os mapas geológicos, hidrogeológicos e geomorfológicos (BASTOS, 2005).

2.2.1.2 Metodologia francesa

Metodologia de 1972 que foi baseada em mapeamentos geotécnicos já existentes realizados na França e em outros países. Pode ser utilizada para planejamentos urbanos e regionais e ainda pode apresentar um nível de detalhamento maior (1:2.000) que o da metodologia IAEG.

São analisadas as condições geodinâmicas, geomorfológicas e geotécnicas dos terrenos nesta metodologia.

Para elaboração dos mapas, são considerados os seguintes fatores: características e propriedades do solo e da rocha; hidrologia; geomorfologia; aspectos exógenos (geodinâmicos); recursos naturais para construção e modificação no ambiente natural proveniente de ações antrópicas (SANEJOUAND, 1972 *apud* BASTOS, 2005).

Ainda segundo Bastos (2005) as cartas de conteúdo e forma podem ser subdivididas em cartas de fatores normais e especiais. As de fatores normais representam informações para um uso abrangente em planejamento local. As cartas de fatores especiais apresentam-se informais, mais específicas, como, as cartas de fundações, por exemplo.

2.2.1.3 Metodologia Zuquette

Segundo De Miranda (2005) esta metodologia tem como base os trabalhos elaborados por Zuquette (1987) e Zuquette *et al.* (1997), atualizada por Zuquette e Gandolfi (2004), foi proposta após uma análise crítica das metodologias de mapeamento geotécnico utilizadas em vários países e se propõe atender à condição socioeconômica brasileira.

Segundo o autor, para a elaboração das unidades geotécnicas devem ser seguidas as seguintes etapas: levantamento e análise de informações já produzidas, reconhecimentos dos atributos e identificação das unidades homogêneas. Os mapas resultantes devem apresentar preferencialmente escalas entre 1:50.000 e 1:10.000 e são apresentados de três formas:

- Mapas de condições geotécnicas gerais: retratam todos os atributos, caracterizam o meio físico, sem separar áreas similares ou indicar potenciais e limitações;
- Mapa de zoneamento geotécnico geral: representam as condições do meio físico através do zoneamento de áreas similares, segundo os atributos considerados, porém sem considerar qualquer finalidade específica;
- Mapa de zoneamento geotécnico específico ou carta de aptidão: a região é zoneada segundo condições geotécnicas que afetam uma única finalidade (fundações, estradas etc.) (HIGASHI, 2006).

2.2.1.4 Metodologia Davison Dias

Segundo Mafra Jr. (2007) o principal fator que leva os pesquisadores a desenvolverem novos métodos de trabalho está na possibilidade da obtenção de um produto de maior qualidade e acima de tudo, que represente o mais fielmente a realidade na qual ele está inserido. Isso tanto é fato que cada vez mais e mais surgem metodologias desenvolvidas exclusivamente para determinadas regiões, ou para determinadas situações, que se não se fizerem presentes acarretam resultados sem grande valor.

A metodologia de mapeamento geotécnico de grandes áreas proposta por Davison Dias (1995) baseia-se na formulação de um mapa temático geotécnico, onde os mapas litológicos, oriundo de um mapa geológico, e pedológico são utilizados para a formulação de unidades geotécnicas com estimativas de comportamento geomecânico (HIGASHI, 2006).

Nesta metodologia ocorre a análise do perfil do solo de duas maneiras: a primeira, que inicia pela superfície, percorrendo os horizontes pedológicos A, B e C. A segunda constitui-se da avaliação ascendente do perfil, percorrendo-se todo o substrato. As curvas de nível auxiliam na delimitação dos polígonos das unidades, uma vez que o perfil do solo influencia diretamente na condição de formação do solo, como por exemplo, condições de drenagem e declividade. A Figura 2 resume o processo de desenvolvimento do mapa geotécnico, com base na metodologia Davison Dias (1995).

A investigação pedológica é importante, pois em alguns casos o substrato rochoso pode encontrar-se em profundidades elevadas com uma espessa camada de solo laterítico sobrejacente, assim, este não proporciona informações sobre os solos superficiais relevantes em determinadas situações. No entanto, através da geologia é possível supor a granulometria do solo residual e transportado, bem como identificar os minerais presentes (DAVISON DIAS, 1987).

Thiesen (2016) afirma que a classificação de uma unidade geotécnica foi definida pela autora pela seguinte simbologia: "ABCxyz", onde as letras maiúsculas "ABC" correspondem à classificação pedológica do horizonte superficial (horizontes A e B) e as minúsculas "xyz", identificadoras da geologia, caracterizando os horizontes C, RA e R. Para a classificação geológica é utilizada a rocha dominante. No caso de haver mais de uma litologia no material do substrato, adotam-se as siglas destas litologias em letras minúsculas separadas por vírgulas.

A Figura 2 resume o fluxo da metodologia Davison Dias (1987).

Deve ser lembrado que cada região apresenta características distintas de solo e que, portanto, essa metodologia fornece subsídios para uma estimativa do comportamento e não deve ser utilizado para o desenvolvimento de projetos.

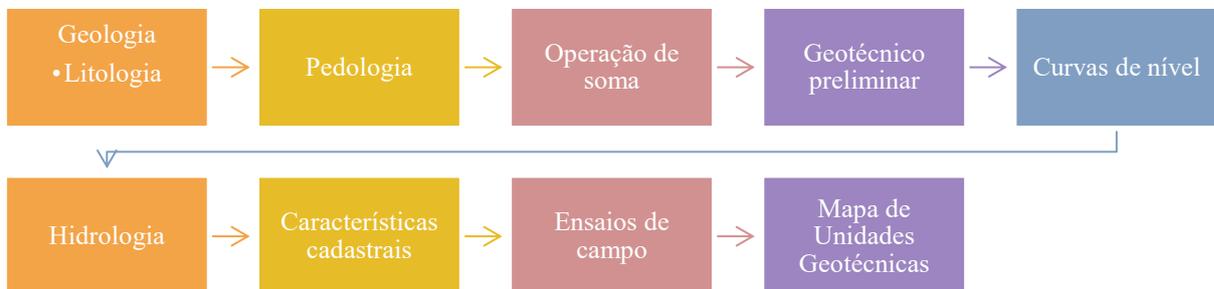


Figura 2 - Resumo da metodologia Davison Dias (1987).

2.2.2 Aplicações do mapeamento geotécnico

Segundo Bastos (2005) no Brasil, o desenvolvimento da cartografia geotécnica, segundo informações correntes, começou na década de 1960, com alguns trabalhos pioneiros, entre os quais se destaca o trabalho de Heine no mapeamento geotécnico do estado da Guanabara.

Desde então, muitas pesquisas relacionadas ao mapeamento geotécnico foram desenvolvidas, caracterizando um diverso campo de aplicação. Dentro os quais se podem citar: o planejamento urbano, erodibilidade, estabilidade de encostas, entre outros.

2.2.2.1 Planejamento urbano

Para o planejamento urbano o mapeamento geotécnico é de grande utilidade, pois possibilita a identificação de áreas não adequadas à ocupação, ou ainda, áreas em que é possível o desenvolvimento de conjuntos habitacionais, por apresentarem menor custo na execução das fundações, entre outros.

O mapeamento geotécnico aplicado às áreas urbanas é um importante instrumento para engenharia, que representa a expressão prática do conhecimento geomecânico do solo aplicado à gestão de problemas impostos pelo seu uso. Tem como objetivo a previsão dos fenômenos geotécnicos que precisam ser evitados ou minimizados, baseando-se nas características geomecânicas dos solos (HIGASHI, 2006).

2.2.2.2 Estudos de erodibilidade

Conforme Guerra (1999) *apud* De Miranda (2005), a dinâmica erosiva começa com as gotas da chuva batendo nos solos, com o *splash*, que pode causar a ruptura dos agregados, selando o topo do solo, seguida pela infiltração de água e a formação de poças (*ponds*), à medida que o solo se torna saturado. A partir daí, a água começa a escoar na superfície, primeiramente em lençol, depois através de fluxos lineares, que evoluem para microrravinas, podendo algumas formas cabeceiras, e algumas dessas cabeceiras podem bifurcar, formando novas ravinas.

Segundo Higashi (2006) a crescente urbanização nas cidades associada à falta de estrutura urbana em novos loteamentos e conjuntos habitacionais, além da suscetibilidade intrínseca dos solos, cria uma situação extremamente favorável ao desenvolvimento de processos erosivos de grande porte.

Nesse âmbito, o mapeamento geotécnico tem-se mostrado bastante útil, principalmente na prevenção do desenvolvimento de processos erosivos e possíveis danos causados por eles.

Observa-se que a grande maioria de mapeamentos levantados pela bibliografia atual não são utilizados ensaios para a previsão da suscetibilidade à erosão do solo. Geralmente, são empregadas apenas cartas de declividade, modelos digitais do terreno, pedologia, geologia, e imagens de satélite e fotos aéreas, algumas derivando para análises multitemporais, para a compreensão do comportamento do solo (HIGASHI, 2006).

2.2.2.3 Estudos de estabilidade de encostas

A estabilidade de taludes de terra consiste na determinação do ângulo de talude sob o qual, nas condições peculiares do talude, e, levando em conta a influência de pressões neutras provenientes de submersão, percolação d'água, adensamento ou deformações de cisalhamento, o talude mantém-se em equilíbrio. Isto se dará se em todos os pontos do maciço taludado as tensões de cisalhamento igualarem as resistências a cisalhamento. O talude existente será considerado estável se o seu ângulo real de inclinação for menor, dentro de certa segurança que o talude de equilíbrio calculado; e instável no caso contrário (VARGAS, 1977).

No Brasil tem-se visto desmoronamentos e instabilidades de encostas, muitas provocadas pela intensa ocupação de áreas não favoráveis, e outras devido a fatores climáticos (chuvas), acarretando um aumento do peso do solo e conseqüentemente, colapsando-o.

Segundo Higashi (2006), Bastos *et al.* (1998) realizaram para o município de Caxias do Sul-RS um zoneamento de áreas de risco à instabilidade de encostas e inundação. Nesta

pesquisa executou-se um levantamento de campo através de fotos dos locais que apresentam riscos, e as principais razões para a instabilidade de taludes, rolamento e queda de blocos e erosão de cada ponto. Para a formulação da carta final de zoneamento de risco, utilizou-se, além da carta geológico-geotécnica, o mapa de isodeclividades em escala de 1:500, seguindo a proposição do IPT (CUNHA, 1991). Como resultado foram apresentadas 4 classes de risco (baixo, médio, alto e rico à inundação).

2.2.2.4 Estudos de compressibilidade dos solos

Segundo Vargas (1977) entende-se como compressibilidade, a propriedade que têm certos corpos de mudarem de forma ou volume quando lhes são aplicadas forças externas.

Embora ainda pouco utilizado, o mapeamento geotécnico pode auxiliar na localiza o de solos moles e compressíveis, otimizando e dando mais segurança em elementos de funda oes.

Lollo e Rodrigues (2002) *apud* Higashi (2006) apresentam um estudo da colapsibilidade do solo do município de Ilha Solteira – SP utilizando-se de técnicas de avalia o do terreno (baseado no reconhecimento, interpreta o e análise de fei oes do relevo-*landforms*). Esta técnica   usada para a identifica o preliminar de ocorrências do fen meno com base na interpreta o de fotografias aéreas, seguida de uma caracteriza o dos perfis de altera o das unidades de solo encontradas no local. Para descrever de forma quantitativa o comportamento colaps vel do solo, amostras deformadas e indeformadas extraídas de nove poços exploratórios, com sete metros de profundidade, foram separadas para ensaios de compressão unidirecional, caracteriza o e compacta o. Como resultado da pesquisa, foi apresentada uma rela o entre as unidades de solos geradas e elementos de terreno com potenciais ou coeficientes de colapsibilidade citados na literatura técnica.

2.2.2.5 Estudos de pavimenta oes

O Brasil vem experimentando uma fase de considerável desenvolvimento em termos econ micos. Entretanto, a falta de infraestrutura viária acaba por comprometer o crescimento de muitas áreas do país. Frente a esta situa o, observa-se a necessidade de constru o de novas vias, para o escoamento da produ o industrial e circula o de pessoas (HIGASHI *et al.*, 2010).

Na  rea de pavimenta o, segundo o antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER-PRO 014/1995), o estudo geológico tem por objetivo apresentar as principais características das faixas que abrangem as possíveis soluçoes do traçado, de modo a possibilitar uma aprecia o comparativa entre elas.

Ainda, a rede hidrográfica, os limites das pequenas e médias bacias, unidades de relevo, vegetação, limites litológicos, presença de solos moles e seus limites, áreas tectonicamente afetadas, áreas de depósitos instáveis (tálus, colúvio), áreas prováveis de jazidas de materiais de construção (pedreiras, saibreiras, cascalheiras, areias, solos para reforço) devem constar necessariamente, da carta geológico-geotécnica e da respectiva legenda, procurando-se, sempre que possível, emprestar bases quantitativas a estas informações (DNER-PRO 014/1995).

2.2.2.6 Estudos de fundações

A cartografia geotécnica pode auxiliar também nos estudos de diferentes tipos de fundações, trazendo soluções mais econômicas e mais seguras. Contudo, o mapeamento geotécnico não serve de parâmetro para o desenvolvimento de qualquer projeto estrutural de fundação, mas sim como auxiliador.

A escolha da localização de um empreendimento de grande porte, ou até mesmo de obras públicas, analisando-se a estrutura do solo pode reduzir consideravelmente custos e ainda diminuir problemas técnicos e de execução comprovando, portanto, a importância para esta situação da associação de um mapa geotécnico e um ambiente SIG.

Davison Dias (1987) utilizou-se do mapeamento geotécnico para o estudo de fundações de torres de linhas de transmissão.

Segundo ela o estudo de fundações de torres de linhas de transmissão é um assunto complexo, pois tratam de diversos tópicos polêmicos, entre os quais se verificam:

- A principal solicitação é o arrancamento. O vento, atuando nos cabos e na torre provoca esforços alternados de tração e compressão, sendo que, em geral, a fundação é dimensionada pela tração;
- Existem várias teorias de capacidade de carga de fundações tracionadas, sendo que os seus mecanismos ainda não estão suficientemente comprovados por provas de cargas;
- Na aplicação das formulações, necessita-se conhecer parâmetros geotécnicos dos solos. Entretanto, semelhante, ao que ocorre em estradas, as linhas de transmissão são extensas, envolvendo vários tipos de solos com comportamento diferenciado;

- O Brasil, devido a sua posição geográfica e a seu tamanho, apresenta vários tipos de solos tropicais e subtropicais, cujo comportamento difere dos solos descritos nas bibliografias usuais de geotecnia;
- Sabe-se que grande parte do território brasileiro (em torno de 65%) é coberto por solos com comportamento laterítico. Entre outras particularidades os solos lateríticos são parcialmente saturados. A determinação da resistência ao cisalhamento dos solos parcialmente saturados é complexa. Os solos parcialmente saturados apresentam uma poropressão negativa, que tende a desaparecer com o aumento da saturação, diminuindo a resistência ao cisalhamento;
- A maioria das fundações de linhas de transmissão é do tipo superficial (grelhas metálicas ou sapatas de concreto) que solicita os solos superficiais. Os solos superficiais sofrem grande influência da variação do teor de umidade devido à alternância das estações climáticas.

Desta forma, o trabalho de Davison Dias (1987) compromete-se em apresentar a metodologia já citada para o estudo de solos de grandes áreas em extensão lineares e uma abordagem de estudo de solos tropicais.

Ainda Davison Dias (1987) comenta que como surgiu a dificuldade de calcular a capacidade de carga de arrancamento, foram feitas provas de carga à tração em uma das unidades geotécnicas formadas por solos laterítico (os de maior incidência no Brasil) para determinação dos parâmetros geotécnicos necessários.

Através de uma investigação de campo, confirmaram-se com boa precisão as unidades previstas no estudo preliminar. Realizou-se a caracterização geomecânica das unidades através de ensaios de laboratório, dando uma maior ênfase, nos solos tropicais, principalmente para os solos laterítico, que são os mais solicitados neste tipo de problemas no Brasil. (DAVISON DIAS, 1987).

Andrade (2003) utilizou-se do mapeamento para identificar os elementos de fundação mais indicados a serem empregados em edificações, nos diferentes perfis geotécnicos que compõem o município de Florianópolis.

Em seu trabalho foram feitas:

- Análise das manifestações patológicas em edificações já concluídas, decorrentes de problemas geotécnicos nas fundações;
- Pesquisa do comportamento dos elementos de fundação quanto a sua capacidade de suporte e interação em diversos perfis geotécnicos do Município;
- Sistematização, através do mapeamento geotécnico, de soluções mais apropriadas para os perfis geotécnicos característicos da região de Florianópolis.

Os resultados de ensaios disponibilizados através do mapeamento geotécnico abordado têm grande importância na obtenção de parâmetros físicos do solo como, por exemplo, coesão e ângulo de atrito. No entanto, essas informações têm relevância específica a cada situação, considerando que seu aproveitamento possibilitaria maior segurança no emprego de métodos teóricos, na determinação da capacidade de carga das fundações (principalmente sobre solos argilosos) em detrimento às correlações empíricas neste abordadas. Entende-se assim, que outras pesquisas específicas sejam necessárias para a complementação do assunto, avançando na obtenção de modelos ideais de projeto de fundações.

Os mapas geotécnicos tornam-se ferramentas ainda mais representativas, com o aumento das escalas de trabalho. Dentro da área analisada, existem outros trabalhos nestes moldes, com grande relevância não apenas no estudo das fundações, mas também a obras geotécnicas diversificadas. Dessa forma, as informações integradas em um mapeamento geotécnico, podem representar um banco de dados com grande significância ao planejamento e elaboração de projetos de fundações, bem como ao reforço de infraestruturas problemáticas, contenção de escavações ou encostas, entre outras (ANDRADE, 2003).

Thiesen (2016) mostra em sua pesquisa que o mapeamento geotécnico no âmbito empresarial da construção civil, em termos práticos, visa a aplicação dos resultados para orientação de compra de terrenos, escolha do tipo de fundação, análise preliminar de investimentos e dimensionamento de fundações rasas e profundas, estimativa preliminar de tempo, previsão de profundidade de sondagens, de forma a melhorar estimativas, reduzir tempo e custos durante a análise de viabilidade dos projetos.

2.3 CARACTERIZAÇÃO LITOLÓGICA, PEDOLÓGICA E GEOTÉCNICA

Os solos são materiais geológicos formados a partir do intemperismo químico e físico das rochas. O intemperismo físico envolve a redução de tamanho sem que haja alteração da composição original da rocha mãe. Os principais agentes responsáveis por estes processos são esfoliação, descarregamento, erosão, gelo e degelo. O intemperismo químico causa tanto a redução do tamanho, como a alteração química da rocha mãe. Os principais agentes responsáveis pelo intemperismo químico são hidratação, carbonatação e oxidação. Em geral, os intemperismos químicos e físicos ocorrem conjuntamente (BUDHU, 2013).

Solos residuais são aqueles que permanecem em seu local de origem e possuem relação com o material rochoso subjacente, enquanto solos transportados são aqueles que foram movidos por fatores climatológicos como vento, água ou gravitacionais e que, portanto, não possuem relação com o material rochoso subjacente.

Solos jovens possuem perfil pedológico raso, sendo possível atingir facilmente a rocha em ensaios SPT. Solos maduros, porém, possuem horizonte B bem desenvolvidos, e perfis podendo atingir profundidades superiores a 30m, sendo necessária a avaliação da própria camada pedológica para execução de obras de engenharia.

Daí a importância da metodologia Davison Dias (1987), que leva em conta esses fatores e que serão mais bem explicados neste capítulo.

2.3.1 Geologia e litologia

Melendez e Fuster (1991) *apud* Caballero e Angeles (2008) definem a geologia como a ciência que estuda a Terra, sua composição, estrutura e fenômenos de todos os tipos que ocorrem nele incluindo seu passado, através dos documentos que são deixados nas rochas.

Branco (2016) afirma que ela é talvez a mais variada das ciências naturais. Estuda a Terra como um todo, sua origem, composição, estrutura e história, bem como os processos que deram origem ao seu estado atual e os que governam as transformações que ocorrem no presente.

O âmbito da Geologia de Engenharia cobre: a definição da geomorfologia, estrutura, litologia e certas características hidrogeológicas das formações geológicas; a caracterização (físico mecânica, química e mineralógica) dos materiais; a definição do comportamento mecânico de maciços terrosos e rochosos; a previsão da evolução daquelas propriedades durante a vida das obras; e a definição das medidas apropriadas para melhorar ou manter as propriedades

relevantes dos terrenos (MACIEL FILHO e NUMMER, 2014). A Figura 3 apresenta essa relação entre áreas de estudo e a geologia.

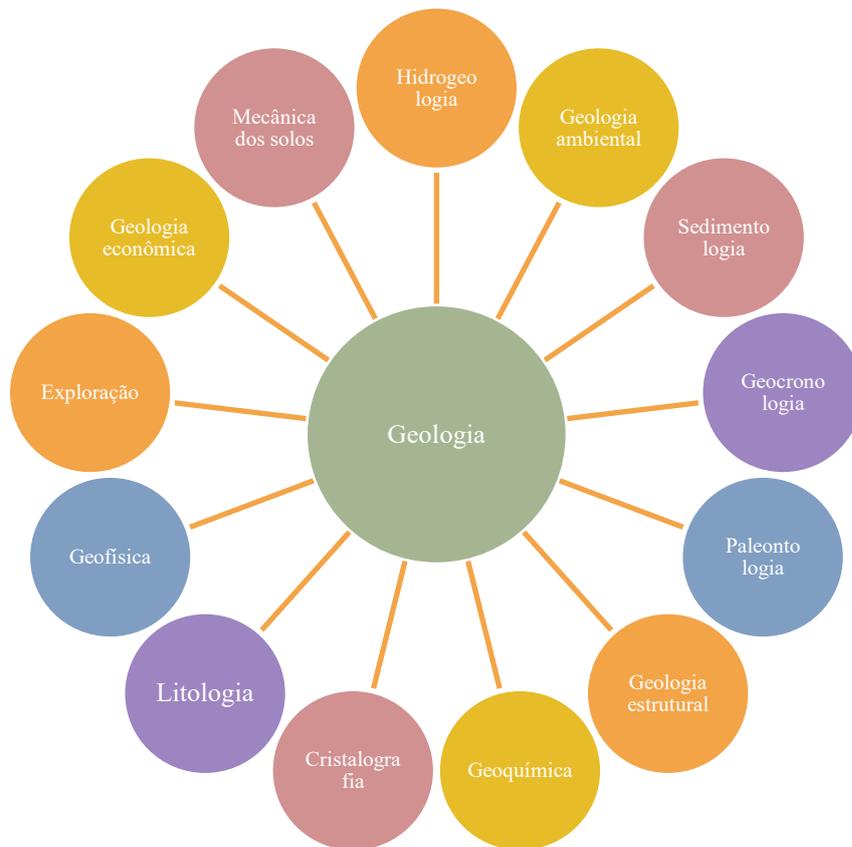


Figura 3 - Geologia e estudos relacionados. Fonte: Adaptado de Ángeles (2008).

Para mapeamento geotécnico, Higashi (2016) mostra que o mapa geológico deve ser interpretado em um mapa de estimativas litológicas, onde as Formações, Complexos, Grupos, etc., são transformados em unidades litológicas predominantes. No caso de haver mais de uma litologia predominante em cada formação, as mesmas são discriminadas no mapa, para que o mapeamento não resulte em erros significativos, o que comprometeria assim a precisão necessária para atingir os objetivos específicos.

A litologia trata, por sua vez e dentro destas circunstâncias, da rocha predominantemente existente.

2.3.2 Pedologia

Ker *et al.* (2012) afirmam que a pedologia, como ramo da ciência do solo, trata de estudos relacionados com a identificação, a formação, a classificação e o mapeamento dos solos. As informações geradas por esses estudos pedológicos, além de sua utilização pelos

demais ramos da ciência do solo, encontram aplicação nas mais diversas áreas da ciência, como agronomia, geografia, geologia, engenharia, arqueologia, biologia, medicina e outras mais.

Dos Santos *et al.* (2013) explicam que os solos como modelo, quando examinados a partir da superfície, consistem de seções aproximadamente paralelas, organizadas em camadas e/ou horizontes que se distinguem do material de origem inicial, como resultado de adições, perdas, translocações e transformações de energia e matéria, que ocorrem ao longo do tempo e sob a influência dos fatores clima, organismos e relevo.

Este modelo corresponde a um sistema aberto, podendo ser estudado utilizando-se o procedimento da hierarquia de subsistemas, em ordem decrescente.

No perfil, é identificada a divisão do solo em horizontes, que são seções aproximadamente paralelas à superfície do terreno, originados e desenvolvidas por processos pedogenéticos e, ou, antropogênicos. Os horizontes são definidos por um conjunto de características ou propriedades, que compreendem, por exemplo: a cor, a granulometria (=textura), a mineralogia, a estrutura, as propriedades físicas e químicas, a distribuição de raízes, da flora e da fauna do solo (KER *et al.*, 2012).

Assim, a atuação de diferentes fatores ambientais influencia diretamente e decisivamente nos processos que atuam no substrato geológico ou no solo pré-existente, acontecendo alterações pedogenéticas das mais variadas escalas.

Segundo a NBR 6502 de 1995, a classificação pedológica consiste na definição de classes de solos e suas subdivisões, segundo o grau de evolução do solo e desenvolvimento de seu perfil; o modo de alteração definido pela natureza dos sesquióxidos liberados e presença de certos tipos de argila; o tipo de distribuição da matéria orgânica que influi no perfil e a presença de certos fenômenos fundamentais de evolução.

A Embrapa define o sistema brasileiro de classificação de solos como sendo um sistema taxonômico de solos, hierárquico, multicategórico e aberto, com a finalidade de classificar todos os solos existentes no Brasil. Sua chave é composta por 6 níveis categóricos de classificação: Ordem, Subordem, Grande Grupo, Subgrupo, Família e Série.

Cada perfil de solo é avaliado pelos processos pedogenéticos predominantes no horizonte ou camada. O Quadro 1 apresenta uma síntese do sistema de classificação dos solos, chaves para identificação em ordem de prioridade e equivalência com o antigo sistema.

Quadro 1 - Sistema brasileiro de classificação dos solos (2018) e equivalência (1999).

| Ordem | Descrição e Chave pelo SiBCS (2018) | Classificação SiBCS (1999) |
|--------------|---|---|
| Organossolos | <p>Solos que apresentam horizonte hístico que atenda um dos seguintes critérios de espessura:</p> <ul style="list-style-type: none"> • 20cm ou mais, quando sobrejacente a um contato lítico ou a fragmentos de rocha, cascalhos, calhaus e matacões; • 40cm ou mais, contínuo ou cumulativo nos primeiros 80cm da superfície do solo; • 60cm ou mais de 75% (expresso em volume) ou mais do horizonte for constituído de tecido vegetal na forma de restos de ramos finos, raízes finas, excluindo as partes vivas. | <p>Nesta classe estão incluídos os Solos Orgânicos, semiorgânicos, Solos tiomórficos de constituição orgânica ou semiorgânica e parte dos Solos litólicos com horizonte O hístico com 20 cm ou mais de espessura.</p> |
| Neossolos | <p>Outros solos sem horizonte B diagnóstico e satisfazendo os seguintes requisitos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ausência de horizonte glei dentro de 50cm da superfície do solo, exceto no caso de solos de textura areia e areia franca; • Ausência de horizonte plíntico dentro de 40cm da superfície do solo; • Ausência de horizonte vértico imediatamente abaixo do horizonte A; • A chernozêmico. Se presente não deve estar conjugado com o caráter carbonático e/ou horizonte cálcico. | <p>litossolos e solos litólicos, regossolos, solos aluviais e areias quartzosas (distróficas, marinhas e hidromórficas).</p> |
| Vertissolos | <p>Outros solos com relação textural insuficiente para identificar um B textural e que apresentam horizonte vértico entre 25cm e 100cm de profundidade e satisfazendo os seguintes requisitos:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Teor de argila, após mistura e homogeneização do material de solo, nos 20cm superficiais, de no mínimo 300g/kg de solo; • Fendas verticais no período seco com pelo menos 1cm de largura, atingindo, no mínimo, 50cm de profundidade, exceto nos solos rasos, nos quais o limite mínimo é 30cm; • Ausência de material com contato lítico, ou horizonte petrocálcico, ou duripã dentro dos primeiros 30cm de profundidade. | <p>Nesta classe estão incluídos todos os vertissolos, inclusive os hidromórficos.</p> |

| Ordem | Descrição e Chave pelo SiBCS (2018) | Classificação SiBCS (1999) |
|--------------|--|---|
| Espodossolos | Outros solos que apresentam horizonte B espódico imediatamente abaixo dos horizontes E ou A. | Nesta classe estão incluídos todos os solos que foram classificados anteriormente como podzol e podzol hidromórfico. |
| Planossolos | Outros solos apresentando horizonte B plânico não coincidente com o horizonte plântico, imediatamente abaixo de horizonte A ou E. | Esta classe inclui os solos que foram classificados como planossolos, solonetz-solodizado e hidromórficos Cinzentos que apresentam mudança textural abrupta. |
| Gleissolos | Outros solos, apresentando horizonte glei iniciando-se dentro de 50cm a partir da superfície ou a profundidades entre 50cm e 150cm da superfície do solo desde que imediatamente subjacente a horizontes A ou E ou horizonte hístico com menos de 40cm de espessura, sem horizonte plântico dentro de 200cm da superfície, ou outro horizonte diagnóstico acima do horizonte glei. | Esta classe abrange os solos que foram classificados anteriormente como glei pouco húmico, glei húmico, parte do hidromórfico cinzento (sem mudança textural abrupta), glei tiomórfico e solonchak com horizonte glei. |
| Latossolos | Outros solos que apresentam horizonte B latossólico imediatamente abaixo do horizonte A. | Nesta classe estão incluídos todos os antigos latossolos, excetuadas algumas modalidades anteriormente identificadas como latossolos plânticos. |
| Chernossolos | Outros solos que apresentam horizonte A chernozêmico seguido de: <ul style="list-style-type: none"> • Horizonte B incipiente ou B textural, ambos com argila de atividade alta e saturação por bases alta ou; • Horizonte B incipiente menor que 10cm de espessura ou; • Horizonte C, ambos cálcicos, petrocálcicos ou carbonáticos ou; • Apresentando horizonte cálcico ou caráter carbonático no horizonte A, seguindo de um contato lítico. | Estão incluídos nesta classe a maioria dos solos que eram classificados como brunizém, rendzina, brunizém avermelhado, brunizém hidromórfico e Cambissolos eutróficos com argila de atividade alta conjugada com A chernozêmico. |
| Cambissolos | Outros solos que apresentam horizonte B incipiente imediatamente abaixo do horizonte A ou de horizonte hístico com espessura inferior a 40cm. Plintita e petroplintita, se presentes, não satisfazem os requisitos de plintossolos. | Esta classe compreende os solos anteriormente classificados como Cambissolos, inclusive os desenvolvidos em sedimentos aluviais. São excluídos dessa classe os solos com horizonte A chernozêmico e horizonte B incipiente com alta saturação por bases e argila de atividade alta. |

| Ordem | Descrição e Chave pelo SiBCS (2018) | Classificação SiBCS (1999) |
|--------------|---|---|
| Plintossolos | <p>Outros solos que apresentam horizonte plântico, litoplântico ou concrecionário, exceto quando coincidente com horizonte B plânico com caráter sódico, iniciando-se em uma das seguintes condições:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dentro de 40cm ou; • Dentro de 200cm se precedido de um horizonte glei, ou horizonte A ou E ou de outro horizonte que apresente cores pálidas, variegadas ou mosqueadas. | <p>Estão incluídos nesta classe solos que eram reconhecidos anteriormente como lateritas hidromórficas de modo geral, parte dos podzólicos plânticos, parte dos gleis húmicos e glei pouco húmico e alguns dos latossolos plânticos. Estão incluídos também outros solos classificados em trabalhos diversos como concrecionários indiscriminados, concrecionários lateríticos, solos concrecionários e petroplintossolos.</p> |
| Luvisolos | <p>Outros solos apresentando horizonte B textural com argila de atividade alta e saturação por bases alta na maior parte dos primeiros 100cm do horizonte B (inclusive BA), imediatamente abaixo do horizonte A ou E.</p> | <p>Nesta classe estão incluídos os solos que foram classificados pela Embrapa solos como brunos não cálcicos, podzólico vermelho-amarelo eutrófico argila de atividade alta e podzólico bruno-acinzentado eutrófico e alguns podzólicos vermelho-escuro eutróficos com argila de atividade alta.</p> |
| Nitossolos | <p>Outros solos que apresentam 350g/kg ou mais de argila, inclusive no horizonte A, com horizonte B nítico imediatamente abaixo do horizonte A, com argila de atividade baixa ou caráter alítico na maior parte do horizonte B, dentro de 150cm da superfície do solo.</p> | <p>Nesta classe se enquadram solos que eram classificados, na maioria, como Terra Roxa Estruturada, Terra Roxa Estruturada Similar, Terra Bruna Estruturada, Terra Bruna Estruturada Similar e alguns Podzólicos Vermelho-Escuros e Podzólicos Vermelho-Amarelos.</p> |
| Argissolos | <p>Outros solos que apresentam horizonte B textural.</p> | <p>Podzólico vermelho-amarelo argila de atividade baixa ou alta, pequena parte de terra roxa estruturada, de terra roxa estruturada similar, de terra bruna estruturada e de terra bruna estruturada.</p> <p>Similar, na maioria com gradiente textural necessário para B textural, em qualquer caso eutróficos, distróficos ou álicos, podzólico bruno-acinzentado, podzólico vermelho-escuro, podzólico amarelo, podzólico acinzentado e mais recentemente solos que foram classificados como alissolos com B textural.</p> |

2.3.3 Banco de dados de sondagens SPT

2.3.3.1 O ensaio SPT

O ensaio SPT foi apresentado no final da década de 80 pela '*International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering*' e no Brasil, o método foi descrito por Décourt *et al.* (1988), é normalizado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas através da NBR 6484 (2001).

Este ensaio consiste basicamente na cravação de um amostrador padrão no solo, através da queda livre de um peso de 65kg (martelo), caindo de uma altura determinada (75cm). As características do amostrador estão especificadas na NBR 6484 (QUARESMA, 1988).

O ensaio SPT é reconhecidamente o mais usualmente utilizado na investigação do subsolo, isso porque ele oferece parâmetros mínimos de métodos semiempíricos no dimensionamento de fundações diretas (rasas ou profundas) e indiretas. Complementarmente, informações como nível d'água, presença de outros componentes como matéria orgânica podem auxiliar também na análise qualitativa do solo e na estratégia de métodos de execução.

A soma do número de golpes necessários à penetração dos últimos 30cm do amostrador é designada por N ou N_{spt} .

A NBR 6484 (2020) descreve critérios de paralisação do ensaio que indicam o solo impenetrável ao amostrador padrão. Esses critérios foram atualizados em relação à norma anterior, o que altera o resultado do laudo de sondagem.

Ainda segundo a norma, dependendo do tipo de obra, das cargas a serem transmitidas às fundações e da natureza do subsolo, admite-se a paralisação da sondagem em solos de menor resistência à penetração do que aquela discriminada anteriormente, desde que haja uma justificativa geotécnica ou solicitação do cliente.

Por meio do perfil do furo de sondagem exemplificado na Figura 4, informações acerca das camadas dos diferentes solos (argila, silte, areia, entre outros) e suas características (coloração, dureza, compactação), nível de água, profundidade do impenetrável, resistência do solo pelo número de golpes padronizados N_{spt} , data, local e empresa responsável pela realização do furo de sondagem. Os furos individuais, por sua vez, ainda podem ser unificados para obtenção de perfis estratigráficos de uma região. A Figura 4 apresenta um modelo de laudo de sondagem SPT.

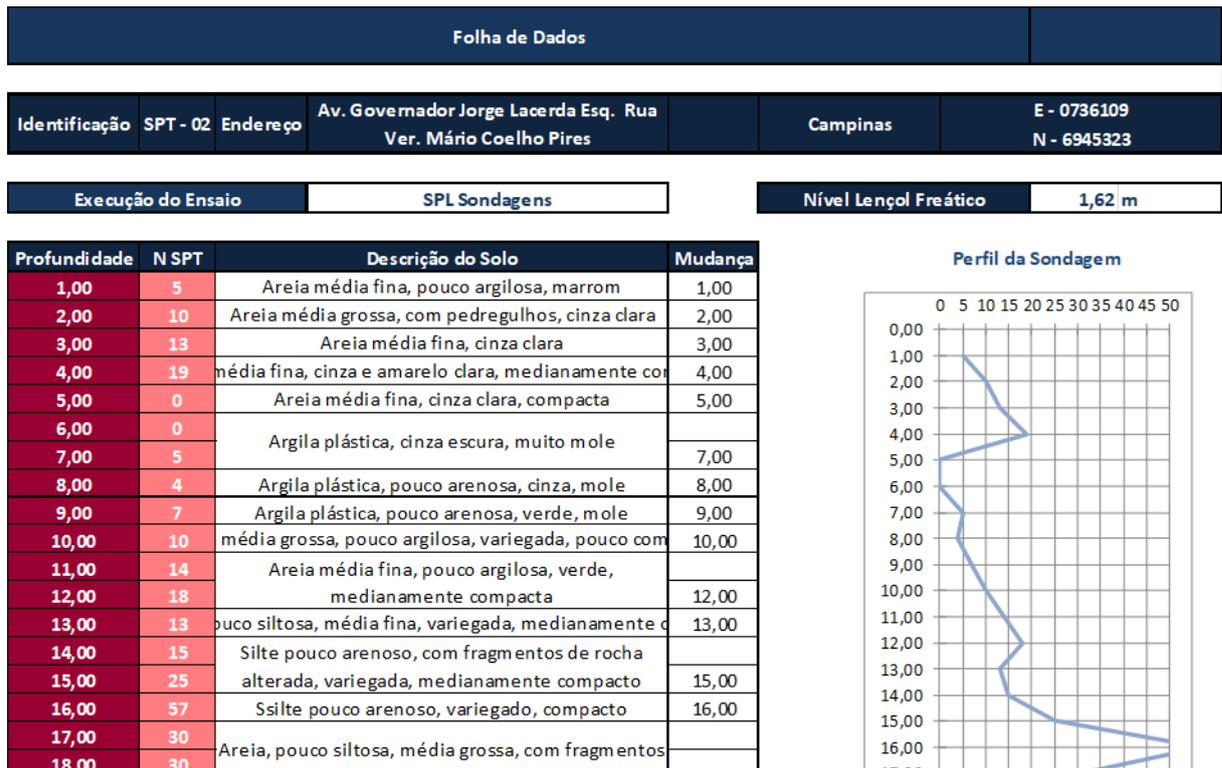


Figura 4 - Exemplo de laudo de sondagem SPT.

2.3.3.2 Banco de dados de sondagens SPT

Banco de dados é o repositório de dados e informações de um SIG, que armazena e recupera dados geográficos em suas diferentes geometrias (imagens, vetores e grades), bem como as informações alfanuméricas (também denominados atributos não espaciais ou descritos) (INPE, 2021).

Segundo May (2008) uma base de dados é essencialmente, um arquivo que armazena informações dentro de grupos relacionados, chamados registros. Cada registro armazena informações dentro de blocos de tamanho predefinido, como números inteiros, números fracionados, datas, textos e outros.

O banco de dados deve ser único, centralizado e associa todos os dados que envolvem todos os dados necessários para a avaliação da problemática. Além disso, é normalmente gerenciado por um SIG e deve contemplar os objetivos do trabalho.

Cada base de dados/banco de dados relacional é dividida em tabelas. Cada tabela contém certo número de registros. Cada registro contém certo número de campos. Ao trabalhar com a base de dados/banco de dados projetam-se campos, tabelas e registros dentro do programa/aplicativo complexo (MAY, 2008).

Locks (2008) elaborou um banco de dados SPT em ambiente SIG. Ele cita que o banco de dados foi construído através da estruturação de mapas e laudos que foram elaborados na pesquisa em um Sistema de Informações Geográficas. Após inserir os pontos no *ArcView*, verificou-se a facilidade de localização a partir de coordenadas ou até mesmo pelo mapa de ruas que foi inserido.

Este procedimento possibilita que, com a ampliação de banco de dados, sejam criadas zonas de solos que apresentem característica semelhante (LOCKS, 2008).

O banco de dados dentro de um SIG deve considerar não apenas o conjunto de dados descritivos de um objeto e seu relacionamento com os demais, mas também exige escolher uma representação para cada um deles. Esta representação deve ser adequada às finalidades da aplicação, porém ocorre que aplicações distintas podem ter necessidades da mesma informação, mas em diferentes representações e escalas. O ideal seria poder armazenar apenas uma das representações e deduzir as demais a partir da representação primária, evitando manter dados redundantes (DAVIS, 2000 *apud* DOMINGUES, 2005).

Almeida e Albrecht (2002) *apud* Higashi (2006) apresentam um banco de dados georreferenciados de sondagens de simples reconhecimento (SPT) em um Sistema de Informação Geográfica (*ArcView* e *Access*) com o objetivo de aproveitar essa estrutura como subsídio ao planejamento urbano. O trabalho utilizou como fonte de dados os relatórios de sondagens existentes fornecidos pelas empresas que atuam no ramo de prospecção geotécnica em Cuiabá-MT. Como produto foi criado um ambiente SIG que permite ao usuário vários tipos de correlações entre os dados das sondagens e cartas geológico-geotécnicas e urbanísticas em escala de 1:25.000, de tal maneira que possam ser facilmente acessados e manipulados interativamente para várias finalidades, através do mapa de localização das sondagens georreferenciadas.

Fonteles (2003) utilizou-se de técnicas geoestatísticas de análise da variabilidade espacial e de estimativas de dados de sondagem de simples reconhecimento com *Standard Penetration Test* (SPT) objetivando a caracterização geotécnica de uma área com 44km², situada na porção nordeste do município de Fortaleza (CE). A caracterização geotécnica desta área compreendeu os seguintes processos: montagem de um banco de dados geotécnicos; aplicação de algoritmos de interpolação para elaboração do Modelo Digital de Terreno (MDT); a aplicação de técnicas geoestatística de cokrigagem e krigagem ordinária na elaboração do mapa de superfície freática; a construção de um modelo geológico 3D de superfície, o mapeamento de uma superfície do impenetrável ao amostrador SPT, auxiliado por

geoestatística; a modelagem geoestatística 3D dos dados do índice de resistência à penetração (N) do amostrador do SPT, o que possibilitou a estimativa em bancadas por krigagem ordinária de blocos, do referido índice em diversos níveis altimétricos do terreno. Os dados estimados das bancadas foram tratados no programa *ArcView* 3.1 em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) na elaboração de mapas de uso sugerido de fundações.

2.3.4 Elementos de fundação

Fundação é o elemento ou conjunto de elementos responsável por receber todas as cargas de uma edificação e transmiti-las ao solo. As fundações podem ser classificadas de acordo com a profundidade da cota de assentamento, sendo consideradas rasas as que são executadas entre as cotas máximas entre 3m e 5m e as profundas entre 4m e 6m. Podem também ser classificadas de acordo com a maneira pela qual transmitem as cargas ao solo, sendo diretas as que transmitem o carregamento por pressão sob a base e indiretas as que consideram o atrito de ponta e o lateral.

A figura 5 mostra a união dessas quatro classificações e os elementos de fundação correspondentes às mesmas.

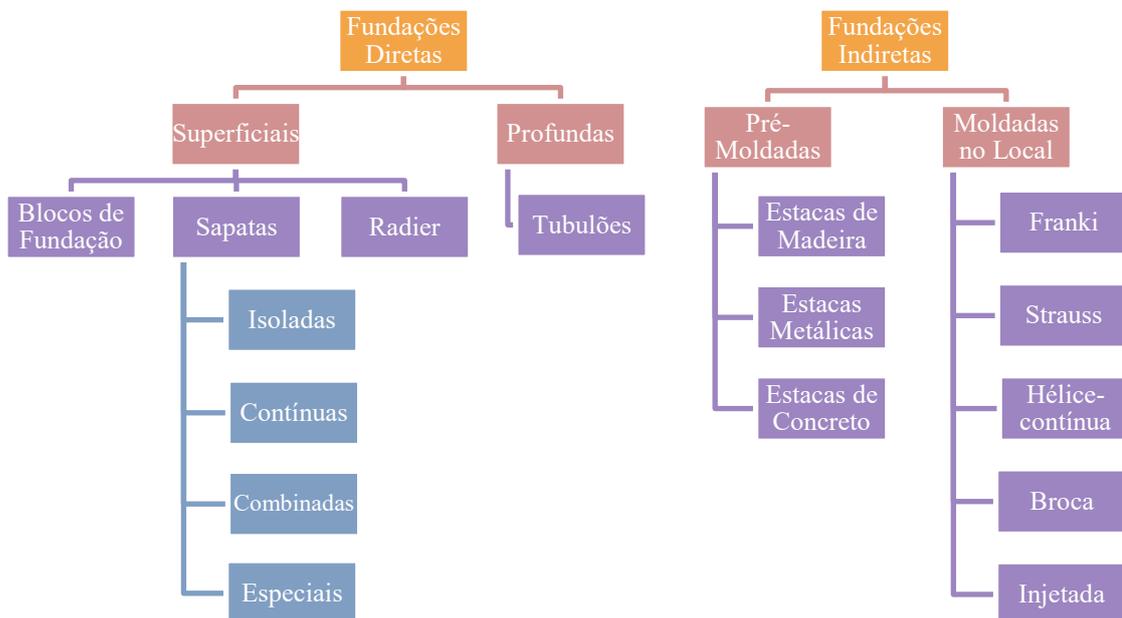


Figura 5 - Classificação dos diferentes tipos de Fundação. Fonte: Baseado em da Silva (2003).

2.3.4.1 Fundações superficiais

A NBR 6122 (2019) define métodos semiempíricos como aqueles que relacionam resultados de ensaios (tais como o SPT, CPT etc.) com tensões admissíveis. Devem ser

observados os domínios de validade de suas aplicações, bem como as dispersões dos dados e as limitações regionais associadas a cada um dos métodos.

Para o dimensionamento de fundações diretas do tipo sapatas, em função do índice de resistência à penetração do SPT, segundo Cintra *et al.* (2011), é possível utilizar-se a equação 1:

$$\sigma_a = 0,02 \times N_{spt} \text{ (MPa)} \quad (1)$$

Em que N_{spt} é o valor médio no bulbo de tensões. A equação é válida para valores de N_{spt} entre 5 e 20.

Dada uma sapata isolada de concreto armado de largura “B” e comprimento “L”, com reação vertical de compressão do pilar “P”, Cintra *et al.* (2011) calculam a tensão resistente (σ) no maciço de solo, no contato sapata-solo, conforme a Equação (2).

$$\sigma_r = \frac{P}{B \times L} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

Por fim, a profundidade do bulbo de tensões é dada a partir da forma e tipo de sapata, sendo apresentadas essas características no Quadro 2. O esquema de interação solo-sapata é apresentado na Figura 6.

Quadro 2 - Profundidade do bulbo de tensões conforme tipo de sapata. Fonte: Baseado em Cintra *et al.* (2011).

| Tipo de Sapata | Profundidade “z” do bulbo de tensões |
|-----------------------------|---|
| Sapata circular ou quadrada | $z = 2B$ |
| Sapata retangular | $z = 3B$ |
| Sapata corrida | $z = 4B$ |

A NBR 6122 (2019), bem como livros consagrados na área de fundações, descreve outras metodologias para o cálculo da tensão admissível, sendo essa escolhida para aplicação nesta dissertação por apresentar relativa simplicidade e trazer representatividade aos dados.

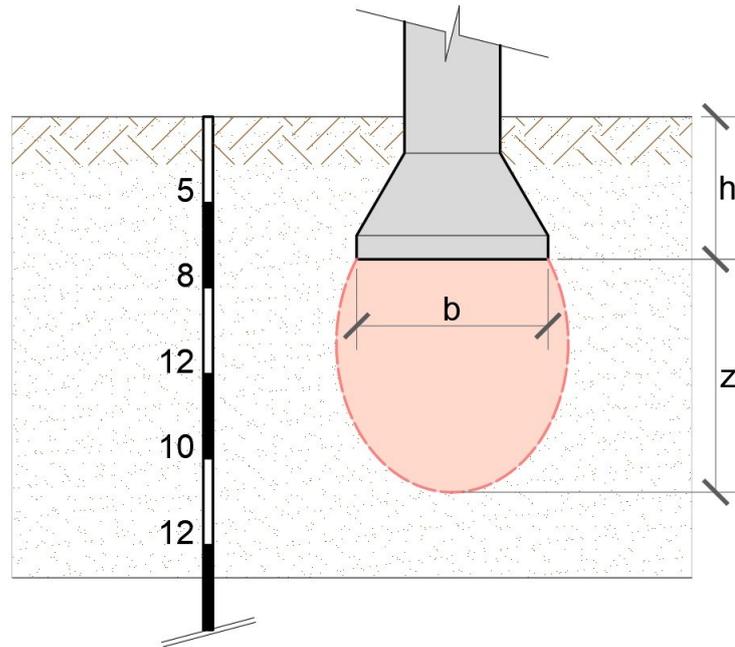


Figura 6 - Sistema sapata-solo e bulbo de tensões.

2.3.4.2 Fundações profundas

O Nspt é comumente utilizado em correlações no dimensionamento de fundações profundas. Estas correlações podem ser diretas ou indiretas.

Os métodos indiretos utilizam os dados na previsão de parâmetros constitutivos, representativos do comportamento do solo obtidos por correlação com resultados de ensaios de campo e/ou laboratório. Nos métodos diretos, os dados são aplicados em formulações empíricas e/ou semiempíricas com o intuito de prever um valor de tensão admissível ou o recalque de um elemento de fundação (FONTELES, 2003).

Os métodos de Aoki e Velloso e Decóurt e Quaresma são métodos semiempíricos que se utilizam do Nspt e suas correlações com os valores de atrito de ponta e atrito lateral do ensaio CPT para obter como resultado, somando-se as duas parcelas citadas anteriormente, a carga admissível de uma estaca em elemento isolado.

Esses métodos semiempíricos consideram uma série de coeficientes relacionados diretamente às particularidades de cada sistema estaca-solo, como os relacionados ao tipo de fundação, ao tipo de solo e valores referentes às dimensões da estaca, sendo, portanto, de difícil conversão para análise em formato de cartas de aptidão.

Outra metodologia desenvolvida por Aoki e Cintra (1996) consiste em aplicações práticas do Nspt para determinar limites de execução. Segundo Fonteles (2003) a justificativa

para utilização de tais limites está relacionada ao conceito de Fundação, que supostamente deveria incorporar as características estruturais e geotécnicas.

O elemento de fundação é então considerado como a união do elemento estrutural de fundação profunda, que pode ou não ser pré-fabricado, mas que possui um rigoroso controle de produção e no qual se conhece os parâmetros de resistência à ruptura e deformabilidade, e o elemento geotécnico, que é composto por rochas e solos de diferentes composições mineralógicas e granulometrias que resultam em um material anisotrópico de comportamento geomecânico semelhante, porém não igual.

É neste contexto que surge o conceito de superfície resistente (Figura 7), que seria delimitada pela capacidade do elemento estrutural atingir diferentes profundidades no elemento geotécnico. Segundo Aoki (2002), esta variabilidade observada nos comprimentos das estacas significa que há valores individuais de carga admissível para o conjunto.

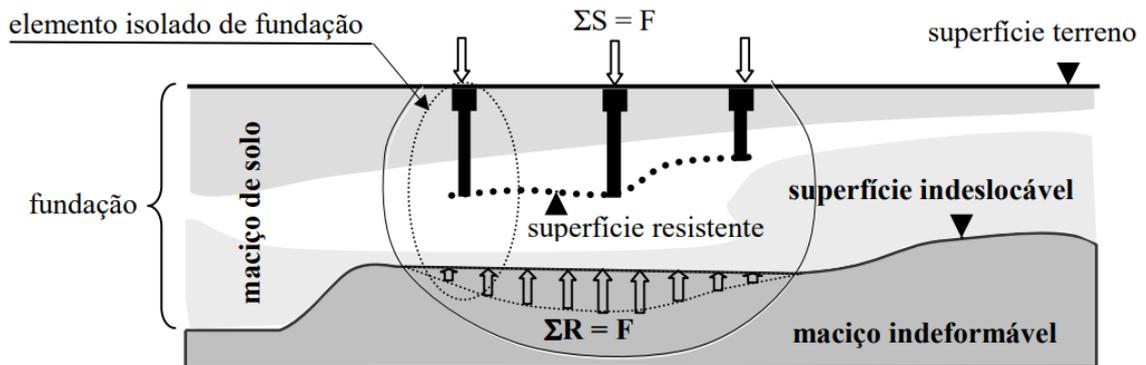


Figura 7 - Equilíbrio estático da fundação. Fonte: Aoki, Menegotto e Cintra (2002).

Aoki, Menegotto e Cintra (2002) afirmam que, na fundação profunda, o objeto de estudo é a superfície resistente. Fixada esta superfície, a fundação será: a) segura, se apresentar coeficientes de segurança satisfatórios aos estados limites último e de utilização e, b) confiável, se a probabilidade de ruína da fundação for aceitável para o usuário.

Quadro 3 - Limites de N_{spt} para execução de estacas considerando a utilização de equipamentos convencionais sem adoção de recursos especiais. Fonte: Baseado em Cintra et al (2011).

| Tipo de Estaca | Limite de N_{spt} para o equipamento |
|--|--|
| Pré-moldada de concreto, com diâmetro < 30cm | $15 < N_{spt} < 25, \Sigma N_{spt} = 80$ |
| Pré-moldada de concreto, com diâmetro ≥ 30 cm | $25 < N_{spt} \leq 35$ |
| Hélice-contínua | $20 < N_{spt} \leq 45$ |
| Estaca raiz | $N_{spt} \geq 45$ |

2.4 GEOESTATÍSTICA

Atualmente o termo Geoestatística acha-se consagrado como um tópico especial da estatística aplicada que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, as quais têm um comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e as totalmente determinísticas. Nesse sentido pode-se afirmar que tal metodologia representa a grande contribuição da Geologia para a Estatística Aplicada (LANDIM, 2006).

Segundo Yamamoto (2020), a análise geoestatística tem a finalidade de determinar o modelo de correlação espacial dos pontos de dados, que será usado nos processos de estimativas geoestatísticas, bem como na aplicação das técnicas de simulação estocástica. O modelo de correlação espacial reflete o padrão de distribuição dos pontos de dados e o tipo de distribuição de frequências da variável de interesse.

A geoestatística trata da análise de dados, cuja origem se dispõem caracterizada espacialmente, ou seja, por coordenadas x e y , ditas variáveis regionalizadas.

Matheron (1965) *apud* Fonteles (200) cita que as variáveis regionalizadas apresentam certas características qualitativas ou atributos que representam ou dão uma medida da componente espacial no sentido da sua definição apresentada no item anterior, quais sejam a localização, continuidade e anisotropia, conforme detalhado a seguir:

- **Localização:** Como exposto anteriormente, uma variável regionalizada representa uma realização com posicionamento espacial definido, portanto esta é localizada e as variações inerentes ocorrem dentro de um campo geométrico, ou seja, o espaço geométrico no qual se observa a tendência de se tomar valores espacialmente correlacionados. Os critérios de adoção do campo geométrico são baseados em certas condições físicas da variável regionalizada, tais como uma aceitável homogeneidade. Além do campo geométrico, a variável regionalizada apresenta um suporte geométrico geralmente considerado como um volume que comporta variabilidade espacial identificada. A mudança de suporte, ou seja, das características geométricas deste, poderá ser interpretada como a transformação em uma nova variável regionalizada que tem semelhanças com a precedente, não obstante não seja idêntica;
- **Continuidade:** Esta característica pode ser expressa através de uma flutuação mais ou menos importante dentre os valores de observações vizinhas. Tal flutuação

reflete, por outro lado, um certo grau de dependência ou independência espacial dentre os valores. Por exemplo, nos depósitos estratiformes, a continuidade da espessura de um determinado estrato mineralizado pode ser avaliada pelas flutuações dos valores observados em furos de sondagem. Em termos estatísticos, sejam consideradas duas observações $x(z_i)$ e $x(z_i + h)$, a continuidade é, então, atestada quando $[f(x(z_i)) - f(x(z_i + h))]^2$ tende a zero;

- Anisotropia: A anisotropia está relacionada a uma direção preferencial ao longo da qual os valores não variam bruscamente, enquanto na direção perpendicular o mesmo não se observa. Este fenômeno é também conhecido como zonalidade. Tal característica é essencial para a interpretação do semivariograma experimental, como será visto adiante.

O semivariograma mostra a medida do grau de dependência espacial entre amostras ao longo de um suporte específico e, para sua construção, são usados simplesmente as diferenças ao quadrado dos valores obtidos, assumindo-se uma estacionaridade nos incrementos. Isso significa que o semivariograma é uma medida da variabilidade geológica condicionada pela distância (Landim, 2006).

A função variograma mede a variância entre pontos separados por uma distância h . Assim, para pontos próximos, a diferença é pequena e, portanto, a variância é pequena. Ao aumentar a distância, os valores dos pontos tornam-se mais diferentes e, conseqüentemente, a variância aumenta. Muitas vezes, a variância se estabiliza em torno de uma variância máxima, a partir de certa distância. Isso significa que, mesmo com o aumento da distância, a função variograma irá oscilar em torno da variância máxima, denominada patamar. Esses casos definem os variogramas com patamar (YAMAMOTO, 2013).

Havendo sido elaborado o semivariograma experimental, deve-se buscar um modelo matemático que o represente. A essa etapa dá-se o nome de modelagem do semivariograma experimental.

Yamamoto (2020) comenta que o último procedimento na análise geoestatística se refere à modelagem de variogramas experimentais. Trata-se na realidade de ajustar uma função que descreva matematicamente a correlação espacial. Para isso, procede-se ao ajuste automático ou interativo.

Entre os modelos que consideram que a variância atinge patamar, os mais conhecidos e difundidos são, segundo Landim (2006):

- Esférico: neste modelo a inclinação da tangente junto à origem ($h \cong 0$) é $3C/2a$. É o modelo mais comum, podendo-se afirmar que equivale à função de distribuição normal da estatística clássica;
- Exponencial: neste modelo a inclinação da tangente junto à origem é C/a . C é a assíntota de uma curva exponencial e pode ser equalizada junto à soleira. “a” corresponde ao alcance prático igual à distância segundo a qual 95% da soleira foi alcançada;
- Gaussiana: a curva é parabólica junto à origem e a tangente nesse ponto é horizontal, o que indica pequena variabilidade para curtas distâncias. “a” corresponde ao alcance prático igual à distância segundo a qual 95% da soleira foi alcançada.

Thiesen (2016) explica que o termo krigagem é derivado do nome Daniel G. Krige, que foi o pioneiro ao introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas de mineração. Inicialmente, o método de krigagem foi desenvolvido para solucionar problemas de mapeamentos geológicos, mas seu uso expandiu-se com sucesso no mapeamento de solos, mapeamento hidrológico, mapeamento atmosférico e outros campos correlatos. A diferença entre a krigagem e outros métodos de interpolação é a maneira como os pesos são atribuídos às diferentes amostras. No caso de interpolação linear simples, por exemplo, os pesos são todos iguais a $1/N$ (N = número de amostras); na interpolação baseada no inverso do quadrado das distâncias, os pesos são definidos como o inverso do quadrado da distância que separa o valor interpolado dos valores observados.

A krigagem ordinária nada mais é que a krigagem simples com a média local calculada pela krigagem da média. É o método mais utilizado, pela simplicidade e os resultados que proporciona. A krigagem ordinária é um método local de estimativa e, dessa forma, a estimativa em um ponto não amostrado resulta da combinação linear dos valores encontrados na vizinhança próxima (YAMAMOTO, 2013).

A Figura 8 resume o processo de desenvolvimento da krigagem ordinária.

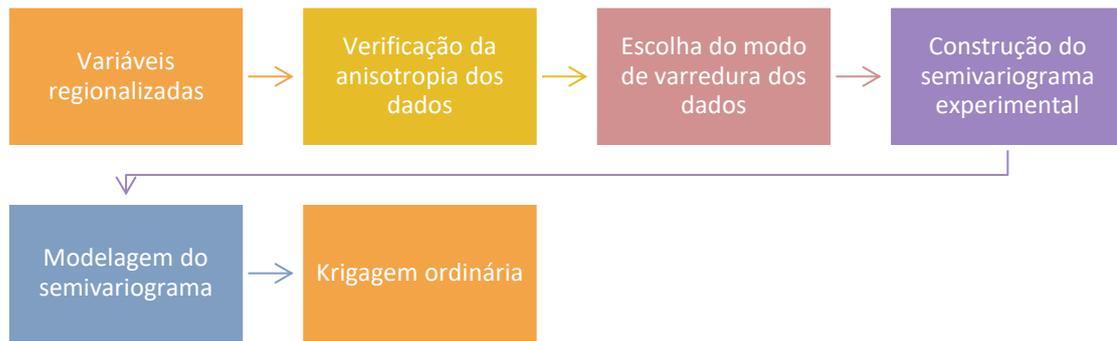


Figura 8 - Processo de desenvolvimento da krigagem ordinária.

2.4.1 Krigagem não linear

O método de krigagem ordinária estabelece como diretriz o comportamento de normalidade da variável descrita. Por muitas vezes, porém, essa hipótese não pode ser verificada, sendo necessária a transformação dos dados.

Nesse contexto, Yamamoto (2013) descreve que as variáveis podem ser contínuas ou discretas. As variáveis contínuas podem apresentar comportamentos distintos revelados pela forma do histograma. Se a distribuição tiver assimetria positiva, há a necessidade de transformação dos dados para evitar a influência dos poucos valores altos na estimativa de pontos de vizinhança, caracterizada por baixos valores.

As estimativas geoestatísticas para os dados transformados são obtidos por meio das krigagens multigaussiana, lognormal e indicadora.

A transformada gaussiana é aquela que permite obter um histograma normal, com média zero e desvio padrão igual a um, qualquer que seja o histograma dos dados originais. Este método gera sempre um histograma simétrico e com variabilidade igual à distribuição normal (YAMAMOTO, 2020).

Yamamoto e Chao (2009) *apud* Yamamoto (2013) citam que há a necessidade de testar se a distribuição de dois, três ou mais pontos é gaussiana. Como essa verificação é muito difícil para distribuições multipontos, adota-se o teste de bigaussianidade, que, na prática, consiste em testar se a distribuição de dois pontos é também gaussiana, por meio da comparação de variogramas.

A hipótese da bigaussianidade dos dados é realizada através do método proposto por Goovaerts (1997) e, havendo sido comprovada a hipótese de multigaussianidade dos dados, é então possível se proceder para às estimativas com base na krigagem não-linear, com ponderadores obtidos conforme a metodologia descrita para a krigagem ordinária e, após a

obtenção dos resultados, a solução adotada para se obter a transformada reversa nada mais é do que a aplicação da função inversa da estimativa corrigida.

Yamamoto (2013) descreve que os valores de interesse a serem transformados são classificados em ordem crescente para obtenção das classes: o primeiro ponto pertence à primeira classe ($r(x_1) = 1$) e o n -ésimo ponto pertence à n -ésima classe ($r(x_n) = n$).

Ainda, o autor complementa que as proporções dessas classes podem ser calculadas dividindo-se cada classe pelo número total de observações n ou, então, dividindo-se por $(n + 1)$, conforme sugerido por Journel e Huijbregts (1978). Dessa divisão se obtêm os quantis da distribuição da variável de interesse. Tomando a função gaussiana inversa desses quantis se calculam escores da distribuição normal padrão (JOURNEL e HUIJBREGTS, 1978 *apud* YAMAMOTO, 2013).

$$y(x_i) = G^{-1}\left(\frac{r(x_i)}{n+1}\right) \quad (3)$$

A Equação (3) apresenta os escores de distribuição normal padrão, considerando-se o quantil $\left(\frac{r(x_i)}{n+1}\right)$, de uma função inversa gaussiana G^{-1} .

Por fim, Yamamoto (2013) mostra que a transformada reversa pode ser obtida aplicando-se a função inversa da estimativa corrigida, conforme Equação (4).

$$Z_{MG}^{**}(x_0) = \varphi^{-1}(Y_{MG}^{**}(x_0)) \quad (4)$$

Em que $Z_{MG}^{**}(x_0)$ é a transformada reversa e $\varphi^{-1}(Y_{MG}^{**}(x_0))$ é a função inversa da transformação estimada corrigida dos valores gaussianos.

A processo para realização da krigagem é apresentado, sistemática e simplificadamente, através da Figura 9.

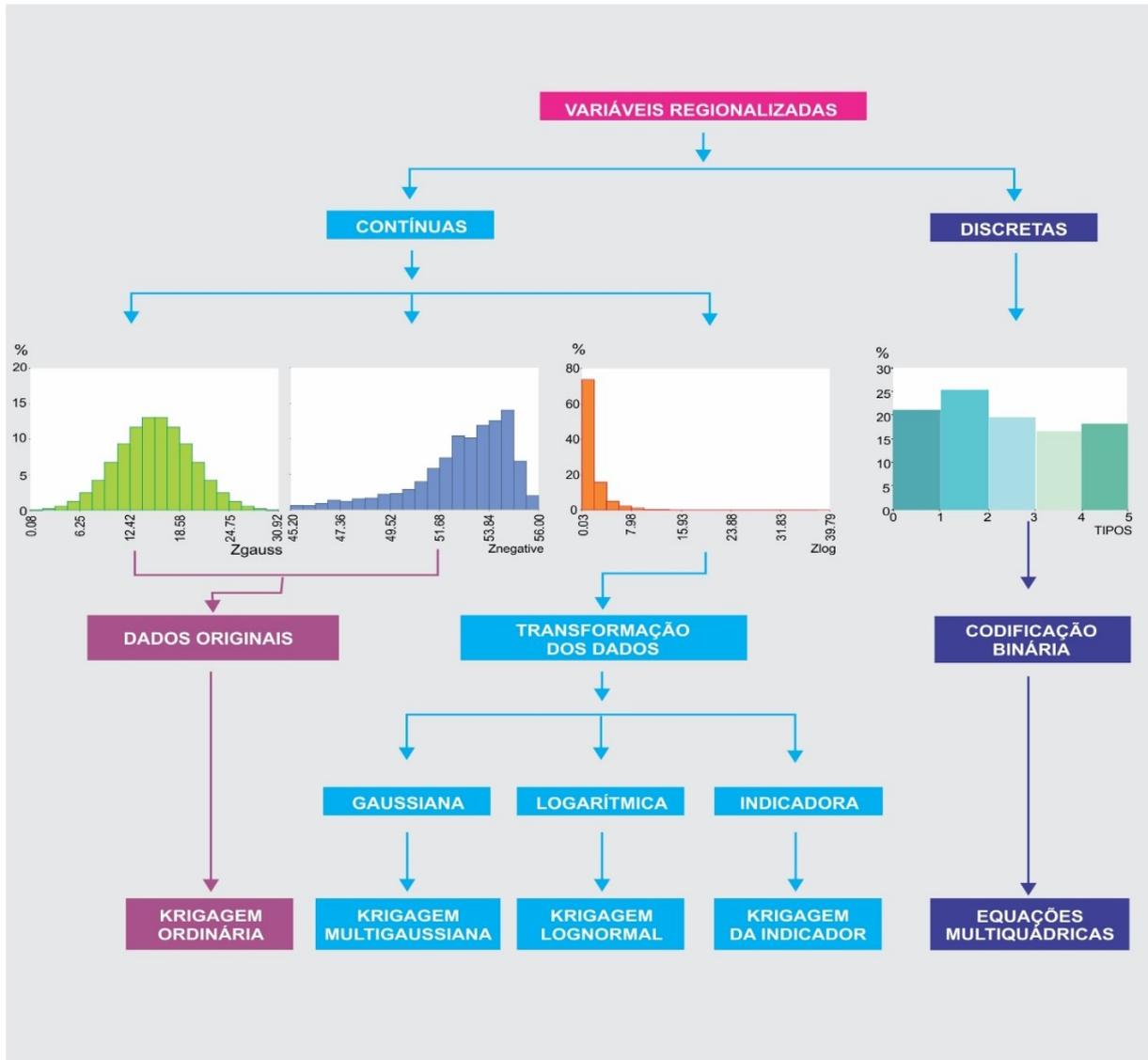


Figura 9 - Procedimento esquemático para desenvolvimento da krigagem. Fonte: Yamamoto (2013).

Por fim, Landim (2006) conclui que não há garantia que o mapa obtido pela krigagem tenha o mesmo histograma, a mesma variância e o mesmo semivariograma dos dados originais, pois trata-se, pela própria natureza do método, de um mapa com valores suavizados, sendo a suavização inversamente proporcional à densidade dos pontos amostrados.

2.5 INSERÇÃO DA PESQUISA NO CENÁRIO ACADÊMICO

O estudo da geotecnia correlacionado à geoestatística vem sendo realizado de longa data e em torno de todo o globo.

Fonteles (2003) resulta da aplicação de técnicas geoestatísticas de análise da variabilidade espacial e de estimativas de dados de sondagem de simples reconhecimento com *Standard Penetration Test* (SPT) objetivando a caracterização geotécnica de uma área com 44km², situada na porção nordeste do Município de Fortaleza (CE). Na pesquisa o autor desenvolve cartas de aptidão para fundações com base no banco de dados SPT, através da krigagem.

Folle (2009) cita que, em sua pesquisa, técnicas geoestatísticas foram selecionadas para atender a necessidade da estimativa de modelagem 3D da estratigrafia e das propriedades mecânicas do solo. A eficiência dos métodos geoestatísticos foi testada em dois bancos de dados que apresentam características geológico-geotécnicas distintas, denominados de área urbana de Passo Fundo/BR e Roma/IT.

Patias (2010) apresenta tese de doutorado com base em zoneamentos de parâmetros geotécnicos provenientes de sondagens rotativas, realizadas no maciço basáltico, localizado na área das obras de Usina Hidrelétrica de Itaipu (Foz do Iguaçu - PR). Estes zoneamentos foram realizados a partir de interpolação dos dados por meio de krigagem ordinária e equações multiquádricas.

Altun, Göktepe, A.B. & Sezer (2013), apresentam artigo cujo objetivo foi mapear os valores corrigidos do Teste de Penetração Padrão (SPT) no centro da cidade de Karşıyaka por abordagem de krigagem. Seis mapas foram preparados por esta abordagem geoestatística em profundidades de 3, 6, 9, 13,5, 18 e 25,5 m e os resultados poderiam vir a ser usados em estudos de microzoneamento, análises de resposta do local, cálculo da capacidade de suporte de subsolos na região e produzir uma série de parâmetros que estão empiricamente relacionados ao número SPT corrigido.

Nasseh, Hafezi Moghaddas, Ghafoori, M. *et al* (2018), em seu estudo, tratam do desenvolvimento de um modelo 3D de engenharia geológica para resultados de teste de penetração padrão (SPT) em depósitos sedimentares de Mashhad City usando abordagens de simulação de indicador sequencial (SIS) e simulação sequencial de Gauss (SGS). A estimativa confiável de valores de SPT pode ser útil na previsão de outras propriedades geotécnicas, como parâmetros de resistência do solo e capacidade de carga.

Kring e Chatterjee (2020) propõe uma metodologia integrada para uma análise de estabilidade de estruturas rochosas, incorporando fatores espacialmente variáveis. Na pesquisa, é realizada a modelagem de dois fatores principais: um parâmetro estrutural categórico (zonas de falha) e um parâmetro geotécnico contínuo (designação de qualidade da rocha - RQD), através de dois algoritmos de simulação geoestatística, ou seja, simulação de indicador sequencial e simulação gaussiana sequencial, que são aplicados para quantificar a incerteza espacial, gerando vários mapas de simulação equiprováveis de zonas de falha e valores de RQD.

3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 LOCALIZAÇÃO

O município de São José possui uma área de 113,6km² (PMSJ, 2021) e situa-se na parte central do litoral catarinense, entre os paralelos 27°31'30'' e 27°38'31'' latitude sul, e os meridianos 48°44'50'' e 48°35'20'' longitude oeste. Faz parte da região metropolitana da grande Florianópolis.

Os municípios limítrofes são: ao norte Biguaçu, ao sul Palhoça e Santo Amaro da Imperatriz, à oeste Antônio Carlos e São Pedro de Alcântara e à leste Florianópolis. O Município também é banhado ao leste pelo Oceano Atlântico.

O território do Município é proporcionalmente distribuído em latitude e longitude, medindo a primeira, em sua maior extensão, 14km e a segunda, 13km.

É cortado no sentido longitudinal pela rodovia BR-101. No sentido leste-oeste há a ocorrências de importantes vias que atravessam diferentes bairros, como a rodovia BR-282 entre os bairros Campinas e Kobrasol, a estadual SC-281 entre Picadas do Sul, Sertão do Maruim e Colônia Santana, a Avenida Osvaldo José do Amaral, que tangencia o Bosque das Mansões, Nossa Senhora do Rosário, Bela Vista, Jardim Cidade Florianópolis, Areias e Serraria e, ainda, a Rua Antônio Jovita Duarte, que atravessa os bairros Flor de Nápolis, Forquilha e Forquilhas.

A Figura 10 mostra a localização do Município e seus limites.

MAPA DE LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC

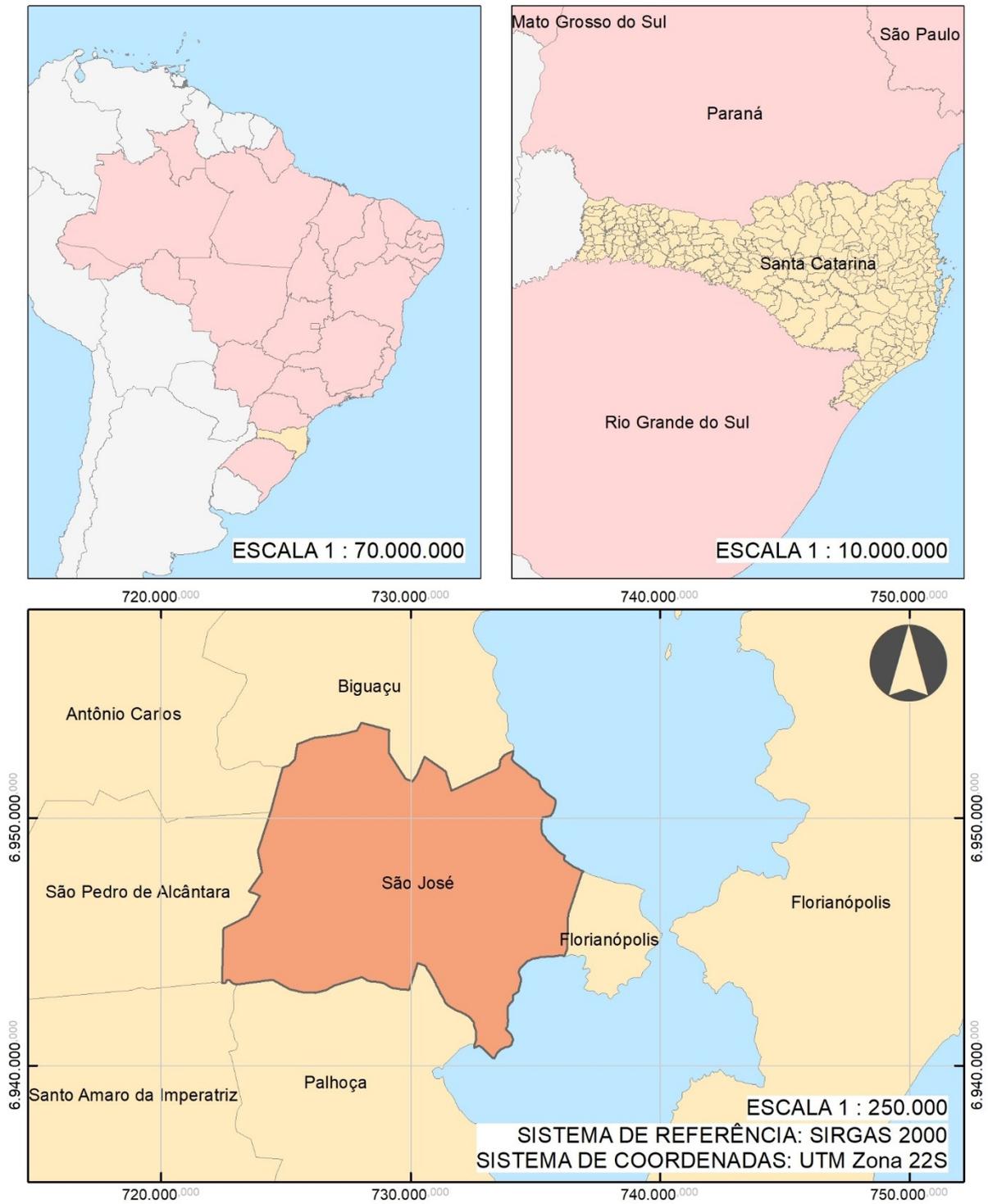


Figura 10 - Localização do município de São José/SC.

3.2 HIDROGRAFIA

Em São José predomina o Clima Subtropical Mesotérmico Úmido com verão quente (segundo classificação de Köppen). A área faz parte do complexo sistema hidrográfico da vertente do Atlântico. É drenado em praticamente 70% do seu território pelo Rio Maruim e seus afluentes (Figura 11).

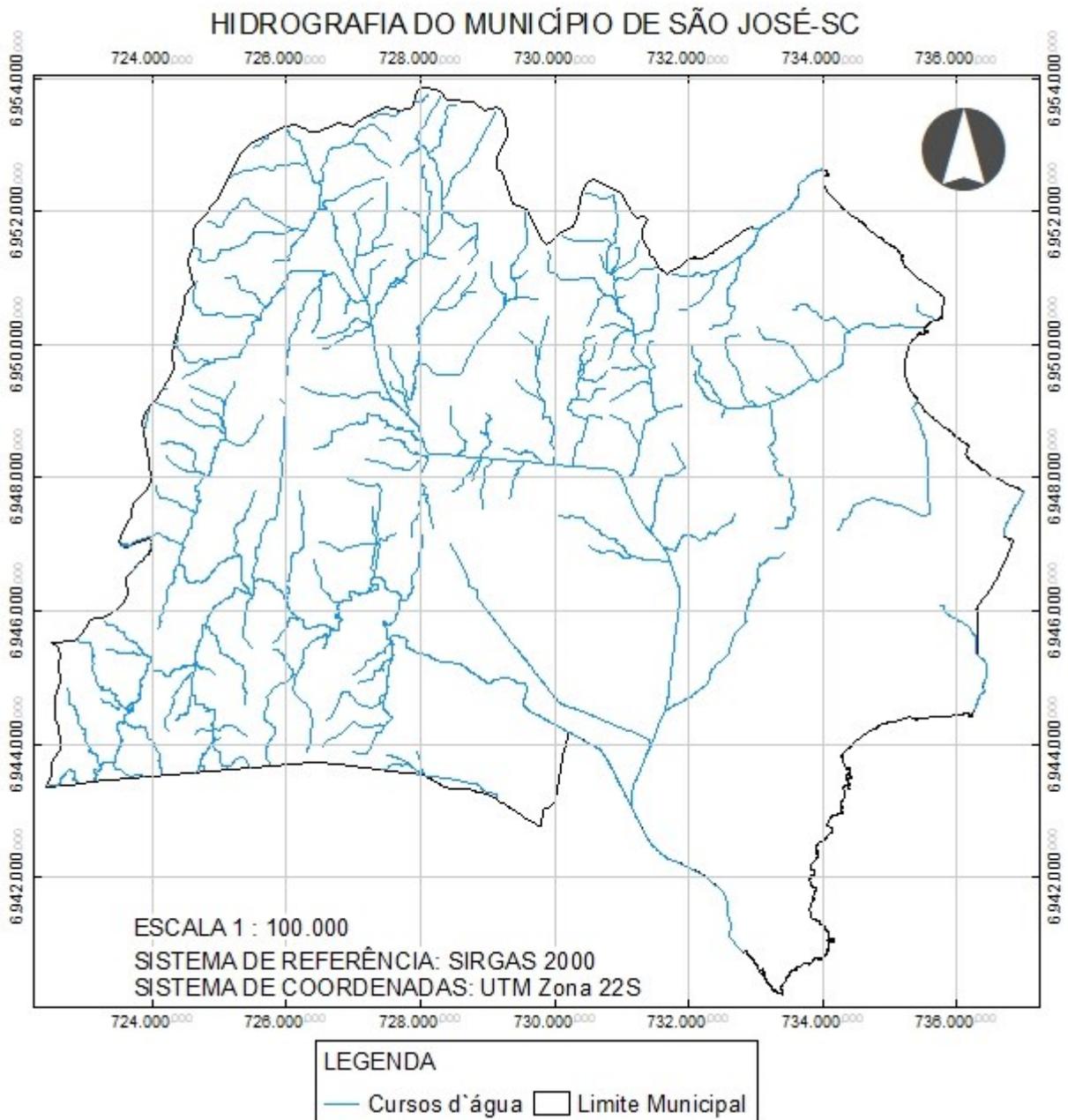


Figura 11 - Hidrografia do município de São José. Fonte: SDS, 2010.

3.3 DIVISÃO POLÍTICA E DEMOGRAFIA

O Município é dividido em 3 distritos: Sede, Barreiros e Campinas e 29 bairros, sendo 2 deles considerados hoje como áreas rurais pelo Plano Diretor, Alto Forquilhas e Zona Rural Sul. A Figura 12 mostra o Mapa Cadastral do município de São José.

A área urbana é concentrada ao longo das baías Norte e Sul, com extensão de aproximadamente 13km no sentido norte-sul. Observa-se também ocupação e expansão urbana ao longo da bacia do Ribeirão Forquilhas.

Quanto à demografia, São José é o município com a quarta maior população do Estado, atrás apenas de Joinville, Florianópolis e Blumenau. No Censo realizado pelo IBGE em 2010, foi levantada uma população de 209.804 pessoas e densidade demográfica de 1.376,78hab/km², com projeção para 2020 de 250.181 pessoas. Nesse mesmo Censo, havia cadastrados 68.827 domicílios urbanos e apenas 743 domicílios rurais.

Quando avaliadas separadamente área rural e área urbana, a demografia varia bastante, sendo, segundo GT-Cadastro (2004) *apud* dos Santos (2004), a densidade urbana média é de cerca de 5.800 habitantes/km² na área urbana e 30 habitantes/km² na área rural.

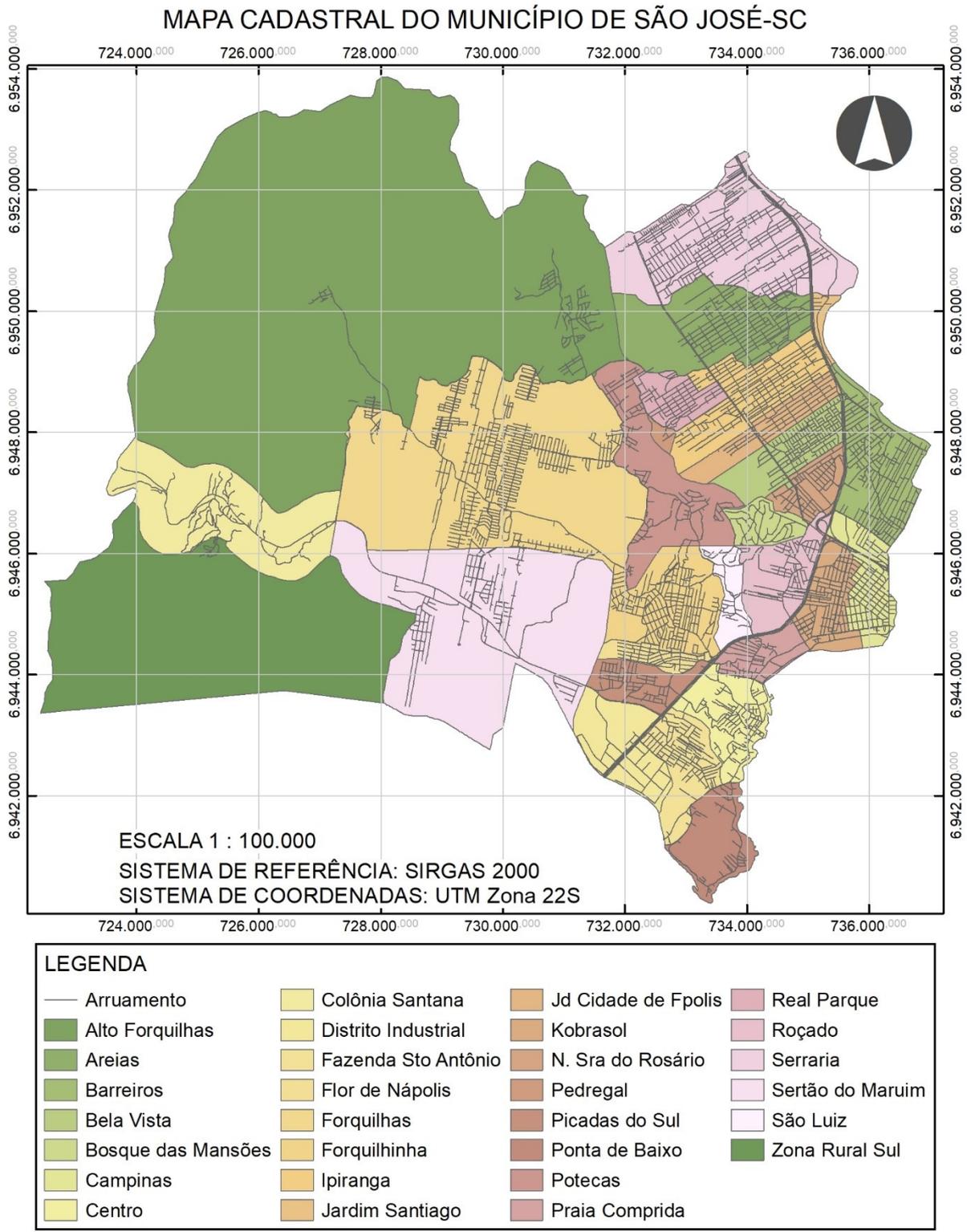


Figura 12 - Mapa cadastral do município de São José. Fonte: PMSJ, 2020.

3.4 RELEVO E DECLIVIDADE

O território pertence ao domínio geomorfológico de embasamentos em estilos complexos, apresentando um relevo irregular, predominando altitudes de 0 a 200 metros e declividades de 0,5 a 20%. A Figura 13 apresenta o modelo digital do terreno.

MODELO DIGITAL DO TERRENO COM HILLSHADE DO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC

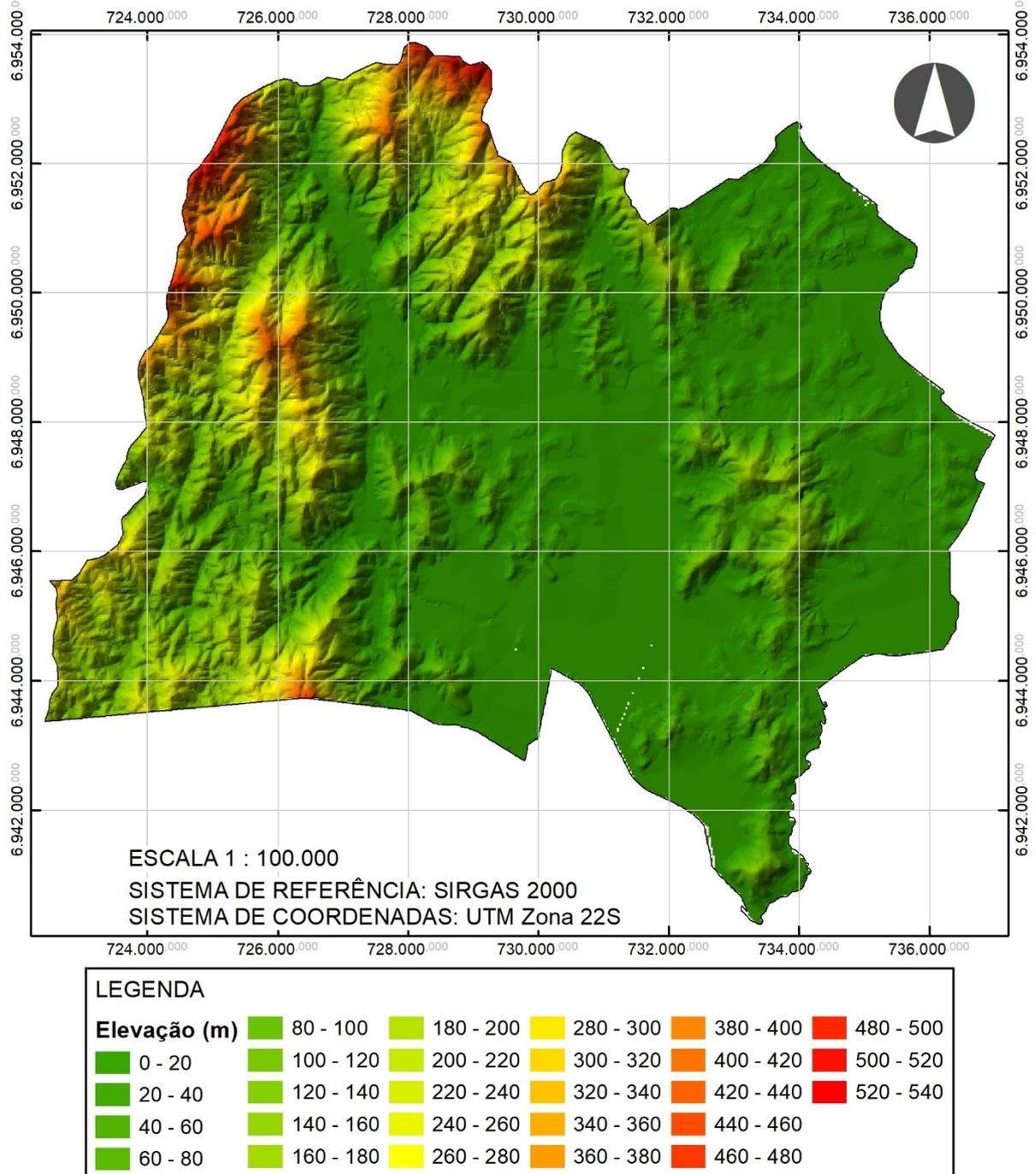


Figura 13 - Modelo digital do terreno com sombreamento de vale de São José. Fonte: Baseado em SDS, 2010.

O relevo predominante no município constitui-se de planícies, em sua maioria referentes às faixas litorâneas e bacias dos rios Maruim e afluentes, Serraria, Três Henriques, Araújo e Bücheler (FARIAS, 2002 *apud* DOS SANTOS, 2004).

A altitude máxima encontrada foi de 532m, no limite municipal com Antônio Carlos. Grande parte do território do Município fica abaixo da cota 20m, com as maiores elevações concentradas na porção oeste e na região dos bairros Bosque das Mansões e Roçado.

Ainda, Farias (2002) *apud* dos Santos (2004), somente 19% da cobertura florestal se desenvolve em terrenos de baixa declividade (0 a 3%) correspondentes a divisores de água e várzeas inundáveis. A cobertura vegetal do município encontra-se bastante transformada, tendo desaparecido quase por completo as formações florestais originais. Nas áreas de planície, intervenções como aterros e drenagens fizeram desaparecer certas espécies vegetais existentes nos manguezais.

O mapa de declividades (Figura 14) mostra que grande parte do território é de plano a ondulado, com a porção oeste forte ondulada e, mais reservado à parte noroeste, é possível identificar pequenos trechos de montanhoso a forte montanhoso.

As áreas planas seguem contornadas por áreas de maiores declividades, que mostram a tendência de formação de solos imperfeitamente drenados.

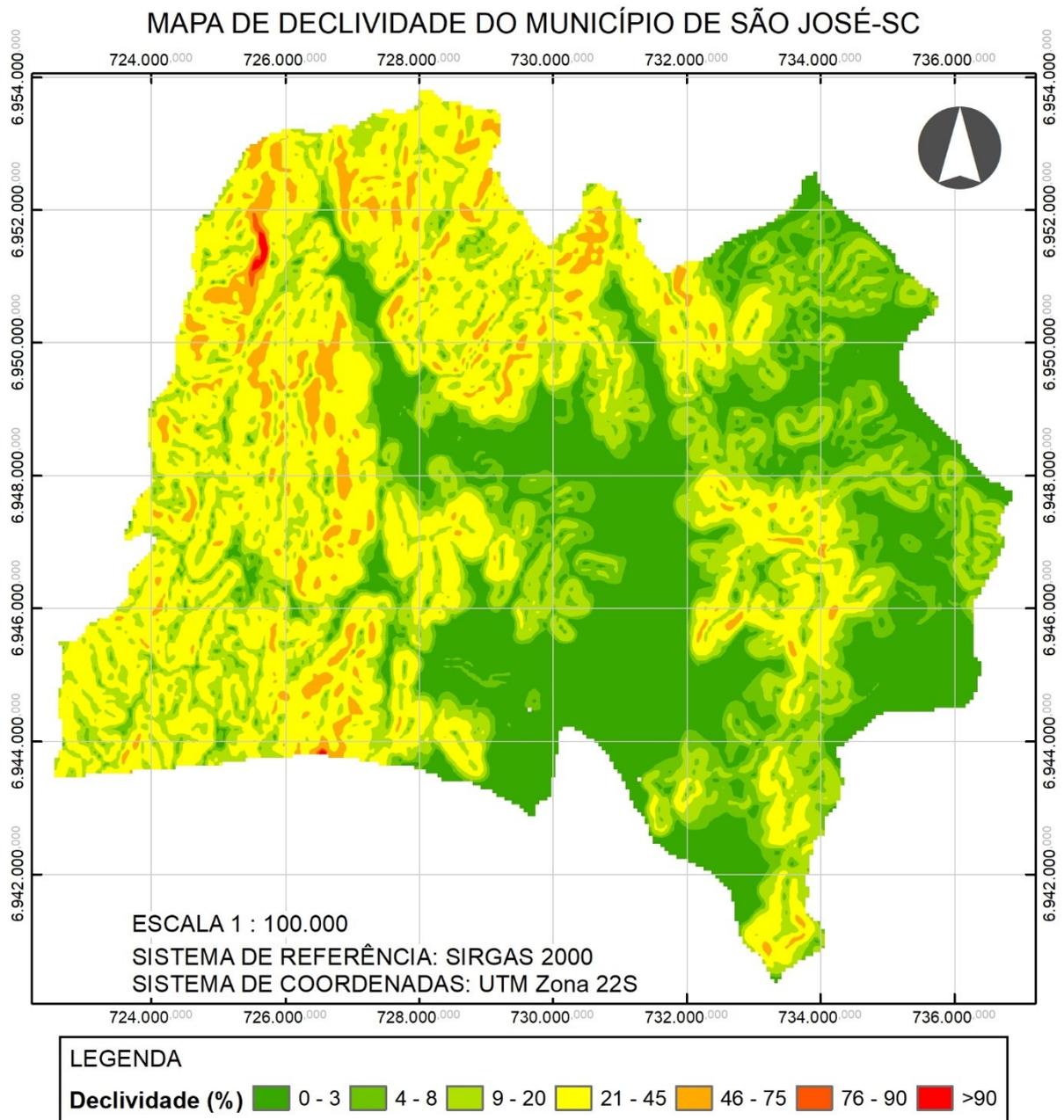


Figura 14 - Mapa de declividade. Fonte: Baseado em SDS, 2010.

3.5 GEOLOGIA E LITOLOGIA

A Figura 15 apresenta a litologia do município de São José.

Geologicamente, o substrato rochoso do município é constituído por gnaisses e migmatitos do Complexo Águas Mornas intrudidos por granitos da Suíte Maruim e da Suíte Intrusiva Pedras Grandes. Essas unidades estão localmente encobertas por formações superficiais na forma de alteritos, depósitos coluviais, colúvio-aluvionares e aluvionares quaternários continentais e marinhos (SBROGLIA e SANCHEZ, 2017).

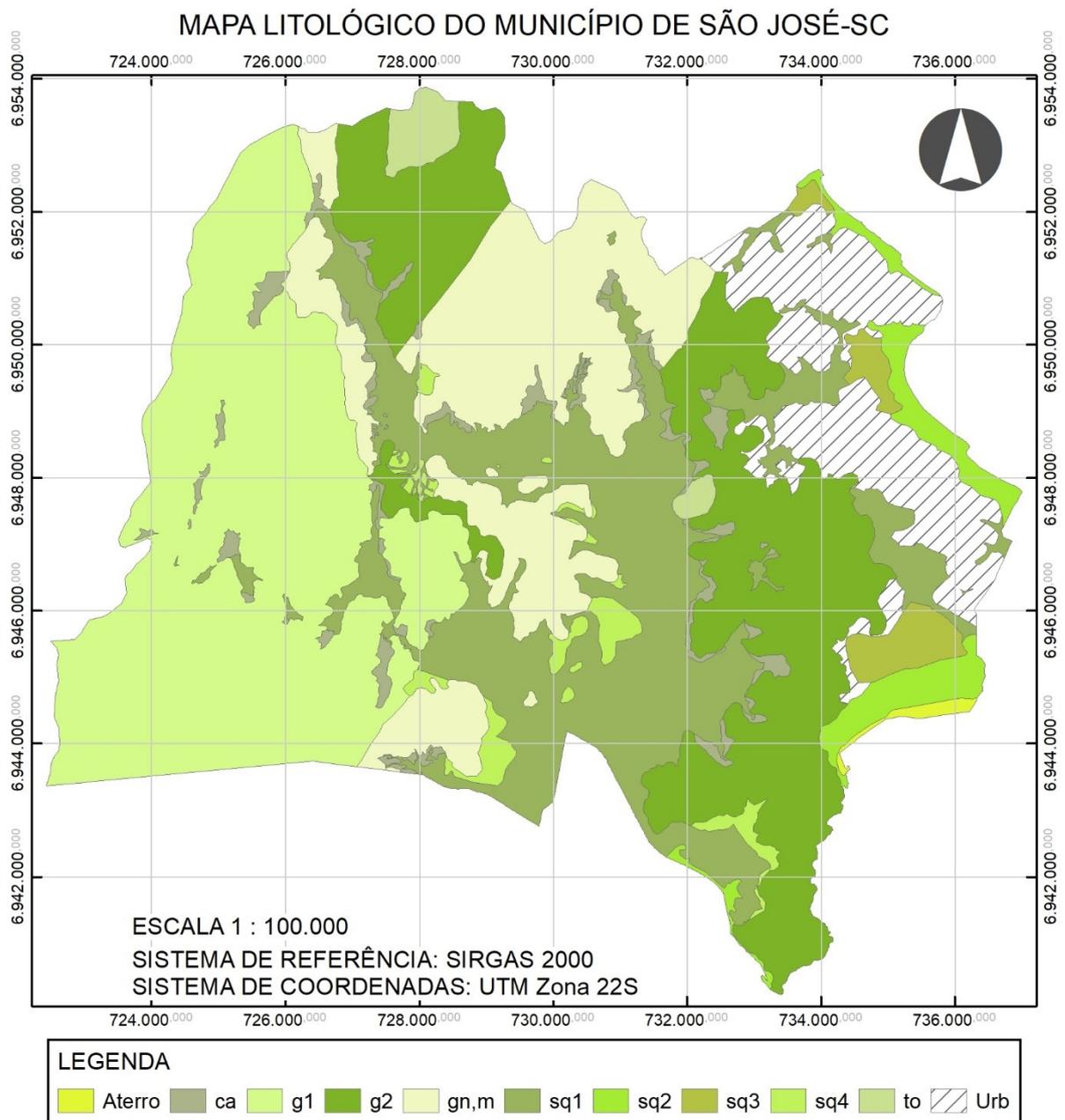


Figura 15 - Mapa litológico do município de São José. Fonte: Baseado em Ministério das Cidades, 2017.

A área densamente urbanizada não foi alvo do mapeamento geológico de origem e, portanto, foi classificada apenas dessa forma. A área de aterro (at) corresponde ao aterro à beira-mar.

3.5.1 Sedimentos Cenozoicos Inconsolidados ou Pouco Consolidados Depositados em Meio Aquoso

Esse domínio compreende terrenos geologicamente recentes, em processo de construção e retrabalhamento. Trata-se de áreas mais baixas com acúmulo de sedimentos erodidos de terrenos mais altos, transportados por rios e depositados ao longo dos seus cursos ou na faixa costeira, onde são retrabalhados pela ação de rios, lagoas e mar.

Compreende os depósitos aluvial e flúvio-marinho, lagunar e marinho, marinho e o terraço fluvial e flúvio-marinho.

A unidade geológico-ambiental Ambiente Fluvio-lacustre (DCfl) compreende as áreas em que os rios cortam os terrenos ocupados por antigas lagoas e lagunas costeiras, as quais se apresentam hoje total ou parcialmente colmatadas, resultando em depósitos de areias e lamas com restos orgânicos vegetais de origem lagunar, interdigitados com cascalhos e areias grossas a finas, relacionados à sedimentação fluvial. Constituem áreas planas, que podem ocupar extensas superfícies e se estender para muito além das margens dos rios, muitas vezes abaciadas, com elevada dificuldade de drenagem. As áreas situadas ao longo dos rios são inundadas em épocas de cheias (VIERO, 2016).

A unidade geológico-ambiental Ambiente Lagunar (DCl) compreende depósitos arenosos associados a margens de corpos aquosos intercalados com depósitos argilosos de fundo lagunar e/ou fluvial. São áreas onde ocorrem solos mal drenados e que estão sujeitas a inundações periódicas. A unidade também engloba depósitos paleolagunares constituídos por turfas ou depósitos lamosos ricos em matéria orgânica, cuja origem está associada ao processo natural de colmatação de corpos aquosos costeiros, que vão sendo progressivamente vegetados à medida que suas lâminas d'água diminuem. São áreas muito mal drenadas, em que o escoamento de água é praticamente inexistente, onde ocorrem solos com material orgânico em diversos estágios de decomposição. A unidade pode ainda conter acumulações significativas de conchas calcárias (VIERO, 2016).

A unidade geológico-ambiental Ambiente Marinho Costeiro (DCmc) está presente na faixa litorânea, em especial, no litoral norte e no extremo sul do Estado. Consiste em depósitos sedimentares gerados em ambiente de praia, englobando terraços marinhos e cordões arenosos, nos quais sedimentos arenosos foram depositados pela ação do mar e, em alguns casos, retrabalhados pela ação dos ventos. Os solos são bastante arenosos, pobres quimicamente e

muito profundos. As formas de relevo associadas a essa unidade são as Planícies Costeiras (VIERO, 2016).

A unidade geológico-ambiental Ambiente Misto (Marinho/Continental) (DCm) abrange os mangues. Estes ocorrem em ambiente de transição entre os ambientes terrestre e marinho, sujeitos ao regime das marés e caracterizados por biodiversidade típica. Os terrenos, em geral, ricos em matéria orgânica, são constituídos por intercalações irregulares de sedimentos arenosos e argilosos. Os solos são pouco evoluídos morfologicamente, apresentando-se como uma massa pastosa de coloração cinzenta, com materiais sulfídricos formados em ambiente redutor, associados a áreas de marés, onde a água salobra é biologicamente reduzida a sulfetos. Normalmente, esses solos estão associados à elevada salinidade (VIERO, 2016).

3.5.2 Sedimentos Cenozoicos Inconsolidados do tipo Coluvião

Viero (2016), define essa unidade geológica como aquele que compreende os depósitos de sedimentos resultantes da erosão de terrenos mais elevados que sofreram transporte, principalmente por ação da gravidade e de fluxos de água, até as áreas mais baixas, na base das encostas.

3.5.3 Séries Graníticas Subalcalinas

Essa unidade compreende as rochas não deformadas classificadas nas séries magmáticas subalcalinas, englobando as calcialcalinas (baixo, médio e alto-K) e astoleíticas. São rochas cristalinas, de textura homogênea, com granulação variando de média a grossa. Para o município de São José, engloba as unidades geológicas São Pedro de Alcântara, granodiorito Alto da Varginha e o Tonalito Forquilha.

3.5.4 Granitoides Intensamente Deformados: Ortognaisses

Esse domínio é formado por rochas granitoides resultantes da fusão parcial da fração crustal primitiva, que foram intensamente deformadas e metamorfizadas, gerando uma associação de ortognaisses (VIERO, 2016).

A unidade compreende o Complexo Águas Mornas, que correspondem a rochas intensamente deformadas, classificadas nas séries graníticas subalcalinas, englobando as calcialcalinas (baixo, médio e alto-K) e as toleíticas, nas quais os minerais diagnósticos são hornblenda, biotita, titanita e epídoto.

3.5.5 Litologia

O Quadro 4 descreve brevemente a classificação geológica e a litologia que compõe e características básicas.

Quadro 4 - Classificação geológica, litologia e características básicas. Fonte: Baseado em Sbroglia e Sanchez, 2017.

| Geologia | Litologia | Características Básicas |
|--------------------------------|-------------------------------|--|
| Complexo Águas Mornas | Gnaisse | Rochas com alternância entre bandas escuras, ricas em anfibólio e biotita de orientação planar e bandas claras, quartzofeldspáticas. |
| | Migmatito | Rochas extremamente heterogêneas constituídas por enclaves tonalíticos a quartzo dioríticos anfibolitizados ou não, com formatos arredondados ou fusiformes, que, por assimilação gradam a ortognaisses quartzo monzoníticos. |
| Tonalito Forquilha | Tonalito | Rochas equigranulares médias a grossas de coloração cinza escuro, mesocráticas, ricos em hornblenda. |
| Granodiorito Alto da Varginha | Granodiorito | Rocha mesocrática, equigranular média a fina, por vezes mostrando orientação de fluxo. |
| Granito São Pedro de Alcântara | Granito | Rochas mesocráticas cinza escuro, de granulação grossa, com fenocristais esbranquiçados de feldspato alcalino e, eventualmente, de plagioclásio. São frequentes os enclaves do Tonalito Forquilha e Granodiorito Alto da Varginha. |
| Formações Superficiais | Depósitos Colúvio-aluvionares | Colúvios constituídos de blocos de grande dimensão embalados por matriz argilo-arenosa a areno-argilosa, de composição mineralógica dependente da rocha fonte que formam as |

| Geologia | Litologia | Características Básicas |
|-----------------|------------------------------|--|
| | | encostas das elevações que ocorrem na área. |
| | Depósitos Flúvio-aluvionares | Formados pela deposição de sedimentos transportados pelos rios Forquilhas e Maruim, durante os períodos de cheias e transbordamento do fluxo para as áreas marginais ao do canal fluvial, nas áreas de planície de inundação. Constituídos por sedimentos silticoargilosos, arenosos e cascalho. |

Para essa dissertação, o mapa litológico foi simplificado, unindo-se unidades geológicas semelhantes para melhor os resultados do geotécnico, conforme apresentado na

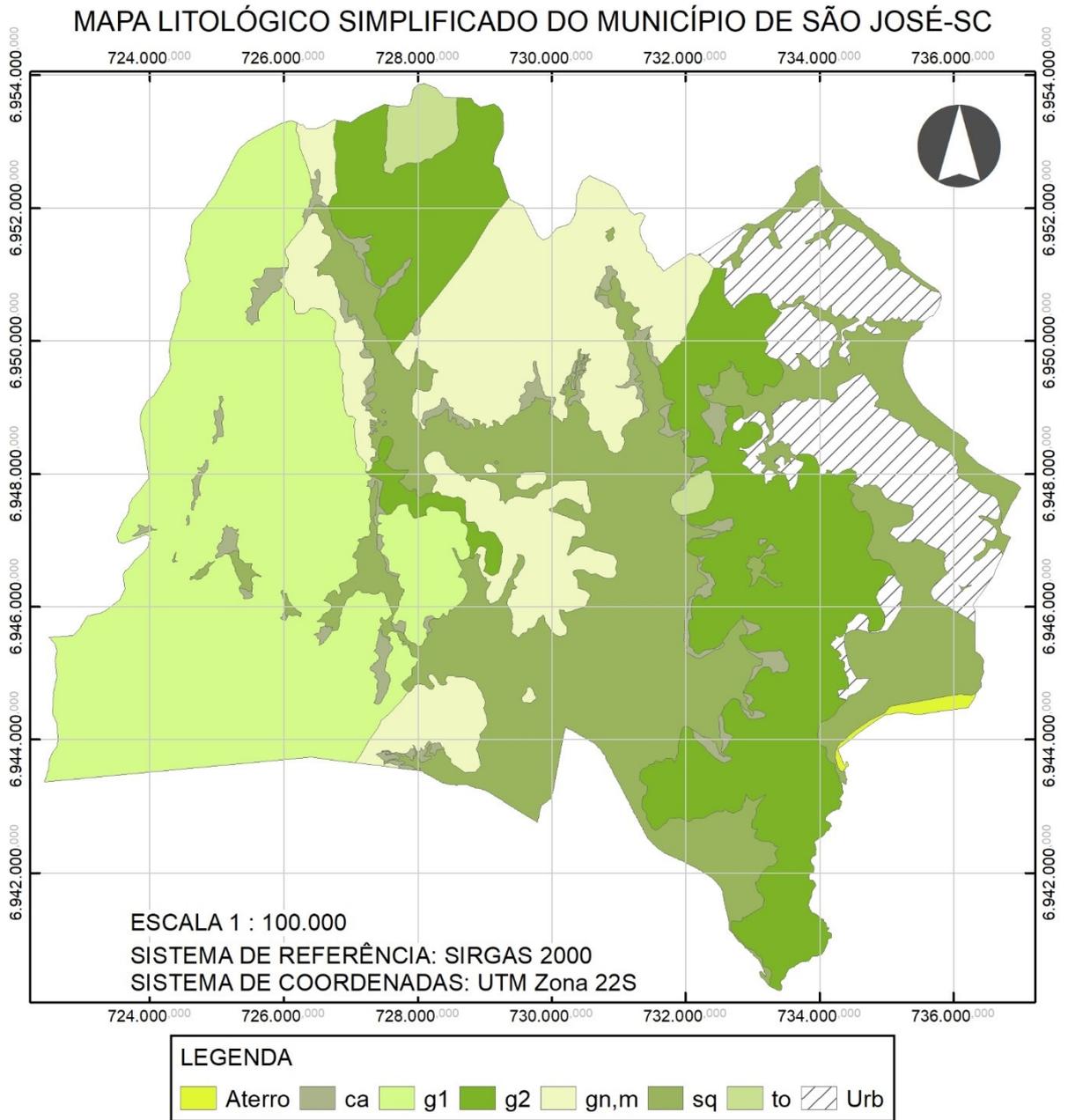


Figura 16 - Mapa litológico simplificado do município de São José. Fonte: Baseado em Ministério das Cidades, 2017.

3.6 PEDOLOGIA

Os solos encontrados no Município podem ser descritos conforme os itens 3.6.1 a 3.6.4.

A área definida como URB no mapa pedológico (Figura 17) foi assim descrita por já estar amplamente adensada há época em que o levantamento foi realizado.

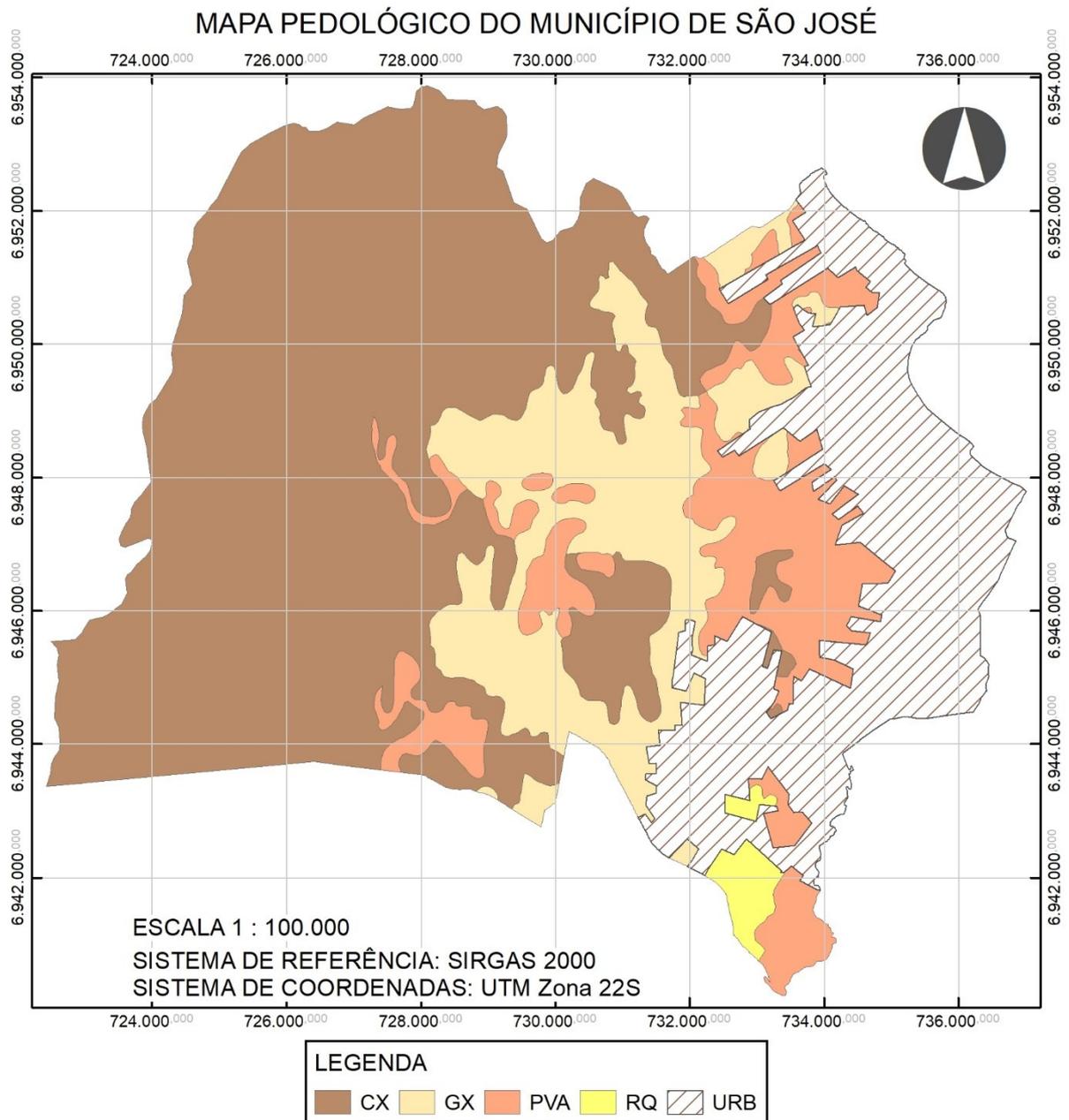


Figura 17 - Mapa pedológico do município de São José. Fonte: Adaptado de Epagri, 2007.

3.6.1 Neossolos Quartzarênicos

Solos sem contato lítico dentro de 50cm de profundidade, com sequência de horizontes A-C, porém apresentando textura areia ou areia franca em todos os horizontes até, no mínimo, a profundidade de 1,50m a partir da superfície do solo ou até contato lítico.

São essencialmente quartzosos, tendo nas frações areia grossa e areia fina 95% ou mais de quartzo, calcedônia e opala e, praticamente, ausência de minerais primários alteráveis (menos resistentes o intemperismo).

Compreendem solos minerais, não hidromórficos, profundos ou muito profundos, originados de sedimentos arenosos não consolidados do Quaternário, com textura areia ao longo do perfil e sequência de horizontes A, C. Em muitos casos não se verifica desenvolvimento de horizontes, salvo um horizonte A pouco expresso com cerca de 15 a 20cm de espessura, bruno-acinzentado escuro ou bruno claro acinzentado, normalmente sem organização estrutural definida, mas quando presente é fraca muito pequena granular e grãos simples, consistência solta, não plástica e não pegajosa. O horizonte C é de coloração mais clara (bruno, bruno forte ou bruno-amarelado), sem estrutura e com consistência idêntica a do horizonte subjacente (EMBRAPA, 2004).

3.6.2 Gleissolos Hápicos

Solos constituídos por material mineral com horizonte glei iniciando-se dentro dos primeiros 50cm ou entre 50cm e 150cm da superfície, imediatamente abaixo de horizonte A ou E. Sem horizonte sulfúrico, caráter sálico, horizontes H ou A húmico, proeminente ou chernozêmico.

Não apresenta horizonte vértico ou B plânico acima ou coincidente com horizonte glei, tampouco qualquer outro tipo de horizonte B diagnóstico acima do horizonte glei, ou textura exclusivamente areia ou areia franca em todos os horizontes até a profundidade de 150cm a partir da superfície do solo ou até um contato lítico. Horizonte plântico se presente deve estar à profundidade superior a 200cm da superfície do contato lítico.

Os solos desta classe são caracterizados pela forte gleização, em decorrência do regime de umidade redutor que se processa em meio anaeróbico, com muita deficiência ou mesmo ausência de oxigênio devido ao encharcamento do solo por um longo período ou mesmo durante o ano todo. Apresentam sequência de horizontes ACg, AgCg, ABigCg ou ABtgCg, neste último caso com gradiente textural acentuado, mas não o suficiente para caracterizar mudança textural abrupta. São em geral pouco profundos, mal ou imperfeitamente drenados e com

permeabilidade muito baixa, principalmente em se tratando de variedade de textura argilosa e de argila de atividade alta (EMBRAPA, 2004).

Ainda, Embrapa 2004 cita os Gleissolos háplicos em Santa Catarina como formados de sedimentos recentes, próximos ou às margens dos rios, de materiais colúvio-aluviais sujeitos a condições de hidromorfia em terraços fluviais, lacustres ou marinhos, ou ainda em áreas abaciadas ou depressões do terreno, sob vegetação dos tipos floresta tropical de várzea floresta subtropical de várzea e campos tropical e subtropical de várzea.

3.6.3 Cambissolos Háplicos

São constituídos por material mineral com horizonte B incipiente subjacente a qualquer tipo de horizonte superficial (exceto hístico com 40cm ou mais de espessura) ou horizonte A chernozêmico, quando o B incipiente apresentar argila de atividade alta e saturação por bases alta.

Plintita, petroplintita, horizonte glei e horizonte vértico, se presentes, não satisfazem os requisitos para plintossolos, Gleissolos e vertissolos, respectivamente. Não possuem horizonte hístico, A húmico, ou caráter flúvico dentro de 120cm a partir da superfície do solo.

Compreende solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B incipiente bastante heterogêneo, tanto no que se refere à cor, espessura e textura, quanto no que diz respeito à atividade química da fração argila e saturação por bases. Este horizonte situa-se imediatamente abaixo de qualquer tipo de horizonte A, exceto o fraco, ou sob horizonte H turfoso, possuindo sequência A, Bi, C ou H, Bi, C. São derivados de materiais relacionados a rochas de composição e natureza bastante variáveis, desde as mais antigas que constituem o embasamento do Complexo Brasileiro até as de origem recente, passando pelas metamórficas do Complexo Brusque, pelas intrusivas graníticas referidas ao Eo-Paleozóico, pelas sedimentares do Paleozóico, pelo arenito Botucatu e pelas efusivas da Formação Serra Geral (EMBRAPA, 2004).

Ainda, Embrapa 2004 cita que são bem a moderadamente drenados, pouco profundos a profundos, apesar de ocorrerem perfis rasos (< 50cm) ou muito profundos (> 200cm). A espessura do horizonte A também varia muito, via de regra, de 15 a 80cm.

Para a região em estudo, a ocorrência de cor que varia entre amarelo avermelhado ao vermelho com o horizonte superficial contrastando ora mais ora menos com os horizontes subjacentes. Cabe citar também a existência de Cambissolos derivados de sedimentos aluviais,

sendo estes normalmente marcados por incremento marcante de argila do horizonte A para o B.

3.6.4 Argissolos Vermelho-Amarelos

Solos constituídos por material mineral, apresentando horizonte B textural imediatamente abaixo do A ou E, com argila de atividade baixa ou com argila de atividade alta conjugada com saturação por bases baixa e/ou caráter alítico na maior parte do horizonte B e, satisfazendo, ainda, os seguintes requisitos:

- Horizonte plíntico, se presente, não satisfaz os critérios para plintossolo;
- Horizonte glei, se presente, não satisfaz os critérios para Gleissolo.

Compreende solos minerais, não hidromórficos, com horizonte B textural, em geral vermelho amarelado ou bruno avermelhado, sob horizonte A moderado, ou proeminente, ou mesmo chernozêmico, desde que a atividade da argila seja baixa. Pode ser tanto de argila de atividade baixa quanto alta, álicos, distróficos ou eutróficos, e possui sequência de horizontes A, Bt, C ou, mesmo frequentemente A, E, Bt, C. Abrange desde solos com mais de 2 metros de profundidade (muito profundos), até perfis com pouco mais de 50 centímetros (pouco profundos), e desde moderadamente até acentuadamente drenados (EMBRAPA, 2004).

Formam-se em áreas de relevo suave ondulado até forte ondulado.

4 MATERIAIS E MÉTODO

A criação de uma base de dados SPT em ambiente SIG tem inúmeras aplicações, conforme descrito anteriormente. A associação dessa base de dados georreferenciada a um mapa geotécnico auxilia em estudos preliminares no âmbito das fundações, seja através do conhecimento prévio da profundidade estimada do solo, ou uma avaliação do plano executivo para certos tipos de fundações, como estabilização de taludes, rebaixamento do lençol freático, ou ainda através da análise da viabilidade econômica de um empreendimento, considerando a capacidade suporte do solo e o tipo mais adequado de fundação de um determinado empreendimento de pequeno, médio ou grande porte.

Para tanto, esta dissertação tem por metodologia desenvolver uma base de dados a partir dos ensaios de sondagem SPT obtidos e, ao unir dados geográficos preexistentes, como mapa cadastral do Município, mapa altimétrico, pedológico e geológico, obter superfícies de impenetrável e níveis d'água e por fim estimar a superfície resistente dos solos para possíveis soluções de projetos de fundações.

O fluxograma da Figura 18 demonstra de forma objetiva a metodologia deste trabalho.

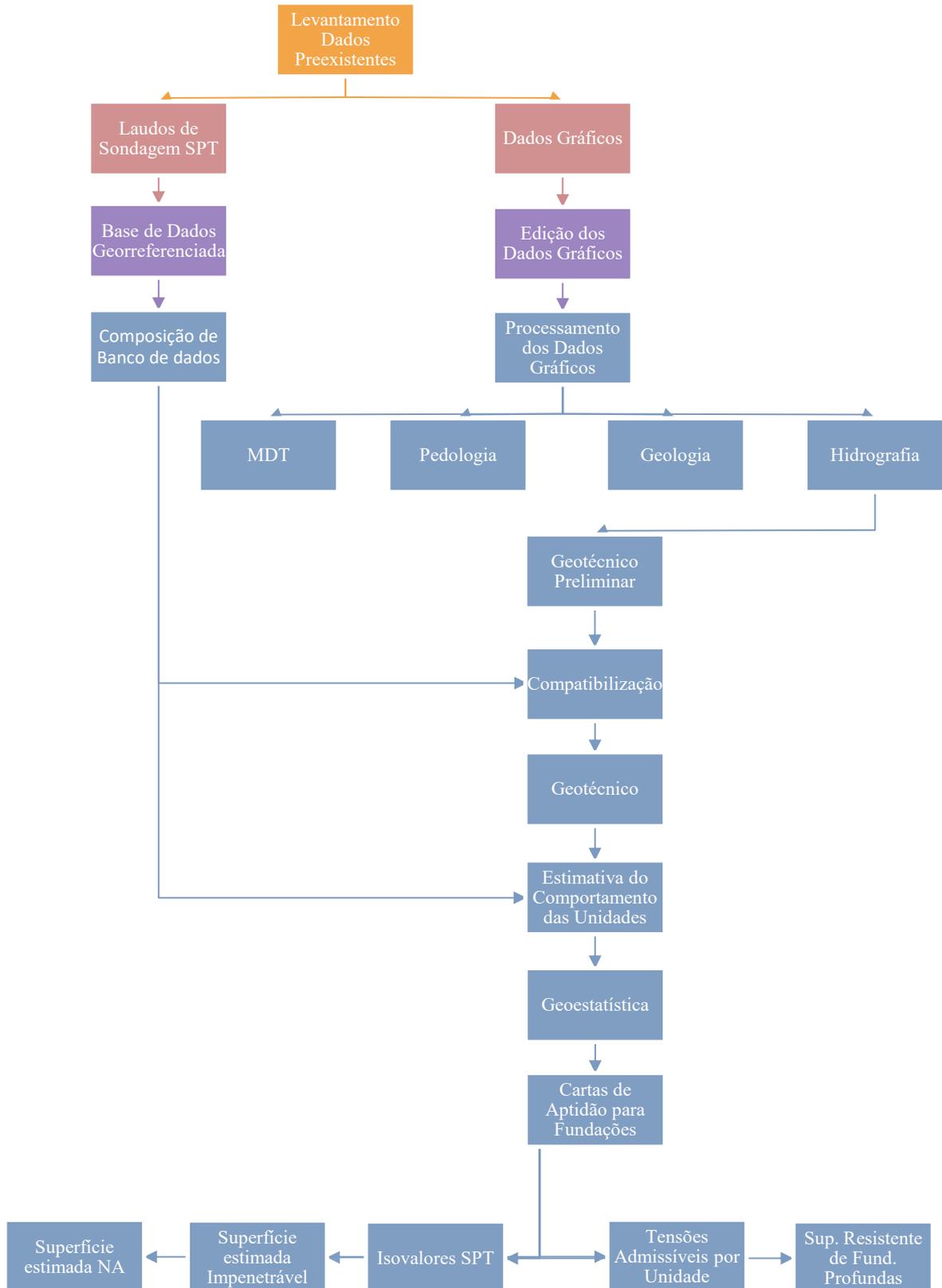


Figura 18 - Fluxograma referente à metodologia utilizada.

4.1 LEVANTAMENTO DE DADOS PREEXISTENTES

No desenvolvimento dessa pesquisa foram adquiridos dados junto ao Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Ministério das Cidades, à Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão rural de Santa Catarina (Epagri), à Secretaria de Estado de Desenvolvimento Sustentável (SDS), Prefeitura Municipal de São José (PMSJ), Laboratório de Mapeamento Geotécnico da Universidade Federal de Santa Catarina (LAMGEO). As informações utilizadas, vinculadas ao órgão responsável pelo fornecimento, estão dispostas no Quadro 5.

Quadro 5 - Dados adquiridos e suas respectivas configurações.

| Tema | Escala | Formato | Fonte |
|------------------|-----------------------------|-----------------|-----------------------------|
| Limite Municipal | 1:10.000 | Vetorial | PMSJ |
| Cadastro Urbano | 1:10.000 | Vetorial | PMSJ |
| Mancha Urbana | 1:100.000/1:10.000/1:10.000 | Raster/Vetorial | Epagri/PMSJ/LAMGEO |
| Declividade | 1:10.000 | Raster | SDS |
| Curvas de Nível | 1:10.000 | Raster | SDS |
| Hidrografia | 1:10.000 | Vetorial | SDS |
| Mapa Geológico | 1:100.000 | Vetorial | CPRM/Ministério das Cidades |
| Mapa Pedológico | 1:100.000 | Vetorial | EPAGRI |

Todos os dados do Laboratório de Mapeamento Geotécnico da UFSC e os demais obtidos junto à Prefeitura Municipal, foram cedidos mediante termo de responsabilidade para uso acadêmico. Os demais dados gráficos foram obtidos por web, no endereço eletrônico das respectivas fontes.

Os laudos de sondagem SPT foram cedidos pelas empresas responsáveis, através do contato por e-mail e retirada dos dados referentes ao contratante.

4.2 DADOS GRÁFICOS – EDIÇÃO E PROCESSAMENTO

Após aquisição dos mapas, foi realizada uma triagem básica, com o objetivo de selecionar os dados mais atuais, mais confiáveis e com melhor escala.

Foram necessárias edições de todos os mapas para compatibilização do contorno, atualização da base de dados, limpeza e organização de temas.

Todos os temas sofreram algum tipo de edição, para deixá-los compatíveis entre si. O sistema de coordenadas definido foi o Sistema Universal Transverso de Mercator (UTM), na

zona 22S e o sistema de referência o SIRGAS 2000. O *datum* vertical utilizado foi o referencial do marégrafo de Imbituba/SC.

O limite municipal adquirido junto à Prefeitura não era compatível com o limite de outros mapas adquiridos anteriormente, como o geológico e o pedológico. As principais diferenças encontradas foram devido à diferença de escala entre os mapas e a inclusão do aterro à beira-mar. Para que essas divergências não gerassem erros no processamento dos mapas, todos foram adequados ao limite municipal fornecido pela Prefeitura.

Na parte cadastral, não houve necessidade de alterações.

Para a delimitação da mancha urbana de 2011, foram unidas as feições do traçado urbano em uma versão anterior (FELISBINO, 2011) de dados fornecidos pelo Município.

Os mapas geológico e pedológico sofreram edições de nomenclatura e simplificações que serão descritas a seguir.

4.2.1 Mapa cadastral

O mapa cadastral apresenta toda a divisão política do Município, com os 29 bairros, quadras, lotes e arruamento. Ele auxilia na localização dos pontos e no entendimento da distribuição por bairros. Em termos práticos, foi através do mapa cadastral que foi possível iniciar o processo de tomada de decisão de delimitação da área de influência dos tratamentos estatísticos, descrito mais à frente.

4.2.2 Modelo digital do terreno

INPE (2021) define o modelo digital do terreno como uma representação matemática da distribuição espacial da característica de um fenômeno vinculada a uma superfície real. A superfície é em geral contínua e o fenômeno que representa pode ser variado. Nessa pesquisa ele foi elaborado para auxiliar no controle e validação dos resultados obtidos no mapeamento geotécnico preliminar e para elaboração dos mapas de aptidão para fundação e foi elaborado a partir do mosaico da Secretaria de Desenvolvimento Sustentável/SC. A Figura 19 resume o fluxo de criação do MDT.



Figura 19 - Fluxo de criação do MDT.

Inicialmente foram adquiridas as cartas da SDS que compõem o município, em formato *tif*. Para unir o mosaico, foi preciso criar um arquivo *raster* base, já georreferenciado (através do comando *create raster dataset*).

Em seguida, foram adicionadas as cartas, usando a base recém-criada e logo após, com a ferramenta *clip*, foi obtido o arquivo *tif* com os limites municipais.

A partir do arquivo *raster* devidamente recortado, foram extraídas as curvas de nível, distribuídas de metro em metro (comando *contour*) e, por fim, foi realizada a interpolação através de uma rede triangular irregular (ferramenta *tin*) que representa um modelo matemático para valores de altitude. A Figura 20 apresenta a sequência de geração do MDT.

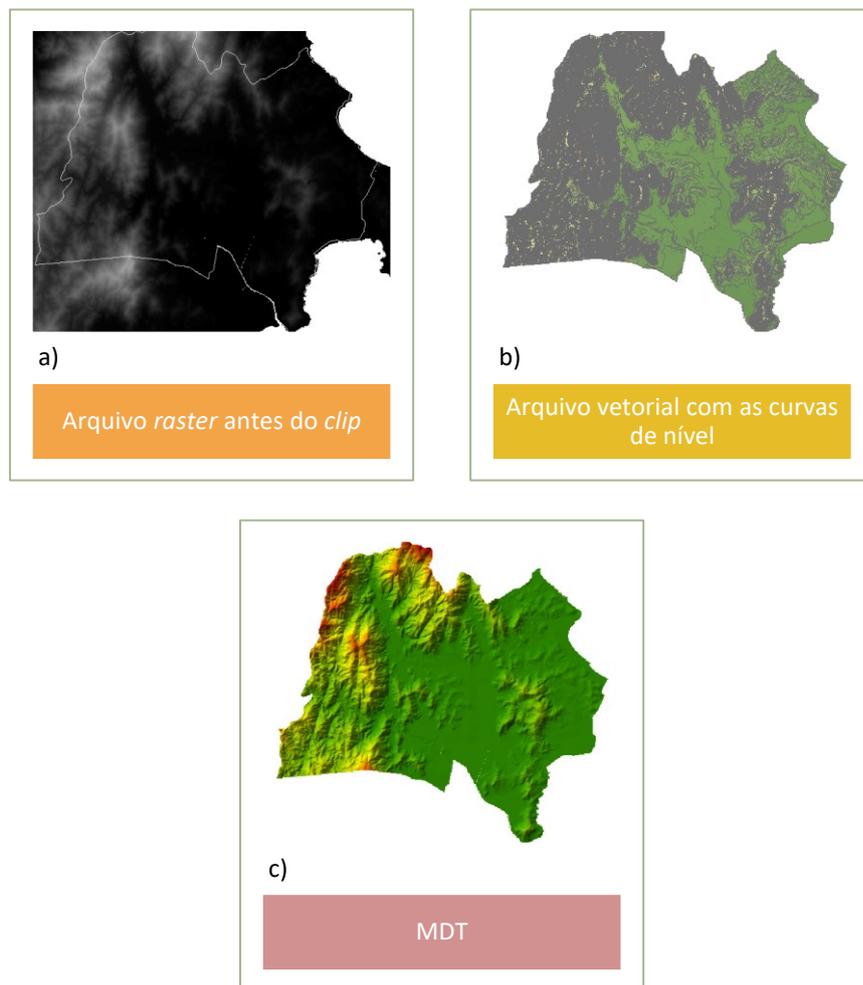


Figura 20 - Sequência de geração do MDT.

4.2.3 Mapa de declividades

Segundo Higashi (2006), a ocorrência de solos pode ser estimada também em função da declividade ou cota de elevação.

A partir do MDT pôde-se extrair automaticamente a variável declividade, expressa em graus e em porcentagem. O processamento automático no SIG para a construção do mapa de declividade utiliza o MDT em formato grid (matricial) de dados de elevação espaçados regularmente. O valor de declividade é calculado para toda a área de interesse por meio da função de derivação na vizinhança de cada célula (MIRANDA apud SBROGLIA, 2015).

Para criar o mapa de declividade, foi gerado um *raster* a partir do MDT em *tin* (comando *tin to raster*) e, com a imagem *raster* criada, foi criada a superfície (ferramenta *slope*). A Figura 21 apresenta a sequência de geração do mapa de declividades.

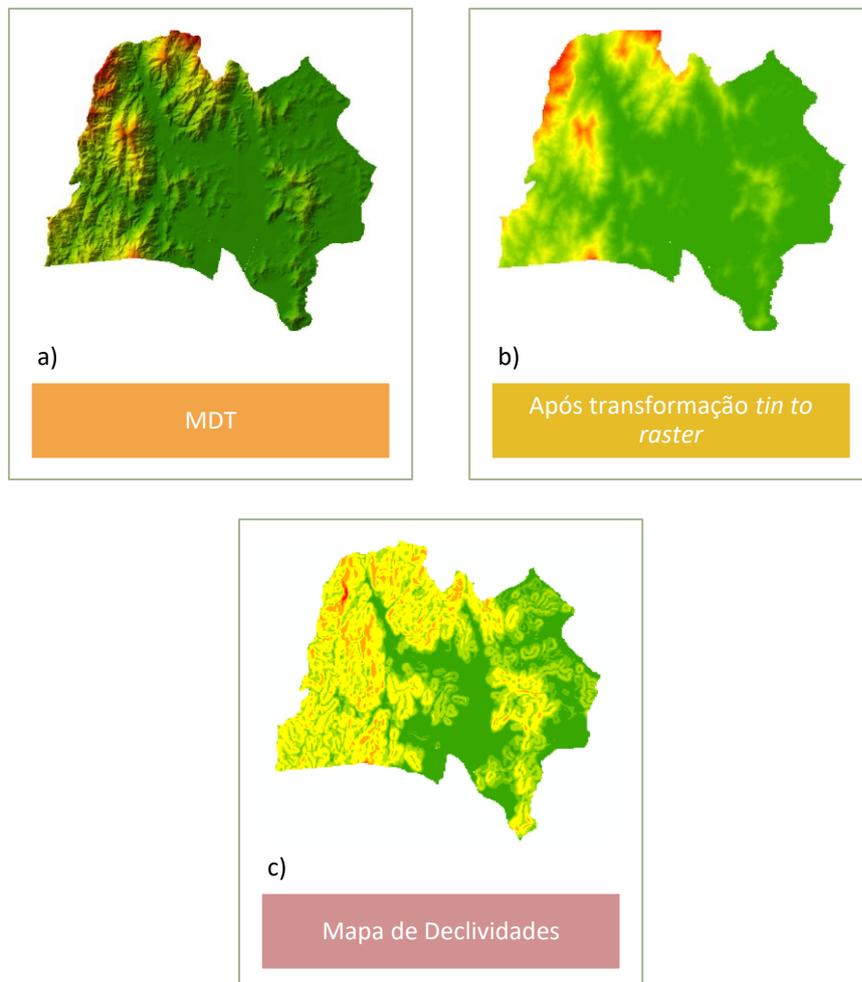


Figura 21 – Sequência de geração do mapa de declividades.

Para classificação do tipo de terreno quanto à declividade foi utilizada a referência da Embrapa, 1999, conforme o Quadro 6. Para configurar as faixas de declividade de acordo com a referência, foram definidos os valores manualmente (na aba *simbology* e opção *classified*).

Quadro 6 - Classificação quanto à declividade. Fonte: Adaptado de Embrapa, 1999.

| Declividade (%) | Definição Relevo | Descrição da Superfície Topográfica |
|-----------------|------------------|--|
| 0-3 | Plano | Horizontal, onde os desníveis são muito pequenos. |
| 3-8 | Suave Ondulado | Pouco movimentada constituída por conjunto de colinas ou outeiros (elevações de atitudes relativas até 50m e entre 50m e 100m), apresentando declives suaves. |
| 8-20 | Ondulado | Pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas ou outeiros, apresentando declives moderados. |
| 20-45 | Forte Ondulado | Movimentada, formada por outeiros ou morros (elevações entre 50m e 100m e entre 100m e 200m de altitudes relativas) e raramente colinas, com declives fortes. |
| 45-75 | Montanhoso | Vigorosa, com predomínio de formas acidentadas, usualmente constituídas por morros, montanhas, maciços montanhosos e alinhamentos montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes e declives fortes ou muito fortes. |
| 75-90 | Forte Montanhoso | Predomínio de formas abruptas, compreendendo superfícies muito íngremes, tais como aparados, itaimbés, frentes de cuestras, falésias e vertentes de declives muito fortes. |

4.2.4 Litologia

O mapa litológico tratado, com validação dos resultados através de coleta de amostras em campo e em escala 1:10.000 foi elaborado por Sbroglia e Sanchez, 2017.

Os autores descrevem que a validação efetuada a partir do trabalho de campo demonstrou que a melhor interpretação das unidades geológicas e do contexto tectônico do município de São José corresponde ao mapa geológico na escala de 1:100.000 publicado pelo CPRM – Serviço Geológico do Brasil (ZANINI *et al.*, 1997).

Para essa dissertação foi necessária a edição do mapa litológico como um todo.

Num primeiro momento, foram identificadas diversas sobreposições de limites, sendo necessária a retificação de todos os contornos (através do *align edge tool*, da barra de ferramentas *topology*) (Figura 22).

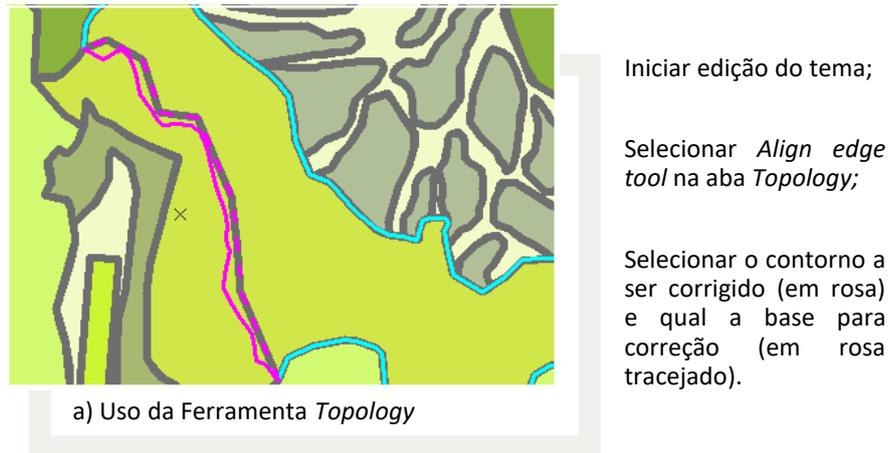


Figura 22 - Exemplo de edição de feições.

Para fins de mapeamento geotécnico, foram ainda retiradas algumas feições aparentemente importantes marcadas no mapa. A justificativa é que, apesar de notórias, não implicavam em alterações para o fim dessa pesquisa e só aumentariam desnecessariamente a quantidade de unidades geotécnicas. A primeira, antes identificada como aterro, trata-se na verdade do trecho da BR-101 que atravessa o Município. A segunda, apresentava os maiores corpos d'água do Município e optou-se por preenchê-los com a unidade litológica em que estavam inseridos.

Por fim, muitos polígonos adjacentes ou pertencentes um ao outro, com a mesma nomenclatura foram unidos (ferramenta *merge features*).

O mapa litológico foi fornecido com a classificação de 4 tipos de sedimentos quaternários, sendo eles:

- sq1 - depósito aluvial e flúvio-marinho;
- sq2 - depósito lagunar e marinho;
- sq3 - depósito marinho;
- sq4 - terraço fluvial e flúvio-marinho.

Para melhorar os resultados do mapeamento geotécnico, foi realizada uma simplificação dessas unidades, unindo-se os 4 tipos, visto que são materiais que possuem características geotécnicas relativamente semelhantes.

Por fim, a Figura 23 resume as edições do mapa litológico e resume seu processo de construção.

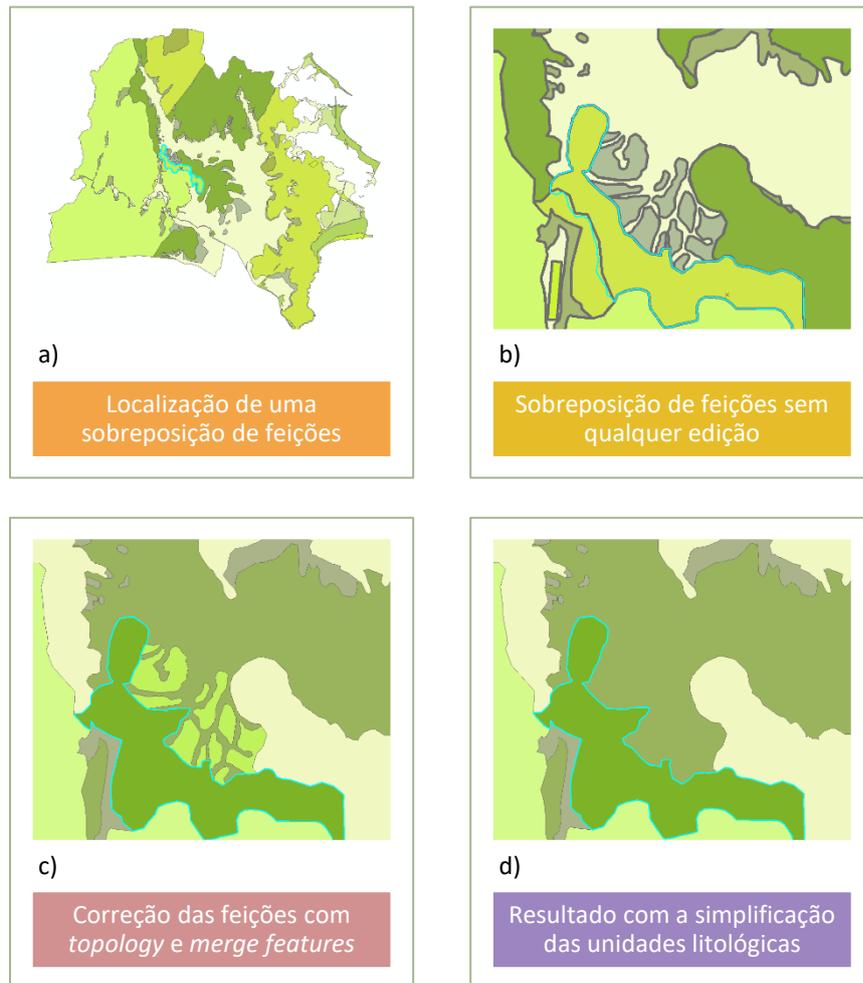


Figura 23 - Processo de construção do mapa Litológico.

4.2.5 Pedologia

O mapa pedológico do Município é datado de 2007, está escala 1:100.000 e foi adquirido através da Epagri/SC.

Foram necessárias uma série de edições do mapa pedológico também. Inicialmente foi realizada a migração das unidades pedológicas para adequação do mapa ao novo sistema brasileiro de classificação de solos, datado de 2018 (Quadro 2). Todas as unidades tiveram sua nomenclatura simplificada para apenas Ordem e Subordem e, com isso, houve a necessidade de unir polígonos que agora apresentavam as mesmas unidades pedológicas (ferramenta *merge features*).

Outro tipo de edição realizada foi a retificação do contorno do Município, em virtude do acréscimo do aterro à beira-mar e, principalmente, da diferença de escalas entre mapas (ferramentas *clip*, *union*, e *merge features*).

Todas as correções nas feições foram realizadas para tornar o arquivo mais organizado, o que acarretaria uma menor quantidade de unidades geotécnicas.

4.2.6 Análise temporal de evolução da mancha urbana

Os centros das cidades apresentam uma dinâmica de ocupação interna e externa relativa à sua mancha urbana que pode ser representada através da ocupação de vazios internos e expansão radial para novas unidades de solos (HIGASHI, 2006). Dessa forma, o estudo da evolução da mancha urbana auxilia na compreensão e estimativa de quais unidades geotécnicas poderão ser solicitadas na sequência do desenvolvimento urbano.

O mapa de evolução da mancha urbana foi desenvolvido considerando-se 3 diferentes temas:

- O primeiro, de 2007, obtido da Epagri;
- O segundo, foi desenvolvido através dos dados de lotes, quadras e arruamento com a Prefeitura Municipal de São José em 2011;
- O terceiro, de 2014, elaborado pelo LAMGEO através de dados matriciais.

Como o comportamento de ocupação do Município se dá do extremo leste para o oeste, optou-se por não fazer a análise temporal através do processo de transformação do arquivo vetorizado em imagem *raster* para então se realizar a variação da resolução das células (*pixel*), pois isso ultrapassaria os limites municipais, além de reforçar a ocupação de áreas já completamente consolidadas. A análise feita foi, portanto, puramente qualitativa, através do estudo multitemporal e traçado dos vetores de crescimento.

Avaliando-se esses vetores, identifica-se um crescimento que se desenvolve do litoral para o interior, seguindo ao longo das cotas de altitude mais baixas, declividades mais suavizadas e principais vias de ligação.

Considerando-se que a área propensa a expansão urbana é uma faixa comparativamente estreita e proporcional ao offset do crescimento temporal analisado e, aliando-se essa informação à legislação ambiental federal vigente, Lei 12.651/2012, que normatiza que cotas de altitude acima de 100m são áreas de preservação permanente, foi gerado um mapa do município com a projeção da expansão urbana abaixo das cotas 100m externas à área já consolidada do crescimento.

A Figura 24 apresenta o fluxo de criação do mapa de projeção da mancha urbana.

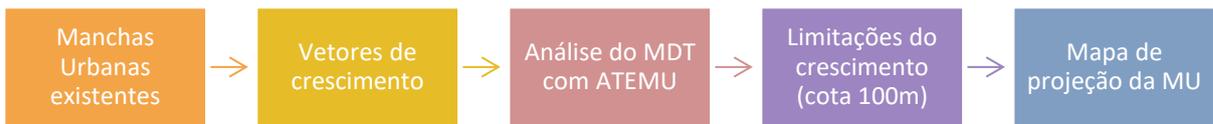


Figura 24 - Fluxo de criação do Mapa de projeção da mancha urbana.

4.2.7 Geotécnico preliminar

O mapa geotécnico preliminar é aquele resultante da operação de soma dos mapas litológico e pedológico (Figura 25), de forma que cada unidade pedológica tenha um substrato constituído por unidade litológica. Esse procedimento é válido porque, tendo-se as unidades geotécnicas finais, é possível estimar o comportamento delas com base em dados anteriores, ou simplesmente atribuir características geotécnicas obtidas pontualmente para um todo.

De acordo com a metodologia desenvolvida por Davison Dias (1995), as unidades geotécnicas baseiam-se no conhecimento pedológico, geológico e topográfico, apresentando áreas de solos de comportamento geomecânico semelhante (HIGASHI, 2006).



Figura 25 - Processo básico para geração do mapa geotécnico preliminar.

Para essa pesquisa, o mapa geotécnico preliminar foi elaborado (ferramenta *union*) e contempla todas as edições realizadas nos mapas pedológico, geológico e cadastral. Essa operação de adição resultou preliminarmente em 28 unidades, que foram descritas no Quadro 7 e apresentadas, esquematicamente, na Figura 26.

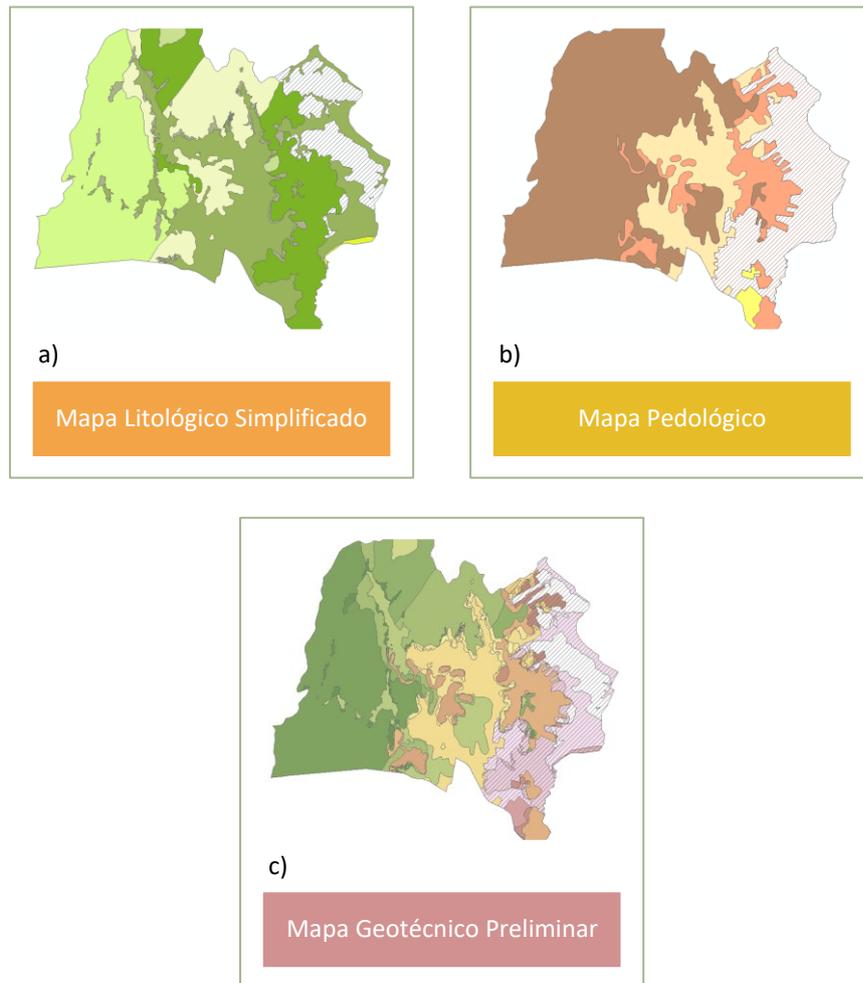


Figura 26 - Criação do mapa geotécnico preliminar.

Quadro 7 - Classificação geotécnica preliminar.

| Unidade Geotécnica | Descrição | Unidade Geotécnica | Fonte |
|---------------------------|--|---------------------------|--|
| CX-ca | Cambissolo Háplico substrato Depósitos Coluviais | PVA-ca | Argissolo Vermelho-Amarelo substrato Depósitos Coluviais |
| CX-g1 | Cambissolo Háplico substrato Granito | PVA-g1 | Argissolo Vermelho-Amarelo substrato Granito |
| CX-g2 | Cambissolo Háplico substrato Granodiorito | PVA-g2 | Argissolo Vermelho-Amarelo substrato Granodiorito |
| CX-gn,m | Cambissolo Háplico substrato Gnaiss, migmatito | PVA-gn,m | Argissolo Vermelho-Amarelo substrato Gnaiss, migmatito |
| Cx-sq | Cambissolo Háplico substrato Sedimentos Quaternários | PVA-sq | Argissolo Vermelho-Amarelo substrato Sedimentos Quaternários |
| CX-to | Cambissolo Háplico substrato Tonalito | PVA-to | Argissolo Vermelho-Amarelo substrato Tonalito |
| CX-urb | Cambissolo Háplico substrato Urbano | PVA-urb | Argissolo Vermelho-Amarelo substrato Urbano |

| Unidade Geotécnica | Descrição | Unidade Geotécnica | Fonte |
|---------------------------|---|---------------------------|--|
| GX-ca | Gleissolo Háplico substrato Depósitos Colúviais | RQ-g2 | Neossolo Quartzarênico substrato Granodiorito |
| GX-g1 | Gleissolo Háplico substrato Granito | RQ-sq | Neossolo Quartzarênico substrato Sedimentos Quaternários |
| GX-g2 | Gleissolo Háplico substrato Granodiorito | URB-Aterro | Área Urbana substrato Aterro |
| GX-gn,m | Gleissolo Háplico substrato Gnaisse, migmatito | URB-ca | Área Urbana substrato Depósitos Colúviais |
| GX-sq | Gleissolo Háplico substrato Sedimentos Quaternários | URB-g2 | Área Urbana substrato Granodiorito |
| GX-to | Gleissolo Háplico substrato Tonalito | URB-sq | Área Urbana substrato Sedimentos Quaternários |
| GX-urb | Gleissolo Háplico substrato Urbano | URB-urb | Área Urbana substrato Urbano |

Analisando-se o Quadro 8, foram identificadas algumas unidades potencialmente inconsistentes, que teriam a necessidade de avaliação e correção subsequente.

Higashi (2006) cita que nas cidades costeiras os solos sedimentares ocorrem nas regiões planas, de baixas declividades e cotas de elevação, sendo encontrados normalmente perfis de argila mole provenientes de solos minerais (Solos Glei) e orgânicos, solos de mangue, areias quartzosas (podzolizadas ou não) e podzóis.

Higashi (2006) ainda aponta que a exceção para este caso é o Cambissolo originado de colúvio que pode ocorrer a grandes declividades, denominado por Santos (1997) de Cambissolo de substrato depósitos de encostas. Apesar deste tipo de solo ser classificado como de origem sedimentar, este deve ser analisado através da mesma metodologia apresentada para os solos residuais, em razão da semelhança de comportamento geotécnico entre estes solos.

Foram avaliadas mais detalhadamente as unidades Cambissolo háplico e Argissolos vermelho-amarelos, ambos de substrato sedimentos quaternários, Gleissolos de substratos depósitos colúvionares, granito, granodiorito, gnaisse, migmatito e tonalito e, por fim, os Neossolos quartzarênicos de substrato granodiorito.

Pode-se observar também o surgimento de diversas unidades sem classificação pedológica ou litológica adequada, aparecendo apenas como “área urbana” e “urbano” respectivamente. Isso já era previsto em virtude da extensa área já consolidada do município há época em que foram realizados esses levantamentos, porém torna-se necessário que esse problema seja ao menos atenuado, para melhor compreensão da área de estudos.

4.3 LAUDOS DE SONDAGEM SPT

Os procedimentos utilizados para composição e organização da base de dados de sondagem SPT bem como para o desenvolvimento dos mapas de aptidão para fundação estão detalhados a seguir.

4.3.1 Composição da base de dados

Para o processamento dos dados de sondagem, foi necessária a criação de uma base de dados alfanumérica compatível com ambiente SIG, contendo as informações necessárias ao desenvolvimento das análises desejadas.

Para a criação dessa base de dados SPT, foi necessário tratamento prévio dos laudos, visto a variabilidade de apresentação das informações, seja pelos diferentes formatos, como *pdf*, *docx*, *xlsx*, *dwg*, *jpeg*, seja pela forma de apresentação e, por isso, cada laudo foi avaliado e tratado individualmente.

Os laudos foram adquiridos com a empresas Brasecol, Furo & Solo Perfurações, Geodésia, J. A. Barossi, NP Perfurações, Sondagel, Sotepa e SPL Sondagens.

Para padronização da nomenclatura de cada furo, foi escolhido um sistema de 4 partes, conforme Quadro 8.

Quadro 8 - Sistema de padronização de identificação do ponto na base de dados.

| Ano - 4 Dígitos | Mês - 2 Dígitos | Sequencial do Arquivo – 3 Dígitos | Ponto Utilizado – 2 a 3 Dígitos |
|-----------------|-----------------|--------------------------------------|------------------------------------|
| 1999 | 02 | 051 | 03 |
| 2000 | 03 | 062 | 03e |
| 2020 | 08 | 155 | 03 |

Muitos pontos executados não apresentavam valor exato para os 30cm finais de camada, conforme deve ser o de N_{spt} , isso porque é natural que a variabilidade dos solos de fato não permita muitas vezes tal precisão. Para padronização desses valores foi realizada uma correlação simples, optando-se pelo arredondamento para o menor inteiro, ou seja, a favor da segurança.

Outro ponto importante identificado é que diversas vezes, no encontro de um matacão ou rocha, ou ainda quando definidas as características mínimas de impenetrável conforme à normativa vigente, o valor planilhado foi definido para uma camada também menor que 30cm. Para que os dados pudessem ser homogeneizados foi realizada a mesma correlação simples,

com os mesmos critérios de arredondamento. O que cabe aqui como observação é que esses valores ficaram, por vezes, extremamente elevados e completamente fora dos valores usualmente aplicados. No capítulo que aborda os tratamentos estatísticos serão explicadas as outras adaptações que realizadas para adequação da base de dados ao estudo de fundações.

Houve dois tipos específicos de laudos que não puderam ser usados em sua totalidade. Foram os que o critério de paralização foi a pedido do cliente e aqueles em que não foi encontrado o nível d'água. Naturalmente, esses pontos não poderiam ser utilizados na elaboração de superfícies estimativas de impenetrável e nível d'água, porém ainda apresentavam bastante utilidade, inclusive muitas vezes em locais estratégicos do mapa, para os tratamentos estatísticos de tensões admissíveis em fundações superficiais e estimativa das superfícies resistentes para fundações profundas.

Ao final da composição da base de dados haviam sido inseridas as informações de identificação do furo, bairro do ponto, coordenadas geográficas, cota de altitude, nível do impenetrável e cota de altitude do impenetrável, nível de água e cota de altitude do nível d'água, o Nspt por profundidade, as tensões admissíveis para profundidades até 4m, critérios de paralização para estacas tipo pré-moldada, hélice-contínua monitorada e estaca raiz.

4.3.2 Georreferenciamento da base de dados

Em um primeiro momento foi avaliado quais laudos poderiam de alguma forma ser localizados e, portanto, pode-se afirmar que o georreferenciamento foi realizado antes mesmo da base de dados em si.

Todos os pontos foram localizados através do Google Earth. Para locação utilizou-se o endereço, o croqui, o nome do empreendimento constante nas informações de cabeçalho do laudo como referência para obtenção da localização mais provável do furo. A ferramenta de linha do tempo do Google Earth, combinada com a data da realização do furo de sondagem, também foi empregada em alguns casos para relacionar construções com a época de elaboração das sondagens.

Muitos laudos apresentavam mais de 1 ponto. Para que isso não se tornasse informação redundante e apenas um volume sem grande importância para as análises que se seguiriam, foi adotado como prerrogativa o uso das informações do furo que melhor descrevesse os demais. Foi também estabelecido que SPTs distantes ao menos 50m um do outro, seriam utilizados, ainda que referentes à mesma edificação ou terreno.

Aqueles ensaios cujo croqui não foi encontrado, foi realizada a locação do ponto no centro do terreno.

Ao final foram georreferenciados 350 pontos de sondagem SPT e exportados do Google Earth para um arquivo *kmz* (através da opção *salvar lugar como* com o botão direito do *mouse*).

Para importar esse arquivo para o ArcGIS foi necessário primeiro descompactá-lo, transformando-o de *kmz* para *kml* e, em seguida, utilizou-se a ferramenta de conversão *kml to layer*, da *Arc toolbox* e transformado em SIRGAS 2000. Com o *shapefile* criado foram adicionadas as informações de cota de elevação a partir do MDT (através do *interpolate shape*, das ferramentas de análise 3D, também da *Arc toolbox*). Ainda, foi adicionada a cada ponto a informação do bairro, para facilitar sua localização manualmente (obtido com *intersect* entre os temas de pontos e de bairros).

Cabe lembrar que até o momento descrito a base de dados em si ainda não havia sido associada aos pontos e, portanto, georreferenciado. Para complementar a base de dados, o tema de pontos criado foi transformado em planilha (ferramenta de conversão *table to excel*). Ao ser exportado, o arquivo transformou cada ponto em coordenada x e y, além de trazer os dados de cota de altitude z e bairros, obtidos anteriormente.

Por fim, a base de dados poderia ser finalmente inserida novamente em ArcGIS (*add data*) e transformado em arquivo de pontos georreferenciado adicionando-se as informações de coordenadas (*display XY data*, na *table of contents*), conforme mostra a Figura 28 e depois exportando esse arquivo para o formato *shapefile*. O resumo do fluxo de criação da base de dados georreferenciada é mostrado na Figura 27.



Figura 27 - Fluxo de criação da base de dados georreferenciada.

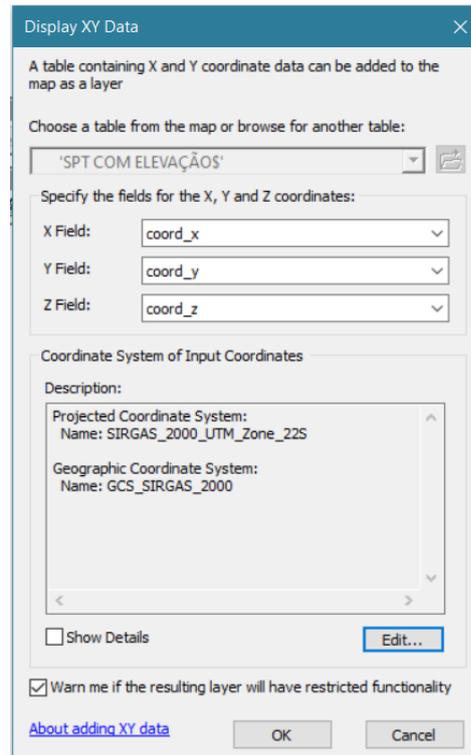


Figura 28 - Captura de tela do ArcGIS para georreferenciamento da tabela de pontos SPT.

4.4 CONSOLIDAÇÃO DO MAPA GEOTÉCNICO

Após a criação da base de dados de sondagens SPT georreferenciada foi possível retornar à análise do mapa geotécnico preliminar, para avaliar melhor as unidades potencialmente inconsistentes.

Para esse estudo foram colocados no ArcGIS o mapa pedológico, o geológico, o geotécnico, mapa de declividades, curvas de nível, hidrológico e a base de dados SPT (Figura 29). Cada um desses temas tem contribuição direta para validação ou correção dos resultados e cada unidade foi avaliada individualmente e de forma manual.

Em um primeiro momento, após uma avaliação de todas as feições pela tabela de atributos, identificou-se muitos polígonos de áreas não representativas, a maioria abaixo de 1m² e, para avaliar e retirar quaisquer possíveis discrepâncias, utilizou-se uma série de filtros em busca de cada unidade, onde cada um dos polígonos foi analisado, excluindo-se os sobrepostos e unindo-se os que eram adjacentes (através da ferramenta *merge features*).

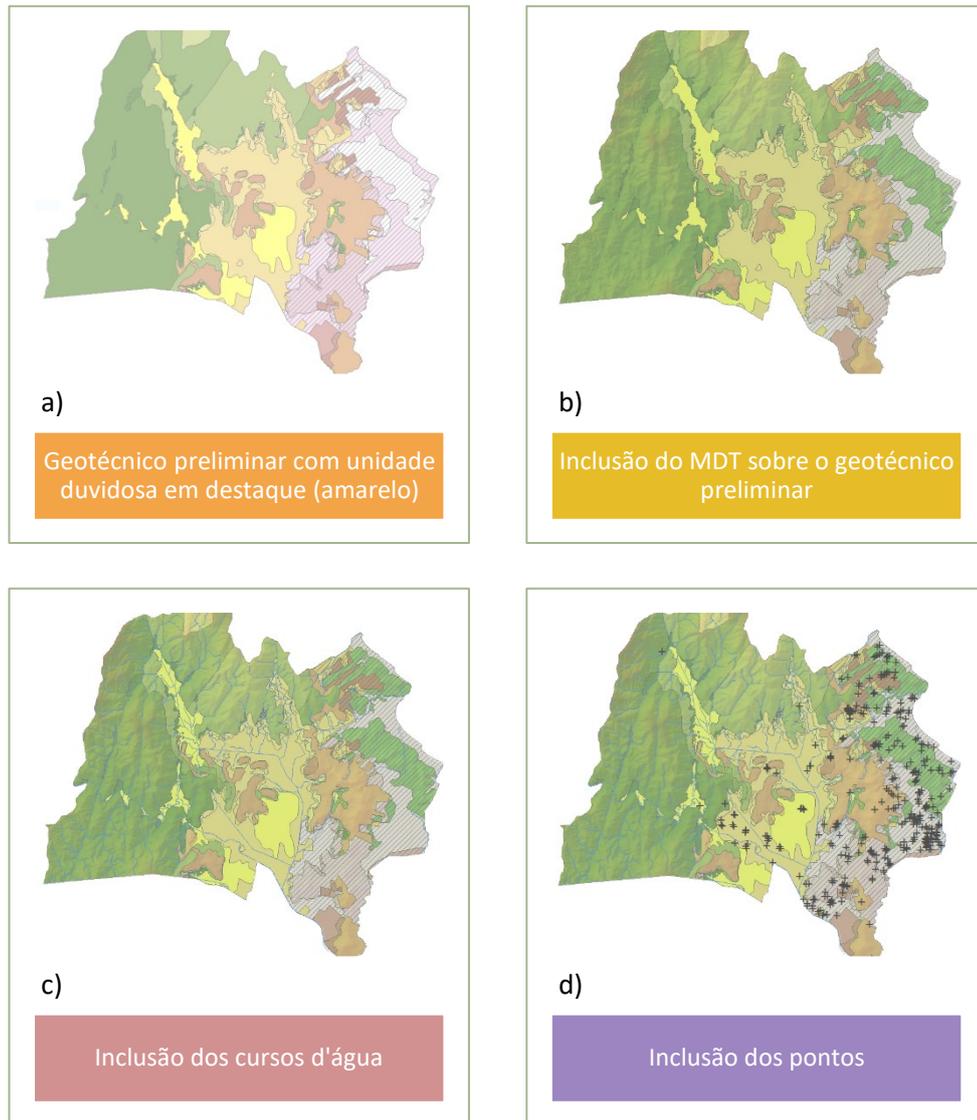


Figura 29 - Fluxo para correção das unidades geotécnicas potencialmente incoerentes.

4.4.1 Cambissolos de substrato sedimentos quaternários

Essa unidade geotécnica preliminar foi encontrada em diversos pontos do mapa, todos, porém, localizados na região mais central do mapa e em cotas mais baixas.

Para análise dessa unidade preliminar, buscou-se pontos da base de dados que estivessem contidos na unidade geotécnica preliminar e foram encontrados, da esquerda para direita da Figura 30, os seguintes pontos:

- 2016-06-186-02;
- 2014-06-196-01;
- 2013-07-200-01;
- 2013-07-200-02;

- 2013-07-200-03;
- 2013-07-200-04.

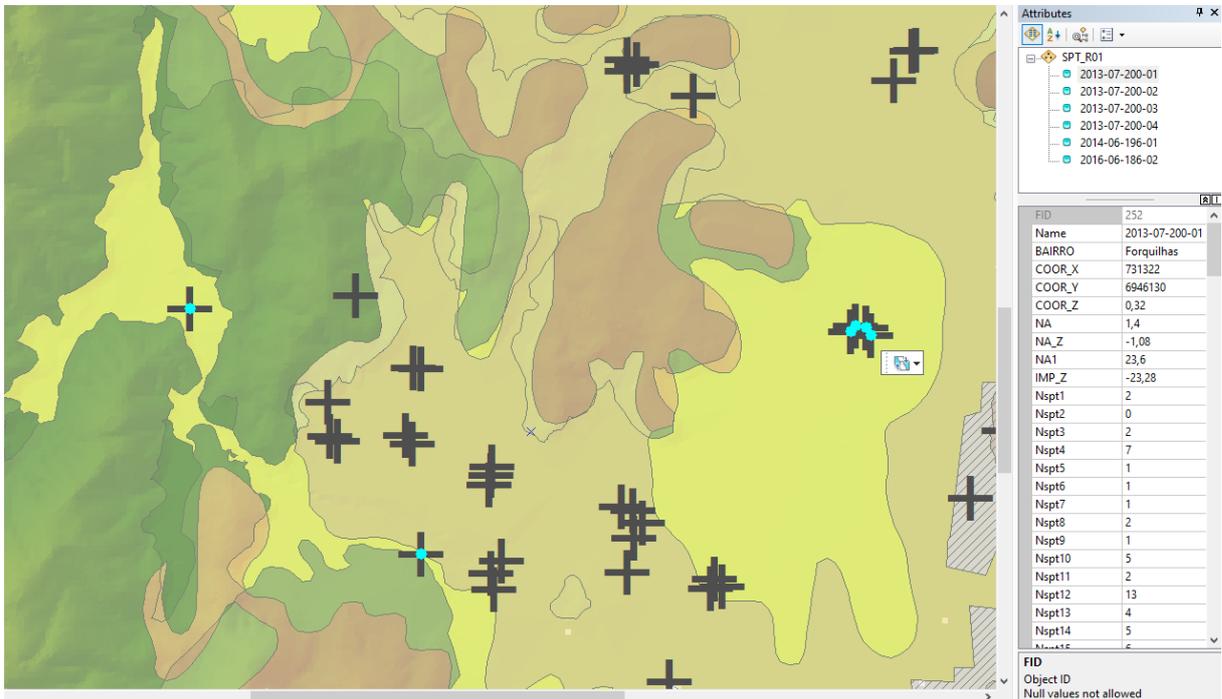


Figura 30 - Pontos SPT encontrados na unidade geotécnica preliminar.

Dentre os 6 laudos de sondagem os do ano de 2016 e o do ano de 2013 possuem características extremamente semelhantes, sendo nível d'água próximo à superfície, material de argilo-siltoso à argilo-arenoso de coloração cinza à verde-amarelada, passando por camadas de argila mole de coloração cinza a cinza escura. Um ponto muito importante a ser levantado é que o laudo 2016-06-186-02 apresenta em todos os furos, entre os primeiros metros de profundidade (entre 4m e 5m) camada de aterro em areia fina à média, argilosa, fofa a pouco compacta, vindo imediatamente abaixo o nível do lençol freático e as características descritas como semelhantes ao laudo 2013-07-200-01 ao 04.

As características relatadas de fato diferem daquelas encontradas em Cambissolos, principalmente quando se observa a coloração, profundidade e, principalmente, o desenvolvimento de perfil, que deveria apresentar uma sequência clara, característica de solos residuais. No entanto, as características avaliadas se assemelham sobremaneira aos Gleissolos, ficando, porém, a dúvida quanto às colorações mais claras, como o bege amarelado citado nos laudos 2013-07-200-02, 2013-07-200-03 (Figura 31) e 2016-06-186-02.

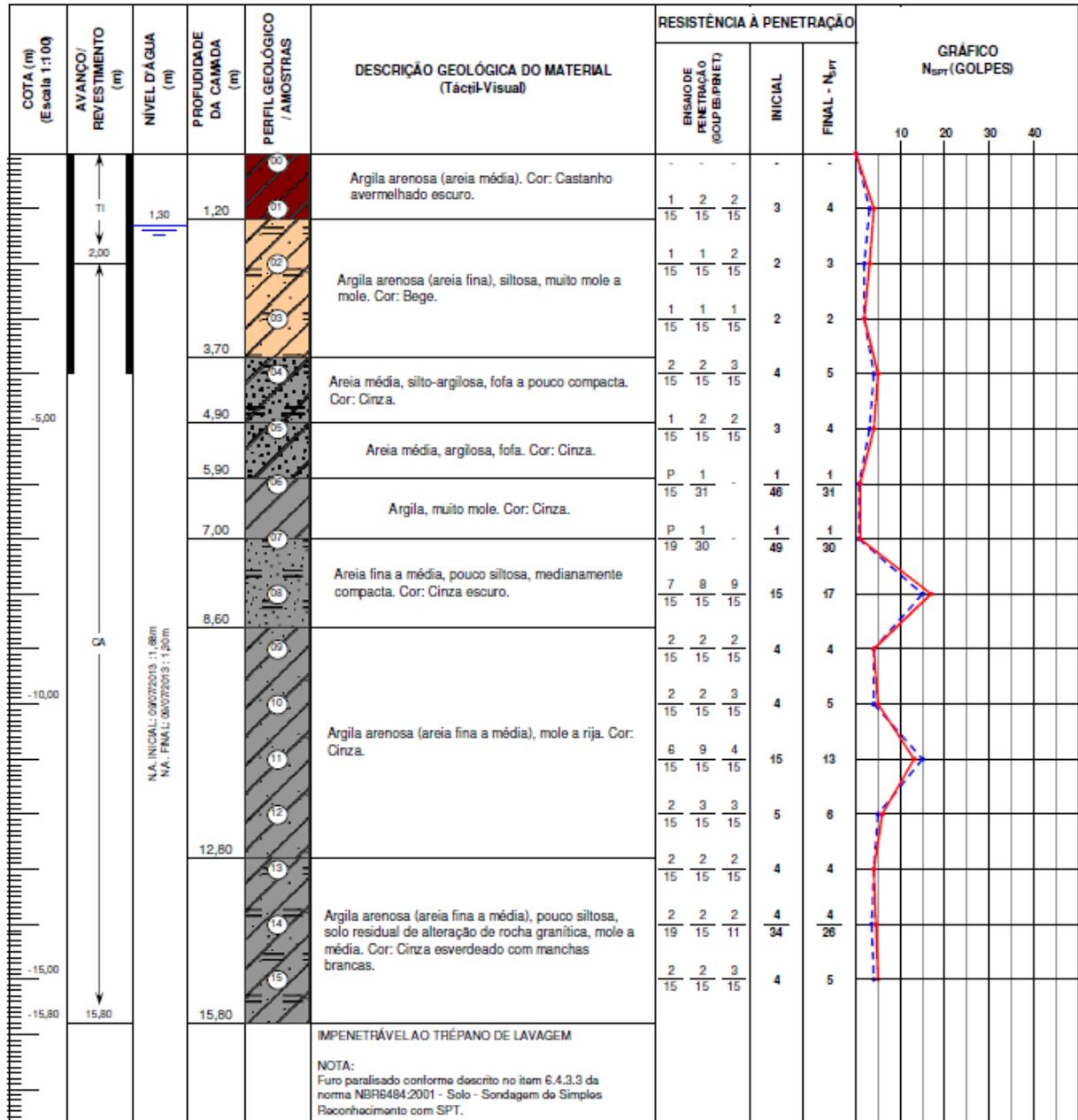


Figura 31 - Segmento do laudo 2013-07-200-03.

Dos Santos (2013) descreve que o horizonte glei trata-se de horizonte fortemente influenciado pelo lençol freático e por regime de umidade redutor, virtualmente livre de oxigênio dissolvido em razão da saturação por água durante todo o ano, ou pelo menos por um longo período, associado à demanda de oxigênio pela atividade biológica. O autor ainda descreve que esse horizonte pode ser constituído por material de qualquer classe textural, e suas cores são de cromas bastante baixos, próximas de neutras ou realmente neutras, tornando-se, porém, mais brunadas ou amareladas por exposição do material ao ar.

Somando-se essa informação à localização dessa unidade geotécnica preliminar, que passa por entre as áreas de cotas mais baixas, entre 5m e 10m de altitude, seguindo talvegues de cursos d'água, o que garantiria o saturamento do solo em pelo menos um longo período do ano, retificou-se essa unidade inteira para a unidade Gleissolo substrato sedimentos quaternários (Figura 32).

É importante citar que um dos polígonos dessa unidade se localiza entre as cotas 50m e 55m de altitude, atendendo, porém, aos demais itens avaliados, como acompanhar talvegue de curso d'água e estar delimitado por altitudes maiores.

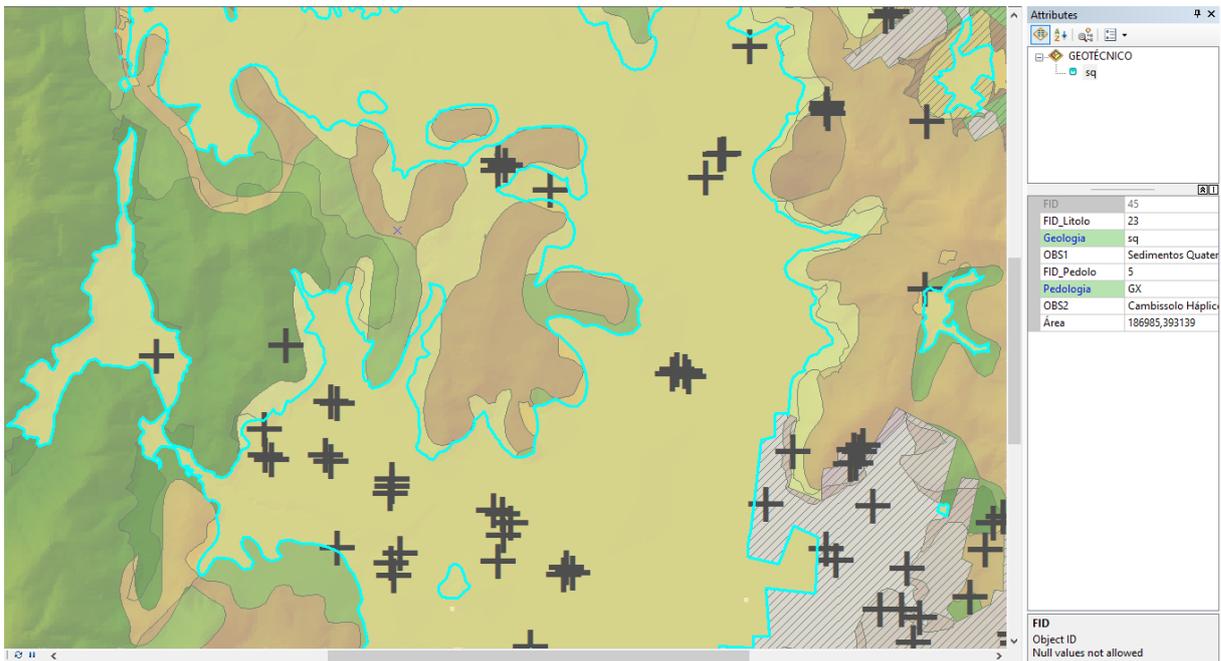


Figura 32 - Unidade geotécnica Gleissolo substrato sedimentos quaternários após edições.

4.4.2 Gleissolos de substrato depósitos coluvionares

Foi realizada a análise dessa unidade geotécnica preliminar utilizando-se parâmetros semelhantes aos do estudo anterior. A Figura 33 mostra que a ocorrência dos Gleissolos de substrato depósitos coluvionares se limita ao entorno dos Gleissolos de sedimentos quaternários, permanecendo em cotas de altitude mais baixas.

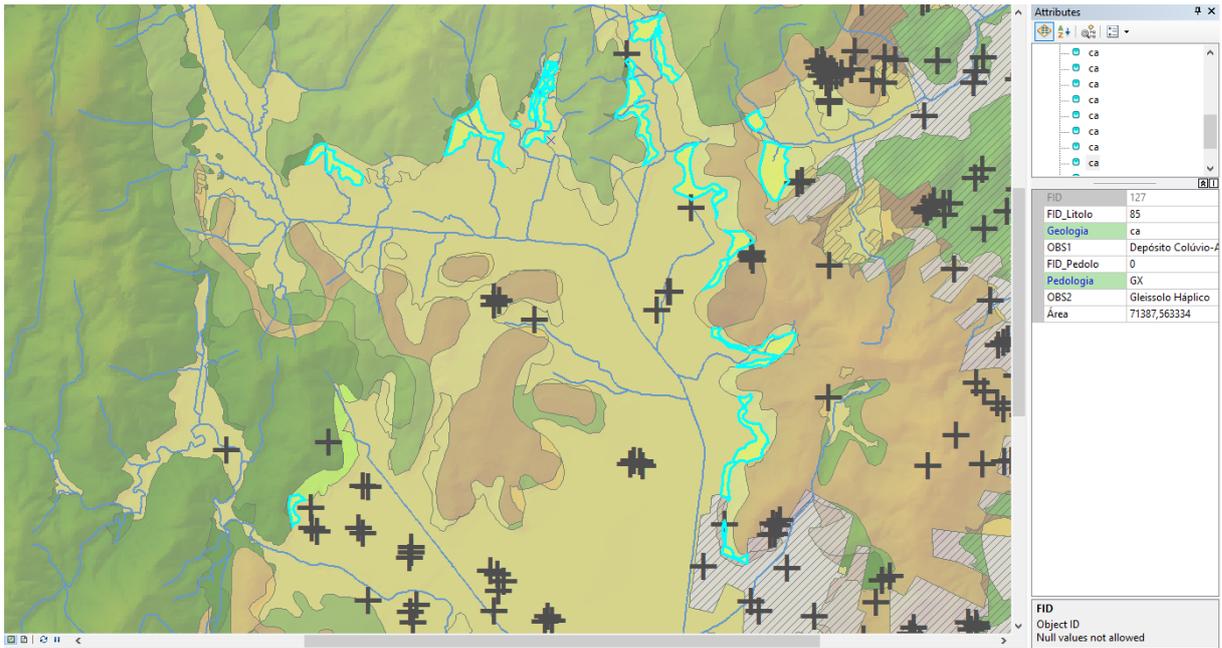


Figura 33 - Unidade geotécnica preliminar Gleissolos substrato depósitos colúvionares.

Não foram identificados pontos SPT contidos nesses polígonos. Ainda assim, é possível considerar a incompatibilidade existente entre essa pedologia e geologia, considerando-se que os possíveis colúvios delimitados, nesse caso, seriam referentes ao material de origem granodiorito, que geraria solos residuais e com classificação granulométrica que proporcionaria melhor drenagem, não ocorrendo, portanto, o principal meio de formação dos Gleissolos. A Figura 34 apresenta a unidade geotécnica após edições.

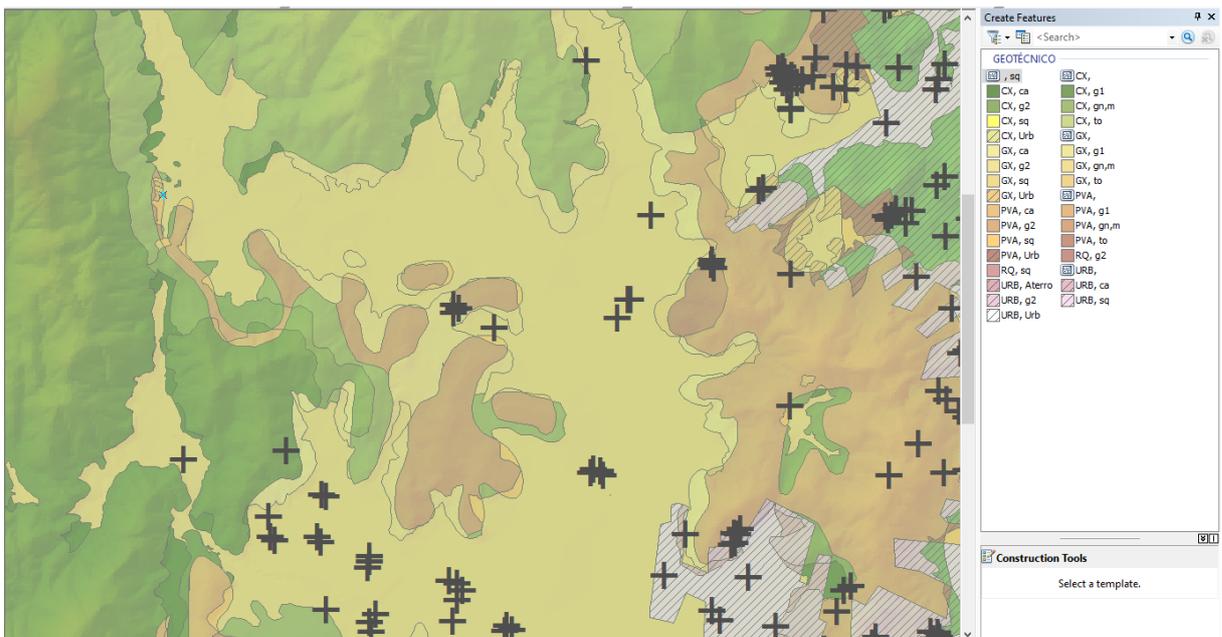


Figura 34 - Unidade geotécnica Gleissolo substrato sedimentos quaternários após novas edições.

4.4.3 Gleissolos substrato granito, granodiorito, gnaisse, migmatito e tonalito

Num primeiro momento, considerando-se que essas unidades preliminares se localizavam em uma região de encosta, com cotas de altitudes variando entre 15m e 50m e em terreno ondulado, de acordo com a classificação do Quadro 7, descartou-se a possibilidade de ocorrência de Gleissolos nesses locais.

Para os de origem granito, para se obter algum parâmetro de reclassificação desse solo, como não havia laudos SPTs contidos nesses polígonos, buscou-se a análise do perfil estratigráfico dos pontos próximos.

Foram encontrados, da esquerda para direita da Figura 35, os seguintes pontos:

- 2007-08-236-03;
- 2018-06-288-02;
- 2010-07-067-03.

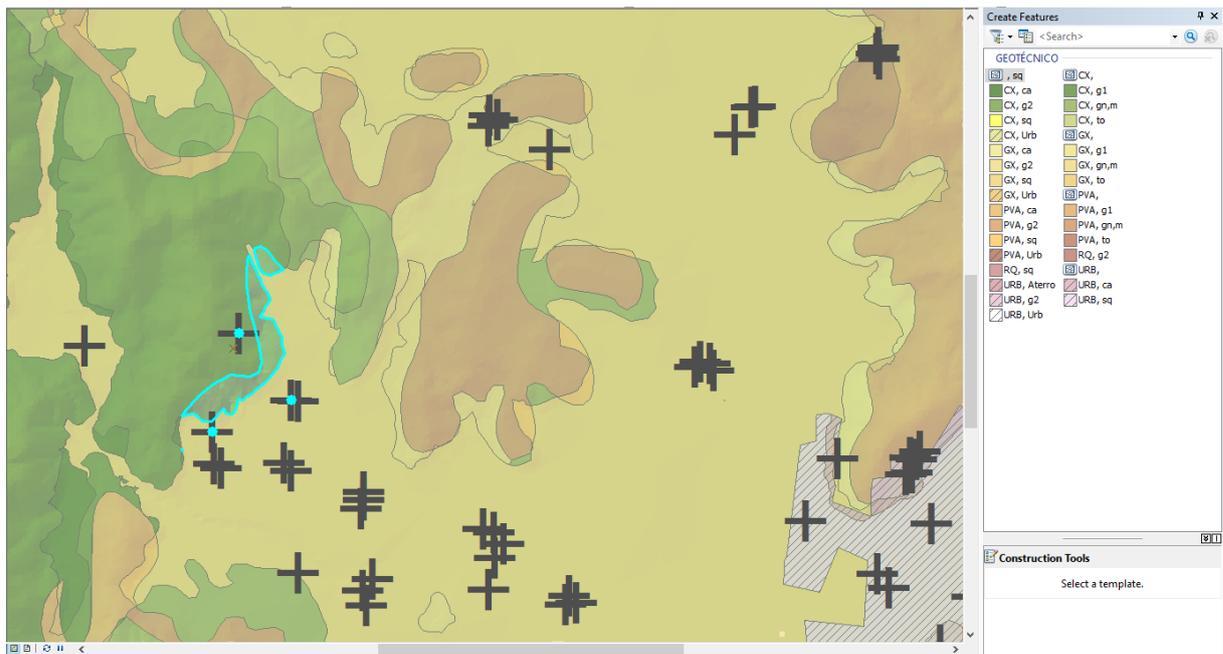


Figura 35 - Unidade geotécnica preliminar Gleissolo substrato granito.

Foram avaliados cada um desses laudos com o objetivo de se compreender a topo sequência do entorno. O ponto 2018-06-288-02 (Figura 36), que se encontra na unidade geotécnica Cambissolo háplico substrato granito, apresentava perfil de solo raso, com nível d'água não encontrado e características compatíveis com solo residual, enquanto os demais pontos (Figura 37) apresentavam descrição e perfil tipicamente de Gleissolos substrato sedimentos quaternários, com profundidade do impenetrável entre 11,05m e 14,98m.

Com essa análise entende-se que o solo dessa unidade se apresentaria potencialmente como intermediário. Havendo sido encontrado do lado oposto da encosta da mesma elevação a unidade geotécnica Argissolo vermelho-amarelo substrato granito, a unidade foi reclassificada da mesma forma.

| | | | | | | | | | | |
|---|---------------------------------|-----------------------------|--|----------------------------|---------|--------------------------------|---------------------------|--|---|--|
| Ciente: | | SONDAGEM A PERCUSSÃO | | SP | | | | | | |
| Local: Lote 2 - Quadra 9 - Loteamento Vista da Pedra do Maruim - São José - SC | | Sertão | | SP- 02 | | | | | | |
| | | INÍCIO: 20/06/2018 | | COTA: + 5,40m ± | | | | | | |
| | | COORD: S - | | TÉRMINO: 20/06/2018 | | | | | | |
| | | | | W - | | | | | | |
| Cota em relação ao R.N. | Golpes / cm | | | | | Número de golpes (30cm finais) | RESISTÊNCIA A PENETRAÇÃO | | Diâmetro do revestimento (mm): 68,8 | |
| | AMOSTRADOR TIPO TERZAQHI & PECK | | | | | | Nº DE GOLPES | | Diâmetro do amostrador: ± INTERNO (mm): 34,9 | |
| | | | | | GRÁFICO | | Altura da queda (m): 0,75 | | Peso (kg): 65 | |
| | | | | | Torque | | Prof. da camada (m) | | DESCRIÇÃO | |
| | | | | | Max Min | | 1,31 | | Solo argiloso, pouco siltoso, marrom, impenetrável. | |
| | | | | | | | | | | |

Figura 36 - Laudo 2018-06-288-02.

| | 1ª- 2ª | cm | 2ª- 3ª | cm | | Nº | Classificação do Material |
|--------|--------|----|--------|----|----|----|--|
| | 3 | 30 | 4 | 30 | 0 | | |
| | | | | | 1 | 01 | Aterro de argila, pouco arenosa, mole. Cor: Marrom e vermelho. |
| | 2 | 30 | 3 | 30 | 2 | | |
| 1,63 m | | | | | 3 | 02 | Argila pouco arenosa, muito mole a mole. Cor: Cinza e marrom. |
| | 0 | 30 | 0 | 30 | 4 | | |
| | 0 | 30 | 0 | 30 | 5 | 03 | |
| | 0 | 30 | 0 | 30 | 6 | 04 | Argila pouco arenosa, muito mole. Cor: Cinza escura. |
| | 2 | 30 | 3 | 30 | 7 | 05 | |
| | 1 | 30 | 1 | 30 | 8 | 06 | 5,72 m |
| | 1 | 30 | 2 | 30 | 9 | 07 | Argila arenosa, muito mole a mole. Cor: Cinza. |
| | 0 | 30 | 0 | 30 | 10 | 08 | |
| | 0 | 30 | 0 | 30 | 11 | 09 | Argila pouco arenosa, com turfa, muito mole. Cor: Marrom escuro. |
| | 6 | 30 | 9 | 30 | 12 | 10 | 9,15 m |
| | 12 | 30 | 11 | 30 | 13 | 11 | 10,79 m |
| | 11 | 30 | 10 | 30 | 14 | 12 | Areia média, argilosa, fofa. Cor: Cinza. |
| | | | | | 15 | 13 | 13,09 m |
| | | | | | | | Areia média, com pedregulho, pouco compacta a mediamente compacta. Cor: Cinza. |

Figura 37 - Laudo 2007-08-236-03.

Para os Gleissolos de substrato granodiorito, o que facilitou em muito o estudo foi a série de pontos encontrados, contidos em alguns desses polígonos, sendo eles apresentados na Figura 38, sequencialmente como:

- 2005-06-257-03;
- 2010-08-038-02;
- 2011-01-013-02a;
- 2011-09-224-01;
- 2012-04-126-01;
- 2015-12-185-01.

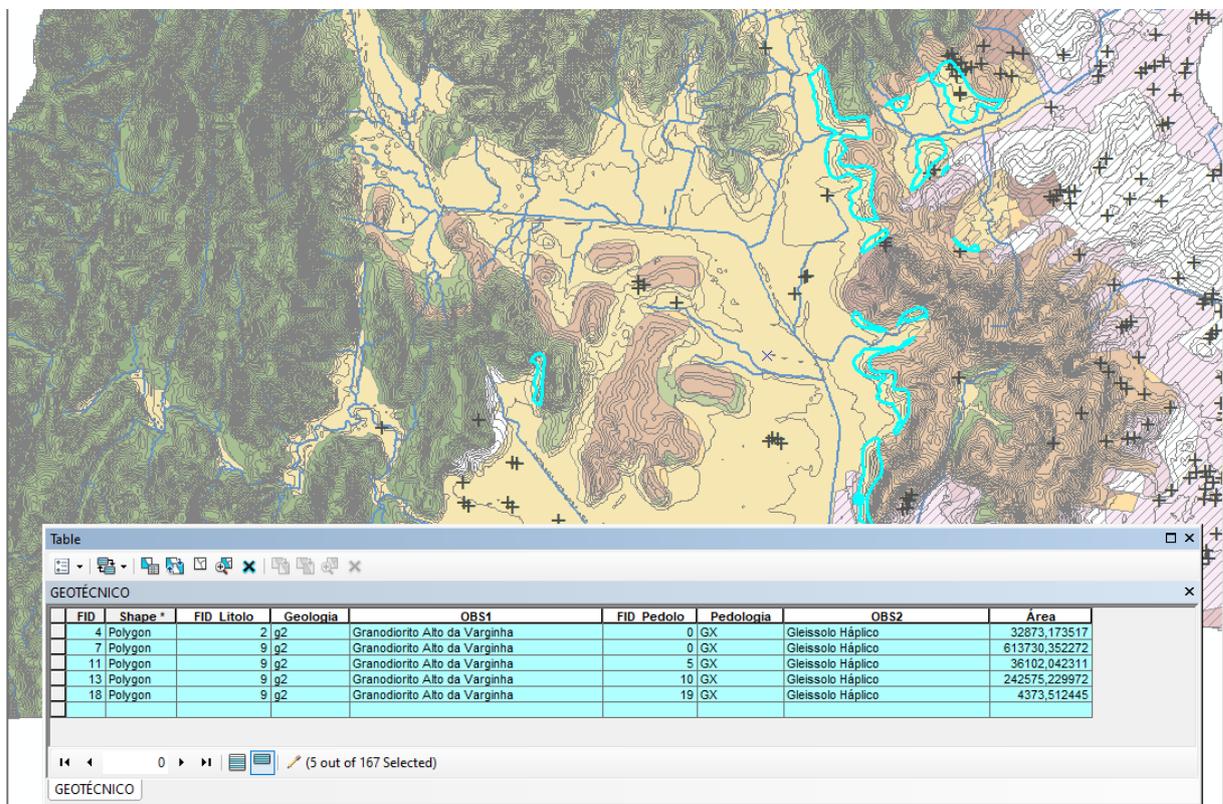


Figura 38 - Unidade geotécnica preliminar Gleissolo substrato granodiorito.

Todos os laudos apresentavam algumas semelhanças entre si, apresentando camadas intercaladas ou subsequentes de coloração vermelha e amarela ou ocre, com discreto gradiente textural. Já o desenvolvimento do perfil do solo teve maior variação, com profundidade do impenetrável variando entre 4,87m e 38,30m e nível d'água variando entre 3,53m e 10,85m de profundidade. A Figura 39 apresenta laudo de sondagem característico dessa unidade que foi retificada para Argissolo vermelho-amarelo substrato granodiorito.

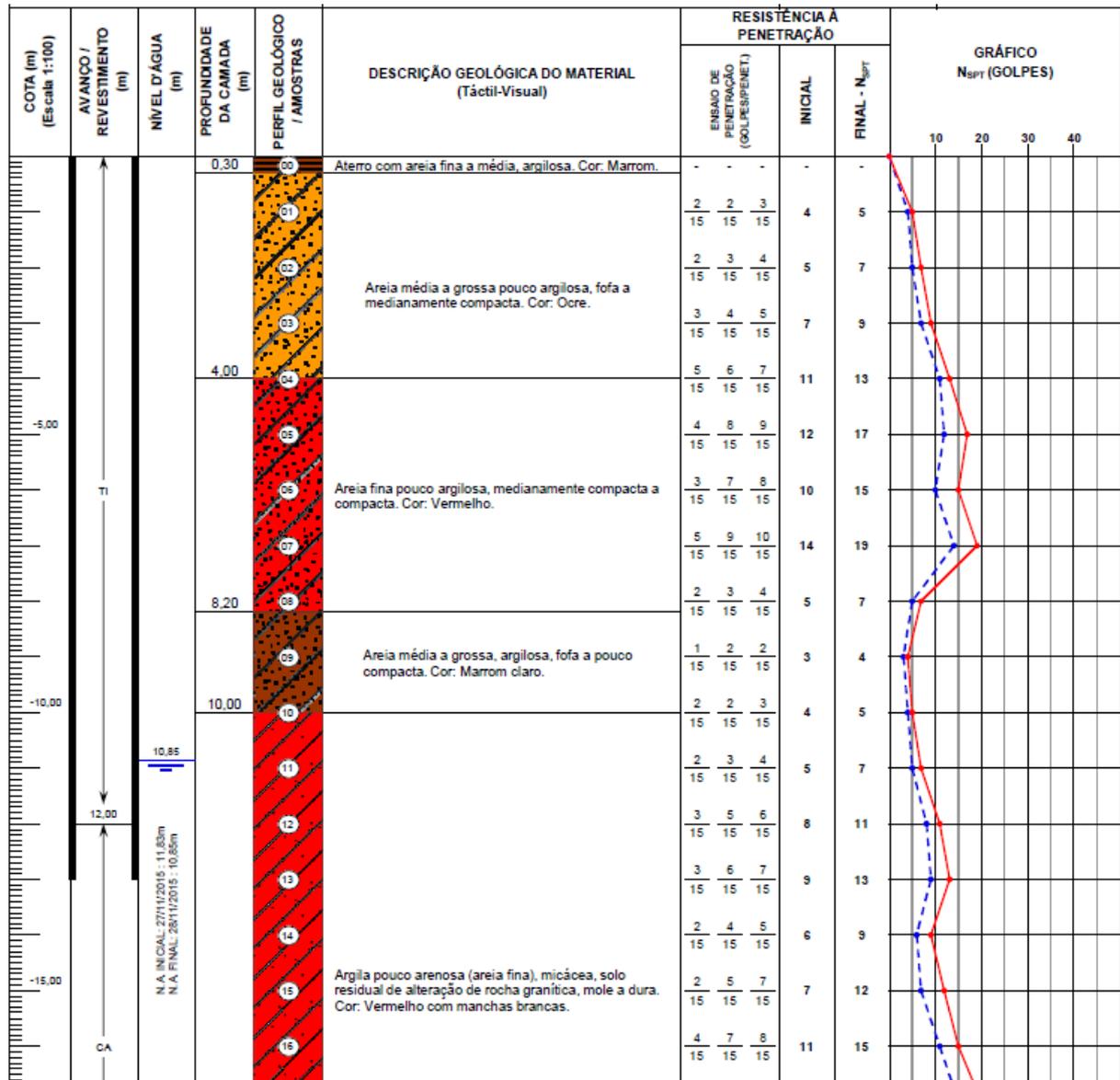


Figura 39 - Trecho do laudo 2015-12-185-01.

Os Gleissolos de substrato gnaiss, migmatito (Figura 40) seguiram o mesmo raciocínio das unidades preliminares anteriores e foram facilmente renomeados como Argissolos vermelho-amarelos substrato gnaiss, migmatito. Um ponto interessante dessa unidade é que apresentava clara continuidade em relação aos pontos já anteriormente classificados da mesma forma, ratificando a escolha de reclassificação.

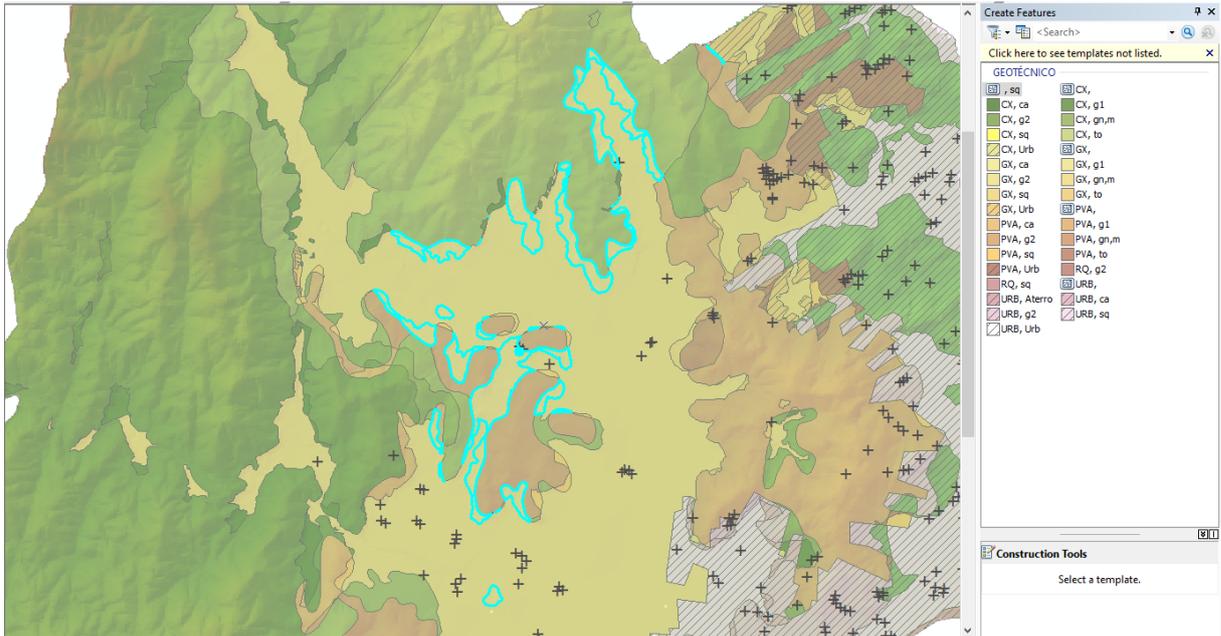


Figura 40 - Unidade geotécnica preliminar Gleissolo substrato gnaiss, migmatito.

Por fim, ao se avaliar a unidade geotécnica preliminar Gleissolo substrato tonalito, foi possível observar sua ocorrência em apenas um pequeno segmento adjacente aos Gleissolos de substrato sedimentos quaternários, entre cotas de altitude de 10m e 15m, passando então a ser englobada por essas (Figura 41).

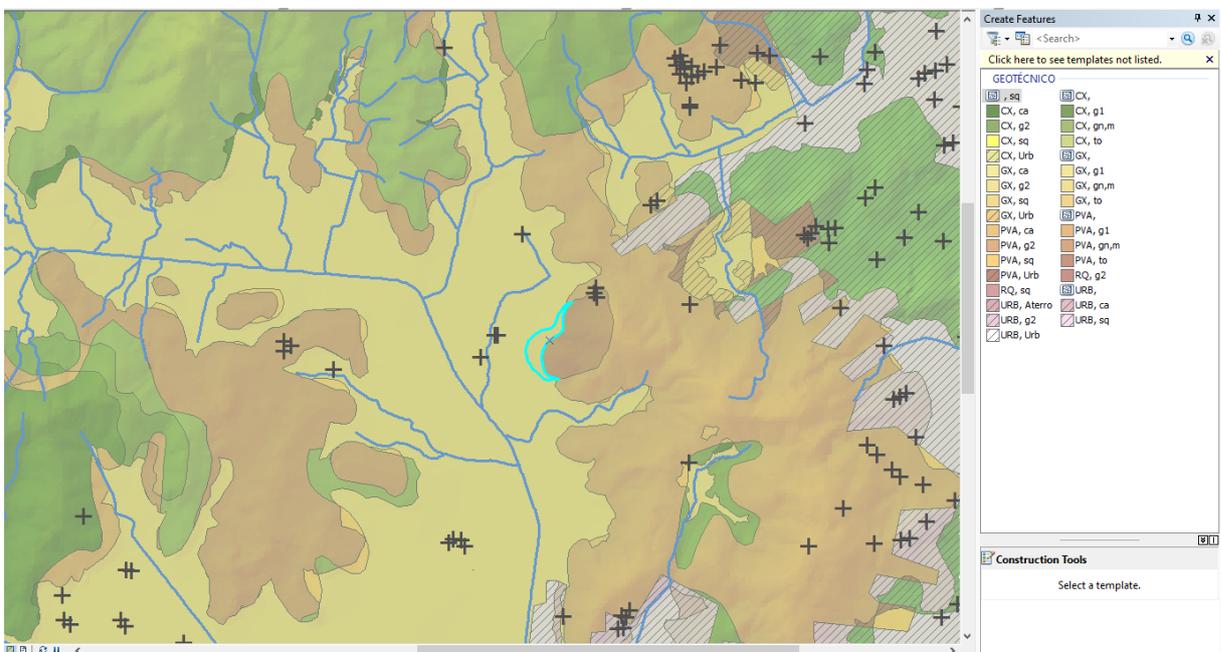


Figura 41 - Unidade geotécnica preliminar Gleissolo substrato tonalito.

4.4.4 Argissolos vermelho-amarelos substrato sedimentos quaternários

A ocorrência dessa unidade geotécnica preliminar se delimita ao pé de encostas, em pequenos polígonos, típicos da ação coluvionar. Conforme citam Higashi (2006) e Santos (1997), essa unidade passou a se chamar Argissolo vermelho-amarelo substrato depósito de encosta, conforme mostra a Figura 42.

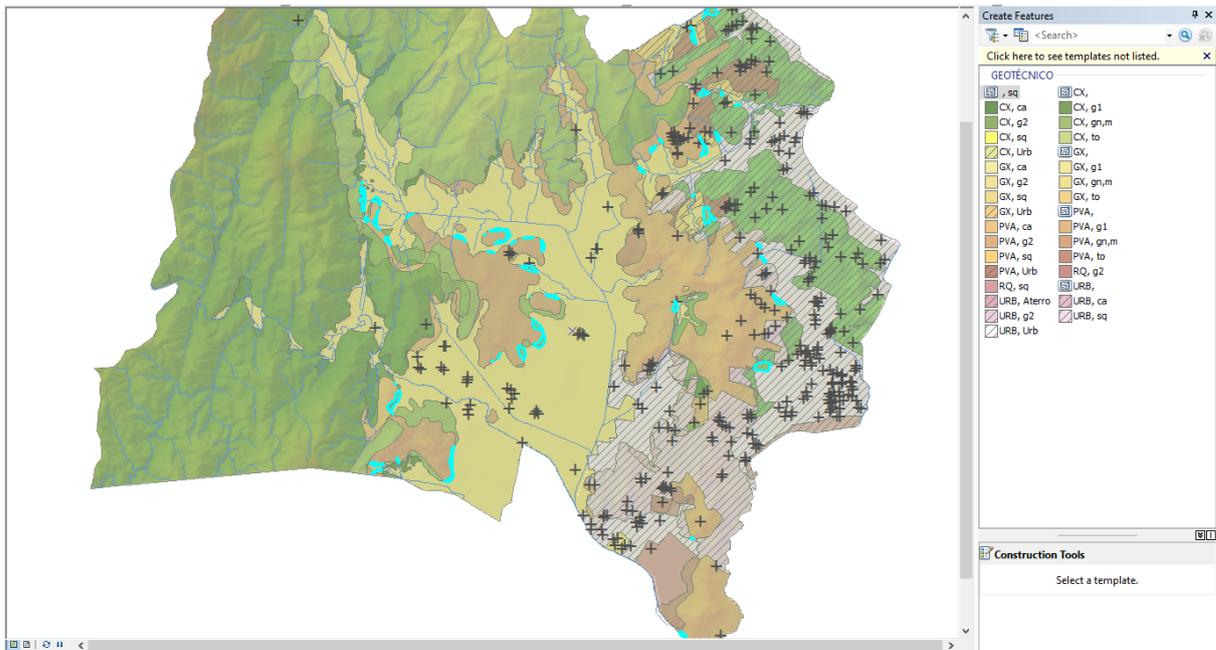


Figura 42 - Ocorrência da unidade geotécnica Argissolo vermelho-amarelo substrato depósito de encosta.

4.4.5 Neossolos quartzarênicos substrato granodiorito

Essa unidade foi verificada em virtude da potencial incompatibilidade de Neossolos, principalmente quartzarênicos em cotas de altitude um pouco maiores. Essa classe pedológica está normalmente associada a solos de sedimentos quaternários, muitos de origem marinha ou fluviais.

Foram identificados dois pontos SPT que estavam contidos dentro dos polígonos e feito o estudo desses laudos de sondagem, que apontavam características de Argissolos, porém apresentando coloração vermelha, variegada e marrom. Em termos de cotas de altitude e até mesmo pelas adjacências dessa unidade, Argissolos vermelho-amarelos seriam compatíveis, não fosse pela coloração. Certamente, pela avaliação dos laudos não poderia se tratar de Neossolos quartzarênicos, visto o teor de argila entre camadas.

A coloração, de fato, frequentemente pode gerar alguma dúvida em avaliações de solos e não costuma ser alvo de grande atenção, já que para fins de obras de fundações, não é um

parâmetro utilizado e por essa razão, apesar não representar a cor para esse ponto específico, essa unidade foi renomeada para Argissolo vermelho-amarelo substrato granodiorito.

Foram os laudos encontrados, da esquerda para a direita da Figura 43:

- 2007-08-238-02;
- 2010-03-060-12.

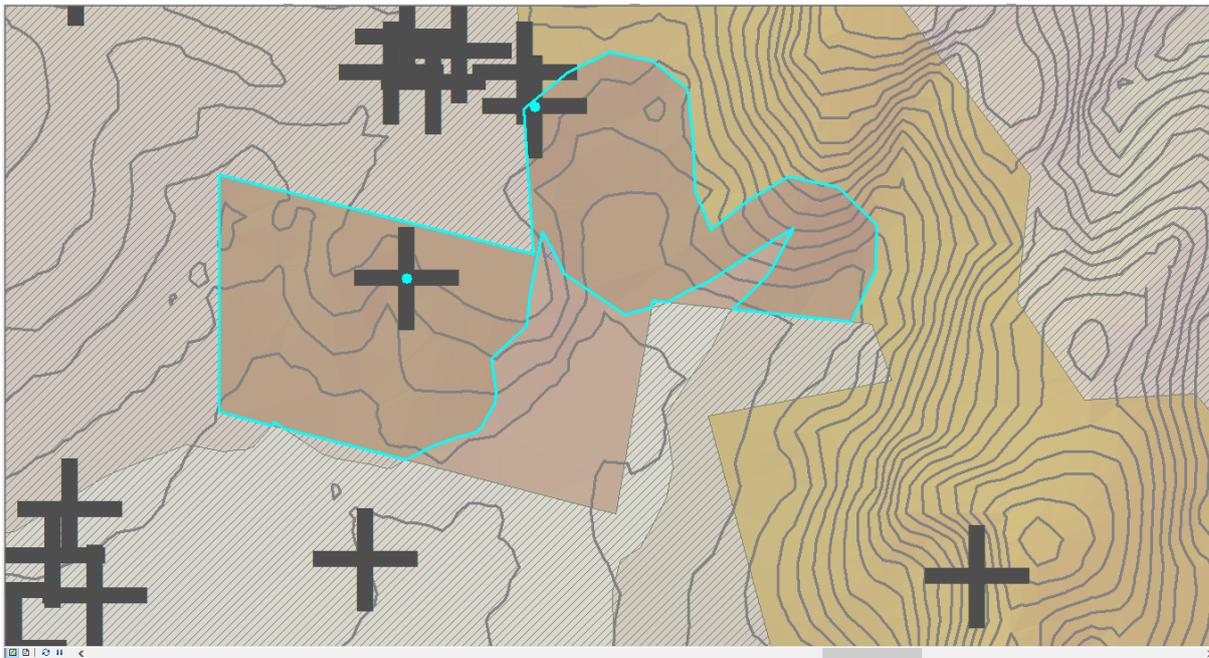


Figura 43 - Unidade geotécnica preliminar Neossolos quartzarênicos substrato granodiorito.

O laudo 2010-03-060-12 é apresentado na Figura 44.

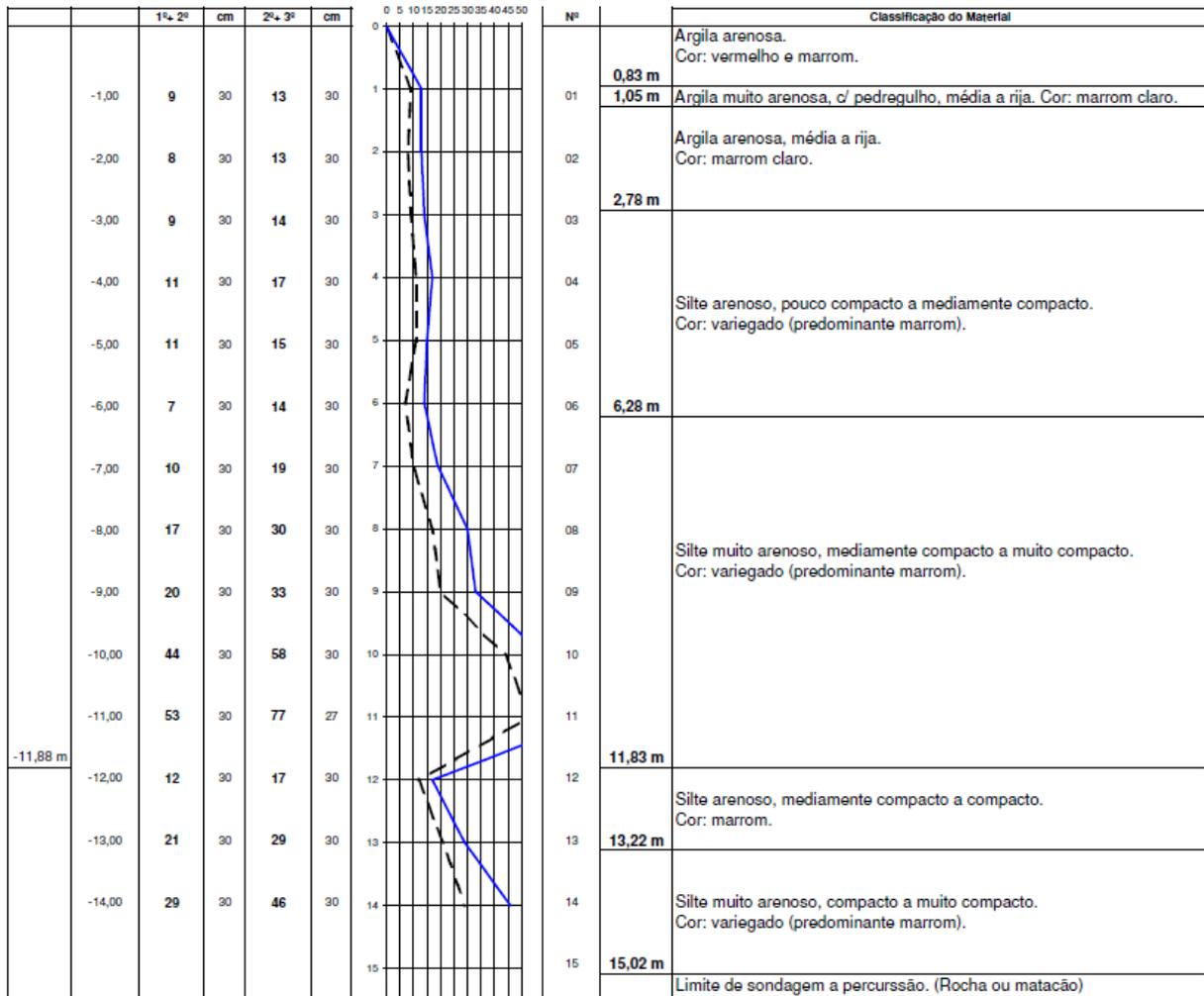


Figura 44 - Laudo 2010-03-060-12.

4.4.6 Neossolos quartzarênicos substrato sedimentos quaternários

Essa unidade foi avaliada através da combinação do laudo de sondagem, a identificação de cotas de altitude baixas e, sobretudo, conhecimento prévio do local, que indicava área próxima de mangue, resultando na reclassificação para Gleissolos substrato sedimentos quaternários. A Figura 45 apresenta a região de ocorrência desses solos, o laudo de sondagem encontrado e seu perfil.

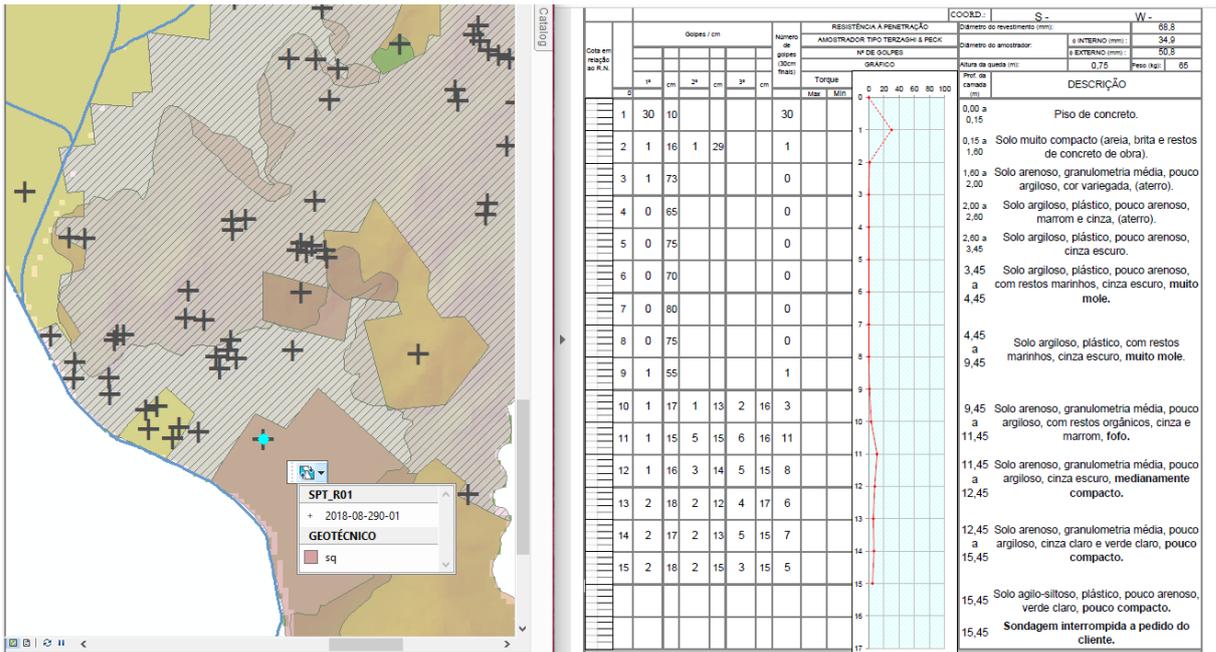


Figura 45 - Unidade geotécnica preliminar Neossolos quartzarênicos substrato sedimentos quaternários.

4.4.7 Avaliação das unidades com urbanização encontradas

A primeira unidade avaliada foi a área urbana substrato granodiorito por ser a maior unidade urbanizada. Esse grande polígono segue de forma contínua pelas altitudes médias a altas, unindo ou contornando os Argissolos vermelho-amarelos de mesmo substrato, levando a uma mesma tendência de classificação. Como havia muitos laudos da base de dados nessa área, foi realizada a validação dessa hipótese através deles.

Foram escolhidos para o estudo pontos distribuídos, que contemplasse áreas próximas às bordas e bem o centro do polígono. As Figuras 46 a 49 mostram os pontos coletados para ratificação da hipótese.

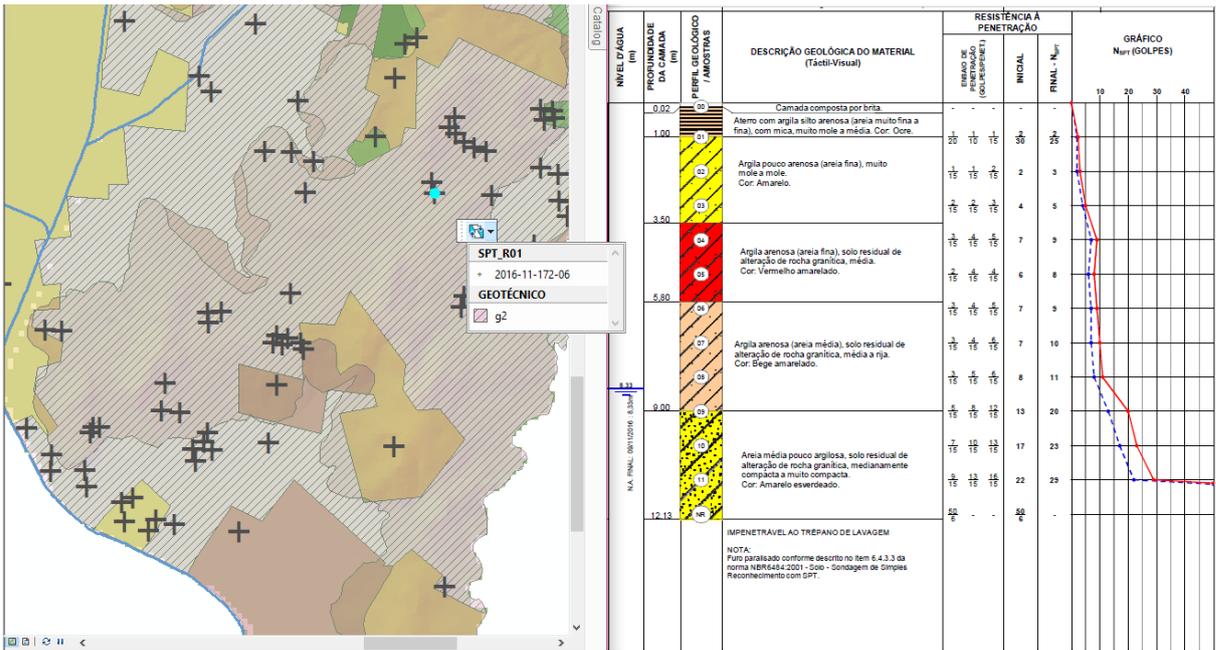


Figura 46 – Laudo 2016-11-172-06.

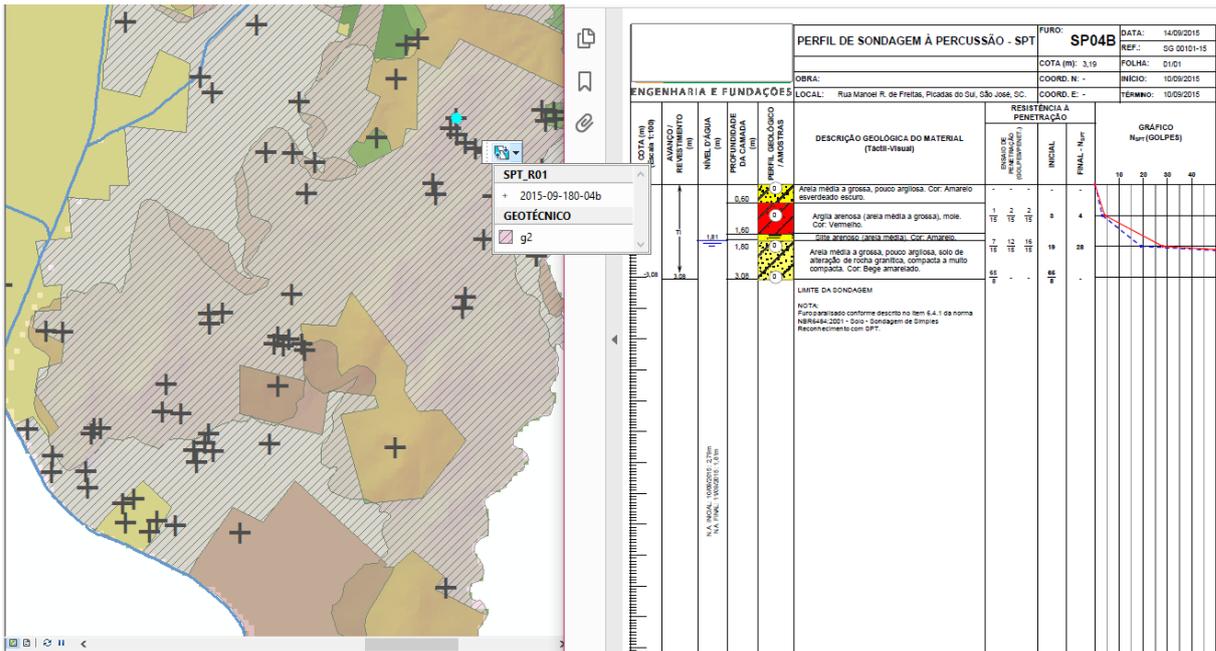


Figura 47 - Laudo 2015-09-180-04b.

continuidade dessa unidade pedológica. As Figuras 50 a 53 mostram os pontos coletados para ratificação da hipótese.

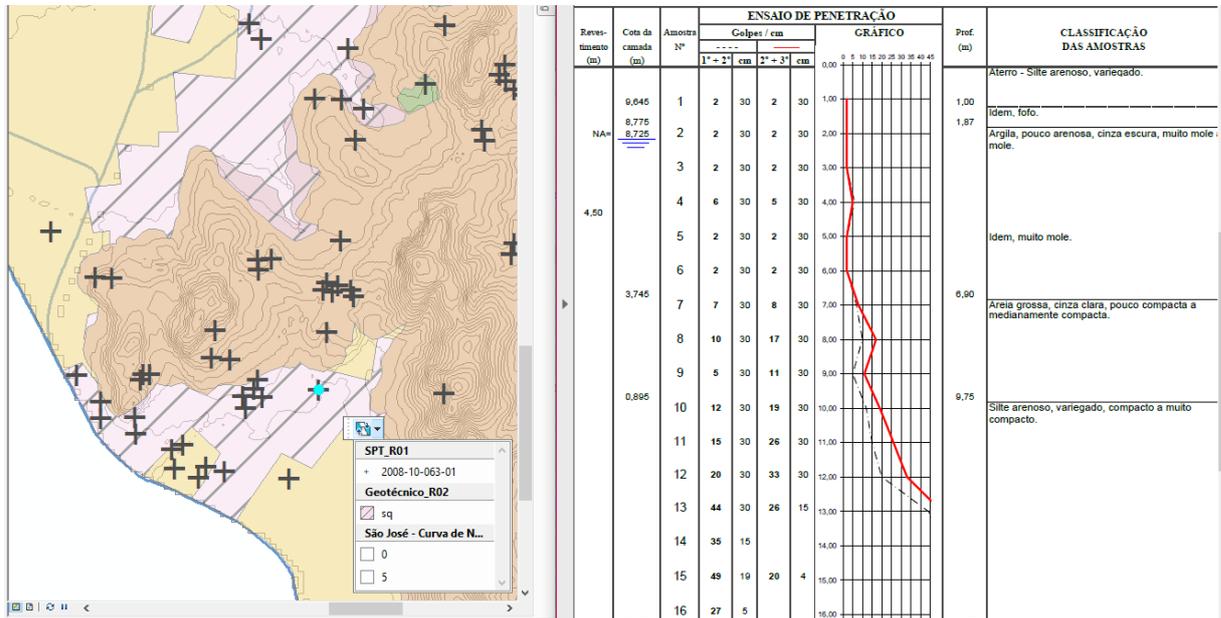


Figura 50 - Laudo 2008-10-063-01.

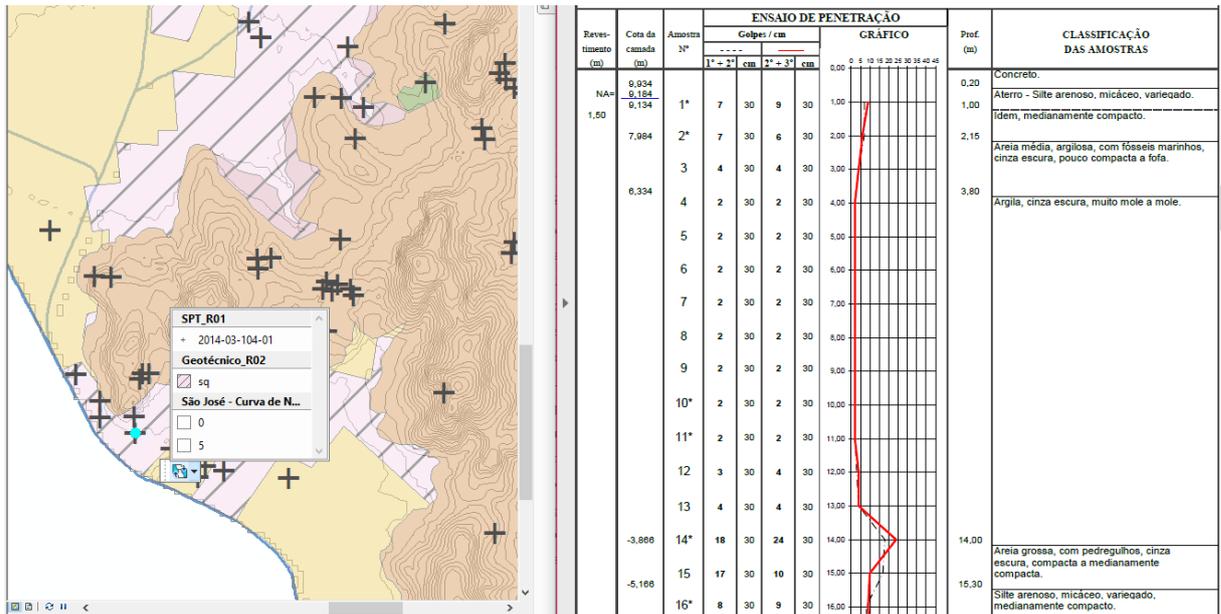


Figura 51 - Laudo 2014-03-104-01.

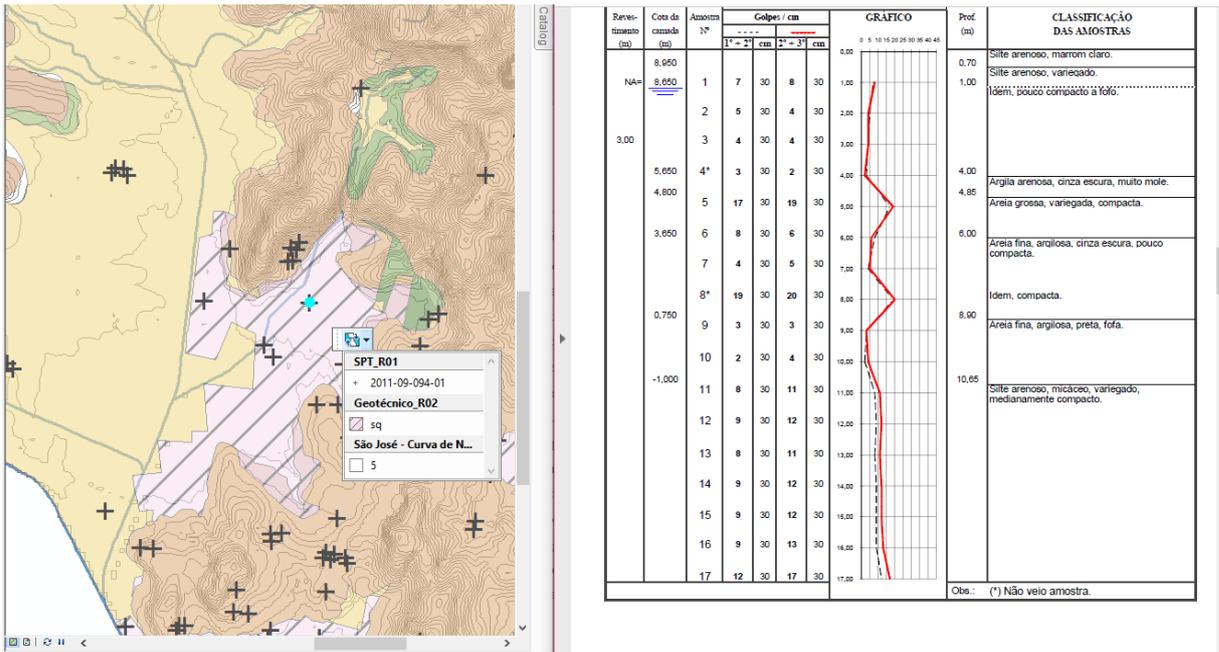


Figura 52 - Laudo 2011-09-094-01.

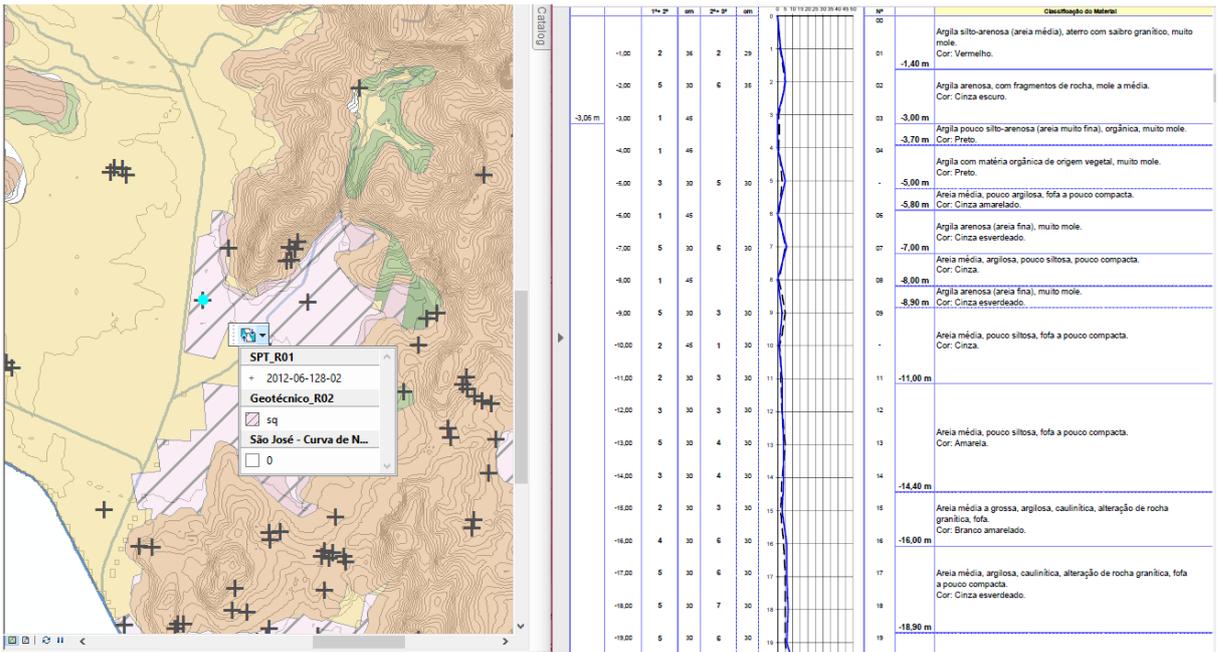


Figura 53 - Laudo 2012-06-128-02.

Os polígonos da porção leste foram avaliados considerando-se as cotas de altitude, que seguiam entre o nível do mar até 15m. Como as áreas do entorno eram ou urbanizadas ou em cotas diferentes, optou-se por uma análise criteriosa de pontos ao longo de todo o perímetro e porções intermediárias dos polígonos.

Todos os laudos avaliados confirmam que a unidade em questão era Gleissolos de substrato sedimentos quaternários. As Figuras 54 a 57 apresentam alguns dos laudos considerados.

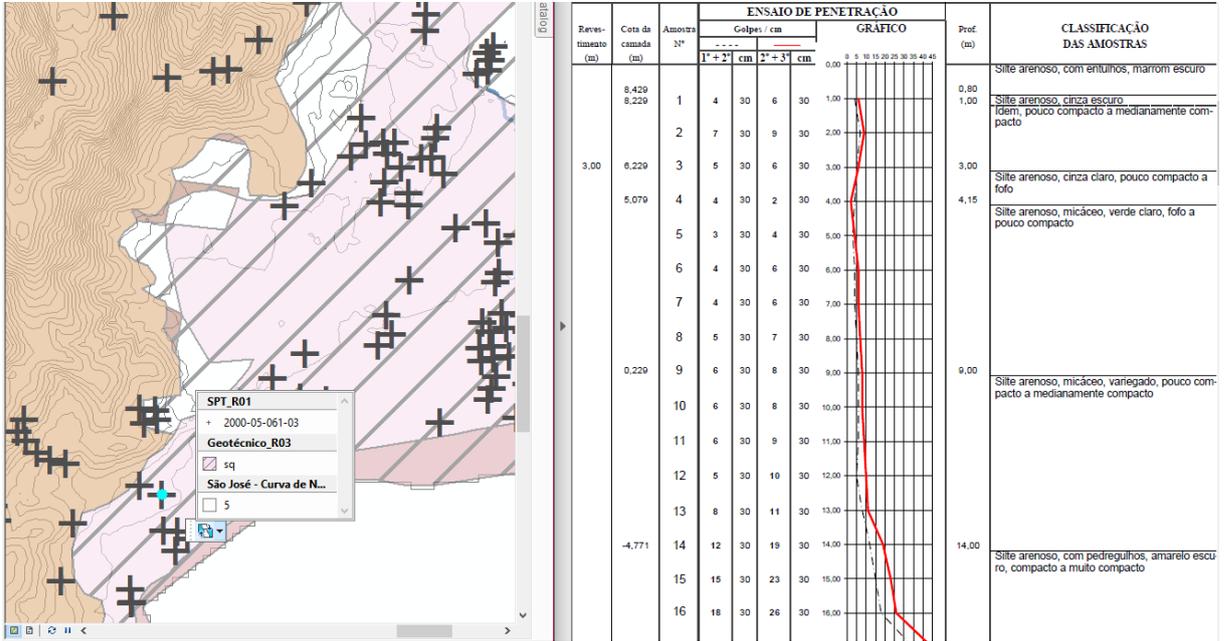


Figura 54 - Laudo 2000-05-061-03.

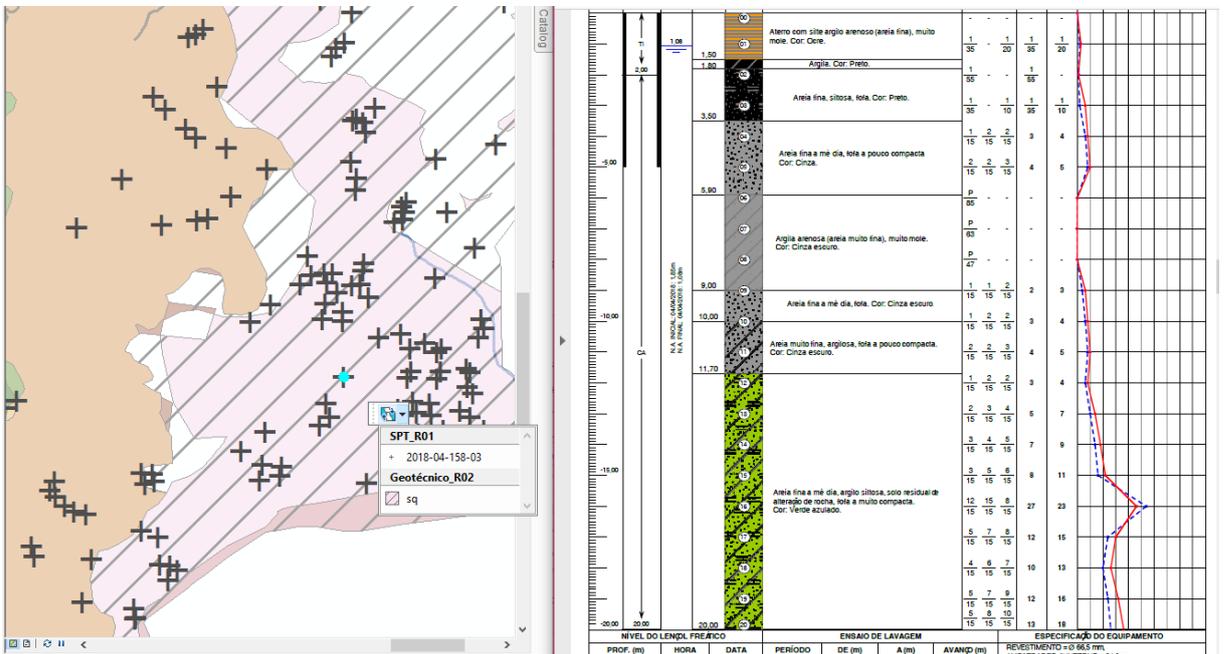


Figura 55 - Laudo 2018-04-158-03.

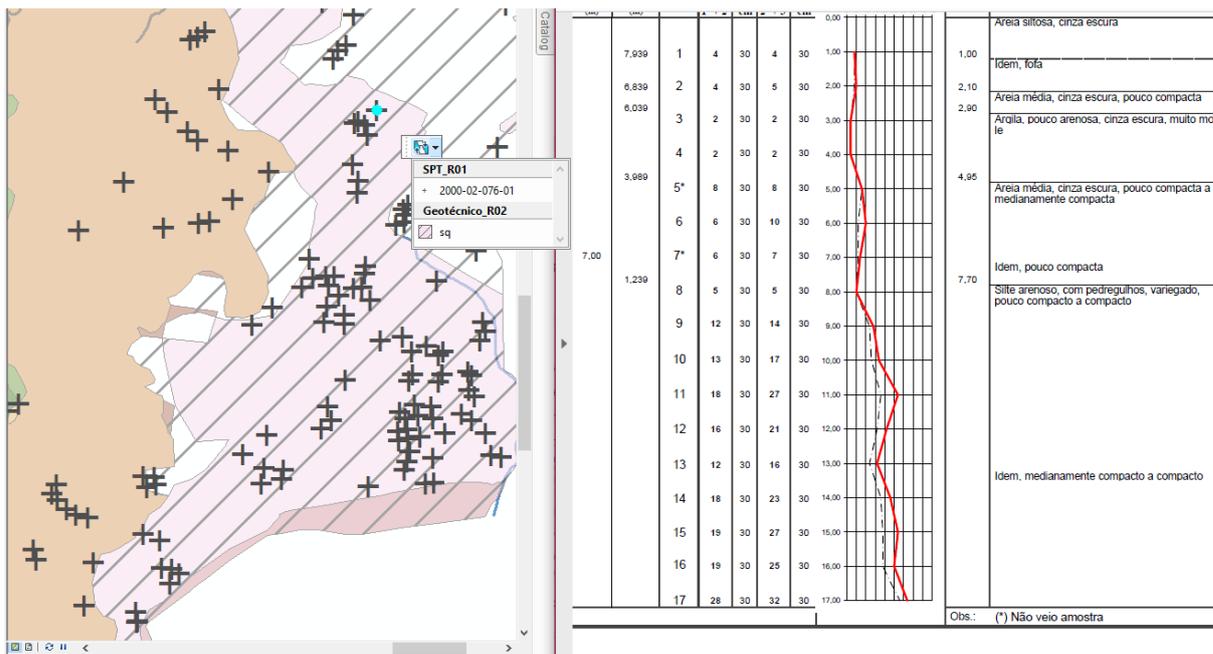


Figura 56 - Laudo 2000-02-076-01.

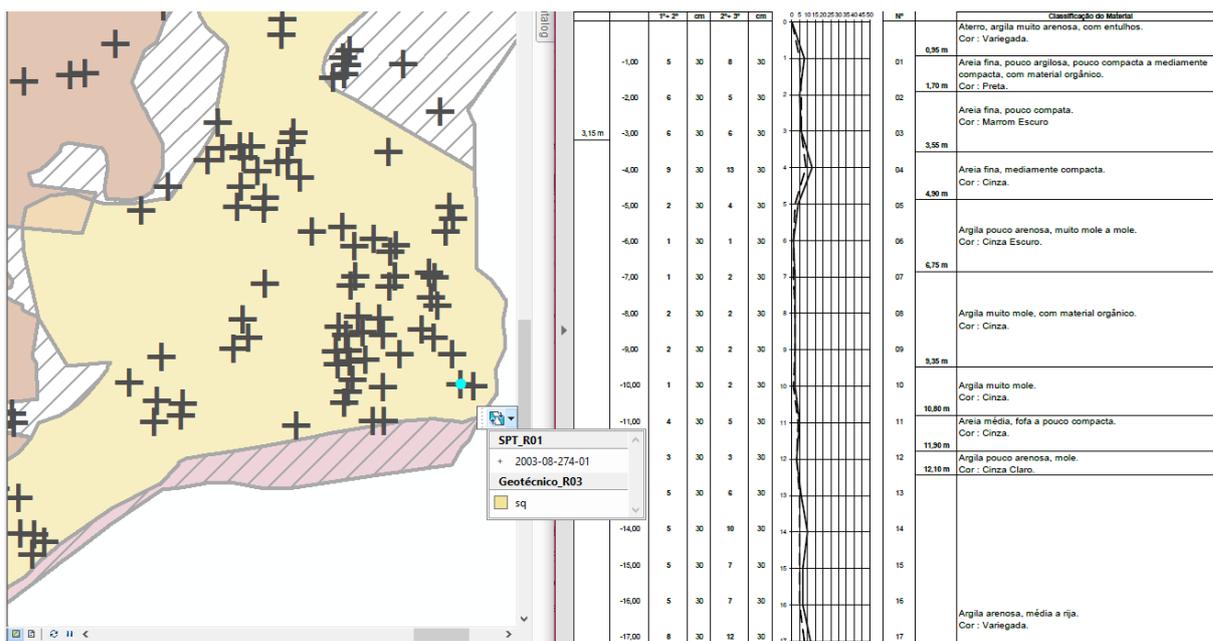


Figura 57 - Laudo 2003-08-274-01.

Por fim, uma análise mais detalhada foi realizada para toda a área urbanizada, com o objetivo de melhorar o mapa geotécnico, com união de polígonos incompletos, ou seja, com uma das classificações como área urbana ou urbano, aos adjacentes que tinham unidade pedológica-geológica compatíveis.

No final resultaram desse estudo 16 unidades geotécnicas, conforme descrito no Quadro 9.

Quadro 9 - Unidades geotécnicas finais.

| Unidade Geotécnica | Descrição | Unidade Geotécnica | Fonte |
|---------------------------|--|---------------------------|--|
| CX-ca | Cambissolo Háplico substrato Depósitos Coluviais | PVA-g2 | Argissolo Vermelho-Amarelo substrato Granodiorito |
| CX-g1 | Cambissolo Háplico substrato Granito | PVA-gn,m | Argissolo Vermelho-Amarelo substrato Gnaisse, migmatito |
| CX-g2 | Cambissolo Háplico substrato Granodiorito | PVA-de | Argissolo Vermelho-Amarelo substrato Depósito de Encosta |
| CX-gn,m | Cambissolo Háplico substrato Gnaisse, migmatito | PVA-to | Argissolo Vermelho-Amarelo substrato Tonalito |
| CX-to | Cambissolo Háplico substrato Tonalito | PVA-urb | Argissolo Vermelho-Amarelo substrato Urbano |
| GX-sq | Gleissolo Háplico substrato Sedimentos Quaternários | URB-Aterro | Aterro à beira-mar |
| PVA-ca | Argissolo Vermelho-Amarelo substrato Depósitos Coluviais | URB-ca | Área Urbana substrato Depósitos Coluviais |
| PVA-g1 | Argissolo Vermelho-Amarelo substrato Granito | URB-urb | Área Urbana |

4.5 SUPERFÍCIES ESTIMADAS E CARTAS DE APTIDÃO

Tendo sido finalizada a etapa do mapeamento geotécnico, foi iniciada a busca pela caracterização dessas unidades. A ferramenta geoestatística de krigagem foi escolhida por ser compatível com os dados existentes e apresentar resultados confiáveis, se manipulada da maneira correta. Para isso, foi analisada a distribuição das sondagens e, em virtude da não homogeneidade dos pontos, optou-se pela elaboração de cartas únicas, dentro da área de projeção do crescimento urbano, para cada item a ser avaliado, ao invés de separá-las por unidade geotécnica.

Ainda, considerando-se a natureza dos dados, laudos de sondagem SPT, foram avaliadas quais informações poderiam vir a ser extraídas que auxiliassem na caracterização da área em estudo. Laudos SPT fornecem diretamente valores de NA, impenetrável à percussão e valores de N_{spt} a cada metro, enquanto, indiretamente, fornecem valores para dimensionamento de fundações rasas e profundas. Portanto, foram definidas as seguintes cartas para elaboração:

- Superfícies estimada do lençol freático;
- Superfície estimada do impenetrável;
- Cartas de tensões admissíveis para fundações superficiais;
- Cartas de superfície resistente para fundações profundas;
- Cartas de isovalores de N_{spt} .

Em relação à nuvem de pontos, o de código 2012-07-129-05a, localizado no bairro Alto Forquilhas, foi retirado de todas as análises, visto que, no momento da determinação das vizinhanças, ele acabava por aumentar o erro e nublar a estimativa, em virtude da sua distância em relação aos demais pontos ser muito elevada, superior a 5km.

Foram elaboradas duas superfícies estimadas do lençol freático, sendo uma delas levando em conta a profundidade em si e, a outra, a cota de assentamento do ponto subtraída da profundidade. É importante ressaltar que se optou por não separar os dados para análise temporal do nível d'água porque esses seriam necessários em maior quantidade e mais bem distribuídos.

Dos 350 pontos, 25 haviam sido cadastrados com NA não encontrado e, por isso, foram retirados da amostra para esse estudo, através de um filtro.

Foram desenvolvidas também duas superfícies estimadas do impenetrável à percussão, sendo uma delas levando em conta a profundidade em si e, a outra, a cota de assentamento do ponto subtraída da profundidade. Dos 350 pontos, 10 haviam sido cadastrados com critério de paralização por solicitação do cliente e, por isso, foram retirados da amostra para esse estudo, através de um filtro.

Para a análise de fundações superficiais foi avaliado qual seria o melhor critério e qual seria a melhor forma de extrair esses dados.

O primeiro passo foi então definir o método de pré-dimensionamento que fosse relativamente simples e direto, de forma que fosse possível generalizá-lo independente de outras características do solo, além do N_{spt} . Para isso, foi escolhido o método descrito por Cintra *et al.* (2011), conforme Equação (1).

O segundo passo foi determinar até que profundidade haveria aplicabilidade da Equação (1), ou seja, até que profundidade poderia se considerar os valores obtidos próprios ao dimensionamento de fundações rasas, o que levantou um questionamento mais primitivo ainda que seria até que profundidade uma fundação poderia ser dita como superficial. Sobre isso, não foi encontrado um valor rígido e a própria norma vigente, NBR 6122 (2019), não determina esse limite. Com base em Thiessen (2016) e Santos (2016), que utilizaram em suas pesquisas a

profundidade de 4m como limite para elaboração de cartas de isovalores de tensões admissíveis para fundações rasas, foi estabelecido esse mesmo valor como diretriz.

As faixas de classificação foram baseadas nos valores limites de N_{spt} entre 5 e 20, ou seja, entre 100kPa e 400kPa, separados em intervalos de 25kPa, sendo então todas as regiões da carta com valores de N_{spt} abaixo de 5, que resultaram em tensões admissíveis inferiores a 100kPa, considerados como inadequados ao uso de fundações superficiais e, todos os valores acima de N_{spt} 20 (400 kPa) limitados a esse valor, indo-se a favor da segurança.

Foram utilizados todos os 349 pontos válidos para essa análise.

Para o estudo de fundações profundas não se encontrou método de pré-dimensionamento que pudesse fornecer valores de maneira generalizada, ou seja, sem levar em consideração os demais critérios e características do solo, como granulometria, coesão e ângulo de atrito. Por outro lado, incluir essas informações para cada metro de profundidade, de cada laudo, seria uma atividade consideravelmente extensa e inadequada para os fins dessa pesquisa. Além do mais, caso se optasse pela inclusão dessas descrições, a peculiaridade de cada solo acabaria por dificultar a geração de cartas tão amplas quanto às propostas.

Sendo assim, o conceito de superfície resistente, descrito no item 2.3.4 e resumido no Quadro 4, foi escolhido por simplificar e ao mesmo fornecer informações consideravelmente importantes no dimensionamento de estacas, afinal, a capacidade executiva do elemento é tão importante quanto o dimensionamento teórico em si.

Para as cartas de superfície resistente, foi então realizada a varredura automatizada dos dados para se encontrar os valores correspondentes aos critérios de paralização, conforme o tipo de fundação profunda. Essas, por sua vez, foram escolhidas da seguinte forma:

- As pré-moldadas, por serem uma das fundações por estacas com menor custo de mercado e extremamente usuais;
- As estacas tipo hélice contínua, por atenderem ao grande número de formatos e carregamentos, além de se adaptarem a uma variedade de solos e, importante lembrar, com baixa vibração e impacto de vizinhança, sendo bastante adequada em áreas mais urbanizadas;
- As estacas tipo raiz, por serem mais robustas e capazes de prosseguir em perfuração de solos mais resistentes que as demais, incluindo rochas alteradas.

A faixa de classificação definida foi de metro em metro. Foram utilizados todos os 349 pontos válidos para essa análise.

Para as cartas de isovalores de Nspt, foi determinado qual seria a profundidade máxima a ser avaliada, subdividindo-se o intervalo da maneira mais igualitária possível. A escolha do maior valor, que seria a última carta, levou em consideração o percentual mínimo de 50% de laudos em que ainda havia informações de Nspt, ou seja, os pontos em que não havia sido atingido o impenetrável, como mostra o Quadro 10. Foram utilizados todos os 349 pontos válidos para essa análise.

Quadro 10 - Percentual de pontos que possuem valor de Nspt por profundidade.

| Profundidade (m) | Pontos com Nspt (%) |
|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|---------------------|
| 1,00 | 99,71% | 11,00 | 76,29% | 21,00 | 39,71% | 31,00 | 5,14% |
| 2,00 | 97,71% | 12,00 | 74,86% | 22,00 | 36,29% | 32,00 | 3,43% |
| 3,00 | 97,43% | 13,00 | 71,71% | 23,00 | 33,14% | 33,00 | 3,14% |
| 4,00 | 94,57% | 14,00 | 68,86% | 24,00 | 29,14% | 34,00 | 2,29% |
| 5,00 | 92,29% | 15,00 | 65,14% | 25,00 | 25,71% | 35,00 | 1,71% |
| 6,00 | 88,86% | 16,00 | 61,43% | 26,00 | 18,00% | 36,00 | 0,57% |
| 7,00 | 86,86% | 17,00 | 57,14% | 27,00 | 15,14% | 37,00 | 0,57% |
| 8,00 | 84,86% | 18,00 | 53,14% | 28,00 | 11,71% | 38,00 | 0,57% |
| 9,00 | 83,14% | 19,00 | 48,57% | 29,00 | 9,43% | 39,00 | 0,29% |
| 10,00 | 79,71% | 20,00 | 44,29% | 30,00 | 7,14% | 40,00 | 0,29% |

Para exemplificar o método de criação das cartas estimativas do lençol freático, impenetrável, tensões admissíveis, superfície resistente e, por fim, de isovalores, será descrito nos itens de 4.5.1 a 4.5.5, a criação da carta de superfície estimada do lençol freático do município de São José.

4.5.1 Análise preliminar dos dados

Uma análise geoestatística parte da premissa de uma série de características básicas dos dados a serem avaliados. Para esse estudo, as variáveis precisavam ser, sem dúvida, regionalizadas, pois seriam caracterizadas por sua posição espacial (coordenadas UTM) e contínuas, que poderiam ser medidas pelas escalas relacional e intervalar. Além disso, deveriam ser representadas por uma distribuição normal, o que permitiria o uso da krigagem ordinária. Para que fosse possível realizar o estudo da forma mais completa possível e, considerando algumas limitações do *software* ArcGIS frente à natureza dos dados, optou-se por se utilizar da aplicação Geovisual, desenvolvida por Yamamoto e utilizada por Fonteles (2003) e Yamamoto (2000). A Figura 58 mostra a tela inicial do programa.

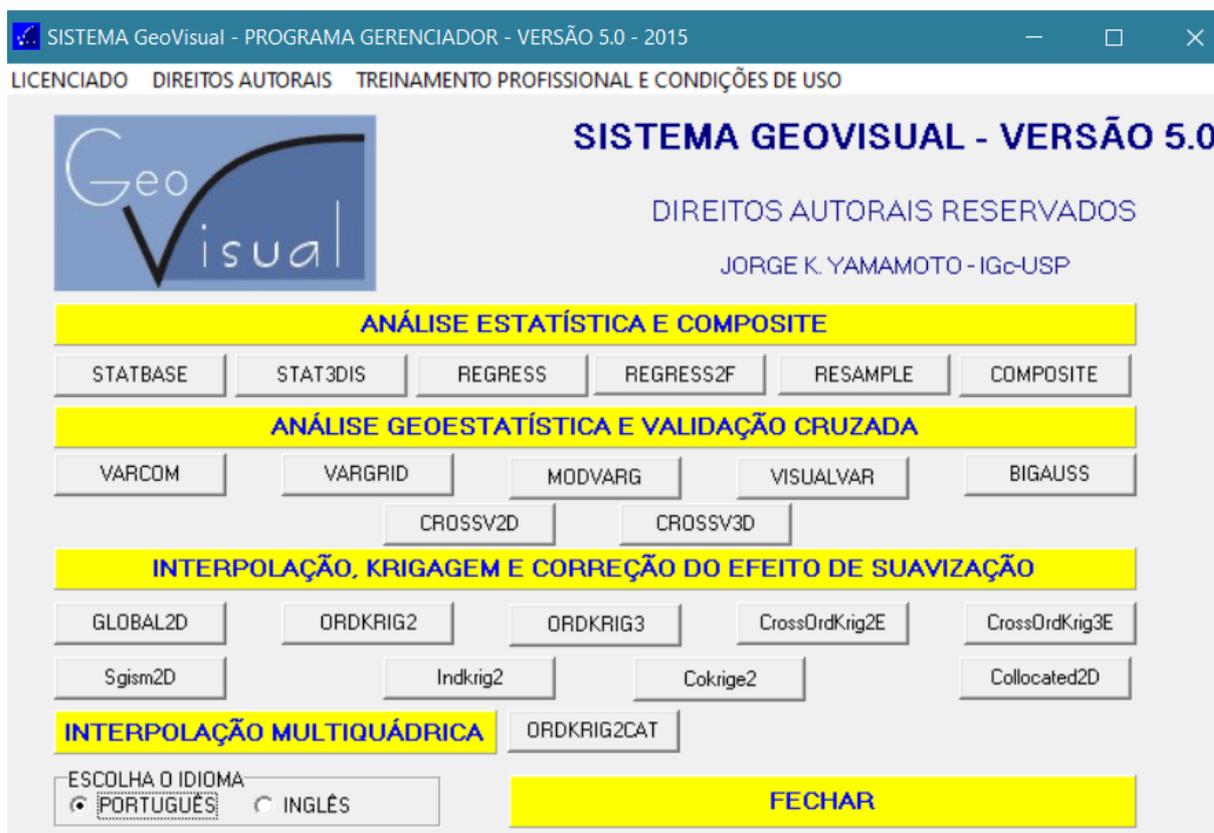


Figura 58 - Tela inicial do aplicativo Geovisual.

4.5.2 Tratamento dos dados

Foi necessária, primeiramente, a edição da base de dados desenvolvida, subdividindo-a em arquivos de formato *txt* para cada análise a ser realizada. Cada carta gerada foi desenvolvida a partir das informações de coordenadas e o motivo da respectiva análise, propriamente dito.

A Figura 59 apresenta a forma simplificada de inserção dos dados para análise.

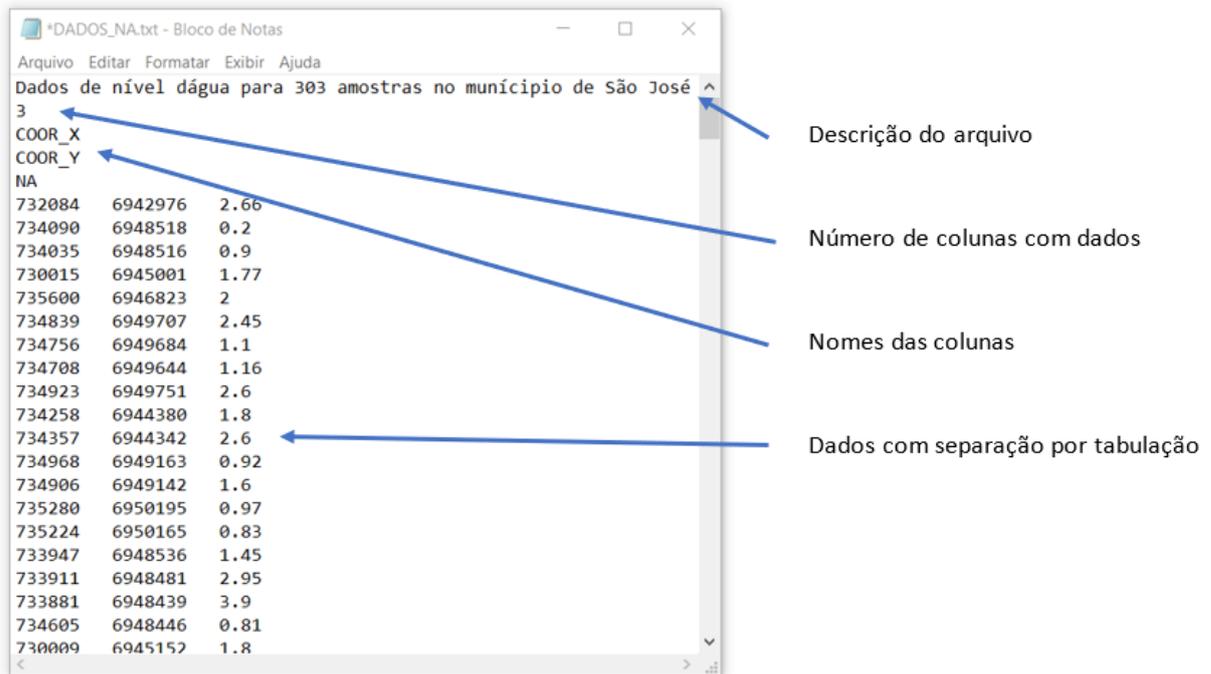


Figura 59 - Arquivo base para análise geoestatística dos dados.

4.5.3 Teste de hipótese e transformação gaussiana

Com o arquivo *txt* pronto, os dados foram inseridos no programa para se iniciar as análises estatísticas (ferramenta *statbase*), que retornam valores de mínimo e máximo, média, desvio padrão e teste de hipótese.

Nenhuma das amostras pode ser considerada normal, sendo elas, em quase sua totalidade, com forte assimetria positiva (Figura 60), o que inviabilizaria a aplicação da krigagem ordinária sem transformação dos dados.

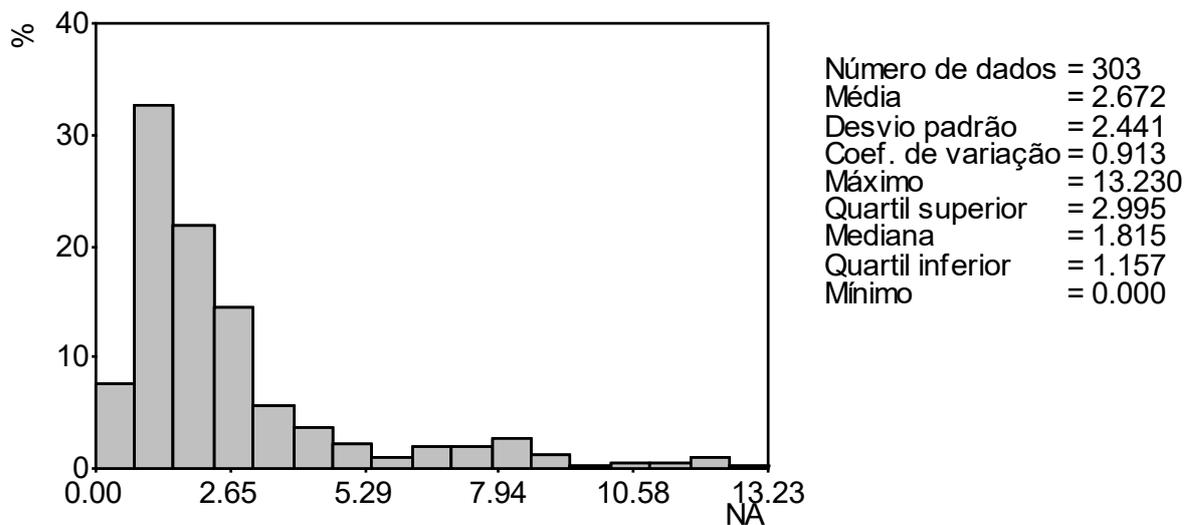


Figura 60 - Histograma de valores de NA obtidos pela ferramenta Geovisual.

Das transformações usualmente utilizadas, a logarítmica não permitiria valores negativos ou iguais a 0. A transformação gaussiana, que foi a escolhida, parte do princípio de uma distribuição normal, com valor médio igual a 0 e desvio padrão igual a 1.

4.5.4 Semivariograma experimental e modelagem do semivariograma

Segundo Landim (2006), o semivariograma mostra a medida do grau de dependência espacial entre amostras ao longo de um suporte específico e, para sua construção, são usados simplesmente as diferenças ao quadrado dos valores obtidos, assumindo-se uma estacionaridade nos incrementos. Isso significa que o semivariograma é uma medida da variabilidade geológica condicionada pela distância. Tal variabilidade pode ser bastante diferente quando consideradas diferentes direções.

A análise do semivariograma experimental tem por objetivo encontrar, de forma iterativa e manual, a direção de maior e o de menor continuidade dos dados, ou seja, a condição em que se encontra pontos de valores de variância mais próximos, com o incremento do passo.

Nos semivariogramas experimentais, para se descobrir as direções de maior e menor continuidade, tomou-se como hipótese inicial quatro direções, sendo elas 0°, 45°, 90° e 135°. Tendo como tolerância 45°. Para determinar o tamanho do passo, foi avaliada a variação nos eixos x e y, escolhendo-se o menor, dividindo-se por dois para obter o campo geométrico amostral, e, por fim, subdividindo-se pelo número de passos (usualmente 10).

Das coordenadas, tem-se que $\Delta x = 736731 - 726181 = 10550$ e $\Delta y = 6952097 - 6940708 = 11389$. Portanto, o campo geométrico é metade de Δx , $CGA=5275$ e assim o tamanho do passo adotado foi de 528.

As Figuras 61 e 62 apresentam, respectivamente, o mapa da direção de maior e menor continuidade e o variograma experimental para o NA. Para o nível d'água, a direção de 120°, em vermelho, retorna os valores de maior continuidade, enquanto a menor foi encontrada com o ângulo de 30°, em azul em ambas as Figuras já citadas.

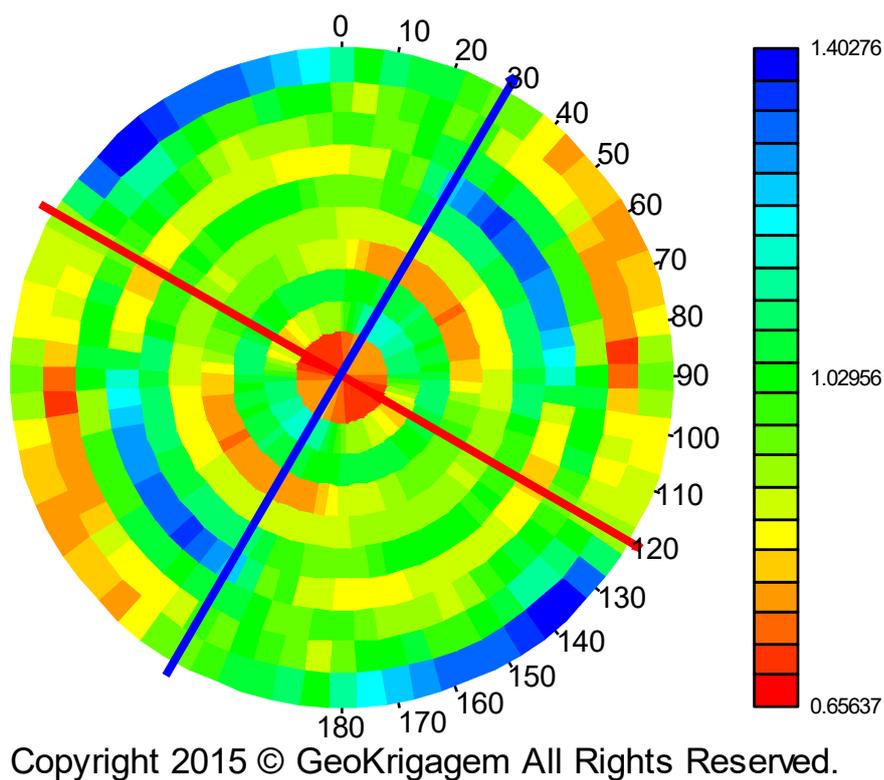


Figura 61 - Mapa do variograma experimental, indicando as direções de maior e menor continuidade.

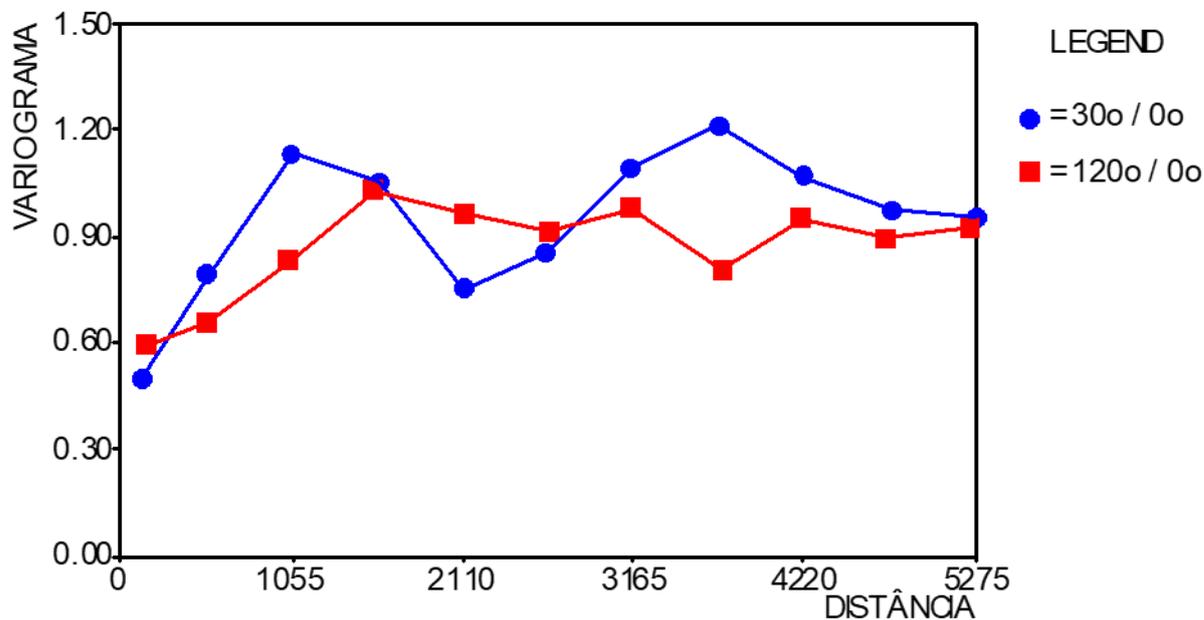


Figura 62 - Variograma do NA com as direções de maior e menor continuidade.

Após a definição do variograma experimental (através da ferramenta *modvarg*) foi realizada a modelagem utilizando-se do modelo esférico, escolhido por ser o mais usual, podendo-se afirmar que equivale à função de distribuição normal da estatística clássica. Foram

inseridos valores estimados iniciais de efeito pepita, amplitude e variância e, iterativamente e de forma manual, chegou-se aos valores finais, conforme apresenta a Figura 63.

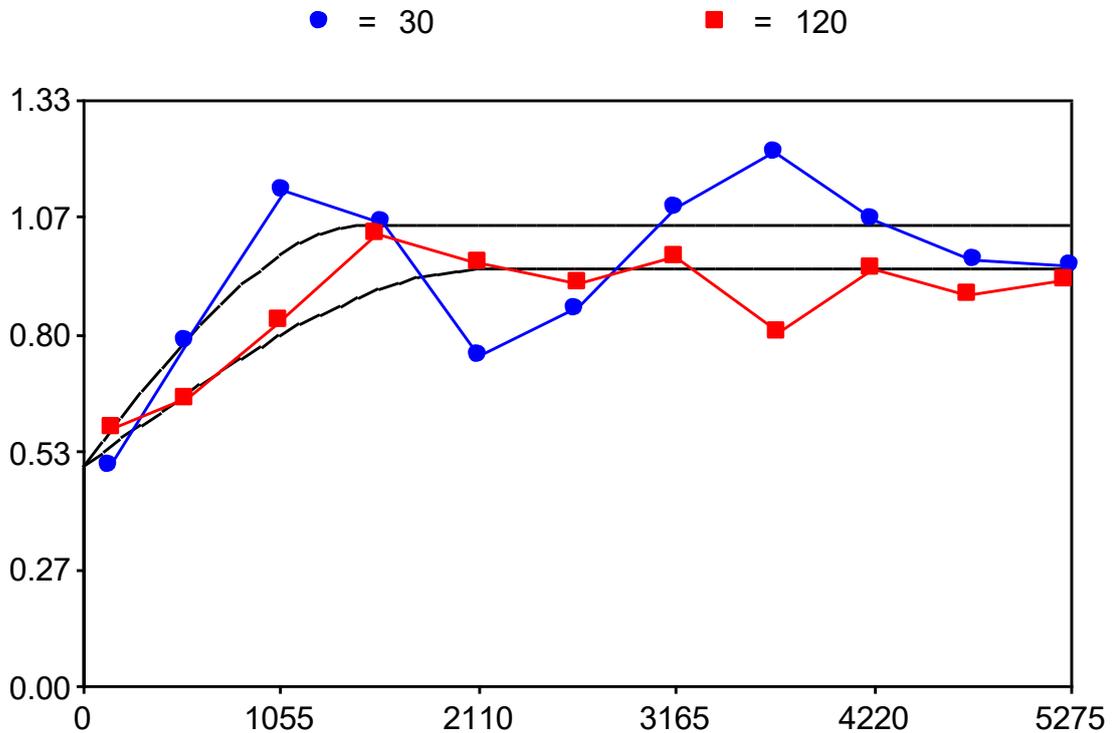


Figura 63 - Semivariogramas ajustados.

O Quadro 11 resume os parâmetros escolhidos para modelagem das estruturas dos semivariogramas, sendo θ_1 e θ_2 a direção de maior e menor continuidade, C_0 o efeito pepita, C_1 e C_2 valores de soleira da primeira e segunda estrutura, $A_{1\text{mín}}$, $A_{1\text{máx}}$, $A_{2\text{mín}}$ e $A_{2\text{máx}}$ amplitudes de influência mínimas e máximas para primeira e segunda estrutura, respectivamente.

Quadro 11 - Parâmetros da modelagem dos semivariogramas.

| Dado | θ_1 | θ_2 | C_0 | C_1 | $A_{1\text{máx}}$ | $A_{1\text{mín}}$ | C_2 | $A_{2\text{máx}}$ | $A_{2\text{mín}}$ |
|--------|------------|------------|-------|-------|-------------------|-------------------|-------|-------------------|-------------------|
| NA | 30° | 120° | 0,50 | 0,45 | 2200 | 1500 | 0,10 | 9,9E30 | 1500 |
| NA Z | 95° | 5° | 0,10 | 0,80 | 2350 | 2300 | 0,20 | 9,9E30 | 2300 |
| IMP | 55° | 145° | 0,30 | 0,70 | 2200 | 1850 | 0,13 | 9,9E30 | 1850 |
| IMP Z | 90° | 0° | 0,20 | 0,74 | 2400 | 2200 | 0,62 | 9,9E30 | 2200 |
| TA1m | 45° | 135° | 0,60 | 0,30 | 1850 | 1200 | 0,11 | 9,9E30 | 1850 |
| TA2m | 165° | 75° | 0,52 | 0,40 | 1500 | 2200 | 0,13 | 9,9E30 | 2200 |
| TA3m | 170° | 80° | 0,62 | 0,45 | 1900 | 2250 | 0,22 | 9,9E30 | 2250 |
| TA4m | 175° | 85° | 0,47 | 0,50 | 1700 | 1850 | 0,15 | 9,9E30 | 1850 |
| EPMAF | 145° | 55° | 0,45 | 0,50 | 1900 | 1500 | 0,10 | 9,9E30 | 1500 |
| EPMBF | 145° | 55° | 0,45 | 0,50 | 1900 | 1500 | 0,10 | 9,9E30 | 2200 |
| EHCF | 145° | 55° | 0,40 | 0,55 | 1900 | 1500 | 0,08 | 9,9E30 | 1500 |
| ERAIZF | 145° | 55° | 0,45 | 0,50 | 1900 | 1500 | 0,10 | 9,9E30 | 1600 |
| NSPT01 | 135° | 45° | 0,53 | 0,30 | 1600 | 1500 | 0,05 | 9,9E30 | 2400 |
| NSPT04 | 0° | 90° | 0,45 | 0,35 | 1200 | 1750 | 0,15 | 9,9E30 | 1750 |
| NSPT07 | 135° | 45° | 0,45 | 0,35 | 1400 | 1200 | 0,20 | 9,9E30 | 2100 |

| Dado | θ_1 | θ_2 | C_0 | C_1 | $A_{1m\acute{a}x}$ | $A_{1m\acute{i}n}$ | C_2 | $A_{2m\acute{a}x}$ | $A_{2m\acute{i}n}$ |
|--------|------------|------------|-------|-------|--------------------|--------------------|-------|--------------------|--------------------|
| NSPT10 | 140° | 50° | 0,55 | 0,26 | 1600 | 1500 | 0,17 | 9,9E30 | 2150 |
| NSPT13 | 135° | 45° | 0,57 | 0,30 | 900 | 650 | 0,20 | 9,9E30 | 650 |
| NSPT16 | 15° | 105° | 0,85 | 0,22 | 600 | 400 | 0,07 | 9,9E30 | 400 |
| NSPT18 | 10° | 100° | 0,84 | 0,24 | 1200 | 1100 | 0,05 | 9,9E30 | 900 |

4.5.5 Krigagem ordinária dos valores gaussianos e transformada reversa

Por fim, com os dados transformados e padronizados, foi possível se realizar a krigagem ordinária dos valores gaussianos, através do comando *crossordkrig2e*, do programa Geovisual.

Foi necessário dimensionar a malha regular que, tendo como base as coordenadas do Município, ficou definida no intervalo em *x* de 722000 a 738000 e em *y* de 6940000 a 6954000, com variação de 50m.

Os resultados foram gerados para os valores gaussianos e, em sequência, foram obtidos àqueles referentes aos valores transformados, também chamados de transformada reversa. Os dados calculados são então exportados de formato *txt* para planilha novamente e então inseridos em ArcGIS para padronização da apresentação.

A Figura 64 apresenta o relatório de saída, em formato *txt*, de toda a análise de krigagem, sendo da esquerda para a direita:

- X - Valores das coordenadas;
- Y - Valores das coordenadas;
- Y*OK - Krigagem dos valores gaussianos;
- Z*OK - Transformada reversa sem correção;
- Z**OK - Transformada reversa com correção;
- Y**OK - Krigagem dos valores gaussianos corrigidos;
- So - Desvio padrão de interpolação corrigido.

```

DADOS_NAN01.KO2 - Bloco de Notas
Arquivo Editar Formatar Exibir Ajuda
[TRANSFORMADA REVERSA DA KRIGAGEM GAUSSIANA: So: Nso original: nppq = 5
7 C:\Mestrado-Margott\SJ-ARCGIS\Krigagem\GEOVISUAL\NA\DADOS_NAN01.BK2
X
Y
Y*OK
Z*OK
Z**OK
Y**OK
So
7.22025000000000E+0005 6.94002500000000E+0006 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001
7.22075000000000E+0005 6.94002500000000E+0006 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001
7.22125000000000E+0005 6.94002500000000E+0006 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001
7.22175000000000E+0005 6.94002500000000E+0006 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001
7.22225000000000E+0005 6.94002500000000E+0006 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001
7.22275000000000E+0005 6.94002500000000E+0006 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001
7.22325000000000E+0005 6.94002500000000E+0006 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001
7.22375000000000E+0005 6.94002500000000E+0006 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001
7.22425000000000E+0005 6.94002500000000E+0006 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001 -9.90000000000000E+0001

```

Figura 64 - Dados de saída da krigagem.

5 RESULTADOS

Esse capítulo apresenta os resultados obtidos da pesquisa, após tratamento e processamento dos dados.

Foram gerados o modelo digital do impenetrável considerando-se a profundidade e a cota de altitude, modelo digital do nível d'água considerando-se a profundidade e a cota de altitude, cartas de aptidão para fundação com isovalores de N_{spt} para profundidade limite entre fundações rasas e profundas (4m).

5.1 EVOLUÇÃO DA MANCHA URBANA

A projeção de evolução da mancha urbana (Figura 65) mostra uma tendência de crescimento da faixa leste em direção à faixa oeste do Município, percorrendo as cotas de altitudes mais baixas e principais vias de acesso já estabelecidas. Há de se notar também a existência de alguns vazios urbanos, muitos deles sem impeditivos legais, como áreas institucionais ou de preservação permanente, apenas áreas com tendência à ocupação futura.

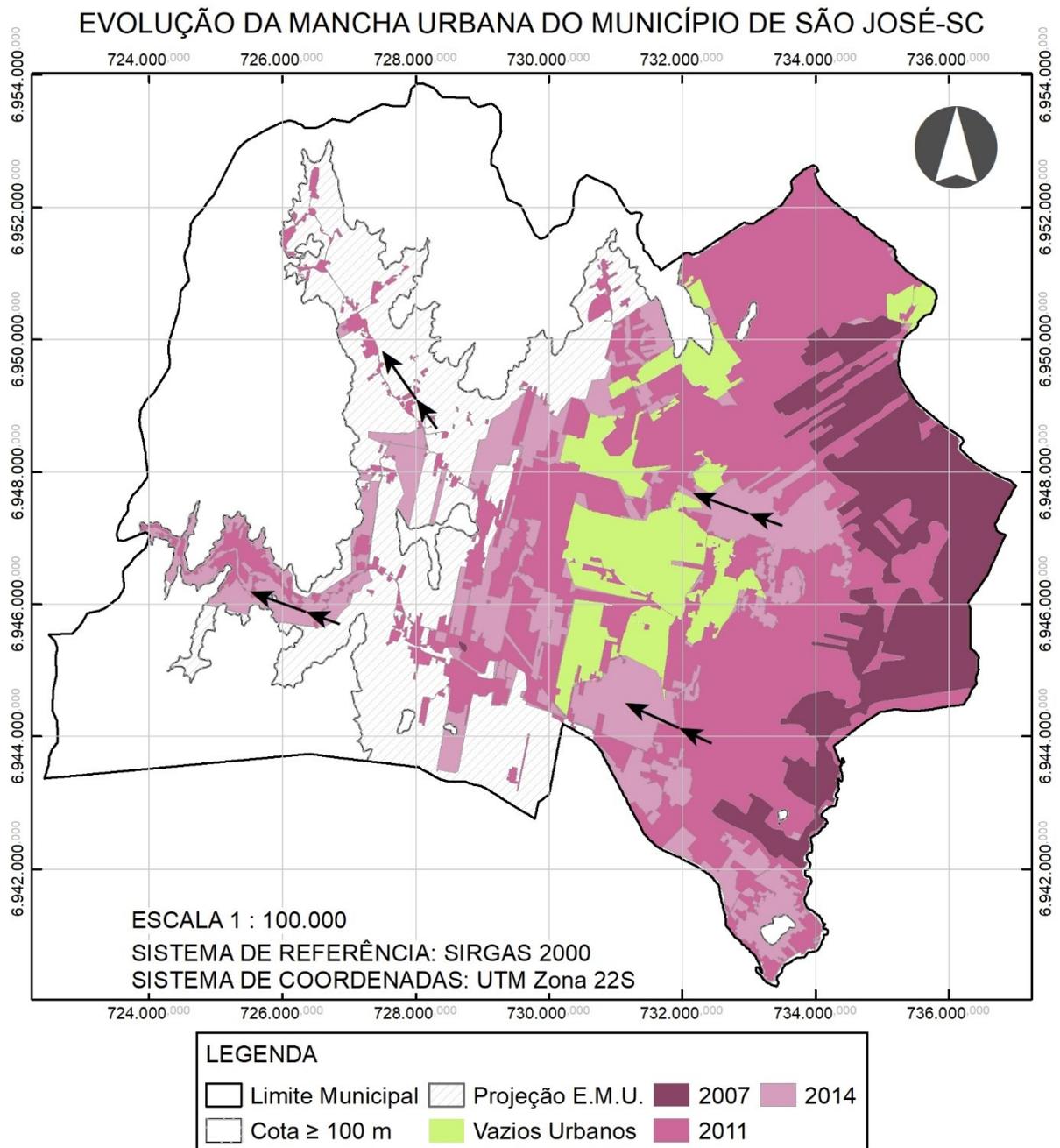


Figura 65 - Evolução da mancha urbana do município de São José.

5.2 GEOTÉCNICO

O mapa geotécnico preliminar (Figura 68) apresentava 28 unidades geotécnicas, todas descritas no Quadro 8.

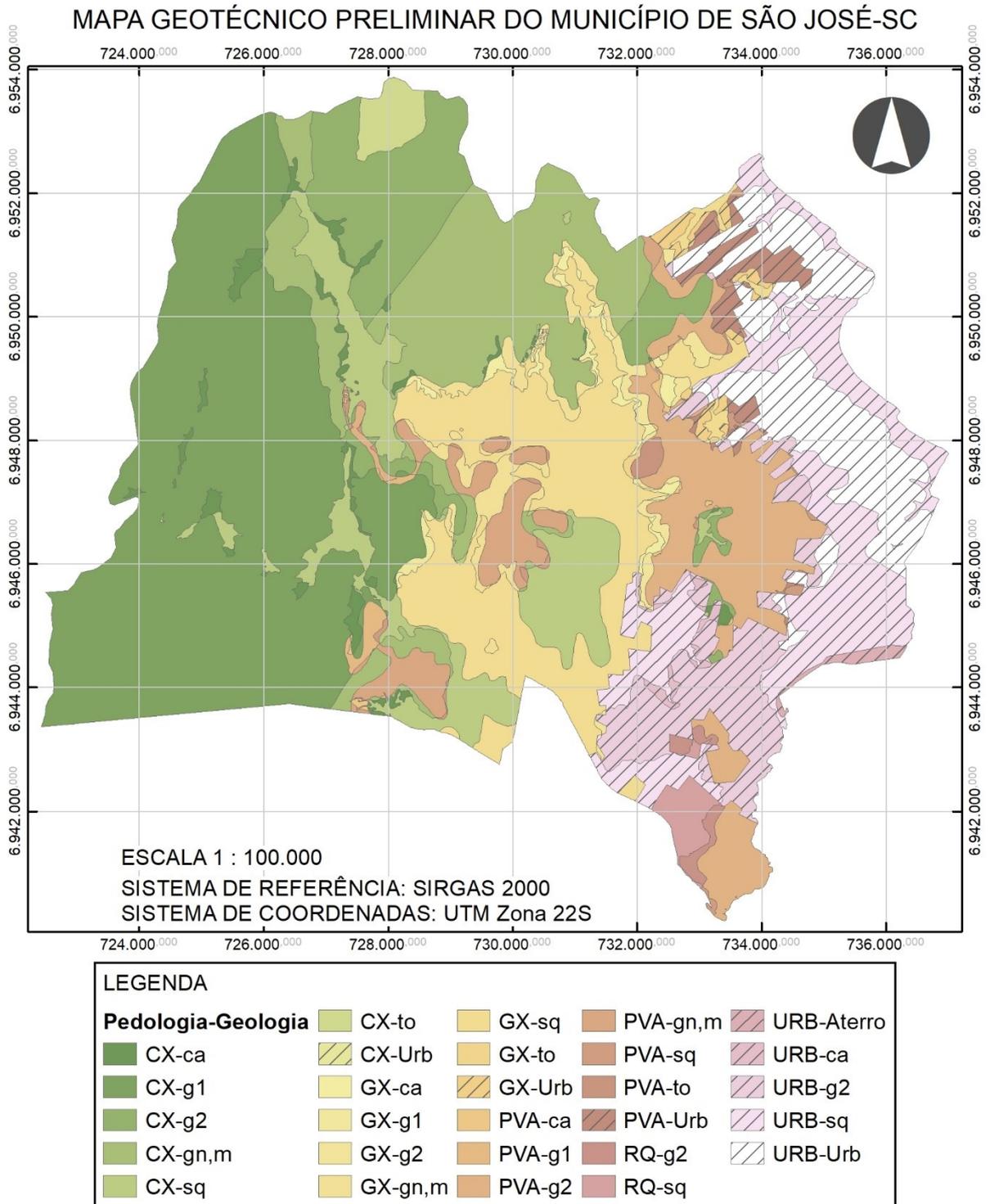


Figura 66 - Mapa geotécnico preliminar do município de São José.

Após todas as correções descritas no item 4.4 foi gerado o mapa geotécnico final, conforme Figura 69. A caracterização das unidades geotécnicas encontradas será feita a seguir.

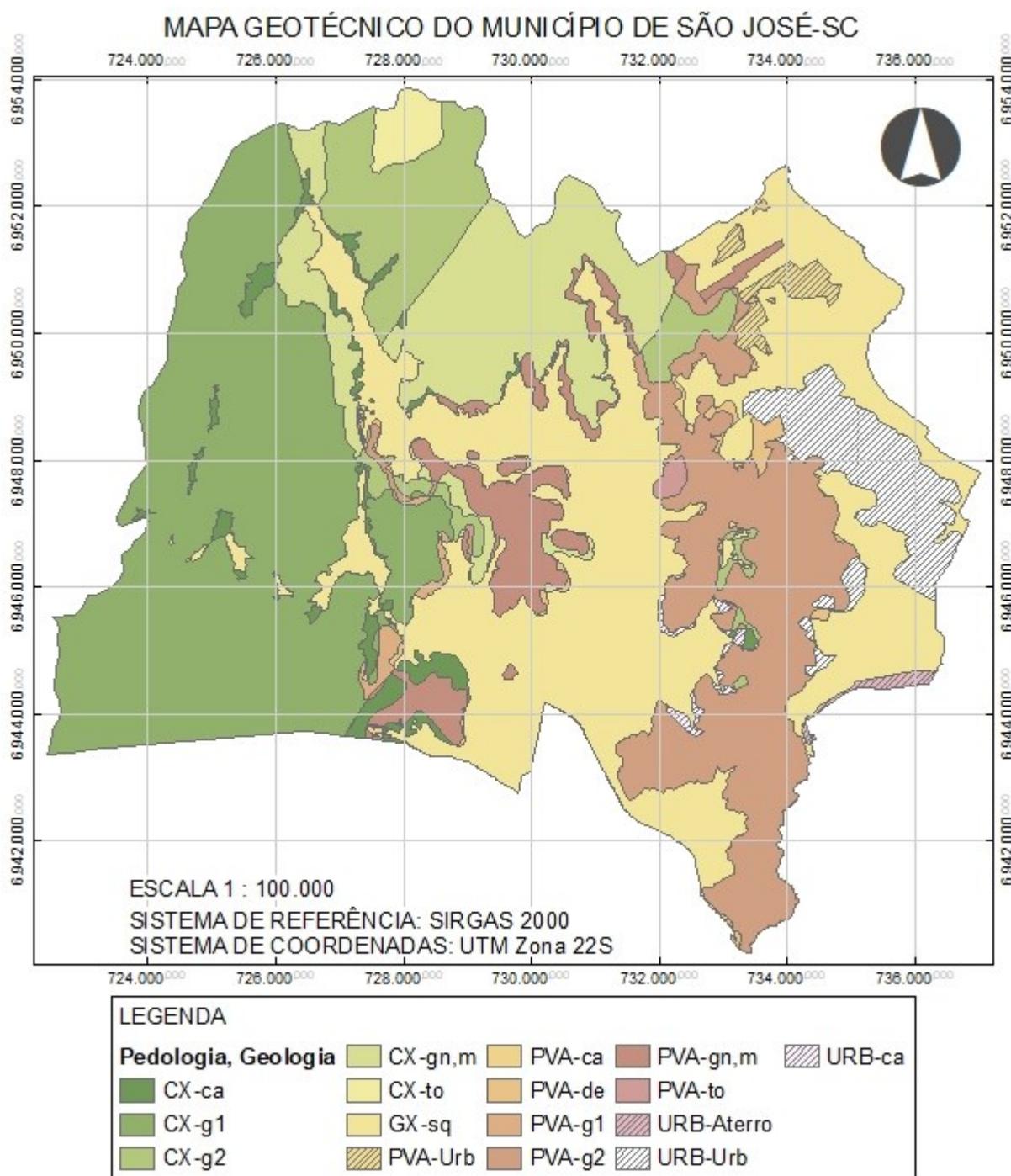


Figura 67 - Mapa geotécnico do município de São José.

O Quadro 12 resume as informações das unidades geotécnicas, como área, percentual do total, quantidade de pontos da base de dados e densidade de pontos, enquanto a Figura 70

apresenta gráfico com cada unidade geotécnica e a área que ocupa do território Municipal, à exceção das unidades com pedologia ou geologia com classificação urbana.

Quadro 12 - Resumo das unidades geotécnicas.

| Unidade Geotécnica | Área (km ²) | Percentual | Quantidade de Pontos SPT | Densidade (Pontos/km ²) |
|--------------------|-------------------------|------------|--------------------------|-------------------------------------|
| URB-Aterro | 0,31 | 0,27% | 0,00 | 0,00 |
| URB-Urb | 4,85 | 4,27% | 44,00 | 9,07 |
| URB-ca | 0,34 | 0,30% | 0,00 | 0,00 |
| CX-ca | 2,27 | 2,00% | 1,00 | 0,44 |
| CX-g1 | 29,28 | 25,77% | 2,00 | 0,07 |
| CX-g2 | 7,37 | 6,49% | 2,00 | 0,27 |
| CX-gn,m | 11,49 | 10,11% | 0,00 | 0,00 |
| CX-to | 1,01 | 0,89% | 0,00 | 0,00 |
| GXsq | 33,99 | 29,92% | 196,00 | 5,77 |
| PVA-Urb | 0,95 | 0,84% | 12,00 | 12,63 |
| PVA-ca | 0,16 | 0,14% | 0,00 | 0,00 |
| PVA-de | 0,81 | 0,71% | 5,00 | 6,17 |
| PVA-g1 | 0,5 | 0,44% | 0,00 | 0,00 |
| PVA-g2 | 15,08 | 13,27% | 83,00 | 5,50 |
| PVA-gn,m | 4,96 | 4,37% | 3,00 | 0,60 |
| PVA-to | 0,23 | 0,20% | 2,00 | 8,70 |
| Total | 114,29 | 100,00% | 350,00 | 49,23 |

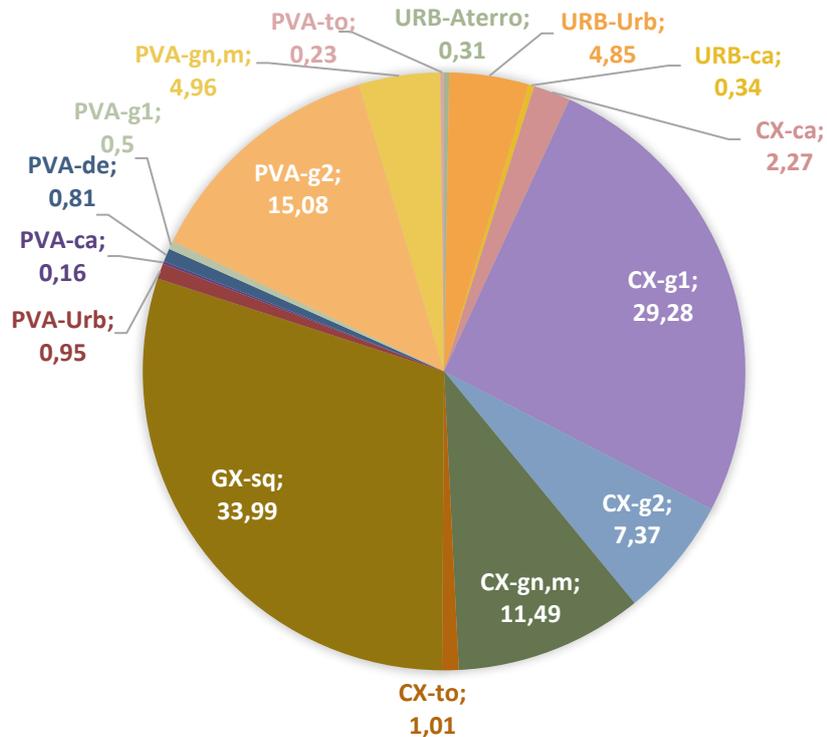


Figura 68 - Unidades geotécnicas e suas respectivas áreas em km².

5.2.1 Solos de origem sedimentar

Essa classificação engloba basicamente os Gleissolos de sedimentos quaternários que ocupam uma área de 33,99km² do Município, ou seja, 29,92% do território. Eles ocorrem em regiões de bacia, dispostos praticamente em sua totalidade abaixo da cota de 15m de altitude e declividade plana.

São solos tipicamente imperfeitamente drenados, com lençol freático próximo à superfície, sendo encontrados, pontualmente, abaixo de 5m de profundidade. Essa condição associada ao relevo garante o confinamento de água nesses solos, ainda que temporário, proporcionando o processo de redução dos minerais de ferro e manganês, que acabam por conferir as cores acinzentadas com croma menor ou igual a 2, referentes aos constituintes da matriz, sejam os argilominerais ou quartzo. Existindo oxigênio livre novamente, há a formação localizada de óxidos como hematita e goethita, conferindo ao solo cores avermelhadas, alaranjadas e amareladas. Quando o lençol freático é oscilante, o movimento de Fe ocorre de forma a permitir a formação de mosqueados no topo da flutuação.

Ker *et al.* cita que solos originalmente oxidados (bem drenados) que se tornam permanentemente saturados com água (graças a alguma ação antrópica) tornar-se-ão cinzentos somente se houver matéria orgânica metabolizável como fonte de energia. Sem matéria orgânica não há atividade de microrganismos anaeróbicos heterotróficos, cuja respiração conduz o processo de redução, de maneira que mosqueados brunos de Fe^{3+} podem persistir por milhares de anos.

Ker *et al.* (2012) cita que Amostras de horizonte glei de coloração cinzenta a azulada que contenham Fe^{2+} em solução, quando expostas ao ar adquirem em poucos minutos uma coloração brunada decorrente da oxidação a Fe^{3+} e sua precipitação como ferrihidrita.

O processo de oxiredução explicaria então o aparecimento de camadas de colorações avermelhadas, amareladas e até mesmo em marrom relatadas em alguns laudos.

Referente ao substrato sedimentos quaternários, por serem basicamente de origem aluvionar, deu origem a solos de maiores granulometrias, com textura argilo-arenosa ou maior.

Dos 350 laudos de sondagem cadastrados 196 ocorrem nessa unidade geotécnica. O nível do lençol freático varia entre 0,00m e 8,64m, sendo o valor médio de 2,02m com desvio padrão de 1,55m. Em 7 desses laudos não foi encontrado o nível d'água. Os valores de impenetrável apresentam variação bem maior, indo de 3,50m a 40,20m de profundidade, sendo o valor médio de 19,76m com desvio padrão de 7,03m.

5.2.2 Solos de origem residual

Essa classificação inclui os Cambissolos e Argissolos que juntos cobrem 74,11km² de São José, ou seja, 65,24% do território. São solos que mostram estrutura gradativa e decrescente em relação ao intemperismo, com resistência à penetração crescente e características evidentes compatíveis com o material rochoso de origem.

Os Cambissolos são aqueles com, segundo Dos Santos (2013), pedogênese pouco avançada evidenciada pelo desenvolvimento da estrutura do solo, com alteração do material de origem expressa pela quase ausência da estrutura da rocha ou da estratificação dos sedimentos, cromas mais altos, matizes mais vermelhos ou conteúdo de argila mais elevado que o dos horizontes subjacentes.

Os Cambissolos de origem coluvionar totalizam 2,27km² e, por se tratar de polígonos de pequenas dimensões, os colúvios propriamente ditos, são de difícil análise, sendo que apenas 1 ensaio SPT está contido nessa unidade. A origem do material deslocado é, provavelmente o granodiorito, uma vez que é a litologia adjacente. Foi identificado nível d'água a 1,90m de profundidade e impenetrável com 6,00m.

Os Cambissolos de substrato granito ocupam 29,28km² e se concentram na porção oeste do Município, com 2 pontos para análise. O primeiro apresenta NA não encontrado e impenetrável com 1,31m e o segundo com NA de 7,93m e impenetrável de 16,15m de profundidade. Foi possível identificar manchas brancas caulínicas compatíveis com os granitóides calcialcalinos que compõe a geologia suíte Maruim.

Os Cambissolos de origem granodiorito cobrem 7,37km² distribuídos em 4 maiores blocos, dispostos na região centro-norte de São José. Apenas 1 ensaio estava localizado nessa unidade geotécnica e apresenta NA não encontrado e profundidade do perfil de solo de 5,72m. Nesse ensaio, particularmente, foi realizada sondagem mista, com resultado de recuperação de rocha, *RQD*, igual a 86%, compatível com rochas com baixa alteração.

Os Cambissolos de substrato gnaíse, migmatito têm 11,49km² e, junto com os de substrato tonalito, com 1,01km², percorrem em altitudes mais elevadas e declividade de ondulada à montanhosa e, portanto, não perfazem unidade urbana ou como alvo de expansão urbana. Não foram encontrados laudos de sondagem nessa unidade geotécnica, porém, a área foi extensamente avaliada no trabalho de Sbroglia e Sanchez (2017), com realização de ensaios geofísico, coleta de amostras para classificação granulométrica, ensaio de cisalhamento direto e MCT.

Segundo Sbroglia e Sanchez (2017), os resultados encontrados indicam para as unidades geotécnicas os solos do tipo podzólico e Cambissolo associados à alteração de substrato formado respectivamente por gnaiss/migmatito e pelo granodiorito apresentam menores ângulos de repouso máximo de talude, da ordem de 21° a 22°. Para os demais tipos de solos residuais o ângulo de repouso máximo atinge até 26°.

Os Argissolos apresentam horizonte B textural e são definidos por Dos Santos (2013) como aqueles com evolução avançada com atuação incompleta de processo de ferralitização, em conexão com paragênese caulínico-oxídica ou virtualmente caulínica ou vermiculita com hidróxi-Al entre camadas na vigência da mobilização de argila da parte mais superficial do solo, com concentração ou acumulação em horizonte subsuperficial.

Os Argissolos de origem coluvionar totalizam 0,16km² e foram avaliados por semelhança, conforme a litologia de adjacência, ocorrendo no entorno dos granitos, granodioritos e gnaisses, migmatitos.

Os Argissolos de substrato depósito de encosta, dispostos em vários pequenos polígonos, totalizam 0,81km², sendo encontrados 5 pontos SPT que caracterizam a unidade geotécnica. O NA apresenta profundidade média de 2,15m com desvio padrão de 1,11m e impenetrável em 25,81m com desvio padrão de 3,96m.

Os Argissolos de granito ocupam área de 0,50km² e não apresentam pontos da base de dados para caracterização. Por aproximação, seria possível avalia-los alusivamente aos de substrato granodiorito, considerando-se que são rochas de origem semelhante sendo a segunda mais intemperizável que a primeira, principalmente em virtude da diferença granulométrica e principais minerais, de grossa a média com presença de feldspato potássico, quartzo, plagioclásio, biotita e muscovita para o granito São Pedro de Alcântara e granulometria média a fina com quartzo, plagioclásio e feldspato alcalino como minerais essenciais, com biotita e, ocasionalmente anfibólio no granodiorito Alto da Varginha.

Os Argissolos de substrato granodiorito totalizam 15,08km² da porção centro-leste do Município. As cotas de altitude encontradas variam de 15m a 165m, caracterizando-se como solos de encosta. Foram encontrados 83 pontos da base de dados pertencentes a essa unidade, sendo o nível d'água médio com profundidade de 4,28m com desvio padrão de 3,65m e impenetrável de 10,96m com desvio padrão de 8,08m. Em 23 das sondagens não foi encontrado o lençol freático.

Os Argissolos de origem gnaiss, migmatito cobrem 4,96km² do território e possuem 3 laudos cadastrados, cabendo, porém, ressaltar que todos fazem parte da mesma obra, logo são

concentrados de forma pontual em relação a toda a unidade geotécnica. O NA tem profundidade média de 7,16m com desvio padrão de 0,67m e o impenetrável foi atingido em 27,19m com desvio padrão de 0,06m.

Os Argissolos de substrato tonalito possuem apenas 1 polígono de 0,23km². 2 pontos SPT caracterizam a área, com nível d'água médio de 5,46m com desvio padrão de 1,12m e impenetrável em 16,22m com desvio padrão de 0,68m.

Em uma análise global de todos os Argissolos encontrados no município de São José observa-se considerável semelhança dos aspectos geotécnicos referentes ao ensaio SPT, com lençol freático médio encontrado em 4,33m com desvio padrão de 3,43m e impenetrável de 13,92m com desvio padrão de 9,28m.

5.3 MAPA DE LOCAÇÃO DOS PONTOS

O mapa de locação de pontos (Figura 69) foi desenvolvido para auxiliar na análise dos demais produtos, uma vez que todos partiram do princípio da base de dados e, portanto, a disposição dos pontos interfere diretamente no resultado deles.

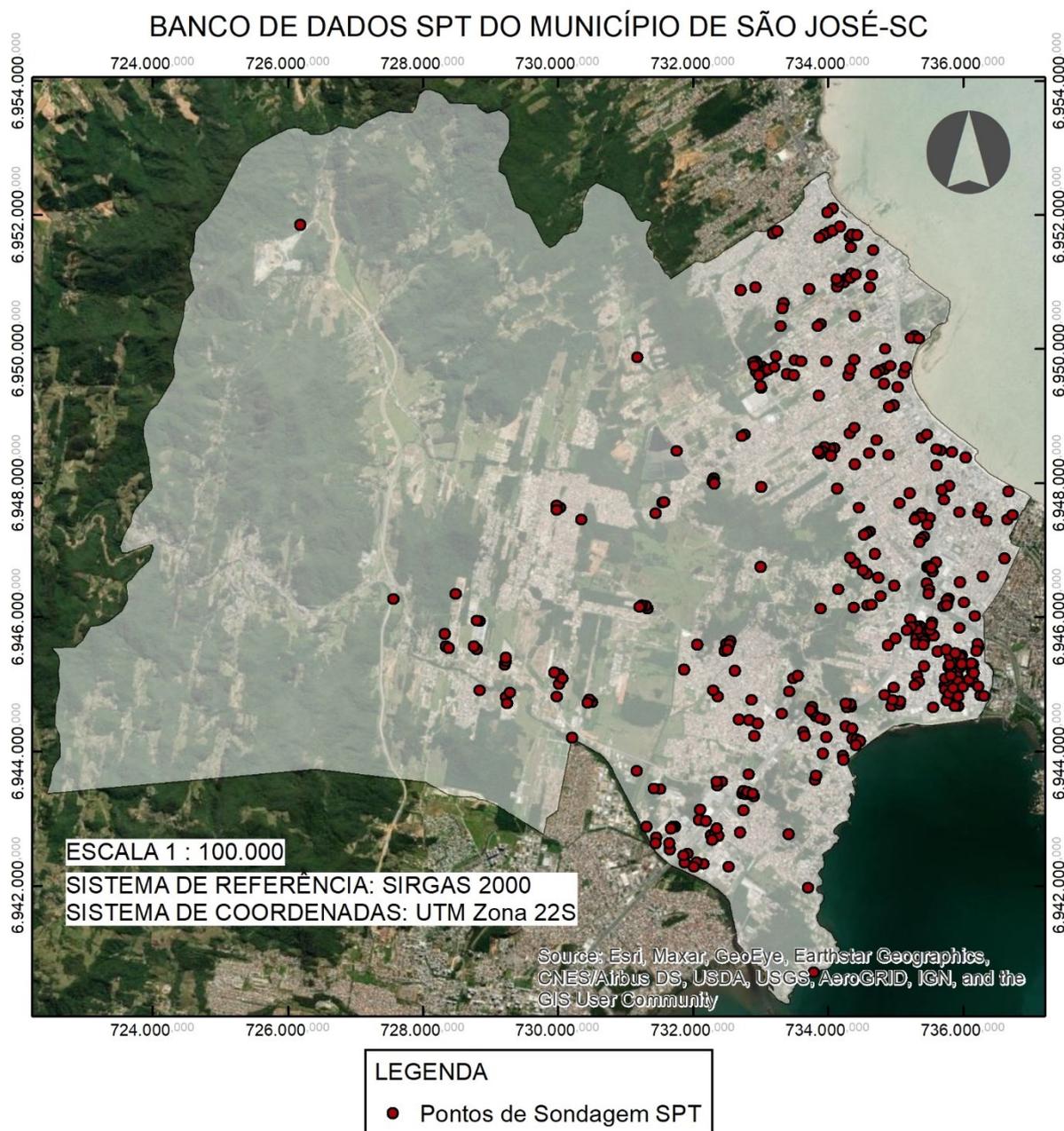


Figura 69 - Base de dados de sondagens SPT georreferenciada.

A disposição ideal seria aquela em que os pontos de SPT estivessem igualmente distribuídos, em forma matricial. Yamamoto e Landim (2013) citam que a amostragem de pontos deve ser feita em disposição regular ou o mais próximo disso, mas podem ocorrer

amostragens preferenciais em zonas de maior interesse que acabam produzindo agrupamento de pontos. Ainda, os autores afirmam que esses agrupamentos devem ter seus efeitos atenuados para não distorcer as estatísticas globais, tais como o histograma e o variograma.

Nessa dissertação, por terem sido utilizados apenas laudos fornecidos, sem locação predeterminada para esse estudo, era de se esperar que a distribuição não pudesse ser tão sistemática quanto o desejado e foi possível observar que a densidade de furos está diretamente relacionada à evolução da mancha urbana, estando então os pontos dispostos de maneira gradativamente decrescente dos polígonos mais antigos de ocupação e conseqüentemente mais adensados, até a quase inexistência nas áreas já preponderadas como de expansão urbana do Município.

5.4 SUPERFÍCIE ESTIMADA DO LENÇOL FREÁTICO

A superfície estimada do lençol freático foi elaborada com o objetivo de se extrapolar as informações existentes na base de dados até a área delimitada como zona de expansão urbana, conforme descrito no item 4.2.6.

Foram geradas 2 cartas referentes ao nível d'água, sendo a primeira considerando-se apenas a profundidade e, a segunda, considerando-se a cota de altitude menos a profundidade prevista. As Figuras 70 a 73 mostram, respectivamente, essas cartas e seus erros padrão.

Nas cartas que consideram apenas a profundidade do nível d'água em si (Figuras 70 e 71) é possível inferir uma alusão ao mapa geotécnico, com a estimativa seguindo mais próxima ao nível do mar em solos hidromórficos, como os Gleissolos de sedimentos quaternários e crescendo em profundidade à medida que encontra unidades mais resistentes e de solos residuais.

Em alguns momentos, porém, identifica-se a existência de zonas de formato circular, suavizado, que se referem à falta de pontos que melhorassem o resultado de previsão oferecido pela krigagem.

As cartas que apresentam os desvios padrões foram elaboradas por serem consideradas essenciais para validação de qualquer análise estatística. Landin (2006) cita que esta medida do erro associado à estimativa é que distingue o método da krigagem em relação aos demais algoritmos e, desse modo, quando da sua aplicação sempre resultam dois mapas: um com a distribuição dos valores interpolados e outro com a variâncias, ou os desvios padrão, referentes aos valores estimados. Nestes a localização dos menores valores coincide com as áreas com maior densidade de pontos.

Entre as Figuras 70 e 71, observa-se clara semelhança e relação entre os valores de menores profundidades com os de menores desvios padrão e profundidades maiores com maiores desvios padrão, com valores máximos de 1,75m.

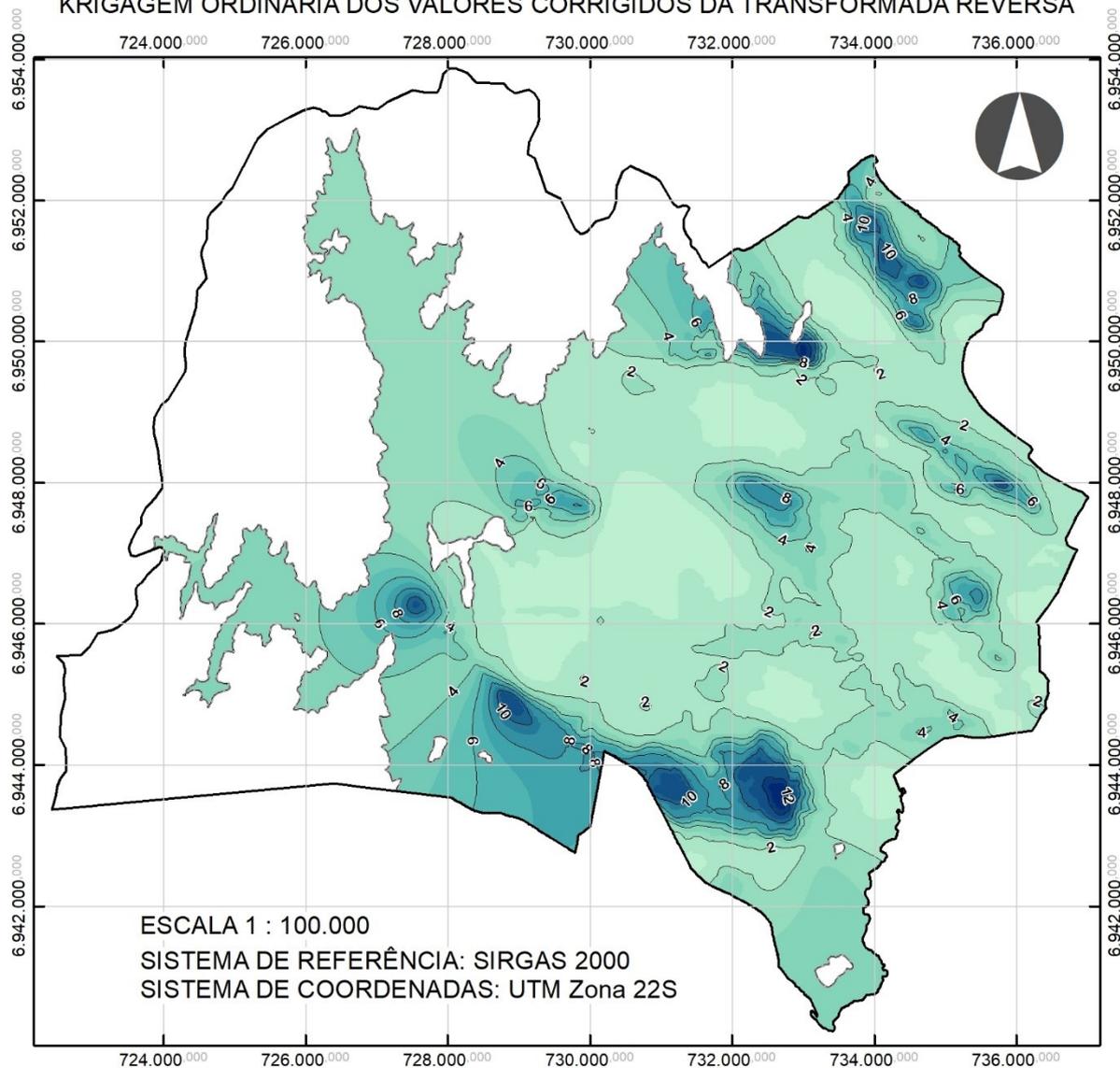
Em relação às Figuras 72 e 73 é possível observar que a superfície estimada acompanha a linha do MDT, ainda que de forma mitigada pelas maiores profundidades em maiores altitudes e menores em terrenos planos.

O ponto mais superficial do NA encontra-se a 0,00m e o ponto mais profundo a 13,23m, enquanto a cota de altitude mais baixa foi de -8,36m e a maior foi de 73,41m. Dos 350 laudos cadastrados no banco dados, fizeram parte dessa krigagem 303 pontos, sendo retirados 46 pontos, referentes àqueles cujo nível do lençol freático não foi encontrado.

Em relação ao desvio padrão, as Figuras 72 e 73 tem uma correlação mais difícil de ser avaliada, isso porque, como já comentado anteriormente, a carta de altitudes achata as diferenças entre cota e profundidade. Há de se citar ainda que o desvio padrão nessa situação, próximo aos locais com menor quantidade de pontos, principalmente nas porções localizadas nos bairros Alto Forquilhas e Colônia Santana, ficou entre 0,25m e 0,50m.

Também foi excluído da simulação o ponto 2012-07-129-05a, localizado na extrema esquerda do mapa, visto que, ao buscar a vizinhança para fazer as médias da krigagem, ele prejudicava a análise, criando o que é chamado de artefatos na geoestatística.

SUPERFÍCIE ESTIMADA DO LENÇOL FREÁTICO DO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA



| LEGENDA | | |
|------------------|-------------|---------------|
| Nível d'água (m) | | |
| 0,06 – 1,00 | 4,00 – 5,00 | 9,00 – 10,00 |
| 1,00 – 2,00 | 5,00 – 6,00 | 10,00 – 11,00 |
| 2,00 – 3,00 | 6,00 – 7,00 | 11,00 – 12,00 |
| 3,00 – 4,00 | 7,00 – 8,00 | 12,00 – 13,00 |
| | 8,00 – 9,00 | 13,00 – 13,23 |

Figura 70 - Superfície estimada do lençol freático do município de São José, considerando-se a profundidade.

SUPERFÍCIE ESTIMADA DO LENÇOL FREÁTICO DO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
KRIGAGEM ORDINÁRIA VALORES DO DESVIO PADRÃO

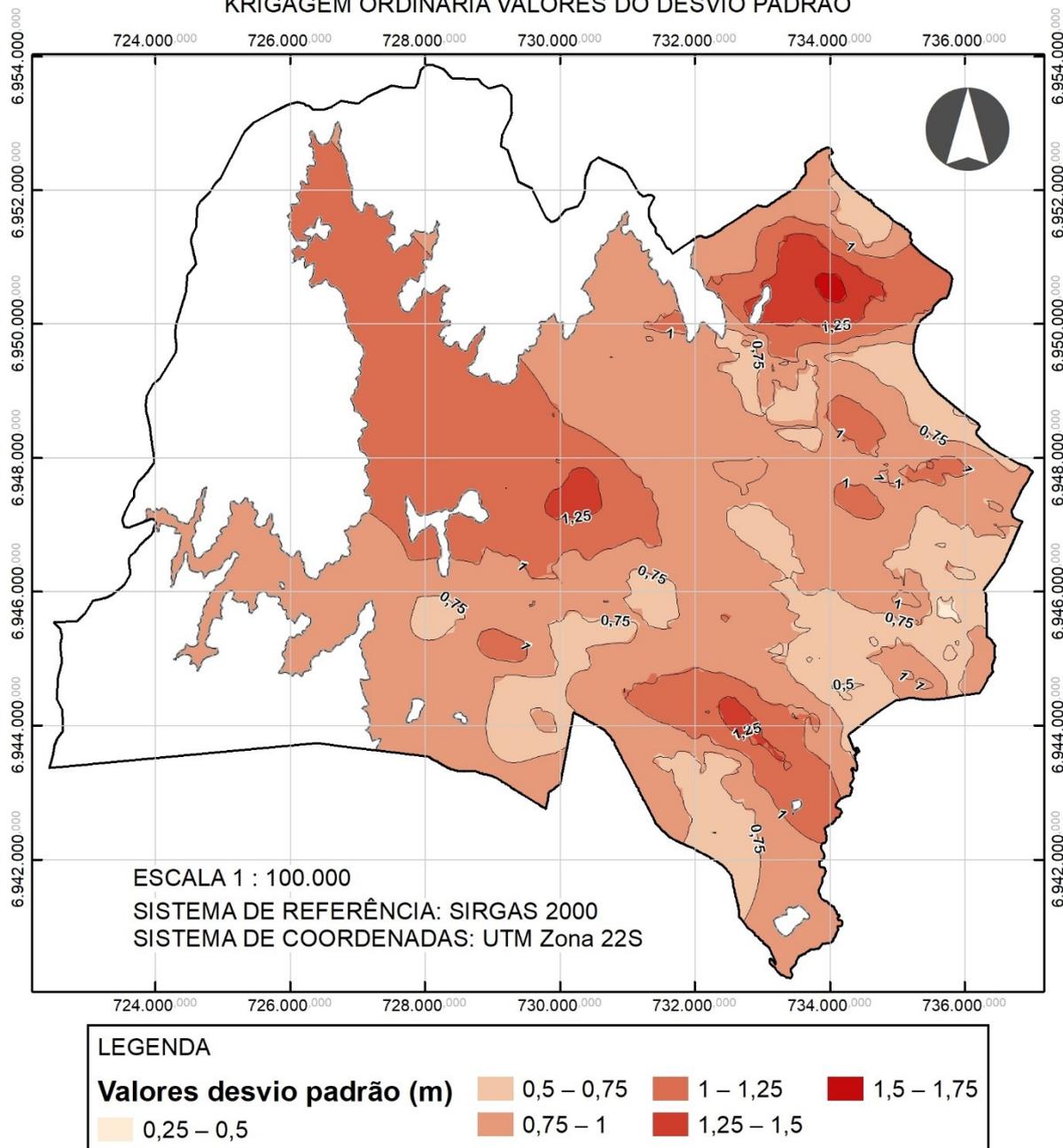


Figura 71 - Desvio padrão - Superfície estimada do lençol freático do município de São José, considerando-se a profundidade.

SUPERFÍCIE ESTIMADA DO LENÇOL FREÁTICO COM ALTITUDE DO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA

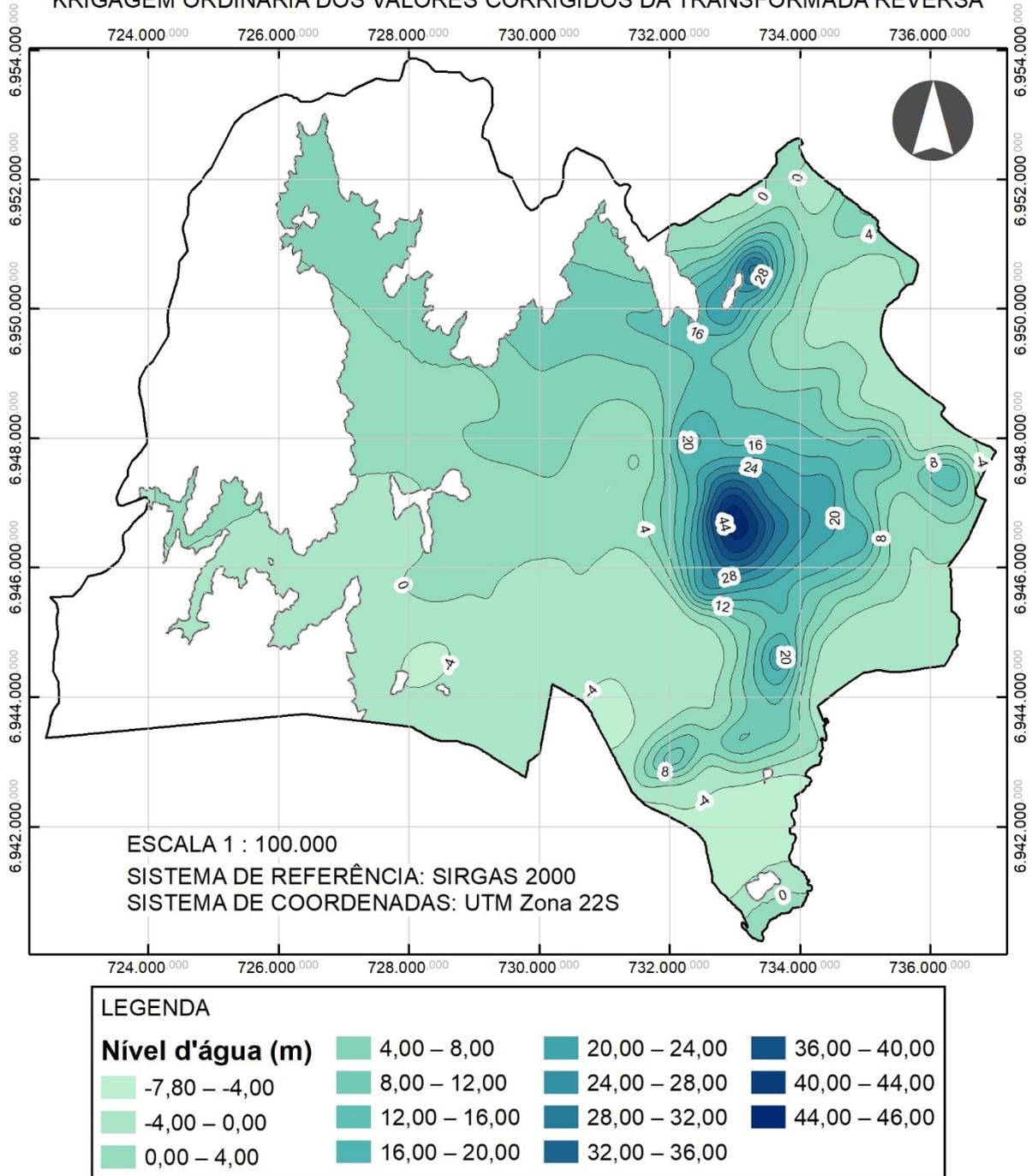


Figura 72 - Superfície estimada do lençol freático do município de São José, considerando-se a altitude.

SUPERFÍCIE ESTIMADA DO LENÇOL FREÁTICO COM ALTITUDE DO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
KRIGAGEM ORDINÁRIA - VALORES DO DESVIO PADRÃO

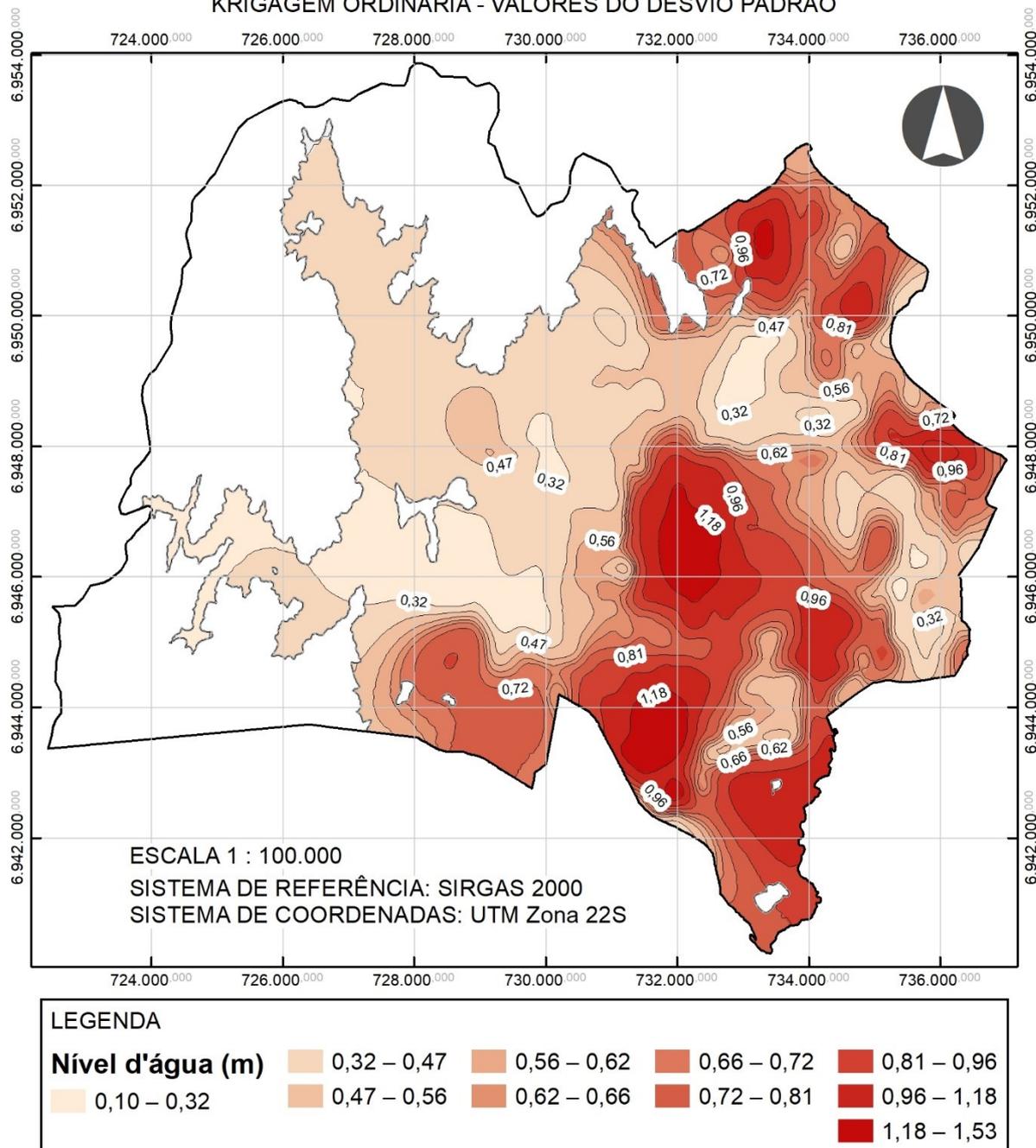


Figura 73 - Desvio padrão - Superfície estimada do lençol freático do município de São José, considerando-se a altitude.

5.5 CARTAS DE APTIDÃO PARA FUNDAÇÕES

5.5.1 Profundidade impenetrável do solo estimada

À luz das cartas de superfície estimada do lençol freático, foram geradas duas cartas de impenetrável, a primeira considerando-se apenas a profundidade em si e, a segunda, levando em conta a cota de altitude de cada ponto. As Figuras 74 a 77 mostram, respectivamente, essas cartas e seus erros padrão.

A Figura 74 apresenta relativa semelhança ao mapa geotécnico, não tendo completa relação principalmente em virtude da baixa densidade de pontos nas extremidades do contorno, principalmente na região dos bairros Alto Forquilhas e Colônia Santana, onde é possível visualizar segmentos curvados concêntricos verticalizados. Observa-se uma região de coloração avermelhada, com isovalores entre 0,65m e 10,00m que corresponde à ocorrência dos Cambissolos e Argissolos. Já as profundidades maiores, acima de 20,00m e até 40,20m, estão diretamente relacionadas aos Gleissolos.

O menor valor encontrado de impenetrável à percussão foi de 0,59m e o máximo de 40,20m com média de 17,99m e desvio padrão de 8,44m enquanto a menor altitude foi de -40,20m e a maior de 147,40m, com média de -6,00 e desvio padrão de 21,65m.

As cartas de desvio padrão não mostram nenhuma tendência específica, sendo utilizadas para verificação da confiabilidade e relevância dos dados. Ambas mostram a mesma tendência de formato na porção esquerda, referente ao já citado problema de densidade de pontos.

PROFUNDIDADE IMPENETRÁVEL DO SOLO ESTIMADA PARA MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA

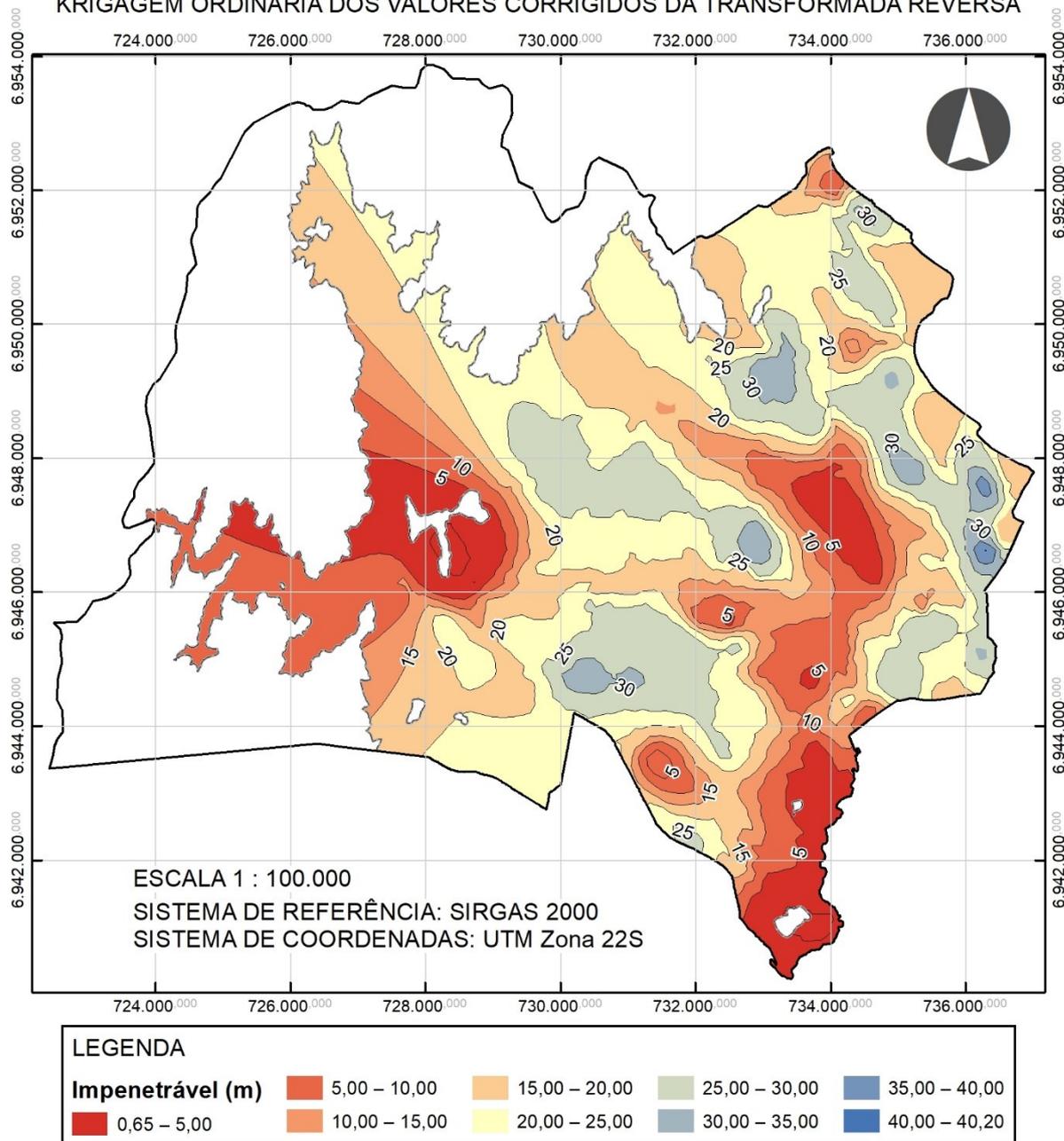


Figura 74 - Carta de profundidade de impenetrável do solo estimada de São José, considerando-se a profundidade.

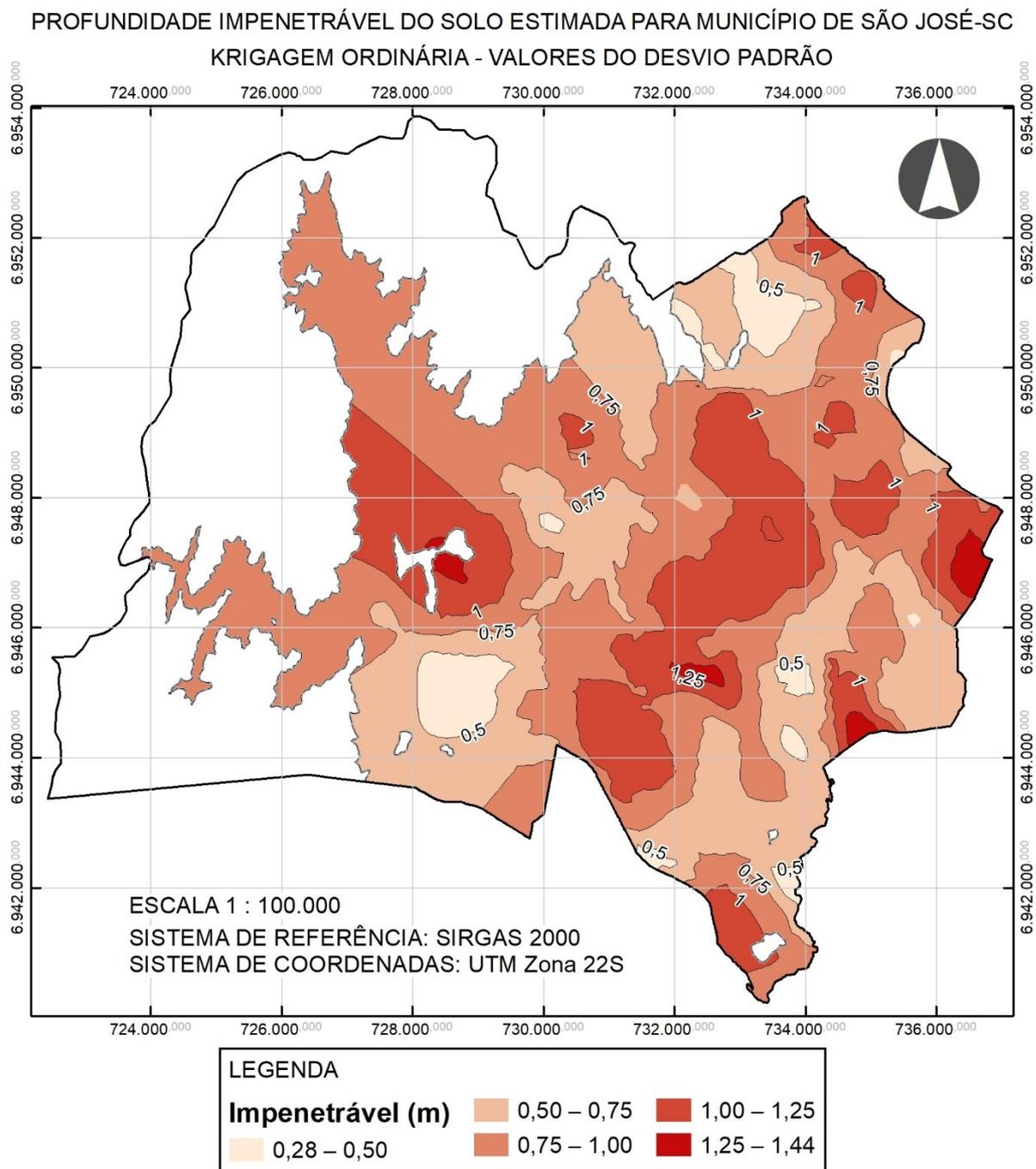
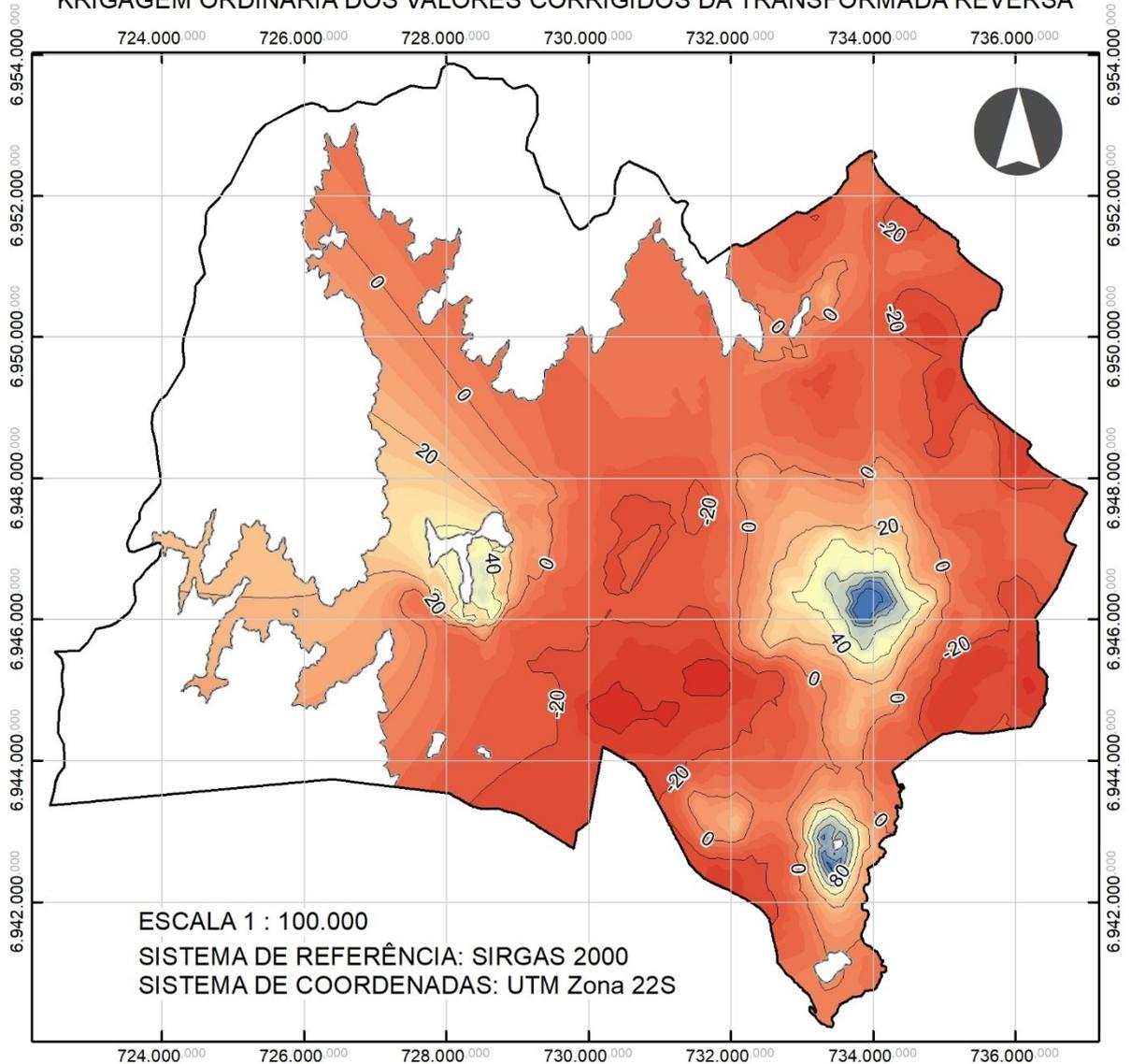


Figura 75 - Desvio padrão - Profundidade de impenetrável do solo estimada de São José, considerando-se a profundidade.

PROFUNDIDADE IMPENETRÁVEL DO SOLO ESTIMADA PARA MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA



LEGENDA

| Impenetrável (m) | | | | | |
|------------------|---------|---------|---------|-----------|-----------|
| -38 - -30 | -5 - 0 | 20 - 25 | 50 - 55 | 80 - 85 | 110 - 115 |
| -30 - -25 | 0 - 5 | 25 - 30 | 55 - 60 | 85 - 90 | 115 - 120 |
| -25 - -20 | 5 - 10 | 30 - 35 | 60 - 65 | 90 - 95 | 120 - 123 |
| -20 - -15 | 10 - 15 | 35 - 40 | 65 - 70 | 95 - 100 | |
| -15 - -10 | 15 - 20 | 40 - 45 | 70 - 75 | 100 - 105 | |
| | | 45 - 50 | 75 - 80 | 105 - 110 | |

Figura 76 - Carta de profundidade de impenetrável do solo estimada de São José, considerando-se a cota de altitude.

PROFUNDIDADE IMPENETRÁVEL DO SOLO ESTIMADA PARA MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
KRIGAGEM ORDINÁRIA - VALORES DO DESVIO PADRÃO

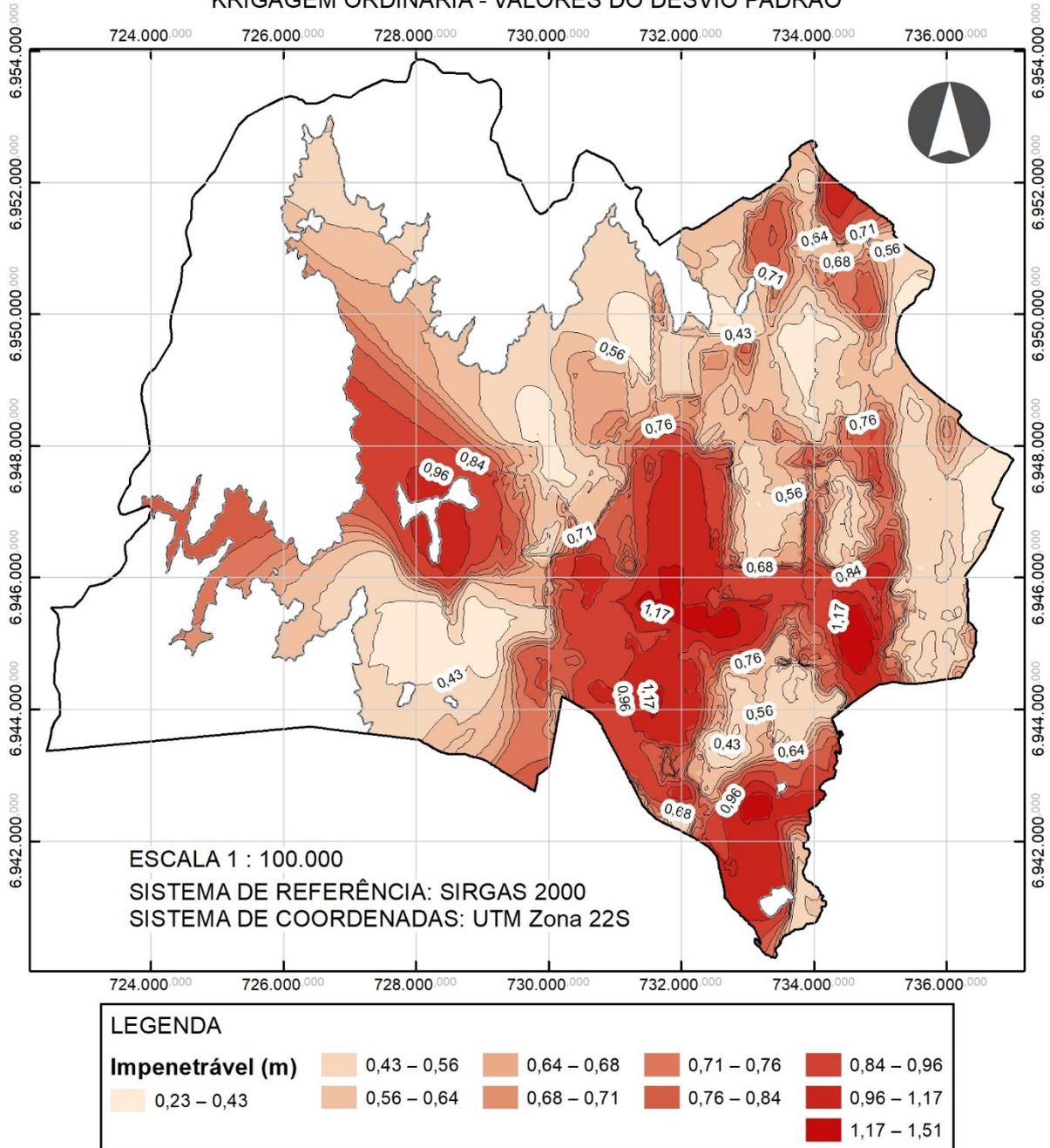


Figura 77 - Desvio padrão - Profundidade de impenetrável do solo estimada de São José, considerando-se a altitude.

5.5.2 Tensões admissíveis

Considerando-se que as cartas de tensões admissíveis se referem exclusivamente a fundações superficiais, âmbito de validade da equação a partir da qual os mapas foram desenvolvidos, conforme item 2.3.4, foram realizadas as krigagens apenas onde há viabilidade para tal solução. Desta forma, as Figuras 78 a 85 apresentam o estudo para as profundidades entre 1m e 4m e seus respectivos erros padrão.

As regiões acinzentadas, zonas em que a tensão admissível era inferior a 100 kPa, ou seja, N_{spt} menores que 5, foram classificadas como fora do domínio de aplicação da Equação (1) e por isso possuem uso inadequado para sapatas. Todos os valores de N_{spt} maiores que 20, limite superior da equação, foram considerados, por segurança, na faixa de tensão superior, ou seja, entre 350 kPa e 400 kPa.

É importante ressaltar que o cálculo da tensão admissível não se deu pela média dos N_{spt} no bulbo de tensões, conforme recomendado por Cintra *et al.* (2011), e sim pelo valor respectivo a cada profundidade analisada. As cartas foram desenvolvidas dessa forma com objetivo de se obter maior flexibilidade para o seu uso, sem maiores restrições de um único perfil de solo. Os valores médios nesse caso, ainda podem ser obtidos pela simples média das tensões admissíveis nas profundidades que compõem o bulbo de tensões.

De forma evolutiva, é possível observar o aumento de áreas em que a aplicação de fundações rasas atende aos critérios mínimos de dimensionamento com o acréscimo da profundidade.

Um ponto importante é que a análise dessas cartas seja realizada de forma combinada com a superfície estimada do lençol freático, Figura 70, visto que o NA muito próximo à superfície interfere diretamente na exequibilidade de fundações rasas. Para profundidades entre 1m e 2m, as regiões que apresentam tensões admissíveis acima de 325kPa mostram-se potencialmente favoráveis em termos executivos, com nível d'água abaixo de 4m.

Com relação à geotecnia, os locais compatíveis com fundações rasas, correspondem àqueles, principalmente, originários dos Argissolos de substrato granodiorito, seguido pelos Argissolos de substrato gnaisse, migmatito, granito e depósito de encostas. Os Cambissolos pouco apareceram como aptos, sendo já o esperado em virtude das cotas de altitude em que se encontram, praticamente em sua totalidade acima de 100m e, portanto, fora da área de estudo.

As cartas de desvio padrão, Figuras 79, 81, 83 e 85, mostram que os valores tendem a permanecer consideravelmente próximos à média, sendo a maior diferença inferior a 0,5% do valor de tensão admissível.

Thiesen (2016) afirma que, por segurança, as camadas inferiores da cota de apoio das fundações superficiais devem apresentar maior resistência que a própria camada de apoio. Vale destacar então, a importância de associar as tensões admissíveis à resistência do solo nas camadas inferiores à profundidade analisada. Desta forma, para a compreensão da resistência do solo com a profundidade, os mapas de isovalores de NSPT podem ser aplicados. Essas cartas são apresentadas no item 5.5.4.

O Quadro 13 resume a área de cada faixa de carregamento e seu respectivo percentual do total da projeção urbana para cada profundidade estudada.

Quadro 13 - Área por tensão admissível para fundações superficiais.

| Faixas de Tensão Admissível (kPa) | 1 metro | | 2 metros | | 3 metros | | 4 metros | |
|-----------------------------------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|-------------------------|----------|
| | Área (km ²) | Área (%) |
| Uso de sapata inadequado | 53,88 | 70,42% | 42,83 | 55,98% | 40,25 | 52,61% | 32,96 | 43,08% |
| 100 - 125 | 5,25 | 6,86% | 5,4 | 7,06% | 6,8 | 8,89% | 8,7 | 11,37% |
| 125 - 150 | 4,25 | 5,55% | 4,48 | 5,86% | 5,24 | 6,85% | 8,73 | 11,41% |
| 150 - 175 | 3,40 | 4,44% | 4,71 | 6,16% | 4,42 | 5,78% | 5,71 | 7,46% |
| 175 - 200 | 2,08 | 2,72% | 3,95 | 5,16% | 4,4 | 5,75% | 3,7 | 4,84% |
| 200 - 225 | 1,42 | 1,86% | 2,91 | 3,80% | 4,24 | 5,54% | 3,56 | 4,65% |
| 225 - 250 | 1,17 | 1,53% | 3,03 | 3,96% | 2,77 | 3,62% | 2,25 | 2,94% |
| 250 - 275 | 0,55 | 0,72% | 2,1 | 2,74% | 1,48 | 1,93% | 1,71 | 2,24% |
| 275 - 300 | 0,37 | 0,48% | 1,55 | 2,03% | 0,85 | 1,11% | 1,34 | 1,75% |
| 300 - 325 | 0,78 | 1,02% | 1,08 | 1,41% | 0,66 | 0,86% | 1,22 | 1,59% |
| 325 - 350 | 0,87 | 1,14% | 0,94 | 1,23% | 0,56 | 0,73% | 1,21 | 1,58% |
| 350 - 375 | 1,03 | 1,35% | 1,46 | 1,91% | 0,65 | 0,85% | 1,49 | 1,95% |
| 375 - 400 | 1,46 | 1,91% | 2,07 | 2,71% | 4,19 | 5,48% | 3,93 | 5,14% |
| Total | 76,51 | 100,00% | 76,51 | 100,00% | 76,51 | 100,00% | 76,51 | 100,00% |

TENSÃO ADMISSÍVEL ESTIMADA PARA SAPATAS A UM METRO NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA

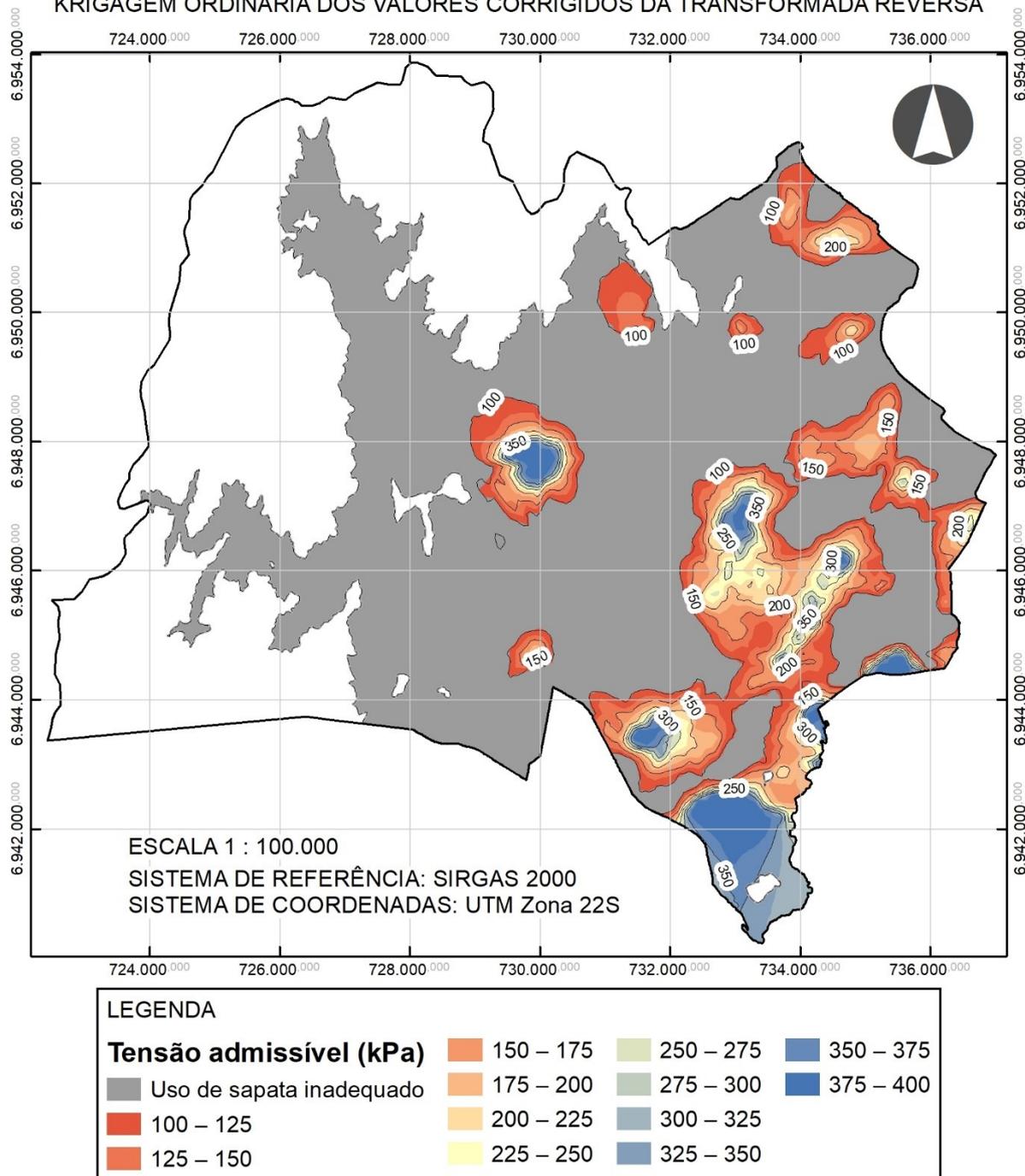


Figura 78 - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 1m.

TENSÃO ADMISSÍVEL ESTIMADA PARA SAPATAS A UM METRO NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
KRIGAGEM ORDINÁRIA - VALORES DO DESVIO PADRÃO

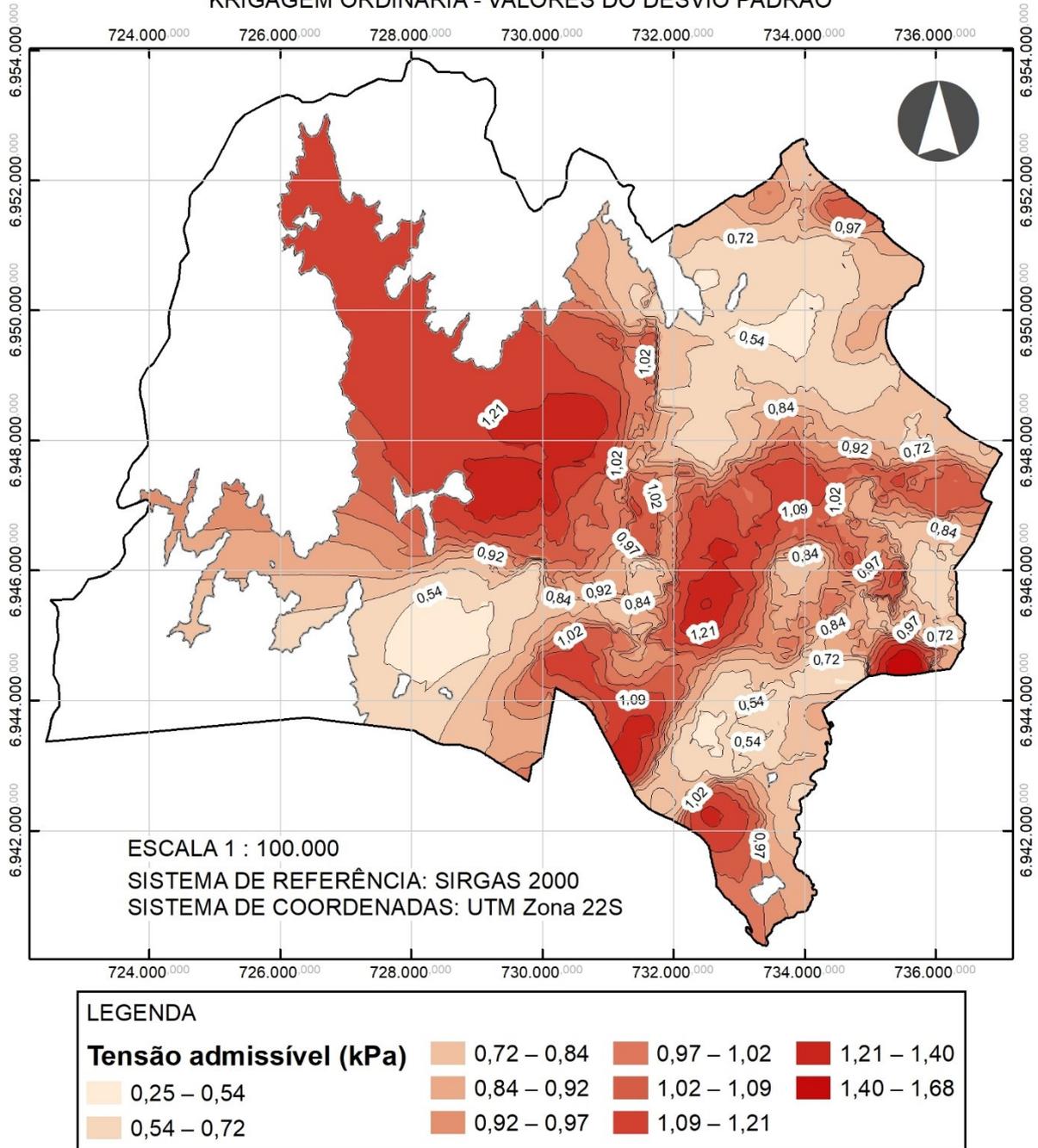


Figura 79 - Desvio padrão - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 1m.

TENSÃO ADMISSÍVEL ESTIMADA PARA SAPATAS A DOIS METROS NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA

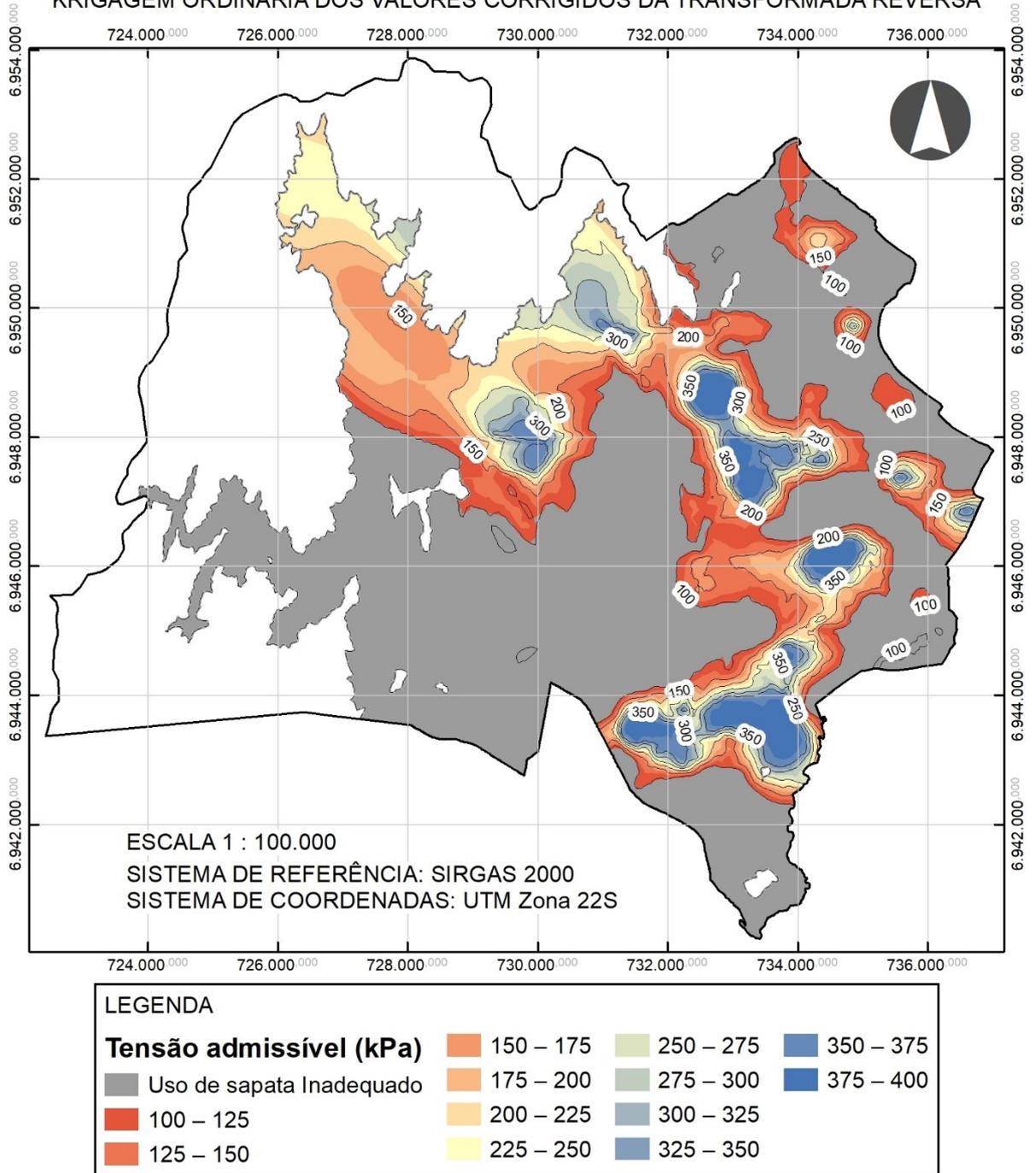


Figura 80 - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 2m.

TENSÃO ADMISSÍVEL ESTIMADA PARA SAPATAS A DOIS METROS NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA - VALORES DO DESVIO PADRÃO

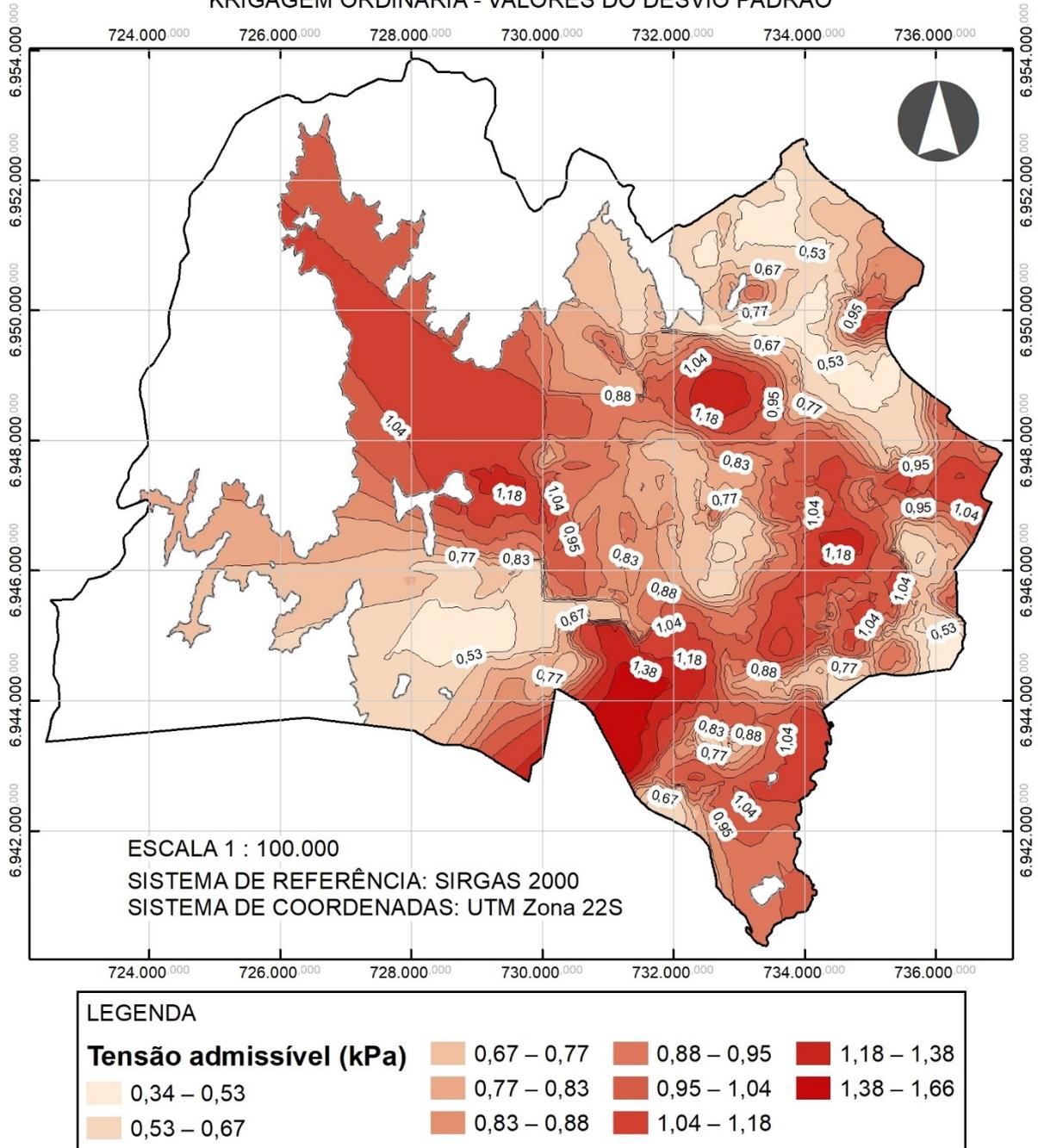


Figura 81 - Desvio padrão - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 2m.

TENSÃO ADMISSÍVEL ESTIMADA PARA SAPATAS A TRÊS METROS NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA

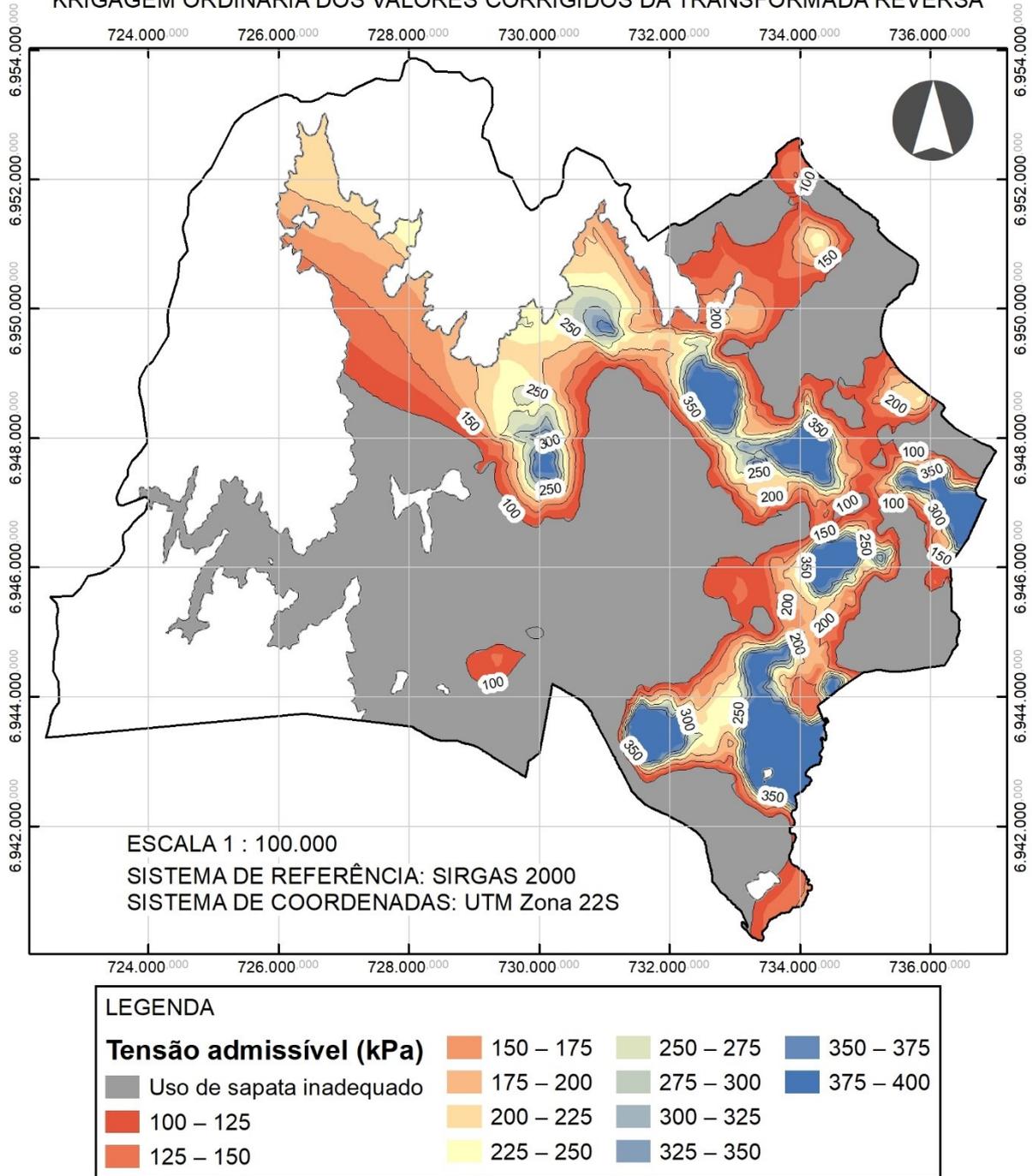


Figura 82 - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 3m.

TENSÃO ADMISSÍVEL ESTIMADA PARA SAPATAS A TRÊS METROS NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
KRIGAGEM ORDINÁRIA - VALORES DO DESVIO PADRÃO

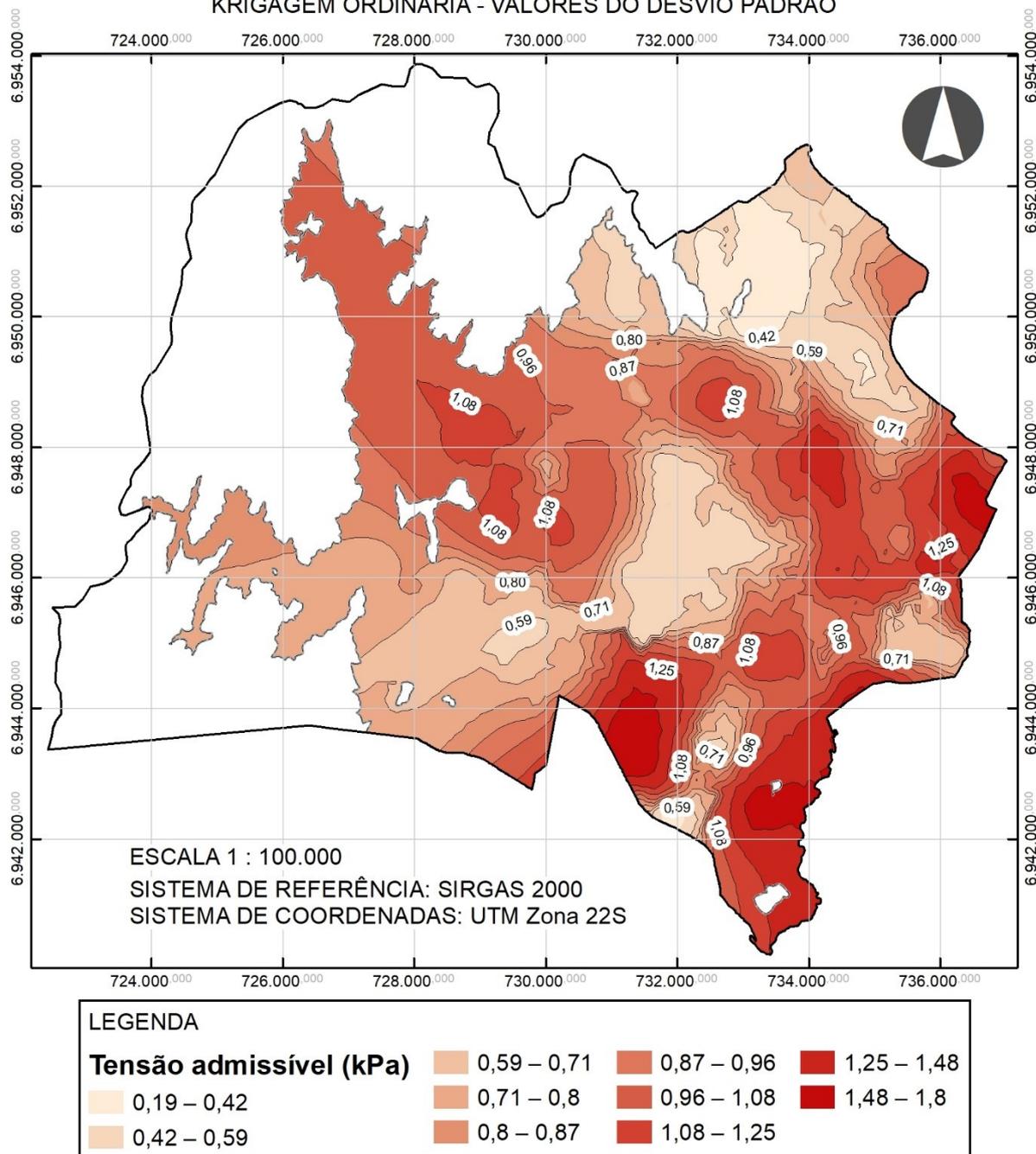


Figura 83 - Desvio padrão - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 3m.

TENSÃO ADMISSÍVEL ESTIMADA PARA SAPATAS A QUATRO METROS NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA

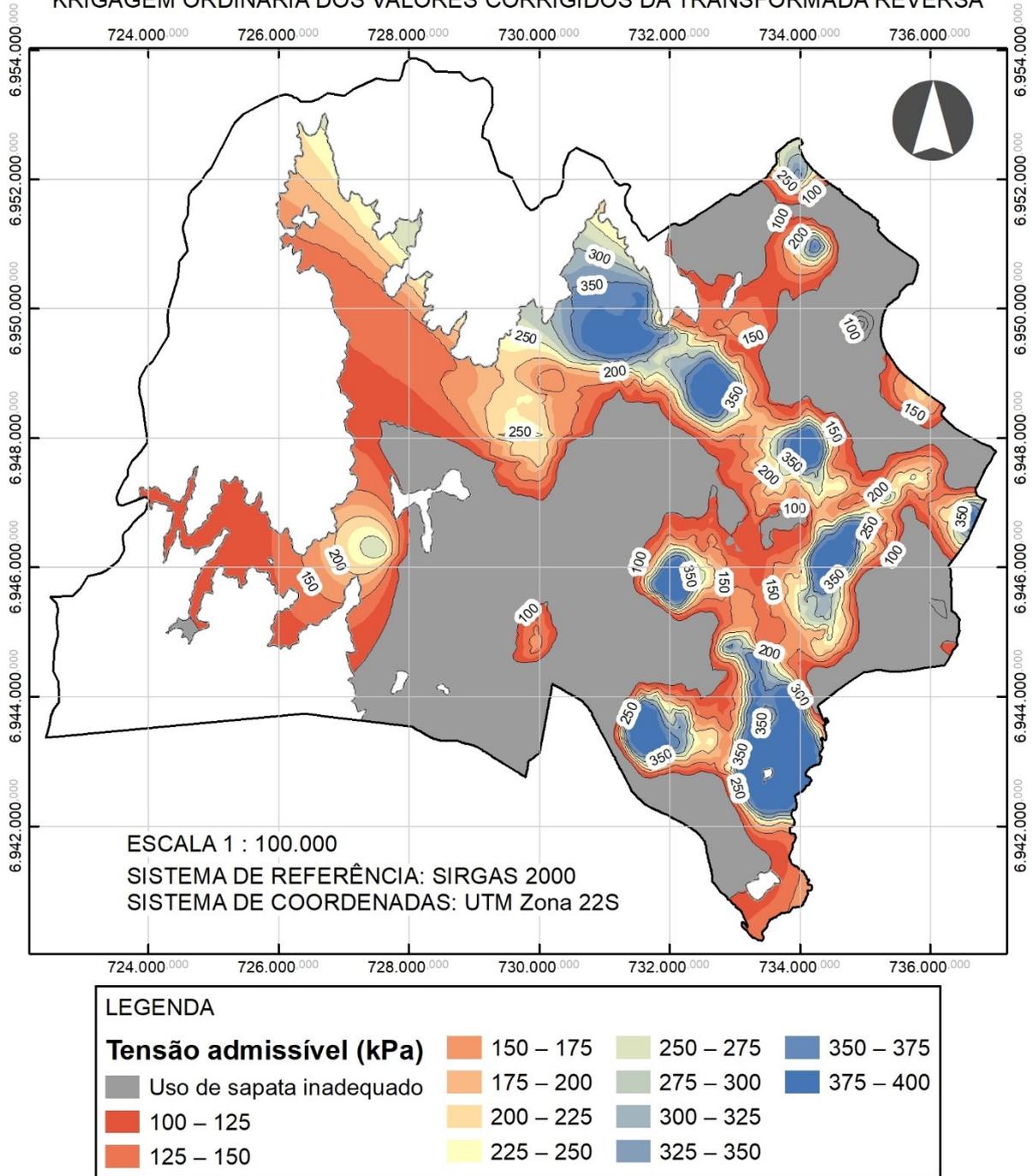


Figura 84 - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 4m.

TENSÃO ADMISSÍVEL ESTIMADA PARA SAPATAS A QUATRO METROS NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC

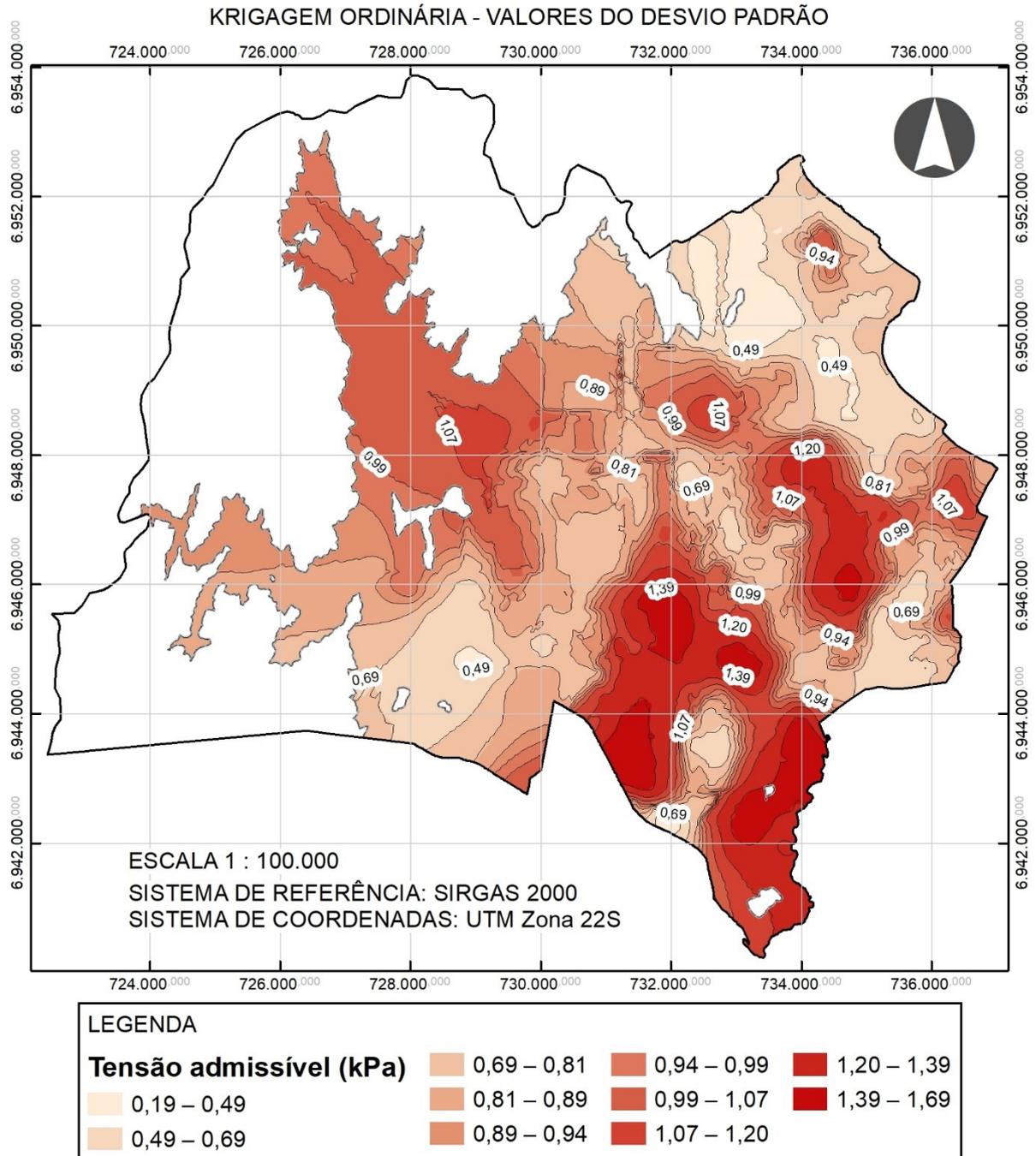


Figura 85 - Desvio padrão - Carta de tensões admissíveis estimadas para sapatas, profundidade de 4m.

5.5.3 Superfície resistente

As cartas elaboradas para fundações profundas (Figuras 86 a 93) utilizam-se do conceito de superfície resistente, abordado no item 2.3.4, e se refere principalmente à capacidade estrutural do próprio elemento de fundação em atingir determinadas camadas de solo. O Quadro 4 apresenta os parâmetros iniciais e finais de N_{spt} , sob os quais a estaca tende

a permanecer, atingindo a nega. Como referência foram então utilizados os valores finais para realização dessa estimativa.

Há de se considerar que o valor de profundidade de paralização do elemento de fundação indica uma capacidade executiva e está relacionado a resistência estrutural da estaca em si, devendo ser avaliado de forma concomitante a capacidade suporte do solo frente ao carregamento estipulado. Para a avaliação dessa capacidade de suporte foram elaboradas as cartas de isovalores, apresentadas no item 5.5.4.

Ao se realizar a análise comparativa entre as estimativas para cada elemento (Figuras 86, 88, 90 e 92) foi possível identificar considerável semelhança entre elas, seja pela forma ou pelos isovalores propriamente ditos. Como os critérios de paralização são bastante diferentes, de N_{spt} igual a 25 para estacas pré-moldadas com diâmetro inferior a 30cm e N_{spt} 45 para estacas tipo raiz, foi-se averiguar o que estaria interferindo dessa maneira nos resultados, visto que a expectativa era que estacas com maior capacidade suporte conseguissem avançar por maiores profundidades.

A resposta veio da análise da superfície estimada do impenetrável (Figura 74). Nela é possível identificar profundidades semelhantes às das superfícies resistentes, levando-se a conclusão de que, de uma maneira generalizada, o solo atinge valores maiores de N_{spt} apenas muito próximos ao limite impenetrável.

Os Gleissolos, que ocupam cerca de 30% do território do Município, como solos moles, com N_{spt} baixo ao longo de todo o perfil estratigráfico, geraram isolinhas de profundidade com valor médio acima de 20m e máximo de 34m.

Os Argissolos, que cobrem em torno de 20% de São José, por se tratarem de solos residuais, com crescimento gradual da resistência do solo, atingem mais rapidamente os valores estabelecidos como critério de paralização, com média entre 4m e 6m.

As cartas de desvio padrão (Figuras 87, 89, 91 e 93) mostram variação em torno de 1,06m de profundidade.

O Quadro 14 resume as áreas e seus respectivos percentuais do total da projeção de crescimento urbano para cada tipo de estaca e sua profundidade.

Quadro 14 - Área por profundidade da superfície resistente para fundações profundas.

| Superfície Resistente | Estaca pré-moldada (l<30 cm) | | Estaca pré-moldada (l≥30 cm) | | Estaca Hélice-contínua | | Estaca Raiz | |
|-----------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------|------------------------|-------------------------|-------------|-------------------------|
| | Profundidade (m) | Área (km ²) | Área (%) | Área (km ²) | Área (%) | Área (km ²) | Área (%) | Área (km ²) |
| 1 - 2 | 2,11 | 2,76% | 2,59 | 3,39% | 2,18 | 2,85% | 1,93 | 2,52% |
| 2 - 3 | 0,78 | 1,02% | 0,76 | 0,99% | 0,74 | 0,97% | 0,61 | 0,80% |
| 3 - 4 | 1,30 | 1,70% | 1,42 | 1,86% | 1,27 | 1,66% | 1,25 | 1,63% |
| 4 - 5 | 1,78 | 2,33% | 2,57 | 3,36% | 1,75 | 2,29% | 1,49 | 1,95% |
| 5 - 6 | 2,20 | 2,88% | 3,01 | 3,93% | 2,23 | 2,91% | 1,93 | 2,52% |
| 6 - 7 | 2,17 | 2,84% | 1,92 | 2,51% | 2,30 | 3,01% | 1,61 | 2,10% |
| 7 - 8 | 2,13 | 2,78% | 2,07 | 2,71% | 2,15 | 2,81% | 1,65 | 2,16% |
| 8 - 9 | 2,29 | 2,99% | 2,43 | 3,18% | 2,32 | 3,03% | 1,92 | 2,51% |
| 9 - 10 | 2,75 | 3,59% | 2,81 | 3,67% | 2,78 | 3,63% | 2,40 | 3,14% |
| 10 - 11 | 2,53 | 3,31% | 2,99 | 3,91% | 2,64 | 3,45% | 2,06 | 2,69% |
| 11 - 12 | 3,01 | 3,93% | 3,75 | 4,90% | 3,02 | 3,95% | 1,94 | 2,54% |
| 12 - 13 | 3,26 | 4,26% | 3,48 | 4,55% | 3,31 | 4,33% | 2,14 | 2,80% |
| 13 - 14 | 2,92 | 3,82% | 3,06 | 4,00% | 3,91 | 5,11% | 2,37 | 3,10% |
| 14 - 15 | 4,45 | 5,82% | 3,95 | 5,16% | 3,83 | 5,01% | 3,12 | 4,08% |
| 15 - 16 | 4,03 | 5,27% | 3,93 | 5,14% | 3,84 | 5,02% | 3,40 | 4,44% |
| 16 - 17 | 4,31 | 5,63% | 4,33 | 5,66% | 4,08 | 5,33% | 4,05 | 5,29% |
| 17 - 18 | 3,67 | 4,80% | 4,54 | 5,93% | 3,48 | 4,55% | 4,25 | 5,55% |
| 18 - 19 | 3,52 | 4,60% | 3,75 | 4,90% | 3,61 | 4,72% | 5,05 | 6,60% |
| 19 - 20 | 3,74 | 4,89% | 4,57 | 5,97% | 3,80 | 4,97% | 4,43 | 5,79% |
| 20 - 21 | 4,05 | 5,29% | 5,97 | 7,80% | 3,92 | 5,12% | 4,11 | 5,37% |
| 21 - 22 | 4,05 | 5,29% | 3,58 | 4,68% | 3,98 | 5,20% | 3,97 | 5,19% |
| 22 - 23 | 3,46 | 4,52% | 2,73 | 3,57% | 3,39 | 4,43% | 4,87 | 6,37% |
| 23 - 24 | 2,46 | 3,22% | 1,53 | 2,00% | 2,43 | 3,18% | 3,65 | 4,77% |
| 24 - 25 | 2,54 | 3,32% | 1,02 | 1,33% | 2,58 | 3,37% | 2,29 | 2,99% |
| 25 - 26 | 2,43 | 3,18% | 1,01 | 1,32% | 2,33 | 3,05% | 1,86 | 2,43% |
| 26 - 27 | 1,75 | 2,29% | 1,04 | 1,36% | 1,73 | 2,26% | 2,15 | 2,81% |
| 27 - 28 | 0,90 | 1,18% | 0,78 | 1,02% | 0,91 | 1,19% | 1,88 | 2,46% |
| 28 - 29 | 0,42 | 0,55% | 0,22 | 0,29% | 0,44 | 0,58% | 1,23 | 1,61% |
| 29 - 30 | 0,29 | 0,38% | 0,13 | 0,17% | 0,29 | 0,38% | 0,93 | 1,22% |
| 30 - 31 | 0,23 | 0,30% | 0,10 | 0,13% | 0,24 | 0,31% | 0,66 | 0,86% |
| 31 - 32 | 0,18 | 0,24% | 0,09 | 0,12% | 0,18 | 0,24% | 0,39 | 0,51% |
| 32 - 33 | 0,15 | 0,20% | 0,10 | 0,13% | 0,15 | 0,20% | 0,21 | 0,27% |
| 33 - 34 | 0,15 | 0,20% | 0,17 | 0,22% | 0,17 | 0,22% | 0,18 | 0,24% |
| 34 - 35 | 0,22 | 0,29% | 0,08 | 0,10% | 0,31 | 0,41% | 0,26 | 0,34% |
| 35 - 36 | 0,28 | 0,37% | 0,03 | 0,04% | 0,22 | 0,29% | 0,17 | 0,22% |
| 36 - 37 | 0,00 | 0,00% | 0,00 | 0,00% | 0,00 | 0,00% | 0,08 | 0,10% |
| 37 - 38 | 0,00 | 0,00% | 0,00 | 0,00% | 0,00 | 0,00% | 0,02 | 0,03% |
| Total | 76,51 | 100,00% | 76,51 | 100,00% | 76,51 | 100,00% | 76,51 | 100,00% |

SUPERFÍCIE RESISTENTE PARA ESTACAS PRÉ-MOLDADAS (L<30 CM) NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA

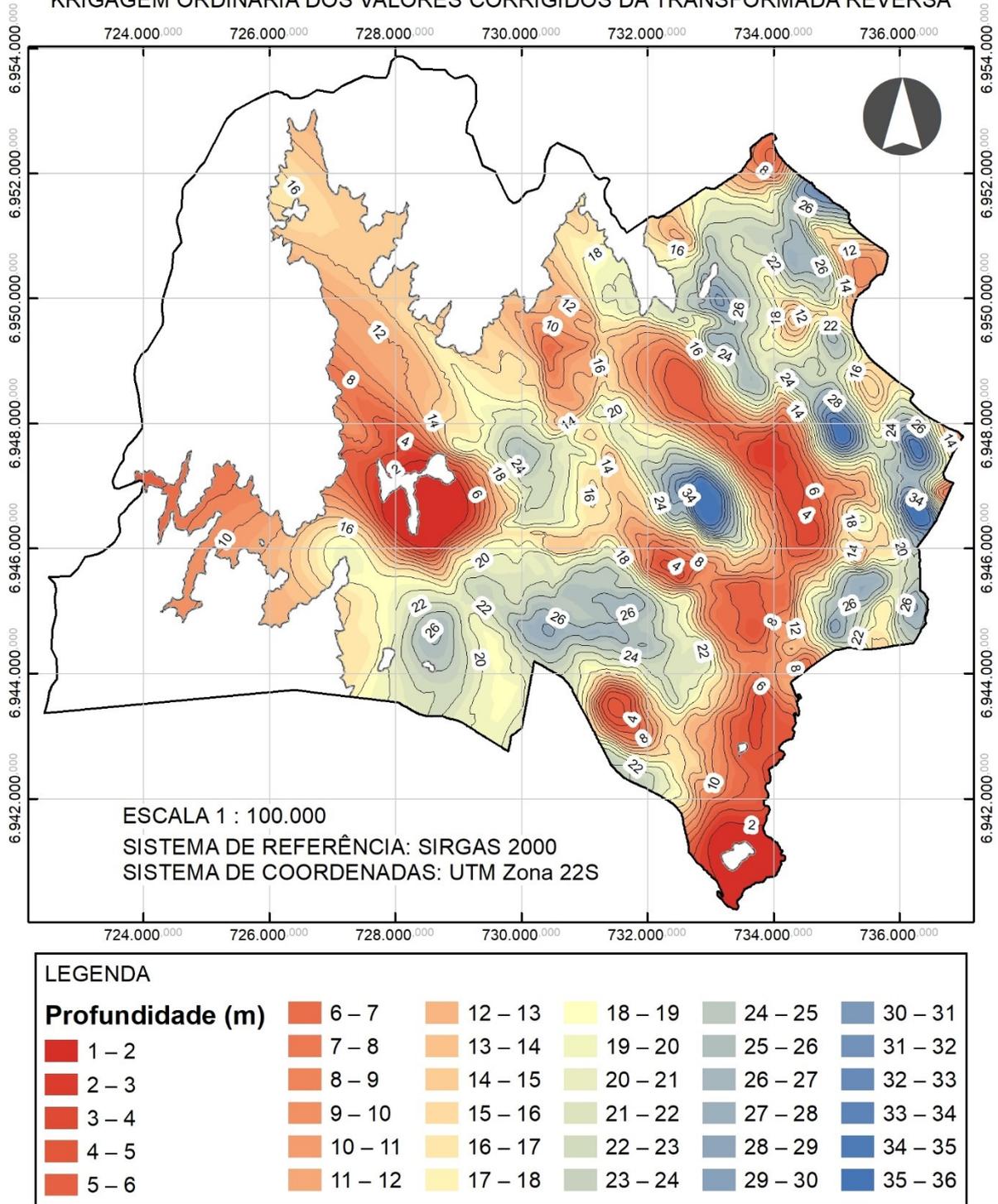


Figura 86 - Superfície resistente para estacas pré-moldadas com diâmetro menor que 30cm.

SUPERFÍCIE RESISTENTE PARA ESTACAS PRÉ-MOLDADAS (L<30 CM) NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC

KRIGAGEM ORDINÁRIA - VALORES DO DESVIO PADRÃO

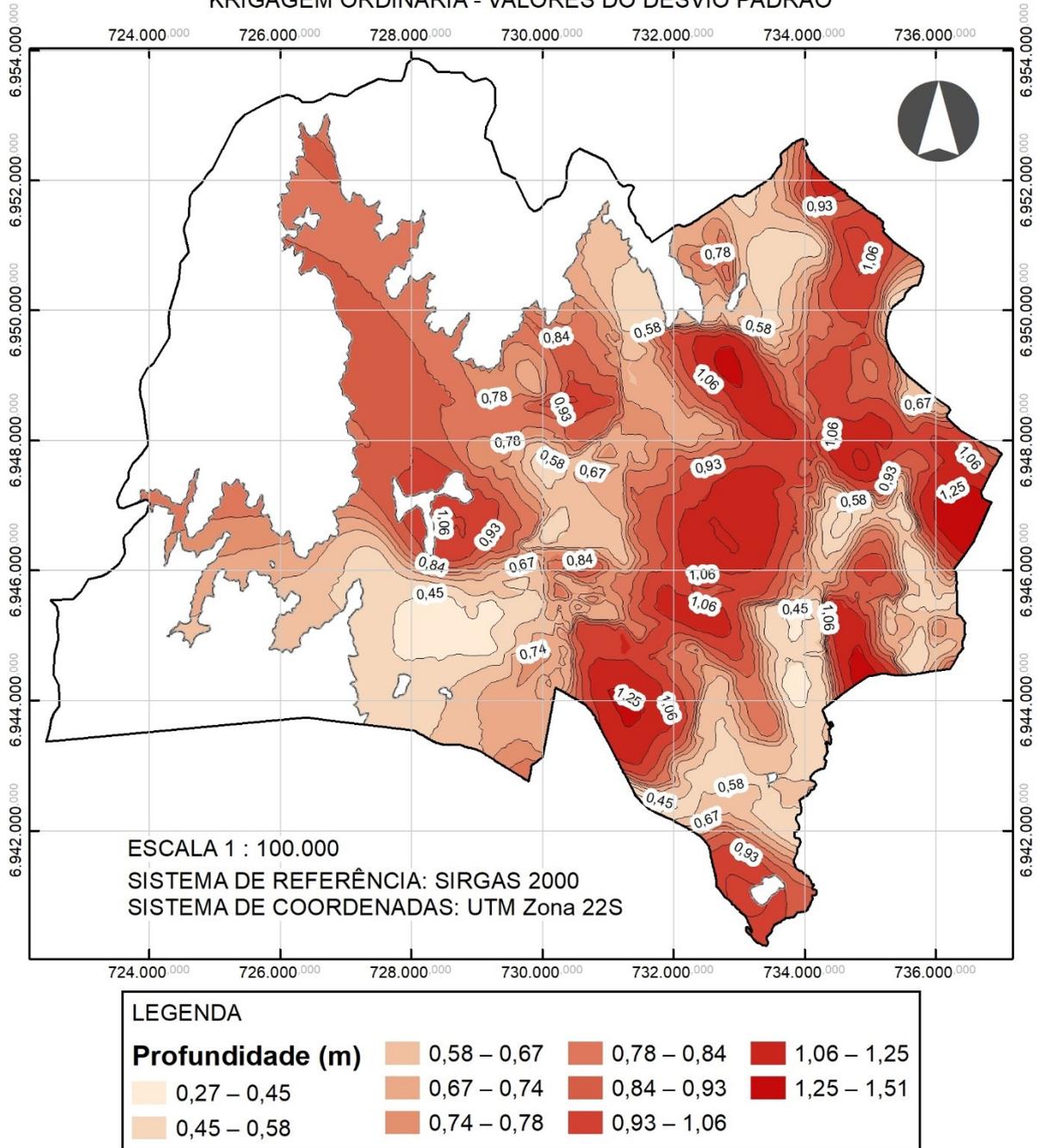
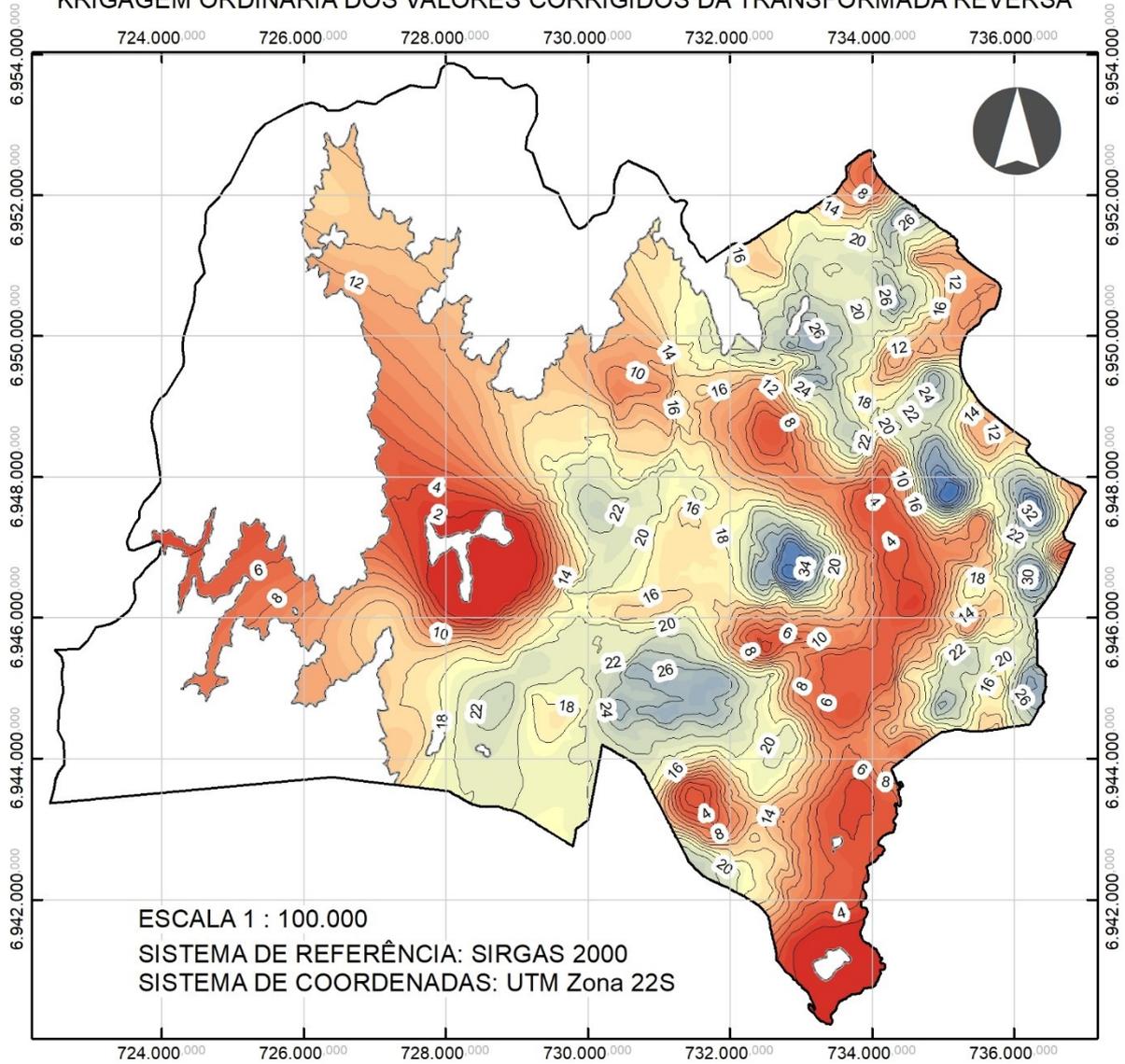


Figura 87 - Desvio padrão - Superfície resistente para estacas pré-moldadas com diâmetro menor que 30cm.

SUPERFÍCIE RESISTENTE PARA ESTACAS PRÉ-MOLDADAS (L≥30 CM) NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA



LEGENDA

| Profundidade (m) | |
|------------------|---------|
| 1 – 2 | 6 – 7 |
| 2 – 3 | 7 – 8 |
| 3 – 4 | 8 – 9 |
| 4 – 5 | 9 – 10 |
| 5 – 6 | 10 – 11 |
| | 11 – 12 |
| | 12 – 13 |
| | 13 – 14 |
| | 14 – 15 |
| | 15 – 16 |
| | 16 – 17 |
| | 17 – 18 |
| | 18 – 19 |
| | 19 – 20 |
| | 20 – 21 |
| | 21 – 22 |
| | 22 – 23 |
| | 23 – 24 |
| | 24 – 25 |
| | 25 – 26 |
| | 26 – 27 |
| | 27 – 28 |
| | 28 – 29 |
| | 29 – 30 |
| | 30 – 31 |
| | 31 – 32 |
| | 32 – 33 |
| | 33 – 34 |
| | 34 – 35 |
| | 35 – 36 |

Figura 88 - Superfície resistente para estacas pré-moldadas com diâmetro maior ou igual que 30cm.

SUPERFÍCIE RESISTENTE PARA ESTACAS PRÉ-MOLDADAS ($L \geq 30$ CM) NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC

KRIGAGEM ORDINÁRIA - VALORES DO DESVIO PADRÃO

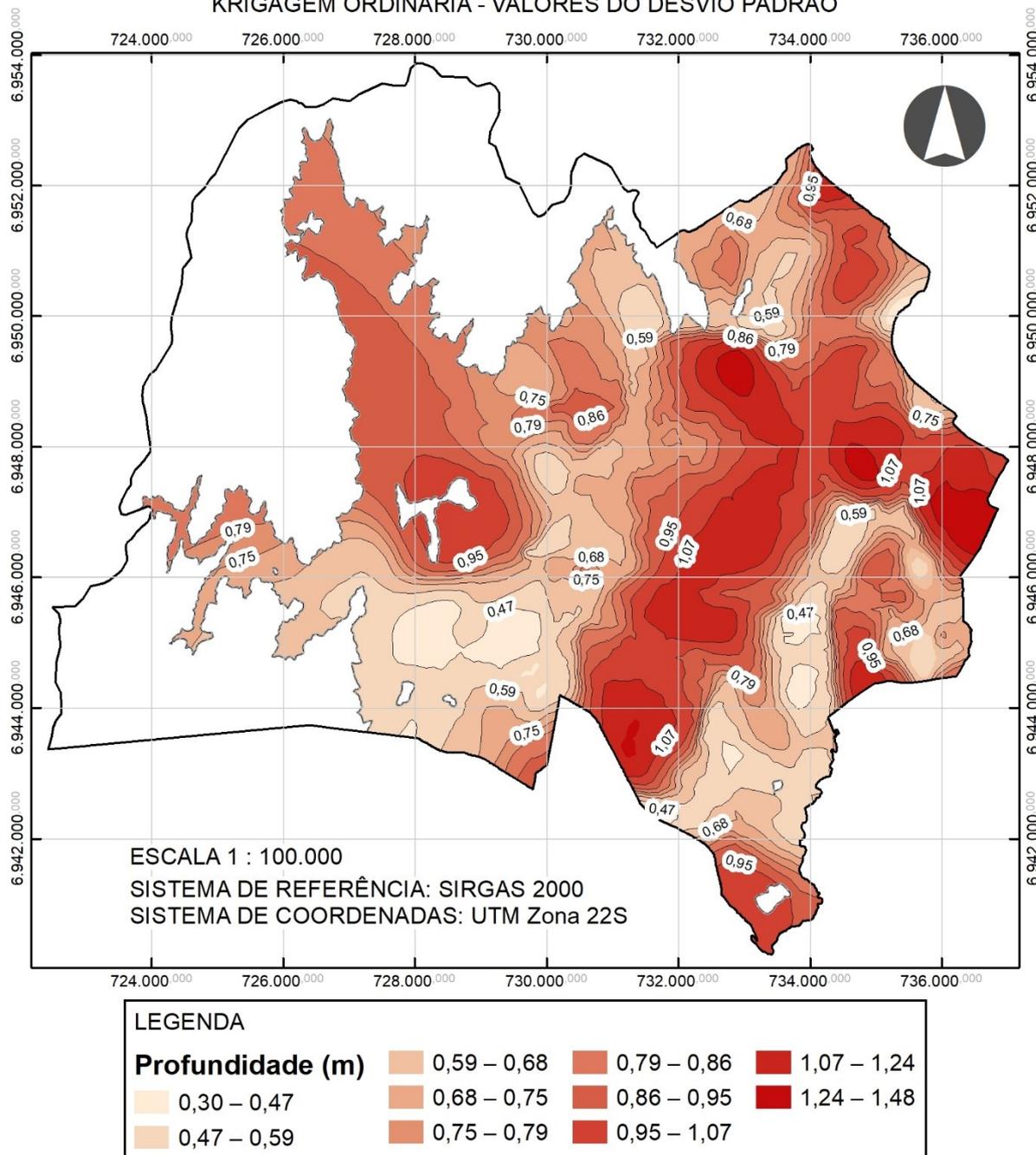
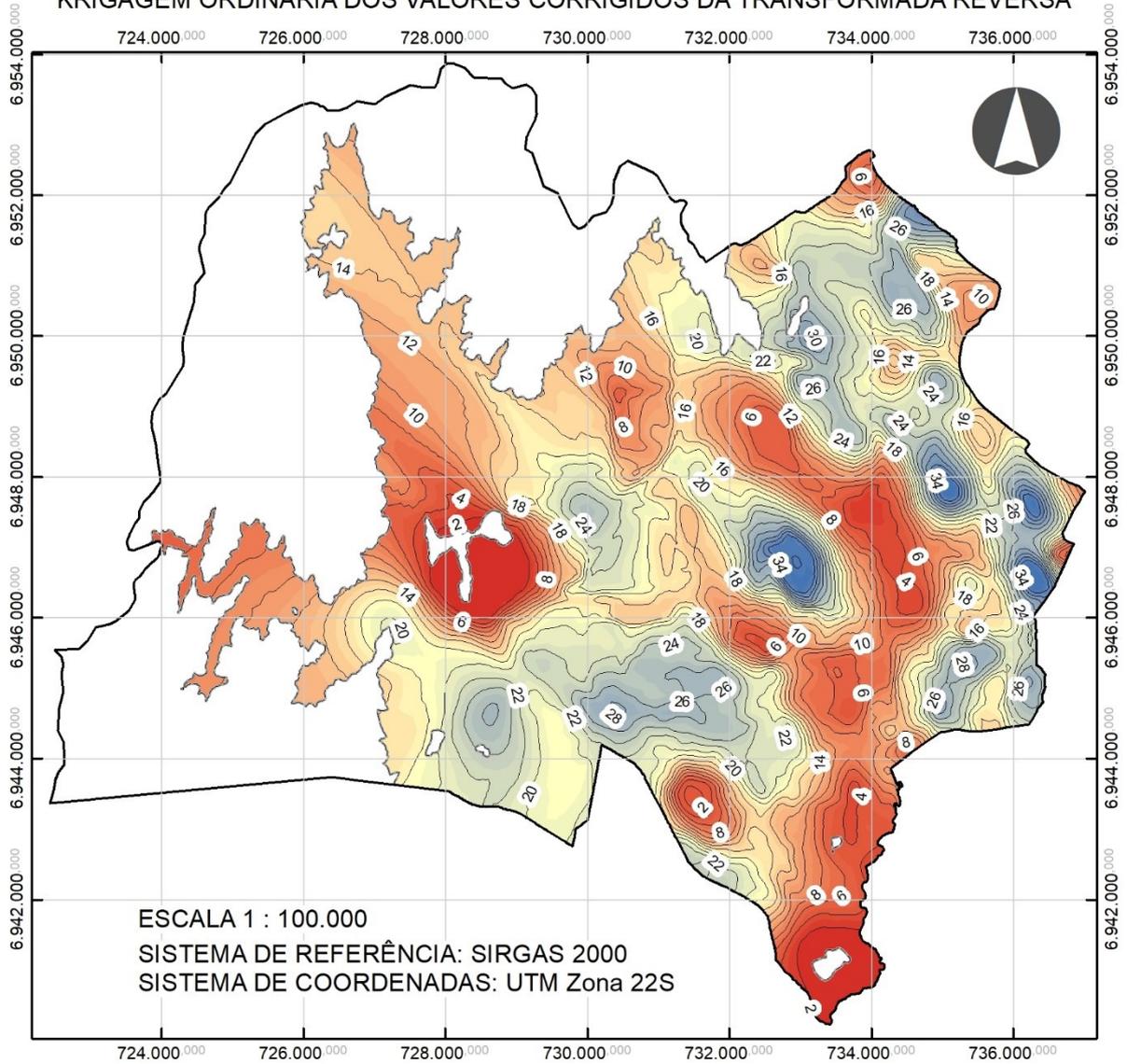


Figura 89 - Desvio padrão - Superfície resistente para estacas pré-moldadas com diâmetro maior ou igual que 30cm.

SUPERFÍCIE RESISTENTE PARA ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA



LEGENDA

| Profundidade (m) | |
|------------------|---------|
| 1 – 2 | 6 – 7 |
| 2 – 3 | 7 – 8 |
| 3 – 4 | 8 – 9 |
| 4 – 5 | 9 – 10 |
| 5 – 6 | 10 – 11 |
| | 11 – 12 |
| | 12 – 13 |
| | 13 – 14 |
| | 14 – 15 |
| | 15 – 16 |
| | 16 – 17 |
| | 17 – 18 |
| | 18 – 19 |
| | 19 – 20 |
| | 20 – 21 |
| | 21 – 22 |
| | 22 – 23 |
| | 23 – 24 |
| | 24 – 25 |
| | 25 – 26 |
| | 26 – 27 |
| | 27 – 28 |
| | 28 – 29 |
| | 29 – 30 |
| | 30 – 31 |
| | 31 – 32 |
| | 32 – 33 |
| | 33 – 34 |
| | 34 – 35 |
| | 35 – 36 |

Figura 90 - Superfície resistente para estacas tipo hélice-contínua.

SUPERFÍCIE RESISTENTE PARA ESTACAS HÉLICE CONTÍNUA NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA - VALORES DO DESVIO PADRÃO

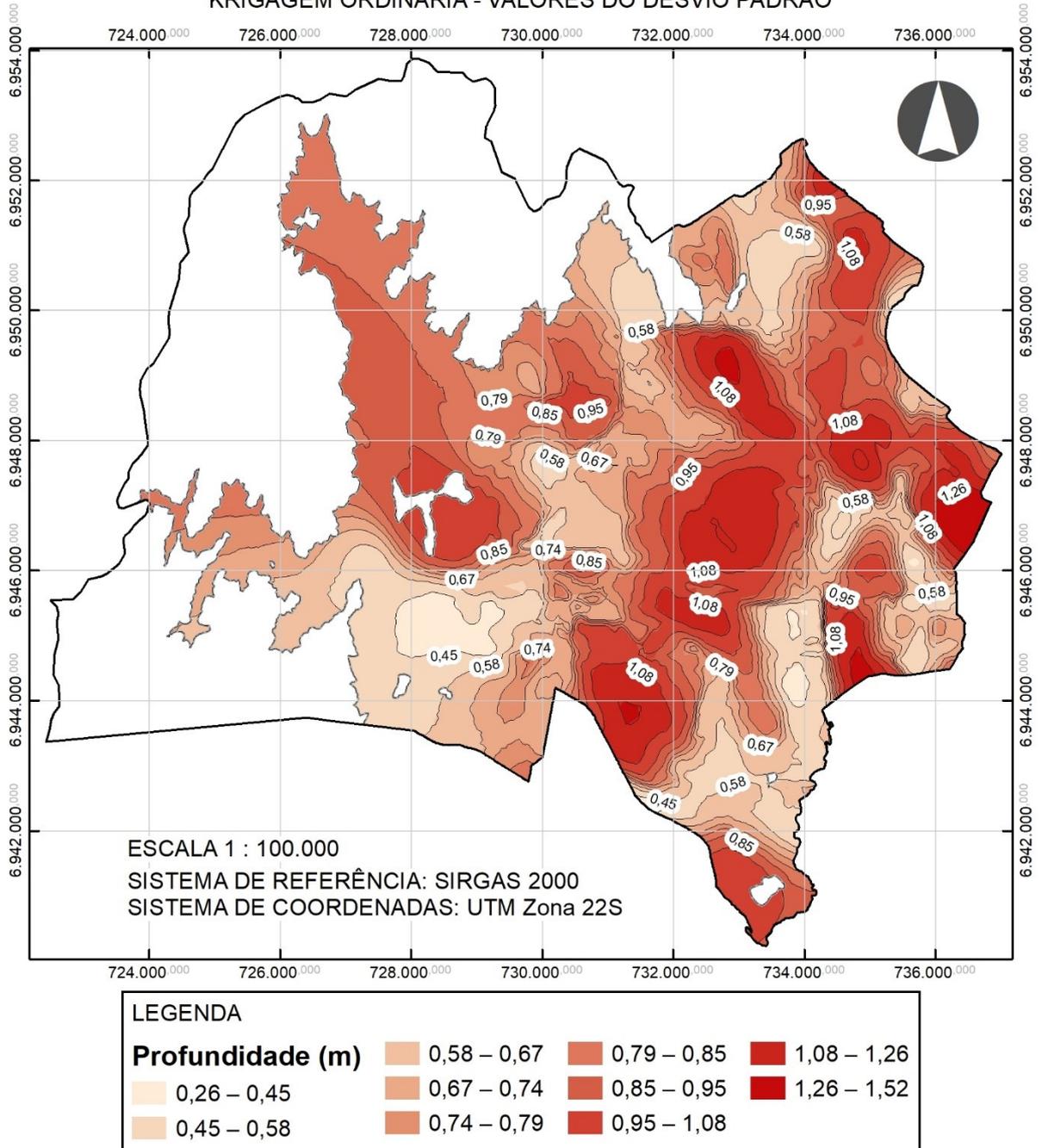


Figura 91 - Desvio padrão - Superfície resistente para estacas tipo hélice-contínua.

SUPERFÍCIE RESISTENTE PARA ESTACAS RAÍZ NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA

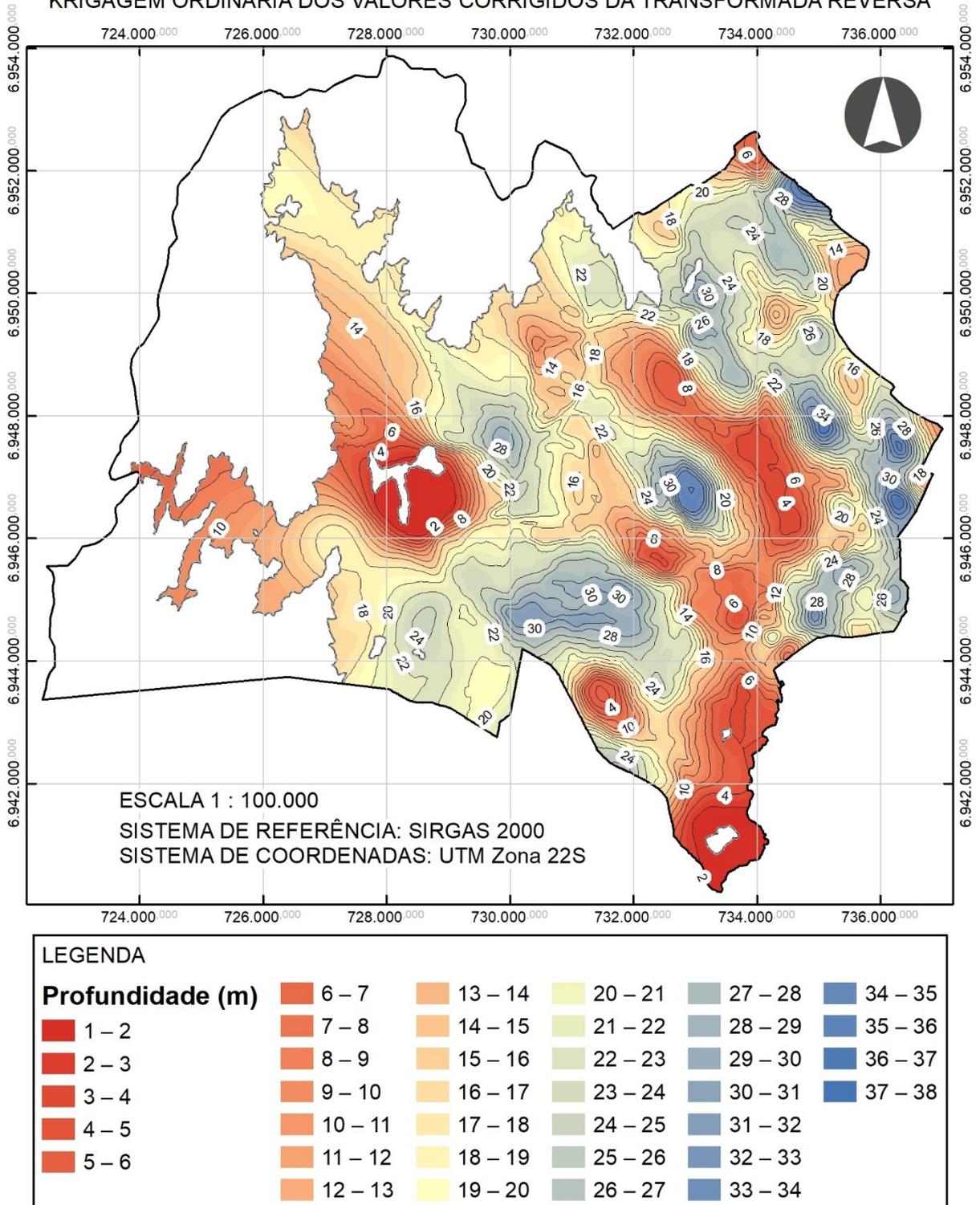


Figura 92 - Superfície resistente para estacas tipo raiz.

SUPERFÍCIE RESISTENTE PARA ESTACAS RAÍZ NO MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA - VALORES DO DESVIO PADRÃO

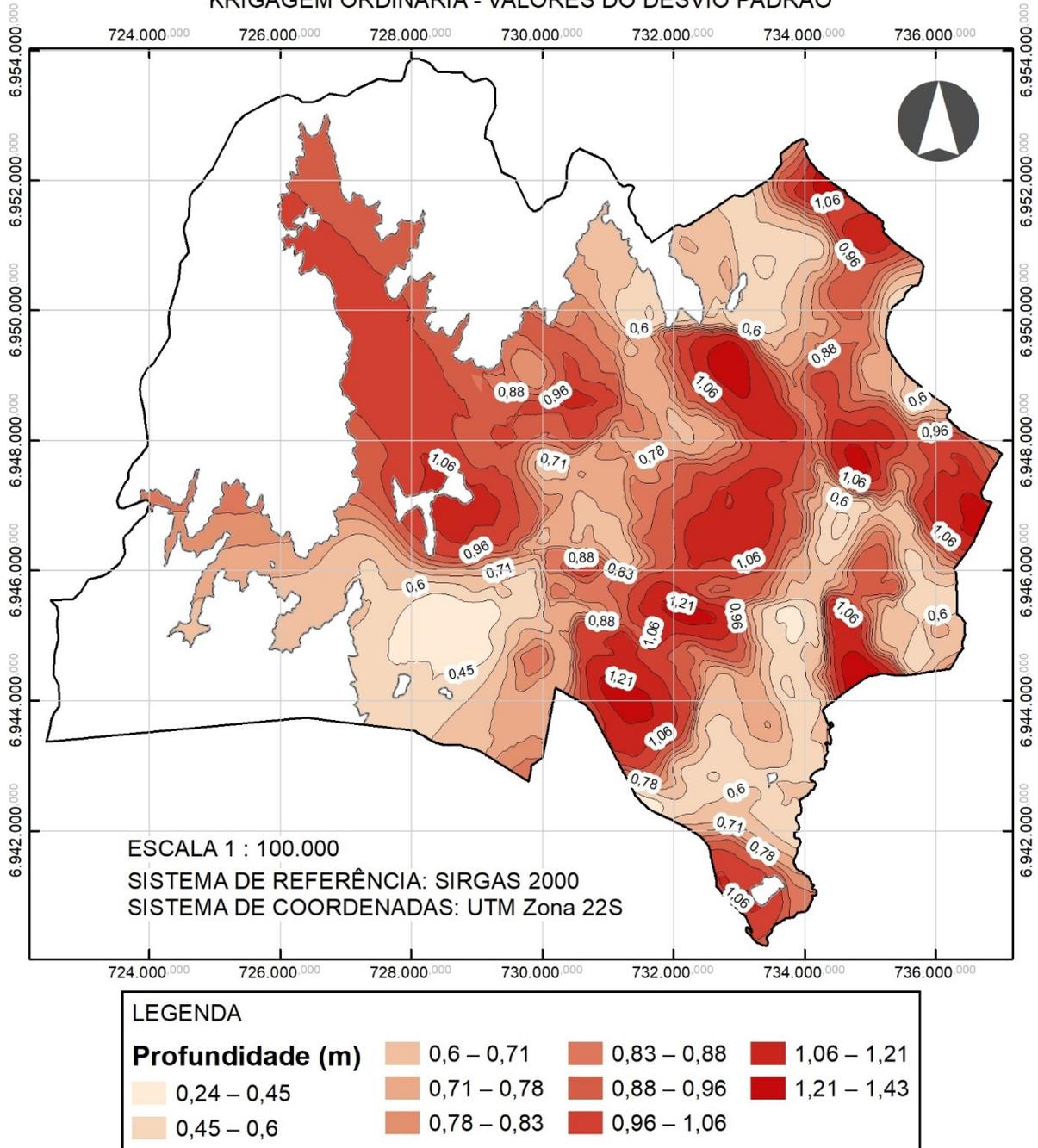


Figura 93 - Desvio padrão - Superfície resistente para estacas tipo raiz.

5.5.4 Cartas de isovalores de N_{spt}

As cartas de isovalores têm função de complementar as de tensões admissíveis e superfície resistente. Para a primeira, para cálculo do bulbo de tensões na aplicação da Equação (1) e, a segunda, para estimativa da capacidade portante do solo nas camadas em que são atingidas as profundidades da superfície resistente.

As cartas que se referem aos isovalores de N_{spt} são apresentadas entre as Figuras 94 e 107).

Ao se avaliar as cartas de isovalores (Figuras 94, 96, 98, 100, 102, 104 e 106) identificou-se um lento aumento da resistência, com mudança significativa apenas após os 10m de profundidade. Entre os 4m e 7m (Figuras 96 e 98) houve redução do índice N_{spt}, com a ausência de polígonos menores de coloração azulada, comparativamente falando, mas com o incremento de área do que já era maior, localizada entre os bairros Bosque das Mansões, Forquilha, Kobrasol e Potecas.

Na profundidade de 16m, nota-se que mais da metade da área em estudo ainda não havia atingido valores superiores a 20 golpes, moldando-se de forma a atingir maiores resistência mais rapidamente entre os 2 últimos metros analisados, quando o mesmo N_{spt} citado passou a ocupar quase a totalidade do território.

Os trechos que persistem em valores mais baixos de resistência são aqueles associados aos Gleissolos, como já era esperado. Quanto às demais unidades geotécnicas, observou-se uma variabilidade maior de resultados, sendo em alguns casos uma progressão clara e, em outros, de transição menos suave.

As cartas de desvio padrão (Figuras 95, 97, 99, 101, 103, 105 e 107) mostram que os dados se mantêm próximos à média, com variações inferiores a 1,72m, ou seja, não chegando a mudar o entendimento de cada análise.

Vale lembrar que as cartas que apresentam o desvio padrão para cada profundidade não devem chegar a apresentar qualquer linha de tendência de fato, sendo, porém, necessárias para qualquer análise pontual dos resultados obtidos. Isso significa que nenhum valor encontrado deve ser lido isoladamente ao seu respectivo erro em relação ao valor estimado.

ISOVALORES DE NSPT A UM METRO PARA O MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA

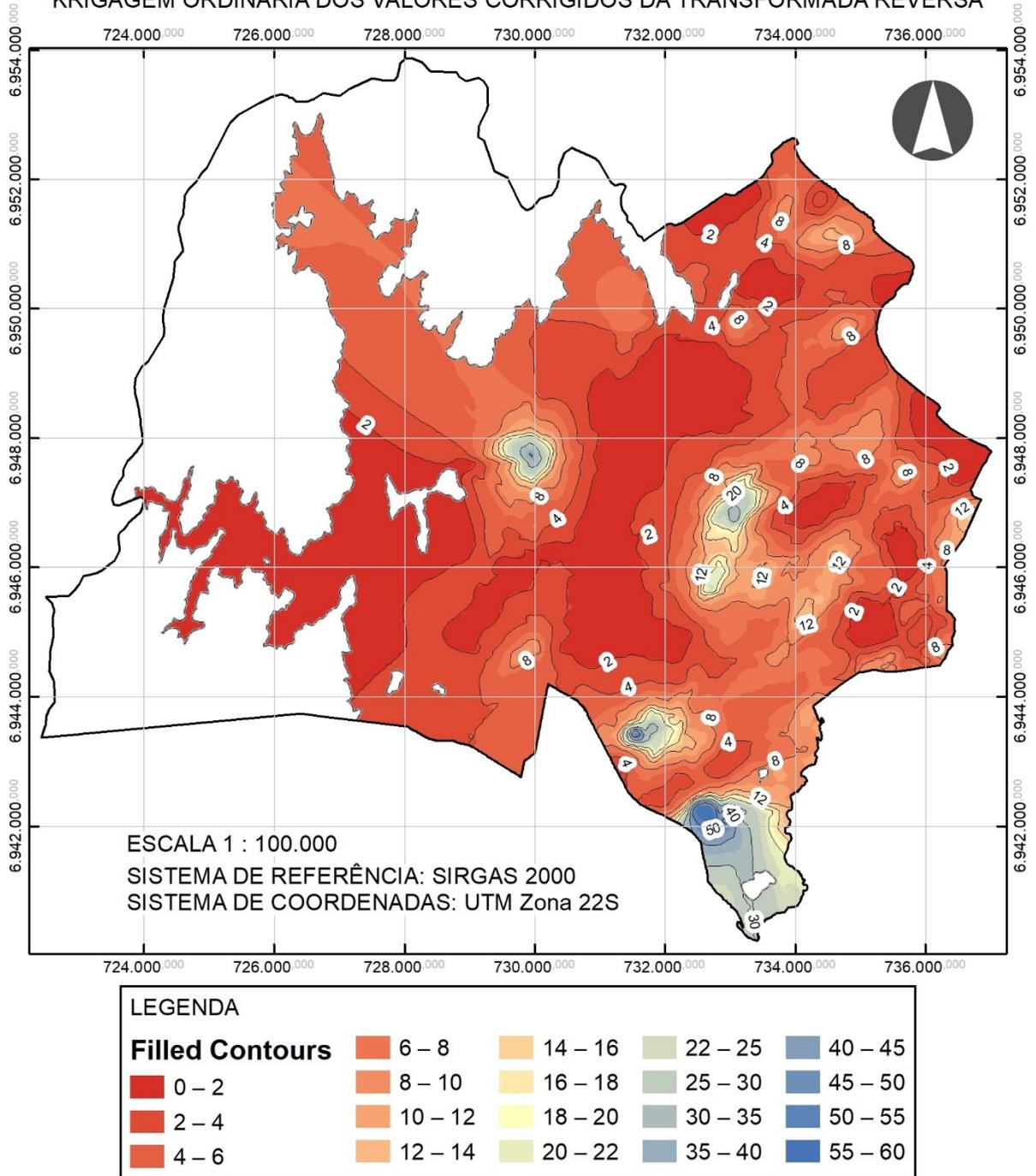


Figura 94 - Isovalores de Nspt a 1m de profundidade.

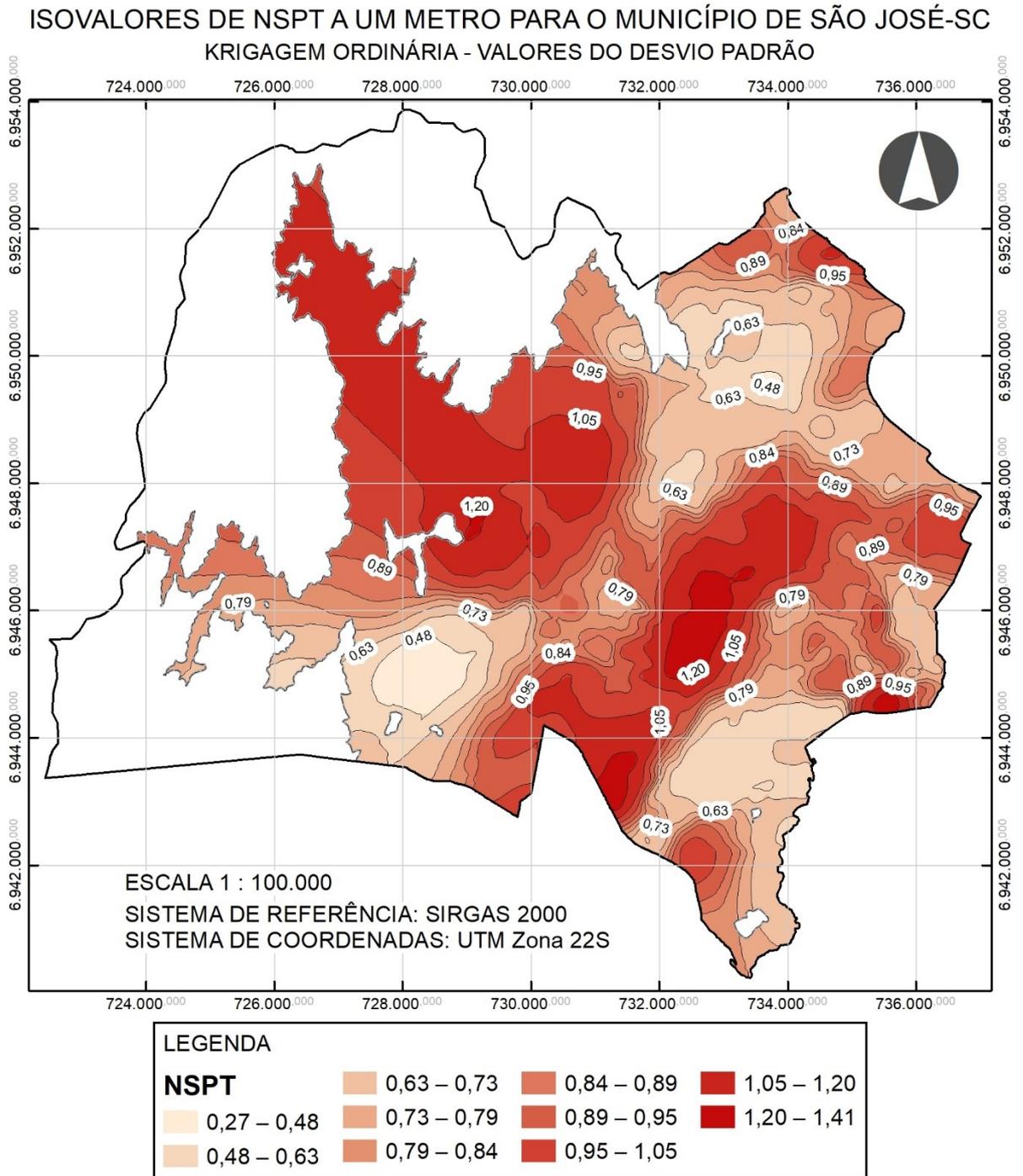


Figura 95 - Desvio padrão - Isovalores de Nspt a 1m de profundidade.

ISOVALORES DE NSPT A QUATRO METROS PARA O MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA

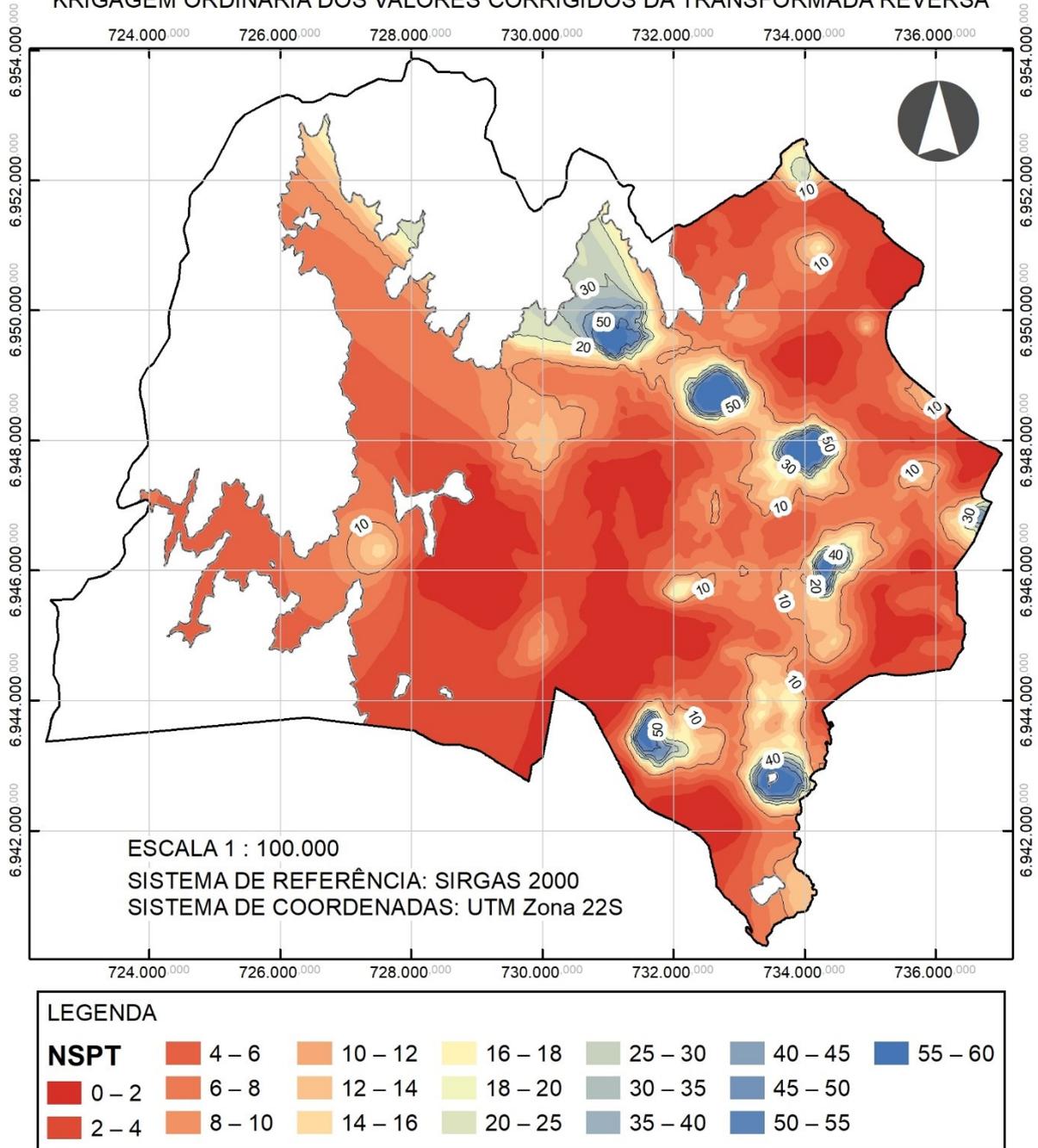


Figura 96 - Isovalores de Nspt a 4m de profundidade.

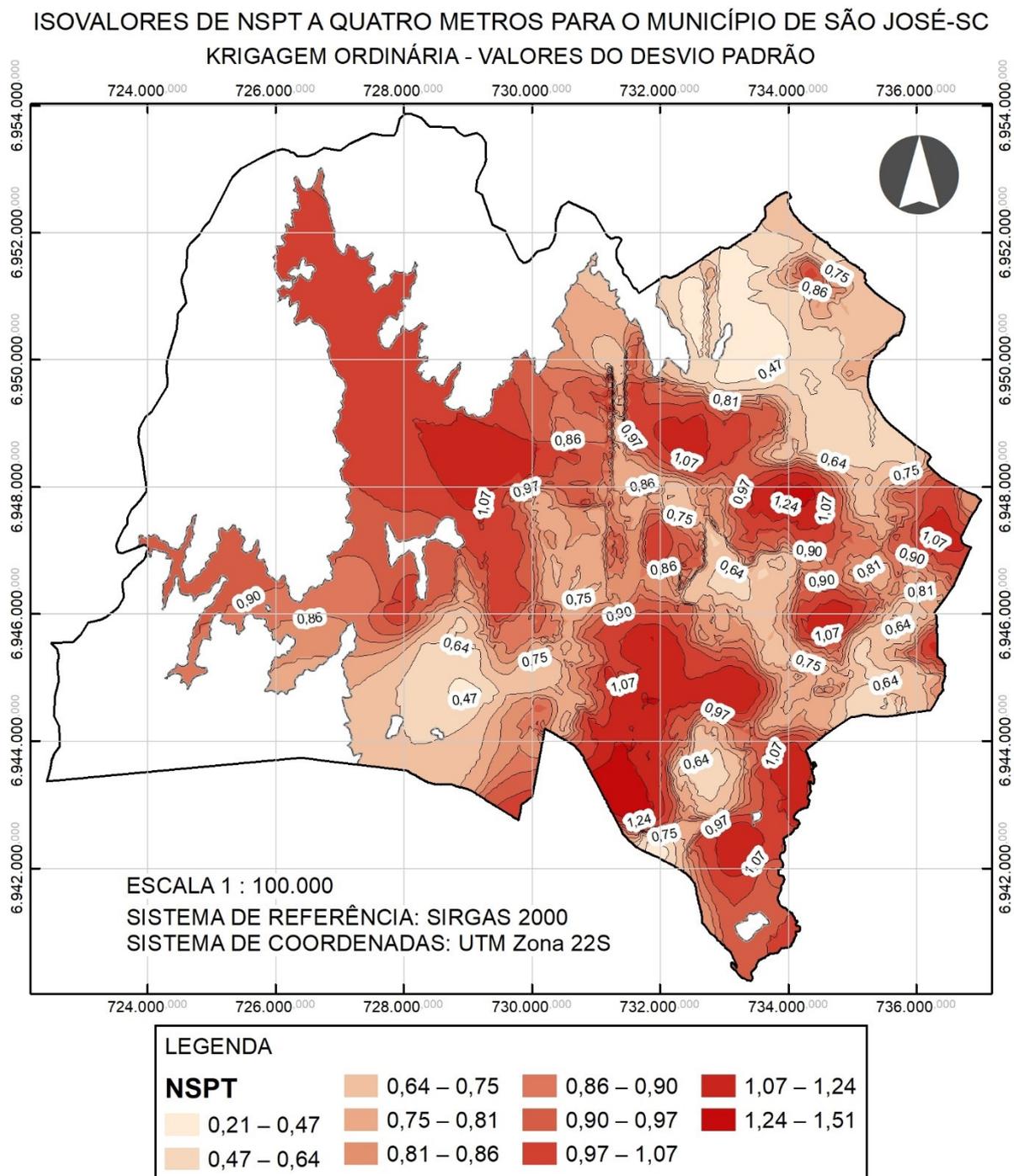


Figura 97 - Desvio padrão - Isovalores de Nspt a 4m de profundidade.

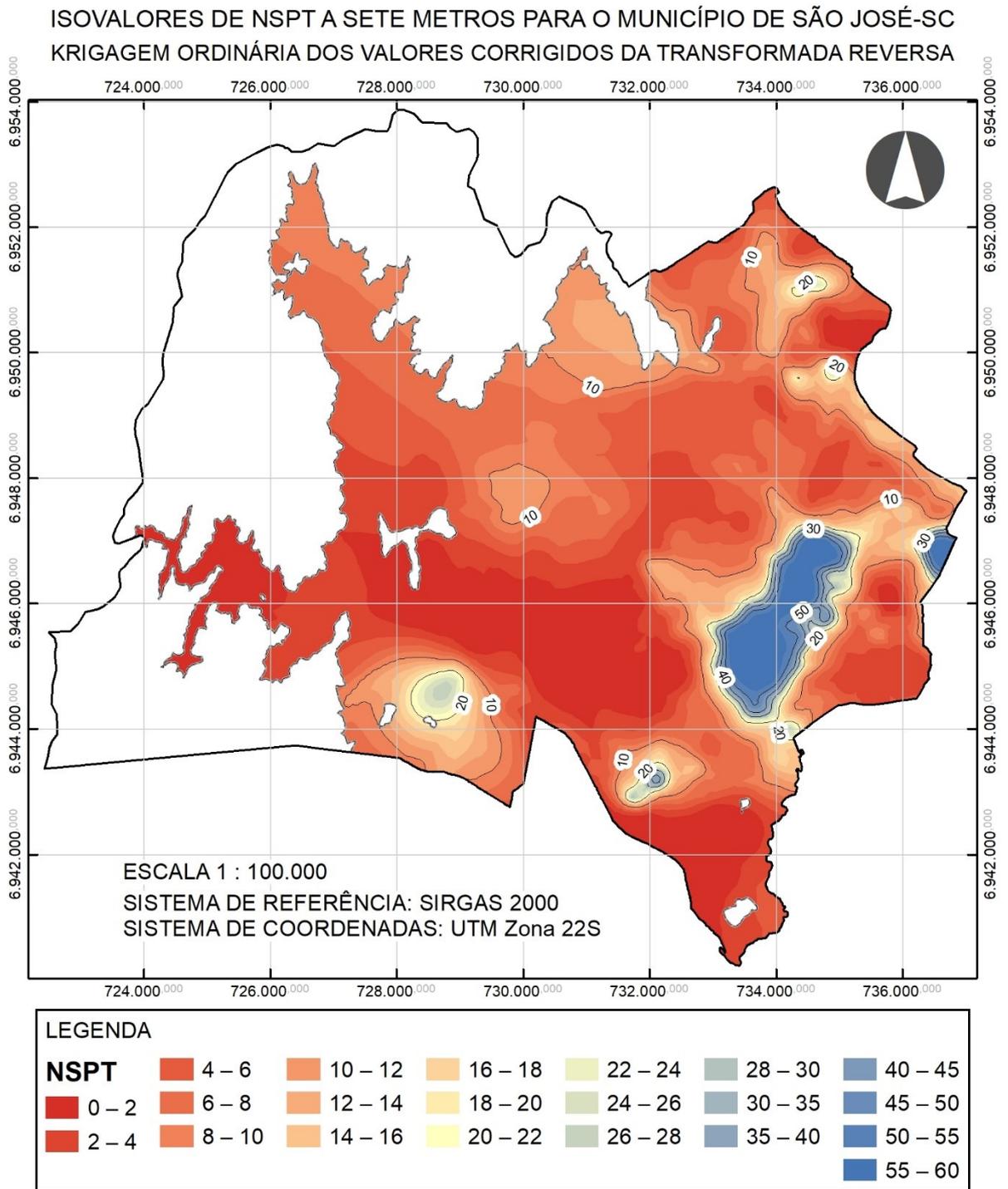


Figura 98 - Isovalores de Nspt a 7m de profundidade.

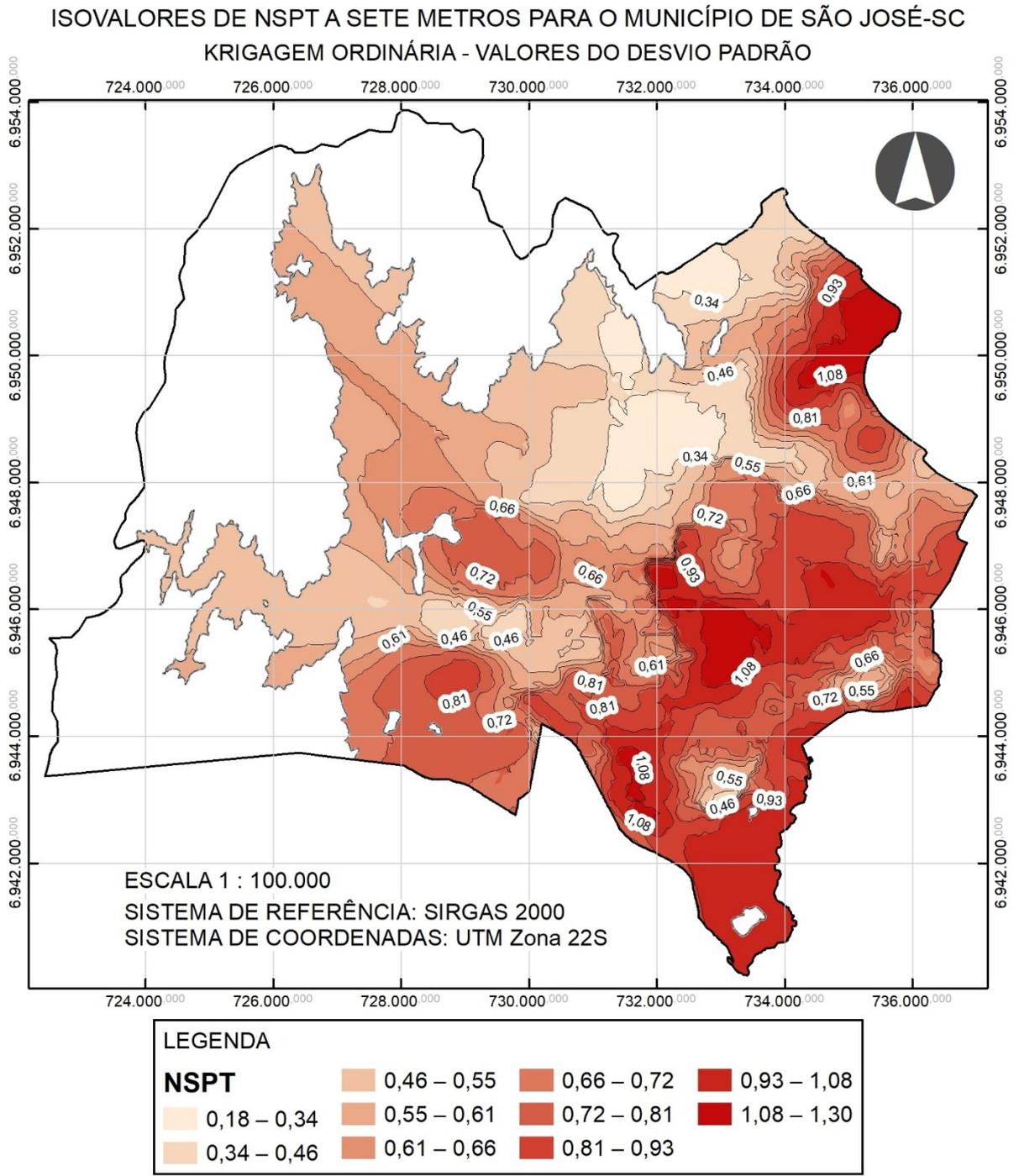


Figura 99 - Desvio padrão - Isovalores de Nspt a 7m de profundidade.

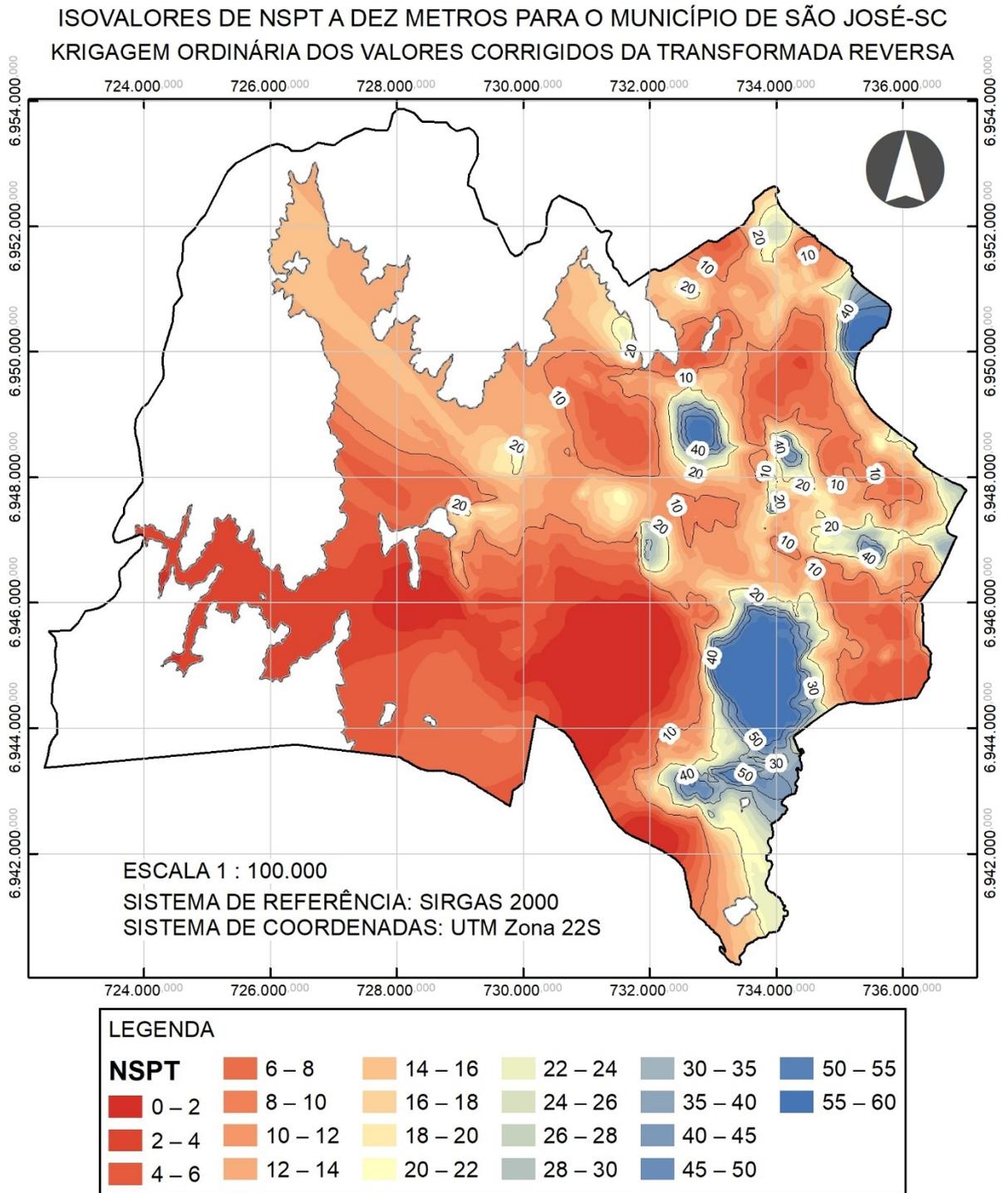


Figura 100 - Isovalores de Nspt a 10m de profundidade.

ISOVALORES DE NSPT A DEZ METROS PARA O MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA - VALORES DO DESVIO PADRÃO

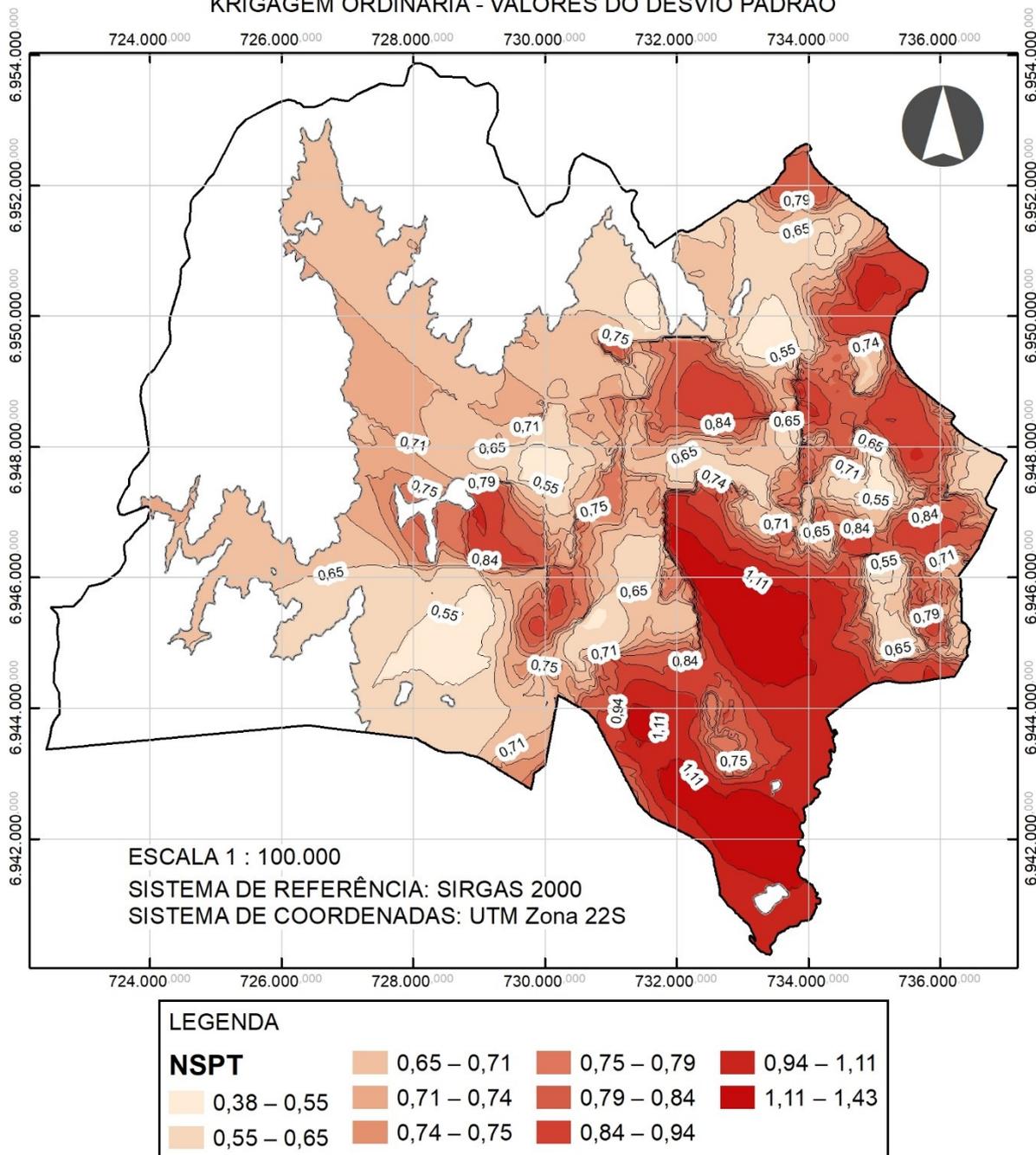


Figura 101 - Desvio padrão - Isovalores de Nspt a 10m de profundidade.

ISOVALORES DE NSPT A TREZE METROS PARA O MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA

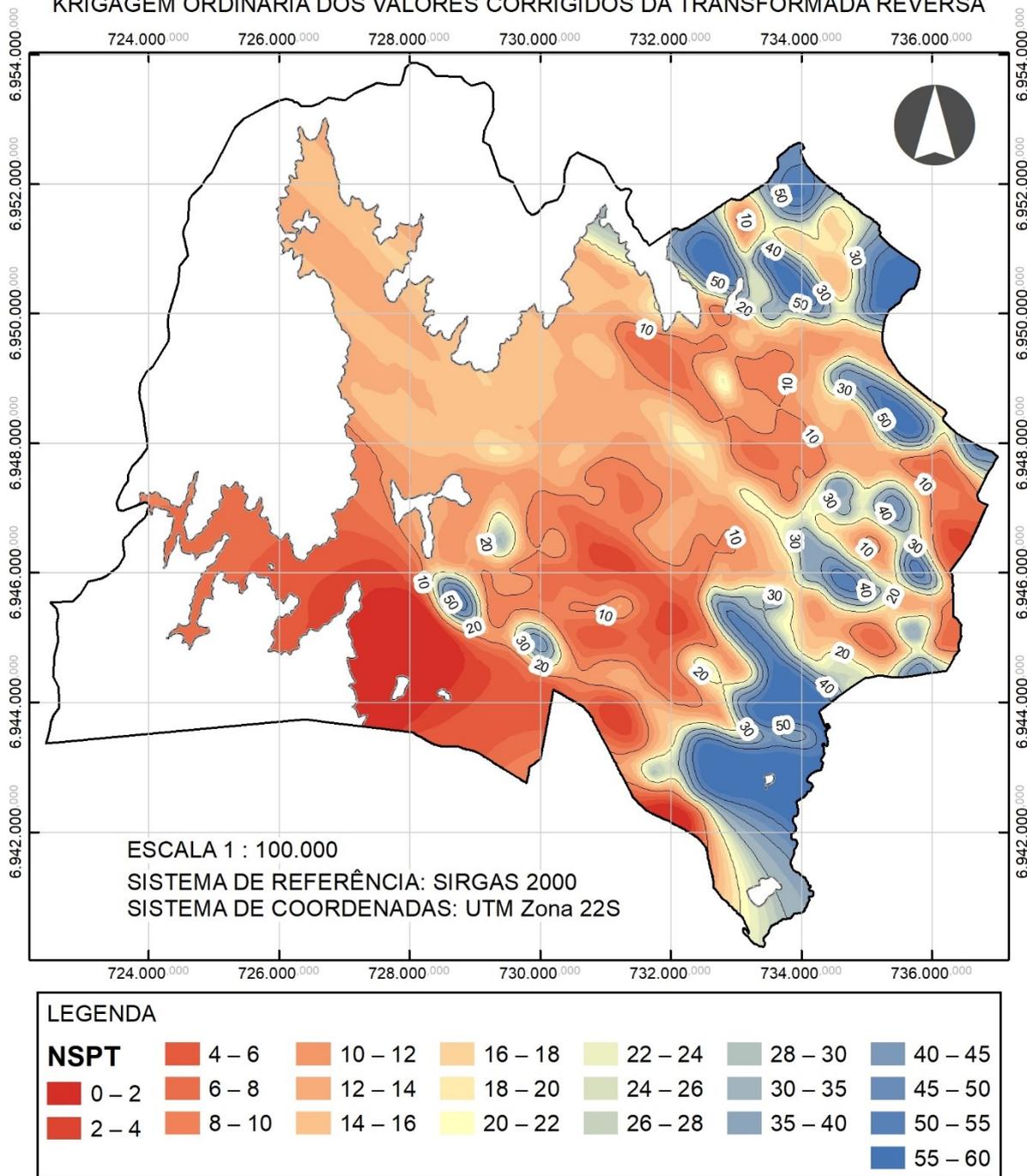


Figura 102 - Isovalores de Nspt a 13m de profundidade.

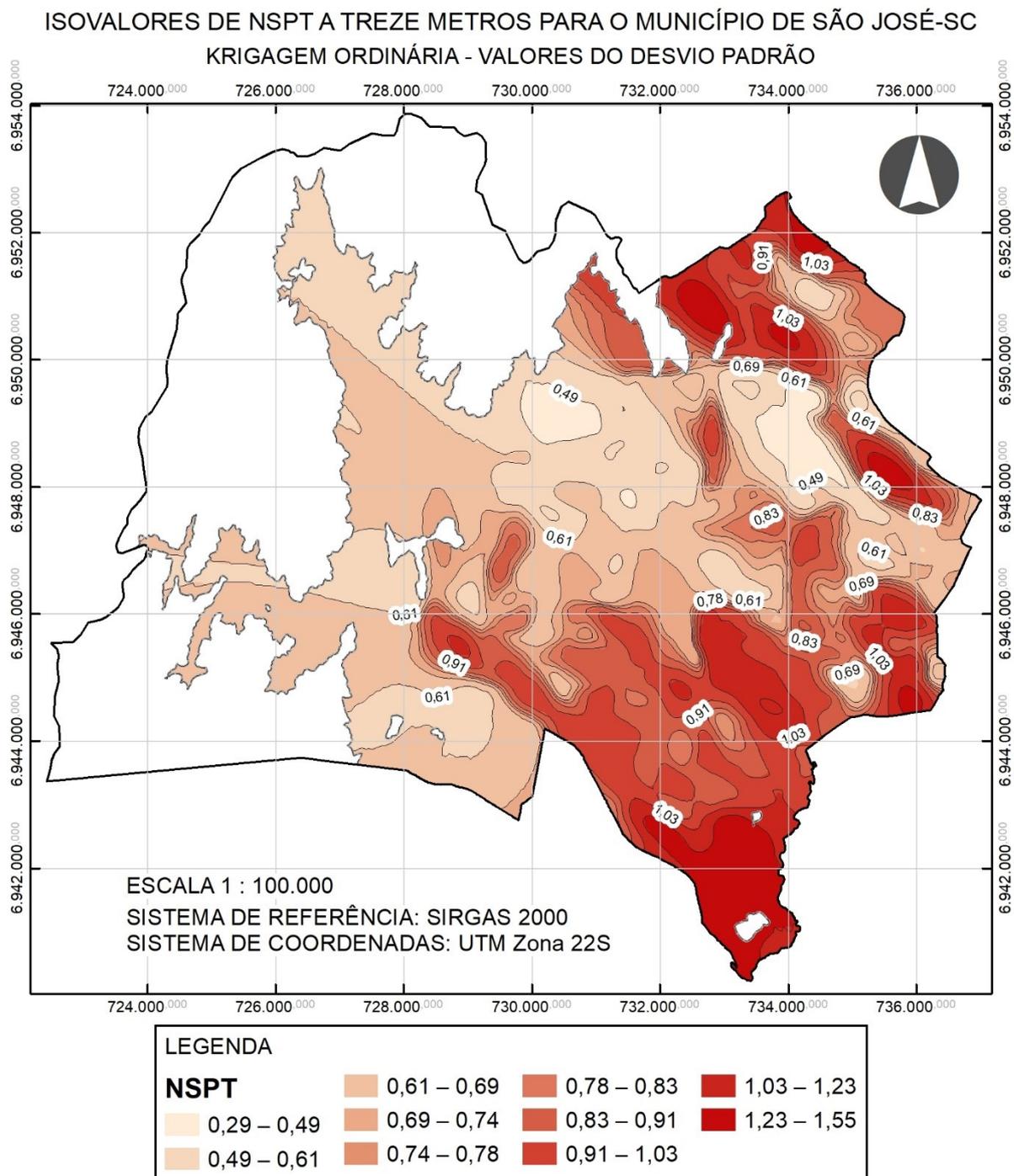


Figura 103 - Desvio padrão - Isovalores de Nspt a 13m de profundidade.

ISOVALORES DE NSPT A DEZESSEIS METROS PARA O MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA

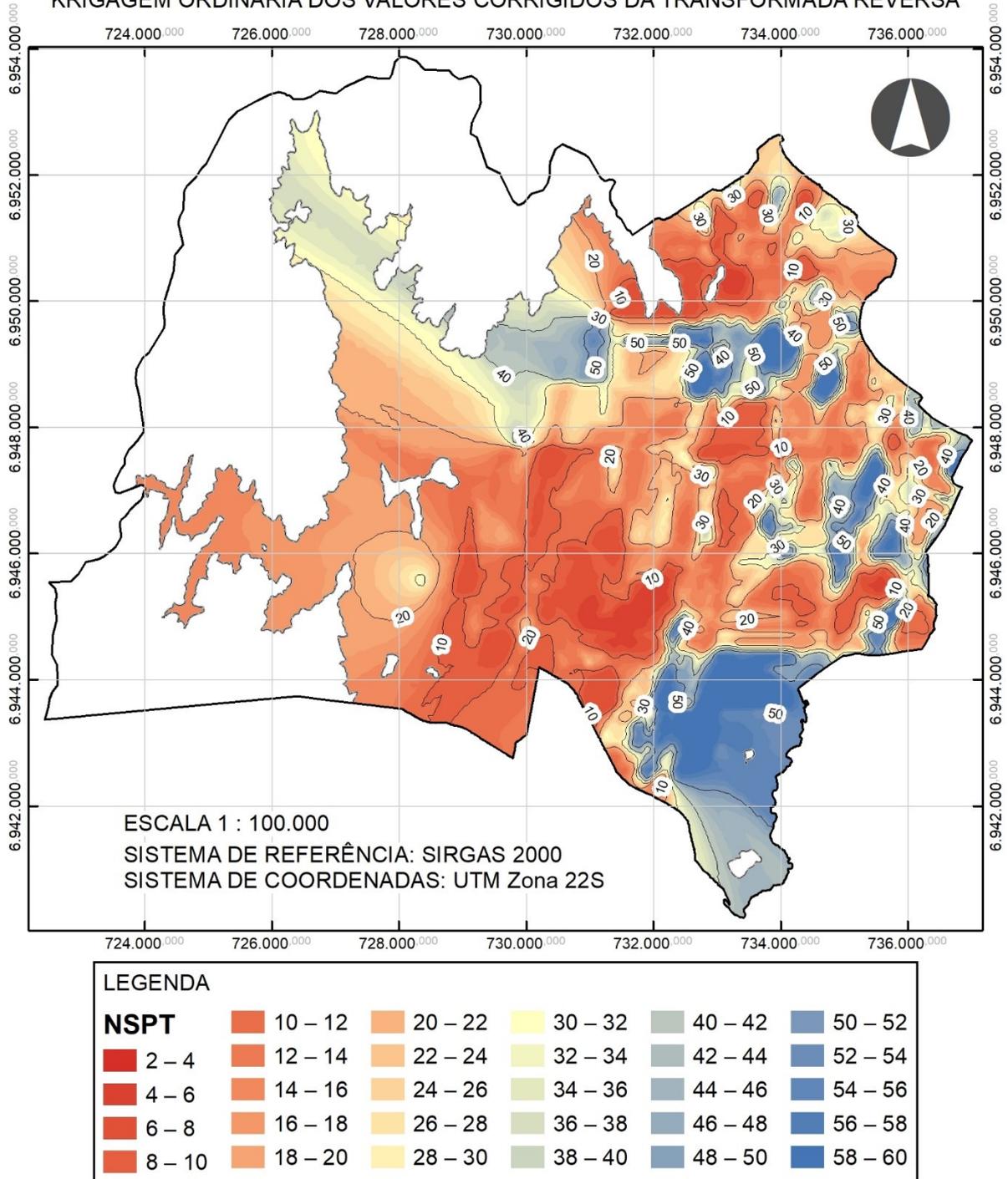


Figura 104 - Isovalores de Nspt a 16m de profundidade.

ISOVALORES DE NSPT A DEZESSEIS METROS PARA O MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
KRIGAGEM ORDINÁRIA - VALORES DO DESVIO PADRÃO

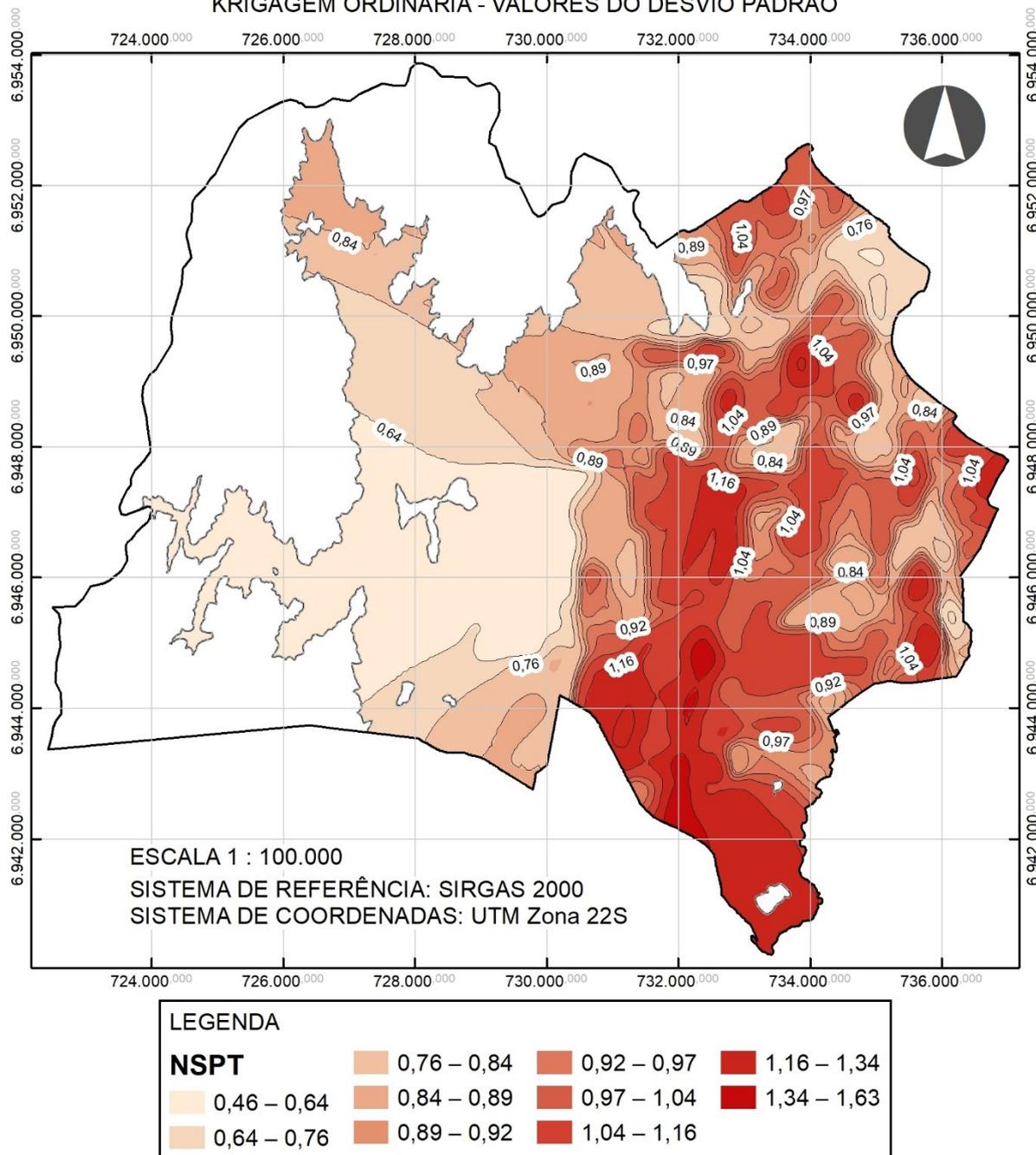


Figura 105 - Desvio padrão - Isovalores de Nspt a 16m de profundidade.

ISOVALORES DE NSPT A DEZOITO METROS PARA O MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
 KRIGAGEM ORDINÁRIA DOS VALORES CORRIGIDOS DA TRANSFORMADA REVERSA

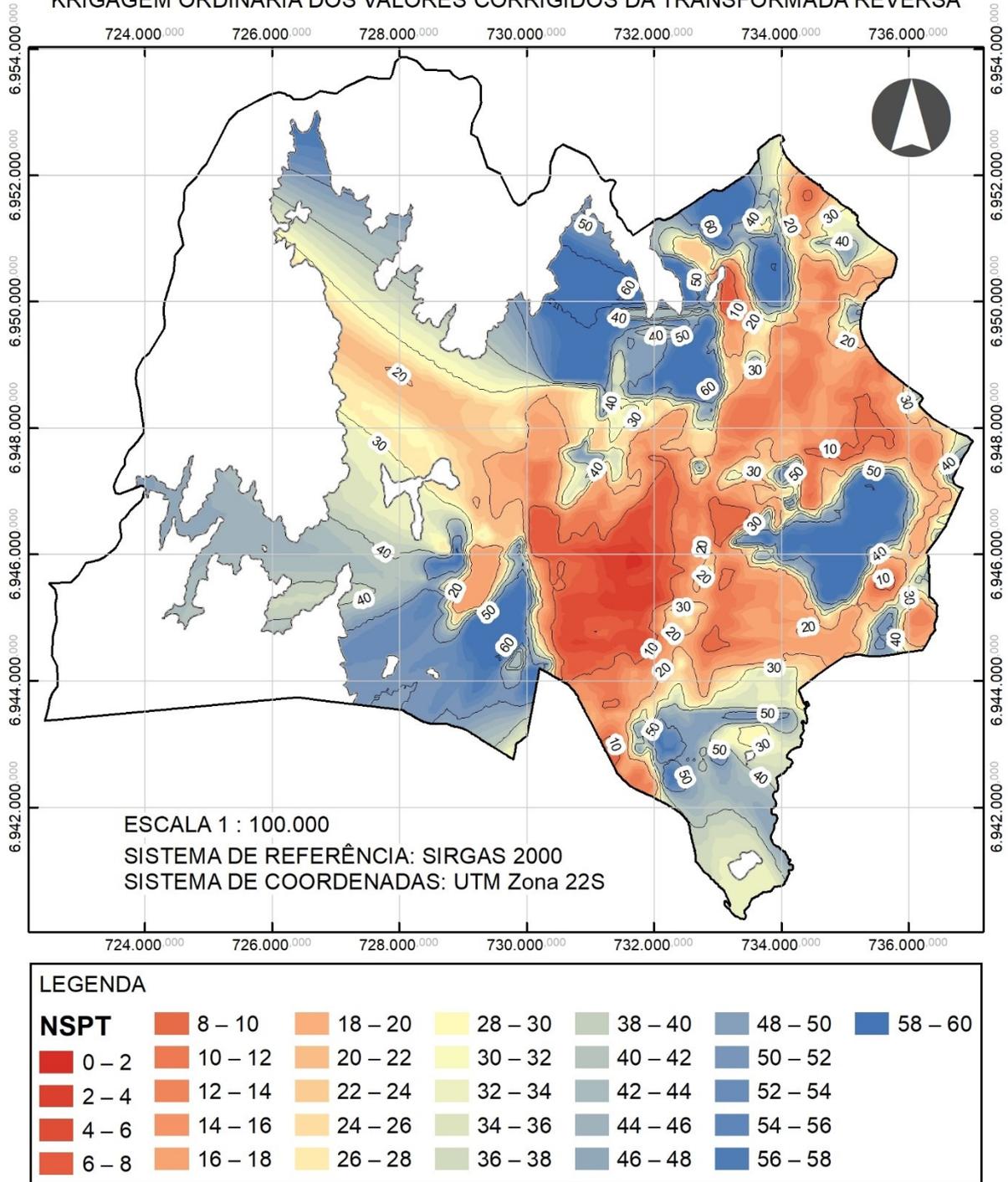


Figura 106 - Isovalores de Nspt a 18m de profundidade.

ISOVALORES DE NSPT A DEZOITO METROS PARA O MUNICÍPIO DE SÃO JOSÉ-SC
KRIGAGEM ORDINÁRIA - VALORES DO DESVIO PADRÃO

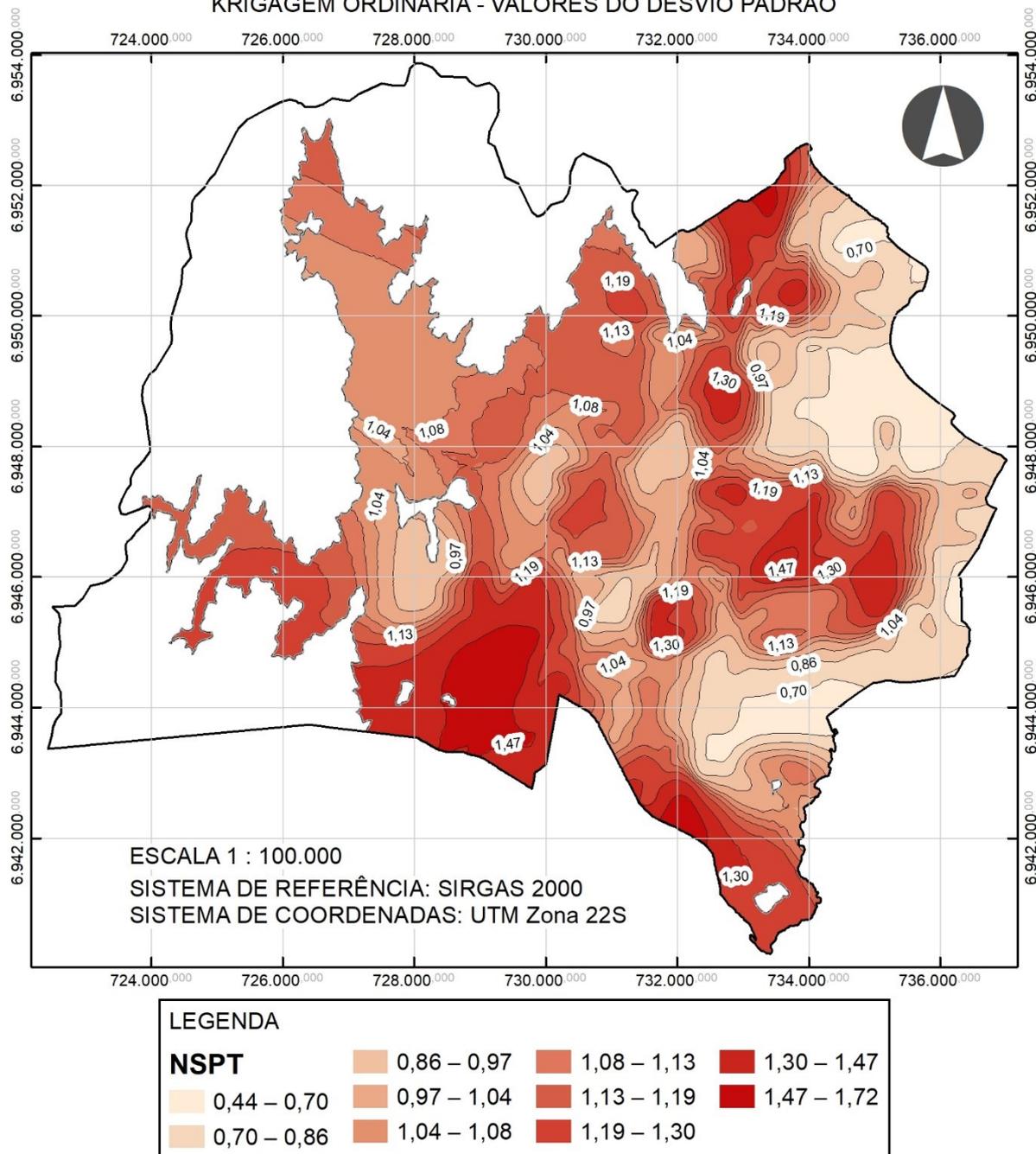


Figura 107 - Desvio padrão - Isovalores de Nspt a 18m de profundidade.

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Esse capítulo apresenta, sucintamente, as conclusões relativas ao estudo realizado e sugestões para trabalhos futuros.

6.1 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, seguindo-se a metodologia Davison Dias (1995), foi possível estimar 16 unidades geotécnicas, a partir da pedologia e geologia local.

Dessas, o aterro da baía de São José, identificado como URB-Aterro, não necessita atualmente de caracterização, visto ser uma área resultante da ação antrópica. Com o passar dos anos, no entanto, é possível que uma pedologia característica se desenvolva nesta área, como citam Ker *et al.* (2012) sobre formação de solos com ação do homem.

Algumas unidades em locais densamente ocupados foram identificadas também com as siglas URB ou Urb. Em um primeiro momento o objetivo era eliminar completamente essas classificações, substituindo-as pela unidade pedológica-geológica correspondente, sendo posteriormente, no entanto, descartada essa hipótese em virtude do volume de análises que precisariam ser realizadas e o tempo que demandariam, principalmente no maior polígono com essas características, a unidade URB-urb, que não possuía nenhuma informação preexistente, além da mancha urbana.

Excetuando-se as áreas urbanizadas, foram encontradas 12 unidades geotécnicas, sendo apenas uma, a maior delas, de solos de origem sedimentar e as demais de solos residuais. Os solos de depósito de encosta foram classificados como residuais pelas suas características pedológicas.

O intuito inicial era, havendo sido determinadas as unidades geotécnicas, caracterizá-las com base na base de dados SPT, gerando-se cartas de aptidão para cada solo, estimando-se o comportamento geomecânico nas áreas ainda não ocupadas delas, ou seja, nas áreas em que poderia haver crescimento urbano. Infelizmente, essa proposta restou frustrada, em virtude da falta de homogeneidade dos dados. Por outro lado, foi possível produzir cartas de aptidão para toda a área avaliada, descrita como zona de expansão urbana, e correlacioná-las ao mapeamento geotécnico, sendo possível, portanto, compreender a geotecnia da região, tendo como base as cartas geradas e a base de dados associada.

Separando-se as unidades geotécnicas em sedimentares e residuais, observou-se que os solos sedimentares apresentam baixa resistência e em quase sua totalidade inadequabilidade para execução de fundações rasas. Nesses mesmos tipos de solos, analisando-se as fundações

profundas, o comprimento estimado foi considerado bastante elevado, atingindo 34m em algumas regiões. Há de se observar ainda limitações executivas em virtude do nível elevado do lençol freático, quase sempre menor que 2m.

Estacas pré-moldadas poderiam ser preferencialmente utilizadas, podendo se fazer uso das centrifugadas no caso de carregamentos maiores, devendo-se observar, no entanto, o impacto de vibrações na vizinhança.

A fundação do tipo Hélice-contínua seria uma escolha bastante usual para essas características, mas a associação de solos moles com o nível d'água tão próximo à superfície poderia demandar soluções mais específicas, como o uso de lama bentonítica para melhorar o sobre consumo de concreto e garantir a integridade e continuidade do fuste. Em relação à vizinhança, seria a solução com menor impacto.

Estacas tipo raiz dificilmente se enquadrariam como melhor escolha para esse tipo de solos, a não ser em casos de uso peculiar, como reforços de fundações, presença de matacões ou algo do tipo.

Para os solos residuais o uso de sapatas já aparece como possível em alguns pequenos segmentos logo no primeiro metro, principalmente nas cotas mais altas dos bairros Forquilhas, Potecas, Fazenda Santo Antônio e Ponta de Baixo, com tensões admissíveis acima de 300kPa. Com o avanço da profundidade, ocorre um *offset* desses polígonos de maneira que, em até 4m, quase toda a área de expansão urbana de solos residuais poderia utilizar-se de fundações superficiais. O NA apresenta uma variação um pouco maior, indo de quase superficial na região de Forquilhas a mais mediano, entre 4m e 6m, nas demais localidades.

Para maiores carregamentos os três tipos de estacas poderiam vir a atender às necessidades de projeto, com ressalvas às pré-moldadas, principalmente em virtude das possíveis quebras no encontro de solos mais resistentes ou, ainda, com maior quantidade de fragmentos da rocha de origem, acarretando um maior número de emendas que o ideal e gerando certa vulnerabilidade no elemento.

Em relação às superfícies estimadas do lençol freático, cabe citar que foram produzidas com base em laudos de sondagem de diferentes épocas do ano, sendo a sazonalidade o maior erro embutido. Por outro lado, apesar de todos os dados haverem sido catalogados com data, o aumento desse erro devido à baixa densidade de pontos, no caso em que fossem elaboradas superfícies para diferentes épocas do ano, não justificaria o desagrupamento deles.

Pode-se considerar que houve validação dos dados obtidos, com base na compatibilização das análises qualitativa e quantitativa. Em análise comparativa da evolução

da mancha urbana com o mapa geotécnico, observa-se que a projeção segue dentro das unidades GX-sq e PVA-gn, m. Com essa informação, associada às cartas de aptidão, pode-se validar os resultados e orientar estudos futuros para desenvolvimento de diretrizes de crescimento e reordenamento urbano.

Cabe ressaltar que o estudo desenvolvido não leva em consideração o plano diretor vigente, nem delimitações impostas pelo zoneamento, sendo o objetivo das cartas elaboradas, portanto, fornecer critérios puramente técnicos que auxiliem no planejamento urbano e Municipal.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Faz-se as seguintes sugestões para melhoria e aprofundamento dessa dissertação:

- Aumentar a base de dados com a coleta de laudos em locais estratégicos, que melhorem a homogeneização de distribuição dos pontos;
- Acrescentar à base de dados as informações referentes à caracterização do solo, possibilitando a simulação de fundações superficiais e profundas por métodos específicos para cada tipo de solo;
- Elaborar base de dados específica para a unidade GX-sq, adquirindo-se ensaios mais sensíveis para solos sedimentares, como o CPT;
- Melhorar a escala do mapa geotécnico, através da análise cruzada dos laudos de sondagem e MDT;
- Considerar a sazonalidade de períodos secos e de chuvas para elaboração da superfície estimada do lençol freático, com o refinamento da base de dados;
- Realizar análises geoestatísticas por unidade geotécnica, considerando-se o refinamento da base de dados, a fim de melhorar a caracterização geotécnica de cada unidade;
- Realizar análises geoestatísticas tridimensionais, proporcionando a avaliação de perfis estratigráficos simulados;
- Substituir a krigagem por simulações estocásticas, que permitem, segundo Landim (2006), infinitas realizações de mapas, cada qual com aproximadamente o mesmo semivariograma e a mesma variância que os dados originais. Teoricamente a média de um grande número de mapas simulados deve fornecer resultados mais reais e, conseqüentemente, mais confiáveis para predições.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6484 – **Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ, 2001.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6484 – **Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ, 2020.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6502 – **Rochas e Solos**. Rio de Janeiro, RJ, 1995.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6122 – **Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, RJ, 2019.
- ALTUN, S., GÖKTEPE, A.B. & SEZER, A. **Geostatistical interpolation for modelling SPT data in northern Izmir**. *Sadhana* 38, 1451–1468 (2013). <https://doi.org/10.1007/s12046-013-0183-8>.
- ANDRADE, A.R. **Caracterização dos elementos de fundações aplicáveis em edificações na região de Florianópolis**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2003, 143p.
- AOKI, N. **Novo conceito de carga admissível de fundação baseado em probabilidade de ruína**. Simpósio de Prática de Engenharia Geotécnica da Região Sul. ABMS. Porto Alegre, RS, 2002.
- AOKI, N. e CINTRA, J.C.A. **Influência da variabilidade do maciço de solos no comprimento de estacas**. Seminário de Engenharia de Fundações Especiais e Geotecnia. ABMS/ABEF, v1, 1996.
- AOKI, N. MENEGOTTO, M.L. e CINTRA, J.C.A. **Probabilidade de ruína como critério para definir o coeficiente de segurança a ser usado na previsão da carga admissível de fundações por estacas**. Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 12, 2002, São Paulo. Anais, 2002. v. 3. p. 1471-1481.
- BASTOS, G. **Estruturação de banco de dados a partir do mapeamento geotécnico aplicado à região de Ribeirão Preto (SP)**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, SP, 2005, 306p.
- BERBERIAN, D. **Engenharia de fundações**. Editora da UnB. Brasília, 1975, 700p.

- BORTOLUZZI, S.D. **Caracterização das funções e padrões de uso e ocupação do solo no Centro de Florianópolis**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2004, 174p.
- BUDHU, M. **Fundações e estruturas de contenção**. Editora LTC. Rio de Janeiro, RJ, 2013, 427p.
- BRANCO, P.deM. **O geólogo e a geologia**. Disponível em <<http://www.cprm.gov.br/publique/Redes-Institucionais/Rede-de-Bibliotecas---Rede-Ametista/Canal-Escola/O-Geologo-e-a-Geologia-1116.html>>. Acesso em 09 de maio de 2019.
- CABALLERO, D. D. R e ÁNGELES, J. P. **Compendio de geologia general**. EDUNI, Lima, Peru, 2008.
- CINTRA, J.C.A. *et al.* **Fundações diretas: Projeto geotécnico**. Oficina de Textos. São Paulo, SP, 2011, 140p.
- DA SILVA, D.A. **Técnicas de construção civil I**. Notas de Aula. Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2003, 119p.
- DAVISON DIAS, R. **Aplicação de pedologia e geotecnia no projeto de fundações de linhas de transmissão**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 1987, 349p.
- DE MIRANDA, J.G. **Mapeamento geotécnico e estudo de suscetibilidade à erosão na bacia do Ribeirão Ponte de Pedra (MT), escala: 1:100.000**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, SP, 2005, 278p.
- Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER. **Mapeamento geológico-geotécnico de obras viárias**. DNER – PRO 014/1995.
- DOMINGUES, C.V. **Aplicação de geoprocessamento no processo de modernização da gestão municipal**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Faculdade Estadual de Campinas. Campinas, SP, 2005, 88p.
- DOS SANTOS, H.G. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Embrapa. Brasília, DF, 2013, 353p.
- DOS SANTOS, V.C. **Classificação de vazios urbanos utilizando S.I.G. como apoio ao Planejamento e gestão urbanos e à implementação do estatuto da Cidade. Estudo de caso: município de São José – SC**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2004, 188p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412 p.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento 46. **Solos do estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro, 2004. 721 p.

Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI. **Mapoteca Digital**. Disponível em <<http://ciram.epagri.sc.gov.br/mapoteca/>>.

ESRI. **ESRI Shapefile Technical Description**. An ESRI White Paper. Redlands, Califórnia, 1998.

FOLLE, D. **Análise e aplicações da geostatística no contexto geológico-geotécnico urbano**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Minas, Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, 2009, 212p.

FONTELES, H.R.N. **Caracterização geotécnica do subsolo da porção nordeste do município de Fortaleza (CE) com base em Geostatística**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia de São Carlos. São Paulo, SP, 2003, 135p.

GUIA SIG. Disponível em: <<http://www.guiasig.com.br/arcgis.html>>. Acesso em 13 de outubro de 2011.

GODOI, C.S. **Caracterização geomecânica de um solo residual de gnaiss – Santo Amaro da Imperatriz, Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2014, 212p.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation**. Oxford University Press. New York, 1997, 483p.

HIGASHI, R.A.R. **Utilização de um SIG no desenvolvimento de um banco de dados geotécnico do norte do estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Infraestrutura Viária. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2002, 198p.

HIGASHI, R.A.R. **Metodologia de uso e ocupação dos solos de cidades costeiras brasileiras através de SIG com base no comportamento geotécnico e ambiental**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2006, 486p.

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Disponível em: <www.inpe.com.br>. Acesso em 12 de junho de 2021.

International Association of Engineering Geology – IAEG. **Engineering geological maps: A guide to their preparation**. Paris, Unesco, 1976, 79p.

KER, J.C. *et al.* **Pedologia: fundamentos**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, MG, 2012, 343p.

KRING, K., CHATTERJEE, S. **Uncertainty quantification of structural and geotechnical parameter by geostatistical simulations applied to a stability analysis case study with limited exploration data**. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Volume 125, 2020, 104157, ISSN 1365-1609, <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2019.104157>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1365160918312474>).

LANDIM, P.M.B. **Sobre Geoestatística e mapas**. Terrae Didatica, 2(1):19-33, 2006.

LOCKS, G. **Estudo de sondagem com a utilização do SIG**. Trabalho de Conclusão de Curso. Graduação em Engenharia Civil na Universidade do Sul de Santa Catarina. Tubarão, SC, 2008, 69p.

LONGLEY, P.A. *et al.* **Sistemas e ciência da informação geográfica**. 3. Ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

MACIEL JÚNIOR, C.L. e NUMMER, A.V. **Introdução à geologia de engenharia**. Editora UFSM. Santa Maria, RS, 2011, 456p.

MAFRA JÚNIOR, C.S. **Elaboração de um mapa preliminar de unidades geotécnicas do município de Brusque associado a um banco de dados geotécnico em ambiente SIG**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2007, 122p.

MAY, M.A.C. **Utilização de dados setorizados do uso do solo e da infraestrutura urbana**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2008.

MORAES, M.C. **Estruturas de fundações**. Editora McGraw-Hill do Brasil. São Paulo, SP, 1976, 264p.

NASSEH, S., HAFEZI MOGHADDAS, N., GHAFUORI, M. *et al.* **Investigation of spatial variability of SPT data in Mashhad City (NE Iran) using a geostatistical approach**. Bull Eng Geol Environ 77, 441–455 (2018). <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1136-y>.

OLIVEIRA FILHO, U.M. **Fundações profundas**. D.C. Luzzatto Editores Ltda. Segunda Ed. Porto Alegre, RS, 1985, 267p.

PATIAS, J. **Zoneamento geotécnico com base em krigagem ordinária e equações multiquádricas: barragem de Itaipu.** Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 2010.

PMSJ. **São José em Dados.** Prefeitura Municipal de São José. Disponível em <https://saojose.sc.gov.br/sao-jose-em-dados/>. Acesso em julho/2021.

REGINATTO, G.M.P. **Caracterização de movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Cunha, Rio dos Cedros – SC, com ênfase em escorregamentos translacionais.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2013, 219p.

RAMOS JÚNIOR, J.R. **Mapas digitais referentes ao município de São José.** PMSJ, São José, SC, 2011.

ROGÉRIO, L.C.W. **Expansão urbana – Estudo de caso: Loteamento Anna Clara, São José/SC.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2009, 114p.

SANTO, S.M.E. **Evolução da ocupação do solo nos manguezais do município de Palhoça utilizando técnicas de Sensoriamento Remoto.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2004, 69p.

SANTOS, G.T. **Integração de informações pedológicas, geológicas e geotécnicas aplicadas ao uso do solo urbano em obras de engenharia.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, RS, 1997, 209p.

SANTOS, J.V.dos. **Aplicação de SIG para análise do perfil geológico geotécnico do campus sede da UFSC e elaboração de cartas de aptidão para fundações utilizando sondagem SPT.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2016, 200p.

SBROGLIA, R.M. **Mapeamento geotécnico e das áreas suscetíveis a Deslizamentos na microbacia do ribeirão baú, ilhota/sc.** Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2015, 187p.

SBROGLIA, R.M. e SÁNCHEZ, G.M. **Elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais no município de São José, estado de Santa Catarina.** Relatório Final do Projeto do Departamento de Geociências da Universidade Federal de Santa Catarina. Ministério das Cidades. Florianópolis, SC, 2017, 93p.

- SILVA, A.B. **Sistemas de Informações Georreferenciadas: Conceitos e fundamentos**. Editora da Unicamp. Campinas, SP, 1999.
- THIESEN, S. **Aplicação de ferramenta SIG para mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundação a partir de ensaios SPT: Um estudo de caso em Blumenau/SC**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2016, 207p.
- TROCADO, P. **ArcGis 9**. Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa. Lisboa, Portugal, aprox. 2008, 74p.
- VARGAS, M. **Introdução à Mecânica dos Solos**. Editora McGraw-Hill do Brasil. São Paulo, SP, 1978, 509p.
- VIERO, A.C. **Geodiversidade do estado de Santa Catarina**. CPRM. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade. Porto Alegre, RS, 2016, 155p.
- YAMAMOTO, J.K. **An Alternative Measure of the Reliability of Ordinary Kriging Estimates**. *Mathematical Geology* 32, 489–509 (2000).
<https://doi.org/10.1023/A:1007577916868>
- YAMAMOTO, J.K. **Estatística, análise e interpolação de dados geoespaciais**. Gráfica Paulos. São Paulo, SP, 2020, 308p.
- YAMAMOTO, J.K. **Geoestatística: conceitos + aplicações**. Oficina de Textos. São Paulo, SP, 2013, 215p.
- ZUQUETE, L.V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras**. Tese de Doutorado em Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP, 1987, 657p.
- ZUQUETE, L.V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio-físico: Fundamentos e guia para elaboração**. Tese de Livre Docência. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, SP, 1993, 388p.
- ZUQUETE, L.V. *et al.* **Mapeamento geotécnico: Parte 1 – atributos e procedimentos básicos para elaboração de mapas e cartas**. Geociência. São Paulo, SP, 1997.