UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ESTRUTURAÇÃO DE BANCO DE DADOS GEOTÉCNICO PARA ELABORAÇÃO DE CARTAS GEOTÉCNICAS E CARTAS DE APTIDÃO A FUNDAÇÕES EM PALMAS/TO

GUILHERME ALVES MORAIS

ORIENTADOR:NEWTON MOREIRA DE SOUZA

CO-ORIENTADOR: BRUNO RODRIGUES DE OLIVEIRA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM GEOTECNIA

PUBLICAÇÃO: G.DM-440/2026

BRASÍLIA/DF: JULHO/2026

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

ESTRUTURAÇÃO DE BANCO DE DADOS GEOTÉCNICO PARA ELABORAÇÃO DE CARTAS GEOTÉCNICAS E CARTAS DE APTIDÃO A FUNDAÇÕES EM PALMAS/TO

GUILHERME ALVES MORAIS

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM GEOTECNIA.

APROVADA POR:

_____

NEWTON MOREIRA DE SOUZA (UnB)

(ORIENTADOR)

_____

BRUNO RODRIGUES DE OLIVEIRA (UFMT)

(CO-ORIENTADOR)

_____

RENATO PINTO DA CUNHA (UnB)

(EXAMINADOR INTERNO)

_____

BRUNO CARRILHO DE CASTRO (UFT)

(EXAMINADOR EXTERNO)

BRASÍLIA/DF: JULHO/2026

FICHA CATALOGRÁFICA

MORAIS, GUILHERME ALVES	
Estruturação de Banco de Dados Geotécnico para Elaboração de Cartas Geotécnicas e Cartas de Aptidão a Fundações em Palmas/TO.	
xix, 209 p., 297mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Geotecnia, 2026)	
Dissertação de Mestrado – Universidade de Brasília.	
Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental	
1. Banco de dados Geotécnicos (BDG)	2. Sistema de informação geográfica (SIG)
3. Investigação Geotécnica	4. Cartas de aptidão à fundação
I. ENC/FT/UnB	II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MORAIS, G. A. (2026). ESTRUTURAÇÃO DE BANCO DE DADOS GEOTÉCNICO PARA ELABORAÇÃO DE CARTAS GEOTÉCNICAS E CARTAS DE APTIDÃO A FUNDAÇÕES EM PALMAS/TO. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-440/2026, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 209 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Guilherme Alves Morais

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: ESTRUTURAÇÃO DE BANCO DE DADOS GEOTÉCNICO PARA ELABORAÇÃO DE CARTAS GEOTÉCNICAS E CARTAS DE APTIDÃO A FUNDAÇÕES EM PALMAS/TO

GRAU / ANO: Mestre / 2026

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

Guilherme Alves Morais

Quadra ARSE 33 (308 Sul), Av. LO-07, Lote HM1.1R, Apartamento 604, Araras Residence

CEP: 77.021-054, Palmas/TO - Brasil

DEDICATÓRIA

À minha amada esposa Larissa e a nossa

filha Liz, que está a caminho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, meu senhor e salvador.

À mulher da minha vida, Larissa, por todo apoio durante essa jornada, pela compreensão nos momentos difíceis e por ser meu maior suporte.

Aos meus pais, por todos os ensinamentos.

Aos meus familiares, pelo apoio e incentivo.

A todos da Técnica Engenharia, pelas ajudas e adaptações na rotina de trabalho necessárias para viabilizar a conclusão dessa etapa importante da minha vida.

Ao professor Newton Moreira de Souza meu orientador, por todas as discussões e contribuições durante à pesquisa.

Ao professor Bruno Rodrigues de Oliveira, meu co-orientador, por toda a contribuição durante a execução desse trabalho.

A todos os demais professores do Programa de Pós-graduação em Geotecnia da UnB, pelos conhecimentos transmitidos durante as disciplinas e pelas discussões que tanto contribuíram para meu amadurecimento técnico e profissional durante o período do mestrado.

A todos amigos que fiz na UnB durante o meu período no programa.

À banca examinadora, pelas contribuições significativas para essa pesquisa.

RESUMO

A investigação geotécnica constitui etapa fundamental para o planejamento de obras urbanas e para a definição preliminar de soluções de fundação. Entretanto, em muitos municípios, os dados provenientes de sondagens permanecem dispersos em relatórios técnicos, com limitada integração espacial e baixa utilização em análises regionais. Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo estruturar um Banco de Dados Geotécnico (BDG) georreferenciado e elaborar cartas geotécnicas e cartas de aptidão a fundações para a área urbana de Palmas/TO, a partir de dados de sondagens SPT e mistas, técnicas geoestatísticas e ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Foram organizadas, padronizadas e analisadas informações de 2.519 sondagens, integradas a bases cartográficas, geológicas, hidrológicas e altimétricas. A partir desses dados, foram elaboradas cartas de profundidade e cota do impenetrável ao SPT, profundidade e cota do nível de água, valores de N_{SPT} por camada e predominância da textura de solo ao longo do perfil geotécnico. As variáveis contínuas foram modeladas predominantemente por krigagem ordinária, com avaliação por validação cruzada, sendo que a predominância da textura de solo foi representada por abordagem probabilística baseada em variáveis indicadoras. Posteriormente, as cartas geotécnicas foram integradas por meio de critérios geotécnicos e executivos para elaboração de cartas orientativas de fundações superficiais e profundas, cartas de aptidão à execução de estacas escavadas mecanizadas sem fluido estabilizante e estacas hélice contínua monitorada, além de cartas de comprimento máximo estimado para essas tipologias. Os resultados indicaram coerência espacial entre os produtos gerados e as condições geológico-geotécnicas da área de estudo. As cartas de aptidão indicaram que o nível de água constitui o principal fator restritivo para estacas escavadas sem fluido estabilizante, enquanto as estacas hélice contínua monitorada apresentaram maior favorabilidade executiva em grande parte da área analisada. A validação qualitativa com casos reais de fundações executadas em Palmas demonstrou coerência entre os produtos cartográficos elaborados e as soluções adotadas em campo, reforçando que o impenetrável ao SPT deve ser interpretado como indicador de dificuldade executiva, e não necessariamente como impedimento absoluto à execução de fundações profundas. Conclui-se que a metodologia proposta apresenta potencial para apoiar o planejamento geotécnico preliminar, a interpretação regional do subsolo e o direcionamento de investigações futuras, ressaltando-se que as cartas produzidas possuem caráter orientativo e não substituem estudos geotécnicos específicos em nível de projeto executivo.

ABSTRACT

Geotechnical investigation is a fundamental stage in the planning of urban works and in the preliminary definition of foundation solutions. However, in many municipalities, data obtained from subsurface investigations remain dispersed in technical reports, with limited spatial integration and restricted use in regional analyses. In this context, this study aimed to develop a georeferenced Geotechnical Database (GDB) and produce geotechnical maps and foundation suitability maps for the urban area of Palmas, Tocantins, Brazil, using data from SPT and mixed boreholes, geostatistical techniques, and Geographic Information System (GIS) tools. Information from 2,519 boreholes was organized, standardized, and analyzed, and integrated with cartographic, geological, hydrological, and altimetric databases. Based on these data, maps were produced for SPT refusal depth and elevation, groundwater level depth and elevation, layer-by-layer NSPT values, and predominant soil texture along the geotechnical profile. Continuous variables were predominantly modeled using ordinary kriging with cross-validation, while the predominance of soil texture was represented using a probabilistic approach based on indicator variables. Subsequently, the geotechnical maps were integrated using geotechnical and construction-related criteria to develop guidance maps for shallow and deep foundations, suitability maps for the execution of mechanically excavated piles without stabilizing fluid and continuous flight auger piles, as well as maps of estimated maximum pile length for these foundation types. The results indicated spatial coherence between the generated products and the geological-geotechnical conditions of the study area. The suitability maps showed that the groundwater level is the main restrictive factor for mechanically excavated piles without stabilizing fluid, whereas continuous flight auger piles presented greater construction suitability in a large portion of the analyzed area. The qualitative validation using real cases of foundations executed in Palmas demonstrated consistency between the cartographic products developed and the solutions adopted in the field, reinforcing that SPT refusal should be interpreted as an indicator of construction difficulty, and not necessarily as an absolute impediment to the execution of deep foundations. It is concluded that the proposed methodology has the potential to support preliminary geotechnical planning, regional interpretation of subsurface conditions, and the guidance of future investigations, emphasizing that the maps produced are intended as guidance tools and do not replace site-specific geotechnical studies at the detailed design stage.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 1
1.1. Objetivo 3
1.1.1. Objetivos específicos 3
1.2. Estrutura da dissertação 4
2. REVISÃO DE LITERATURA 6
2.1. Área de estudo 6
2.2. Classificação e caracterização dos solos 10
2.2.1. Classificação geológica 11
2.2.2. Classificação pedológica 12
2.2.3. Classificação geotécnica 16
2.3. Investigação geotécnica 20
2.3.1. Sondagem a percussão 21
2.3.2. Sondagem rotativa e mista 26
2.3.3. Parâmetros e correlações 30
2.4. Fundações 32
2.5. Banco de dados e SIG 35
2.6. Cartografia geotécnica 36
2.6.1. Panorama dos trabalhos de cartografia geotécnica nacionais e internacionais 37
2.6.2. Escala de trabalho 39
2.7. Estatística e métodos de interpolação 41
2.7.1. Estatística Descritiva 42
2.7.2. Krigagem 43
2.7.3. Inverso ponderado da distância 46
2.7.4. Rede Triangular Irregular e Topo To Raster 47
3. METODOLOGIA 49

3.1. Estrutura da metodologia 49
3.2. Aquisição e tratamento dos dados 51
3.2.1. Aquisição de dados 51
3.2.2. Estruturação do banco de dados geotécnico (BDG) 52
3.3. Processamento dos dados em ambiente SIG 54
3.3.1. Georreferenciamento dos dados 54
3.3.2. Delimitação da área de estudo e compartimentação para análises geoestatísticas 55
3.3.2.1. Delimitação da área de estudo 55
3.3.2.2. Compartimentação geológica da área de estudo 57
3.3.2.3. Compartimentação por densidade amostral 59
3.3.3. Definição da escala 61
3.3.4. Elaboração de bases cartográficas e produtos derivados do MDE 67
3.3.4.1. Bases cartográficas auxiliares 67
3.3.4.2. Modelo digital de elevação (MDE) 69
3.3.4.3. Hipsometria, declividade e orientação de vertente 71
3.4. Elaboração das cartas geotécnicas derivadas das sondagens 74
3.4.1. Cartas da profundidade e cota do impenetrável SPT 75
3.4.2. Cartas da profundidade e cota do lençol freático 77
3.4.3. Cartas do índice de resistência à penetração (NSPT) por camada 79
3.4.4. Cartas da textura de solo predominante por camada 80
3.5. Elaboração das cartas de aptidão à fundação 83
3.5.1. Cartas de orientação à fundação: superficial ou profunda 84
3.5.2. Cartas de aptidão à estaca escavada mecanicamente sem fluido estabilizante 87
3.5.3. Cartas de aptidão à estaca hélice contínua monitorada 91
3.5.4. Cartas de comprimento máximo de estacas 93
3.6. Validação dos resultados 95
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 97

4.1. Cartas Geotécnicas 97
4.1.1. Impenetrável SPT 97
4.1.1.1. Análise estatística dos dados 97
4.1.1.2. Modelagem geoestatística e validação cruzada 99
4.1.1.3. Resultado espacial 100
4.1.2. Nível de água 104
4.1.2.1. Análise estatística dos dados 104
4.1.2.2. Inserção de condicionantes hidrológicos e definição da profundidade 106
4.1.2.3. Modelagem geoestatística e validação cruzada 107
4.1.2.4. Comparação entre abordagens de modelagem 109
4.1.2.5. Resultado espacial 112
4.1.3. Índice de resistência à penetração 116
4.1.3.1. Análise estatística dos dados no perfil 116
4.1.3.2. Definição da abordagem geoestatítica 119
4.1.3.3. Remoção espacial no domínio aluvionar 121
4.1.3.4. Modelagem geoestatística e validação cruzada 124
4.1.3.5. Resultado espacial 127
4.1.4. Predominância da textura de solo 135
4.1.4.1. Comparação entre abordagens metodológicas 135
4.1.4.2. Análise da confiabilidade espacial da classificação 138
4.1.4.3. Resultado espacial 140
4.2. Cartas de aptidão à fundação 148
4.2.1. Critérios geotécnicos e executivos adotados 148
4.2.2. Orientação para fundação superficial e fundação profunda 153
4.2.3. Estacas escavadas mecanizadas sem fluido estabilizante 155
4.2.3.1. Comparação entre análise booleana e com pesos 155
4.2.3.2. Resultado espacial 157

4.2.4. Estacas Hélice contínua monitorada 161
4.2.4.1. Comparação entre análise booleana e com pesos 161
4.2.4.2. Resultado espacial 163
4.2.5. Comprimento máximo de estacas 167
4.2.5.1. Resultado espacial 168
4.2.6. Validação com casos reais 171
4.2.6.1. Casos de fundação superficial 174
4.2.6.2. Casos de fundação em estaca escavada 176
4.2.6.3. Casos de fundação em estaca hélice contínua 178
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES 181
REFERÊNCIAS 184

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Mapa de localização da área de estudo..... 6
Figura 2.2 - Mapa Geológico da região metropolitana de Palmas/TO (modificado - Sachs, Araújo e Godoy 2020)..... 8
Figura 2.3 - Histograma mensal da precipitação pluviométrica em Palmas/TO (Marcuzzo & Goularte, 2013)..... 9
Figura 2.4 - Representação esquemática dos principais horizontes pedológicos de um perfil de solo (Modificado - Lepsch, 2010)..... 13
Figura 2.5 - Triângulo de grupamentos de classes de textura (Embrapa, 2025). 17
Figura 2.6 – Relatório de ensaio de limite de liquidez e plasticidade. 18
Figura 2.7 - Execução de sondagens à percussão (SPT) no sistema manual. 22
Figura 2.8 - Coleta de amostras e anotações de campo do ensaio SPT..... 24
Figura 2.9 - Laudo de sondagem SPT 26
Figura 2.10 - Equipamento utilizado na execução de sondagens mistas 27
Figura 2.11 - Exemplos de materiais recuperados em sondagens mistas: (a) amostras de solo e pedregulho; (b) testemunhos de material rochoso recuperados por perfuração rotativa..... 28
Figura 2.12 - Laudo de sondagem mista 29
Figura 2.13 - Procedimento executivo de estaca escavada mecanicamente sem fluido estabilizante (modificado – Araujo *et al*., 2018)..... 34
Figura 2.14 - Procedimento executivo de estaca hélice contínua monitorada (modificado – Educa Civil, 2020)..... 35
Figura 2.15 – Propriedades um típico variograma (Landim, 2010)..... 44
Figura 3.1 - Fluxograma da abordagem metodológica aplicada no presente trabalho..... 50
Figura 3.2 - Recorte do banco de dados geotécnico (BDG) elaborado para a pesquisa. 53
Figura 3.3 - Delimitação da área de estudo em relação ao Plano Diretor Municipal..... 56
Figura 3.4 - Distribuição das unidades geológicas na área de estudo. 58
Figura 3.5 - Compartimentação da área de estudo para análise das camadas profundas. 60
Figura 3.6 - Análise da cobertura espacial para total da área de estudo. 63
Figura 3.7 - Análise da cobertura espacial das camadas profundas na região norte-central. ... 66
Figura 3.8 - Bases cartográficas auxiliares utilizadas nesta pesquisa. 68
Figura 3.9 - Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo. 70
Figura 3.10 - Hipsometria da área de estudo. 71
Figura 3.11 - Declividade e orientação de vertente da área de estudo. 72

Figura 3.12 - Fluxograma das cartas de orientação ao tipo de fundação (superficial ou profunda). 85
Figura 3.13 - Fluxograma das cartas de aptidão a fundações em estacas escavadas. 88
Figura 3.14 - Fluxograma das cartas de aptidão a fundações em estacas hélice contínua. 91
Figura 3.15 - Fluxograma das cartas de comprimento máximo de estacas. 94
Figura 3.16 - Recorte do banco de dados utilizado na validação dos resultados. 96
Figura 4.1 - Histograma da profundidade do impenetrável (conjunto total de dados)..... 98
Figura 4.2 - Histogramas da profundidade do impenetrável nos domínios (a) não aluvionar e (b) aluvionar 98
Figura 4.3 - Avaliação do modelo geoestatístico da profundidade do impenetrável: (a) semivariograma experimental e modelo ajustado; (b) valores observados versus estimados; (c) gráfico quantil-quantil dos erros padronizados. 100
Figura 4.4 - Carta da Profundidade do impenetrável SPT. 102
Figura 4.5 - Carta da Cota do impenetrável SPT da área de estudo. 103
Figura 4.6 - Histogramas da (a) profundidade e da (b) cota do nível de água para o conjunto total de dados..... 105
Figura 4.7 - Histogramas da profundidade do nível de água (a) no período seco e (b) no período úmido. 106
Figura 4.8 - Avaliação do modelo geoestatístico da cota do lençol freático: (a) semivariograma experimental e modelo ajustado; (b) valores observados versus estimados; (c) gráfico quantil-quantil dos erros padronizados. 108
Figura 4.9 - Comparação entre abordagens para definição da profundidade do N.A. 109
Figura 4.10 - Comparação entre abordagens para definição da cota do N.A. 111
Figura 4.11 - Carta de profundidade do lençol freático. 113
Figura 4.12 - Carta da cota do lençol freático. 114
Figura 4.13 - Histogramas do NSPT (1-2 m, 5-6 m, 10-11 m e 15-16m) com e sem restrição de registros com 50 golpes. 117
Figura 4.14 - Histogramas do NSPT por domínio geológico (1-2 m, 5-6 m e 10-11). 119
Figura 4.15 - Distribuição espacial dos pontos do domínio aluvionar e critérios de remoção espacial adotados para avaliação da conectividade espacial do conjunto amostral. 123
Figura 4.16 - Semivariogramas representativos da modelagem segmentada por domínios para o NSPT na camada de 3-4m. 125
Figura 4.17 - Semivariograma representativo da modelagem integrada para o NSPT na camada de 15-16m. 126

Figura 4.18 - Carta de NSPT da camada de 1-2m. 128
Figura 4.19 - Carta de NSPT da camada de 2-3m. 129
Figura 4.20 - Carta de NSPT da camada de 3-4m. 130
Figura 4.21 - Carta de NSPT da camada de 5-6m. 131
Figura 4.22 - Carta de NSPT da camada de 10-11m. 132
Figura 4.23 - Cartas de NSPT das camadas profundas (15-16 m e 20-21 m). 134
Figura 4.24 - Comparação entre os resultados obtidos para camada de 2-3m pelas abordagens de aplicação direta da krigagem ordinária, interpolação por IDW e abordagem probabilística baseada em variáveis indicadoras. 136
Figura 4.25 - Mapas de confiabilidade espacial da predominância do tipo de solo para as camadas de 1-2 m e 10-11 m. 138
Figura 4.26 - Mapas de confiabilidade espacial da classificação textural para as camadas de 15-16 m e 20-21m. 139
Figura 4.27 - Carta de material predominante para a camadas de 1-2 m. 141
Figura 4.28 - Carta de material predominante para a camadas de 2-3 m. 142
Figura 4.29 - Carta de material predominante para a camadas de 3-4 m. 143
Figura 4.30 - Carta de material predominante para a camadas de 5-6 m. 144
Figura 4.31 - Carta de material predominante para a camadas de 10-11 m. 145
Figura 4.32 - Cartas de material predominante para as camadas profundas (15-16 m e 20-21 m). 147
Figura 4.33 - Exemplo de execução de estaca hélice contínua monitorada em profundidade superior ao impenetrável identificado na sondagem SPT em setor aluvionar da Orla da Graciosa. 150
Figura 4.34 - Exemplo de execução de estaca hélice contínua monitorada em profundidade superior ao impenetrável identificado na sondagem SPT em setor associado à Formação Pimenteiras. 152
Figura 4.35 - Cartas orientativas para fundação superficial e fundação profunda para profundidades de assentamento de 1 m e 2 m. 154
Figura 4.36 - Comparação entre a abordagem booleana restritiva e a abordagem ponderada para aptidão à execução de estacas escavadas sem fluido estabilizante na camada de 10-11 m. .. 156
Figura 4.37 - Cartas de aptidão à execução de estacas escavadas sem fluido estabilizante para as camadas de 5-6 m e 10-11 m. 158
Figura 4.38 - Cartas de aptidão à execução de estacas escavadas sem fluido estabilizante para as camadas de 15-16 m e 20-21 m. 160

Figura 4.39 - Comparação entre a abordagem booleana restritiva e a abordagem ponderada para aptidão à execução de estacas hélice contínua monitorada na camada de 15-16 m..... 162
Figura 4.40 - Cartas de aptidão à execução de estacas hélice contínua monitorada para as camadas de 5-6 m e 10-11 m..... 164
Figura 4.41 - Cartas de aptidão à execução de estacas hélice contínua monitorada para as camadas de 15-16 m e 20-21 m..... 166
Figura 4.42 - Cartas de comprimento máximo estimado para estacas escavadas sem fluido estabilizante e estacas hélice contínua monitorada. 169
Figura 4.43 - Distribuição espacial dos casos reais de fundações utilizados na validação das cartas de aptidão, com destaque para a região central do Plano Diretor de Palmas..... 172
Figura 4.44 - Casos reais compatíveis com a aptidão à fundação superficial indicada pela carta. 174
Figura 4.45 - Fundações superficiais executadas em zona de transição entre aptidão à fundação superficial e direcionamento para fundação profunda. 175
Figura 4.46 - Profundidades executadas em estacas escavadas sobrepostas à carta de comprimento máximo estimado para a tipologia. 176
Figura 4.47 - Profundidades executadas em estacas hélice contínua sobrepostas à carta de comprimento máximo estimado para a tipologia. 179

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Critérios para atribuição de símbolos utilizando testes de laboratório (modificado - ASTM, 2017). 19
Tabela 2.2 - Orientações para registro dos golpes no ensaio SPT (Modificado – ABNT, 2020) 24
Tabela 2.3 - Estado de compacidade e consistência dos solos (Modificado - ABNT, 2020) .. 30
Tabela 2.4 - Valores limites de NSPT para a parada de estacas (modificado - Cintra & Aoki, 2010)..... 32
Tabela 2.5 - Trabalhos nacionais e internacionais de cartografia geotécnica 38
Tabela 2.6 - Densidade de amostragem no mapeamento geotécnico (modificado – Zuquete em 1993, citado por Thiesen, 2016)..... 40
Tabela 2.7 - Modelos teóricos de variogramas (modificado - Olea em 1999, citado por Yamamoto & Landim, 2013) 45
Tabela 3.1 - Distribuição das classes de declividade da área de estudo..... 73
Tabela 3.2 - Distribuição das classes de orientação de vertente da área de estudo..... 73
Tabela 4.1 - Parâmetros de modelagem e indicadores da validação cruzada do Impenetrável. 99
Tabela 4.2 - Parâmetros de modelagem e indicadores de validação cruzada para o nível de água. 107
Tabela 4.3 - Parâmetros de modelagem e validação cruzada do NSPT por camada..... 125
Tabela 4.4 - Áreas por classe de comprimento máximo estimado para estacas escavadas sem fluido estabilizante e estacas hélice contínua monitorada..... 170

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIAÇÕES

%	Porcentagem
ABGE	Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASE	Erro Padrão Médio (*Average Standard Error*)
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
BDG	Banco de Dados Geotécnico
BDGT	Banco de Dados Geotécnico Tridimensional
CBR	Índice de Suporte Califórnia (*California Bearing Ratio*)
cm	Centímetro(s)
CPT	Ensaio de Penetração de Cone (*Cone Penetration Test*)
CPRM	Serviço Geológico do Brasil
DF	Distrito Federal
EESC/USP	Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo
EPSG	*European Petroleum Survey Group*
Esri	*Environmental Systems Research Institute*
h	Hora(s)
HCM	Hélice Contínua Monitorada
IAEG	*International Association for Engineering Geology and the Environment*
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IDW	Inverso Ponderado da Distância (*Inverse Distance Weighted*)
IG/SP	Instituto Geológico de São Paulo
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IP	Índice de Plasticidade
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
km	Quilômetro(s)
km²	Quilômetro(s) quadrado(s)
kPa	Quilopascal

LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
m	Metro(s)
m²	Metro(s) quadrado(s)
mm	Milímetro(s)
min	Minuto(s)
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
N.A.	Nível de água
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NSPT	Índice de Resistência à Penetração do ensaio SPT
OCR	Razão de Sobreadensamento (*Overconsolidation Ratio*)
OSGeo	*Open Source Geospatial Foundation*
PH	Penetração com haste e amostrador, sem golpes
PM	Penetração com martelo, haste e amostrador, sem golpes
PUCE	*Pattern, Unity, Component, Evaluation*
QGIS	*Quantum Geographic Information System*
RMS	Raiz do erro quadrático médio (*Root Mean Square*)
RMSS	Raiz do erro quadrático médio padronizado (*Root Mean Square Standardized*)
RQD	Designação de Qualidade da Rocha (*Rock Quality Designation*)
RTI	Rede Triangular Irregular
SAD69	*South American Datum* 1969
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
SIRGAS 2000	Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas
SPT	Ensaio de Penetração Padrão (*Standard Penetration Test*)
SPRING	Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas
SUCS	Sistema Unificado de Classificação dos Solos

TIN	Rede Triangular Irregular (*Triangular Irregular Network*)
TO	Tocantins
UFT	Universidade Federal do Tocantins
UFMT	Universidade Federal de Mato Grosso
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
UnB	Universidade de Brasília
UNESP	Universidade Estadual Paulista
USP	Universidade de São Paulo
UTM	Universal Transversa de Mercator (*Universal Transverse Mercator*)
W	Bem graduado
WGS84	Sistema Geodésico Mundial de 1984 (*World Geodetic System 1984*)
ZERMOS	Zonas Expostas ao Movimento dos Solos

1. INTRODUÇÃO

A investigação geotécnica constitui etapa fundamental para o reconhecimento das condições do subsolo e para a definição de soluções seguras e economicamente adequadas em obras de engenharia. No caso de projetos de fundações, a NBR 6122 (ABNT, 2019) reforça a necessidade de caracterização do terreno como base para o dimensionamento e a execução dos elementos de fundação. Dentre os métodos de investigação mais utilizados no Brasil, destaca-se a sondagem de simples reconhecimento com ensaio SPT, amplamente empregada em função de sua simplicidade executiva, disponibilidade regional e aplicabilidade em correlações empíricas voltadas à prática de projetos geotécnicos.

Apesar da ampla realização de sondagens em áreas urbanas, as informações obtidas nesses ensaios frequentemente permanecem restritas aos empreendimentos para os quais foram contratadas. Em muitos municípios brasileiros, os dados geotécnicos disponíveis encontram-se dispersos em relatórios técnicos, sem padronização, sistematização ou integração espacial, o que limita sua utilização em análises regionais e em instrumentos de planejamento urbano. Essa realidade é evidenciada por Soares (2011) , ao destacar que os municípios brasileiros ainda apresentam experiências limitadas na estruturação e utilização de bancos de dados geotécnicos como instrumentos de gestão urbana. Nesse contexto, a estruturação de bancos de dados geotécnicos apresenta-se como alternativa relevante para transformar registros pontuais de investigação em informação espacial organizada, permitindo a análise da variabilidade do subsolo em escala urbana.

A integração entre bancos de dados geotécnicos e Sistemas de Informações Geográficas (SIG) amplia o potencial de utilização dessas informações, possibilitando o armazenamento, o tratamento, a espacialização e a interpretação de dados de sondagens em conjunto com bases cartográficas, geológicas, altimétricas e hidrológicas. Quando associadas a métodos de interpolação determinística ou geoestatística, essas ferramentas permitem elaborar cartas geotécnicas capazes de representar tendências regionais de parâmetros relevantes, como profundidade e cota do impenetrável ao SPT, profundidade e cota do nível de água, valores de N_{SPT} por camada e predominância da textura de solo.

A cartografia geotécnica constitui, nesse sentido, importante instrumento de apoio ao planejamento territorial e à engenharia urbana, pois permite sintetizar informações do meio físico em produtos cartográficos voltados à tomada de decisão. Trabalhos nacionais e internacionais têm demonstrado a aplicabilidade de dados de sondagens, técnicas de

interpolação e SIG para elaboração de cartas geotécnicas e cartas de aptidão voltadas a fundações, escavações, obras subterrâneas e planejamento urbano. No Brasil, estudos como os de Alves (2009), Silva (2011), Thiesen (2016), Santos (2016), Castro (2018), Oliveira (2018), Oliveira (2018), Ahualli (2019) e Almeida (2022) evidenciam a relevância desse tipo de abordagem para a compreensão espacial do comportamento geotécnico em diferentes contextos urbanos.

No município de Palmas/TO, a expansão urbana e o adensamento de determinadas regiões, especialmente em setores associados ao Plano Diretor, têm intensificado a demanda por soluções de fundação adequadas às condições locais do subsolo. A área de estudo abrange compartimentos geológicos distintos, destacando-se os depósitos aluvionares relacionados ao rio Tocantins e as áreas dominadas pelos sedimentos da Formação Pimenteiras. As diferenças entre esses ambientes refletem-se diretamente no comportamento geotécnico do subsolo, influenciando parâmetros como a profundidade do impenetrável ao SPT, a ocorrência do nível freático, os valores de N_{SPT} e a distribuição espacial dos materiais predominantes.

Em regiões próximas ao Lago de Palmas e aos principais cursos de água, a presença de lençol freático raso e de depósitos arenosos com seixos pode impor condicionantes significativos à execução de fundações. Nessas áreas, é comum a necessidade de adoção de fundações profundas. Entretanto, a interpretação direta de parâmetros como o impenetrável ao SPT e valores elevados de N_{SPT} exige cautela, uma vez que tais informações nem sempre representam impedimento absoluto à execução dessas fundações, podendo refletir diferentes graus de dificuldade executiva associados às características do subsolo e à capacidade operacional dos equipamentos empregados.

Dessa forma, a elaboração de cartas de aptidão à fundação demanda não apenas a espacialização dos parâmetros geotécnicos, mas também a definição de critérios que considerem simultaneamente aspectos técnicos, geológicos, relacionados ao nível freático e executivos. Em escala regional, essas cartas não substituem investigações geotécnicas específicas em nível de projeto, mas constituem ferramenta de apoio ao planejamento preliminar, permitindo identificar áreas mais favoráveis ou mais restritivas para diferentes soluções de fundação, orientar estudos futuros e subsidiar decisões iniciais em empreendimentos urbanos.

Nesse contexto, o presente trabalho propõe a estruturação de um Banco de Dados Geotécnico (BDG) a partir de sondagens SPT e mistas executadas na área urbana de

Palmas/TO, bem como sua integração a ferramentas SIG e técnicas geoestatísticas para elaboração de cartas geotécnicas e cartas de aptidão à fundação. A pesquisa contempla a modelagem espacial de variáveis geotécnicas relevantes, a avaliação de critérios de aptidão para fundações superficiais e profundas, a estimativa de comprimentos máximos executáveis para estacas escavadas e hélice contínua monitorada e a validação qualitativa dos resultados com base em casos reais de fundações executadas no município.

Assim, a contribuição principal deste estudo está na sistematização de um conjunto expressivo de dados geotécnicos e na sua transformação em produtos cartográficos aplicados à engenharia de fundações. Os resultados obtidos buscam contribuir para o conhecimento da variabilidade geotécnica da área urbana de Palmas, oferecendo subsídios ao planejamento de novos empreendimentos, à avaliação preliminar de soluções de fundação e ao desenvolvimento de futuras pesquisas em cartografia geotécnica urbana.

1.1. Objetivo

O principal objetivo deste trabalho é estruturar um Banco de Dados Geotécnico (BDG) georreferenciado e desenvolver cartas geotécnicas e cartas de aptidão à fundação para a área urbana de Palmas/TO, utilizando dados de sondagens SPT e mistas, técnicas geoestatísticas e ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), de modo a subsidiar o planejamento geotécnico preliminar e a avaliação regional de soluções de fundação.

1.1.1. Objetivos específicos

- Organizar, padronizar e estruturar um Banco de Dados Geotécnico (BDG) a partir de laudos de sondagens à percussão e sondagens mistas executadas na área urbana de Palmas/TO;
- Integrar os dados geotécnicos a bases cartográficas, geológicas, hidrológicas e altimétricas em ambiente SIG, assegurando consistência espacial entre as informações utilizadas;
- Elaborar cartas geotécnicas de profundidade e cota do impenetrável ao SPT, profundidade e cota do nível freático, valores de N_{SPT} por camada e textura de solo predominante ao longo do perfil geotécnico;

- Desenvolver cartas orientativas para avaliação preliminar da aptidão à adoção de fundações superficiais ou profundas, com base em critérios geotécnicos e técnico-econômicos;
- Elaborar cartas de aptidão executiva para estacas escavadas mecanizadas sem fluido estabilizante e estacas hélice contínua monitorada, com base em critérios geotécnicos e executivos;
- Estimar, em escala regional, faixas de comprimento máximo executável para estacas escavadas e estacas hélice contínua monitorada; e
- Validar qualitativamente os resultados obtidos por meio da comparação entre as cartas elaboradas e casos reais de fundações projetadas e/ou executadas na área de estudo.

1.2. Estrutura da dissertação

Esta dissertação está estruturada em cinco capítulos, além das referências bibliográficas, organizados de forma a apresentar progressivamente os fundamentos teóricos, os procedimentos metodológicos adotados, os resultados obtidos e as conclusões da pesquisa.

O Capítulo 1 apresenta a introdução do trabalho, contemplando a contextualização e justificativa do tema, os objetivos propostos e a estrutura geral da dissertação.

O Capítulo 2 reúne a revisão bibliográfica, abordando os principais conceitos relacionados à cartografia geotécnica, aos bancos de dados geotécnicos, aos Sistemas de Informações Geográficas (SIG), aos métodos estatísticos e geoestatísticos aplicados à espacialização de dados geotécnicos, bem como aspectos associados à investigação do subsolo e às fundações. Esse capítulo fornece o embasamento teórico necessário para o desenvolvimento da pesquisa e para a interpretação dos resultados obtidos.

O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos empregados na pesquisa. Inicialmente, são apresentados a área de estudo e os dados utilizados na estruturação do Banco de Dados Geotécnico (BDG). Em seguida, são detalhados os procedimentos de tratamento, organização e espacialização dos dados, os métodos de interpolação adotados, os critérios utilizados na elaboração das cartas geotécnicas e das cartas de aptidão à fundação, bem como os procedimentos empregados na validação dos resultados.

O Capítulo 4 apresenta os resultados e discussões da pesquisa. Inicialmente, são apresentadas as cartas geotécnicas elaboradas, incluindo as análises relacionadas à

profundidade e cota do impenetrável ao SPT, à profundidade e cota do nível de água, aos valores de N_{SPT} por camada e textura de solo predominantes. Na sequência, são discutidas as cartas de aptidão à fundação, abrangendo a avaliação preliminar entre fundações rasas e profundas, a aptidão executiva para estacas escavadas mecanizadas sem fluido estabilizante e para estacas hélice contínua monitorada, além das estimativas de comprimento máximo executável para essas tipologias. Por fim, são apresentados os resultados da validação, obtidos por meio da comparação entre os produtos cartográficos desenvolvidos e casos reais de fundações executadas na área de estudo.

O Capítulo 5 apresenta as conclusões da pesquisa, destacando as principais contribuições do trabalho, as limitações associadas aos procedimentos adotados e as recomendações para trabalhos futuros relacionados à utilização de bancos de dados geotécnicos e à elaboração de cartas geotécnicas aplicadas ao planejamento de fundações.

Ao final da dissertação são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

2. REVISÃO DE LITERATURA

Nessa seção será realizada a revisão bibliográfica de modo a apresentar os conceitos necessários para o desenvolvimento da pesquisa em questão, visando alcançar os objetivos previamente citados, por meio da abordagem sobre a área de estudo, classificação e caracterização dos solos, investigação geotécnica, fundações, banco de dados e SIG, cartografia geotécnica, bem como estatística descritiva e métodos de interpolação.

2.1. Área de estudo

A cidade de Palmas, capital do estado do Tocantins tem uma área territorial de 2.227,329 km² e uma população estimada 323.625 pessoas no ano de 2024 de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025). Sua localização confere à cidade um papel relevante na articulação logística, econômica e política do norte brasileiro.

A Figura 2.1 apresenta o mapa de localização da área de estudo. Nele se observam o enquadramento da área de estudo em relação ao território nacional, estadual e municipal, permitindo a contextualização espacial do município de Palmas e da área urbana analisada no trabalho em questão.

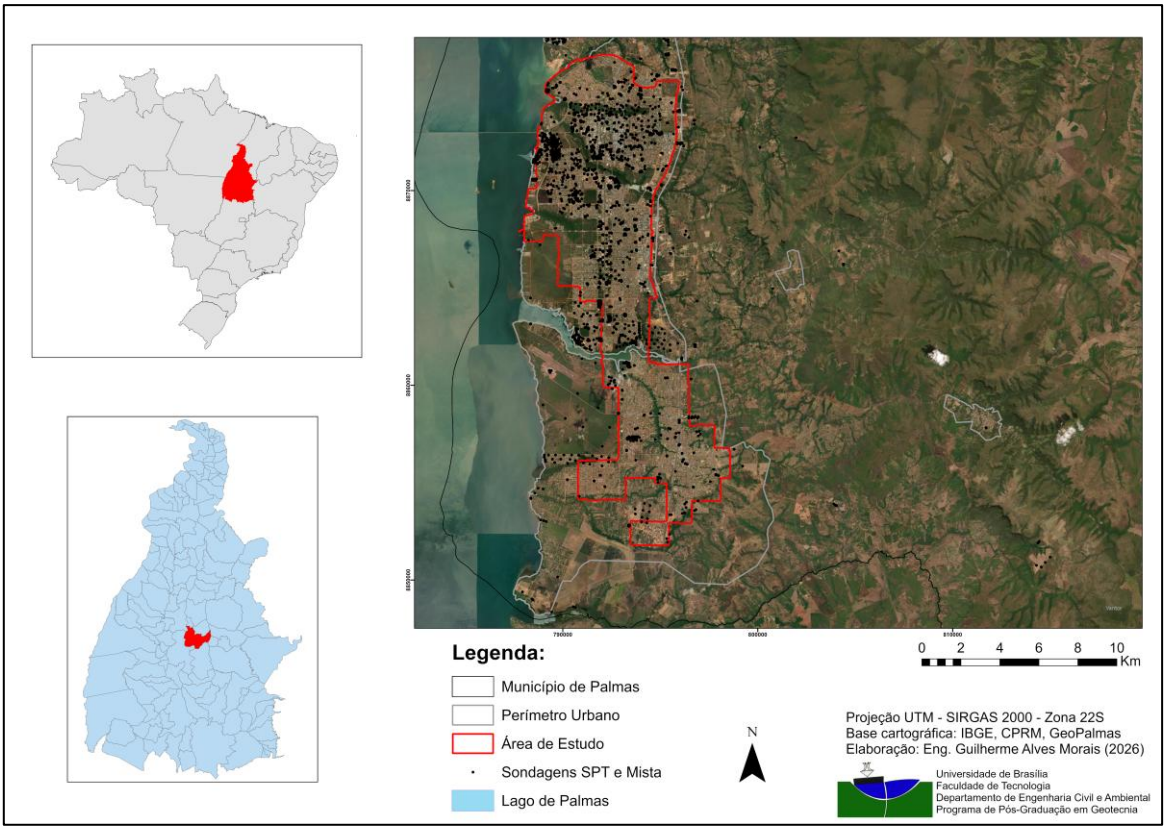


Figura 2.1 - Mapa de localização da área de estudo

Segundo Castro (2018), Palmas está localizada em um município de topografia escarpada com altitude média de 246 metros acima do nível do mar, mas o seu Plano Diretor localiza-se em uma região plana, com predominância de declividade entre 2% e 10%. A cidade é dividida hidrograficamente pelas bacias do Ribeirão Água Fria, do Córrego Sussuapara, do Córrego Comprido, do Córrego da Prata e do Ribeirão Taquaruçu.

No contexto hidrográfico regional, a área de estudo encontra-se inserida na bacia hidrográfica Tocantins-Araguaia (Abreu *et al*., 2025).

Com relação à geologia de Palmas, observa-se a ocorrência de três unidades geológicas principais no Plano Diretor do município: os Terraços Fluviais do rio Tocantins, a Formação Pimenteiras e a Formação Jaicós, pertencente ao Grupo Serra Grande (Sachs, Araújo e Godoy, 2020). Dentre essas unidades, a Formação Pimenteiras ocupa a maior parte da área urbanizada e é caracterizada pela ocorrência de camadas argilosas, siltosas e arenosas associadas à baixa permeabilidade. Os terraços fluviais, por sua vez, são constituídos predominantemente por depósitos arenosos com presença de seixos, apresentando elevada permeabilidade. A Formação Jaicós ocorre de forma subordinada na região e integra o Grupo Serra Grande, sendo constituída predominantemente por arenitos de granulação média a grossa, com intercalações de arenito fino e siltito (Sachs, Araújo e Godoy, 2020). Essa unidade apresenta relevância hidrogeológica regional, uma vez que o Grupo Serra Grande é descrito como um aquífero frequentemente contínuo, de extensão regional e elevada importância hidrogeológica em grandes profundidades (Abreu *et al*., 2025). A Figura 2.2 apresenta as unidades geológicas de Palmas/TO.

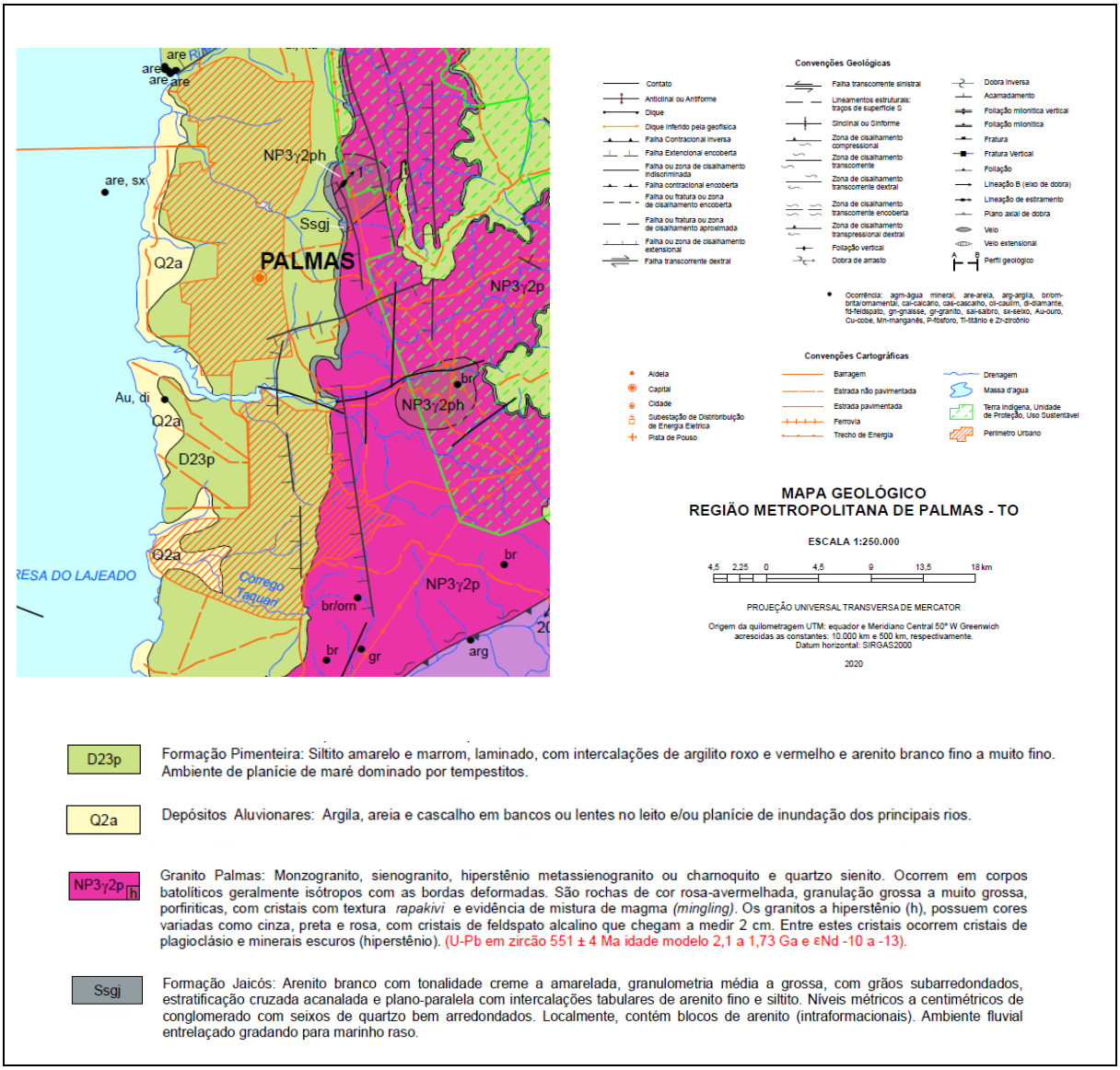


Figura 2.2 - Mapa Geológico da região metropolitana de Palmas/TO (modificado - Sachs, Araújo e Godoy 2020)

A Formação Pimenteiras apresenta arenitos com granulometria muito fina que possuem gênese ligada a um ambiente nerítico de plataforma dominada por tempestades (Morais & Souza, 2009). Segundo Hasui *et al*. (2012), as áreas pertencentes à formação Pimenteiras apresentam uma permeabilidade relativamente baixa e podem apresentar problemas de expansibilidade. Além disso, são encontradas fraturas distensivas que são preenchidas por material arenoso, formando regiões de alta permeabilidade. Conforme Abreu *et al*. (2025), a Formação Pimenteiras é constituída predominantemente por siltitos e argilitos intercalados com níveis areníticos, apresentando baixa permeabilidade e reduzida capacidade de armazenamento e circulação de água subterrânea. Em função dessas características, essa unidade comporta-se como um aquitarde, exercendo importante papel como barreira hidráulica ao fluxo subterrâneo.

Na área urbanizada de Palmas formada por planície encontra-se terraços fluviais localizados às margens do rio Tocantins, que são sujeitos a inundações periódicas (Silva & Schulz, 2007). Segundo Jesus (2020) esses depósitos apresentam meandros abandonados, cordões arenosos e materiais com granulometria variando de fina a grossa. Hasui *et al*. (2012) destacam a presença de espessas camadas arenosas associadas a níveis de seixos depositados pela dinâmica fluvial do rio Tocantins. De acordo com Abreu *et al*. (2025) esses depósitos sedimentares inconsolidados apresentam elevada permeabilidade, favorecendo a infiltração e a circulação de água subterrânea, constituindo aquíferos livres de ocorrência descontínua e nível freático geralmente raso. Essa condição contribui para a ocorrência de lençol freático pouco profundo em parte da área urbanizada, aspecto que pode gerar impactos relevantes na execução de obras civis (Castro, 2018).

Quanto aos aspectos pedológicos, predominam na região de Palmas, especialmente na área de estudo, Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos, associados a condições de infiltração classificadas como muito boas (Abreu *et al*., 2025). Sob o ponto de vista geomorfológico, os terraços fluviais apresentam relevo predominantemente plano, enquanto as áreas associadas à Formação Pimenteiras são caracterizadas por superfícies aplainadas com relevo suave ondulado. Ambos os compartimentos integram a unidade geomorfológica denominada Depressão do Médio Tocantins (Abreu *et al*., 2025).

Ademais, a sazonalidade do regime hidrológico na região de estudo é caracterizada por um período úmido, que se estende de outubro a abril, e um período seco, de maio a setembro (Marcuzzo & Goularte, 2013). O histograma da Figura 2.3 apresenta o comportamento da precipitação durante o ano, indicando a sazonalidade dividida entre os períodos seco e úmido previamente citados.

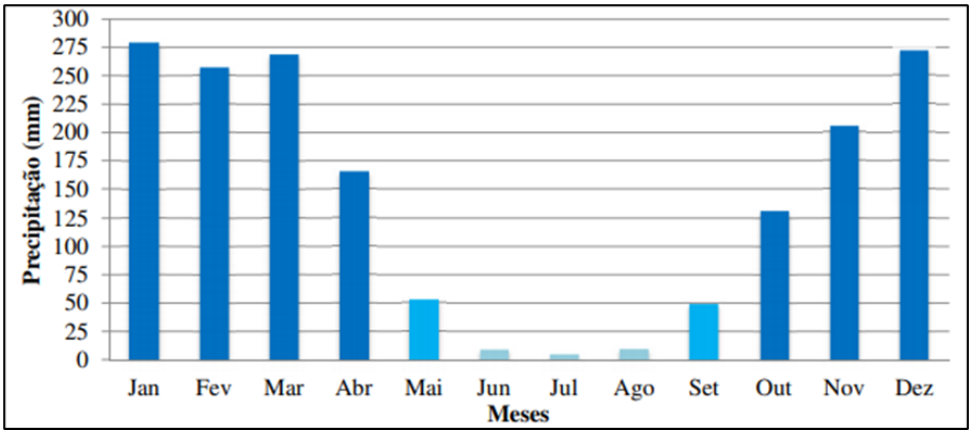


Figura 2.3 - Histograma mensal da precipitação pluviométrica em Palmas/TO (**Marcuzzo & Goularte, 2013)**

As características geológicas, hidrogeológicas e geomorfológicas descritas anteriormente influenciam diretamente as condições geotécnicas observadas na área de estudo. Em especial, os depósitos aluvionares associados aos terraços fluviais do rio Tocantins apresentam comportamento distinto daquele observado na Formação Pimenteiras, refletindo-se em aspectos relevantes para a investigação geotécnica e para a execução de fundações profundas.

A região da Orla da Graciosa constitui um dos principais polos de verticalização de Palmas, concentrando empreendimentos de grande porte executados sobre depósitos aluvionares associados aos terraços fluviais do rio Tocantins. Nessas áreas, é comum a ocorrência de lençol freático raso e espessas camadas arenosas contendo seixos, características que frequentemente demandam a adoção de fundações profundas, sendo comum na região a execução de estacas do tipo hélice contínua monitorada. Segundo Lorenzi (2022), as perfuratrizes usualmente empregadas para esse método executivo no Brasil apresentam capacidade para execução de estacas com profundidades da ordem de 20 a 24 metros.

Em função da presença de seixos nas profundidades de apoio das fundações, é prática recorrente a execução de sondagens mistas complementares às sondagens SPT convencionais. Nessas condições, a impenetrabilidade observada durante o avanço da sondagem pode estar associada à presença de seixos e não necessariamente à ocorrência de rocha, tornando necessária a continuidade da investigação para adequada caracterização do perfil geotécnico e suporte à tomada de decisão em projetos de fundação. Por esse motivo, as sondagens mistas executadas na região geralmente atingem profundidades próximas de 20 metros, sendo limitadas principalmente pela dificuldade de avanço e pelo risco de perda de revestimento.

2.2. Classificação e caracterização dos solos

A caracterização dos solos pode ser realizada por diferentes abordagens complementares, cada uma fornecendo informações relevantes para a compreensão do comportamento do material. A classificação geológica permite identificar sua origem e ambiente de formação, enquanto a classificação pedológica auxilia na compreensão dos processos de evolução dos perfis de solo e de seus horizontes. Já a caracterização geotécnica busca descrever propriedades físicas e índices de comportamento que influenciam diretamente a resposta do solo frente às solicitações impostas por obras de engenharia. Dessa forma, a classificação e caracterização dos solos podem ser realizadas sob os enfoques geológico,

pedológico e geotécnico, fornecendo subsídios importantes para a interpretação das condições do terreno e para o desenvolvimento de estudos aplicados à engenharia de fundações.

2.2.1. Classificação geológica

A classificação geológica dos solos é feita a partir da rocha de origem e do processo de formação do solo (Vaz, 1996). Sendo que, geologicamente, os solos se classificam em residuais e sedimentares.

Segundo Santos (2016), os solos residuais são formados no local onde foram originados devido a decomposição das rochas por meio do intemperismo químico e/ou físico, ficando evidente a macroestrutura da rocha matriz em solos pouco desenvolvidos. Os solos residuais apresentam grande importância em regiões tropicais, onde os processos de intemperismo são intensos. De acordo com Pinto (2006), suas propriedades são fortemente influenciadas pela rocha de origem, pelo grau de intemperismo e pelas condições climáticas atuantes durante sua formação. Em função da permanência no local de origem, esses solos frequentemente apresentam heterogeneidade vertical, com transições graduais entre o solo superficial, o material saprolítico e a rocha sã subjacente.

Conforme Pinto (2006), os solos residuais podem ser classificados em maduros e jovens. Os solos residuais maduros apresentam elevado grau de intemperismo e perda das características estruturais da rocha matriz, enquanto os solos residuais jovens preservam parte da estrutura e das descontinuidades da rocha de origem, sendo frequentemente denominados solos saprolíticos.

Os solos sedimentares são transportados até o local onde estão depositados, havendo diferentes formas de ocorrência, conforme apresentado no Quadro 2.1 (Santos, 2016).

Quadro 2.1 - Formas de ocorrências de solos sedimentares (Santos, 2016)

Solo sedimentar	Descrição
Aluviões	Resultado do transporte por cursos d'água, são depósitos de materiais erodidos e retrabalhados situados nos leitos e margens de rios, assim como nos fundos e nas margens de lagoas e lagos.
Terraços fluviais	Decorrente da condução por cursos d'água em tempos passados, são aluviões antigos que se depositaram quando o nível d'água se encontrava em posição superior ao atual.

Coluviões	Formado pela ação da água e, principalmente, da gravidade, são depósitos de materiais inconsolidados, comumente encontrados acobertando encostas íngremes.
Tálus	Originado por meio da ação da água e, principalmente, da gravidade, são depósitos compostos predominantemente por blocos de rocha de variados tamanhos, os quais ocupam os sopés das encostas de relevos acidentados.
Sedimentos marinhos	Produzidos em ambientes de praia ou de mangues por meio de oscilações do nível do mar, são depósitos de sedimentos constituídos de areias limpas, finas a médias e quartzosas ou muito finos e argilosos.
Solos eólicos	Transportados e depositados pela ação do vento, são compostos por areia fina quartzosa de granulometria bem arredondada.

Observa-se que a origem geológica dos solos exerce influência direta sobre suas características físicas e geotécnicas. Enquanto os solos residuais tendem a refletir as propriedades da rocha matriz e o grau de intemperismo, os solos sedimentares apresentam características relacionadas aos processos de transporte e deposição. Dessa forma, a compreensão da gênese dos solos constitui etapa fundamental para interpretação de seu comportamento geotécnico e para a adequada caracterização das condições do subsolo.

2.2.2. Classificação pedológica

Segundo a Embrapa (2025), ao examinar o solo a partir da superfície, observam-se seções aproximadamente paralelas, organizadas em horizontes, de tal modo que os horizontes refletem os processos de formação do solo a partir do intemperismo do substrato rochoso ou de sedimentos de natureza diversa, enquanto as camadas são pouco ou nada afetadas pelos processos pedogenéticos, mantendo, em maior ou menor proporção, as características do material de origem.

Os horizontes formados pela ação de processos pedogenéticos são denominados horizontes genéticos (Embrapa, 2025). Segundo Lepsch (2010), os perfis de solo são constituídos por camadas aproximadamente paralelas à superfície, denominadas horizontes, que refletem os processos de formação e evolução do solo. Os principais horizontes são representados pelas letras O, A, E, B e C. A Figura 2.4 apresenta uma representação esquemática da organização desses horizontes em um perfil de solo.

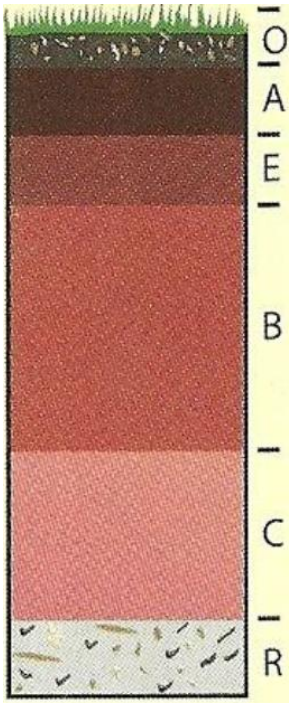


Figura 2.4 - Representação esquemática dos principais horizontes pedológicos de um perfil de solo (Modificado - Lepsch, 2010)

Embora os horizontes sejam representados de forma distinta na Figura 2.4, as transições entre eles nem sempre são nítidas em campo (Lepsch, 2010). Segundo o autor, o solo pode ser analisado em locais propícios para classificação e exame da descrição morfológica, como taludes escavados, perfil de solo exposto, cortes de estrada e em trincheiras.

Segundo Bozio (2022), as características morfológicas desses horizontes refletem a constituição do solo e suas condições de formação, fornecendo informações importantes para a interpretação de propriedades relacionadas à drenagem, permeabilidade, compactação, suscetibilidade à erosão e aptidão ao uso do solo. O Quadro 2.12 apresenta as principais características dos horizontes pedológicos.

Quadro 2.2 - Principais características dos horizontes pedológicos (modificado – Santos, 2016; Bozio, 2022)

Horizonte	**Características**
O	Horizonte orgânico superficial constituído por restos vegetais e substâncias húmicas em diferentes estágios de decomposição, caracterizado pelo elevado teor de matéria orgânica.
H	Horizonte orgânico (hístico) constituído predominantemente por matéria orgânica acumulada em ambientes com excesso de água.

A	Camada mineral mais próxima da superfície, caracterizada pelo acúmulo de matéria orgânica humificada e intensa atividade biológica. Apresenta coloração geralmente mais escura devido à presença de húmus e concentra parte significativa dos nutrientes do solo.
E	Camada mineral de coloração clara, resultante da perda de argilas, óxidos e matéria orgânica para horizontes inferiores. Apresenta menor teor de matéria orgânica e textura geralmente mais arenosa que os horizontes superficiais.
B	Camada subsuperficial resultante da transformação do material de origem e/ou do acúmulo de constituintes minerais provenientes dos horizontes superiores. Caracteriza-se pelo maior desenvolvimento estrutural e pela concentração de argilas e óxidos.
C	Camada constituída por material inconsolidado pouco alterado pelos processos pedogenéticos, preservando características da rocha matriz. Frequentemente corresponde ao saprólito e representa a transição entre o solo e a rocha subjacente.
R	Camada constituída por rocha consolidada, pouco ou não alterada pelos processos de formação do solo, correspondendo à rocha matriz que deu origem ao perfil.
Transicionais	Resultam da transição gradual entre dois horizontes adjacentes, apresentando características intermediárias de ambos e sendo identificados pela combinação de suas letras.

Com base nas características morfológicas dos horizontes do solo, em referências internacionais e em dados obtidos por levantamentos pedológicos realizados no território nacional, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) desenvolveu o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Sua primeira versão oficial foi publicada em 1999 e o sistema permanece em constante revisão e aprimoramento, encontrando-se atualmente em sua 6ª edição (Embrapa, 2025).

Considerando a combinação dos horizontes diagnósticos e demais atributos morfológicos, físicos e químicos dos solos, o SiBCS estabelece treze classes de solos no primeiro nível categórico, denominado Ordem: Argissolos, Cambissolos, Chernossolos,

Espodossolos, Gleissolos, Latossolos, Luvissolos, Neossolos, Nitossolos, Organossolos, Planossolos, Plintossolos e Vertissolos (Embrapa, 2025).

O Quadro 2.3 apresenta um resumo das ordens de solos definidas pelo SiBCS, incluindo seus elementos formativos e respectivos significados etimológicos.

Quadro 2.3 - Resumo das ordens de solos definidas pelo SiBICS (Modificado - Embrapa, 2025).

Classes	Elementos formativos	Termos de conotação e de memorização
ARGISSOLO	ARGI	Do latim *argilla*, "argila"; conotativo de solos com processo de acumulação de argila
CAMBISSOLO	CAMBI	Do latim *cambiare*, "trocar", "mudar"; conotativo de solos em formação (transformação). Horizonte B incipiente
CHERNOSSOLO	CHERNO	Do russo *chorniy*, "preto"; conotativo de solos ricos em matéria orgânica, com coloração escura
ESPODOSSOLO	ESPODO	Do grego *spodos*, "cinza vegetal"; conotativo de solos com horizonte de acumulação iluvial de matéria orgânica associada à presença de alumínio. Horizonte B espódico
GLEISSOLO	GLEI	Do russo *gley*, "massa do solo pastosa"; conotativo de solos com excesso de água. Horizonte glei
LATOSSOLO	LATO	Do latim *lat*, "tijolo"; conotativo de solos muito intemperizados. Horizonte B latossólico
LUVISSOLO	LUVI	Do latim *luere*, "lavar"; conotativo de translocação de argila. Horizonte B textural com alta saturação por bases e Ta
NEOSSOLO	NEO	Do grego *neo*, "novo"; conotativo de solos com pouco desenvolvimento pedogenético
NITOSSOLO	NITO	Do latim *nitidus*, "brilhante"; conotativo de superfícies brilhantes nas unidades estruturais. Horizonte B nítico
ORGANOSSOLO	ORGANO	Do latim *organicus*, "pertinente ou próprio dos compostos de carbono"; conotativo de solos com maior expressão da constituição orgânica. Horizonte H ou O

PLANOSSOLO	PLANO	Do latim *planus*, "plano"; conotativo de solos desenvolvidos em planícies ou depressões com encharcamento estacional. Horizonte B plânico
PLINTOSSOLO	PLINTO	Do grego *plinthos*, "ladrilho"; conotativo de materiais argilosos coloridos que endurecem quando expostos ao ar. Horizontes plíntico, litoplíntico ou concrecionário
VERTISSOLO	VERT	Do latim *vertere*, "virar", "inverter"; conotativo de movimento de material de solo na superfície e que atinge a subsuperfície (expansão/contração). Horizonte vértico

Cada uma das ordens apresentadas está dividida em subordens, grandes grupos e subgrupos, constituindo os níveis subsequentes da estrutura hierárquica do SiBCS (Embrapa, 2025).

A classificação pedológica fornece informações relevantes sobre a gênese e a evolução dos solos, permitindo compreender aspectos relacionados à sua composição, drenagem e grau de desenvolvimento. Essas características influenciam diretamente o comportamento geotécnico dos materiais, tornando o conhecimento das classes pedológicas um importante complemento à caracterização realizada para fins de engenharia.

2.2.3. Classificação geotécnica

Além das classificações geológica e pedológica, é importante conhecer as propriedades físicas do solo, como sua granulometria e índices de consistência, por meio da caracterização geotécnica. Por meio dos resultados obtidos com base na análise granulométrica, realizado conforme procedimentos da NBR 7181 (ABNT, 2025), é possível fazer a interpretação das faixas granulométricas, de modo a classificar o solo segundo a dimensão de suas partículas (quadro 2.4), estando essa classificação dividida em: argila, silte, areia fina, média e grossa, pedregulho fino, médio e grosso, pedra de mão e matacão; conforme a NBR 6502 (ABNT, 2022).

Quadro 2.4 - Classificação do solo segundo a granulometria (modificado - ABNT, 2022).

Classificação do solo	**Diâmetro das partículas**
Argila	< 0,002 mm
Silte	0,002 – 0,06 mm

Areia fina	0,06 – 0,20 mm
Areia média	0,20 – 0,60 mm
Areia grossa	0,60 – 2,0 mm
Pedregulho fino	2,0 – 6,0 mm
Pedregulho médio	6,0 – 20 mm
Pedregulho grosso	20 – 60 mm
Pedra de mão	60 – 200 mm
Matacão	200 mm – 1m

Segundo Lepsch (2010), a textura refere-se à proporção relativa das frações de areia, silte e argila em um material de solo, que raramente é constituído de uma fração granulométrica, mas de uma combinação dessas três, a qual reflete a classe da textura. Elas são identificadas graficamente em diagramas triangulares, como o triângulo de grupamentos de classes de textura apresentado por (Embrapa, 2025) na Figura 2.5.

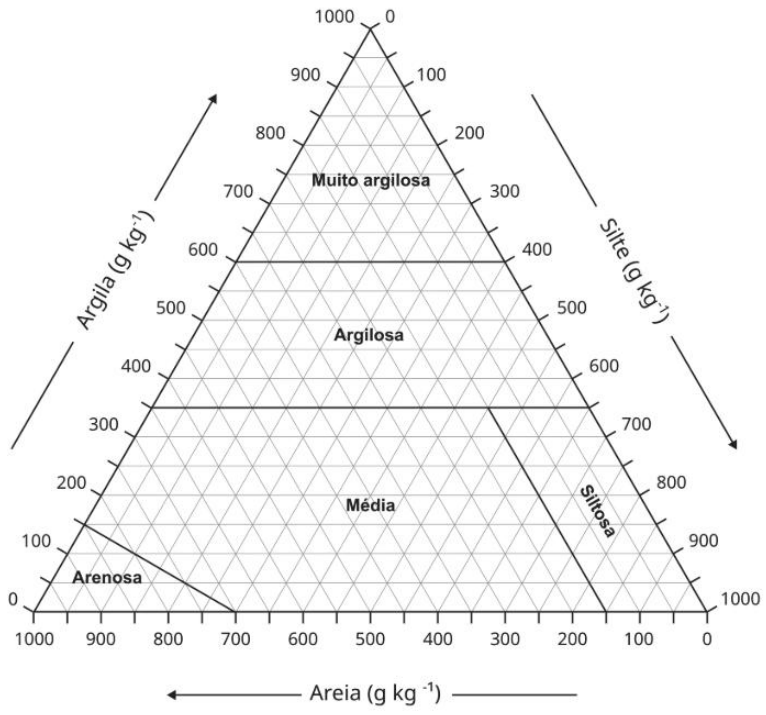


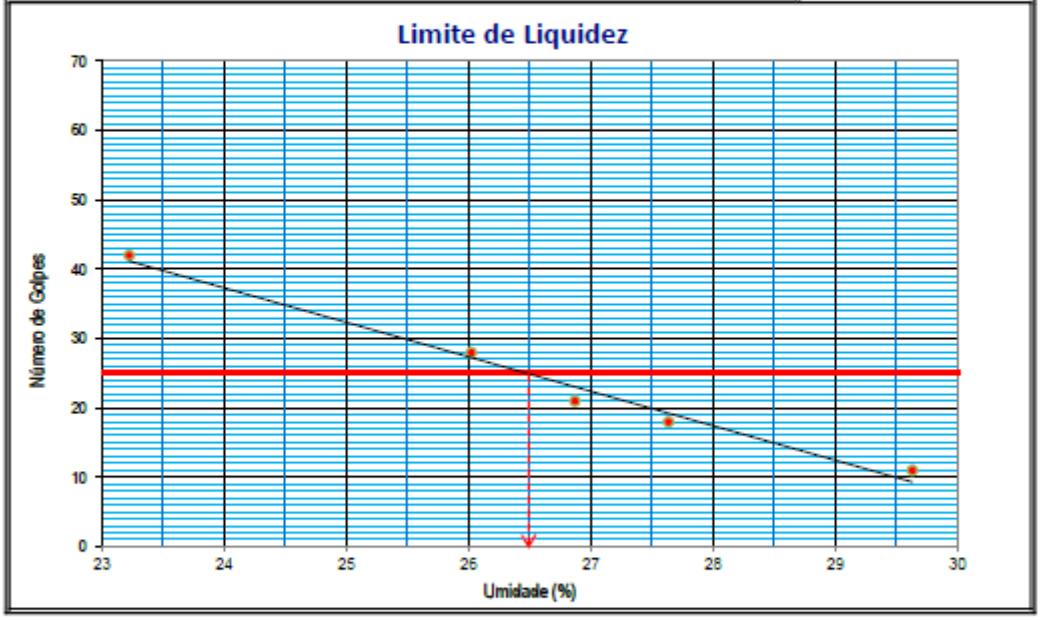
Figura 2.5 - Triângulo de grupamentos de classes de textura (Embrapa, 2025).

A fração fina do solo tem grande importância em seu comportamento, de tal forma que devido ao fato de suas partículas terem superfícies específicas variadas, o comportamento varia mediante a presença de água. Segundo Pinto (2006), a partir da diferença entre limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP), calcula-se o índice de plasticidade (IP). O

procedimento para determinação do limite de liquidez dos solos é estabelecido pela NBR 6459 (ABNT, 2016a) que determina os procedimentos para obtenção do LL, enquanto a NBR 7180 (ABNT, 2016b) determina os procedimentos para obtenção do LP e cálculo do IP. A Figura 2.6 abaixo exemplifica a obtenção dos valores de LL, LP e IP.

LIMITE DE LIQUIDEZ						
Cápsula	Nº	7	41	95	19	8
C + S + A	g	12,49	12,20	11,26	12,13	10,71
C + Solo	g	11,25	10,86	10,11	10,74	9,59
Água	g	1,24	1,34	1,15	1,39	1,12
Peso Cápsula	g	5,91	5,71	5,83	5,71	5,81
Solo	g	5,34	5,15	4,28	5,03	3,78
Umidade	%	23,22	26,02	26,87	27,63	29,63
Golpes		42	28	21	18	11

IP	
1 < IP < 7	Fracamente Plastico
7 < IP < 15	Medianamente Plastco
IP > 15	Altamente Plástico
Valores de referência bibliografica conforme Pinto, 2008.	



LIMITE DE PLASTICIDADE						
Cápsula	Nº	5	83	15	51	4
C + S + A	g	7,85	8,67	8,54	9,30	8,86
C + Solo	g	7,54	8,16	8,13	8,81	8,45
Água	g	0,31	0,51	0,41	0,49	0,41
Cápsula	g	5,97	5,88	6,02	6,43	6,13
Solo	g	1,57	2,28	2,11	2,38	2,32
Umidade	%	19,75	22,37	19,43	20,59	17,67

Índices de Concistencia	
LL % =	26,50
LP % =	19,96
IP % =	6,54

Figura 2.6 – Relatório de ensaio de limite de liquidez e plasticidade.

Além de permitirem avaliar a plasticidade e a consistência dos solos finos, os limites de Atterberg constituem parâmetros fundamentais para sistemas de classificação geotécnica, sendo amplamente empregados pelo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS).

O SUCS é um dos métodos mais utilizados para a identificação e classificação de solos em projetos de engenharia geotécnica, considerando para tal, a textura e consistência do material. Ele foi desenvolvido inicialmente na década de 1940 pelo corpo de engenheiros do Exército

dos Estados Unidos e foi posteriormente adaptado pelo *Bureau of Reclamation* e pela *ASTM* (*American Society for Testing and Materials*) para uso geral na engenharia civil (Holtz & Kovacs, 1981). Essa classificação é baseada na análise granulométrica e nos limites de consistência dos solos, organizando-os em grupos principais, sendo argilas (C), siltes (M), areias (S) e cascalhos (G), com subdivisões conforme características de plasticidade e graduação dos grãos. O SUCS é especialmente útil por oferecer uma terminologia padronizada, permitindo a comunicação técnica precisa entre profissionais da área e a interpretação adequada do comportamento mecânico dos solos em obras de fundações, barragens, escavações, entre outras (Seed & Whitman, 1967).

A classificação pelo sistema SUCS depende da determinação dos limites de liquidez e plasticidade, índice de plasticidade, bem como da curva granulométrica do solo. A Tabela 2.1 abaixo mostra uma relação entre os critérios mencionados e a classificação SUCS.

Tabela 2.1 - Critérios para atribuição de símbolos utilizando testes de laboratório (modificado - ASTM, 2017).

		Critérios		Grupo
Solos Grossos	Pedregulhos	Pedregulhos puros (<5% de finos)	$Cu \geq 4$ e $1 \leq Cc \leq 3$	GW
			$Cu < 4$ e/ou $1 > Cc > 3$	GP
		Pedregulho com finos (>12% de finos)	Finos classificados como ML ou MH	GM
			Finos classificados como CL ou CH	GC
	Areias	Areias puras (<5% de finos)	$Cu \geq 6$ e $1 \leq Cc \leq 3$	SW
			$Cu < 6$ e/ou $1 > Cc > 3$	SP
		Areias com finos (>12% de finos)	Finos classificados como ML ou MH	SM
			Finos classificados como CL ou CH	SC
Solos Finos	Siltes e argilas (LL<50)	Inorgânico	IP > 7 e sobre ou acima da linha a	CL
			IP < 4 ou abaixo da linha a	ML
		Orgânico	LL seco em estufa / LL não seco < 0,75	OL
	Siltes e argilas	Inorgânico	IP sobre ou acima da linha a	CH

(LL≥50)		IP abaixo da linha a	MH
	Orgânico	LL seco em estufa / LL não seco < 0,75	OH
Solos altamente orgânicos	Matéria orgânica primária, de cor escura e odor orgânico		PT

Legenda: LL – limite de liquidez; IP – índice de plasticidade; Cu – coeficiente de uniformidade; Cc – coeficiente de curvatura; G – pedregulho; S – areia; C – argila; M – silte; O – solo orgânico; W – bem graduado; P – mal graduado; L – baixo limite de liquidez; H – elevado limite de liquidez; PT – Turfa.

A classificação geotécnica dos solos constitui uma importante ferramenta para a interpretação preliminar do comportamento dos materiais em obras de engenharia. Entretanto, a adequada caracterização do subsolo depende da obtenção de dados representativos por meio de investigações geotécnicas de campo e laboratório. Essas investigações permitem determinar parâmetros necessários à classificação dos materiais e ao desenvolvimento de projetos geotécnicos, sendo abordadas no tópico seguinte.

2.3. Investigação geotécnica

A investigação geotécnica compreende o conjunto de procedimentos destinados à caracterização das condições do subsolo, fornecendo informações necessárias para o desenvolvimento de projetos de fundações, contenções, pavimentação e obras de terra. Esses procedimentos podem envolver ensaios de campo, ensaios laboratoriais e métodos indiretos de investigação, permitindo a determinação das propriedades físicas, mecânicas e hidráulicas dos materiais que compõem o terreno.

Dentre os principais métodos empregados destacam-se as sondagens à percussão, mista, rotativa e a trado, bem como ensaios de laboratório voltados à caracterização geotécnica dos solos, tais como análise granulométrica, determinação da massa específica, limites de *Atterberg*, permeabilidade, compactação, resistência ao cisalhamento e índice de suporte Califórnia (CBR), entre outros. A escolha do método de investigação depende das características geológicas e geotécnicas da área de estudo, da finalidade da obra e do nível de detalhamento requerido pelo projeto.

No contexto da presente pesquisa, a principal fonte de informações utilizada foi o banco de dados geotécnico constituído por sondagens à percussão (SPT), complementado por registros de sondagens mistas (percussão e rotativa) executadas em áreas específicas do

município de Palmas. Em razão da ampla disponibilidade espacial desses dados, as análises desenvolvidas neste trabalho basearam-se predominantemente nas informações obtidas por esses métodos de investigação. Os dados provenientes de outros ensaios geotécnicos foram armazenados no banco de dados e utilizados de forma complementar na interpretação e validação dos resultados.

2.3.1. Sondagem a percussão

Segundo Schnaid & Odebrecht (2012), a sondagem de simples reconhecimento dos solos realizada através do SPT (*Standard Penetration Test*) é o método para investigação geotécnico mais popular, rotineiro e econômico em praticamente todo o mundo. Devido à simplicidade do equipamento, baixo custo e possibilidade de correlação dos resultados obtidos no ensaio em projeto de fundações diretas e profundas, o SPT é sistematicamente realizado no Brasil, seguindo os procedimentos apresentados na NBR 6484 (ABNT, 2020), a qual especifica o método de execução de sondagens de simples reconhecimento de solos através do sistema de sondagem manual e mecanizado.

A NBR 8036 (ABNT, 1983) fixa as condições exigíveis na programação de sondagem, de tal forma que a quantidade de furos é determinada através da área de projeção do edifício a ser construído posteriormente.

Para uma área de projeção em planta de uma construção de até 1.200 m², deve ser realizada, pelo menos, uma sondagem a cada 200 m². Para uma área de projeção em planta de uma construção entre 1.200 m² e 2.400 m², deve ser realizada, pelo menos, uma sondagem a cada 400 m² que excederem os 1.200 m². Para uma área de projeção em planta de uma construção superior à 2.400 m², a quantidade de sondagens deve ser definida através de plano particular da construção. A norma também define que para uma área de projeção em planta de uma construção de até 200 m², devem ser realizadas, pelo menos, duas sondagens, e que para uma área entre 200 m² e 400 m² devem ser realizadas, pelo menos, três sondagens NBR 8036 (ABNT, 1983).

Dessa forma, a sondagem a percussão visa identificar os estratos do solo até a profundidade do impenetrável ao trépano e coletar amostras deformadas e semideformadas para caracterização e ensaios geotécnicos e geoambientais, bem como realizar ensaios de penetração padronizado (SPT) e investigar a profundidade e variação do nível de água (ABGE, 2023a). Portanto, por meio de sua execução é possível determinar o tipo de solo por camada, os índices de resistência à penetração (N_{SPT}) a cada metro, além da posição final do nível de água (N.A.)

e profundidade do impenetrável (ABNT, 2020). Nesse contexto, a sondagem SPT é uma aliada da construção civil quando falamos de uma cidade em crescimento como Palmas.

As sondagens à percussão utilizadas nesta pesquisa foram executadas por meio do sistema manual com tripé, método amplamente empregado pelas empresas atuantes na região da área de estudo. A Figura 2.7 apresenta exemplos desse procedimento executivo.



Figura 2.7 - Execução de sondagens à percussão (SPT) no sistema manual.

Após a locação do ponto de investigação, procede-se à marcação do furo de sondagem, conforme as orientações da NBR 8036 (ABNT, 1983). O primeiro metro da sondagem deve ser feito com uso do trado-concha ou cavadeira manual, com posterior instalação do tubo de revestimento com sapata cortante até a mesma profundidade.

Posterior ao primeiro metro deve ser utilizado o trado helicoidal para perfuração, intercalando ensaio e amostragem, até atingir o N.A. Deve-se realizar a lavagem com uso do trépano/peça de lavagem (método de perfuração por circulação de água) quando for observado que com o uso trado helicoidal se atinja o nível de água ou o avanço da perfuração seja menor do que 50 milímetros após 10 minutos de operação. Nesse caso, a remoção do material escavado é feita pela circulação de água com uso de bomba de água motorizada (ABNT, 2020).

Em caso de perfurações com parede do furo instáveis torna-se obrigatório, conforme prescrito na NBR 6484 (ABNT, 2020) o uso de tubo de revestimento. Em casos especiais, onde houver problemas para descer e/ou remover o tubo de revestimento, ele pode ser substituído

por lamas de estabilização. Isso se limita aos casos em que não foram previstos ensaios de infiltração na sondagem.

Através do exame tátil-visual, são anotadas as profundidades das mudanças de camadas e coloração de materiais trazidos à boca do furo pelo trado helicoidal ou pela água de circulação. Além disso, é coletado solo do primeiro metro do ensaio realizado pelo trado-concha para exame posterior. Sendo que para os metros subsequentes, são colhidas amostras dos solos com uso do amostrador-padrão, a cada metro.

Durante o ensaio manual de SPT, o índice de resistência à penetração (N_{SPT}) é determinado por meio da anotação da quantidade de golpes necessários para cravar o amostrador-padrão em três segmentos de 15 cm, totalizando 45 cm. O valor de N_{SPT} é igual à soma do número de golpes necessários para penetração dos dois últimos segmentos de 15 cm (ABNT, 2020).

Segundo a NBR 6484 (ABNT, 2020) cravação realizada para obtenção do índice de resistência à penetração deve ser interrompida antes dos 45 cm de penetração nas seguintes situações:

- Se o número de golpes for maior do que 30 em qualquer um dos três segmentos de 15 cm; e
- Se com a aplicação de cinco golpes sucessivos do martelo não for observado avanço do amostrador-padrão.

Segundo a NBR 6484 (ABNT, 2020), na ausência de um critério de paralização definido por parte do contratante, as sondagens devem avançar até que seja atingido um dos seguintes critérios:

- Indicação de N_{SPT} iguais ou superiores a 25 golpes em 10 metros consecutivos;
- Indicação de N_{SPT} iguais ou superiores a 30 golpes em 8 metros consecutivos;
- Indicação de N_{SPT} iguais ou superiores a 35 golpes em 6 metros consecutivos; ou
- Quando no ensaio de avanço da perfuração por circulação de água forem obtidos avanços inferiores à 50 mm em cada período de 10 min (o ensaio deve ter duração de 30 min).

Além da profundidade do impenetrável, devem ser registradas as profundidades do nível de água observadas durante a execução da sondagem e após, no mínimo, 12 horas do encerramento do ensaio (ABNT, 2020).

A Figura 2.8 apresenta exemplos da coleta de amostras deformadas obtidas durante o ensaio e do registro das informações de campo utilizadas na elaboração dos laudos de sondagem.



Figura 2.8 - Coleta de amostras e anotações de campo do ensaio SPT

A NBR 6484 (ABNT, 2020) também estabelece critérios para o registro dos golpes aplicados ao amostrador-padrão e para a apresentação dos resultados nos laudos de sondagem. A Tabela 2.2 apresenta exemplos das convenções utilizadas para o registro das penetrações e dos respectivos números de golpes.

Tabela 2.2 - Orientações para registro dos golpes no ensaio SPT (Modificado – ABNT, 2020)

Penetração	**Registro dos golpes**	**Exemplo**
Penetração de 45 cm Três trechos iguais a 15 cm	Golpes por trecho	3/15 – 3/15 – 4/15
Penetração diferente de 45 cm Trechos diferentes de 15 cm	Número de golpes para uma penetração imediatamente superior a 15 cm	3/7 – 4/14 – 5/15
Penetração superior a 45 cm com a aplicação do primeiro golpe do martelo	Número de golpes e respectiva penetração	1/58
Penetração com haste e amostrador, sem número de golpes	Sem número de golpes	PH/50

Penetração com martelo, haste e amostrador, sem número de golpes	Sem número de golpes	PM/70
Penetração superior a 45 cm com a aplicação de poucos golpes do martelo	Número de golpes e respectiva penetração nos respectivos intervalos	1/33 – 1/20
Penetração inferior a 45 cm, se em qualquer dos três segmentos, o número de golpes ultrapassar 30	Número de golpes para cada intervalo de penetração	32/15
Se não for observado avanço do amostrador durante a aplicação de cinco golpes sucessivos do martelo	Número de golpes para zero centímetros de penetração	5/0

As informações registradas em campo são posteriormente compiladas e organizadas em laudos de sondagem, nos quais são apresentados o perfil estratigráfico, os índices de resistência à penetração, a posição do nível de água e demais informações obtidas durante a investigação. A Figura 2.9 apresenta um exemplo de laudo de sondagem à percussão executada no município de Palmas/TO, representativo dos registros utilizados na estruturação do banco de dados desta pesquisa.

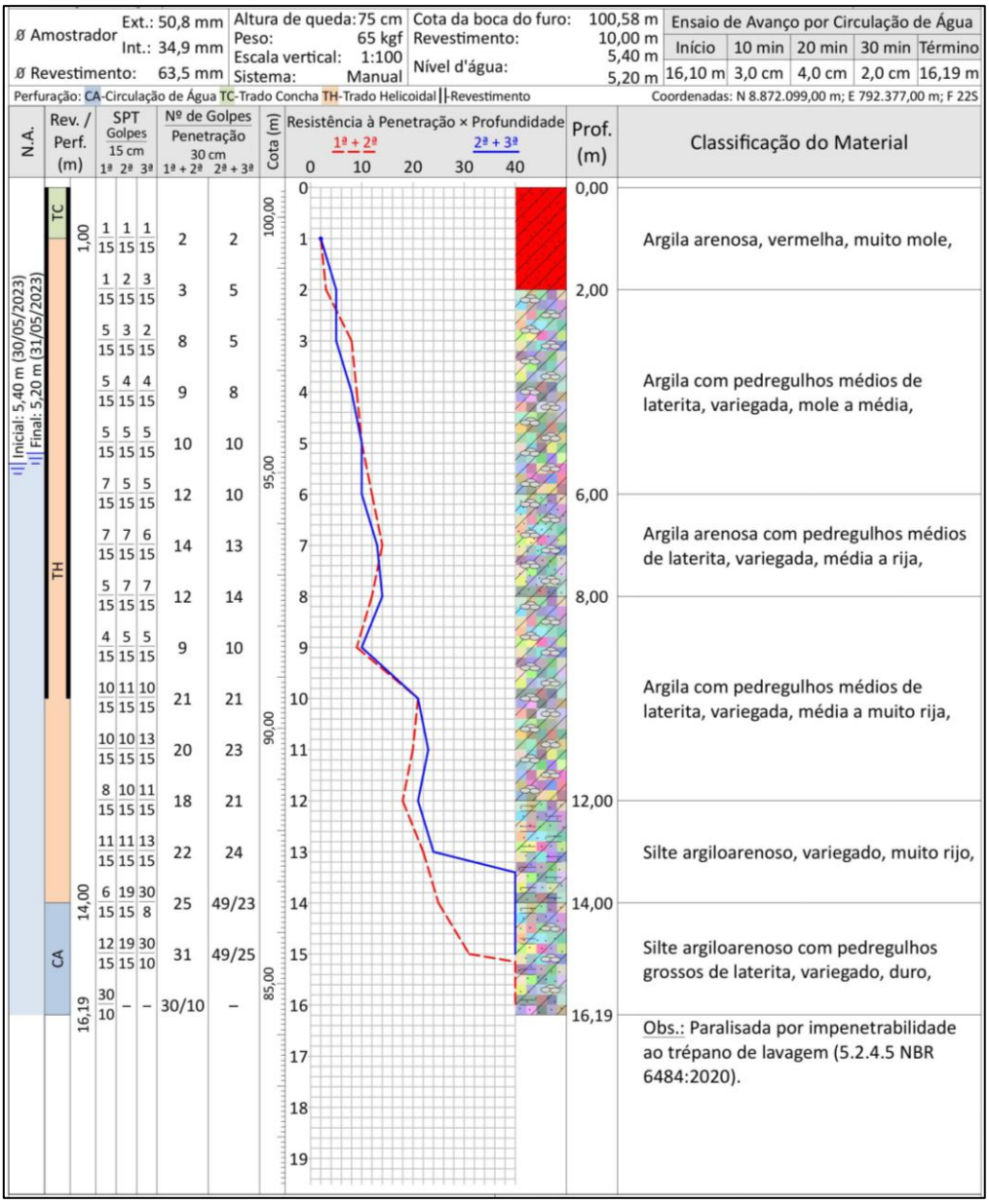


Figura 2.9 - Laudo de sondagem SPT

As informações contidas laudos de sondagem foram extraídas e estruturadas no banco de dados do presente trabalho. Entretanto, em determinadas regiões do município, especialmente nos depósitos aluvionares associados ao rio Tocantins, a investigação geotécnica frequentemente exige métodos complementares capazes de atravessar camadas com ocorrência de seixos e materiais mais resistentes, justificando a utilização de sondagens mistas e rotativas.

2.3.2. Sondagem rotativa e mista

Enquanto a sondagem rotativa visa caracterizar e classificar o maciço rochoso, por meio da coleta e descrição de amostras; a sondagem mista visa identificar, amostrar e caracterizar todo o maciço natural, englobando solos e rochas. Ou seja, a sondagem mista é o método de

investigação que conjuga a sondagem à percussão para o trecho em solo e a sondagem rotativa para o trecho em rocha (ABGE, 2023b).

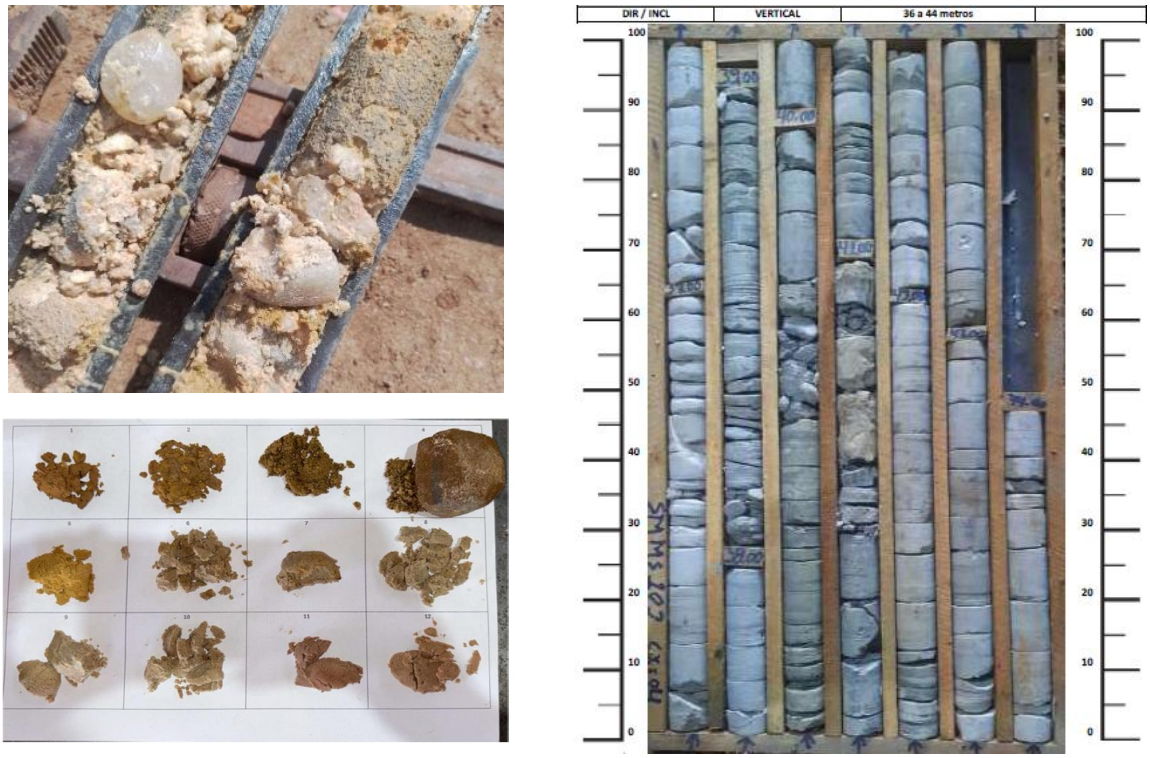
Segundo a norma ABGE 104 (ABGE, 2023b), na sondagem rotativa pode-se obter as seguintes informações: litologia, recuperação por manobra, graus de alteração, coerência e fraturamento, "*Rock Quality Designation*" (RQD), condutividade hidráulica, profundidade e variação do nível de água, condições das descontinuidades, caracterização petrográfica, tecnológica e mecânica dos testemunhos, ovalização, descamação e disqueamento das paredes do furo (ABGE, 2023b). Para o trabalho em questão, das sondagens mistas foram utilizados os dados dos trechos com execução de ensaios SPT: índice de resistência à penetração e tipo de solo a cada metro, bem como a profundidade do nível de água.

A utilização de perfuratriz rotativa permite a continuidade da investigação em trechos onde a sondagem à percussão apresenta limitações operacionais. O trecho em solo é investigado por meio dos procedimentos convencionais da sondagem à percussão, enquanto os materiais resistentes são atravessados mediante perfuração rotativa. Dessa forma, o método permite tanto a obtenção de informações geotécnicas dos solos quanto a recuperação de testemunhos de rocha para caracterização geológica e geomecânica do maciço. A Figura 2.10 apresenta um exemplo do equipamento utilizado nesse tipo de investigação.



Figura 2.10 - Equipamento utilizado na execução de sondagens mistas

Diferentemente da sondagem à percussão convencional, a sondagem mista possibilita a recuperação tanto de amostras de solo quanto de testemunhos de materiais resistentes e rochosos. A Figura 2.11 apresenta exemplos dos materiais recuperados durante esse tipo de investigação. Essas informações são posteriormente registradas nos laudos de sondagem, juntamente com parâmetros obtidos por perfuração rotativa.



(a) (b)

Figura 2.11 - Exemplos de materiais recuperados em sondagens mistas: (a) amostras de solo e pedregulho; (b) testemunhos de material rochoso recuperados por perfuração rotativa.

Na presente pesquisa, as sondagens mistas foram utilizadas principalmente para complementar a investigação geotécnica em áreas com presença de seixos e materiais resistentes, permitindo a obtenção de informações adicionais sobre o perfil do subsolo e a caracterização dos materiais responsáveis pela interrupção ou limitação do avanço das sondagens à percussão. Em razão dessa característica, esse método foi empregado especialmente nos depósitos aluvionares associados aos terraços fluviais do rio Tocantins, onde a presença de seixos dificulta o avanço das sondagens convencionais.

As informações obtidas durante a execução das sondagens mistas são posteriormente organizadas em laudos de sondagem, nos quais são registrados simultaneamente os resultados

dos ensaios SPT executados em solo e os parâmetros obtidos durante a perfuração rotativa. A Figura 2.12 apresenta um exemplo desse tipo de registro.

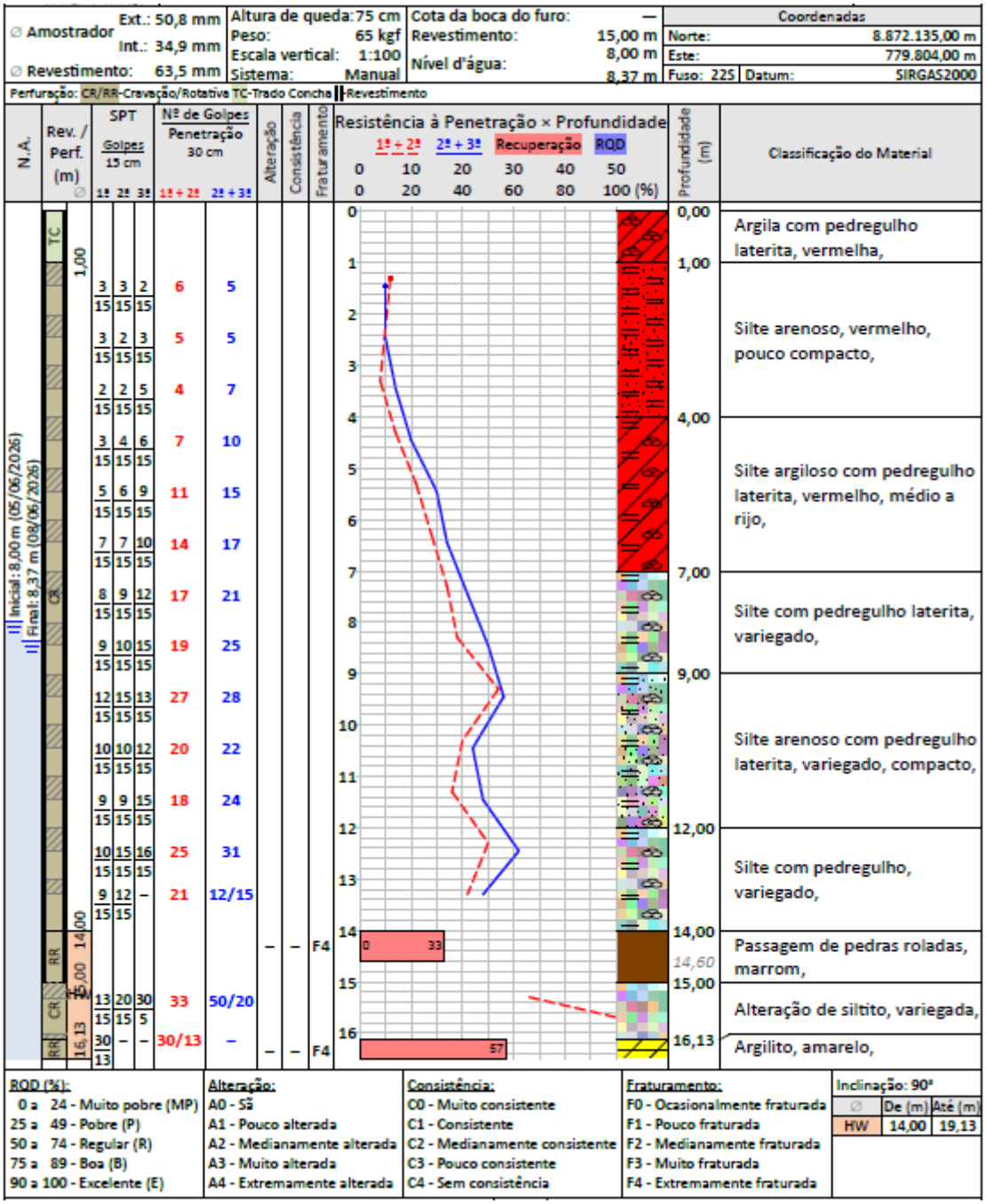


Figura 2.12 - Laudo de sondagem mista

As informações obtidas por meio das investigações geotécnicas constituem a base para a determinação dos parâmetros utilizados na caracterização do subsolo. Dessa forma, o item seguinte apresenta os principais parâmetros geotécnicos e correlações empregados na interpretação dos resultados de sondagem e no desenvolvimento de estudos aplicados à engenharia de fundações.

2.3.3. Parâmetros e correlações

De acordo com Schnaid & Odebrecht (2012), os resultados provenientes do ensaio SPT podem ser interpretados por meio de métodos indiretos ou diretos. Nos métodos indiretos, os valores de N_{SPT} são utilizados para estimar parâmetros representativos do comportamento do solo, enquanto nos métodos diretos os resultados do ensaio são empregados diretamente na previsão de capacidade de carga, recalques e demais aspectos relacionados ao desempenho geotécnico das fundações.

Observa-se na literatura diversas correlações realizadas a partir dos dados provenientes de sondagens a percussão utilizados para obtenção de dados tais como: estado de compacidade e consistência do solo, peso específico, ângulo de atrito e coesão, tensão admissível, entre outros.

Conforme observado na Tabela 2.3, o anexo A da NBR 6484 (ABNT, 2020) relaciona o índice de resistência à penetração com a compacidade dos solos grossos (areia e silte arenoso), bem como com a consistência dos solos finos (argila e silte argiloso).

Tabela 2.3 - Estado de compacidade e consistência dos solos (Modificado - ABNT, 2020)

Solo	**Índice de resistência à penetração (N_{SPT})**	**Designação**
Areias e siltes arenosos	≤ 4	Fofa (o)
	5 a 8	Pouco compacta(o)
	9 a 18	Mediamente compacta(o)
	19 a 40	Compacta(o)
	> 40	Muito compacta(o)
Argilas e siltes argilosos	≤ 2	Muito mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média(o)
	11 a 19	Rija(o)
	20 a 30	Muito rija(o)
	> 30	Dura(o)

Há também trabalhos, como o de Amaretunga *et al*. (2016), que apresenta uma série de correlações com valores do N_{SPT}, dentre elas: densidade relativa, o ângulo de atrito de pico drenado e o módulo de elasticidade para areias; resistência ao cisalhamento não drenado, pressão de pré-consolidação e OCR para argilas; bem como correlações para obter a capacidade de suporte para fundações rasas e profundas. Como o valor de N_{SPT} é amplamente utilizado no

projeto de fundações Amaretunga *et al*. (2016) apresenta correlações do N_{SPT} para a obtenção da capacidade de carga para fundações superficiais (q_u), resistência última de ponta (f_b) e lateral (f_s) para estacas.

Schnaid & Odebrecht (2012) também apresentaram uma abordagem de aplicação direta do resultado de SPT utilizada na rotina de projetos de fundações que envolve a estimativa das tensões admissíveis do terreno através da Equação 2.1.

$$\sigma_{adm} = \mathrm{k}\, N_{spt} \tag{2.1}$$

Onde k depende do tipo de solo, da geometria do problema e da sensibilidade da estrutura a recalques, entre outros fatores. Dessa forma, a prática deve ser vista com restrições, dado o caráter generalista e empírico adotado na estimativa de k.

Apesar da ampla utilização do índice de resistência à penetração em correlações geotécnicas, a interpretação de valores elevados de N_{SPT} requer cautela. Conforme a NBR 6484 (ABNT, 2020), quando o amostrador não atinge a penetração prevista, os resultados passam a ser registrados em função do número de golpes e do avanço obtido, caracterizando condições de elevada resistência a penetração. Dessa forma, a utilização direta de valores muito elevados de N_{SPT} em correlações empíricas pode conduzir a superestimativas dos parâmetros geotécnicos.

Em razão dessa limitação, diversos métodos empíricos adotam valores máximos para o índice de resistência à penetração. Como exemplo, Décourt (1982) propôs a adoção de limite superior de 50 golpes para os valores de N_{SPT} na estimativa da resistência lateral do método Décourt & Quaresma (1978), amplamente empregado no cálculo da capacidade de carga de estacas. De forma semelhante, Berberian (2015) adota $N_{SPT} \leq 50$ para estimativa da tensão admissível em solos de diferentes tipos.

Além das limitações adotadas em correlações empíricas, valores elevados de N_{SPT} também são frequentemente utilizados como critério de paralisação da cravação ou avanço de fundações profundas. Nesse contexto, Cintra & Aoki (2010) listaram os valores limites de N_{SPT} para a parada de estacas, conforme a Tabela 2.4 abaixo.

Tabela 2.4 - Valores limites de $\mathbf{N_{SPT}}$ para a parada de estacas (modificado - Cintra & Aoki, 2010)

Tipo de estaca		N_{lim}
Pré-moldada de concreto	Ø < 30cm	$15 < N_{SPT}\text{t} < 25$ $\Sigma\ N_{SPT} = 80$
	Ø ≤ 30cm	$25 < N_{SPT} \leq 35$
Perfil metálico		$25 < N_{SPT} \leq 55$
Tubada (oca, ponta fechada)		$20 < N_{SPT} \leq 40$
Strauss		$10 < N_{SPT} \leq 25$
Franki	em solos arenosos	$8 < N_{SPT} \leq 15$
	em solos argilosos	$20 < N_{SPT} \leq 40$
Estacão e diafragma, com lama bentonítica		$30 < N_{SPT} \leq 80$
Hélice contínua		$20 < N_{SPT} \leq 45$
Ômega		$20 < N_{SPT} \leq 40$
Raiz		$N_{SPT} \geq 60$ (penetra na rocha sã)

Os exemplos apresentados evidenciam a ampla utilização do índice de resistência à penetração tanto em correlações empíricas para estimativa de parâmetros geotécnicos quanto na definição de critérios executivos para fundações profundas. Entretanto, conforme ressalta Menezes (2011), as correlações baseadas em valores de N_{SPT} têm fundamento em hipóteses e/ou pressupõem condições ou características do subsolo ou dos elementos estruturais, de caráter regional ou local, mas nunca universal. Dessa forma, sua aplicação deve ser realizada com critério e compatibilizada com as características locais do subsolo.

2.4. Fundações

Segundo Falconi *et al*. (2019), as fundações podem ser divididas entre fundações diretas (superficiais) e indiretas (profundas). Sendo que estão contidas no primeiro grupo de fundações mencionado: bloco, sapata, viga de fundação, grelha, sapata associada e radier. As fundações profundas são divididas em estaca, tubulão e caixão. Ainda há a fundação mista, que associa as fundações superficiais e profundas.

As fundações rasas são indicadas para situações em que as camadas superficiais do terreno apresentam capacidade de suporte suficiente para transmitir os carregamentos da estrutura ao terreno sem a necessidade de transferência das cargas para maiores profundidades.

Dessa forma, parâmetros como resistência do solo, profundidade do nível de água e espessura das camadas mais competentes exercem influência direta na viabilidade de sua utilização.

Segundo Rebello (2011), a adoção de fundações superficiais está condicionada ao atendimento simultâneo de requisitos mínimos de resistência do solo e profundidade de assentamento, com o objetivo de evitar problemas relacionados à capacidade de carga e a deformações excessivas. Tais critérios constituem referências importantes para a avaliação preliminar da aptidão de terrenos à utilização de fundações rasas.

Segundo a NBR 6122 (ABNT, 2019), estaca é o elemento de fundação em que todo o processo de execução é feito com a utilização de ferramentas e equipamentos, não havendo atividade humana em profundidade. Naves (2018) menciona em seu trabalho que os dois métodos mais utilizados de estacas ofertados na cidade de Palmas/TO são: estacas escavadas sem revestimento e estacas hélice contínua monitorada. Sendo assim, serão detalhadas a seguir as estacas hélice contínua monitorada e escavadas mecanicamente.

A estaca escavada situa-se na categoria de estaca moldada *in loco*, feita de concreto armado com formato cilíndrico. O equipamento responsável pela sua execução é chamado perfuratriz, que pode ser acoplado sobre caminhão ou esteira. Segundo Falconi *et al*. (2019), o solo é retirado à medida que o trado se aprofunda até a cota de projeto. Após a perfuração, procede-se à instalação da armadura e, posteriormente, à concretagem da estaca a partir da boca do furo, com auxílio de funil de concretagem. Conforme a NBR 6122 (ABNT, 2019), em estacas submetidas a esforços de tração, esforços horizontais ou momentos, a armadura deve ser colocada no furo antes da concretagem; quando não sujeitas a esses esforços, a armadura é apenas de arranque, sem função estrutural, podendo as barras ser posicionadas no concreto imediatamente após a concretagem.

Segundo Lorenzi (2022), a principal restrição da estaca escavada é o nível de água, devendo ser executada quando não há presença de lençol freático na profundidade de projeto, para evitar que o solo desbarranque ou desprenda-se para dentro do furo. Caso isso aconteça, não se tem a garantia da estabilidade e do formato final da estaca. A Figura 2.13 ilustra o procedimento executivo de uma estaca escavada sem fluido estabilizante, com instalação da armadura antes da etapa de concretagem.

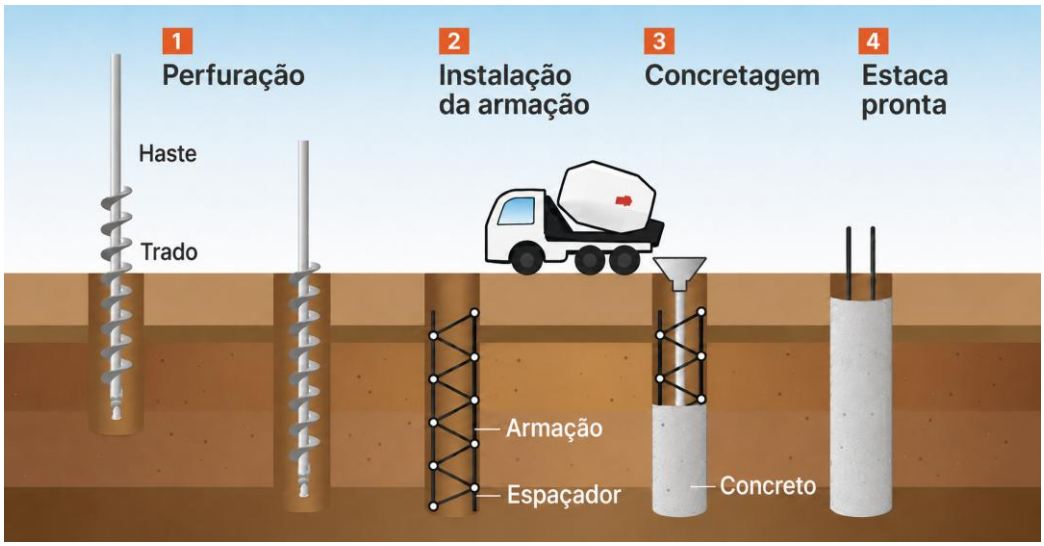


Figura 2.13 - Procedimento executivo de estaca escavada mecanicamente sem fluido estabilizante (modificado – Araujo *et al*., 2018)

A estaca hélice contínua monitorada, assim como a escavada, é uma estaca moldada in loco, que se caracteriza principalmente por ser executada a partir de equipamento dotado de trado helicoidal contínuo, cuja haste permite a passagem de concreto sob pressão, possibilitando a concretagem simultânea à retirada do trado do solo (Falconi *et al*., 2019). Segundo Lorenzi (2022) a hélice contínua monitorada é a solução ideal para os casos em que a fundação precise ultrapassar o nível do lençol freático, sendo uma excelente solução para solos não coesivos, podendo ser utilizadas em diversos tipos de solo. Ou seja, a hélice contínua, assim como a estaca escavada, possui a limitação de não perfurar matacões ou rocha. A Figura 2.14 abaixo ilustra o procedimento executivo de uma estaca hélice contínua monitorada.

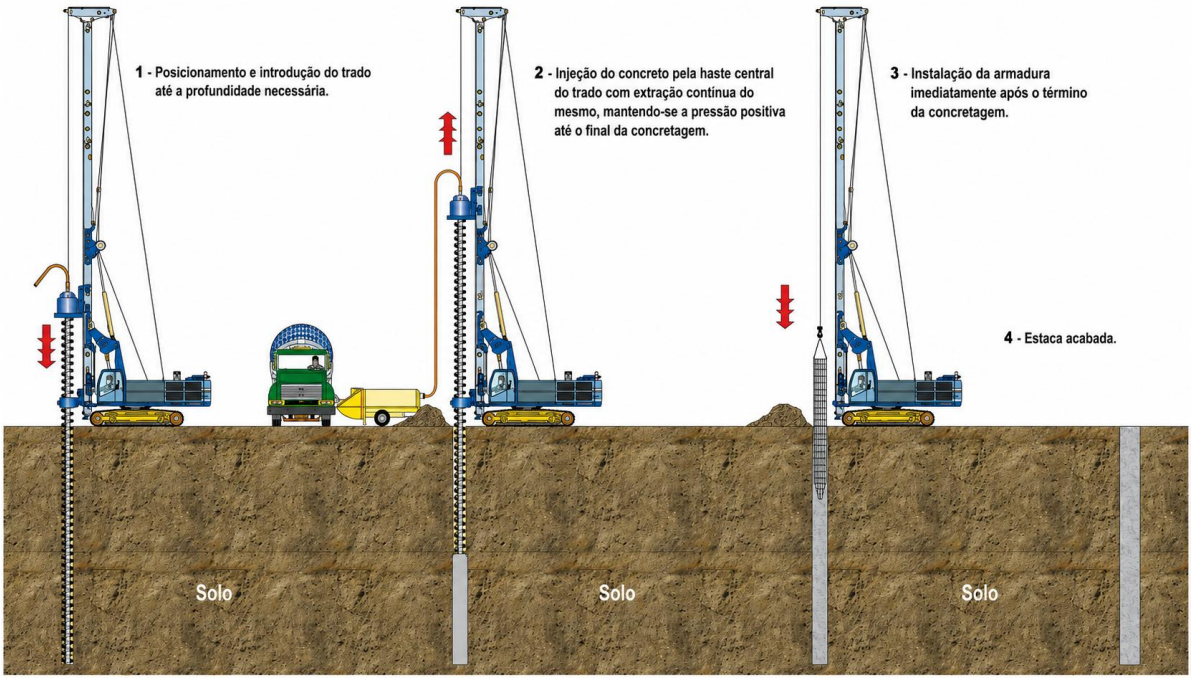


Figura 2.14 - Procedimento executivo de estaca hélice contínua monitorada (modificado – Educa Civil, 2020)

As características executivas e limitações associadas aos diferentes tipos de fundação evidenciam a importância do conhecimento prévio das condições geotécnicas do terreno. Parâmetros como resistência à penetração, profundidade do nível de água, ocorrência de matacões, seixos e materiais impenetráveis influenciam diretamente a viabilidade técnica e econômica das soluções de fundação. Nesse contexto, os dados provenientes das investigações geotécnicas constituem a base para a elaboração das cartas geotécnicas e das cartas de aptidão à fundação desenvolvidas neste trabalho.

2.5. Banco de dados e SIG

A utilização de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) associada a técnicas de interpolação espacial tem se consolidado como uma importante ferramenta para análise, armazenamento e representação de dados geotécnicos. A crescente disponibilidade de bancos de dados provenientes de investigações geotécnicas, especialmente de sondagens à percussão (SPT), possibilitou o desenvolvimento de metodologias voltadas à espacialização de parâmetros geotécnicos e à elaboração de cartas temáticas para apoio ao planejamento urbano, projetos de fundações e avaliação de riscos geotécnicos.

Segundo Kokkala & Marinos (2022), bancos de dados geotécnicos estruturados permitem integrar informações geológicas, geotécnicas e espaciais em ambiente SIG, possibilitando análises que auxiliam tanto as etapas de planejamento quanto de implantação de obras de engenharia. Os autores destacam que a espacialização de dados geotécnicos constitui uma ferramenta relevante para o gerenciamento de áreas urbanas, permitindo identificar padrões de comportamento do subsolo e subsidiar processos de tomada de decisão.

Apenas reunir os dados como um inventário é insuficiente para realização da pesquisa, de tal forma que eles deverão ser organizados de modo a possibilitar a extração das informações desejadas com agilidade e qualidade. Nesse contexto, é possível observar que diferentes autores elaboraram banco de dados geotécnicos (BDG) para aplicação em cartografia geotécnica. Dentre eles, podemos citar o trabalho de Bozio (2022) que utilizou modelagem conceitual para padronizar, armazenar e disseminar dados geotécnicos e Oliveira (2023) que elaborou esquemas conceituais para dados geotécnicos e realizou a implementação de banco de dados geotécnicos tridimensionais (BDGT).

Segundo Santos (2016), o sistema de informação geográfica (SIG) organiza e armazena os dados nos formatos de tabelas, raster e vetoriais, em um banco de dados geográficos, onde os atributos descritivos ou numéricos são associados às feições geométricas. Portanto, quando os sistemas de gerenciamento de bancos de dados estão acoplados em SIG, as informações armazenadas apresentam um atributo específico de coordenada geográfica (dados georreferenciados), tornando-se assim um perfil adequado para implementação de um banco de dados geotécnicos (Soares, 2011).

Há no mercado diversos programas de geoprocessamento, sendo eles gratuitos ou pagos, suprindo necessidades específicas. Dentre os principais programas de SIG disponíveis no mercado, podem ser citados o *ArcGIS*, o QGIS e o SPRING, sendo o primeiro pago e os outros dois gratuitos. O *ArcGIS* é uma ferramenta produzida pela *Environmental Systems Research Institute* (ESRI), o programa QGIS é projeto oficial da *Open Source Geospatial Foundation* (*OSGeo*) e o SPRING foi produzido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

2.6. Cartografia geotécnica

De acordo com Zuquete & Gandolfi (1992), o conhecimento do meio físico (rochas, materiais inconsolidados, água, relevo, condições climáticas e suas inter-relações) por meio de mapeamento geotécnico é necessário para o planejamento adequado de uma região. Esse

conhecimento pode ser obtido por meio de um processo de mapeamento que analise o meio físico como um conjunto "e avalie o comportamento de seus componentes em termos de geotécnica e suas características de interesse à implementação das formas de ocupação".

2.6.1. Panorama dos trabalhos de cartografia geotécnica nacionais e internacionais

A literatura demonstra ainda que a espacialização de dados provenientes de sondagens permite a elaboração de uma ampla variedade de cartas geotécnicas. Entre as aplicações reportadas encontram-se cartas de valores de N_{SPT}, classificação dos solos, profundidade do nível freático, capacidade de carga, potencial de expansão, densidade seca, velocidade de propagação de ondas sísmicas, suscetibilidade à liquefação e aptidão geotécnica para fundações (Etemadifar *et al*., 2018 Al-Hashemi *et al*., 2018; Daniyal *et al*., 2022; Cruz *et al*., 2023).

No âmbito nacional, diferentes autores têm trabalhado com cartografia geotécnica para avaliação do comportamento do solo para auxílio do planejamento regional. Podem ser citados alguns exemplos, como o trabalho de Alves (2009) que realizou um mapeamento dos solos com diferentes adequabilidades à escavação no plano piloto de Brasília. Silva (2011) realizou cartografia geotécnica tridimensional do setor noroeste de Brasília.

Thiesen (2016) fez um estudo da profundidade do lençol freático, impenetrável ao SPT e tensão admissível para fundações rasas para zona urbana de Blumenau/SC. Santos (2016) realizou aplicação de SIG para análise do perfil geológico-geotecnico do Campus sede da UFSC e elaborou cartas de aptidão para fundações utilizando sondagem SPT. Garcia (2017) elaborou cartas geotécnicas das cotas de impenetrável e do nível freático para o município de Palmas/TO a partir de sondagens SPT. Castro (2018) também realizou estudo em Palmas, utilizando resistividade elétrica para identificar os principais tipos de solo encontrados na cidade e relacioná-los com intervalos característicos de resistividade elétrica, além de elaborar modelos geotécnicos a partir de dados de sondagem.

Oliveira (2018) trabalhou com cartografia geotécnica de grande escala baseada em mapeamentos e investigações de campo no setor habitacional Asa Taquari em Brasília/DF. Ahualli (2019) aplicou a cartografia geotécnica como subsídio para planejamento urbano no setor habitacional Fercal no Distrito Federal (DF). Almeida (2022) elaborou em seu trabalho cartas de resistência a penetração no setor habitacional Taquari em Brasília/DF. Esses estudos possibilitam o planejamento em diferentes áreas, evidenciando a importância de se desenvolver mais estudos na cidade de Palmas, que por ser relativamente nova possui poucos estudos acerca de seu solo.

Também foram observados estudos recentes internacionais com utilização de investigações geotécnicas integradas à aplicação de geoestatística para elaboração de cartas geotécnicas pertinentes à aptidão de fundação. O trabalho de Etemadifar *et al*. (2018) exemplifica esse cenário através da utilização da krigagem para elaboração de cartas do tipo de solo, N_{SPT} e densidade seca em Mashhad no Irã.

Celik *et al*. (2021) elaboraram cartas do N_{SPT} e lençol freático para mapeamento geotécnico de área urbana em desenvolvimento em Niğde, Turquia. Mohammed Ali & Shakir (2022) utilizaram IDW e krigagem para elaboração de cartas geotécnicas para a província de Thi Qar, Iraque.

Daniyal *et al*. (2022) elaboraram de cartas de N_{SPT}, lençol freático e capacidade de carga em Lahore, Paquistão. Além do mais, Cruz *et al*. (2023) realizaram modelagem geoestatística de dados de sondagem SPT para determinação do número mínimo e profundidade de futuras investigações geotécnicas em Los Baños, Filipinas.

A Tabela 2.5 apresenta um resumo de trabalhos de cartografia geotécnica nos âmbitos nacional e internacional supracitados.

Tabela 2.5 - Trabalhos nacionais e internacionais de cartografia geotécnica

Autor	**Descrição**
Alves (2009)	Mapeamento dos solos com diferentes adequabilidades à escavação no plano piloto de Brasília
Silva (2011)	Cartografia geotécnica tridimensional do setor noroeste de Brasília
Thiesen (2016)	Estudo da profundidade do lençol freático, impenetrável ao SPT e tensão admissível para fundações rasas para zona urbana de Blumenau/SC
Santos (2016)	Análise do perfil geológico-geotecnico do Campus sede da UFSC e elaboração de cartas de aptidão para fundações utilizando sondagem SPT
Garcia (2017)	Elaboração de cartas geotécnicas das cotas do impenetrável e do nível freático para o município de Palmas/TO

Castro (2018)	Investigação geotécnica no município de Palmas com uso de resistividade elétrica e elaboração de modelos geotécnicos através de dados de ensaios de sondagem
Oliveira (2018)	Cartografia geotécnica de grande escala baseada em mapeamentos e investigações de campo no setor habitacional Asa Taquari em Brasília/DF
Ahualli (2019)	Cartografia geotécnica para planejamento urbano no setor habitacional Fercal no Distrito Federal (DF)
Almeida (2022)	Cartas de resistência a penetração no setor habitacional Taquari em Brasília/DF
Etemadifar *et al*. (2018)	Cartas do tipo de solo, NSPT e densidade seca em Mashhad no Irã.
Celik *et al*., (2021)	Mapeamento geotécnico de área urbana em desenvolvimento em Niğde, Turquia
Mohammed Ali & Shakir (2022)	Cartas geotécnicas para a província de Thi Qar, Iraque
Daniyal *et al*. (2022)	Cartas de NSPT, lençol freático e capacidade de carga em Lahore, Paquistão
Cruz *et al*. (2023)	Modelagem geoestatística de dados de sondagem SPT para determinação do número mínimo e profundidade de futuras investigações geotécnicas em Los Baños, Filipinas

Nesse contexto, observa-se que a integração entre investigações geotécnicas, geoestatística e ferramentas SIG constitui uma abordagem consolidada para representação espacial das condições do subsolo. A ampla utilização dessas técnicas em diferentes contextos geológicos e geotécnicos evidencia seu potencial para apoiar estudos de planejamento territorial, caracterização geotécnica regional e seleção preliminar de soluções de fundação.

2.6.2. Escala de trabalho

Zuquete & Gandolfi (2004) apresentaram metodologias de mapeamento geotécnico que são amplamente utilizadas em trabalhos brasileiros, as quais foram desenvolvidas pelos: Departamento de Geologia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), Departamento de Geotecnia da Escola

de Engenharia de São Carlos (EESC/USP), Grupo de Geotecnia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Instituto Geológico de São Paulo (IG/SP) e Universidade Estadual de São Paulo (Unesp).

Ademais, Carvalho (2014) apresentou metodologias internacionais utilizadas por trabalhos brasileiros. Segundo o autor, dentre as diversas metodologias internacionais existentes, as mais utilizadas em trabalhos brasileiros são: IAEG, metodologia Francesa, metodologia Zermos (Zonas Expostas ao Movimento dos Solos), metodologia *PUCE* (*Pattern, Unity, Component, Evaluation*) e a metodologia Mathewson & Font.

Para o trabalho em questão, foi utilizado o método da EESC/USP, que traz uma recomendação para densidade de amostragem visando apurar os atributos escolhidos de acordo com a escala adotada, conforme a Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Densidade de amostragem no mapeamento geotécnico (modificado – Zuquete em 1993, citado por Thiesen, 2016)

Finalidade do mapeamento geotécnico	**Escala**	**Atributos**					
		Qualitativos				**Quantitativos**	
		Metamórficas e Ígneas		**Sedimentares**		**Geral**	
		Observações/ km²	**Distância entre os pontos observados (m)**	**Observações/ km²**	**Distância entre os pontos observados (m)**	**Observações/ km²**	**Distância entre os pontos observados (m)**
Básico	1:250.000	1/10	3162	1/10	3162	1/10	3162
Regional	1:100.000	4/10	1581	3/10	1826	2/10	2236
	1:50.000	6/5	913	1/1	1000	3/10	1826
	1:25.000	3/1	577	2/1	707	1/1*	1000
Detalhe	1:25.000	5/1	447	4/1	500	4/1*	500
	1:10.000	15/1	258	15/1	258	10/1	316
	1:5.000	25/1	200	20/1	224	15/1	258
	1:2.000	40/1	158	35/1	169	25/1	200

* Valores alterados conforme contato de Thiesen realizado com Prof. Zuquette em 29/4/2016

Além da densidade de amostragem recomendada para cada escala de trabalho, a definição da escala cartográfica também está diretamente relacionada à resolução espacial dos dados utilizados na representação do fenômeno estudado. Sendo que, no domínio digital, a resolução espacial da base de dados aparenta ser uma dimensão mais relevante que a escala, de forma a

ser um dos elementos de controle para a generalização, assim como a escala é no domínio analógico (INPE, 2001). O instituto também destaca que a escala também se torna um elemento de controle quando há preocupação com a visualização dos dados.

Dessa forma, a resolução espacial consiste na abrangência da área de estudo dividida pelo número de observações dispostas, conforme Equação 2.2 em Tobler, 1979 citado por Thiesen (2016).

$$R = \sqrt[2]{\frac{Área}{Número\ de\ observações}} \tag{2.2}$$

Onde R corresponde à resolução espacial.

Sendo que, uma alta resolução espacial se relaciona a um maior nível de detalhes dos elementos, ou seja, um maior número de observações.

Dessa forma, a definição da escala de trabalho deve considerar simultaneamente a finalidade do mapeamento, a densidade de observações disponíveis e a resolução espacial dos dados, de modo a garantir compatibilidade entre o nível de detalhe pretendido e a confiabilidade das interpretações realizadas.

2.7. Estatística e métodos de interpolação

A análise estatística constitui uma etapa fundamental no tratamento e interpretação de dados geotécnicos, permitindo a caracterização do conjunto amostral por meio de medidas de tendência central, dispersão e distribuição dos valores observados. Entretanto, as técnicas estatísticas convencionais consideram apenas os atributos numéricos das observações, sem incorporar explicitamente sua localização espacial. Dessa forma, embora sejam essenciais para compreender o comportamento dos dados, não permitem representar a continuidade espacial das variáveis investigadas.

Dessa forma, podem ser empregadas técnicas de interpolação espacial, capazes de estimar valores em locais não amostrados a partir de observações pontuais georreferenciadas. Essas técnicas permitem gerar superfícies contínuas, sendo amplamente utilizadas em cartografia geotécnica. Dentre os métodos disponíveis, destacam-se os métodos geoestatísticos, que consideram a dependência espacial entre as observações, e os métodos determinísticos, que

realizam estimativas com base apenas nos valores amostrados e em suas relações geométricas. Neste trabalho serão abordados o método geoestatístico krigagem, o método determinístico inverso ponderado da distância (IDW) e os métodos de geração de superfícies TIN e *Topo to Raster*, amplamente empregados na modelagem digital do terreno.

2.7.1. Estatística Descritiva

Segundo Andriotti (2004), a estatística descritiva tem como finalidade organizar, resumir e apresentar conjuntos de dados por meio de tabelas, gráficos e medidas numéricas, permitindo uma compreensão inicial do comportamento das variáveis analisadas. No contexto das geociências, a análise exploratória dos dados constitui etapa fundamental para identificação de tendências, dispersão, assimetria e possíveis valores anômalos, servindo de base para as análises geoestatísticas subsequentes. Os gráficos mais usuais para a apresentação de dados são o histograma, a curva de distribuição acumulada e a distribuição espacial dos pontos (Yamamoto & Landim, 2013).

Segundo Yamamoto & Landim (2013), as observações das representações gráficas, tem apenas caráter qualitativo, de modo que a descrição quantitativa da distribuição de frequências pode ser obtida por meio da estatística descritiva: média, variância, coeficiente de variação, assimetria e curtose. O Quadro 2.5 abaixo apresenta as principais medidas da estatística descritiva.

Quadro 2.5 - Principais medidas utilizadas na estatística descritiva (Modificado - Yamamoto & Landim, 2013).

Medida	Descrição
Média ($\bar{x}$)	Valor médio da variável analisada.
Mediana	Valor que divide a amostra em duas partes iguais.
Moda	Valor mais frequente da distribuição.
Variância (S^2)	Mede a dispersão dos dados em torno da média.
Desvio Padrão (S)	Raíz quadrada da variância. Mede a variabilidade dos dados na mesma unidade da variável.
Coeficiente de variação	Relação entre o desvio padrão e a média, utilizada para avaliar a heterogeneidade dos dados.
Assimetria	Indica o grau de simetria da distribuição dos dados. Valores positivos indicam distribuições com cauda mais longa à direita, enquanto valores negativos indicam distribuições com cauda

	mais longa à esquerda. Valores próximos de zero indicam distribuições aproximadamente simétricas.
Curtose	Indica o grau de concentração dos dados em torno da média.

Segundo Landim (2010), os métodos clássicos de análise estatística não levam em consideração a localização dos pontos de amostragem, nem as relações espaciais entre os valores encontrados, de modo que a geoestatística vem sendo desenvolvida para encontrar soluções para essa problemática.

2.7.2. Krigagem

Segundo Yamamoto & Landim (2013), a krigagem é um processo geoestatístico de valores de variáveis distribuídas no espaço e/ou tempo, com base em valores adjacentes quando considerados interdependentes pela análise variográfica, apresentando estimativas não tendenciosas e a mínima variância associada ao valor estimado. Segundo o autor, as estimativas geoestatísticas são geralmente superiores aos demais métodos de interpolação por conta do uso da função variograma que depende da existência ou não do efeito pepita, da amplitude e da presença de anisotropia.

Thiesen (2016) diz que a krigagem possui mecanismo de interpolação similar ao inverso ponderado da distância, diferindo desse pelo fato de que os pesos no método de krigagem são definidos a partir da análise espacial fundamentada no semivariograma experimental, atribuindo pesos diferentes à suas amostras. Por considerar o comportamento espacial da variável estudada, o método é frequentemente apontado como uma das abordagens mais robustas para espacialização de parâmetros geotécnicos.

De acordo com Yamamoto (2020), o semivariograma experimental é construído a partir do cálculo da variância das diferenças entre pares de dados separados por uma certa distância, permitindo representar graficamente a intensidade e o alcance da autocorrelação espacial existente. Essa estrutura espacial é expressa por meio de três parâmetros principais: o efeito pepita, que indica a variabilidade em escalas menores que a menor distância entre amostras; o patamar, que representa a variância total da variável; e o alcance, que define o limite da influência espacial entre os pontos (Yamamoto, 2020). Sendo assim, a correta interpretação do semivariograma é essencial para o ajuste de modelos teóricos, etapa indispensável na aplicação da krigagem, já que os pesos atribuídos às amostras são derivados diretamente dessa estrutura espacial. A Figura 2.15 apresenta as propriedades típicas de um variograma com patamar.

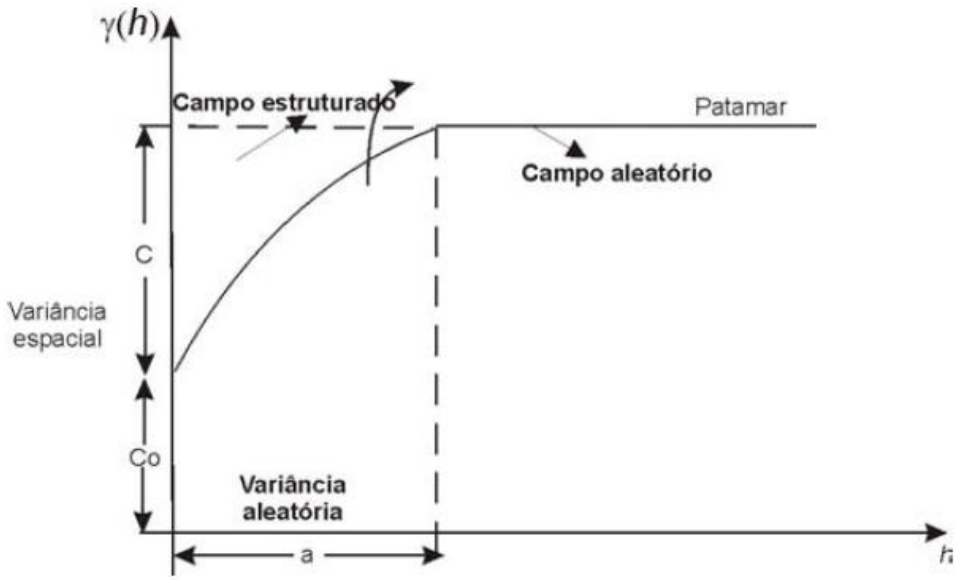


Figura 2.15 – Propriedades um típico variograma (Landim, 2010)

Na abcissa do semivariograma são apresentados os valores de distância e na ordenada os correspondentes semivariogramas (h). Teoricamente, o semivariograma teria seu início na origem do gráfico, mas sempre ocorre algum nível de ruído, conhecido por efeito pepita (C_0). O alcance (a) representa a distância alcançada pelos variogramas. A partir do final do alcance não há mais dependência espacial entre as amostras. Além desses, é possível observar no semivariograma o patamar (C). Através do semivariograma é possível expressar o comportamento das variáveis regionalizadas e abrangência da zona de influência, erros de amostragem, parâmetros anistrópicos e elementos aleatórios.

Yamamoto & Landim (2013) apresentou uma forma de obter o grau de aleatoriedade dos dados da amostra através da razão entre C_0/C, onde a divisão o classifica em componente aleatória pequena ($\frac{C_0}{C} < 0{,}15$), significativa ($0{,}15 < \frac{C_0}{C} < 0{,}30$) ou muito significativa ($\frac{C_0}{C} > 0{,}30$), de tal forma que o extremo dessa situação é o modelo efeito pepita puro, em que não ocorre correlação entre os valores, não se aplicando a análise semivariográfica e sendo sugerido o uso de outros métodos de interpolação.

Os modelos de variogramas teóricos com paramar mais comumente utilizados para explicar a variabilidade dos fenômenos espaciais são: esférico, exponencial, gaussiano, cúbico, pentaesférico e efeito furo (Yamamoto & Landim, 2013). A Tabela 2.7 abaixo apresenta as equações dos modelos teóricos previamente citados.

Tabela 2.7 - Modelos teóricos de variogramas (modificado - Olea em 1999, citado por Yamamoto & Landim, 2013)

Modelo	**Equação**
Esférico	$y(h) = C_0 + C\left[1{,}5\frac{h}{a} - 0{,}5\left(\frac{h}{a}\right)^3\right]$ para $h < a$ $y(h) = C_0 + C$ para $h \geq a$
Exponencial	$y(h) = C_0 + C\,.\left[1 - \exp\left(-\frac{h}{a}\right)\right]$
Gaussiano	$y(h) = C_0 + C\left[1 - \exp\left(-\left(\frac{h}{a}\right)^2\right)\right]$
Cúbico	$y(h) = C_0 + C\left[7(\frac{h}{a})^2 - \frac{35}{4}\left(\frac{h}{a}\right)^3 + \frac{7}{2}\left(\frac{h}{a}\right)^5 - \frac{3}{4}\left(\frac{h}{a}\right)^7\right]$ para $h < a$ $y(h) = C_0 + C$ para $h \geq a$
Pentaesférico	$y(h) = C_0 + C\left[\frac{15}{8}\left(\frac{h}{a}\right) - \frac{5}{4}\left(\frac{h}{a}\right)^3 + \frac{3}{8}\left(\frac{h}{a}\right)^5\right]$ para $h < a$ $y(h) = C_0 + C$ para $h \geq a$
Efeito furo	$y(h) = C_0 + C\left[1 - \frac{\text{sen}\,\pi\left(\frac{h}{a}\right)}{\pi\left(\frac{h}{a}\right)}\right]$

Por considerar o comportamento espacial da variável estudada, a krigagem é frequentemente apontada como uma das abordagens mais robustas para espacialização de parâmetros geotécnicos. Isso foi exemplificado no trabalho de Awan *et al*. (2022), que ao desenvolverem modelos de visualização tridimensional do subsolo a partir de dados de sondagens SPT em áreas de difícil acesso, destacaram a krigagem como uma das técnicas de interpolação mais adequadas para espacialização de informações geotécnicas. De forma semelhante, Cruz *et al*. (2023) utilizaram modelagem geoestatística baseada em krigagem para estimativa espacial de valores de N_{SPT}, obtendo resultados consistentes para definição de futuras campanhas de investigação geotécnica.

A aplicabilidade da krigagem também foi demonstrada por Etemadifar *et al*. (2018), que empregaram o método para espacialização de propriedades geotécnicas do solo, incluindo textura, densidade seca e valores de resistência à penetração. Os autores concluíram que a abordagem permitiu representar adequadamente a heterogeneidade espacial das variáveis analisadas. Da mesma forma, Rehman *et al*. (2021) utilizaram krigagem ordinária para elaboração de cartas de capacidade de carga e potencial de expansão dos solos, evidenciando o

potencial da técnica para representação espacial de parâmetros geotécnicos de interesse em engenharia.

2.7.3. Inverso ponderado da distância

O método Inverso Ponderado da Distância ou "*Inverse Distance Weighting*" (IDW) é uma técnica de interpolação determinística amplamente utilizada em análises espaciais, que atribui maior influência aos pontos amostrais mais próximos da estimativa. Segundo Yamamoto (2020), o IDW calcula os valores interpolados por meio de uma média ponderada, na qual os pesos são inversamente proporcionais à distância entre o ponto a ser estimado e os pontos amostrados, geralmente elevados a uma potência (p), que controla o grau de influência da vizinhança.

De acordo com Soares (2011), a influência de um ponto amostrado em relação a outro diminui conforme aumenta a distância ao nó do "grid" a ser estimado, de tal forma que quanto mais próximo um ponto está do outro mais seus valores se aproximam. Segundo Yamamoto (2020), o método desconsidera a estrutura espacial da variabilidade dos dados, o que pode gerar resultados menos precisos em comparação com técnicas geoestatísticas, como a krigagem. Ainda assim, por sua facilidade de aplicação e baixo custo computacional, o IDW é bastante utilizado em aplicações preliminares ou quando o número de amostras disponíveis é limitado.

Embora a krigagem seja amplamente empregada, diversos autores destacam que métodos determinísticos também podem apresentar desempenho satisfatório em análise de dados geotécnicos. Daniyal *et al*. (2022) compararam a aplicação da krigagem e do método IDW na espacialização de valores de N_{SPT}, profundidade do lençol freático, capacidade de carga e propriedades geofísicas do solo. Os resultados indicaram que o IDW apresentou menor erro médio quadrático para o conjunto de dados analisado, produzindo superfícies consideradas mais representativas para a área de estudo.

Resultados semelhantes foram observados por Al-Hashemi *et al*. (2018), que utilizaram diferentes métodos de interpolação para elaboração de cartas geotécnicas associadas ao projeto de fundações em solos problemáticos na Arábia Saudita. Os autores verificaram que o método IDW apresentou melhor desempenho na espacialização dos valores de N_{SPT} quando comparado a outras técnicas avaliadas.

Por outro lado, Boumpoulis *et al*. (2021), ao analisarem dados provenientes de ensaios SPT e CPT para avaliação do potencial de liquefação dos solos, verificaram que a krigagem

apresentou melhor desempenho estatístico que o método IDW, produzindo menores erros e maiores coeficientes de determinação. Esse resultado evidencia que não existe um método universalmente superior, sendo a escolha dependente das características do conjunto de dados, da densidade amostral e da estrutura de variabilidade espacial da variável analisada.

2.7.4. Rede Triangular Irregular e Topo To Raster

Na "Triangular Irregular Network" (TIN) ou Rede Triangular Irregular (RTI), são criados triângulos a partir dos pontos originais de entrada, de tal modo que nenhum desses triângulos intercepte o outro, formando assim uma rede triangular irregular.

Segundo Landim (2000), esse é considerado um método direto devido ao fato de os contornos derivarem do padrão original dos dados, sendo um método fácil de ser entendido, fiel aos dados originais e bom para uma visualização rápida, mas como gera superfícies triangulares, não é indicado para mapas que devem apresentar contornos suaves, além de que valores abaixo ou acima dos reais não podem ser extrapolados e as estimativas se limitam estritamente à área amostrada.

A RTI permite a criação de uma superfície contínua representada por triângulos conectados, onde cada ponto é um vértice da triangulação, possuindo propriedades únicas que a tornam uma ferramenta valiosa para inúmeras aplicações, como interpolação de dados, geração de malhas para modelagem 3D e análise de superfícies.

Além da krigagem e do IDW, outras metodologias têm sido empregadas em aplicações específicas. Kokkala & Marinos (2022) compararam os métodos IDW, krigagem ordinária e *Topo to Raster*, concluindo que este último apresentou melhor desempenho em situações caracterizadas por variações espaciais abruptas. De forma semelhante, Stalin & Murugan (2015) avaliaram diferentes métodos de interpolação, incluindo IDW, krigagem, RTI e *Topo to Raster*, identificando vantagens deste último na geração de determinadas superfícies espaciais.

Segundo Soares (2011), o método *Topo to Raster* é uma técnica de interpolação baseada em funções *spline*, as quais promovem a suavização da superfície resultante e passam pelos pontos amostrais utilizados na interpolação. Desenvolvido especificamente para a geração de Modelos Digitais de Terreno (MDT) hidrologicamente consistentes, o método pode utilizar, como dados de entrada informações provenientes de curvas de nível, pontos cotados e, quando disponíveis, elementos de drenagem para produzir superfícies contínuas, preservando características geomorfológicas relevantes do relevo, como vales e divisores de água, além de

reduzir a ocorrência de depressões artificiais (*sinks*). Essas características tornam o método amplamente empregado na elaboração de modelos digitais de terreno e superfícies topográficas.

Dessa forma, os métodos de interpolação analisados apresentam características distintas quanto ao tratamento dos dados e à representação espacial das variáveis estudadas. Considerando a necessidade de obtenção de um Modelo Digital de Terreno contínuo e consistente para representação do relevo da área de estudo, adotou-se o método *Topo to Raster* para a elaboração do Modelo Digital de elevação (MDE) utilizado neste trabalho. A aplicação do método e os procedimentos adotados são apresentados no capítulo de metodologia.

3. METODOLOGIA

Este capítulo apresenta os procedimentos metodológicos adotados para a elaboração das cartas geotécnicas de aptidão à fundação da área de estudo. A abordagem metodológica proposta integra dados oriundos de sondagens geotécnicas, informações geoespaciais e técnicas de análise em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), com o objetivo de representar a variabilidade espacial dos parâmetros geotécnicos e orientar a escolha de diferentes soluções de fundação.

Inicialmente, são descritas as etapas de aquisição e organização dos dados, incluindo a estruturação do Banco de Dados Geotécnico (BDG) e a delimitação da área de estudo. Em seguida, são apresentados os procedimentos de processamento em ambiente SIG, abrangendo o georreferenciamento dos dados, a caracterização da área e a definição da escala de trabalho.

Posteriormente, são detalhados os métodos utilizados para a elaboração das cartas geotécnicas derivadas dos resultados das sondagens, incluindo a modelagem espacial do impenetrável ao SPT, do nível de água, dos valores de N_{SPT} por camada e do tipo de solo predominante. Por fim, são descritos os critérios e modelos lógicos adotados para a integração dessas variáveis na elaboração das cartas de aptidão à fundação, considerando diferentes soluções executivas.

A metodologia proposta busca garantir coerência física, consistência espacial e aplicabilidade prática dos resultados, sendo estruturada de forma a permitir a reprodução das etapas e a adaptação para outras áreas com características semelhantes.

3.1. Estrutura da metodologia

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada em etapas sequenciais, envolvendo a aquisição e tratamento dos dados, o processamento em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), a elaboração das cartas derivadas e, por fim, a geração das cartas de aptidão à fundação.

Inicialmente, foram reunidos dados geoespaciais de diferentes temáticas, resultados de sondagens geotécnicas e de projetos de fundação, os quais foram organizados e estruturados em banco de dados geotécnico. Em seguida, esses dados foram processados em ambiente SIG, incluindo etapas de georreferenciamento, elaboração de mapas temáticos e geração do Modelo Digital de Elevação (MDE).

Posteriormente, foi realizada a interpolação espacial das variáveis geotécnicas, permitindo a elaboração das cartas derivadas dos dados obtidos nas sondagens. A partir dessas cartas, foram desenvolvidas as cartas de aptidão à fundação, com base em modelos lógicos que integram critérios geotécnicos e executivos.

A Figura 3.1 apresenta o fluxograma geral da metodologia adotada, sintetizando as principais etapas do estudo.

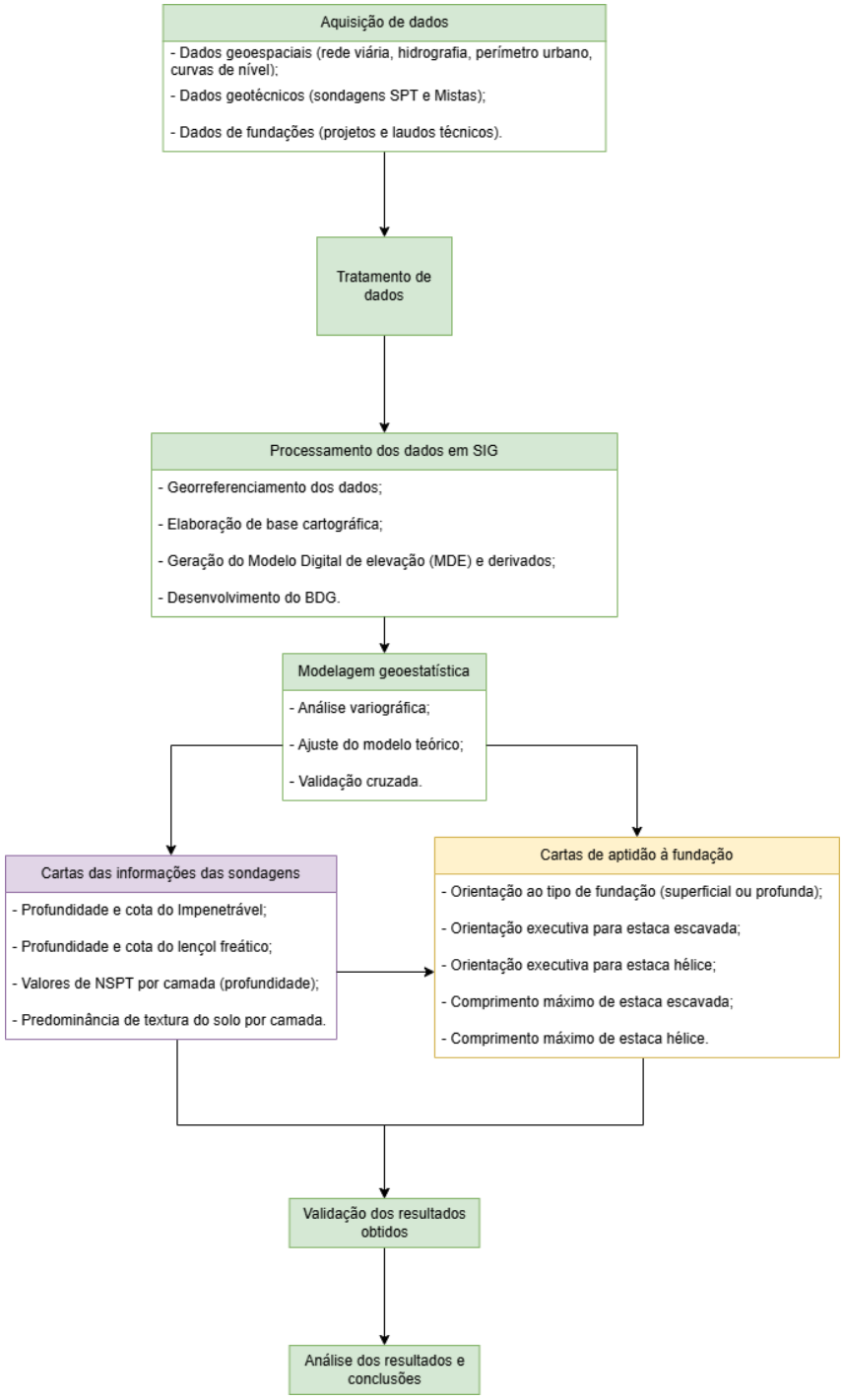


Figura 3.1 - Fluxograma da abordagem metodológica aplicada no presente trabalho.

3.2. Aquisição e tratamento dos dados

Neste item serão apresentadas as etapas de aquisição e estruturação dos dados, de modo a permitir sua aplicabilidade em ambiente SIG.

3.2.1. Aquisição de dados

Foram adquiridos e organizados dados geográficos e geotécnicos provenientes de diferentes fontes, com o objetivo de subsidiar as análises desenvolvidas neste estudo. Os dados geográficos incluíram informações vetoriais de vias urbanas, hidrografia e curvas de nível com equidistância vertical de 1 metro, obtidas junto à plataforma GeoPalmas[1] (PALMAS, 2026) Adicionalmente, foram utilizados dados oficiais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025), incluindo limites administrativos e informações geológicas provenientes do Serviço Geológico do Brasil – CPRM (Sachs; Araújo; Godoy, 2020), bem como modelos digitais de elevação.

Os dados geotécnicos consistiram em informações provenientes de sondagens à percussão (SPT) e sondagens mistas executadas no município de Palmas/TO, obtidas junto a empresas executoras desse tipo de investigação. No total, foram adquiridas 2.610 sondagens, das quais 2.519 foram efetivamente utilizadas nas análises do estudo, após procedimentos de verificação, padronização e consistência dos dados. Também foram coletadas informações complementares referentes a projetos de fundação e relatórios de execução de estacas, incluindo dados de monitoramento de estacas hélice contínua, utilizados posteriormente para fins de validação dos resultados obtidos.

Os dados de sondagem passaram por um processo de organização e conferência, incluindo a separação dos registros por localização, padronização das informações e vinculação aos respectivos relatórios técnicos. Esse procedimento teve como objetivo evitar duplicidades, assegurar a rastreabilidade dos dados e garantir consistência para as etapas subsequentes de análise.

Todos os dados foram organizados em estrutura de pastas e planilhas, de modo a possibilitar sua integração e posterior utilização em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

[1] https://geo.palmas.to.gov.br/

3.2.2. Estruturação do banco de dados geotécnico (BDG)

A partir dos dados coletados, foi estruturado um banco de dados geotécnico (BDG), com o objetivo de consolidar e padronizar as informações provenientes das sondagens, viabilizando sua utilização em ambiente SIG e a aplicação de técnicas de análise geoestatística.

Inicialmente, foi adotado o sistema de coordenadas *Universal Transverse Mercator* (UTM), referenciado ao sistema SIRGAS 2000, zona 22S, garantindo a compatibilidade espacial entre os diferentes conjuntos de dados utilizados. Para os boletins de sondagem que não apresentavam coordenadas geográficas, estas foram obtidas a partir de informações de localização disponíveis nos relatórios técnicos, assegurando a espacialização adequada dos pontos.

As informações geotécnicas extraídas dos laudos de sondagem incluíram, principalmente, a profundidade do impenetrável à percussão (m), a profundidade do nível de água (m), os valores do índice de resistência à penetração (N_{SPT}) a cada metro e a classificação do tipo de solo ao longo do perfil.

Nos casos em que foram identificados registros associados a um mesmo ponto de sondagem, decorrentes de deslocamentos próximos do furo original em situações previstas no item 5.2.4.7 da NBR 6484 (ABNT, 2020), foi mantido no banco de dados apenas o registro correspondente à maior profundidade efetivamente investigada. Esse procedimento teve como objetivo evitar duplicidade espacial de informações muito próximas e reduzir a influência de interrupções localizadas, preservando o registro mais representativo das condições geotécnicas do subsolo.

Para a análise do N_{SPT} e do tipo de solo predominante, os dados foram organizados por camadas do perfil do solo, adotando-se discretização vertical de um metro. Considerou-se como primeira camada válida para análise corresponde ao intervalo entre 1,0 m e 2,0 m de profundidade, uma vez que não há medição de N_{SPT} na camada superficial (0 a 1 m).

No caso da profundidade do impenetrável à percussão, foram considerados apenas os registros que atenderam aos critérios estabelecidos pela NBR 6484 vigente à época da execução da sondagem, incluindo a NBR 6484 (ABNT, 2001) para investigações anteriores à revisão normativa mais recente e a NBR 6484 (ABNT, 2020) para sondagens executadas posteriormente a revisão. Dessa forma, foram excluídos os casos em que o impenetrável não foi alcançado por limitações operacionais ou interrupções da sondagem por motivos alheios às condições do solo. As informações obtidas nos trechos efetivamente investigados foram

mantidas no BDG e utilizadas nas análises das demais variáveis, conforme sua disponibilidade e a profundidade alcançada.

Para a profundidade do lençol freático, foram extraídos dos laudos os valores observados após o período de estabilização de 24 horas, conforme procedimento estabelecido pela NBR 6484 (ABNT, 2020), sendo considerados representativos da posição do nível de água no momento da investigação.

A Figura 3.2 apresenta a estrutura do banco de dados geotécnico (BDG), evidenciando a organização das informações por furo de sondagem e por camadas do perfil do solo. Dessa forma, o banco foi estruturado de modo a integrar, para cada furo, dados de identificação, localização, características gerais do ensaio e informações geotécnicas por camada, incluindo valores de N_{SPT} e classificação do tipo de solo. Essa organização possibilitou a análise vertical detalhada dos perfis, bem como a identificação de possíveis inconsistências, contribuindo para o controle de qualidade do BDG.

ID_FURO	TIPO_SOND	CÓDIGO	ENDEREÇO	E_UTM	N_UTM	COTA_CAM	PROF_SOND	PROF_IMP	PROF_NA	COTA_NA	DIA	MES	PERIODO	CAMADA	NSPT	CLASSIFICA	SOLO_1	SOLO_2	SOLO_3	COD_SOLO
1	SPT	SP_01/2025 - SP 01	Q. 407 SUL, AL...	789992	8870685	238	17,2	17,2	10,4	227,6	3	1	ÚMIDO	0		Areia argilosa, marrom	S	C		2
1	SPT	SP_01/2025 - SP 01	Q. 407 SUL, AL...	789992	8870685	237	17,2	17,2	10,4	227,6	3	1	ÚMIDO	1	5	Argila arenosa, marrom	C	S		0
1	SPT	SP_01/2025 - SP 01	Q. 407 SUL, AL...	789992	8870685	236	17,2	17,2	10,4	227,6	3	1	ÚMIDO	2	2	Argila arenosa, marrom	C	S		0
1	SPT	SP_01/2025 - SP 01	Q. 407 SUL, AL...	789992	8870685	235	17,2	17,2	10,4	227,6	3	1	ÚMIDO	3	4	Argila arenosa, marrom	C	S		0
1	SPT	SP_01/2025 - SP 01	Q. 407 SUL, AL...	789992	8870685	234	17,2	17,2	10,4	227,6	3	1	ÚMIDO	4	5	Argila arenosa, marrom	C	S		0
1	SPT	SP_01/2025 - SP 01	Q. 407 SUL, AL...	789992	8870685	233	17,2	17,2	10,4	227,6	3	1	ÚMIDO	5	4	Argila arenosa, marrom	C	S		0
1	SPT	SP_01/2025 - SP 01	Q. 407 SUL, AL...	789992	8870685	232	17,2	17,2	10,4	227,6	3	1	ÚMIDO	6	11	Argila arenosa, marrom	C	S		0
1	SPT	SP_01/2025 - SP 01	Q. 407 SUL, AL...	789992	8870685	231	17,2	17,2	10,4	227,6	3	1	ÚMIDO	7	12	Argila arenosa, marrom	C	S		0
1	SPT	SP_01/2025 - SP 01	Q. 407 SUL, AL...	789992	8870685	230	17,2	17,2	10,4	227,6	3	1	ÚMIDO	8	14	Areia fina, cinza	S			2
1	SPT	SP_01/2025 - SP 01	Q. 407 SUL, AL...	789992	8870685	229	17,2	17,2	10,4	227,6	3	1	ÚMIDO	9	15	Areia fina, cinza	S			2

Figura 3.2 - Recorte do banco de dados geotécnico (BDG) elaborado para a pesquisa.

Legenda: ID_FURO, TIPO_SOND, CÓDIGO e ENDEREÇO – identificação, tipo, código original e localização do furo de sondagem; E_UTM e N_UTM – coordenadas planas no sistema UTM; COTA_CAM – cota do topo da camada analisada; PROF_SOND – profundidade total sondada; PROF_IMP – profundidade do impenetrável SPT; PROF_NA e COTA_NA – profundidade e cota do N.A.; DIA, MÊS e PERÍODO – informações temporais da sondagem; CAMADA – camada do perfil geotécnico considerada na análise; NSPT – índice de resistência à penetração associado à camada; CLASSIFICA – classificação tátil-visual do material; SOLO_1, SOLO_2 e SOLO_3 – constituintes da classificação do solo, sendo C = argila, M = silte, S = areia, G = pedregulho e R = rocha; COD_SOLO – código numérico da classe principal de solo, sendo 0 = argila, 1 = silte, 2 = areia, 3 = pedregulho e 4 = rocha.

Nota: cada linha do BDG corresponde a uma camada de 1 m de espessura associada a um determinado furo de sondagem. A variável CAMADA identifica esses intervalos, sendo 0 = 0–1 m, 1 = 1–2 m, 2 = 2–3 m, e assim sucessivamente. Por isso, as informações gerais do furo são repetidas nas diferentes camadas do mesmo perfil. Na

camada 0, a COTA_CAM corresponde à cota da boca do furo/terreno natural, não sendo atribuído valor de NSPT nesse registro.

De modo geral, as informações relativas à identificação, localização e características gerais das sondagens foram associadas a todas as camadas do perfil, sendo repetidas em cada registro correspondente à profundidade analisada. Por outro lado, as variáveis dependentes da profundidade, como os valores de N_{SPT} e a classificação do tipo de solo, foram organizadas por camada, permitindo a representação detalhada do perfil geotécnico ao longo da profundidade e sua utilização em análises estratificadas.

A estruturação do BDG constituiu etapa fundamental para o desenvolvimento do estudo, permitindo a integração consistente dos dados geotécnicos com ferramentas de análise espacial e fornecendo a base necessária para a elaboração das cartas geotécnicas e das cartas de aptidão à fundação.

3.3. Processamento dos dados em ambiente SIG

Com o banco de dados geotécnico devidamente estruturado e a disponibilidade dos dados geográficos, procedeu-se ao processamento das informações em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG). Para o desenvolvimento das análises espaciais, foi utilizado o programa ArcGIS Pro (Esri), disponibilizado por meio de licença acadêmica concedida pelo Instituto de Geociências da Universidade de Brasília.

3.3.1. Georreferenciamento dos dados

Para garantir a consistência espacial entre os diferentes conjuntos de dados utilizados, foi padronizado o sistema de referência espacial para o sistema SIRGAS 2000, projeção UTM, zona 22S (EPSG 31982).

Os dados vetoriais obtidos em diferentes sistemas de referência, como WGS84 e SAD69, foram convertidos para o sistema adotado por meio das ferramentas de projeção disponíveis no ambiente SIG, assegurando a compatibilidade entre as bases utilizadas.

Os pontos de sondagem provenientes do banco de dados geotécnico (BDG) foram inseridos diretamente no sistema de referência SIRGAS 2000, garantindo sua correta localização espacial e integração com os demais dados geográficos.

Adicionalmente, foi realizada a verificação da coerência espacial dos dados georreferenciados, por meio da análise da distribuição dos pontos de sondagem em relação aos

limites administrativos, à rede viária e à hidrografia, permitindo identificar e corrigir eventuais inconsistências de posicionamento. Esse procedimento assegurou a integridade espacial do conjunto de dados, constituindo etapa fundamental para a realização das análises em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas.

3.3.2. Delimitação da área de estudo e compartimentação para análises geoestatísticas

A delimitação da área de estudo e sua compartimentação constituíram etapas fundamentais para a organização das análises geoestatísticas realizadas neste trabalho. Inicialmente, foi estabelecido o limite espacial das análises, considerando a disponibilidade e a consistência das bases topográficas e dos dados de sondagem. Em seguida, foram avaliadas subdivisões da área com base em critérios geológicos e na densidade amostral, de modo a verificar a influência dessas condições na representação espacial dos parâmetros geotécnicos.

3.3.2.1. Delimitação da área de estudo

A área de estudo deste trabalho corresponde ao perímetro urbano do município de Palmas, com foco no Plano Diretor Municipal. Entretanto, sua delimitação foi definida com base na disponibilidade e na confiabilidade dos dados topográficos utilizados nas análises.

Adotou-se como limite da área de estudo o perímetro de cobertura das curvas de nível disponibilizadas pelo GeoPalmas (PALMAS, 2026), as quais abrangem praticamente toda a área do Plano Diretor Municipal, conforme ilustrado na Figura 3.3. Essa delimitação foi adotada de modo a garantir a geração de um Modelo Digital de Elevação (MDE) contínuo e consistente, evitando a necessidade de integração com modelos altimétricos de diferentes resoluções e origens.

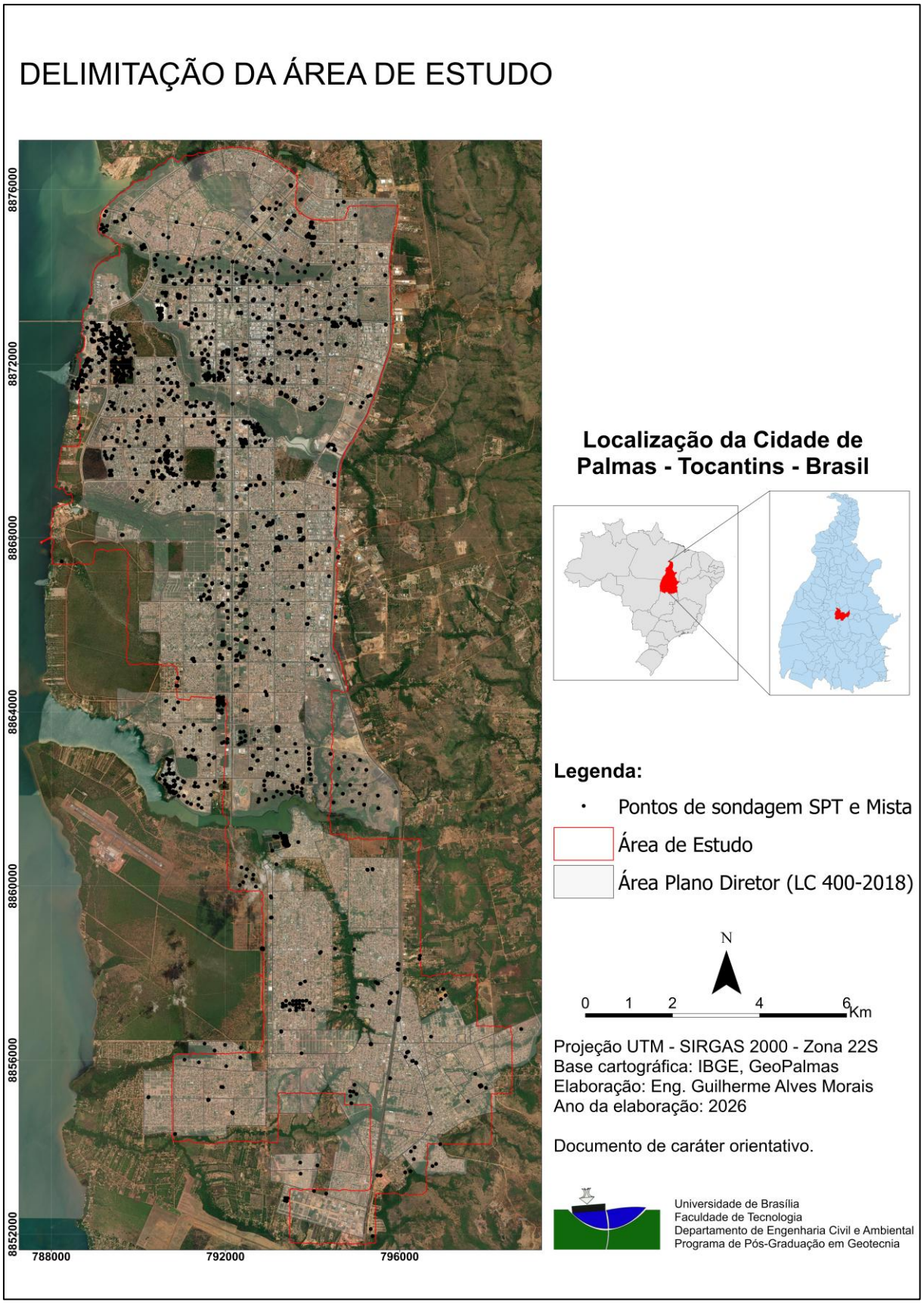


Figura 3.3 - Delimitação da área de estudo em relação ao Plano Diretor Municipal.

Optou-se por não realizar o preenchimento das áreas sem cobertura de curvas de nível por meio de Modelos Digitais de Elevação (MDE) de menor resolução, uma vez que essa abordagem implicaria a combinação de dados com escalas distintas, podendo introduzir descontinuidades nas análises baseadas em cota altimétrica. Considerando que as áreas não cobertas representam parcela reduzida da área urbana analisada, optou-se por sua exclusão com o objetivo de preservar a homogeneidade e a confiabilidade da base altimétrica utilizada. Ressalta-se, contudo, que essa delimitação deixou de contemplar alguns setores urbanizados e áreas recentes de expansão urbana.

Do total de 2.519 furos de sondagem inseridos no perímetro urbano de Palmas, 2.004 (aproximadamente 80%) encontram-se dentro da área delimitada, garantindo representatividade amostral adequada para as análises geotécnicas realizadas.

Dessa forma, a área de estudo não corresponde estritamente ao limite administrativo do Plano Diretor, mas sim à área com suporte altimétrico confiável, condição necessária para a geração do MDE, dos produtos dele derivados e das análises relacionadas à cota do nível de água. Para os atributos geotécnicos que não dependem diretamente da elevação, como o N_{SPT}, profundidade do impenetrável e textura dos solos, a espacialização foi realizada em uma área mais ampla e posteriormente recortada ao limite da área de estudo, assegurando a compatibilidade entre os produtos cartográficos apresentados e evitando extrapolações em regiões sem suporte altimétrico adequado.

3.3.2.2. Compartimentação geológica da área de estudo

As unidades geológicas da área de estudo foram obtidas a partir da base vetorial do Serviço Geológico do Brasil - CPRM, correspondente à folha SC-22-Z-B (Porto Nacional), na escala 1:250.000 (Sachs; Araújo; Godoy, 2020). Os dados foram recortados para o limite da área de estudo e posteriormente utilizados na definição de domínios geológicos com comportamento geotécnico semelhante sob a ótica da modelagem geoestatística. A Figura 3.4 apresenta a distribuição espacial das unidades geológicas na área de estudo.

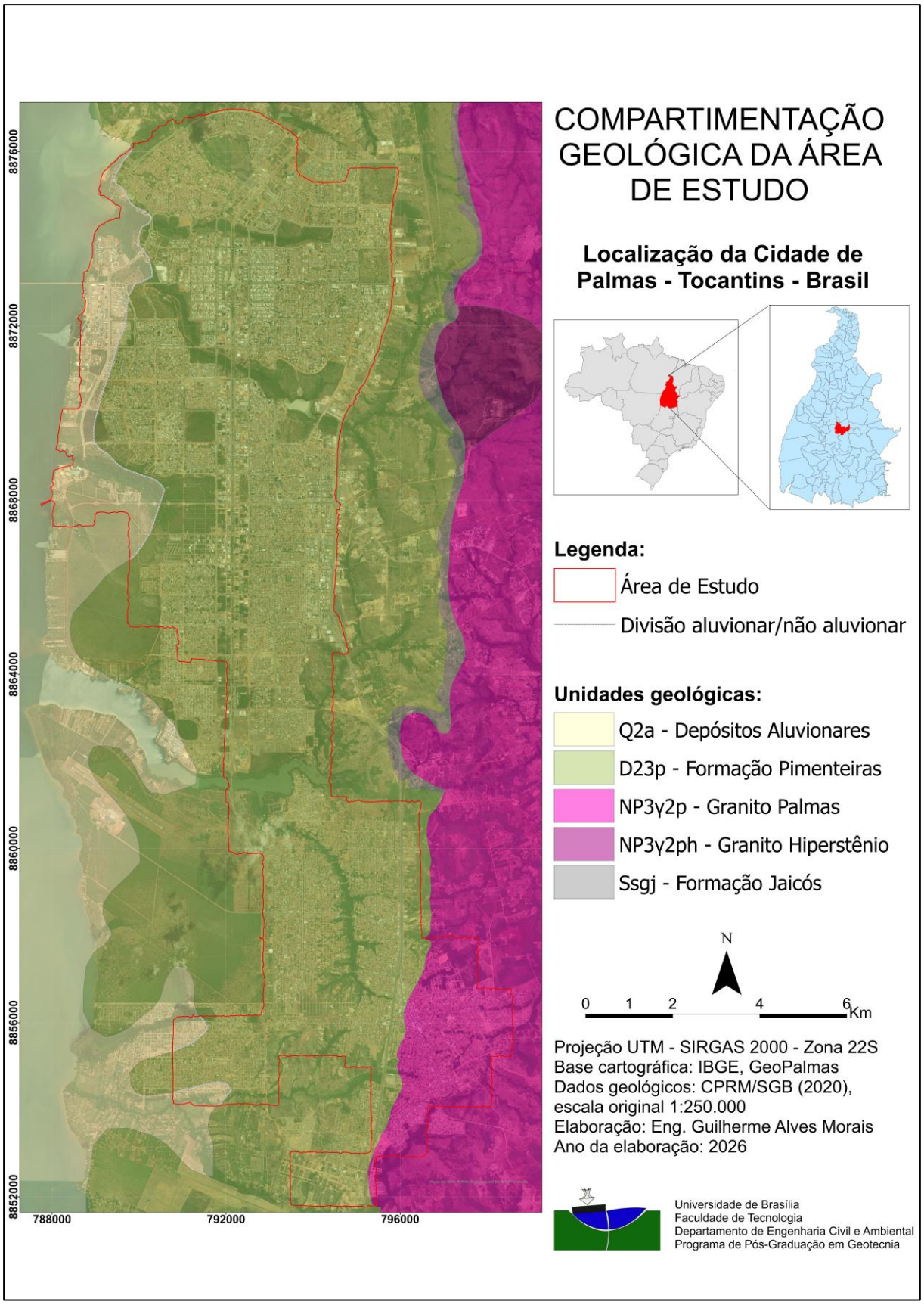


Figura 3.4 - Distribuição das unidades geológicas na área de estudo.

A área de estudo é predominantemente coberta pela Formação Pimenteiras, que corresponde a aproximadamente 84% de sua extensão. Nas proximidades do lago de Palmas, a oeste do Plano diretor, observa-se os depósitos Aluvionares, que cobrem 8,4% da área de estudo. Ademais, o Granito Palmas cobre 7,6% da área estudo, com ocorrência predominante na porção sul da área de estudo.

Em função da limitação amostral na região associada ao Granito Palmas, optou-se, para fins das análises geoestatísticas subsequentes, por incorporá-lo ao domínio não aluvionar, juntamente com a Formação Pimenteiras. Ressalta-se, entretanto, que essa integração teve caráter operacional para análise espacial, não implicando equivalência geológica ou geotécnica entre as unidades.

Sendo assim, as unidades geológicas foram agrupadas em dois domínios principais: (i) domínio não aluvionar, compreendendo as formações Pimenteiras e o Granito Palmas, que corresponde a aproximadamente 91,6% da área de estudo; e (ii) depósitos aluvionares, que ocupam cerca de 8,4% da área. Essa compartimentação foi considerada nas análises exploratórias e geoestatísticas, com o objetivo de verificar se os diferentes contextos geológicos apresentavam comportamentos espaciais distintos e se a modelagem separada por domínios proporcionava melhor representação das variáveis analisadas.

3.3.2.3. Compartimentação por densidade amostral

Conforme observado na Figura 3.5 abaixo, para análises de dados à maiores profundidades (superior à 15 metros), foi observado aumento do espaçamento médio entre os pontos amostrais, especialmente na porção ao sul do Ribeirão Taquaruçu Grande, o que reduz a capacidade de representação de variações espaciais locais. Sendo assim, as análises das camadas profundas concentraram-se na região norte-central da área de estudo, que possui aproximadamente 79,16 km², correspondentes a 66,4% da área total, e apresenta maior densidade e continuidade espacial dos dados disponíveis nessas profundidades.

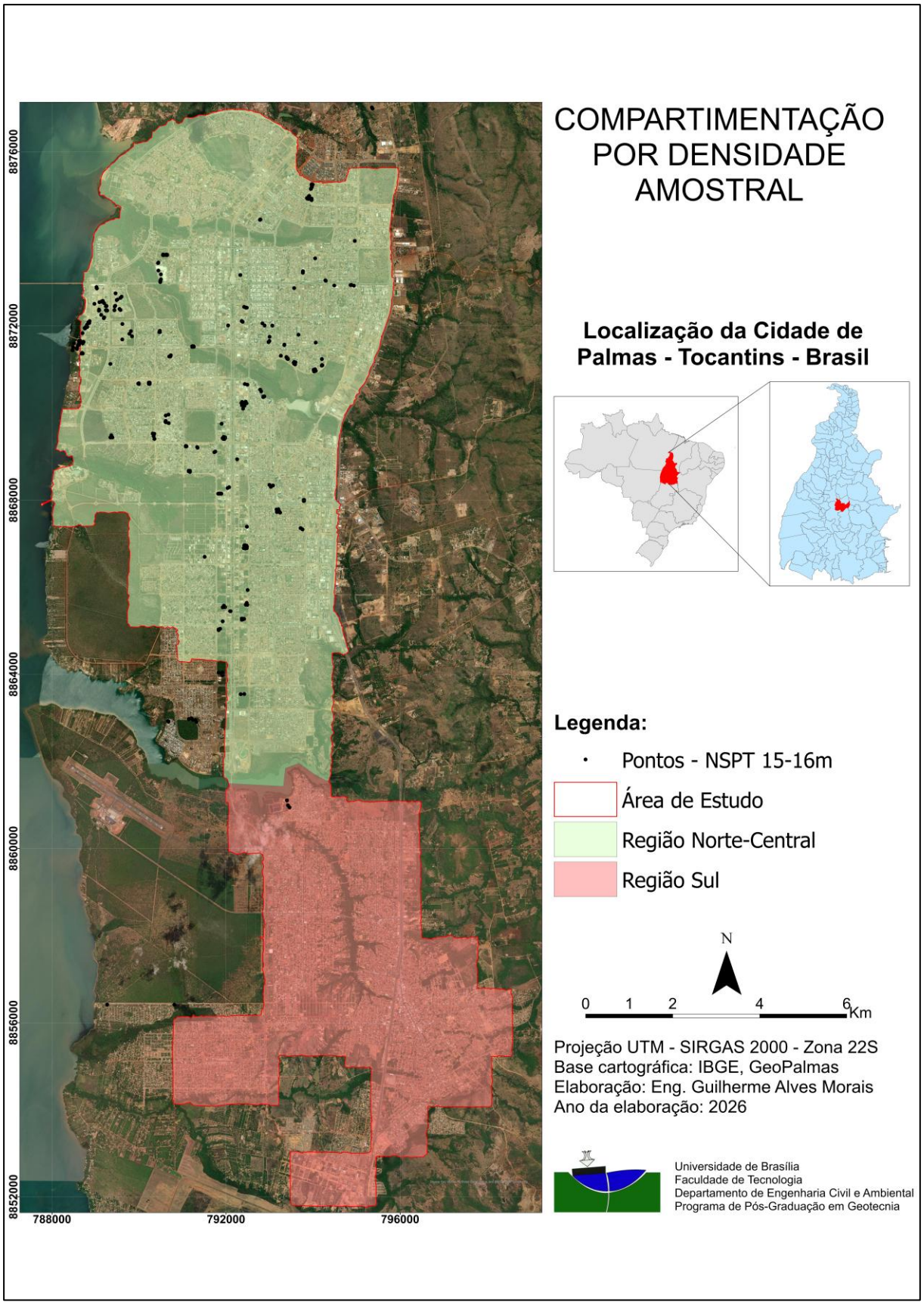


Figura 3.5 - Compartimentação da área de estudo para análise das camadas profundas.

As análises referentes às camadas mais profundas tiveram caráter regional, priorizando a identificação de tendências espaciais gerais do comportamento geotécnico, em função da menor densidade amostral disponível nessas profundidades.

3.3.3. Definição da escala

A definição da escala de trabalho foi realizada com base na densidade de dados em relação à área efetivamente analisada, correspondente à área de estudo delimitada em ambiente SIG. Ressalta-se que, embora o banco de dados geotécnico inclua sondagens distribuídas em todo o perímetro urbano de Palmas, foram considerados, no cálculo da densidade de observações, os quantitativos de dados disponíveis no conjunto utilizado nas análises, incluindo pontos localizados fora da área de estudo, porém inseridos no perímetro urbano.

Esses pontos foram mantidos nas etapas de interpolação com o objetivo de minimizar efeitos de borda e melhorar a estimativa espacial nas regiões próximas aos limites da área de estudo. Dessa forma, a densidade de dados foi relacionada à área de estudo, que corresponde ao domínio espacial das cartas temáticas elaboradas, enquanto o conjunto de dados utilizado reflete a estratégia adotada para garantir maior robustez às análises geoestatísticas.

Além da densidade média de observações, a definição da escala considerou a continuidade espacial da cobertura amostral, buscando compatibilizar o detalhamento cartográfico com o espaçamento entre os dados disponíveis. Para isso, foram utilizados como referência os critérios propostos por Zuquette em 1993, citado por Thiesen (2016), os quais relacionam densidade amostral, distância média entre observações e finalidade do mapeamento geotécnico.

Conforme apresentado no Quadro 3.1, para a definição da escala das cartas produzidas para toda a área de estudo, adotou-se como referência a variável mais restritiva do conjunto de dados, correspondente à profundidade do impenetrável. Essa escolha se justifica pelo fato de que nem todas as sondagens atingem o impenetrável, resultando em menor densidade de observações quando comparada às demais variáveis analisadas, como N_{SPT} e nível de água.

Quadro 3.1 - Observações/km² e resolução (m) para análises em toda área de estudo

Descrição	Observações	Área (km^2)	Observações/km^2	Resolução
BDG Geral	2519	119,18	21,14	217,51
Análise Impenetrável	**910**		**7,64**	**361,89**
Análise Lençol freático	922		7,74	359,53
Análise NSPT e tipo de solo – 1-2m	2401		20,15	222,8
Análise NSPT e tipo de solo – 5-6m	2243		18,82	230,51
Análise NSPT e tipo de solo – 10-11m	1693		14,21	265,32

A área de estudo delimitada em ambiente SIG possui aproximadamente 119,18 km². Para a análise do impenetrável, foram utilizadas 910 observações, resultando em densidade média de 7,64 observações/km² e resolução espacial teórica (R) de 361,89 m, obtida pela raiz quadrada da razão entre a área delimitada e o número de observações disponíveis.

A Figura 3.6 apresenta a análise da cobertura espacial por meio da aplicação de zonas de influência (*buffers*) em torno dos pontos amostrais, considerando diferentes raios associados às escalas propostas por Zuquette (1993). Foram avaliados os raios de 500 m, correspondente ao mapeamento de detalhe na escala 1:25.000, 1000 m, associado ao mapeamento regional na mesma escala, e 1826 m, correspondente ao mapeamento regional na escala 1:50.000.

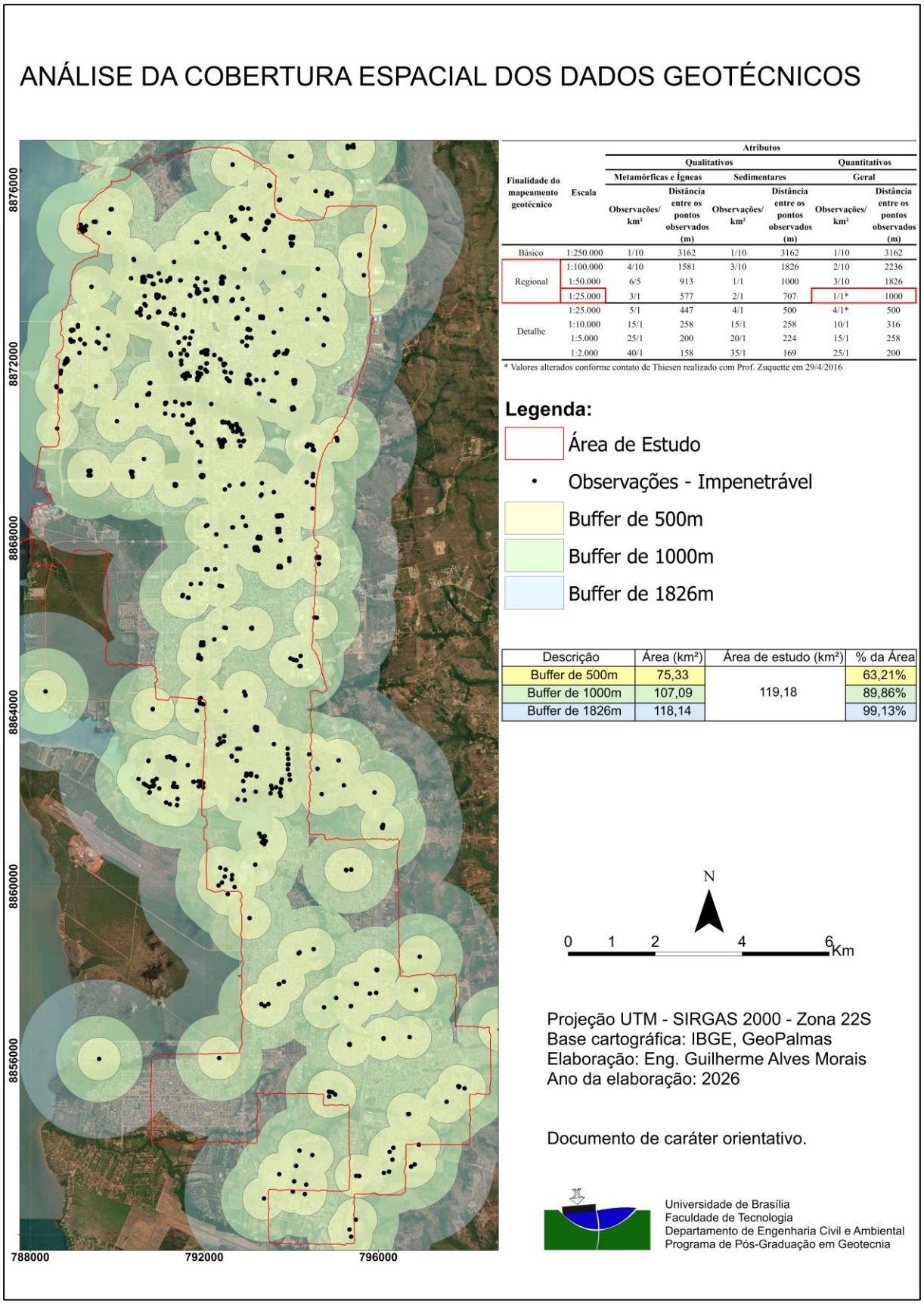


Figura 3.6 - Análise da cobertura espacial para total da área de estudo.

A análise evidenciou que o raio de 500 m apresentou cobertura fragmentada e presença significativa de lacunas espaciais, cobrindo aproximadamente 63,21% da área de estudo, indicando suporte amostral insuficiente para representação contínua em escala de detalhe. Para o raio de 1000 m, verificou-se cobertura espacial significativamente mais contínua, abrangendo cerca de 89,86% da área delimitada, com redução expressiva das regiões sem influência direta de pontos amostrais, indicando compatibilidade com a interpretação cartográfica regional na escala 1:25.000. Já para o raio de 1826 m, correspondente ao mapeamento regional em escala 1:50.000, observou-se cobertura praticamente integral da área de estudo, atingindo 99,13%, porém com elevado grau de sobreposição entre as zonas de influência, resultando em perda de resolução espacial e detalhamento das informações.

Dessa forma, considerando a distribuição espacial dos dados e o caráter orientativo das cartas produzidas, adotou-se a escala 1:25.000 para as análises das cartas da profundidade e cota do impenetrável e lençol freático, N_{SPT} de 1 m a 10 m e tipo de solo predominante nessas profundidades, as quais cobrem toda a área de estudo.

Para as análises em maiores profundidades, correspondentes às camadas de 15 m e 20 m de N_{SPT} e tipo de solo, bem como para as cartas derivadas dessas variáveis – incluindo aptidão à execução de estacas e estimativa de comprimento máximo executável – foi necessária a adoção de abordagem específica em função da redução significativa da densidade amostral, decorrente do menor número de sondagens que alcançaram essas profundidades, especialmente na porção sul da área de estudo. Conforme discutido no item 3.3.2.3, essas análises foram restringidas à região norte-central da área urbana, onde há maior concentração e continuidade espacial das sondagens profundas.

O Quadro 3.2 apresenta os parâmetros obtidos para as análises das camadas profundas na região norte-central, considerando os conjuntos de dados referentes às profundidades de 15 m e 20 m.

Quadro 3.2 - Observações/10km² e resolução para análises profundas na região norte-central

Descrição	Observações	Área (km^2)	Observações/10km^2	Resolução
Análise NSPT e tipo de solo - 15-16m	312	79,16	26,20	618,05
Análise NSPT e tipo de solo - 20-21m	**57**		**4,78**	**1445,99**

Para a profundidade de 20 m, considerada o cenário mais restritivo, foram obtidas 57 observações distribuídas em área aproximada de 79,16 km², resultando em densidade média de 4,78 observações/10 km² e resolução espacial teórica de 1445,99 m.

A Figura 3.7 apresenta a análise de cobertura espacial para as camadas profundas, considerando o raio de influência de 1826 m associado ao mapeamento regional em escala 1:50.000.

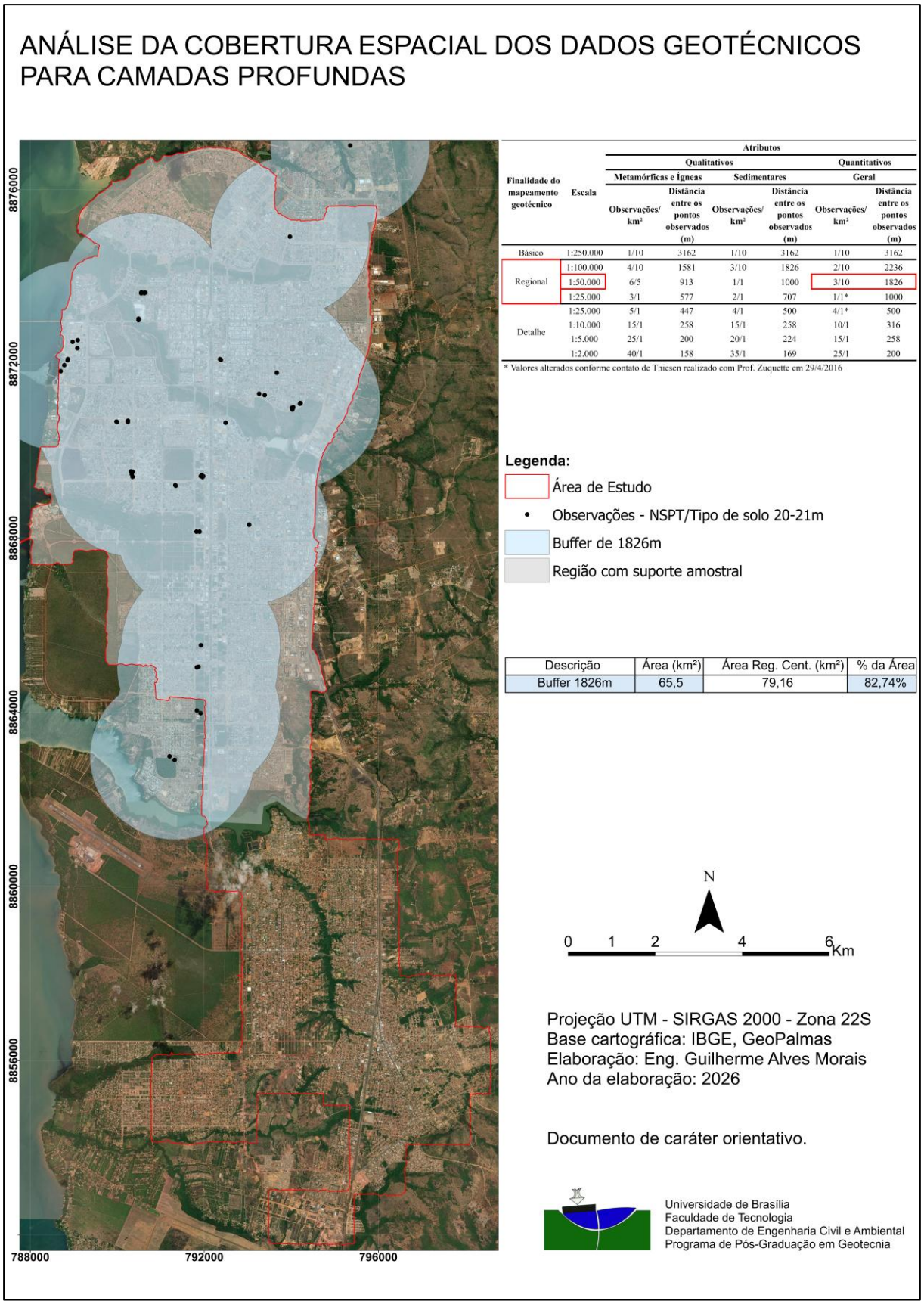


Figura 3.7 - Análise da cobertura espacial das camadas profundas na região norte-central.

Nessa condição, verificou-se cobertura aproximada de 82,74% da região analisada, indicando compatibilidade da distribuição amostral com a interpretação regional em escala 1:50.000. Assim, para as análises profundas e cartas derivadas, adotou-se a interpretação cartográfica em escala regional 1:50.000, compatível com o suporte amostral disponível e com o caráter orientativo dos produtos gerados.

3.3.4. Elaboração de bases cartográficas e produtos derivados do MDE

As bases cartográficas, o modelo digital de elevação (MDE) e produtos derivados do MDE utilizados neste trabalho foram elaborados com o objetivo de subsidiar a interpretação espacial dos resultados, bem como contextualizar as características físicas e geográficas da área de estudo.

Os dados utilizados foram obtidos a partir de diferentes bases institucionais, incluindo a plataforma GeoPalmas (PALMAS, 2026), que forneceu informações vetoriais da área urbana, como curvas de nível com equidistância vertical de 1 metro, rede hidrográfica e sistema viário; o Serviço Geológico do Brasil – CPRM (Sachs; Araújo; Godoy, 2020), responsável pelos dados geológicos e hidrográficos em escala regional; e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2025), utilizado para mapas de referência em escala nacional, estadual e municipal. Adicionalmente, foram incorporados dados provenientes do Banco de Dados Geotécnico (BDG), utilizados para a representação espacial dos pontos de sondagem.

Todos os dados foram previamente tratados em ambiente SIG, incluindo a padronização dos sistemas de referência espacial para o sistema SIRGAS 2000, projeção UTM, zona 22S, garantindo a compatibilidade entre as diferentes camadas de informação utilizadas.

3.3.4.1. Bases cartográficas auxiliares

Foram elaboradas bases cartográficas auxiliares contendo a rede hidrográfica, a malha viária urbana e a distribuição espacial dos pontos de sondagem utilizados no estudo. A hidrografia urbana e a rede viária forneceram, respectivamente, suporte para a interpretação de condicionantes hidrológicos e sua relação com o comportamento do nível de água, bem como referência espacial e apoio à localização das áreas analisadas. A localização dos pontos de sondagem apresenta a distribuição espacial das investigações geotécnicas utilizadas neste trabalho, permitindo a avaliação da densidade amostral e da cobertura dos dados na área de estudo.

A Figura 3.8 apresenta a integração dessas bases cartográficas na área de estudo.

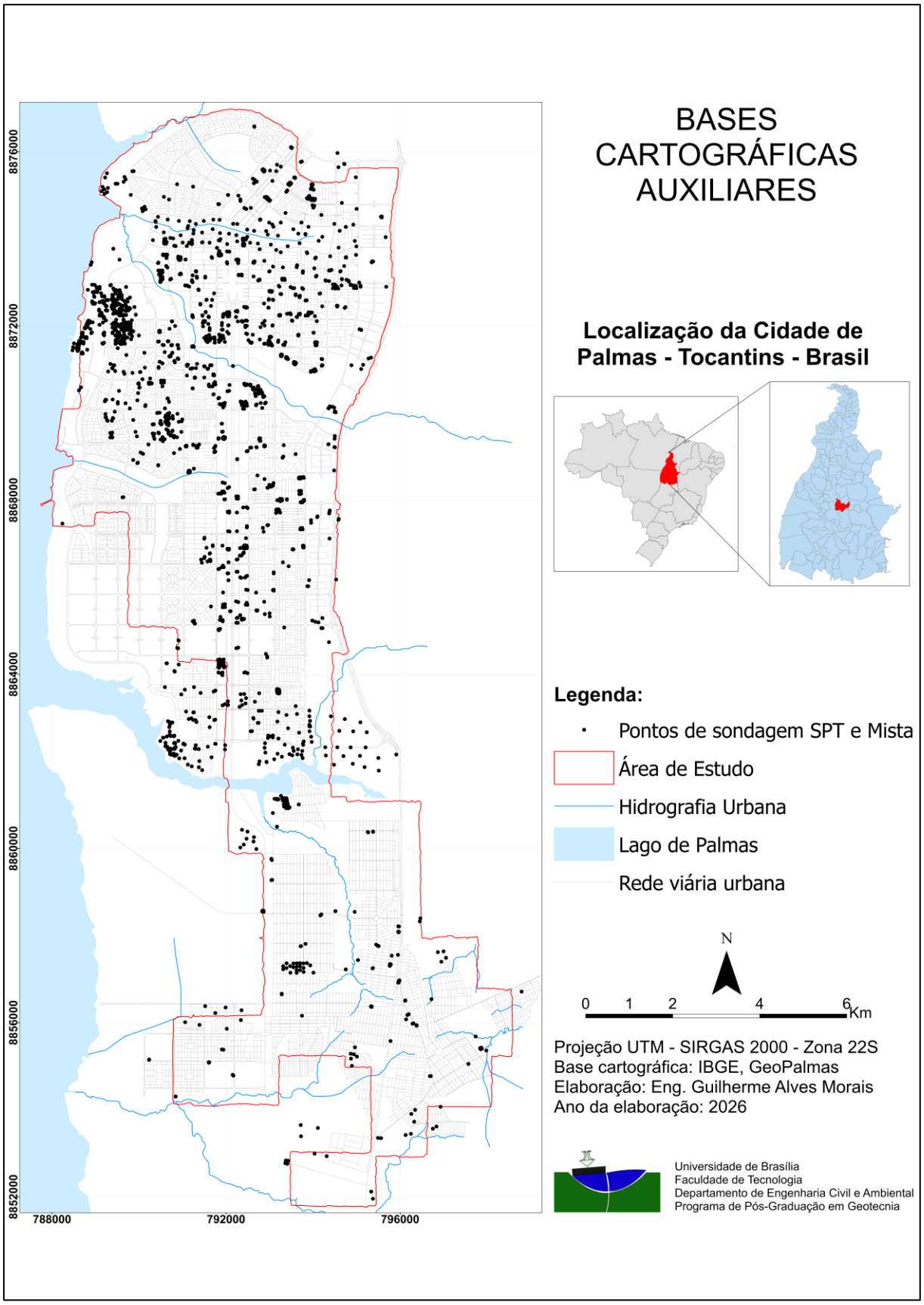


Figura 3.8 - Bases cartográficas auxiliares utilizadas nesta pesquisa.

3.3.4.2. Modelo digital de elevação (MDE)

O Modelo digital de elevação (MDE) da área urbana foi gerado a partir de curvas de nível vetoriais com equidistância vertical de 1 metro, obtidas por meio da plataforma GeoPalmas (PALMAS, 2026), disponibilizada pela Prefeitura de Palmas. As curvas, originalmente em formato de arquivo vetorial, foram previamente padronizadas para o sistema de referência SIRGAS 2000, projeção UTM, zona 22S, e submetidas a processo de filtragem para remoção de feições espúrias e valores inconsistentes.

A interpolação do MDE foi realizada por meio do algoritmo *Topo to Raster*, adotando resolução espacial de 5 m. Essa resolução foi definida de modo a preservar o detalhamento altimétrico fornecido pelas curvas de nível com equidistância vertical de 1 metro e, ao mesmo tempo, manter compatibilidade com a escala cartográfica de trabalho e com a finalidade regional das análises geotécnicas. Não foi aplicado condição para forçar a aderência a hidrografia, e a tolerância vertical foi ajustada para 1 metro, de modo a preservar a fidelidade às curvas de nível originais.

Após a interpolação, o *raster* gerado foi recortado utilizando como máscara o polígono correspondente ao limite efetivo de cobertura das curvas de nível, eliminando extrapolações externas e garantindo que o modelo final representasse exclusivamente áreas com suporte altimétrico confiável.

Conforme apresentado na Figura 3.9, o MDE resultante apresentou variação altimétrica coerente com os dados de entrada, constituindo base consistente para o cálculo das cotas do nível de água e para as demais análises subsequentes.

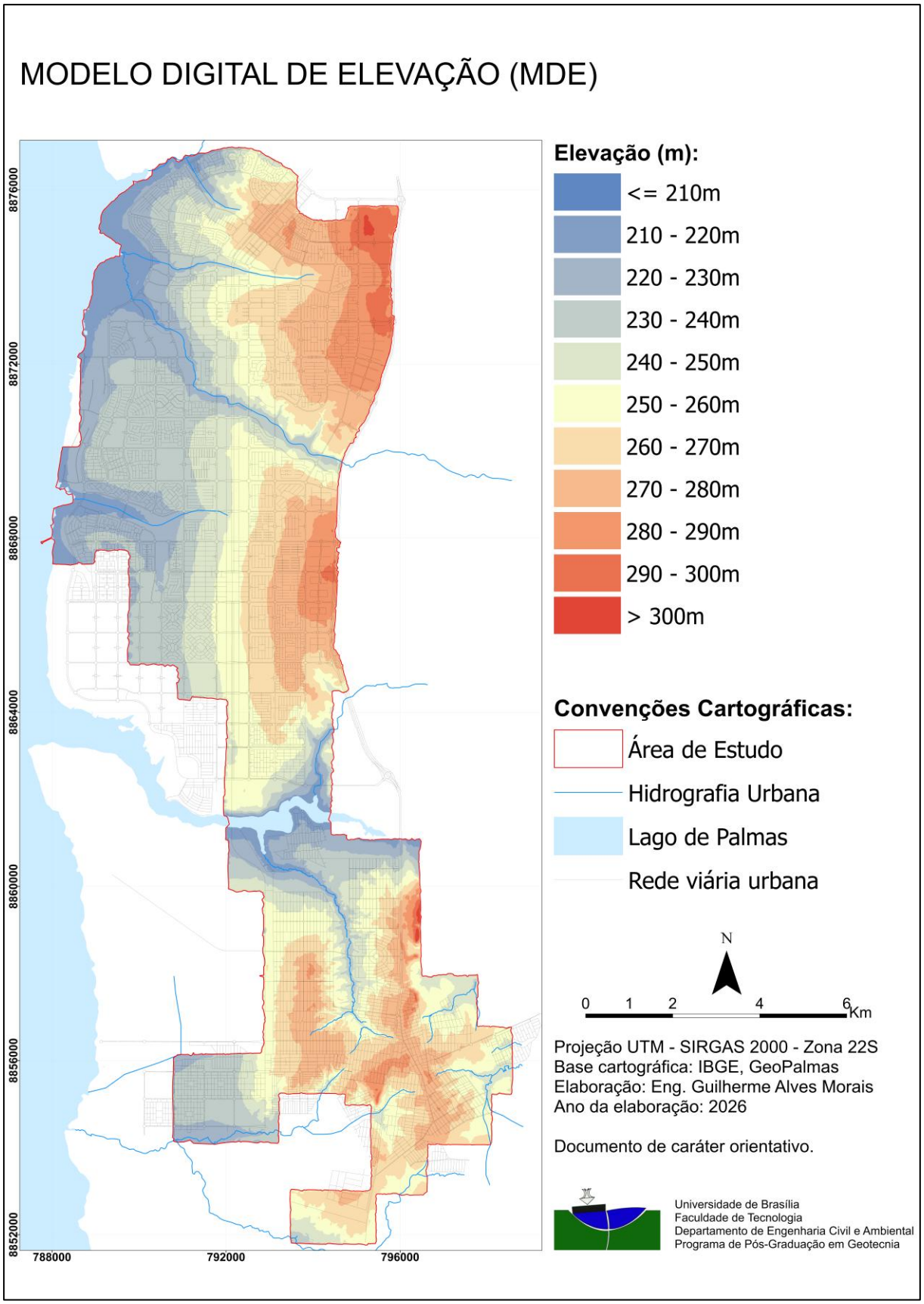
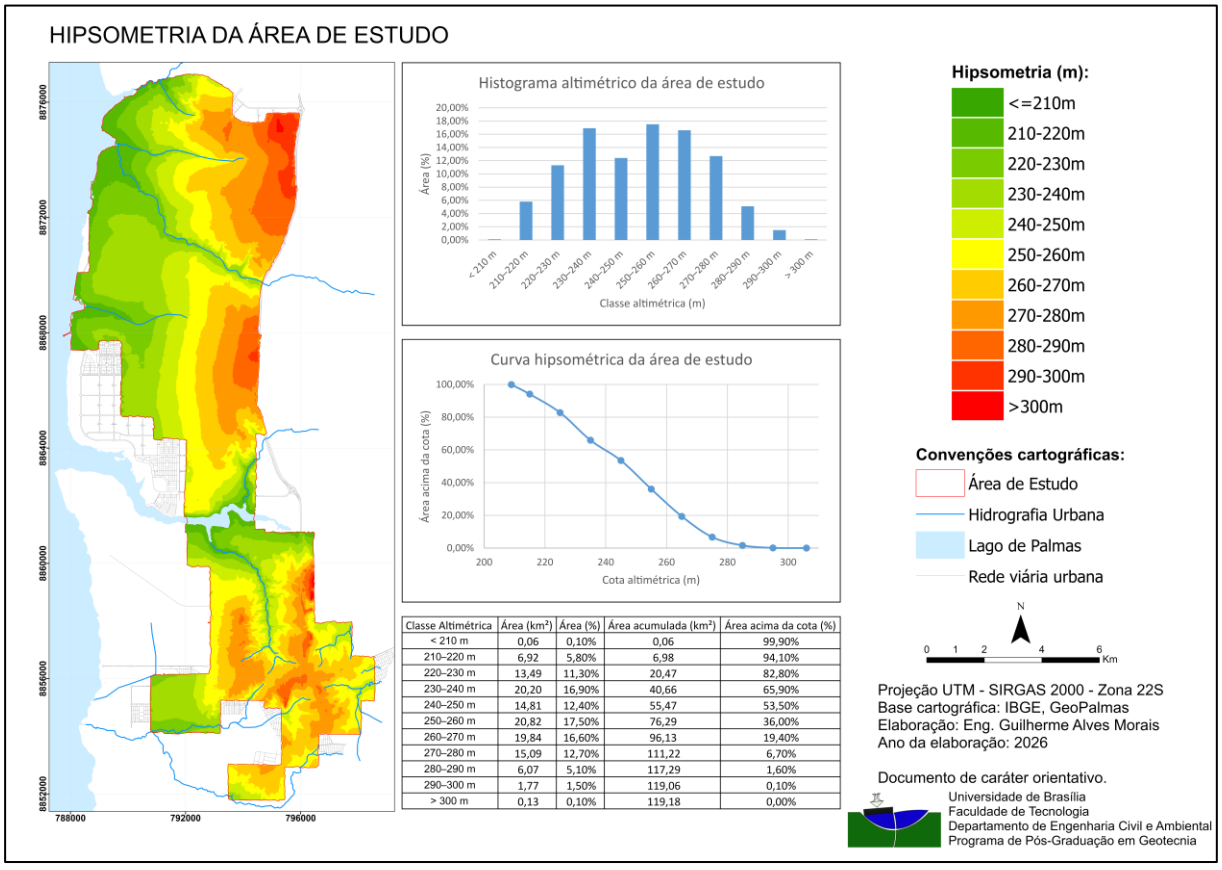


Figura 3.9 - Modelo Digital de Elevação (MDE) da área de estudo.

3.3.4.3. Hipsometria, declividade e orientação de vertente

A partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), foram elaborados os mapas de hipsometria, declividade e orientação de vertente, com o objetivo de caracterizar as condições topográficas da área de estudo e subsidiar a interpretação espacial dos resultados geotécnicos.

Para a hipsometria da área de estudo, foi utilizada a ferramenta *Reclassify*, disponível no *ArcGis*, para reclassificar as cotas do MDE em intervalos de 10 m. Esse procedimento permitiu representar a distribuição altimétrica da área, bem como elaborar o histograma altimétrico e a curva hipsométrica, conforme apresentado na Figura 3.10.



Classe Altimétrica	Área (km²)	Área (%)	Área acumulada (km²)	Área acima da cota (%)
< 210 m	0,06	0,10%	0,06	99,90%
210–220 m	6,92	5,80%	6,98	94,10%
220–230 m	13,49	11,30%	20,47	82,80%
230–240 m	20,20	16,90%	40,66	65,90%
240–250 m	14,81	12,40%	55,47	53,50%
250–260 m	20,82	17,50%	76,29	36,00%
260–270 m	19,84	16,60%	96,13	19,40%
270–280 m	15,09	12,70%	111,22	6,70%
280–290 m	6,07	5,10%	117,29	1,60%
290–300 m	1,77	1,50%	119,06	0,10%
> 300 m	0,13	0,10%	119,18	0,00%

Figura 3.10 - Hipsometria da área de estudo.

Os resultados indicam predominância de cotas intermediárias, com cerca de 76% da área concentrada entre 230 m e 280 m. As faixas altimétricas inferiores a 220 m e superiores a 280 m apresentam ocorrência mais restrita, correspondendo, respectivamente, a aproximadamente 5,9% e 6,7% da área total. Esse padrão evidencia a predominância de superfícies topográficas suavizadas no interior da área urbana analisada, com cotas mais baixas associadas às proximidades do Lago de Palmas e dos principais cursos de água, e cotas mais elevadas

concentradas nos setores mais afastados da margem do lago e em porções topograficamente superiores da área de estudo.

Para elaboração dos mapas de declividade e orientação de vertente, apresentados na Figura 3.11, foram utilizadas, respectivamente, as ferramentas *Slope* e *Aspect*, disponíveis no *ArcGis*.

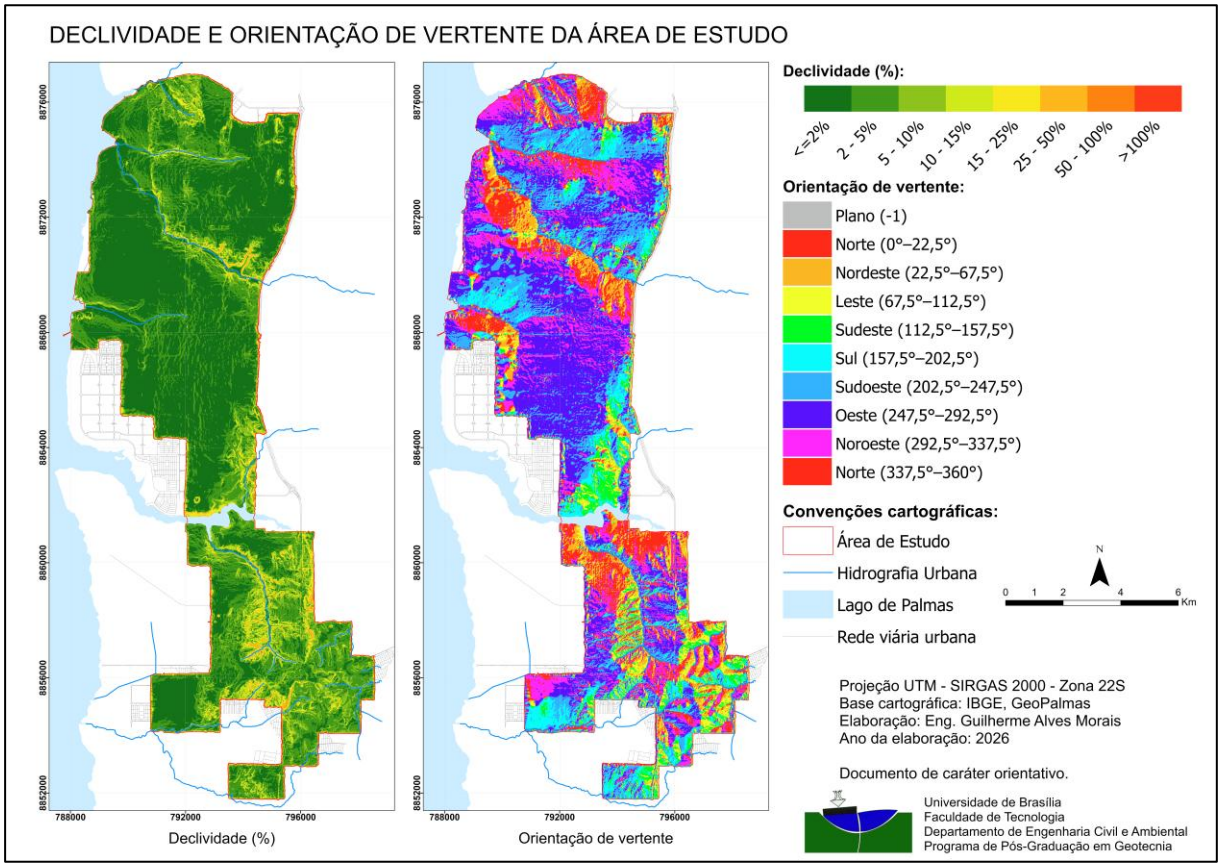


Figura 3.11 - Declividade e orientação de vertente da área de estudo.

A Tabela 3.1 e a Tabela 3.2 apresentam, respectivamente, a distribuição das classes de declividade e de orientação de vertente na área de estudo. Os resultados complementam a análise visual da Figura 3.11, por meio da representação percentual e absoluta das classes.

Tabela 3.1 - Distribuição das classes de declividade da área de estudo.

Declividade	Área (km²)	Área (%)
<=2%	57,61	48,34%
2-5%	37,06	31,10%
5-10%	14,74	12,37%
10-15%	4,40	3,69%
15-25%	2,87	2,41%
25-50%	1,41	1,18%
50-100%	0,48	0,51%
>100%	0,61	0,40%
Total	119,18	100%

Tabela 3.2 - Distribuição das classes de orientação de vertente da área de estudo.

Orientação de vertente	Área (km²)	Área (%)
Plano (-1)	0,00	0,00%
Norte (0°–22,5° e 337,5°–360°)	15,15	12,71%
Nordeste (22,5°–67,5°)	9,30	7,80%
Leste (67,5°–112,5°)	6,92	5,81%
Sudeste (112,5°–157,5°)	7,00	5,87%
Sul (157,5°–202,5°)	10,80	9,06%
Sudoeste (202,5°–247,5°)	18,04	15,14%
Oeste (247,5°–292,5°)	33,70	28,28%
Noroeste (292,5°–337,5°)	18,27	15,33%
Total	119,18	100%

Observa-se o predomínio de áreas com baixa inclinação na área de estudo, com maior concentração das classes inferiores a 5%. As classes de declividade menor ou igual a 2% e entre 2% e 5% representam, respectivamente, 48,34% e 31,10% da área analisada, totalizando 79,44% da área de estudo. Quando consideradas as declividades inferiores a 10%, esse percentual alcança 91,81%, evidenciando o predomínio de relevo plano a suavemente ondulado. As declividades mais elevadas ocorrem de forma localizada, principalmente associadas aos fundos de vale, margens de drenagens e setores de relevo mais acidentado. Esse comportamento é compatível com os padrões altimétricos observados no MDE.

A orientação de vertente indica a direção predominante de exposição das superfícies do terreno, expressa em graus azimutais e posteriormente agrupada em classes cardeais e colaterais: norte, nordeste, leste, sudeste, sul, sudoeste, oeste e noroeste, além das áreas planas. Observa-se maior representatividade das vertentes voltadas para oeste, correspondente a 28,28% da área de estudo. Também se destacam as classes noroeste, sudoeste e norte, com

15,33%, 15,14% e 12,71%, respectivamente. As áreas classificadas como planas não apresentaram representatividade expressiva na quantificação final, em função dos critérios de classificação adotados para o *raster* de orientação de vertente.

Os produtos derivados do MDE, contribuem para a contextualização espacial das condições do relevo, sem constituírem, isoladamente, um critério direto de definição dos parâmetros geotécnicos analisados.

3.4. Elaboração das cartas geotécnicas derivadas das sondagens

As cartas geotécnicas derivadas das sondagens foram elaboradas em ambiente de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), a partir da modelagem espacial das variáveis obtidas no Banco de Dados Geotécnico (BDG). Foram consideradas, para essa etapa, as variáveis profundidade do impenetrável, nível freático, índice de resistência à penetração (N_{SPT}) e tipo de solo predominante por camada.

Para a modelagem geoestatística das variáveis contínuas, foram testados diferentes modelos teóricos de semivariograma, incluindo os modelos esférico, circular e exponencial, amplamente utilizados na literatura para representação de fenômenos do meio físico (Santos, 2016). A escolha do modelo adotado, bem como a definição dos parâmetros de interpolação, foi realizada com base na análise exploratória dos dados e na avaliação de desempenho por validação cruzada.

Para essa avaliação, foram utilizados parâmetros estatísticos descritivos, como média, mediana, desvio padrão, assimetria e curtose, visando caracterizar a distribuição dos dados e identificar possíveis desvios em relação à normalidade. Complementarmente, foram empregados indicadores estatísticos, como erro médio, raiz do erro quadrático médio (RMS), erro padrão médio (ASE), raiz do erro quadrático médio padronizado (RMSS) e parâmetros associados ao semivariograma, como o efeito pepita.

Embora tenham sido observadas diferenças discretas entre os modelos testados, indicando relativa robustez do processo de interpolação, o modelo exponencial apresentou desempenho ligeiramente superior, sendo adotado como padrão para a modelagem das variáveis analisadas.

A definição dos parâmetros de interpolação também considerou o padrão espacial dos dados amostrais, sendo avaliado o espaçamento médio entre as sondagens por meio de análise de vizinhança baseada na distância média ao vizinho mais próximo (*Average Nearest Neighbor*). Com base nesse espaçamento, foram adotados valores de resolução espacial e

parâmetros de busca compatíveis com a densidade dos dados, de modo a garantir representatividade e evitar viés na interpolação.

Adicionalmente, foi avaliada a influência da compartimentação geológica na modelagem espacial das variáveis, por meio da divisão da área de estudo em domínios distintos. Para essa análise, foram considerados separadamente os domínios aluvionar e não aluvionar, conforme definido previamente.

A adoção da modelagem por domínios foi realizada de forma seletiva, em função do comportamento espacial de cada variável e da disponibilidade de dados. Para algumas variáveis, como o impenetrável, o nível freático e o tipo de solo predominante, a modelagem global mostrou-se adequada, não sendo adotada a divisão por domínios.

Por outro lado, para os valores de N_{SPT}, a compartimentação foi aplicada nas camadas mais superficiais, nas quais se observou maior variabilidade espacial associada ao contexto geológico, enquanto nas camadas mais profundas foi mantida a modelagem global. Essa abordagem permitiu ajustar o modelo às características dos dados, preservando a consistência espacial das superfícies interpoladas.

Neste trabalho, os modelos variográficos foram ajustados assumindo-se a hipótese de isotropia, considerando continuidade espacial equivalente em todas as direções.

As superfícies interpoladas foram posteriormente tratadas em ambiente SIG, incluindo etapas de recorte, padronização espacial e integração com o Modelo Digital do Terreno (MDE), resultando nas cartas geotécnicas utilizadas nas análises subsequentes. As cartas geotécnicas elaboradas permitem a representação espacial dos parâmetros analisados, constituindo base para a interpretação da variabilidade geotécnica da área de estudo e para a elaboração das cartas de aptidão à fundação.

3.4.1. Cartas da profundidade e cota do impenetrável SPT

As cartas da profundidade e da cota do impenetrável ao SPT foram elaboradas a partir dos dados provenientes das sondagens à percussão integrantes do Banco de Dados Geotécnico (BDG). A variável “impenetrável” foi definida como a profundidade na qual ocorreu a paralisação da sondagem em função do atendimento aos critérios estabelecidos pela NBR 6484 (ABNT, 2020).

Para a modelagem espacial, foram considerados apenas os registros que atingiram o impenetrável segundo os critérios normativos, sendo excluídos os casos em que a sondagem foi

interrompida por razões operacionais, limitações de equipamento ou decisão de projeto. Essa filtragem teve como objetivo garantir a consistência da variável analisada, evitando a introdução de valores que não representam efetivamente a condição de resistência do subsolo.

Para a interpolação da profundidade do impenetrável, foi necessário realizar tratamento prévio dos dados no Banco de Dados Geotécnico (BDG), de modo a garantir a consistência da variável a ser modelada. A coluna "PROF_IMP", utilizada na interpolação, foi composta exclusivamente por valores numéricos, sendo excluídos os registros classificados como "NÃO ALCANÇADO", referentes a sondagens encerradas antes de atingir o impenetrável, e "NÃO SE APLICA", associados a sondagens mistas, os quais foram representados por valores nulos no banco de dados. A partir dessa filtragem, foi gerado um subconjunto de dados contendo apenas as sondagens que atingiram o impenetrável segundo os critérios estabelecidos pela NBR 6484 (ABNT, 2020), resultando no arquivo vetorial denominado "BDG_Impenetravel". No total, foram consideradas 951 sondagens válidas para a modelagem dessa variável na área de estudo.

A espacialização da profundidade do impenetrável foi realizada por meio de interpolação geoestatística, utilizando o método de krigagem ordinária. A escolha desse método se deu em função de sua capacidade de considerar a estrutura de dependência espacial dos dados, permitindo a obtenção de superfícies contínuas representativas da variabilidade do parâmetro na área de estudo.

A carta de cota do impenetrável foi elaborada como produto complementar à carta de profundidade, com o objetivo de representar a posição altimétrica estimada da superfície de paralisação das sondagens em relação ao terreno. Para isso, adotou-se a superfície interpolada da profundidade do impenetrável e, posteriormente, aplicou-se álgebra de mapas com o Modelo Digital de Elevação (MDE), de modo que a cota do impenetrável fosse obtida pela diferença entre a cota do terreno e a profundidade interpolada, conforme a Equação 3.1.

$$\text{Cota do Impenetrável} = \text{MDE} - \text{Profundidade do Impenetrável interpolada} \qquad (3.1)$$

Assim, a cota do impenetrável não foi interpolada diretamente a partir dos valores pontuais das sondagens, mas derivada da superfície contínua de profundidade previamente modelada, preservando a compatibilidade entre os dois produtos cartográficos.

3.4.2. Cartas da profundidade e cota do lençol freático

As cartas da profundidade e da cota do lençol freático foram elaboradas a partir dos dados obtidos nas sondagens à percussão integrantes do Banco de Dados Geotécnico (BDG), considerando os registros de nível de água observados durante a execução dos ensaios. Esses valores foram adotados como representativos da posição do nível de água no momento da investigação, sendo utilizados como base para a modelagem espacial da superfície piezométrica.

Para a interpolação da profundidade do lençol freático, a variável "PROF_NA" foi previamente tratada no Banco de Dados Geotécnico (BDG), de modo a conter exclusivamente valores numéricos válidos. Assim, foram selecionados apenas os registros em que a profundidade do nível de água foi efetivamente observada, sendo excluídos os casos classificados como "AUSENTE" e "FURO FECHOU", representados por valores nulos no banco de dados.

A partir dessa filtragem, foi gerado o arquivo vetorial denominado "BDG_NA", contendo apenas as sondagens com informação válida de nível de água, restritas ao perímetro urbano delimitado do município de Palmas, conforme adotado nas análises do impenetrável. Ao todo, foram consideradas 1.237 sondagens para a modelagem dessa variável na área de estudo.

Considerando a influência da sazonalidade no comportamento do nível freático, os dados foram classificados em períodos seco e úmido, conforme definição climática para a região de Palmas/TO apresentada previamente na caracterização da área de estudo. Essa distinção permite avaliar possíveis variações sazonais na profundidade do nível de água ao longo do ano.

Com base nessa classificação, foi avaliada a interpolação da profundidade do nível freático considerando separadamente os períodos seco e úmido, bem como a totalidade dos dados, com o objetivo de verificar a influência da sazonalidade na modelagem espacial da variável.

Inicialmente, foi avaliada a interpolação direta da profundidade do nível de água. No entanto, essa abordagem apresentou limitações relacionadas à suavização das superfícies interpoladas e à menor aderência à rede de drenagem e ao relevo da área de estudo. Dessa forma, optou-se por adotar uma abordagem baseada na modelagem da cota do nível freático, considerada mais adequada do ponto de vista físico para representação do fenômeno.

A interpolação da cota do nível freático foi realizada por meio de krigagem ordinária, a partir dos valores obtidos nos furos de sondagem. Em função do caráter mais contínuo do nível

freático, controlado por condicionantes regionais como a topografia e a rede de drenagem, foram adotados parâmetros de interpolação compatíveis com essa maior continuidade espacial, de modo a evitar a geração de superfícies excessivamente ruidosas.

Para reduzir inconsistências físicas associadas à interpolação da superfície piezométrica, foram incorporados pontos adicionais ao conjunto amostral ao longo dos principais corpos hídricos da área de estudo. Esses pontos foram gerados a partir das feições vetoriais da rede hidrográfica e das margens do Lago de Palmas, com espaçamento médio de aproximadamente 150 m.

Considerando que os cursos de água representam zonas naturais de descarga do aquífero, adotou-se, nesses locais, a hipótese de que o nível freático coincide aproximadamente com a superfície topográfica. Dessa forma, a cota do nível de água foi definida como a cota do terreno obtida a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), subtraída de 0,1 m, de modo a evitar inconsistências numéricas associadas à eventual estimativa de valores acima da superfície topográfica.

A inclusão desses pontos teve como objetivo introduzir uma condição de contorno hidráulica explícita na modelagem geoestatística, reduzindo o efeito de suavização da krigagem nas proximidades da drenagem e evitando estimativas fisicamente inconsistentes, como valores da superfície piezométrica superiores ao terreno.

A profundidade do nível freático foi posteriormente obtida por meio de álgebra de mapas, a partir da diferença entre o MDE e a superfície interpolada da cota do nível de água. Para evitar inconsistências físicas decorrentes da extrapolação da krigagem em áreas com baixa densidade de dados, foram aplicados limites inferior e superior baseados no intervalo observado nas sondagens. Assim, valores inferiores a 0,1 m foram ajustados para 0,1 m, enquanto valores superiores a 23 m foram limitados a 23 m, preservando a variabilidade representativa do conjunto de dados e evitando artefatos de extrapolação.

Essa correção foi implementada em ambiente SIG por meio de álgebra de mapas, conforme a Equação 3.2:

$$\text{Profundidade do N. A.} = \text{MDE} - \text{Cota do N. A. interpolada} \tag{3.2}$$

3.4.3. Cartas do índice de resistência à penetração (N_{SPT}) por camada

As cartas do índice de resistência à penetração (N_{SPT}) foram elaboradas a partir dos dados provenientes das sondagens à percussão integrantes do Banco de Dados Geotécnico (BDG), considerando os valores registrados ao longo do perfil do solo.

Para a modelagem espacial, os dados de N_{SPT} foram organizados por camadas, adotando-se discretização vertical em intervalos de um metro, de forma consistente com a estruturação do banco de dados e com as demais variáveis geotécnicas analisadas. Considerou-se como primeira camada válida para análise o intervalo entre 1,0 m e 2,0 m de profundidade, uma vez que não há medição de N_{SPT} na camada superficial (0 a 1 m).

Assim como nas demais análises supracitadas, a espacialização dos valores de N_{SPT} foi realizada por meio de interpolação geoestatística, utilizando o método de krigagem ordinária. Os parâmetros de interpolação foram definidos individualmente para cada camada analisada, considerando o padrão de distribuição espacial dos dados e a densidade amostral. Essa abordagem permitiu ajustar o modelo às variações de disponibilidade de dados ao longo do perfil do solo, garantindo maior coerência espacial das superfícies interpoladas e comparabilidade entre as camadas analisadas.

Para a interpolação dos valores de N_{SPT} por camada, foi necessário realizar tratamento prévio dos dados no Banco de Dados Geotécnico (BDG), de modo a garantir a consistência da variável analisada. Foram considerados apenas registros com valores numéricos válidos, sendo excluídos os dados classificados como “AVANÇO” e “RQD”, provenientes de sondagens mistas, bem como os registros “NÃO SE APLICA”, associados à camada superficial (0 a 1 m), na qual não há medição de N_{SPT} nas sondagens do tipo SPT.

A partir dessa filtragem, foi estruturado um conjunto de dados consolidado para análise do N_{SPT}, a partir do qual foram derivados subconjuntos específicos para cada camada de interesse. No total, foram contabilizadas 2.476 sondagens com valores válidos de N_{SPT} em uma ou mais camadas do perfil do solo.

Para fins de análise espacial, foram selecionadas as camadas de 1 m, 2 m, 3 m, 5 m, 10 m e 15 m, representativas das diferentes condições de resistência ao longo do perfil do solo. O quantitativo de sondagens com dados disponíveis variou entre 2.476 observações para a camada de 1–2 m e 312 observações para a camada de 15–16 m, evidenciando redução progressiva da densidade amostral com o aumento da profundidade investigada.

Os valores de N_{SPT} utilizados na análise correspondem a números inteiros e positivos. Para fins de modelagem espacial, adotou-se como limite superior o valor N_{SPT} = 50, considerando que valores elevados estão associados a condições de elevada resistência à penetração e menor variabilidade prática para interpretação geotécnica regional. Tal procedimento é compatível com limites de N_{SPT} tradicionalmente empregados em métodos semiempíricos para estimativa do atrito lateral e resistência de ponta de fundações profundas, como o método Décourt-Quaresma (Décourt & Quaresma, 1978; Décourt, 1982), além de práticas usuais de projeto e interpretação geotécnica descritas por Cintra & Aoki (2010).

Na análise exploratória dos dados, observou-se a ocorrência de concentração de valores de N_{SPT} iguais a 50, especialmente em maiores profundidades, condição associada à tendência de aumento da resistência à penetração com a profundidade e ao limite superior adotado no trabalho para esse índice. Considerando o potencial efeito dessa concentração na modelagem geoestatística, foi avaliada a influência desses valores por meio da realização de testes específicos, nos quais os registros com N_{SPT} igual a 50 foram temporariamente excluídos da base de dados.

Ressalta-se que não foram aplicadas transformações estatísticas nos dados, de modo a preservar o significado físico do parâmetro N_{SPT} nas análises realizadas. Dessa forma, os testes conduzidos tiveram caráter exploratório, visando avaliar alternativas sem comprometer a interpretação geotécnica dos resultados.

3.4.4. Cartas da textura de solo predominante por camada

As cartas da textura de solo predominante por camada foram elaboradas a partir dos dados provenientes das sondagens à percussão integrantes do Banco de Dados Geotécnico (BDG), considerando a classificação textural registrada ao longo do perfil do solo. Para fins de análise, os materiais foram agrupados em cinco classes principais: argila, silte, areia, pedregulho e rocha.

De forma análoga às demais variáveis geotécnicas, os dados foram organizados por camadas, adotando-se discretização vertical em intervalos de um metro, permitindo a análise da distribuição espacial dos materiais em diferentes profundidades. Para cada camada, foi identificado a textura de solo predominante em cada furo de sondagem.

Para a espacialização do tipo de solo predominante, foram avaliadas diferentes abordagens de interpolação, incluindo a aplicação direta da krigagem ordinária sobre codificação escalar

das classes de solo predominante com valores de ordens de grandeza distintas, a interpolação pelo método *Inverse Distance Weighting* (IDW) utilizando códigos sequenciais representativos das classes de solo e a abordagem probabilística baseada em variáveis indicadoras. A definição da metodologia final considerou a coerência espacial dos resultados, a compatibilidade com os padrões geológicos da área de estudo e a preservação do caráter categórico da variável.

Dessa forma, adotou-se a abordagem probabilística baseada em variáveis indicadoras para elaboração das cartas de textura predominante.

Inicialmente, foi implementado um sistema de codificação numérica representativo dos materiais predominantes em cada camada, considerando-se a classe principal da descrição, conforme a classificação do Quadro 3.3:

Quadro 3.3 - Atributo utilizado nas interpolações de solo predominante.

Solo predominante	Atributo
Argila	0
Silte	1
Areia	2
Pedregulho	3
Rocha	4

Ressalta-se que os códigos atribuídos não representam uma variável quantitativa contínua, sendo utilizados exclusivamente como artifício numérico para viabilizar o processamento dos dados em ambiente SIG. Dessa forma, a interpretação dos resultados mantém caráter categórico, não sendo associada a valores médios ou transições graduais entre materiais distintos.

A coluna utilizada na análise (“COD_SOLO”) foi composta apenas por valores numéricos correspondentes às classes definidas, sendo previamente selecionados os registros nos quais foi possível identificar o material da camada. Foram excluídos os casos em que não houve coleta de amostra ou em que o material não pôde ser classificado. A partir dessa filtragem, foi estruturado um conjunto de dados consolidado, a partir do qual foram derivados subconjuntos específicos para cada camada analisada.

Para a modelagem espacial, foi adotada abordagem baseada em krigagem indicadora, na qual foram criadas variáveis binárias representativas da ocorrência de cada tipo de solo. A partir da codificação inicial apresentada no Quadro 3.3, foi realizada a transformação dos dados em variáveis indicadoras, conforme apresentado no Quadro 3.4. Para cada classe, foi atribuída a

condição 1 quando o material estava presente na camada analisada e 0 nos demais casos, permitindo a interpolação da probabilidade de ocorrência de cada tipo de solo ao longo da área de estudo.

Quadro 3.4 - Transformação dos dados para análise da probabilidade

Solo predominante	V_Arg	V_Sil	V_Are	V_Ped	V_Roc
Argila	1	0	0	0	0
Silte	0	1	0	0	0
Areia	0	0	1	0	0
Pedregulho	0	0	0	1	0
Rocha	0	0	0	0	1

Inicialmente, foram geradas superfícies contínuas representativas da probabilidade espacial de ocorrência de cada classe textural, por meio da interpolação das variáveis indicadoras. A interpolação foi realizada por meio de krigagem ordinária, sendo os parâmetros definidos com base nas características dos dados e na avaliação de desempenho por validação cruzada, de forma consistente com a metodologia adotada para as demais variáveis.

As superfícies de probabilidade obtidas para cada classe foram então integradas por meio do critério de probabilidade máxima. Para isso, foi aplicada a ferramenta Cell Statistics, considerando o valor máximo entre as probabilidades estimadas para cada classe. Essa superfície representa, para cada célula, o maior valor de probabilidade associado às classes analisadas, podendo ser utilizada como indicador da confiabilidade da classificação, uma vez que valores mais elevados indicam maior predominância de uma classe específica, enquanto valores mais baixos refletem maior incerteza relativa, frequentemente associada a regiões de transição entre materiais distintos ou áreas com menor suporte amostral.

Por fim, foi realizada a classificação do tipo de solo predominante, a partir da identificação da classe associada ao maior valor de probabilidade em cada célula. Esse procedimento foi implementado por meio de álgebra de mapas, resultando em um raster final categórico, no qual cada pixel foi atribuído ao código correspondente ao tipo de solo predominante (0 – argila, 1 – silte, 2 – areia, 3 – pedregulho e 4 – rocha). Essa abordagem permite preservar o caráter categórico da variável e evita interpretações indevidas associadas a valores intermediários.

3.5. Elaboração das cartas de aptidão à fundação

As cartas de aptidão à fundação foram elaboradas a partir da integração das cartas geotécnicas derivadas dos resultados das sondagens, obtidas por meio da interpolação espacial dos dados do Banco de Dados Geotécnico (BDG). Foram utilizadas como variáveis de entrada as cartas de profundidade do impenetrável, profundidade do lençol freático, índice de resistência à penetração (N_{SPT}) e tipo de solo predominante por camada.

A partir dessas informações, foram definidos modelos lógicos baseados em critérios geotécnicos e executivos, com o objetivo de avaliar a viabilidade de diferentes soluções de fundação em escala regional. Para cada célula espacial da área de estudo, a aptidão foi determinada por meio da aplicação de operações de álgebra de mapas em ambiente SIG, permitindo a combinação das variáveis de forma sistemática e reprodutível. Essas operações envolveram tanto análises booleanas quanto abordagens ponderadas, conforme os critérios adotados para cada tipo de fundação. Não foram incorporadas tipologias específicas de edificações, cargas provenientes das superestruturas ou parâmetros de dimensionamento das fundações, uma vez que a inclusão dessas variáveis exigiria a definição de cenários estruturais e critérios de projeto específicos, incompatíveis com a escala regional e o caráter orientativo dos produtos propostos, além de demandar investigação geotécnica local para cada empreendimento.

Os critérios adotados consideram tanto aspectos técnicos, relacionados ao comportamento geotécnico dos materiais, quanto aspectos executivos, associados às limitações operacionais dos métodos de fundação analisados. Dessa forma, as cartas produzidas possuem caráter orientativo, sendo destinadas ao apoio ao planejamento preliminar de soluções de fundação.

Para a definição da aptidão entre fundações superficiais e profundas, foi adotada abordagem baseada em análises booleanas, considerando critérios diretos de viabilidade técnica e econômica, como resistência do solo e posição do nível de água. Essa abordagem se demonstrou adequada para análises preliminares, por conta do uso de critérios diretos e de fácil interpretação.

Apesar disso, no caso das fundações profundas a aplicação de critérios estritamente binários mostrou-se excessivamente restritiva, não representando adequadamente a variabilidade das condições geotécnicas e a prática executiva observada na região de estudo, sendo necessária uma abordagem mais flexível. Isso ocorre porque determinados critérios

provenientes das sondagens como, impenetrável ao SPT e valores elevados de N_{SPT}, não representam necessariamente uma limitação absoluta à execução de estacas, uma vez que os equipamentos de fundação possuem capacidade operacional — especialmente em termos de torque — para perfurar camadas de maior resistência. Nessas condições, tais parâmetros passam a refletir, sobretudo, diferentes graus de dificuldade executiva, e não a inviabilidade da execução.

Dessa forma, para a avaliação da aptidão à execução de estacas, foi adotada uma abordagem combinada, envolvendo critérios binários e ponderados. Variáveis diretamente impeditivas à execução, como a presença de nível freático para estacas escavadas sem fluido estabilizante e a ocorrência de material rochoso, foram tratadas como restrições binárias. Por outro lado, parâmetros associados à resistência do solo e à dificuldade de perfuração, como o N_{SPT} e a profundidade do impenetrável, foram incorporados por meio de pesos, permitindo representar diferentes níveis de dificuldade executiva.

Salienta-se que foram adotados critérios mais restritivos para estacas escavadas em relação às estacas hélice contínua monitorada, refletindo as limitações operacionais típicas de cada método executivo. Essa diferenciação permite representar de forma mais realista o comportamento das soluções de fundação frente às condições geotécnicas da área de estudo.

As cartas geotécnicas utilizadas como variáveis de entrada foram originalmente produzidas com resoluções espaciais distintas, definidas em função da densidade amostral e das características de cada variável. Para viabilizar a integração das informações em ambiente SIG, foi adotada uma grade espacial comum, por meio de procedimento de reamostragem dos *rasters*. Para as variáveis contínuas, como profundidade do impenetrável, nível de água e N_{SPT}, foi utilizada reamostragem bilinear, enquanto para variáveis categóricas, como o tipo de solo predominante, foi adotado o método do vizinho mais próximo (*nearest neighbor*), de modo a preservar as classes originais. Esse procedimento teve como objetivo garantir o alinhamento espacial entre os produtos cartográficos, sem alteração dos padrões espaciais originalmente modelados.

3.5.1. Cartas de orientação à fundação: superficial ou profunda

Conforme apresentado no fluxograma da Figura 3.12, as cartas de orientação quanto ao tipo de fundação — superficial ou profunda — foram elaboradas com base na integração das cartas geotécnicas de N_{SPT} e profundidade do nível de água, considerando critérios técnico-econômicos associados à execução de fundações rasas.

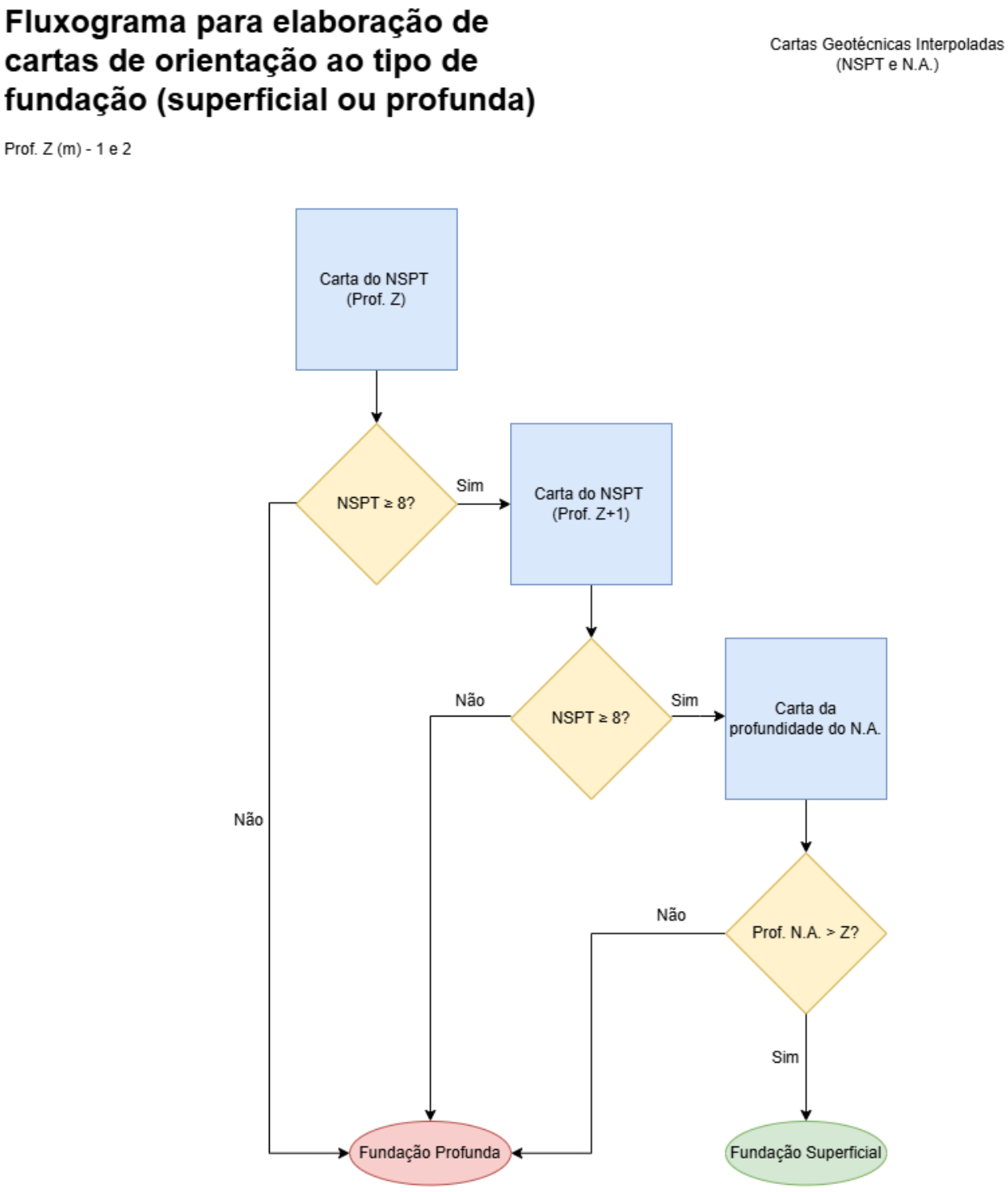


Figura 3.12 - Fluxograma das cartas de orientação ao tipo de fundação (superficial ou profunda).

De acordo com a prática corrente em engenharia geotécnica, a viabilidade de fundações superficiais está diretamente relacionada à resistência do solo nas camadas próximas à superfície e à posição do nível de água em relação à cota de assentamento da fundação. Nesse sentido, foram adotados critérios simplificados para avaliação da aptidão, compatíveis com a escala regional do estudo.

Segundo Rebello (2011), a adoção de fundações superficiais está condicionada ao atendimento simultâneo de requisitos mínimos de resistência do solo e profundidade de assentamento, com o objetivo de evitar problemas relacionados à capacidade de carga e a deformações excessivas. Nesse contexto, destacam-se como critérios fundamentais:

- $Nspt \geq 8$; e
- $H \leq 2m$.

Sendo H a profundidade máxima de assentamento da sapata.

Para fins de análise, considerou-se que o valor representativo de N_{SPT} no bulbo de tensões corresponde aos valores da camada de apoio da fundação e da camada imediatamente inferior, conforme aproximação usual apresentada por Falconi *et al*. (2019) segundo a qual o bulbo de tensões atinge profundidades da ordem de 1,5 a 2 vezes a largura da área carregada.

Adicionalmente, adotou-se como critério restritivo a execução de fundações rasas em profundidades superiores ao nível do lençol freático. Esse critério foi definido sob a ótica técnico-econômica, uma vez que a presença de água acima da cota de apoio da fundação não inviabiliza tecnicamente sua execução, mas implica custos adicionais associados ao rebaixamento do lençol freático durante a escavação.

Dessa forma, para cada célula espacial da área de estudo, considerou-se apto à execução de fundação superficial o solo que atendesse simultaneamente às seguintes condições:

- profundidade máxima de assentamento da sapata de até 2 m;
- valor de $N_{SPT} \geq 8$ na camada de apoio da fundação;
- valor de $N_{SPT} \geq 8$ na camada imediatamente inferior; e
- nível do lençol freático situado abaixo da profundidade de assentamento considerada.

A aptidão foi determinada por meio de modelo lógico baseado em operações booleanas em ambiente SIG a partir das cartas geotécnicas interpoladas. A condição de aptidão à fundação superficial para uma profundidade de assentamento z foi definida conforme a Equação 3.3:

$$A_{sup}(z) = (NSPT_z \geq 8)E(NSPT_{z+1} \geq 8)E(NA > z) \quad (3.3)$$

Em que:

- $A_{sup}(z)$ corresponde à aptidão à fundação superficial na profundidade z;
- $NSPT_z$ é o valor de N_{SPT} na camada correspondente à profundidade de assentamento;

- $NSPT_{z+1}$ é o valor de N_{SPT} na camada imediatamente inferior;
- NA corresponde à profundidade do nível de água.

A aptidão foi considerada verdadeira (1) apenas quando todas as condições foram satisfeitas simultaneamente. Caso contrário, a célula foi direcionada à adoção de soluções de fundação profunda.

Dessa forma, as cartas produzidas permitem a identificação espacial das áreas potencialmente favoráveis à adoção de fundações superficiais, bem como das regiões onde soluções profundas são mais indicadas, constituindo ferramenta de apoio ao planejamento preliminar de projetos de fundação.

3.5.2. Cartas de aptidão à estaca escavada mecanicamente sem fluido estabilizante

Conforme apresentado no fluxograma da Figura 3.13, as cartas de aptidão à execução de estacas escavadas mecanicamente sem fluido estabilizante foram elaboradas para profundidades de Z = 5, 10, 15 e 20 m, a partir da integração das cartas geotécnicas de profundidade do impenetrável, profundidade do nível de água, índice de resistência à penetração (N_{SPT}) e tipo de solo predominante, considerando a aplicação de critérios lógicos e ponderados em ambiente SIG.

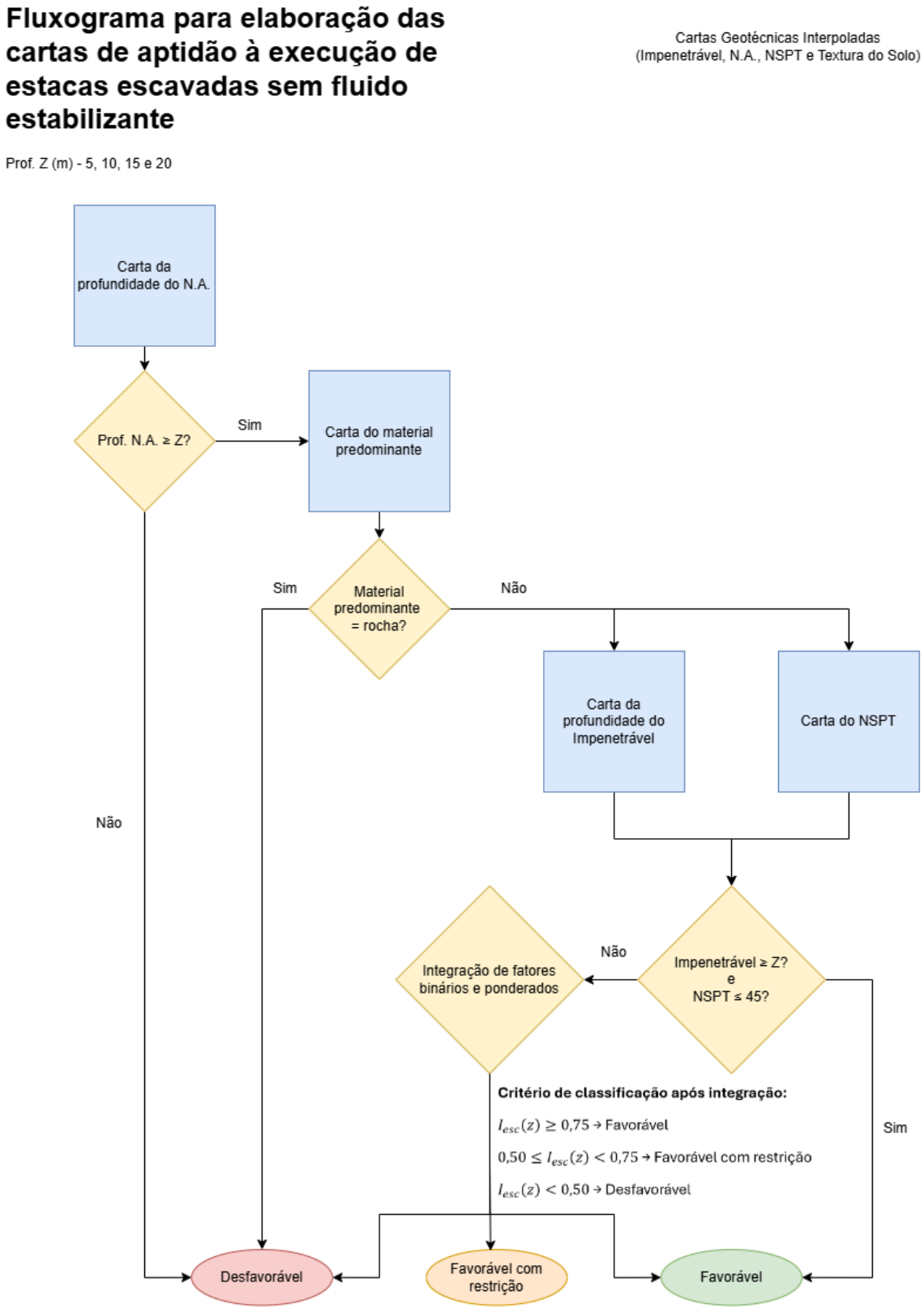


Figura 3.13 - Fluxograma das cartas de aptidão a fundações em estacas escavadas.

A avaliação da viabilidade executiva considerou as limitações inerentes ao método construtivo, especialmente no que se refere à estabilidade das paredes da escavação e à capacidade de perfuração dos equipamentos. Nesse contexto, foram adotados critérios

geotécnicos e executivos para a definição da aptidão, compatíveis com a escala regional do estudo.

Inicialmente, foi avaliada uma abordagem baseada em critérios estritamente binários, na qual a execução da estaca era considerada viável apenas quando todas as condições eram simultaneamente atendidas. Nessa abordagem, foram considerados como fatores restritivos a profundidade do impenetrável, a presença de nível freático acima da ponta da estaca, valores elevados de N_{SPT} e a ocorrência de material rochoso. A aptidão foi, nesse caso, definida por meio de modelo lógico booleano, no qual a condição de viabilidade era satisfeita apenas quando todos os critérios eram atendidos simultaneamente.

Entretanto, verificou-se que a utilização de critérios estritamente binários para algumas variáveis, especialmente o impenetrável e o N_{SPT}, poderia resultar em uma representação excessivamente conservadora das condições de execução, uma vez que esses parâmetros estão mais associados à dificuldade operacional do que à inviabilidade absoluta do método.

Dessa forma, optou-se pela adoção de uma abordagem combinada, envolvendo critérios binários e ponderados, de modo a representar tanto condições impeditivas quanto diferentes níveis de dificuldade executiva. Conforme apresentado nas Equações 3.4 e 3.5, para essas variáveis, foram definidos fatores binários B_{na} e B_{solo}, assumindo valor igual a 1 quando a condição é favorável à execução e 0 quando considerada impeditiva.

$$B_{na} = \begin{cases} 1, & se\ NA \geq z \\ 0, & se\ NA < z \end{cases} \tag{3.4}$$

$$B_{solo} = \begin{cases} 1, & se\ material \neq rocha \\ 0, & se\ material = rocha \end{cases} \tag{3.5}$$

Por outro lado, as variáveis associadas à dificuldade de perfuração foram incorporadas por meio de fatores ponderados.

Para representar a perfuração além do impenetrável, foi calculada a diferença entre a profundidade do impenetrável e a profundidade da estaca analisada, conforme Equação 3.6 abaixo:

$$\Delta_{imp} = IMP - z \tag{3.6}$$

Valores positivos de Δ_{imp} indicam que o impenetrável não foi atingido na profundidade analisada, enquanto valores negativos representam a necessidade de perfuração em camadas de maior resistência. Assim, foram atribuídos pesos decrescentes à medida que aumenta a profundidade de perfuração após o impenetrável, representando maior grau de dificuldade executiva.

De forma complementar, os valores de N_{SPT} foram incorporados por meio de fator ponderado, considerando que valores elevados de N_{SPT} estão associados a maiores esforços de perfuração. Nesse caso, foram adotados pesos diferenciados para valores de N_{SPT} inferiores ou iguais a 45 e superiores a 45, representando condições de menor e maior dificuldade, respectivamente.

Conforme explicitado nas Equações 3.7 e 3.8, foram definidos fatores ponderados $P_{imp,esc}$ e $P_{nspt,esc}$:

$$P_{imp,esc} = \begin{cases} 1.00, & se\ \Delta_{imp} \geq 0 \\ 0.75, & se\ -2 < \Delta_{imp} < 0 \\ 0.50, & se\ -4 < \Delta_{imp} \leq -2 \\ 0.25, & se\ \Delta_{imp} \leq -4 \end{cases} \tag{3.7}$$

$$P_{nspt,esc} = \begin{cases} 1.00, & se\ N_{SPT} \leq 45 \\ 0.75, & se\ N_{SPT} > 45 \end{cases} \tag{3.8}$$

Por fim, a partir da integração dos fatores binários e ponderados, foi definido um índice de aptidão à execução de estacas escavadas, conforme a Equação 3.9:

$$I_{esc}(z) = B_{na} \times B_{solo} \times P_{imp,esc} \times P_{nspt,esc} \tag{3.9}$$

O índice resultante assume valores no intervalo entre 0 e 1, sendo interpretado como indicador do grau de favorabilidade à execução das estacas escavadas. Para fins de classificação, foram adotados os seguintes intervalos:

- Favorável: 0,75 a 1,00;
- Favorável com restrições: 0,50 a < 0,75; e
- Desfavorável: <0,50.

3.5.3. Cartas de aptidão à estaca hélice contínua monitorada

Conforme apresentado no fluxograma da Figura 3.14, cartas de aptidão à execução de estacas hélice contínua monitorada foram elaboradas para profundidades de Z = 5, 10, 15 e 20 m a partir da integração das cartas geotécnicas de profundidade do impenetrável, valores de índice de resistência à penetração (N_{SPT}) por camada e tipo de solo predominante, considerando as particularidades do método executivo para a aplicação de critérios lógicos e ponderados em ambiente SIG.

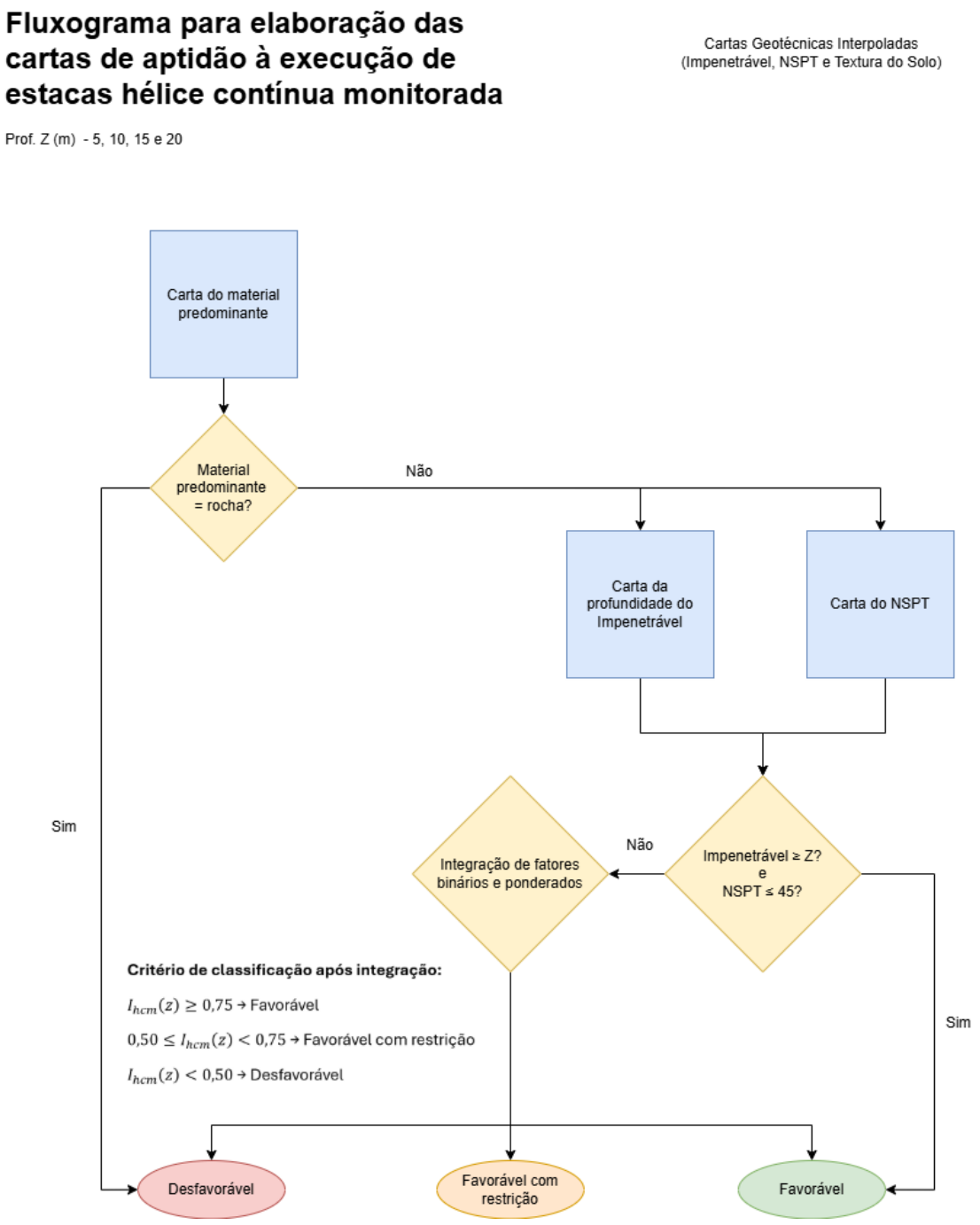


Figura 3.14 - Fluxograma das cartas de aptidão a fundações em estacas hélice contínua.

Diferentemente das estacas escavadas sem fluido estabilizante, a execução de estacas hélice contínua não é significativamente limitada pela presença de água no subsolo, uma vez que o processo construtivo ocorre com a injeção simultânea de concreto durante a retirada do trado, garantindo a estabilidade do furo. Dessa forma, o nível freático não foi considerado como fator restritivo na análise de aptidão para esse tipo de fundação.

A avaliação da viabilidade executiva foi baseada em critérios associados à capacidade de perfuração dos equipamentos e às características do material geotécnico. De forma análoga à análise realizada para estacas escavadas, inicialmente, foi considerada uma abordagem binária, na qual a aptidão era condicionada ao atendimento simultâneo das seguintes restrições: (i) profundidade do impenetrável superior à profundidade da estaca analisada, (ii) valores de N_{SPT} inferiores ou iguais a 45 e (iii) ausência de material classificado como rocha.

Uma vez que a utilização de critérios estritamente binários para o impenetrável e para o N_{SPT} poderia resultar em uma representação excessivamente conservadora das condições de execução, para hélice contínua monitorada também optou-se por adotar uma abordagem combinada, envolvendo critérios binários e ponderados, de modo a representar tanto condições impeditivas quanto diferentes níveis de dificuldade executiva.

Para as variáveis diretamente impeditivas à execução, foi considerado como critério binário apenas a ocorrência de material classificado como rocha, uma vez que, apesar da elevada capacidade operacional dos equipamentos de hélice contínua, a presença de rocha representa limitação à execução do método. Dessa forma, foi definido o fator binário B_{solo}, assumindo valor igual a 1 quando a condição é favorável à execução e 0 quando considerada impeditiva, conforme apresentado na Equação 3.10.

$$B_{solo} = \begin{cases} 1, & se\ material \neq rocha \\ 0, & se\ material = rocha \end{cases} \tag{3.10}$$

De forma análoga à metodologia adotada para estacas escavadas mecanicamente sem fluido estabilizante, as variáveis associadas à dificuldade de perfuração foram incorporadas por meio de fatores ponderados. Para tal, utilizou-se Δ_{imp} para representar a possibilidade de execução além do impenetrável conforme demonstrado no capítulo anterior.

De forma complementar, os valores de N_{SPT} foram incorporados por meio de fator ponderado, considerando que valores elevados de N_{SPT} estão associados a maiores esforços de

perfuração. Entretanto, para o caso da hélice contínua, foram adotados critérios menos restritivos em relação às estacas escavadas, uma vez que o método apresenta melhor desempenho em solos de elevada resistência, principalmente em função do maior torque disponível nos equipamentos, quando comparados aos utilizados em estacas escavadas.

Conforme explicitado nas Equações 3.11 e 3.12, foram definidos para estacas hélice contínua monitorada, o fator ponderado associado ao impenetrável ($P_{imp,hcm}$) e o fator ponderado associado ao N_{SPT} ($P_{nspt,hcm}$):

$$P_{imp,hcm} = \begin{cases} 1.00, & se\ \Delta_{imp} \geq 0 \\ 0.90, & se\ -2 < \Delta_{imp} < 0 \\ 0.75, & se\ -4 < \Delta_{imp} \leq -2 \\ 0.50, & se\ -6 < \Delta_{imp} \leq -4 \\ 0.25, & se\ \Delta_{imp} \leq -6 \end{cases} \tag{3.11}$$

$$P_{nspt,hcm} = \begin{cases} 1.00, & se\ N_{SPT} \leq 45 \\ 0.85, & se\ N_{SPT} > 45 \end{cases} \tag{3.12}$$

Por fim, a partir da integração dos fatores binários e ponderados, foi definido um índice de aptidão à execução de estacas hélice contínua, conforme a equação 3.13:

$$I_{hcm}(z) = B_{solo} \times P_{imp,hcm} \times P_{nspt,hcm} \tag{3.13}$$

O índice resultante assume valores no intervalo entre 0 e 1, sendo interpretado como indicador do grau de favorabilidade à execução das estacas hélice contínua monitorada. Para fins de classificação, foram adotados os mesmos intervalos da metodologia das estacas escavadas para as categorias “favorável”, “favorável com restrições” e “desfavorável”.

3.5.4. Cartas de comprimento máximo de estacas

As cartas de comprimento máximo executável de estacas foram elaboradas a partir da integração hierárquica das cartas de aptidão obtidas para diferentes profundidades de análise, considerando tanto estacas escavadas mecanicamente sem fluido estabilizante quanto estacas hélice contínua monitorada.

Conforme apresentado na Figura 3.15, para a construção dessas cartas, foram utilizadas as cartas de aptidão previamente geradas para profundidades discretas de 5, 10, 15 e 20 metros,

representativas das faixas usuais de execução de fundações profundas em escala regional. Diferentemente de uma abordagem baseada exclusivamente em variáveis isoladas, como profundidade do impenetrável ou nível freático, a metodologia adotada permite incorporar de forma integrada os critérios geotécnicos e executivos definidos nas análises de aptidão.

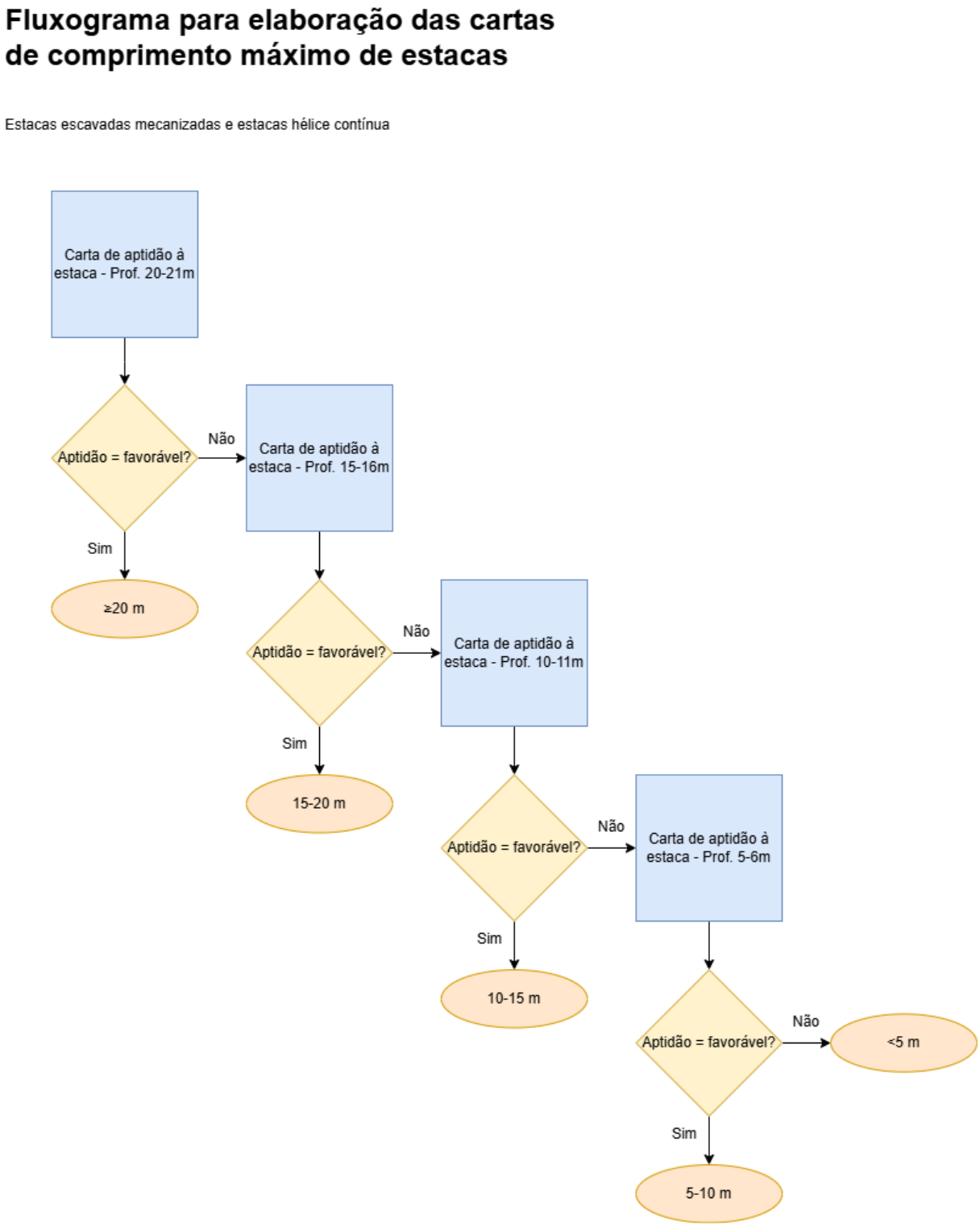


Figura 3.15 - Fluxograma das cartas de comprimento máximo de estacas.

A determinação do comprimento máximo executável foi realizada por meio da identificação, para cada célula espacial, da maior profundidade na qual a execução da estaca foi classificada como favorável. Esse comprimento corresponde exclusivamente à avaliação da favorabilidade executiva, não representando a profundidade necessária para atendimento à capacidade de carga ou ao dimensionamento da fundação. Dessa forma, a área de estudo foi classificada em faixas de comprimento executável, correspondentes aos intervalos: inferior a 5 m, entre 5 e 10 m, entre 10 e 15 m, entre 15 e 20 m e superior ou igual a 20 m.

Para garantir a consistência dos resultados, a análise foi restrita às regiões com suporte amostral adequado nas profundidades consideradas. Em áreas onde a densidade de dados não permitiu a avaliação confiável das maiores profundidades, optou-se por limitar a classificação às faixas inferiores, evitando extrapolações indevidas.

Para a definição do comprimento máximo executável das estacas, foram consideradas exclusivamente as áreas classificadas como “favoráveis” nas cartas de aptidão. As áreas classificadas como “favoráveis com restrições”, embora passíveis de execução, não foram incluídas nessa etapa da análise, de modo a evitar a superestimação do comprimento máximo executável. Dessa forma, a carta produzida representa uma estimativa conservadora do comprimento máximo executável, adequada para fins de planejamento e orientação preliminar de soluções de fundação.

3.6. Validação dos resultados

Para a validação dos resultados obtidos neste trabalho, foram utilizados dados de fundações executadas no município de Palmas, provenientes de projetos geotécnicos e relatórios de execução.

A partir dessas informações, foi construída uma base de dados georreferenciada contendo a localização das obras e os tipos de fundação adotados, possibilitando a comparação entre as soluções executadas em campo e os resultados obtidos nas cartas de aptidão elaboradas.

Essa análise permitiu avaliar a coerência entre as condições indicadas pelas cartas geotécnicas e as soluções de fundação efetivamente adotadas, contribuindo para a verificação da aplicabilidade dos resultados em contexto real. A validação foi realizada de forma qualitativa, por meio da análise da concordância entre as soluções indicadas pelas cartas e aquelas executadas nas obras analisadas.

Foi elaborada uma base de dados georreferenciada contendo informações referentes às obras analisadas, incluindo localização, solução de fundação adotada, profundidade executada e características executivas relevantes. Um exemplo da estrutura organizacional do banco de dados utilizado na validação é apresentado na Figura 3.16.

Ano	Regiao	Tipo_const	Subsolo	Observaç	Endereco	E_UTM	N_UTM	Tipo_Fund	Prof_assen	Ø_Fuste
2010	Outros	Institucional	Não	Fundação em Saptas...	ACSU-SO 40, CONJ....	791837	8870192	Sapata	1,5	Não se aplica
2015	Outros	Residencial	Não	Fundação em Saptas...	ARNO 22, AVENIDA...	790931	8873909	Sapata	1,73	Não se aplica
2022	Graciosa	Sem informação	Sem informação	-	QD. ORLA 14 AL.14...	788792	8871734	Hélice Contínua	10	30
2024	Alphaville I	Residencial	Sem informação	-	ARSO 14 - CONDOM...	789456	8872800	Hélice Contínua	10	30
2023	Alphaville I	Residencial	Sem informação	-	Quadra ARSO 14, Alp...	789386	8872656	Hélice Contínua	10	30
2023	Alphaville II	Residencial	Sem informação	-	ARSO 24 -CONDOMI...	789455	8871982	Hélice Contínua	10	40
2022	Alphaville I	Residencial	Sem informação	-	ARSO 14, CONDOMÍ...	789582	8872644	Hélice Contínua	10	40
2025	Outros	Residencial	Sem informação	-	ARNE 24, ALAMEDA...	794830	8873844	Hélice Contínua	10	40
2023	Outros	Comercial	Não	-	Avenida LO 05, Lotes...	790549	8871564	Estaca Escavada	10	30
2022	Outros	Residencial	Sem informação	-	ARSO 62, ALAMEDA...	790390	8868731	Hélice Contínua	10	30
2020	Outros	Prédio	Não	-	PALMEIRA DE MONA...	793193	8863649	Hélice Contínua	10	50
2025	Outros	Institucional	Sem informação	-	ARSE 14, AL.01, CON...	794985	8872808	Estaca Escavada	10,5	60

Figura 3.16 - Recorte do banco de dados utilizado na validação dos resultados.

Legenda: ANO – ano de execução ou registro da obra; REGIAO – região em que o empreendimento está localizado; TIPO_CONST – tipo de construção; SUBSOLO – indicação da existência de subsolo; OBSERVAÇ – observações complementares associadas ao registro; ENDERECO – endereço ou referência de localização da obra; E_UTM e N_UTM – coordenadas planas no sistema UTM; TIPO_FUND – tipo de fundação executada ou projetada; PROF_ASSEN – profundidade de assentamento da fundação, em metros; Ø_FUSTE – diâmetro do fuste, em centímetros, quando aplicável.

Nota: cada linha corresponde a um registro de obra ou empreendimento associado a um determinado tipo de fundação. Os campos indicados como “Sem informação” correspondem a dados não disponíveis na fonte consultada, enquanto “Não se aplica” foi utilizado para variáveis incompatíveis com o tipo de fundação registrado, como o diâmetro do fuste em fundações superficiais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da modelagem geoestatística das variáveis geotécnicas analisadas, bem como sua interpretação no contexto geológico e geomorfológico da área de estudo. As análises foram conduzidas com base nos dados provenientes do Banco de Dados Geotécnico (BDG), previamente tratados e interpolados em ambiente SIG, conforme descrito no capítulo metodológico.

A apresentação dos resultados foi organizada por variável geotécnica, contemplando, para cada caso, a análise estatística dos dados, a modelagem geoestatística, a avaliação dos indicadores de validação cruzada e a interpretação dos padrões espaciais obtidos. Sempre que pertinente, foram realizadas análises complementares, incluindo a avaliação da influência de domínios geológicos, da distribuição espacial dos dados e de diferentes abordagens metodológicas adotadas durante o processo de modelagem.

Destaca-se que a interpretação dos resultados foi realizada considerando a escala de trabalho adotada, de modo que os padrões identificados devem ser compreendidos como tendências regionais do comportamento geotécnico, não substituindo investigações geotécnicas locais detalhadas para fins de projeto.

4.1. Cartas Geotécnicas

Nessa seção serão apresentados os resultados das análises da profundidade e cota do impenetrável e do nível de água, bem como os valores de N_{SPT} por camada e a predominância do tipo de solo. Os resultados dessas análises constituem a base para a elaboração das cartas de aptidão à fundação, apresentadas ao final deste capítulo.

4.1.1. Impenetrável SPT

A análise da profundidade e da cota do impenetrável ao SPT foi conduzida a partir da caracterização estatística dos dados disponíveis, seguida da modelagem geoestatística e da interpolação espacial. Dessa forma, os subitens seguintes apresentam, respectivamente, a distribuição estatística das variáveis, o ajuste dos modelos variográficos e a validação cruzada, bem como as cartas resultantes.

4.1.1.1. Análise estatística dos dados

A análise estatística da profundidade do impenetrável foi realizada a partir do conjunto de sondagens disponíveis no Banco de Dados Geotécnico (BDG), considerando exclusivamente

os registros com valores numéricos válidos. A distribuição dos dados para o conjunto total é apresentada na Figura 4.1, por meio do histograma da profundidade do impenetrável.

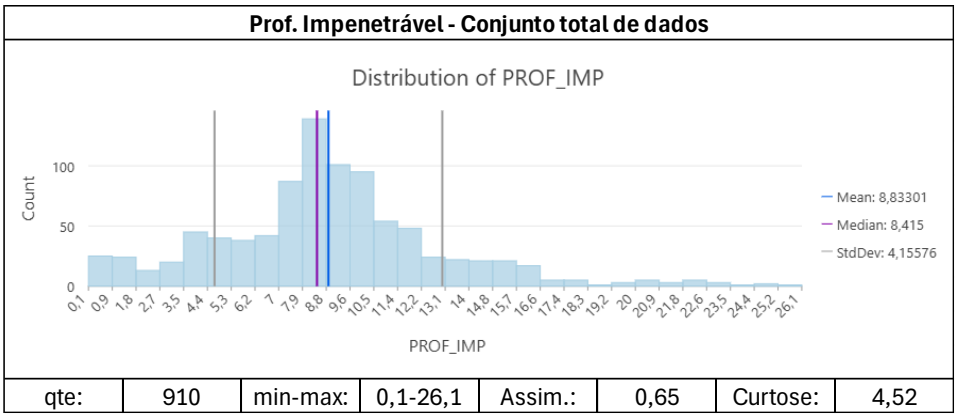


Figura 4.1 - Histograma da profundidade do impenetrável (conjunto total de dados)

Observa-se comportamento aproximadamente unimodal, com leve assimetria positiva, sem concentração artificial de valores ou presença de extremos que comprometam a modelagem geoestatística. A proximidade entre média e mediana, associada a coeficientes de assimetria moderados, indica distribuição compatível com a aplicação direta da krigagem ordinária, sem necessidade de transformações.

Com o objetivo de avaliar a influência do contexto geológico, os dados foram analisados separadamente para os domínios aluvionar e não aluvionar, cujas distribuições são apresentadas na Figura 4.2.

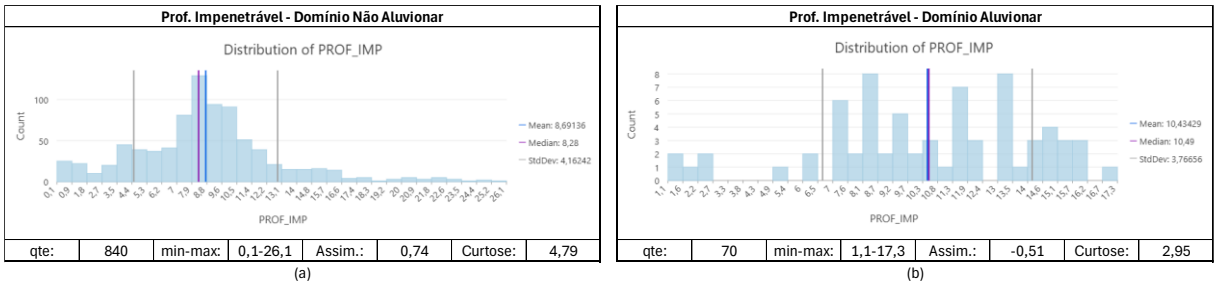


Figura 4.2 - Histogramas da profundidade do impenetrável nos domínios (a) não aluvionar e (b) aluvionar

A análise da segmentação por domínios evidenciou comportamentos distintos em relação ao modelo global. No domínio não aluvionar, os parâmetros estatísticos mantiveram-se semelhantes aos observados no conjunto geral, indicando que essa unidade representa a maior parcela do conjunto amostral e exerce controle predominante sobre a estrutura global da variável.

Em contrapartida, no domínio aluvionar, observou-se aumento da profundidade média e maior proximidade entre os valores de média e mediana, indicando distribuição mais simétrica.

Verificou-se ainda redução da curtose, associada à diminuição da concentração de valores em torno da média e maior dispersão dos dados, comportamento coerente com a maior espessura de materiais inconsolidados nessas regiões.

De modo geral, as distribuições observadas mantêm características compatíveis com a aplicação da krigagem ordinária, sem necessidade de transformações, preservando o significado físico da variável e garantindo consistência na representação das tendências espaciais.

4.1.1.2. Modelagem geoestatística e validação cruzada

Foram testados diferentes arranjos de modelagem geoestatística para a profundidade do impenetrável, incluindo a abordagem global (todos os dados), bem como a divisão por domínios geológicos. Os parâmetros de modelagem e os indicadores de validação cruzada obtidos são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Parâmetros de modelagem e indicadores da validação cruzada do Impenetrável.

		Parâmetros de entrada						Krigagem Ordinária				
Tipo de carta	Del. área	Esp. (D)	Cell Size	Lag Size	Num Lag	Min Neig	Max Neig	nº pts	Pepita (%)	RMS	RMSS	ASE
Impenetrável	**Geral**	**76**	**20**	**40**	**12**	**8**	**12**	**910**	**20,26**	**2,63**	**1,02**	**2,57**
	Não Aluv	75	20	40	12	8	12	838	21,03	2,65	1,03	2,57
	Aluv	280	70	140	10	6	12	70	21,31	2,46	0,98	2,56

Legenda: Del. área – delimitação da área analisada; Esp. (D) – espaçamento médio adotado entre pontos amostrais; *Cell Size* – tamanho da célula do *raster* de saída; *Lag Size* – distância de *lags* utilizada no variograma; *Num Lag* – número de *lags* do variograma; *Min Neig.* e *Max Neig* . – número mínimo e máximo de vizinhos considerados na interpolação; nº pts – número de pontos utilizados; Pepita (%) – efeito pepita relativo; RMS – raiz do erro quadrático médio; RMSS – raiz do erro quadrático médio padronizado; ASE – erro padrão médio. Esp. (D), *Cell Size* e *Lag Size* são expressos em metros.

A divisão por domínios geológicos não resultou em melhoria significativa dos indicadores de validação cruzada em relação ao modelo global, mantendo valores de efeito pepita e RMSS semelhantes. Esse resultado indica que a estrutura espacial da profundidade do impenetrável apresenta comportamento regional contínuo, não sendo fortemente condicionada pelo limite entre depósitos aluvionares e unidades geológicas consolidadas.

Embora tenham sido observadas diferenças estatísticas no domínio aluvionar, tais variações não se refletiram em ganhos relevantes na modelagem geoestatística.

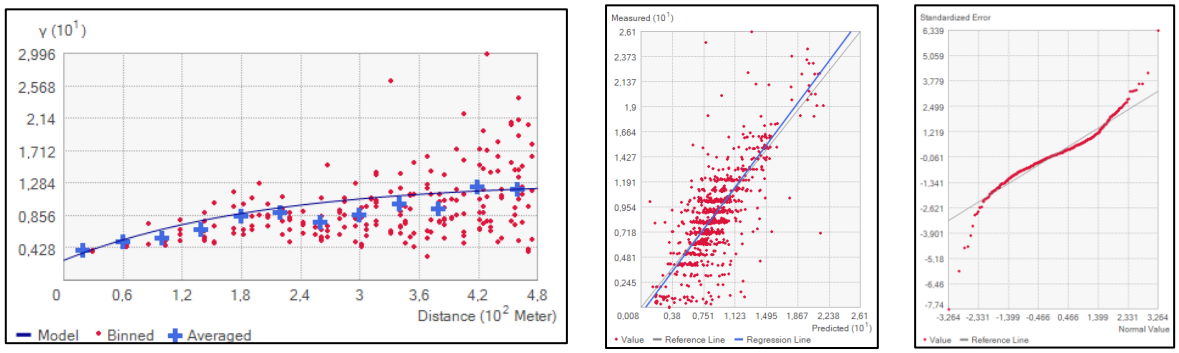
Dessa forma, optou-se pela utilização do modelo global da profundidade do impenetrável, mantendo o conjunto completo de dados, de modo a preservar a representatividade amostral e a continuidade espacial do fenômeno na área de estudo.

A modelagem geoestatística da profundidade do impenetrável foi realizada por meio de krigagem ordinária, assumindo média aproximadamente constante em escala local. O semivariograma ajustado apresentou efeito pepita da ordem de 20%, indicando dependência

espacial moderada e presença de variabilidade local associada à heterogeneidade geotécnica e às limitações do método de investigação.

A qualidade do modelo foi avaliada por meio de validação cruzada, que indicou desempenho satisfatório, com erro quadrático médio compatível com a variabilidade da variável (RMS = 2,63) e razão entre erro padronizado e unidade próxima do ideal (RMSS = 1,02). Observou-se ainda boa concordância entre o RMS e o erro padrão médio (ASE), indicando consistência na estimativa da incerteza.

Os principais resultados da avaliação do modelo são apresentados na Figura 4.3, que reúne o semivariograma ajustado, a relação entre valores observados e estimados e o gráfico quantil-quantil dos erros padronizados.



(a) (b) (c)

Figura 4.3 - Avaliação do modelo geoestatístico da profundidade do impenetrável: (a) semivariograma experimental e modelo ajustado; (b) valores observados versus estimados; (c) gráfico quantil-quantil dos erros padronizados.

A análise dos gráficos de validação mostrou boa correlação entre valores observados e estimados, com tendência à suavização dos extremos - comportamento característico da krigagem ordinária, associado à superestimação de valores baixos e subestimação de valores elevados. O gráfico quantil-quantil dos erros padronizados indica aderência à distribuição normal para a maior parte dos dados, com desvios nas caudas da distribuição associados à presença de valores extremos, sem comprometer a consistência global do modelo.

4.1.1.3. Resultado espacial

A distribuição espacial da profundidade do impenetrável, obtida a partir da modelagem geoestatística descrita anteriormente, é apresentada na Figura 4.4, enquanto a Figura 4.5 apresenta a cota do impenetrável, obtida pela integração entre a superfície interpolada e o Modelo Digital de Elevação (MDE). A carta de profundidade expressa a espessura dos materiais inconsolidados a partir da superfície do terreno até a ocorrência do impenetrável ao SPT,

enquanto a carta de cota representa a posição do impenetrável em relação ao nível do mar. A análise conjunta dessas representações permite avaliar tanto a variabilidade relativa da espessura dos solos quanto a variação altimétrica da superfície de impenetrável na área de estudo.

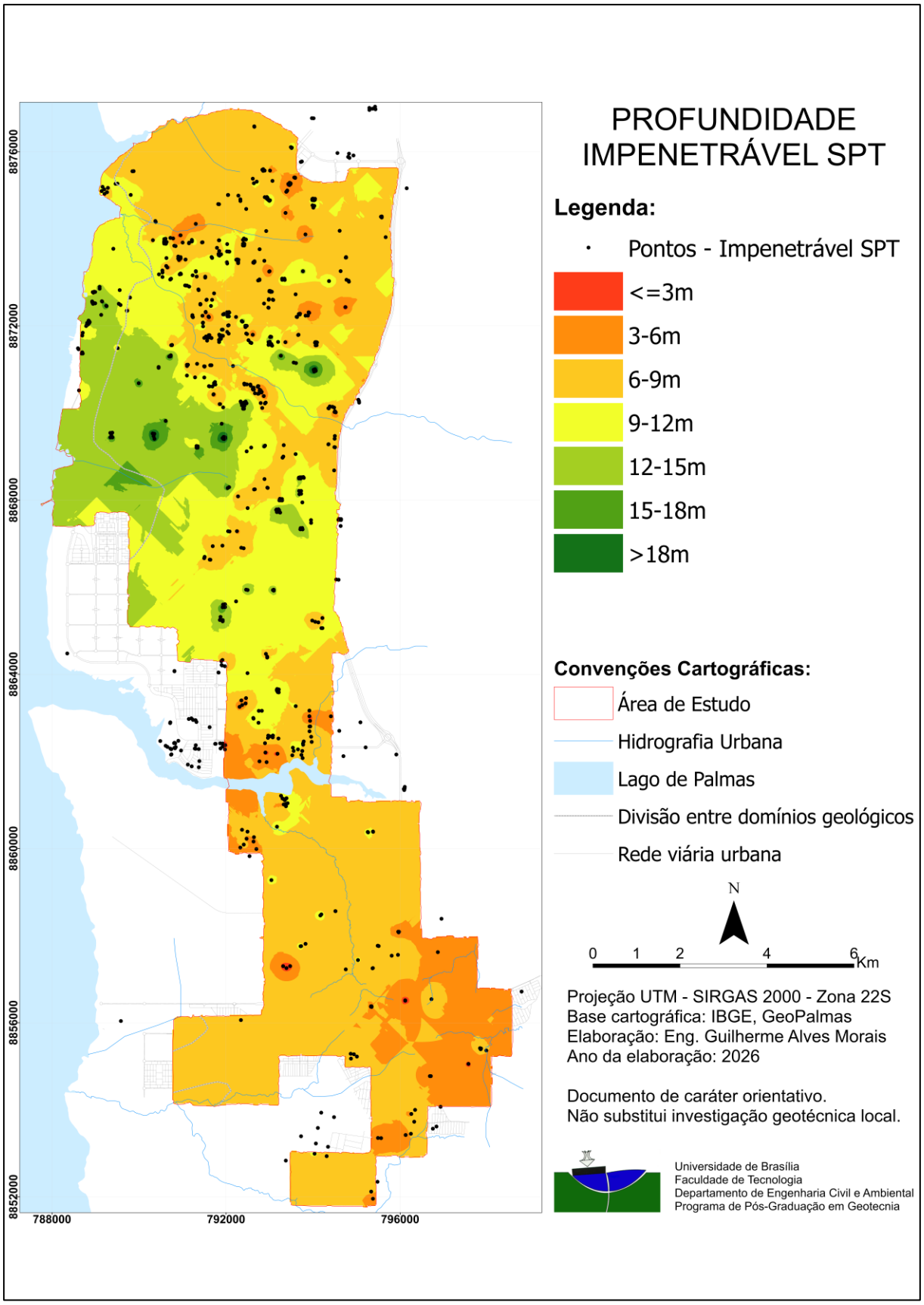


Figura 4.4 - Carta da Profundidade do impenetrável SPT.

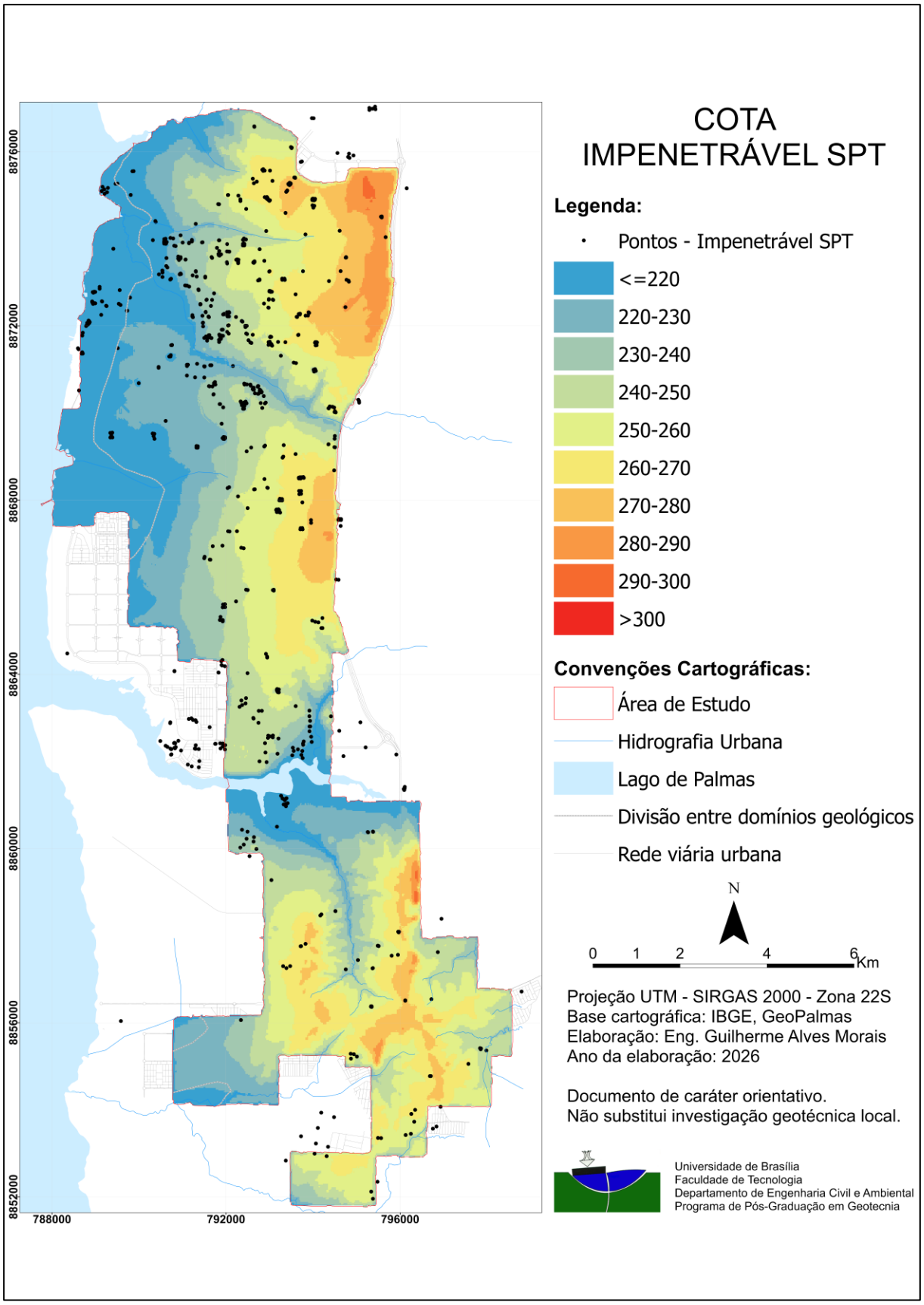


Figura 4.5 - Carta da Cota do impenetrável SPT da área de estudo.

A análise da carta de profundidade do impenetrável evidencia padrões compatíveis com a organização geomorfológica da área de estudo. As variações espaciais observadas parecem estar associadas à combinação entre relevo e espessura dos materiais superficiais. A carta de cota do impenetrável complementa essa interpretação ao representar a posição altimétrica estimada da superfície de paralisação das sondagens, obtida a partir da diferença entre o MDE e a profundidade do impenetrável interpolada. Por incorporar o modelo altimétrico do terreno, essa representação evidencia um gradiente espacial associado à topografia, com cotas menores nos setores topograficamente rebaixados e valores mais elevados nas porções de maior altitude. Dessa forma, a análise conjunta das cartas permite avaliar tanto a profundidade necessária para atingir o impenetrável a partir da superfície do terreno quanto à posição altimétrica estimada dessa superfície na área de estudo.

A distribuição espacial observada também é compatível com o contexto geológico da área de estudo, destacando-se a associação entre maiores profundidades do impenetrável e os terraços aluvionares mapeados na região. Nessas zonas, observa-se maior espessura de materiais inconsolidados, o que implica tendência a maiores comprimentos de estacas e condicionantes técnicos na definição das soluções de fundação.

Em contrapartida, menores profundidades são mais frequentes em setores associados à Formação Pimenteiras, refletindo a menor espessura de solos inconsolidados a residuais. Esse contraste reforça a influência do contexto geológico na organização do subsolo e na variabilidade das condições geotécnicas.

4.1.2. Nível de água

A análise do nível de água foi realizada a partir dos dados de profundidade e cota do N.A. registrados nas sondagens disponíveis no Banco de Dados Geotécnico (BDG). Os resultados foram organizados em etapas sucessivas, contemplando a caracterização estatística dos dados, a definição das condições hidráulicas consideradas, a modelagem geoestatística com validação cruzada, a comparação entre abordagens de interpolação e a apresentação das cartas resultantes.

4.1.2.1. Análise estatística dos dados

Inicialmente, foram analisados os dados de profundidade e cota do nível do lençol freático, considerando o conjunto total de observações disponíveis no Banco de Dados Geotécnico (BDG).

A distribuição dos dados de profundidade e de cota do nível de água para o conjunto global é apresentada na Figura 4.6, por meio de histogramas representativos dessas variáveis.

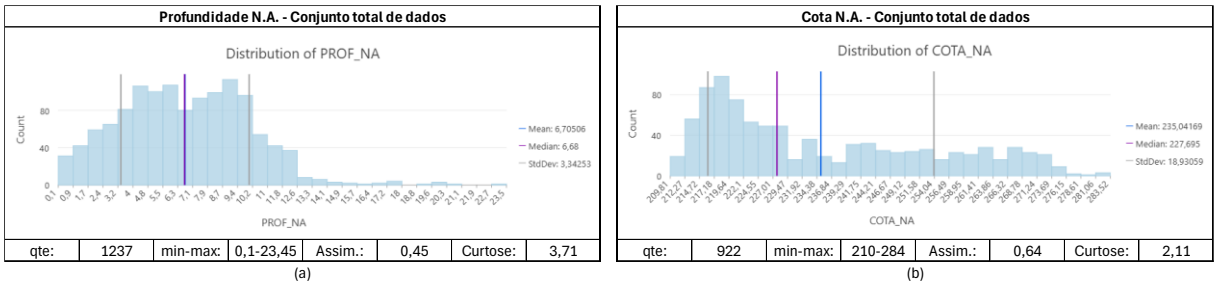


Figura 4.6 - Histogramas da (a) profundidade e da (b) cota do nível de água para o conjunto total de dados

Observa-se que a profundidade do nível de água apresenta indícios de bimodalidade, maior dispersão e curtose, indicando maior variabilidade e presença de valores extremos, associados à sua dependência direta em relação ao relevo. Em contrapartida, a cota do nível de água apresenta distribuição mais regular, com menor curtose, embora com assimetria ligeiramente mais elevada. Esse comportamento indica maior estabilidade estatística da variável, além de menor influência das variações topográficas locais, refletindo de forma mais adequada o comportamento hidrológico do sistema.

Adicionalmente, foi avaliada a influência da subdivisão da área em domínios geológicos, pois os indícios de bimodalidade na distribuição dos dados de profundidade poderiam estar relacionados a diferença da matriz arenosa dos terraços aluvionares, que tendem a apresentar melhor comportamento da drenagem da água proveniente de precipitações quando comparado à capacidade de drenagem da formação pimenteiras com de solos mais finos. A análise da profundidade evidenciou diferenças entre os domínios, com valores médios inferiores no domínio aluvionar. Entretanto, ao analisar a variável cota do nível de água, verificou-se que essas diferenças não se mantêm de forma significativa, evidenciando comportamento mais contínuo e menos influenciado pela subdivisão geológica. Esse resultado sugere que a variabilidade observada na profundidade está fortemente condicionada à topografia e à posição relativa no sistema hidrológico.

Conforme observado na Figura 4.7, a análise da variabilidade sazonal indicou diferenças nos valores médios da profundidade entre os períodos seco e úmido. No período seco, a profundidade média foi de 7,20 m, enquanto no período úmido foi de 6,25 m, resultando em uma diferença média de aproximadamente 0,95 m. Esse comportamento indica a ocorrência de níveis mais rasos durante o período chuvoso, refletindo a resposta do sistema aquífero às condições de recarga.

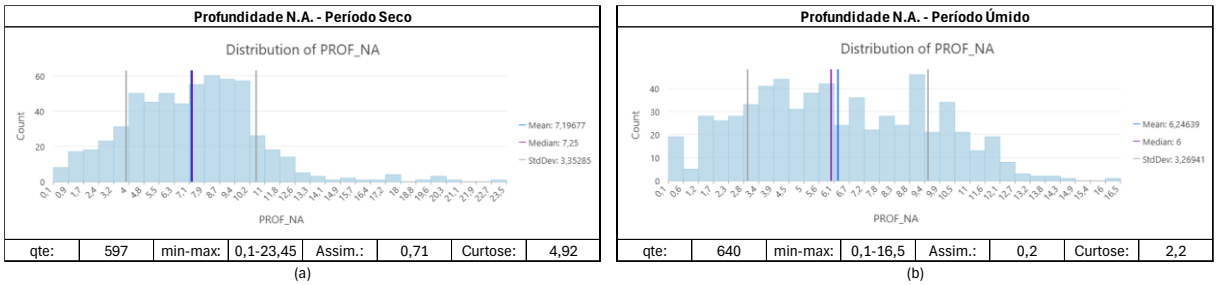


Figura 4.7 - Histogramas da profundidade do nível de água (a) no período seco e (b) no período úmido.

Entretanto, ao avaliar a variável em termos de cota, verificou-se que essa diferença não se manifesta de forma significativa, indicando que a variação observada na profundidade está associada predominantemente ao relevo, e não a alterações estruturais no comportamento hidrológico do sistema.

Dessa forma, a maior estabilidade estatística na variável cota, indica maior adequação dessa representação para a modelagem do nível de água em escala regional.

4.1.2.2. Inserção de condicionantes hidrológicos e definição da profundidade

A avaliação preliminar do modelo evidenciou que a interpolação da cota do nível de água por krigagem, quando realizada sem condicionantes adicionais, tende a suavizar excessivamente a superfície piezométrica, especialmente nas proximidades dos cursos de água, podendo resultar em estimativas fisicamente inconsistentes, como valores superiores à superfície topográfica.

Para reduzir inconsistências físicas associadas à interpolação da superfície piezométrica, foram incorporados pontos de controle ao longo dos principais corpos hídricos da área de estudo, introduzindo uma condição de contorno hidrológico na modelagem.

Considerando que os cursos de água representam zonas naturais de descarga do aquífero, adotou-se, nesses locais, a hipótese de coincidência aproximada entre o nível de água e a superfície topográfica, utilizando-se a cota do terreno como referência para o nível de água.

A inclusão desses condicionantes permitiu reduzir o efeito de suavização da krigagem nas áreas próximas à drenagem, evitando estimativas fisicamente inconsistentes, como valores da superfície piezométrica superiores ao terreno, e resultando em uma superfície interpolada mais coerente com o comportamento do nível de água na área de estudo.

A profundidade do nível freático foi posteriormente obtida a partir da diferença entre o Modelo Digital de Elevação (MDE) e a superfície interpolada da cota do nível de água. Para evitar inconsistências associadas à extrapolação em áreas com menor densidade de dados,

foram aplicados limites baseados no intervalo observado nas sondagens, garantindo a coerência entre a superfície piezométrica e o relevo e preservando a representatividade da variabilidade do conjunto de dados.

4.1.2.3. Modelagem geoestatística e validação cruzada

A modelagem geoestatística do nível freático foi realizada considerando tanto a variável profundidade quanto a variável cota do nível de água, com o objetivo de avaliar a abordagem mais adequada para representação espacial do fenômeno. Foram testadas diferentes configurações de modelagem, incluindo a segmentação por períodos (seco e úmido) e por domínios geológicos, bem como a utilização do conjunto global de dados.

Os principais parâmetros de modelagem e os indicadores de validação cruzada obtidos para as diferentes configurações testadas são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Parâmetros de modelagem e indicadores de validação cruzada para o nível de água.

			Parâmetros de entrada						Krigagem Ordinária				
Tipo de carta	Dado int.	Cond. Hid.	Esp. (D)	Cell Size	Lag Size	Num Lag	Min Neig	Max Neig	nº pts	Pepita (%)	RMS	RMSS	ASE
N.A.	Prof.	não	64	30	60	12	8	12	1237	9,44	1,47	1,05	1,42
	Cota	**sim**	**70**	**30**	**60**	**12**	**8**	**12**	**1366**	**6,01**	**2,4**	**1,07**	**2,05**

Legenda: Dado int – dado interpolado; Cond Hid. – condicionantes hidrológicos; Esp. (D) – espaçamento médio adotado entre pontos amostrais; *Cell Size* – tamanho da célula do *raster* de saída; *Lag Size* – distância de *lags* utilizada no variograma; *Num Lag* – número de *lags* do variograma; *Min Neig.* e *Max Neig* . – número mínimo e máximo de vizinhos considerados na interpolação; nº pts – número de pontos utilizados; Pepita (%) – efeito pepita relativo; RMS – raiz do erro quadrático médio; RMSS – raiz do erro quadrático médio padronizado; ASE – erro padrão médio. Esp. (D), *Cell Size* e *Lag Size* são expressos em metros.

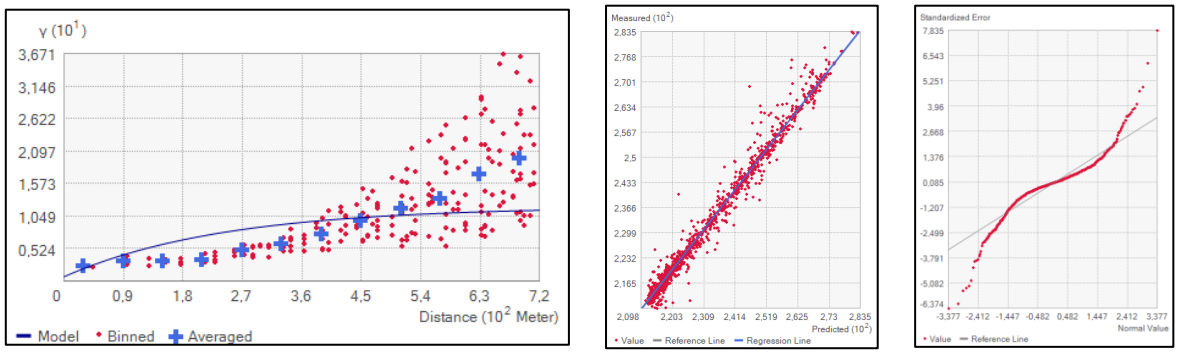
Os resultados indicam que, embora a modelagem baseada na profundidade apresente pequenas variações nos indicadores estatísticos entre as diferentes configurações testadas, esse comportamento não se manteve de forma significativa para a variável cota do nível de água. Para a cota, os indicadores de validação cruzada permaneceram relativamente estáveis, evidenciando comportamento espacial mais contínuo e menos sensível às diferentes estratégias de modelagem adotadas.

Esse resultado reforça a interpretação de que as variações observadas na profundidade do nível de água estão fortemente associadas ao relevo e à posição relativa no sistema hidrográfico, uma vez que a profundidade é medida a partir da superfície do terreno. A cota do nível de água, por sua vez, representa de forma mais adequada o comportamento hidrológico do sistema aquífero, permitindo interpretar sua variação espacial e sua relação com os gradientes de fluxo subterrâneo.

A modelagem final foi realizada por krigagem ordinária, assumindo média aproximadamente constante em escala local. Embora o semivariograma experimental apresente menor aderência ao modelo ajustado nas menores distâncias, os resultados da validação cruzada

indicaram desempenho global satisfatório para a escala de análise adotada. O efeito pepita de aproximadamente 6% sugere a influência da variabilidade local e às incertezas inerentes ao método de investigação.

Os principais resultados da avaliação do modelo adotado são apresentados na Figura 4.8.



(a) (b) (c)

Figura 4.8 - Avaliação do modelo geoestatístico da cota do lençol freático: (a) semivariograma experimental e modelo ajustado; (b) valores observados versus estimados; (c) gráfico quantil-quantil dos erros padronizados.

Os gráficos de validação apresentam boa correlação entre valores observados e estimados, indicando desempenho satisfatório do modelo na representação da variabilidade espacial da variável. Assim como observado na análise do impenetrável, para a análise do nível do lençol freático há tendência à suavização dos extremos, comportamento característico da krigagem ordinária.

O gráfico quantil-quantil dos erros padronizados indica aderência à distribuição normal para a maior parte dos dados, com desvios nas caudas da distribuição associados à presença de valores extremos, sem comprometer a consistência global do modelo.

A validação cruzada indicou RMSS próximo da unidade, indicando adequada calibração da variância. Observou-se também coerência entre o erro médio e o erro padrão médio, evidenciando consistência nas estimativas.

Dessa forma, optou-se por não segmentar os dados por período (seco e úmido) ou por domínios geológicos (terraços aluvionares, Formação Pimenteiras e Granito Palmas) na modelagem final, adotando abordagem global baseada na cota do nível de água. Essa decisão preserva a robustez estatística do conjunto amostral e a coerência física do fenômeno, além de evitar a redução do número de dados em cada subconjunto, o que poderia comprometer a representatividade das distribuições e a estabilidade da modelagem geoestatística.

4.1.2.4. Comparação entre abordagens de modelagem

Foi realizada uma comparação entre duas abordagens para obtenção da profundidade do nível de água: a profundidade interpolada diretamente a partir dos dados de sondagem e a profundidade derivada a partir da cota interpolada do nível de água, sendo esta última a superfície adotada no trabalho. Nesta segunda abordagem, a profundidade foi obtida pela diferença entre o modelo digital de elevação e a superfície interpolada da cota do N.A., conforme a expressão: Prof. N.A. derivada = MDE − Cota N.A. interpolada.

O mapa de diferença foi elaborado a partir da expressão: Prof. N.A. derivada − Prof. N.A. interpolada. Assim, conforme observado na Figura 4.9, valores negativos indicam setores onde a profundidade derivada ficou menor que a profundidade interpolada diretamente, enquanto valores positivos indicam setores onde a profundidade derivada ficou maior. Valores próximos de zero foram interpretados como áreas de maior concordância entre as duas abordagens.

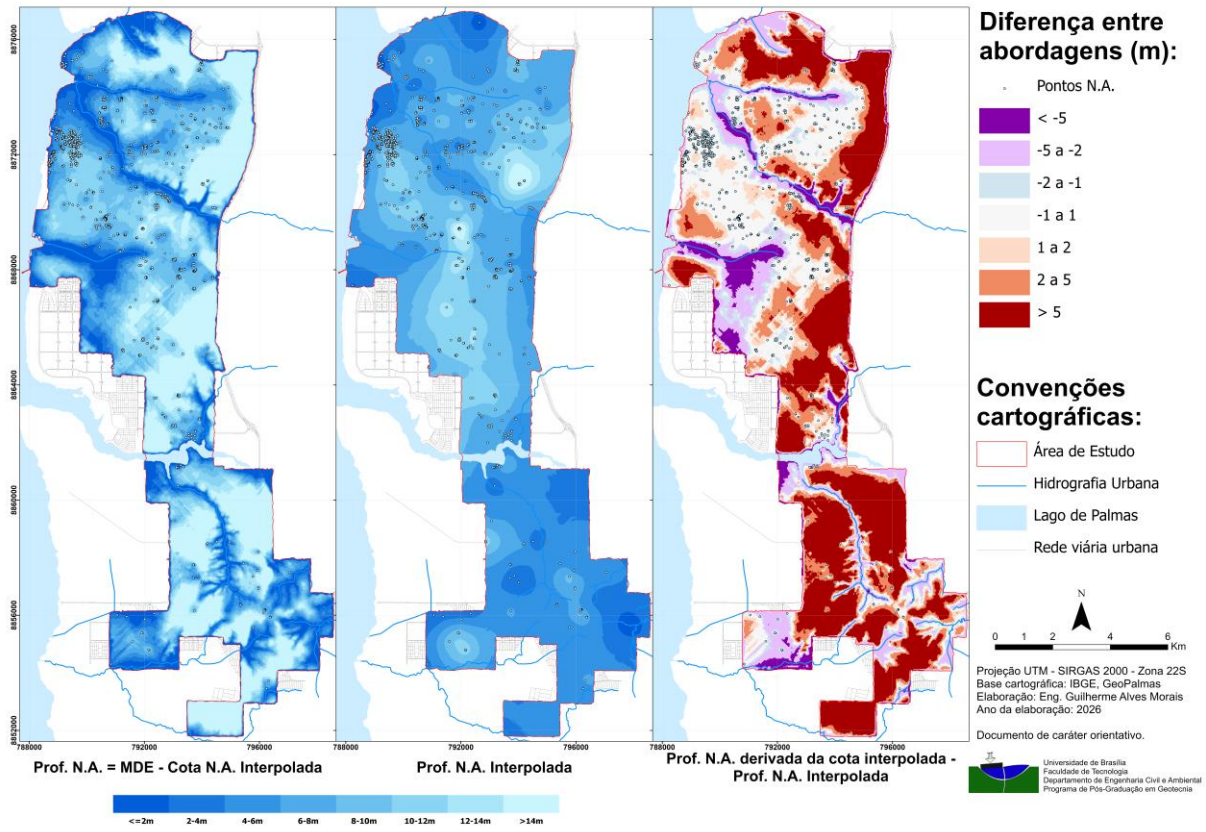


Figura 4.9 - Comparação entre abordagens para definição da profundidade do N.A.

De modo geral, observa-se que as diferenças entre as abordagens apresentam organização espacial coerente com a distribuição dos pontos de sondagem, com a rede de drenagem e com a variação topográfica da área. As menores diferenças tendem a ocorrer nos setores com maior

concentração de sondagens, onde as superfícies interpoladas estão mais condicionadas por dados observados. Em contrapartida, as diferenças mais expressivas aparecem principalmente em setores com menor controle amostral, especialmente em áreas periféricas, topograficamente mais elevadas ou afastadas das zonas com maior densidade de informações.

Nas proximidades dos cursos de água e fundos de vale, predominam valores negativos, indicando que a profundidade derivada tende a ser menor que a profundidade interpolada diretamente. Esse comportamento sugere um N.A. mais próximo da superfície nesses setores, o que é compatível com a condição esperada para áreas baixas e próximas à rede de drenagem.

Por outro lado, em áreas mais elevadas e/ou mais afastadas da rede de drenagem, predominam valores positivos, indicando maior profundidade na abordagem derivada. Esse padrão pode estar relacionado ao fato de que a profundidade derivada incorpora de forma mais explícita a relação entre a superfície topográfica e a superfície interpolada da cota do N.A.

Dessa forma, as diferenças observadas não foram interpretadas diretamente como erro entre as abordagens, mas como indicação da sensibilidade das superfícies interpoladas à variável utilizada na modelagem e à distribuição espacial dos dados disponíveis. A comparação sugere que a abordagem derivada a partir da cota do N.A. apresenta um padrão espacial compatível com a organização do relevo e da drenagem, especialmente ao indicar menores profundidades nos fundos de vale e maiores profundidades em setores mais elevados.

De forma complementar, foi realizada também uma comparação entre duas abordagens para representação da cota do nível de água: a cota interpolada diretamente a partir dos dados de sondagem (adotada no trabalho) e a cota derivada a partir da profundidade interpolada do nível de água. Nesta segunda abordagem, a cota foi obtida pela diferença entre o modelo digital de elevação e a superfície interpolada da profundidade do N.A., conforme a expressão: Cota N.A. derivada = MDE – Prof. N.A. interpolada.

O mapa de diferença foi elaborado a partir da expressão: Cota N.A. interpolada − Cota N.A. derivada. Conforme observado na Figura 4.10, valores positivos indicam setores onde a cota interpolada diretamente ficou maior que a cota derivada, o que sugere, comparativamente, um N.A. mais próximo da superfície nessa abordagem. Por outro lado, valores negativos indicam setores onde a cota interpolada ficou menor que a cota derivada, sugerindo um N.A. mais profundo em relação à abordagem derivada. Valores próximos de zero foram interpretados como áreas de maior concordância entre as duas abordagens.

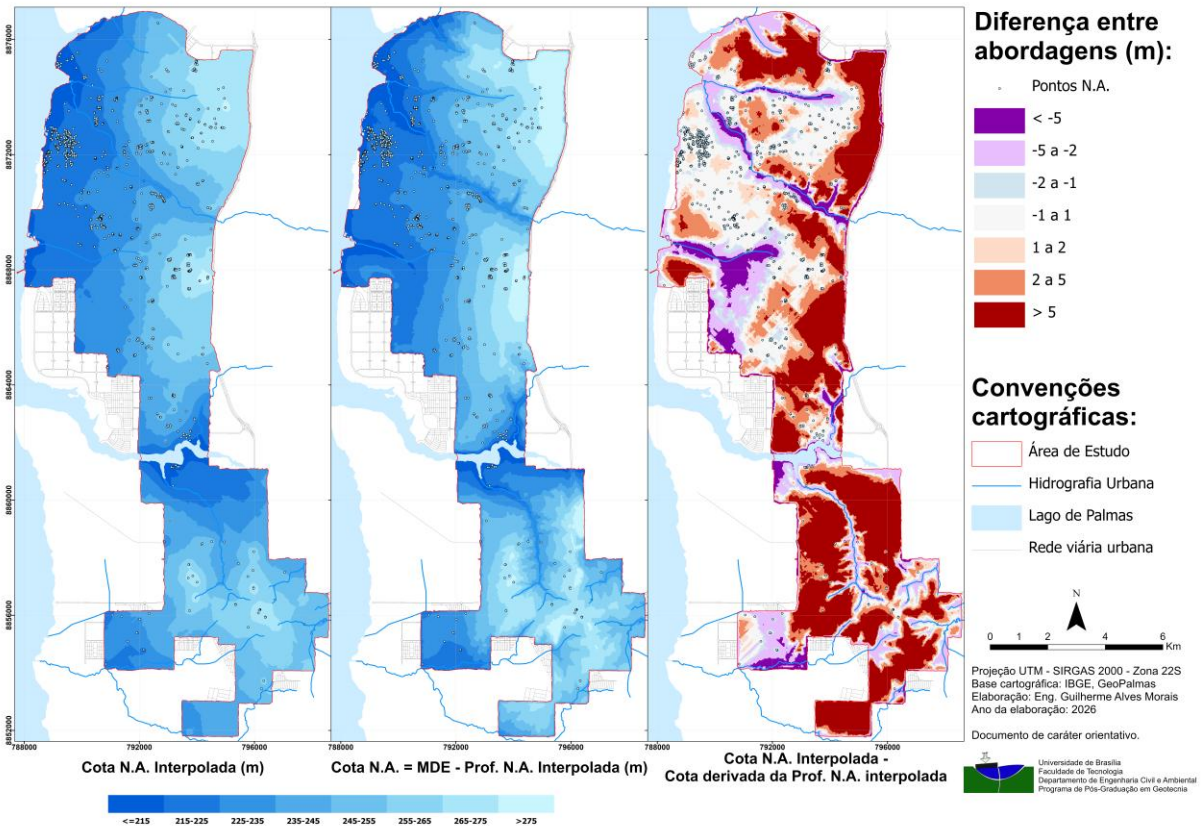


Figura 4.10 - Comparação entre abordagens para definição da cota do N.A.

Essa análise deve ser entendida como complementar à comparação das profundidades, uma vez que cota e profundidade do N.A. são variáveis relacionadas pela superfície do terreno. Por esse motivo, os mapas de diferença tendem a apresentar comportamento espelhado, com sinais opostos entre as duas análises.

A comparação visual entre as duas superfícies de cota também indica uma diferença importante entre as abordagens. A cota do N.A. interpolada diretamente apresenta uma superfície mais suavizada, enquanto a cota derivada da profundidade interpolada apresenta maior influência das variações do MDE. Esse comportamento é coerente com a forma de obtenção da cota derivada, uma vez que ela resulta da subtração entre o terreno e a profundidade interpolada, podendo refletir padrões associados à variação topográfica local.

Dessa forma, a comparação entre as cotas reforça a leitura obtida na análise da profundidade, sem ser tratada como uma análise independente. As diferenças observadas parecem refletir principalmente a sensibilidade das superfícies à variável utilizada na interpolação e à forma como cada abordagem incorpora a relação entre relevo e nível de água.

4.1.2.5. Resultado espacial

A análise espacial do nível do lençol freático foi realizada a partir da elaboração de duas representações cartográficas complementares: a carta de profundidade do nível de água e a carta de cota do nível freático. A carta de profundidade (Figura 4.11) expressa a posição do nível de água em relação à superfície do terreno, enquanto a carta de cota (Figura 4.12) representa o nível hidrológico absoluto, obtido a partir da integração entre os dados de sondagem e o Modelo Digital de Elevação (MDE).

A seguir, são apresentados e discutidos os resultados obtidos para ambas as abordagens, destacando suas diferenças conceituais, implicações na interpretação do comportamento do nível freático e coerência com o comportamento físico do sistema aquífero.

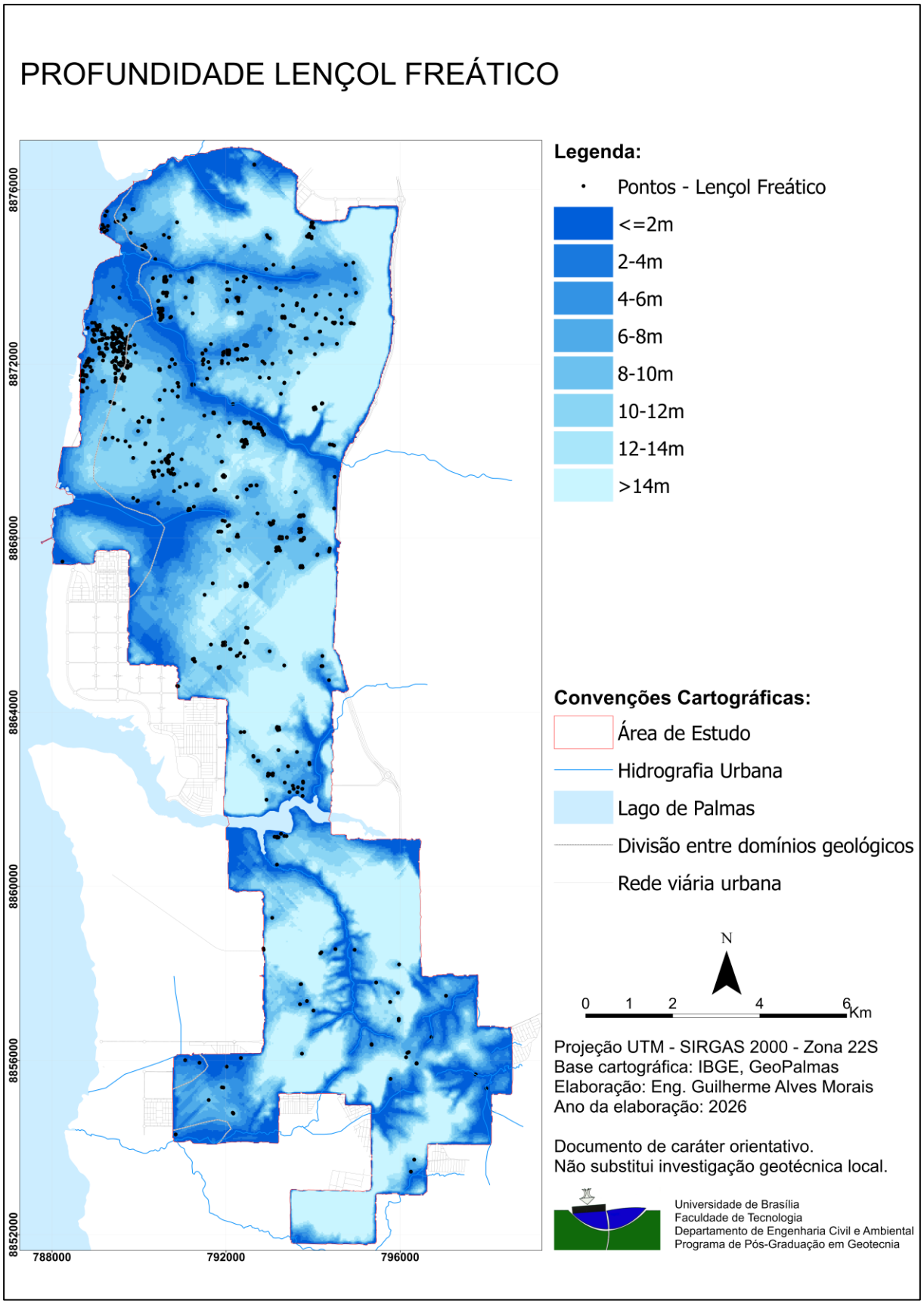


Figura 4.11 - Carta de profundidade do lençol freático.

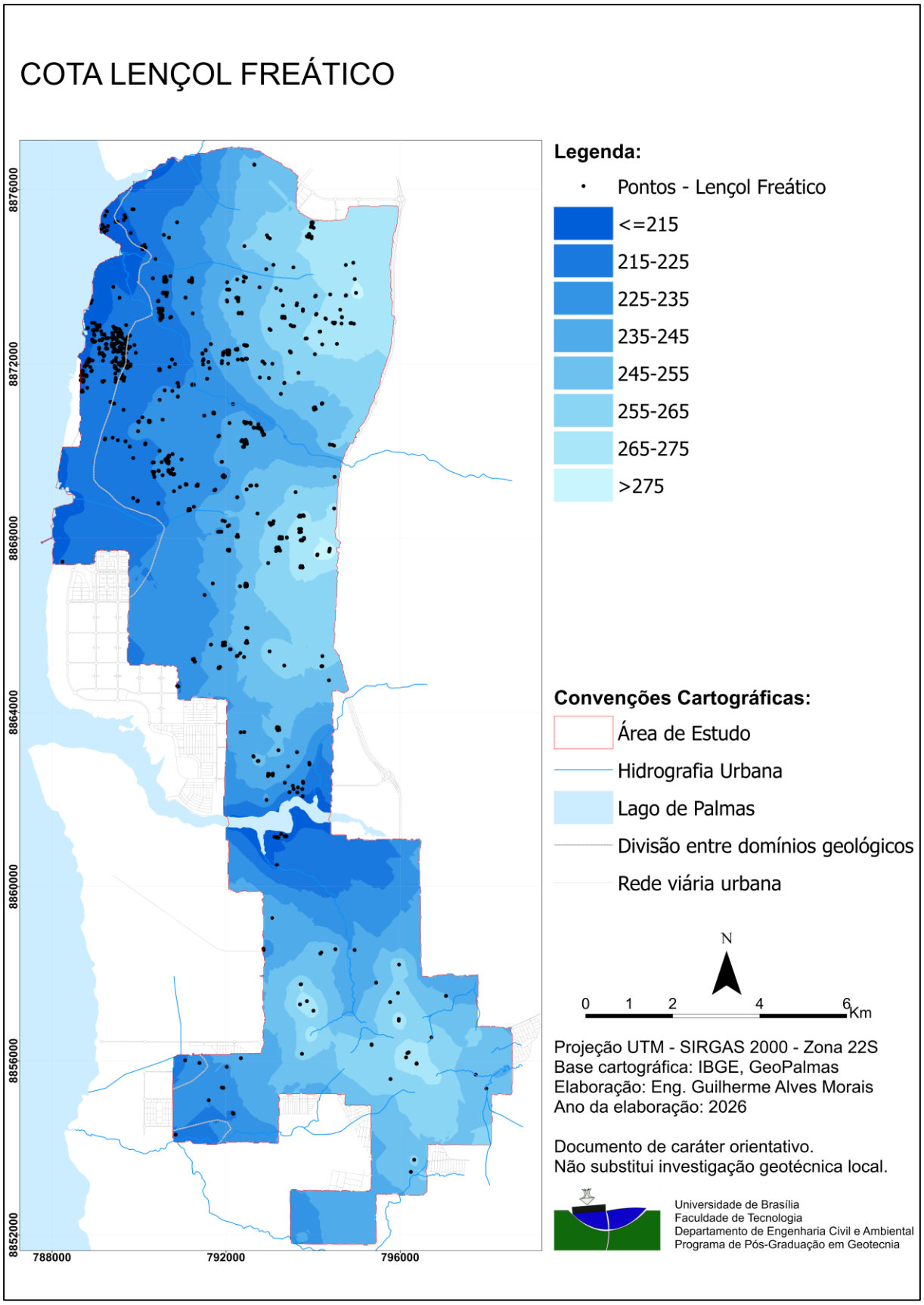


Figura 4.12 - Carta da cota do lençol freático.

A carta de profundidade do nível freático evidencia um padrão espacial coerente com os condicionantes geomorfológicos da área de estudo, com menores profundidades associadas às regiões próximas aos cursos de água e ao Lago de Palmas, e maiores profundidades concentradas nos setores topograficamente mais elevados. Esse comportamento reflete a organização do relevo local, na qual os vales atuam como zonas preferenciais de descarga do aquífero, enquanto as áreas mais elevadas funcionam como regiões de recarga.

Observa-se, contudo, que a distribuição espacial da profundidade apresenta maior variabilidade e menor continuidade quando comparada à superfície obtida a partir da cota do nível de água. Essa característica está associada ao fato de que a profundidade constitui uma variável relativa ao relevo, incorporando diretamente as variações topográficas locais. Como consequência, áreas com relevo mais acidentado podem apresentar contrastes acentuados na profundidade do nível freático, mesmo quando pertencentes a um mesmo sistema hidráulico contínuo.

Nesse contexto, a análise baseada na cota do nível de água permite representação mais consistente do comportamento regional do sistema aquífero, evidenciando padrão espacial mais contínuo do nível freático e gradiente regional direcionado ao Lago de Palmas, principal zona de descarga da área de estudo. Essa abordagem reduz a influência direta das variações topográficas locais e possibilita representação mais coerente dos gradientes de fluxo subterrâneo e da dinâmica regional do nível freático.

Observa-se que os cursos de água secundários exercem influência predominantemente local, sem alterar significativamente a configuração regional da superfície freática. Destaca-se, entretanto, a influência mais expressiva do Ribeirão Taquaruçu Grande sobre setores adjacentes, comportamento também observado por Castro (2018).

A inclusão de pontos de controle ao longo da rede hidrográfica contribuiu para a melhoria da coerência física da superfície interpolada, reduzindo efeitos de suavização nas proximidades dos cursos de água e evitando inconsistências, como estimativas de níveis freáticos superiores à superfície do terreno.

Estudos anteriores, como o de Castro (2018), indicam comportamento bimodal na distribuição da profundidade do nível freático, interpretado como reflexo da presença de diferentes unidades geológicas. No presente estudo, comportamento semelhante foi inicialmente observado na análise da variável profundidade, com indícios de diferentes populações correspondentes aos distintos domínios geológicos da área de estudo.

Entretanto, ao analisar a variável cota do nível de água, verificou-se que essa distinção não se mantém de forma significativa, evidenciando comportamento espacial contínuo e fortemente controlado pela rede de drenagem. Nesse sentido, as variações observadas na profundidade mostram-se influenciadas, em grande parte, pela topografia e pela posição relativa no sistema hidrológico.

Adicionalmente, a análise sazonal indicou variações nos valores médios entre os períodos seco e úmido, porém sem alterações relevantes na estrutura espacial do fenômeno, em concordância com os resultados apresentados por Castro (2018). Nesse aspecto, os resultados obtidos neste trabalho reforçam as interpretações anteriores, ao mesmo tempo em que evidenciam a importância da utilização da cota do nível de água como variável representativa do comportamento do lençol freático em escala regional.

Os resultados obtidos apresentam influência direta na definição preliminar das soluções de fundação. Em regiões com lençol freático raso, há tendência de direcionamento para fundações profundas, especialmente estacas hélice contínua monitorada, cuja execução não é sensível a presença de água no subsolo. Por outro lado, em áreas com nível freático mais profundo, a adoção de fundações superficiais ou estacas escavadas passa a depender predominantemente das condições de resistência do terreno.

4.1.3. Índice de resistência à penetração

A análise do índice de resistência à penetração (N_{SPT}) foi organizada de modo a representar tanto sua variação ao longo do perfil quanto sua distribuição espacial na área de estudo. Os subitens seguintes apresentam a caracterização estatística dos dados, a definição da abordagem geoestatística, a avaliação da remoção espacial no domínio aluvionar, a modelagem com validação cruzada e os resultados espaciais interpolados.

4.1.3.1. Análise estatística dos dados no perfil

Para fins de interpretação, foram adotadas camadas rasas (1-2 m, 2-3 m e 3-4 m), associadas ao comportamento geotécnico relevante para fundações superficiais e à zona de influência das tensões transmitidas ao solo, e camadas intermediárias e profundas (5-6 m, 10-11 m, 15-16 m e 20-21 m), voltadas à avaliação das condições de suporte para fundações profundas.

Para apresentação dos resultados, foram selecionadas camadas representativas do perfil com o objetivo de ilustrar o comportamento estatístico do N_{SPT}. Essa abordagem permite

evidenciar as principais tendências ao longo do perfil, evitando redundância na apresentação, uma vez que padrões semelhantes foram observados nas demais camadas analisadas.

Destaca-se que não foram aplicadas transformações estatísticas nos dados de N_{SPT}, de modo a preservar o significado físico da variável e sua interpretação direta no contexto geotécnico. A distribuição dos valores de N_{SPT} para o conjunto total de dados, considerando as situações com e sem aplicação de restrição de registros com N_{SPT} = 50, é apresentada na Figura 4.13.

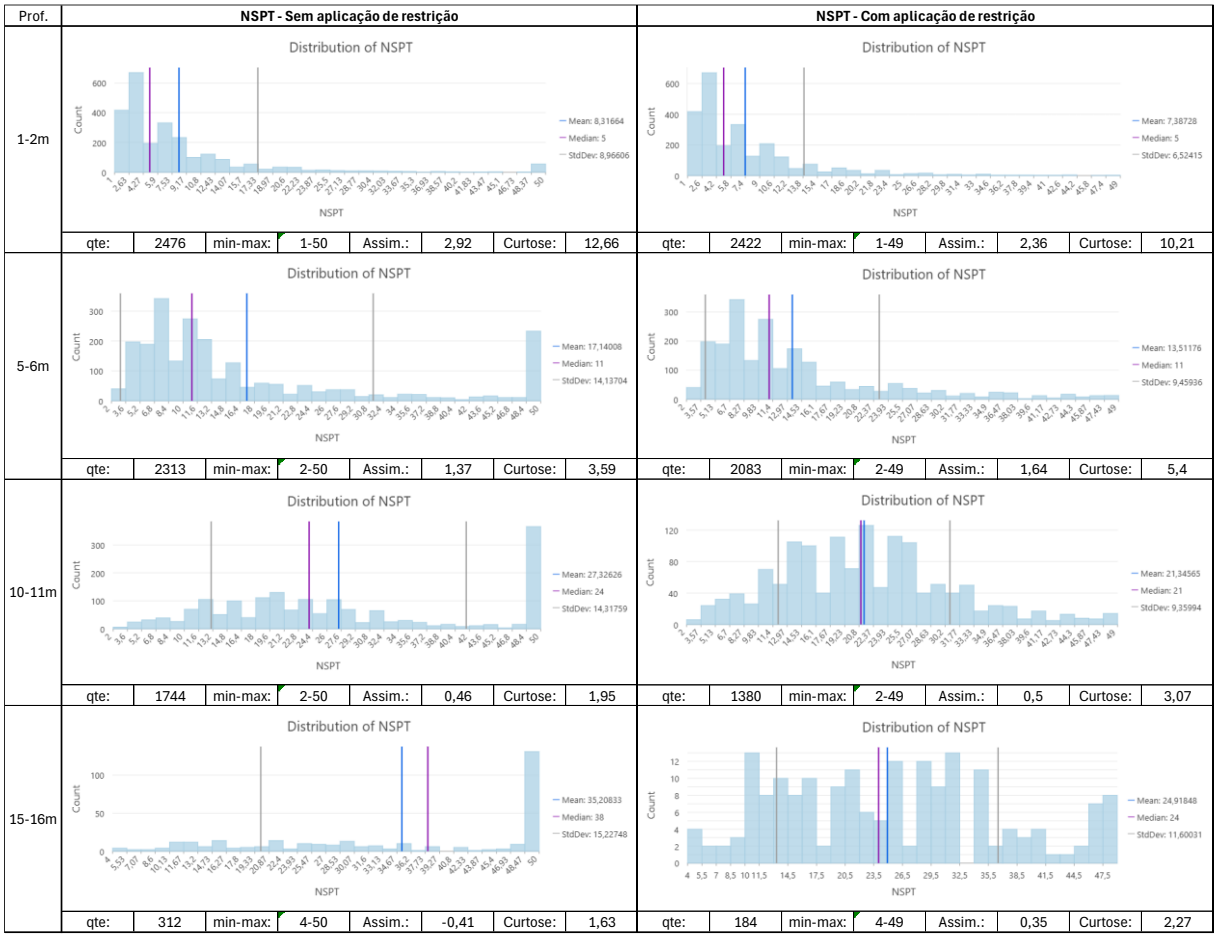


Figura 4.13 - Histogramas do N_{SPT} (1-2 m, 5-6 m, 10-11 m e 15-16m) com e sem restrição de registros com 50 golpes.

Nas camadas mais rasas, observa-se forte assimetria positiva, caracterizada por distribuição com cauda à direita e valores elevados de curtose, indicando alta concentração de valores baixos associada à presença de valores extremos. Para essas camadas, a aplicação da restrição dos valores N_{SPT} = 50 resultou na redução da assimetria e da curtose.

Nas camadas intermediárias e profundas, verifica-se comportamento estatístico distinto, com menor concentração de valores baixos e maior dispersão dos resultados ao longo do perfil.

Nesses casos, a restrição dos valores iguais a 50 golpes não resultou necessariamente em redução da assimetria e da curtose, podendo inclusive aumentar esses indicadores em algumas camadas. Esse comportamento indica que, nessas profundidades, a forma da distribuição não é controlada apenas pelos valores restringidos, mas também pela variabilidade dos demais dados e pela maior heterogeneidade das condições geotécnicas em profundidade.

Adicionalmente, para profundidades superiores a 15 m, observa-se comportamento distinto, com assimetria negativa associada à predominância de valores elevados de N_{SPT}, resultando em cauda à esquerda da distribuição. Esse padrão reflete a presença de materiais mais resistentes em maiores profundidades. Nessa condição, a aplicação da restrição promoveu aumento da assimetria e da curtose, reforçando seu efeito adverso na representação estatística dos dados.

De forma geral, a aplicação da restrição resultou na redução dos valores médios e na aproximação entre média e mediana. No entanto, os efeitos observados não foram consistentes entre as camadas e, em diversos casos, indicaram distorções no comportamento estatístico esperado. Esses resultados demonstram que, embora a restrição altere a distribuição estatística dos dados, sua aplicação não garante melhoria na representatividade do fenômeno analisado, reforçando a necessidade de avaliação integrada com a análise geoestatística para definição da estratégia de modelagem mais adequada.

A análise por domínios geológicos foi realizada com o objetivo de avaliar possíveis diferenças no comportamento estatístico entre depósitos aluvionares e unidades não aluvionares. Exemplos dessa segmentação, sem aplicação de restrição, para as mesmas camadas representativas, são apresentados na Figura 4.14.

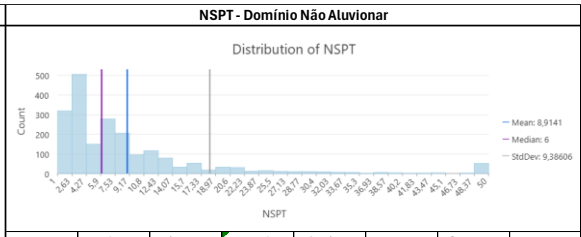
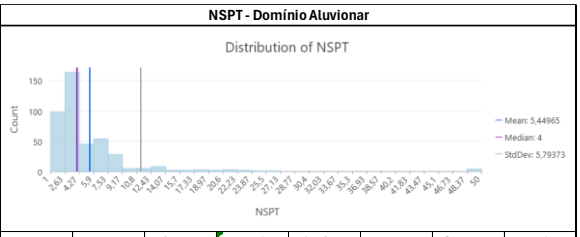
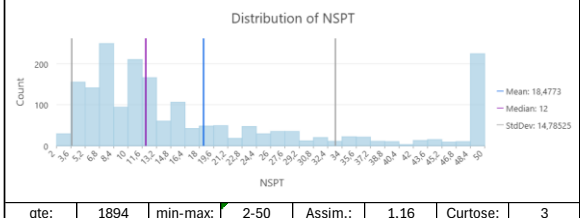
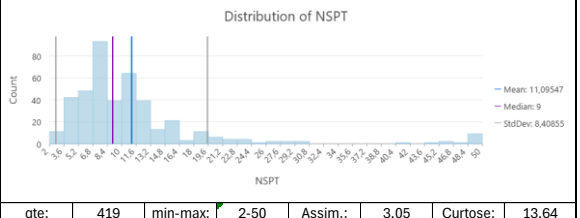
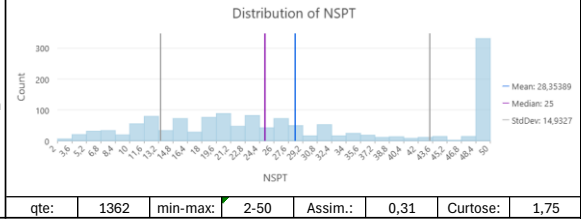
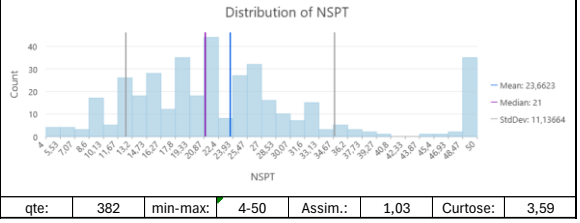
Prof.	NSPT - Domínio Não Aluvionar							NSPT - Domínio Aluvionar							
1-2m															
	qte:	2049	min-max:	1-50	Assim.:	2,72	Curtose:	11,22	qte:	427	min-max:	1-50	Assim.:	4,97	Curtose:	35,02
5-6m															
	qte:	1894	min-max:	2-50	Assim.:	1,16	Curtose:	3	qte:	419	min-max:	2-50	Assim.:	3,05	Curtose:	13,64
10-11m															
	qte:	1362	min-max:	2-50	Assim.:	0,31	Curtose:	1,75	qte:	382	min-max:	4-50	Assim.:	1,03	Curtose:	3,59

Figura 4.14 - Histogramas do N_{SPT} por domínio geológico (1-2 m, 5-6 m e 10-11).

Observa-se que, nas camadas rasas, há distinção clara entre os domínios geológicos, com valores de N_{SPT} mais baixos no domínio aluvionar, refletindo a presença de materiais menos consolidados. Com o aumento da profundidade, essa diferença tende a se reduzir em termos relativos, porém permanece perceptível, indicando que o contraste entre os domínios persiste ao longo do perfil geotécnico, ainda que de forma menos pronunciada.

Na camada de 10-11 m, por exemplo, ainda se observam diferenças entre os conjuntos, evidenciando que os depósitos aluvionares continuam influenciando o comportamento da resistência à penetração em profundidade.

Para a camada de 15-16 m, não foi realizada a segmentação por domínios geológicos, em função da redução do número de dados disponíveis, o que poderia comprometer a representatividade estatística das distribuições. Nessa camada, observa-se distribuição com assimetria negativa, associada à predominância de valores elevados de N_{SPT}, comportamento coerente com a presença de materiais mais resistentes em maiores profundidades.

4.1.3.2. Definição da abordagem geoestatítica

Foram avaliadas diferentes abordagens de modelagem geoestatística com o objetivo de identificar a configuração mais adequada para representação espacial dos valores de N_{SPT} em cada camada analisada. Entre os testes realizados, destacam-se a aplicação de restrição dos

valores elevados (N_{SPT} = 50), a segmentação por domínios geológicos e a subdivisão do domínio não aluvionar.

Os resultados indicaram que a aplicação de restrição não promoveu melhorias consistentes nos indicadores de validação cruzada, além de reduzir a variabilidade natural dos dados. Em diversas camadas, observou-se aumento da assimetria e da curtose após a aplicação da restrição, evidenciando distorções na distribuição estatística da variável, evidenciada pelo aumento do efeito pepita e pela menor estabilidade no ajuste dos semivariogramas. Esse comportamento indica que a restrição implica redução artificial da variância, suprimindo informações geotécnicas relevantes associadas a materiais mais resistentes. Dessa forma, optou-se pela utilização dos valores originais de N_{SPT}, sem aplicação de transformações ou restrição de dados, preservando o significado físico da variável e sua representatividade geotécnica.

A influência do contexto geológico foi avaliada por meio da subdivisão da área de estudo em domínios aluvionar e não aluvionar, considerando a variabilidade espacial dos valores de N_{SPT}. De forma geral, observou-se que os depósitos aluvionares apresentam valores de N_{SPT} inferiores em relação ao domínio não aluvionar, especialmente nas camadas superficiais, comportamento associado à predominância de materiais mais recentes e menos compactos.

A análise geoestatística indicou que a separação por domínios resultou em melhoria dos modelos nas camadas rasas (1 a 5 m), evidenciada pela redução do efeito pepita e melhor definição da estrutura variográfica. Esse comportamento reflete a heterogeneidade deposicional característica das camadas superficiais.

Apesar de nas camadas rasas a distinção entre os domínios aluvionar e não aluvionar contribuir para melhor representação da variabilidade dos dados, com o aumento da profundidade, embora diferenças entre os domínios ainda possam ser observadas, a segmentação passa a implicar redução significativa do número de dados em cada subconjunto, especialmente no domínio aluvionar. Essa redução compromete a robustez estatística das distribuições e resulta em pior desempenho dos indicadores de validação cruzada, com aumento da variabilidade dos parâmetros e menor estabilidade dos modelos geoestatísticos.

Nesse contexto, a adoção de modelos independentes por domínio nas camadas mais profundas não se mostrou adequada, pois a limitação amostral passou a exercer maior influência na qualidade da modelagem do que as diferenças geológicas propriamente ditas. Nas profundidades de 15 e 20 m, a reduzida quantidade de sondagens no domínio aluvionar, concentradas em pequena parcela da área de estudo, compromete a representatividade

estatística dos modelos. Soma-se a isso o maior espaçamento entre os pontos amostrais na Formação Pimenteiras, reduzindo a capacidade de representação das variações espaciais locais. Assim, optou-se por uma abordagem híbrida, com separação por domínios nas camadas rasas e intermediárias e modelagem integrada nas camadas mais profundas, buscando equilíbrio entre representatividade geotécnica e robustez estatística.

Adicionalmente, foi avaliada a subdivisão do domínio não aluvionar em porções distintas (região norte-central e região sul, separadas pelo Ribeirão Taquaruçu Grande), com o objetivo de identificar possíveis variações espaciais internas que justificassem a adoção de modelos independentes. Entretanto, a subdivisão não resultou em ganhos significativos na qualidade da modelagem, indicando comportamento relativamente homogêneo dessa unidade em escala regional. Dessa forma, para o domínio não aluvionar, adotou-se a modelagem utilizando o conjunto original de dados, sem subdivisões adicionais.

Além disso, para as camadas mais profundas (15 e 20 m), observou-se redução na definição espacial dos modelos, associada ao aumento do espaçamento entre as sondagens e à menor continuidade espacial dos dados, especialmente ao sul do plano diretor. Dessa forma, as análises dessas camadas concentraram-se na região norte-central da área de estudo, onde a distribuição amostral apresenta maior consistência espacial.

Embora o número de dados disponíveis para as profundidades de 15 e 20 m seja reduzido, optou-se pela realização das interpolações com o objetivo de identificar tendências regionais do comportamento do N_{SPT} em profundidade. Assim, os resultados obtidos devem ser interpretados de forma indicativa, representando padrões gerais de comportamento geotécnico, sem caráter determinístico ou detalhamento local.

Ressalta-se que, devido à menor densidade amostral e à distribuição espacial heterogênea dos dados, os resultados obtidos devem ser interpretados com cautela, sendo mais representativos de padrões gerais do que de variações locais. Dessa forma, a análise não tem caráter determinístico, mas sim indicativo, podendo subsidiar avaliações preliminares de comportamento geotécnico em profundidade.

4.1.3.3. Remoção espacial no domínio aluvionar

Com o objetivo de avaliar a influência da conectividade espacial dos dados na modelagem geoestatística do domínio aluvionar, foram testados diferentes critérios de remoção espacial, baseados na continuidade entre os pontos amostrais e nas características geomorfológicas da área de estudo.

Inicialmente, foi adotado um critério menos restritivo, no qual foram removidos pontos considerados espacialmente isolados em relação ao conjunto principal de dados, incluindo ocorrências localizadas fora do padrão de distribuição predominante, ainda que próximas ao limite da área de estudo. Em seguida, foi avaliado um critério mais restritivo, com exclusão dos pontos isolados e daqueles situados em compartimentos com distribuição espacial descontínua em relação ao domínio principal do depósito aluvionar.

A Figura 4.15 apresenta a comparação entre os cenários analisados, incluindo a distribuição original dos dados e a aplicação dos critérios de remoção espacial testados.

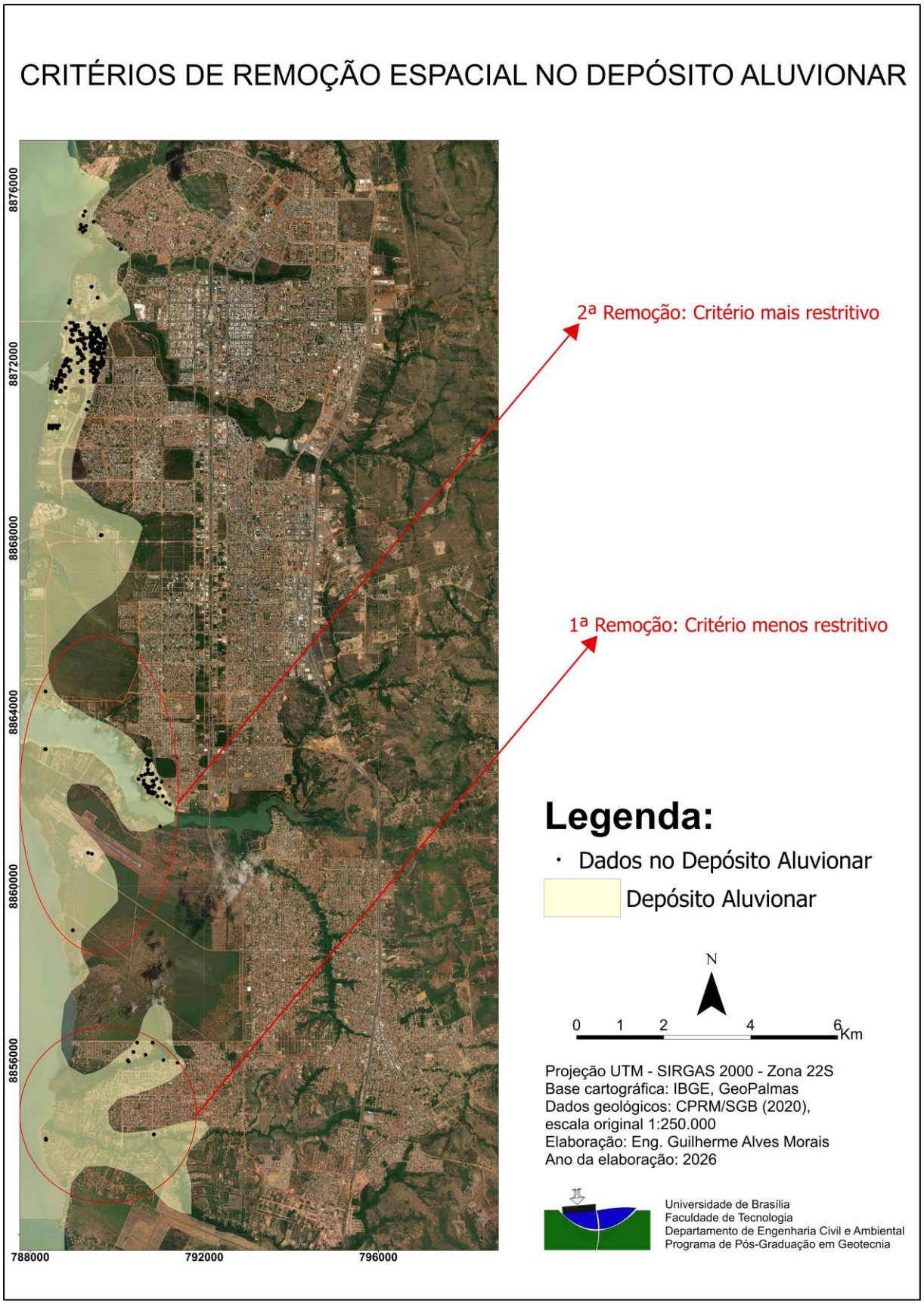


Figura 4.15 - Distribuição espacial dos pontos do domínio aluvionar e critérios de remoção espacial adotados para avaliação da conectividade espacial do conjunto amostral.

A análise comparativa entre os cenários demonstrou que a conectividade espacial dos dados exerce influência significativa na modelagem geoestatística do domínio aluvionar. No cenário sem remoção espacial, observou-se maior variabilidade dos parâmetros variográficos entre as camadas e maior afastamento dos valores de erro padronizado em relação ao ideal, indicando influência de pontos espacialmente discrepantes na definição da estrutura espacial.

Por outro lado, a aplicação dos critérios de remoção espacial, especialmente do critério mais restritivo, resultou em modelos mais estáveis, com maior coerência espacial entre as camadas e melhora nos indicadores de validação cruzada, incluindo valores de RMSS mais próximos da unidade. Dessa forma, optou-se pela adoção do critério mais restritivo no domínio aluvionar, por apresentar maior consistência estatística e espacial.

4.1.3.4. Modelagem geoestatística e validação cruzada

A modelagem geoestatística dos valores de N_{SPT} foi realizada por meio de krigagem ordinária, assumindo média aproximadamente constante em escala local. Os parâmetros de interpolação foram definidos de forma compatível com a densidade amostral e a escala de análise adotada.

Os resultados da validação cruzada indicam desempenho satisfatório dos modelos geoestatísticos adotados, com erro médio próximo de zero, valores de erro quadrático médio compatíveis com a variabilidade dos dados e razão entre erro padronizado e erro médio padronizado próxima da unidade, evidenciando adequada calibração da variância dos modelos. A síntese dos parâmetros variográficos e dos indicadores de validação cruzada para todas as camadas analisadas é apresentada na Tabela 4.3. Os modelos adotados na etapa final de interpolação encontram-se destacados em negrito.

Tabela 4.3 - Parâmetros de modelagem e validação cruzada do N_{SPT} por camada.

			Parâmetros de entrada						Krigagem Ordinária				
Tipo de carta	Prof.	Domínio	Esp. (D)	Cell Size	Lag Size	Num Lag	Min Neig	Max Neig	nº pts	Pepita (%)	RMS	RMSS	ASE
NSPT	1-2m	**Aluvionar**	**28**	**10**	**20**	**10**	**8**	**12**	**352**	**5,55**	**2,39**	**1,02**	**2,33**
		Não Aluvionar	**54**	**15**	**25**	**12**	**8**	**16**	**2049**	**35,41**	**7,34**	**1,01**	**7,12**
		Geral	51	15	25	12	8	16	2476	49,44	6,99	1,14	6
	2-3m	**Aluvionar**	**28**	**10**	**20**	**10**	**8**	**12**	**352**	**4,12**	**2,03**	**0,99**	**2,03**
		Não Aluvionar	**53**	**15**	**25**	**12**	**8**	**16**	**2030**	**36,56**	**8,09**	**1,09**	**7,36**
		Geral	50	15	25	12	8	16	2455	52,33	7,5	1,19	6,19
	3-4m	**Aluvionar**	**28**	**10**	**20**	**10**	**8**	**12**	**352**	**3,62**	**2,66**	**1,02**	**2,54**
		Não Aluvionar	**53**	**15**	**25**	**12**	**8**	**16**	**2021**	**28,74**	**9,2**	**1,01**	**9,1**
		Geral	51	15	25	12	8	16	2443	40	8,58	1,12	7,54
	5-6m	**Aluvionar**	**28**	**10**	**20**	**10**	**8**	**12**	**349**	**37,29**	**4,9**	**0,96**	**5,09**
		Não Aluvionar	**52**	**15**	**25**	**12**	**8**	**16**	**1894**	**29,05**	**10,38**	**1,03**	**10**
		Geral	52	15	25	12	8	16	2313	38,89	9,87	1,14	8,56
	10-11m	Aluvionar	29	10	20	10	8	12	331	63,18	9,85	0,98	10,05
		Não Aluvionar	60	15	30	12	8	16	1362	33,37	10,16	1	10,11
		Geral	**55**	**15**	**30**	**12**	**8**	**16**	**1744**	**38,8**	**10,23**	**1,06**	**9,64**
	15-16m	Aluvionar	43	15	25	12	8	16	69	58,46	10,8	0,93	11,7
		Não Aluvionar	89	25	45	12	8	16	240	9,53	9,8	1,15	8,24
		Geral	**67**	**20**	**35**	**12**	**8**	**16**	**312**	**19,85**	**9,87**	**1,06**	**9,24**
	20-21m	Aluvionar	Não interpolado						Não interpolado				
		Não Aluvionar											
		Geral	**190**	**50**	**95**	**12**	**8**	**16**	**57**	**31,3**	**10,38**	**0,99**	**10,18**

Nota: As modelagens independentes para os domínios aluvionar e não aluvionar não foram adotadas na camada 20–21 m em razão da limitação amostral e da baixa representatividade estatística e espacial dos subconjuntos.

Legenda: Prof. – profundidade; Esp. (D) – espaçamento médio adotado entre pontos amostrais; *Cell Size* – tamanho da célula do *raster* de saída; *Lag Size* – distância de *lags* utilizada no variograma; *Num Lag* – número de *lags* do variograma; *Min Neig.* e *Max Neig* . – número mínimo e máximo de vizinhos considerados na interpolação; nº pts – número de pontos utilizados; Pepita (%) – efeito pepita relativo; RMS – raiz do erro quadrático médio; RMSS – raiz do erro quadrático médio padronizado; ASE – erro padrão médio. Prof., Esp. (D), *Cell Size* e *Lag Size* são expressos em metros.

Observa-se que, nas camadas rasas (1-2 m, 2-3 m e 3-4 m), há maior contraste entre os domínios geológicos, refletindo a heterogeneidade dos materiais superficiais. Nesses níveis, os depósitos aluvionares apresentaram valores de N_{SPT} inferiores aos observados no domínio não aluvionar, além de menor efeito pepita relativo, indicando maior continuidade espacial interna dos materiais arenosos superficiais. Os semivariogramas representativos dessa segmentação são apresentados na Figura 4.16, evidenciando comportamento variográfico distinto entre os domínios aluvionar e não aluvionar nas camadas superficiais.

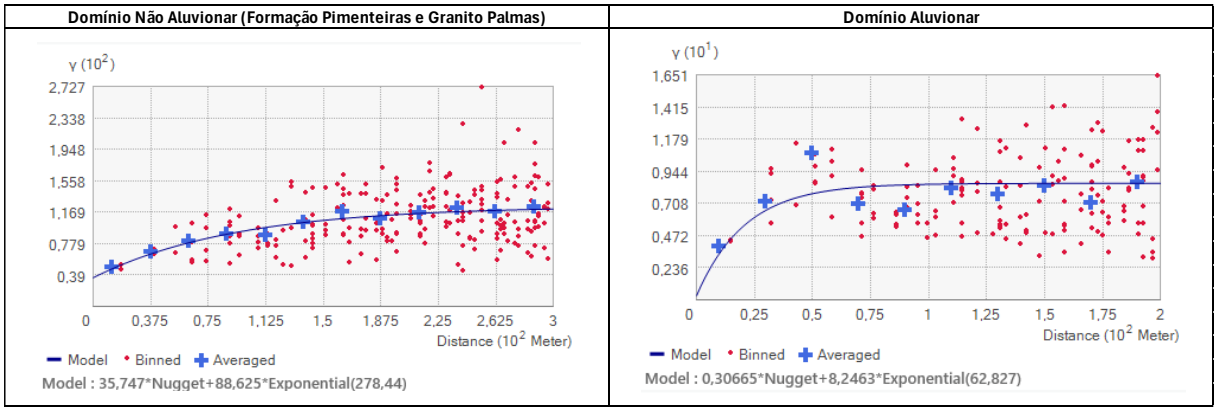


Figura 4.16 - Semivariogramas representativos da modelagem segmentada por domínios para o N_{SPT} na camada de 3-4m.

Na camada intermediária de 5-6 m, embora a segmentação por domínios ainda tenha proporcionado melhor desempenho da modelagem, observa-se aumento expressivo do efeito

pepita no domínio aluvionar. Esse comportamento está associado à maior heterogeneidade deposicional dessa unidade em profundidade, especialmente em razão da ocorrência irregular de níveis com pedregulhos e seixos rolados de quartzo. Nessas condições, a presença localizada de materiais mais resistentes resulta em contrastes acentuados nos valores de N_{SPT} entre sondagens próximas, aumentando a variabilidade espacial em escala local.

Para as camadas mais profundas, particularmente a partir de 10m, a segmentação por domínios passou a apresentar redução significativa do número de dados disponíveis, sobretudo no domínio aluvionar, comprometendo a estabilidade dos modelos geoestatísticos e elevando o efeito pepita. Dessa forma, optou-se pela adoção de modelos integrados para representação regional do comportamento do N_{SPT}. O semivariograma representativo dessa abordagem é apresentado na Figura 4.17.

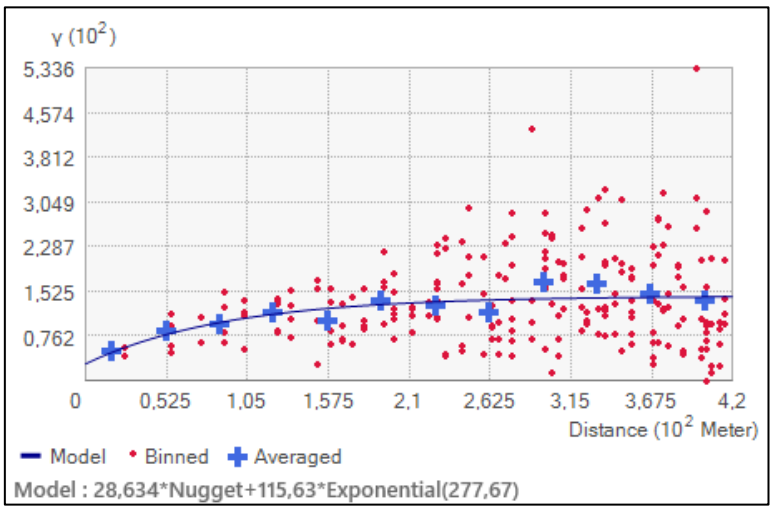


Figura 4.17 - Semivariograma representativo da modelagem integrada para o N_{SPT} na camada de 15-16m.

Nas camadas de 15 e 20m, observa-se redução expressiva da densidade amostral e aumento do espaçamento médio entre sondagens, limitando a capacidade de representação das heterogeneidades locais. Nesse contexto, os resultados passam a refletir predominantemente tendências regionais mais amplas do comportamento geotécnico. Assim, o menor efeito pepita observado na camada de 15-16 m não deve ser interpretado, isoladamente, como melhoria da qualidade do modelo, mas como consequência da suavização da variabilidade espacial decorrente da menor densidade de dados e da redução da resolução espacial da análise.

Assim como nas análises anteriores, a validação cruzada para as camadas representativas do N_{SPT} evidenciou boa correlação entre valores observados e estimados, com tendência à suavização dos extremos, comportamento característico da krigagem ordinária. Os gráficos quantil–quantil indicaram aderência à distribuição teórica na maior parte dos dados, com

desvios mais pronunciados associados aos valores extremos e às camadas de menor densidade amostral.

4.1.3.5. Resultado espacial

A análise espacial dos valores de N_{SPT} permitiu avaliar a variabilidade geotécnica ao longo do perfil investigado, considerando as diferentes profundidades analisadas e as estratégias de modelagem geoestatística adotadas. De forma geral, os mapas interpolados apresentaram coerência com o contexto geológico da área de estudo, evidenciando diferenças entre depósitos aluvionares e não aluvionares, além de tendência de aumento da resistência à penetração com a profundidade. Observa-se ainda que a qualidade da definição espacial varia em função da densidade amostral e do espaçamento entre as sondagens, sendo mais elevada nas camadas rasas e intermediárias.

A Figura 4.18, a Figura 4.19 e a Figura 4.20 apresentam os resultados das camadas rasas (1-2 m, 2-3 m e 3-4 m), correspondentes à zona de maior influência dos processos deposicionais superficiais e das heterogeneidades geotécnicas locais.

A Figura 4.21 e Figura 4.22 apresentam os resultados das camadas intermediárias (5-6 m e 10-11m), nas quais se observa transição gradual entre o comportamento superficial mais heterogêneo e a tendência regional observada nas maiores profundidades.

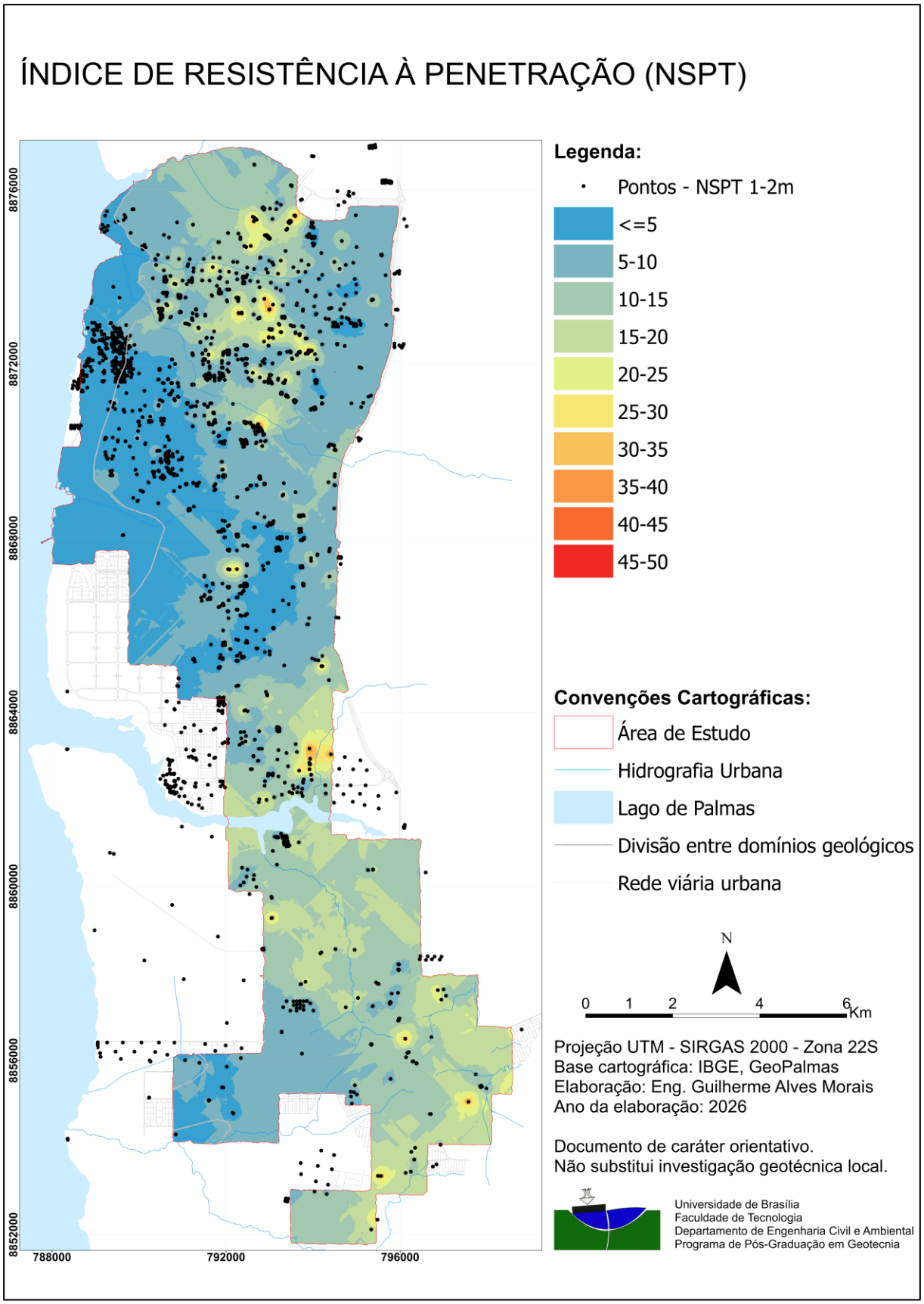


Figura 4.18 - Carta de N_{SPT} da camada de 1-2m.

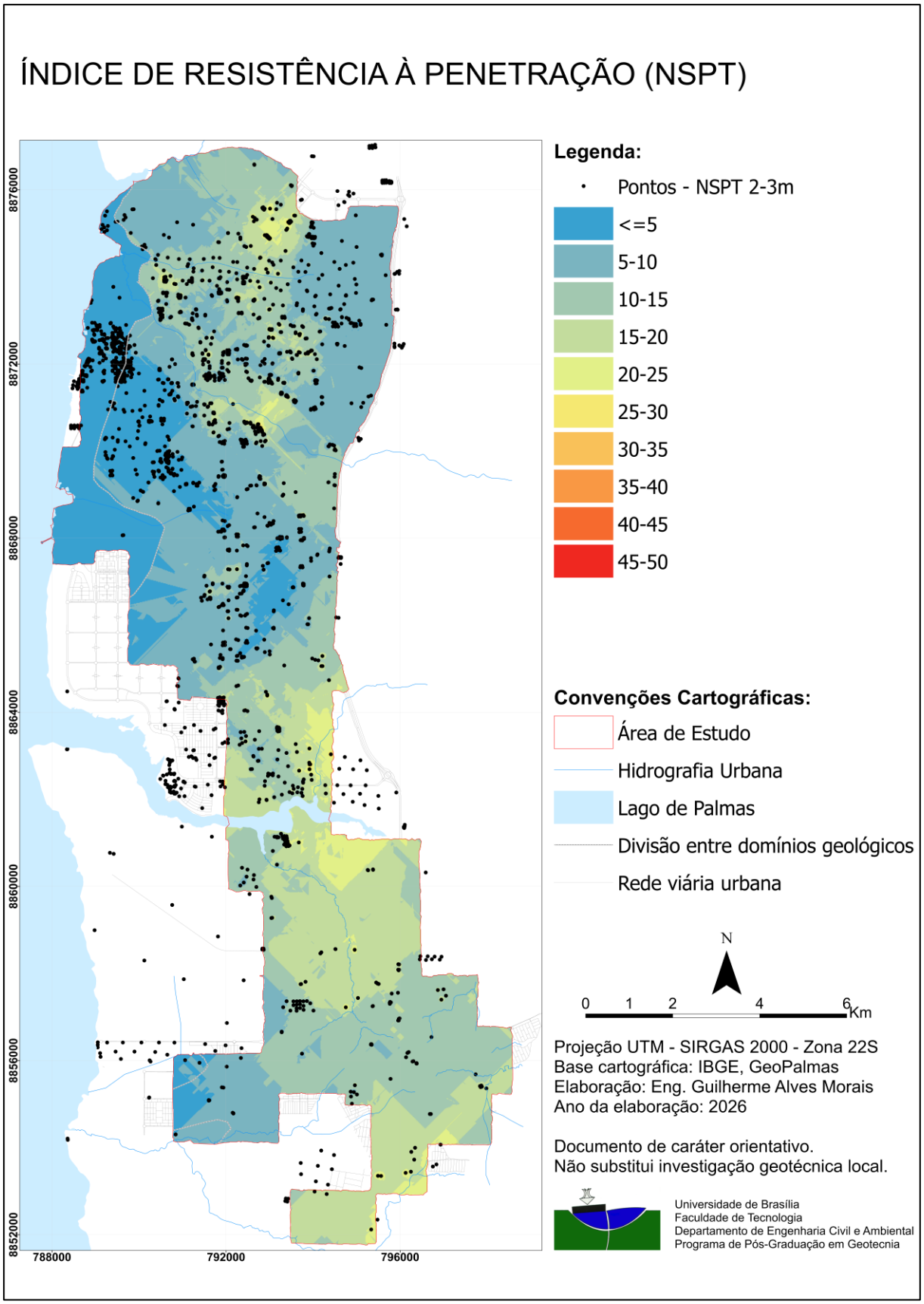


Figura 4.19 - Carta de N_{SPT} da camada de 2-3m.

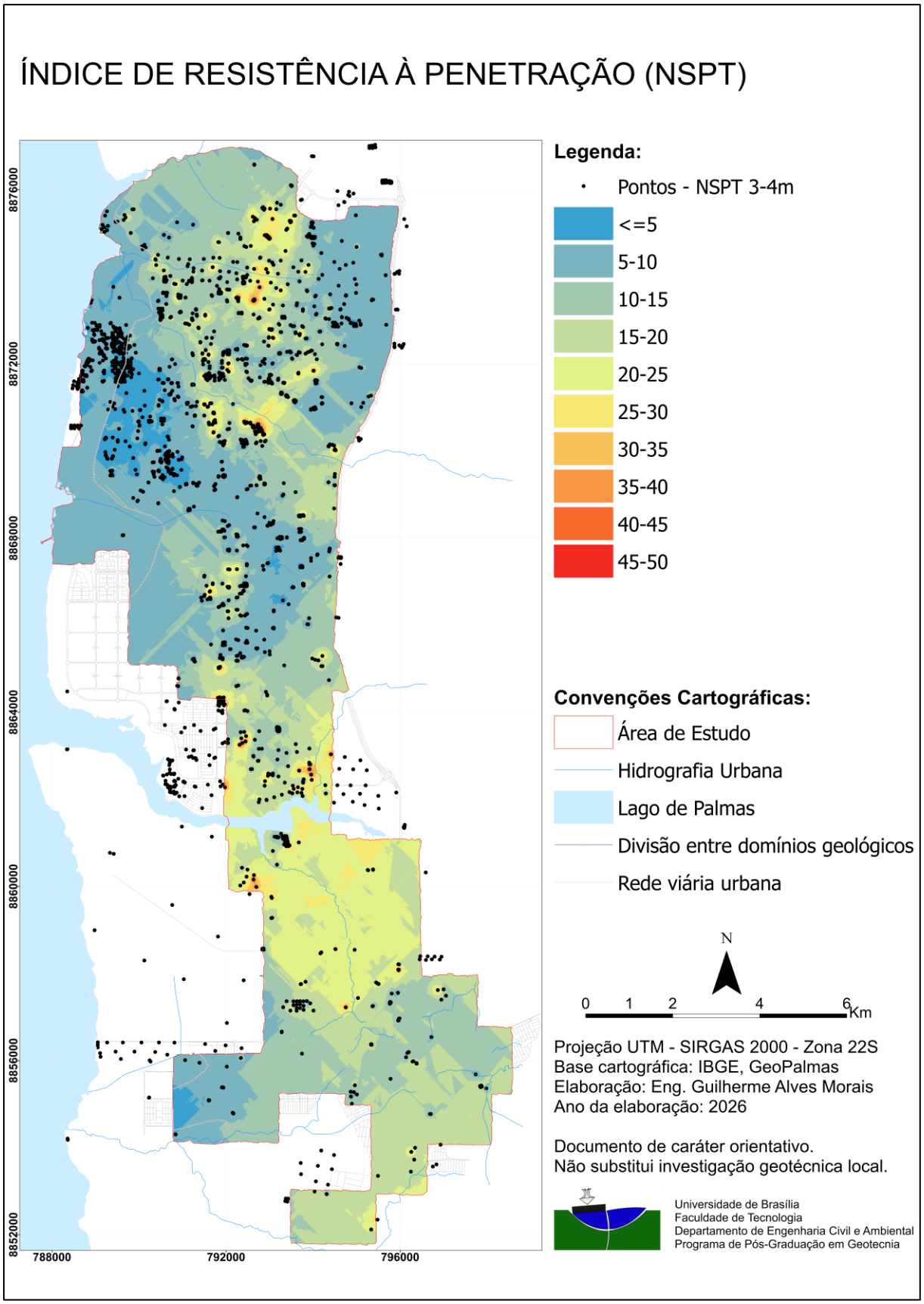


Figura 4.20 - Carta de N_{SPT} da camada de 3-4m.

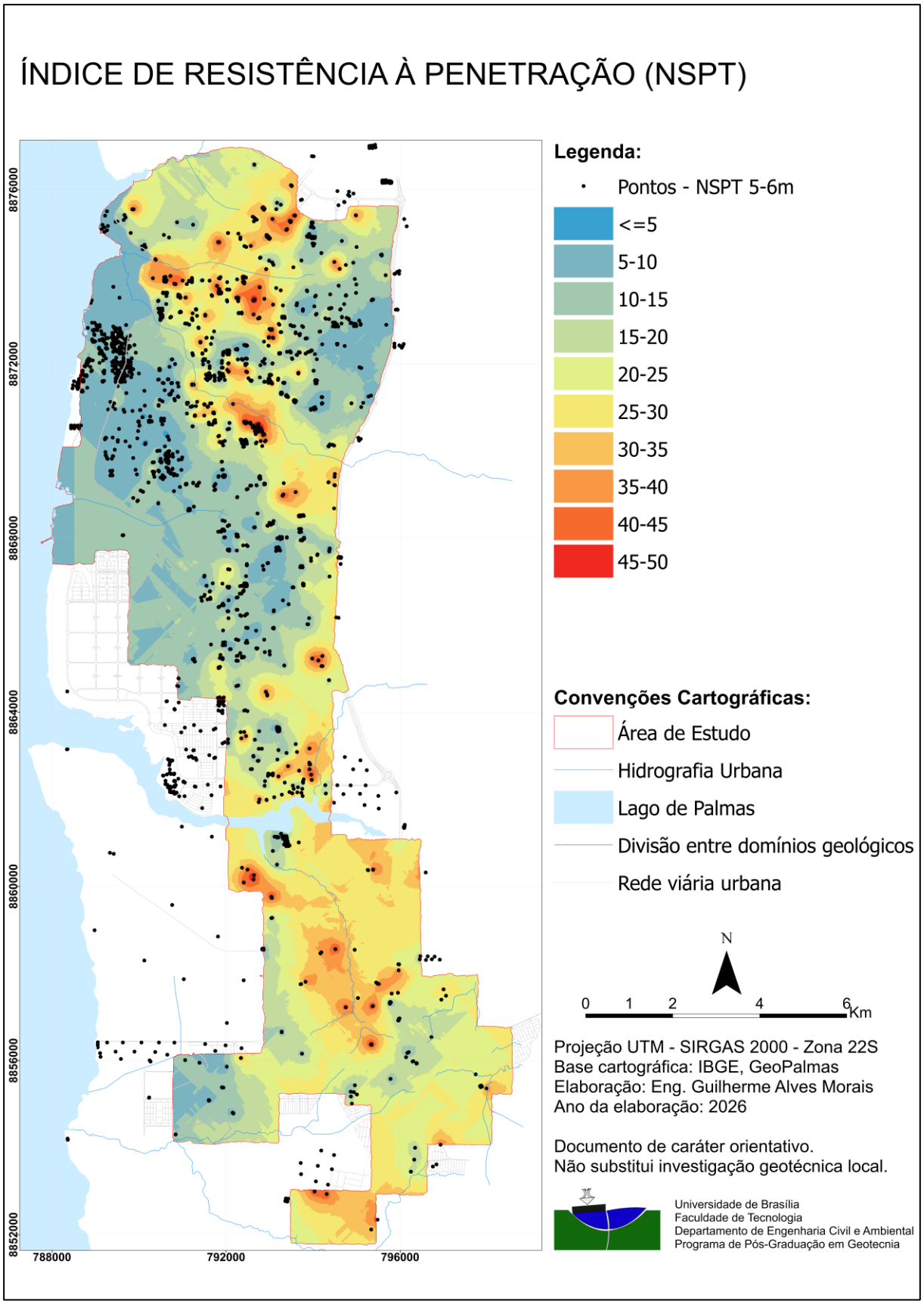


Figura 4.21 - Carta de N_{SPT} da camada de 5-6m.

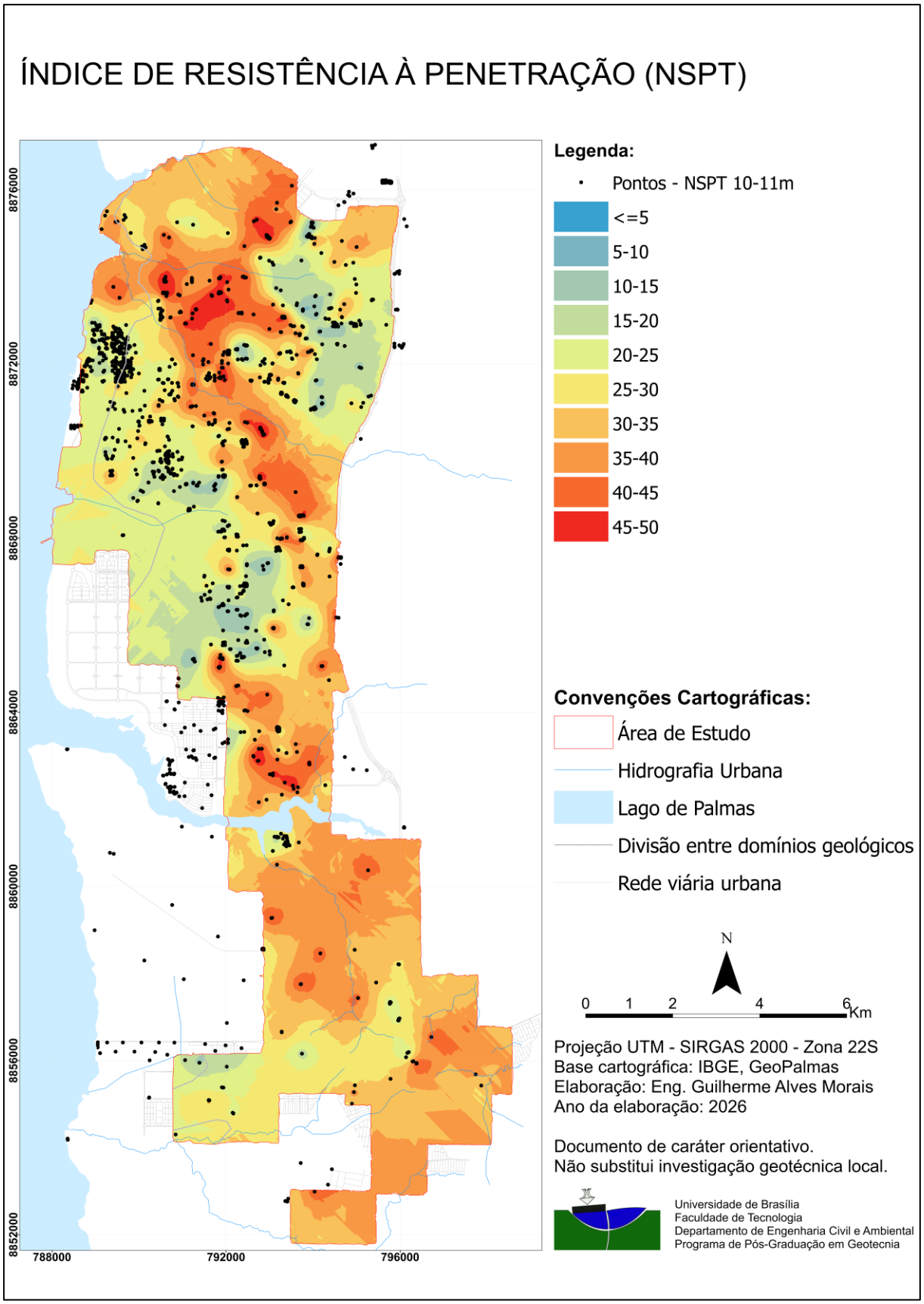


Figura 4.22 - Carta de N_{SPT} da camada de 10-11m.

Nas camadas rasas, observa-se maior variabilidade espacial dos valores de N_{SPT}, refletindo a heterogeneidade característica dos materiais superficiais. De modo geral, os depósitos aluvionares apresentam valores mais baixos de resistência, enquanto as áreas não aluvionares exibem maiores valores de N_{SPT} e maior continuidade espacial. Esse comportamento está associado à predominância de sedimentos arenosos mais recentes na planície aluvionar e de materiais mais resistentes nas áreas não aluvionares.

Nas camadas intermediárias (5-6 m e 10-11 m), os resultados evidenciam aumento progressivo dos valores de N_{SPT} e maior continuidade espacial das superfícies interpoladas. A adoção de intervalos de classe padronizados entre as diferentes camadas permite visualizar de forma mais clara essa tendência de aumento da resistência à penetração ao longo do perfil do solo.

Observa-se que os maiores valores de N_{SPT} concentram-se, predominantemente, em setores associados a vales mais encaixados e áreas de maior dissecação do relevo, onde os processos erosivos favorecem menor espessura de materiais inconsolidados e maior proximidade de materiais mais resistentes em profundidade. Nessas regiões, predominam condições geotécnicas mais competentes, refletidas nos valores elevados de N_{SPT} observados nas superfícies interpoladas.

Em contrapartida, os menores valores de N_{SPT} permanecem associados às áreas próximas ao Lago de Palmas e aos principais cursos de água, espacialmente coincidentes com depósitos aluvionares. Nesses setores, a predominância de sedimentos arenosos pouco consolidados resulta em menores valores de resistência ao longo do perfil.

Observa-se ainda que, no domínio aluvionar, a variabilidade espacial torna-se mais acentuada em relação às camadas superficiais, comportamento associado à heterogeneidade deposicional desses materiais em profundidade. A ocorrência localizada de níveis mais resistentes, associados à presença pontual de pedregulhos em meio aos sedimentos arenosos, contribui para maior contraste entre sondagens próximas e para o aumento da variabilidade espacial observada nas superfícies interpoladas.

A Figura 4.23 apresenta os resultados das camadas profundas (15-16 m e 20-21 m), elaboradas com caráter predominantemente regional em razão da redução da densidade amostral e do aumento do espaçamento médio entre sondagens.

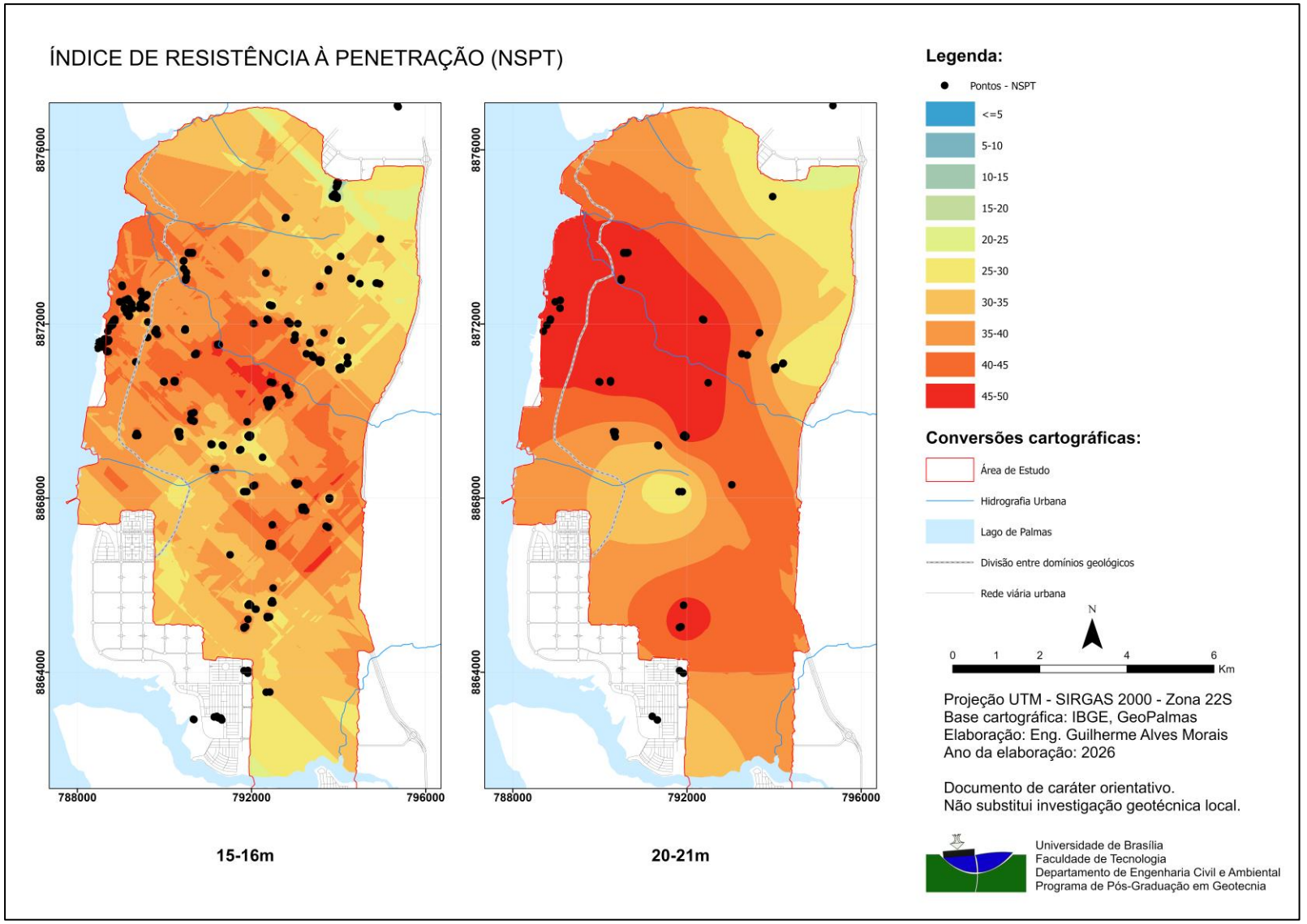


Figura 4.23 - Cartas de N_{SPT} das camadas profundas (15-16 m e 20-21 m).

Nas camadas profundas, observa-se redução da definição espacial dos modelos, associada à menor densidade amostral e ao aumento do espaçamento entre as sondagens. Na camada de 15-16 m, o padrão espacial ainda apresenta fragmentação moderada e preserva parte das variações locais observadas nas camadas intermediárias. Em contrapartida, na camada de 20-21 m, verifica-se maior suavização das superfícies interpoladas, com predominância de tendências regionais em detrimento das heterogeneidades locais.

Ainda assim, é possível identificar zonas com valores elevados de N_{SPT} em diferentes setores da área analisada. Nas porções mais próximas ao lago e aos depósitos aluvionares, esses valores podem estar associados à ocorrência de areias compactas e níveis localizados com presença de pedregulhos de quartzo. Já nos setores mais afastados da influência aluvionar, os valores mais elevados mostram-se compatíveis com materiais residuais mais resistentes, associados a solos siltosos e argilosos compactados, localmente com ocorrência de pedregulhos lateríticos. Ressalta-se, entretanto, que os resultados dessas camadas devem ser interpretados com cautela, sendo mais representativos de tendências regionais do comportamento geotécnico do que de variações pontuais em escala local.

4.1.4. Predominância da textura de solo

A caracterização da textura do solo predominante por camada foi realizada a partir dos dados das sondagens do Banco de Dados Geotécnico (BDG), organizados em intervalos verticais de um metro, de forma consistente com a discretização adotada para análise do N_{SPT}.

Foram consideradas cinco classes principais: argila, silte, areia, pedregulho e rocha.

Diferentemente das variáveis analisadas anteriormente, o tipo de solo constitui uma variável categórica, não sendo fisicamente adequado aplicar diretamente métodos geoestatísticos tradicionais sobre códigos numéricos representativos das classes, uma vez que valores intermediários não possuem significado físico. Dessa forma, no próximo tópico desse capítulo, será abordada a comparação entre diferentes abordagens testadas para definição da metodologia definitiva para categorização.

4.1.4.1. Comparação entre abordagens metodológicas

Com o objetivo de avaliar a representação espacial mais adequada para a classificação do tipo de solo predominante, foi realizada análise comparativa entre diferentes abordagens de interpolação aplicadas à camada de 2–3 m, adotada como representativa da análise.

Foram avaliadas três abordagens distintas: (i) aplicação direta da krigagem ordinária sobre codificação escalar das classes de solo; (ii) interpolação pelo método *Inverse Distance Weighting* (IDW), utilizando codificações numéricas; e (iii) abordagem probabilística baseada em variáveis indicadoras. As codificações numéricas utilizadas nos testes de krigagem ordinária e IDW são apresentadas no Quadro 4.1. A codificação adotada na abordagem probabilística foi previamente apresentada no capítulo de metodologia.

Quadro 4.1 - Codificações numéricas adotadas para os testes de krigagem escalar e interpolação por IDW

Solo predominante	Codificação	
	Krigagem Ordinária	IDW
Argila	00001	0
Silte	00010	1
Areia	00100	2
Pedregulho	01000	3
Rocha	10000	4

A Figura 4.24 apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelas três abordagens metodológicas para a camada de 2-3 m.

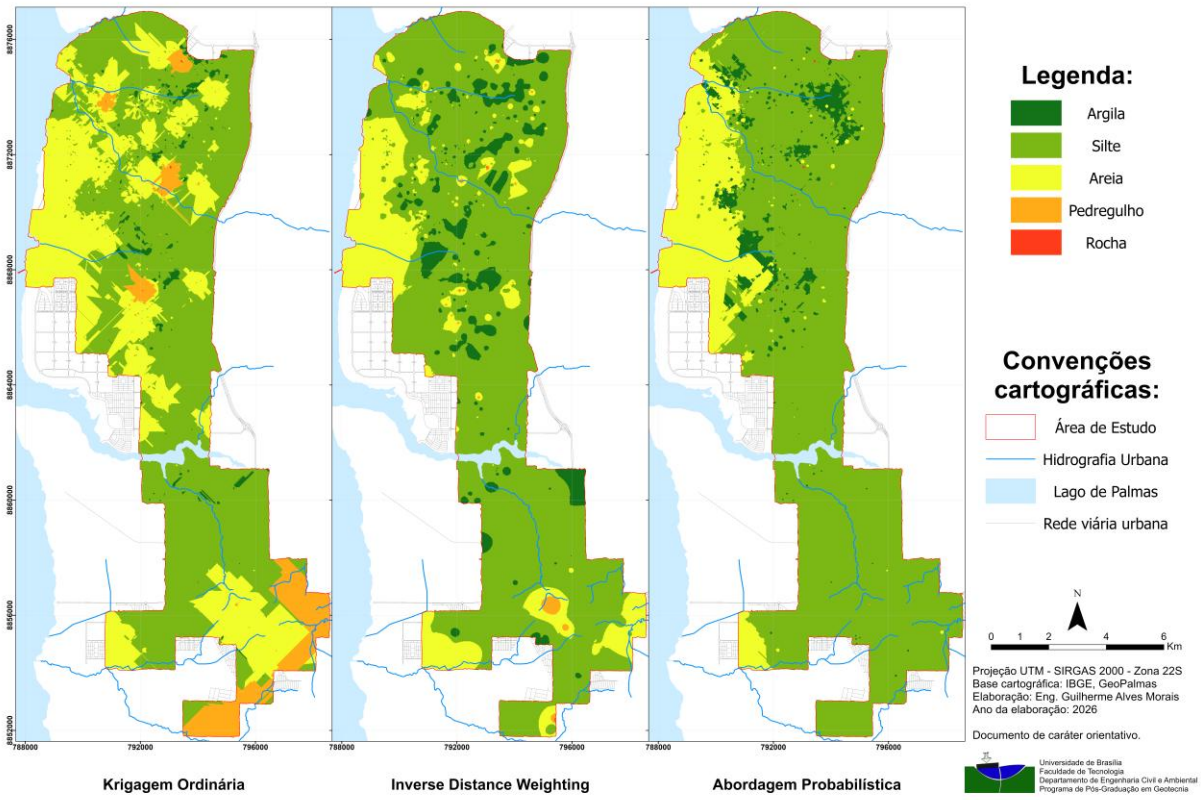


Figura 4.24 - Comparação entre os resultados obtidos para camada de 2-3m pelas abordagens de aplicação direta da krigagem ordinária, interpolação por IDW e abordagem probabilística baseada em variáveis indicadoras.

Observa-se comportamento distinto entre as abordagens avaliadas, especialmente quanto à representação espacial das transições entre classes e à coerência dos padrões interpolados em relação aos domínios geológicos observados na área de estudo.

A aplicação direta da krigagem ordinária sobre códigos numéricos associados às classes de solo predominante produziu distorções espaciais artificiais, especialmente em função da magnitude atribuída aos códigos utilizados na interpolação. Nesse caso, verificou-se super-representação espacial das classes associadas a valores numéricos mais elevados, com expansão indevida dessas categorias, sobretudo em regiões com menor densidade de dados amostrais. Esse comportamento decorre da aplicação da krigagem ordinária sobre variáveis contínuas, fazendo com que a interpolação reflita diferenças de magnitude entre os códigos numéricos, e não necessariamente a distribuição espacial real das classes.

A interpolação pelo método IDW apresentou melhor preservação das classes categóricas em relação à abordagem baseada em codificação escalar única por meio da krigagem ordinária. Entretanto, mesmo considerando codificações numéricas sequenciais simplificadas, observou-se transições espaciais artificiais e padrões pouco compatíveis com os limites texturais reais.

Em contrapartida, a abordagem probabilística baseada em variáveis indicadoras apresentou distribuição espacial mais coerente com os padrões geológicos esperados, com melhor delimitação das unidades geotécnicas e transições mais compatíveis com a organização espacial dos depósitos observados nas sondagens. Além disso, o método permitiu reduzir a influência artificial associada à magnitude dos códigos texturais e minimizar a fragmentação excessiva observada no IDW, resultando em superfícies interpoladas com maior continuidade espacial e coerência interpretativa.

Dessa forma, optou-se pela adoção da abordagem probabilística baseada em variáveis indicadoras para elaboração das cartas de tipo de solo predominante por camada, por representar de maneira mais consistente a distribuição espacial dos materiais e preservar adequadamente o caráter categórico da variável textural.

Além disso, a abordagem probabilística possibilita a obtenção de informações complementares relativas à confiabilidade espacial da classificação, permitindo avaliar a predominância relativa das classes de solo e a competição probabilística entre materiais distintos.

4.1.4.2. Análise da confiabilidade espacial da classificação

A análise da confiabilidade espacial da classificação quanto a textura de solo predominante foi realizada a partir da diferença entre as probabilidades associadas às classes concorrentes em cada célula interpolada. Valores elevados indicam maior predominância de uma única classe textural e, consequentemente, maior confiabilidade da classificação espacial, enquanto valores reduzidos refletem maior ambiguidade entre classes e menor definição do material predominante.

A Figura 4.25 apresenta os mapas de confiabilidade espacial para as camadas de 1-2 m e 10-11 m. Observa-se tendência de aumento da continuidade espacial das áreas classificadas com elevada confiabilidade ao longo da profundidade, indicando maior continuidade espacial das classes predominantes e redução relativa da heterogeneidade observada nas camadas superficiais.

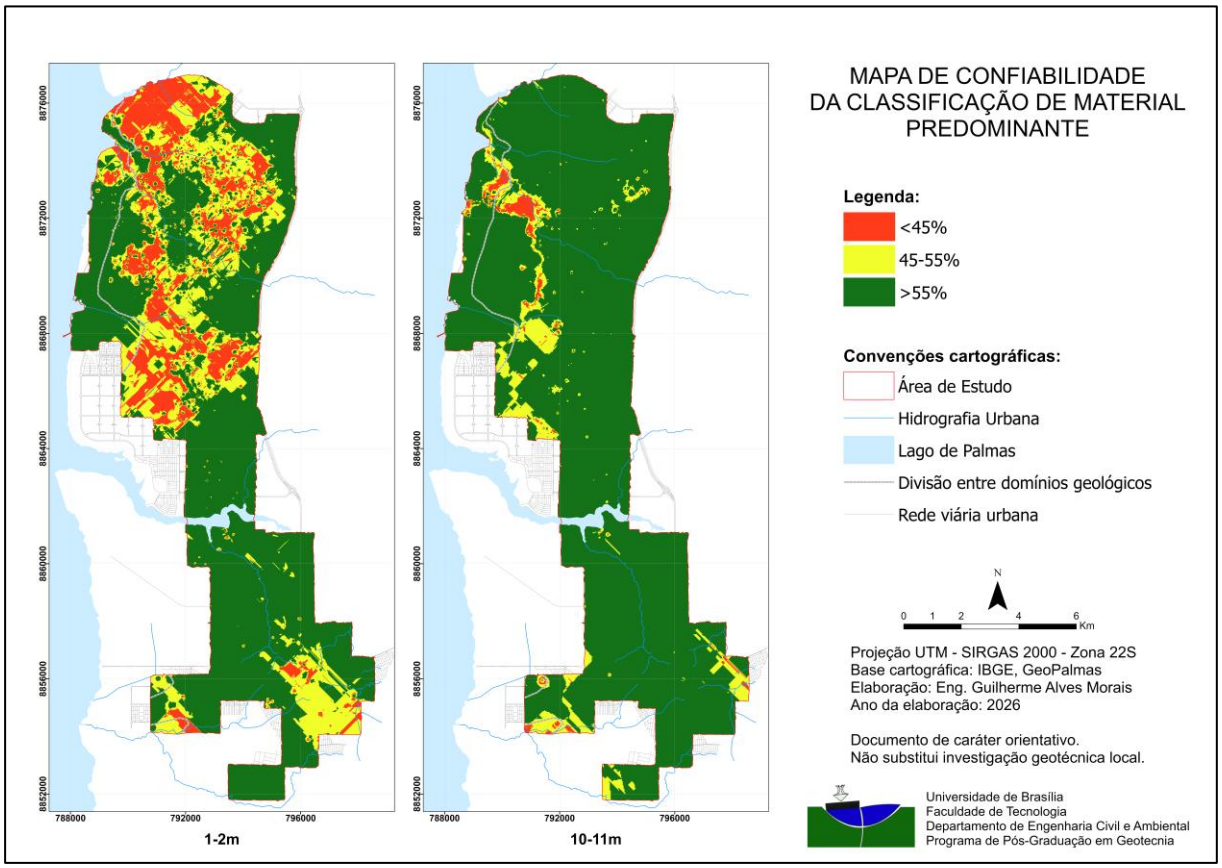


Figura 4.25 - Mapas de confiabilidade espacial da predominância do tipo de solo para as camadas de 1-2 m e 10-11 m.

Nas camadas rasas, verifica-se maior fragmentação espacial da confiabilidade, associada à heterogeneidade deposicional superficial e à alternância entre materiais aluvionares e não aluvionares. Já nas camadas intermediárias, observa-se aumento da continuidade espacial das

classes predominantes, resultando em áreas mais extensas com elevada confiabilidade da classificação e maior coerência entre os padrões interpolados e a organização espacial dos depósitos geológicos.

A Figura 4.26 apresenta os mapas de confiabilidade espacial para as camadas profundas de 15-16 m e 20-21 m. Nessas profundidades, observa-se aumento das áreas com menor confiabilidade da classificação, especialmente em setores com menor densidade amostral e maior espaçamento entre sondagens.

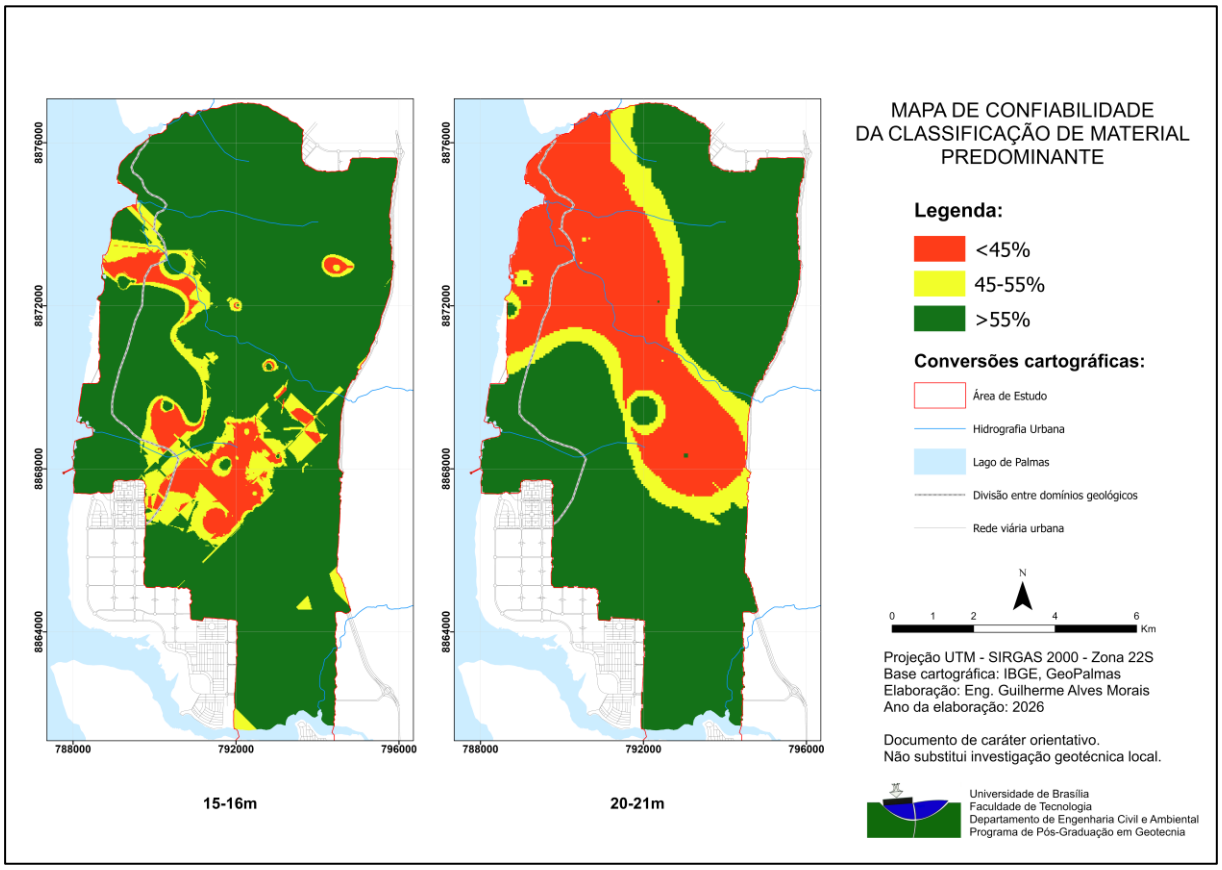


Figura 4.26 - Mapas de confiabilidade espacial da classificação textural para as camadas de 15-16 m e 20-21m.

Esse comportamento reflete as limitações associadas à representação espacial em profundidade, nas quais os resultados passam a representar predominantemente tendências regionais do comportamento geotécnico, com menor capacidade de representação das heterogeneidades locais. Na camada de 20-21 m, em particular, observa-se predominância de padrões mais suavizados e ampliação das áreas classificadas com menor confiabilidade, comportamento compatível com a significativa redução do número de dados disponíveis nessa profundidade. Esse comportamento é compatível com a redução progressiva da densidade

amostral em profundidade, condição que limita a representação das heterogeneidades locais e favorece padrões espaciais mais suavizados e regionalizados.

De modo geral, os resultados demonstram que a abordagem probabilística não apenas produz distribuições espaciais mais coerentes do ponto de vista geológico, mas também fornece subsídios adicionais para interpretação da confiabilidade associada às cartas interpoladas, permitindo identificar setores com maior ou menor robustez da classificação textural.

4.1.4.3. Resultado espacial

A Figura 4.27, a Figura 4.28 e a Figura 4.29 apresentam os resultados das cartas de solo predominante para as camadas rasas (1-2 m, 2-3 m e 3-4 m). Observa-se predomínio de materiais arenosos associados aos depósitos aluvionares próximos ao Lago de Palmas e aos principais cursos de água, enquanto os setores não aluvionares apresentam maior ocorrência de materiais finos residuais, associados a solos siltosos e argilosos.

A Figura 4.30 e a Figura 4.31 apresentam os resultados das camadas intermediárias (5-6 m e 10-11 m). Nessas profundidades, observa-se aumento da continuidade espacial dos materiais predominantes, com maior definição das unidades deposicionais e redução relativa da fragmentação espacial observada nas camadas superficiais.

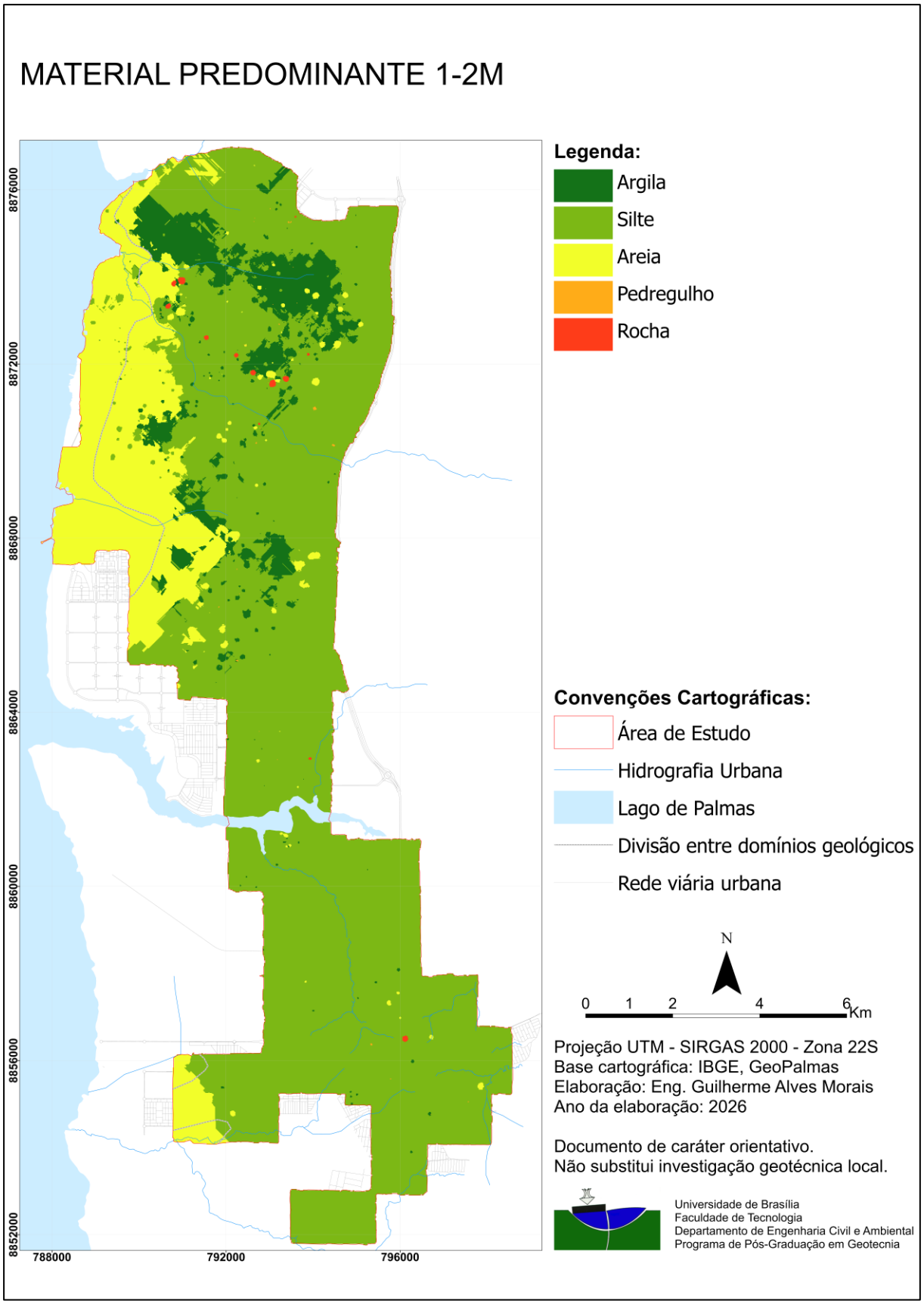


Figura 4.27 - Carta de material predominante para a camadas de 1-2 m.

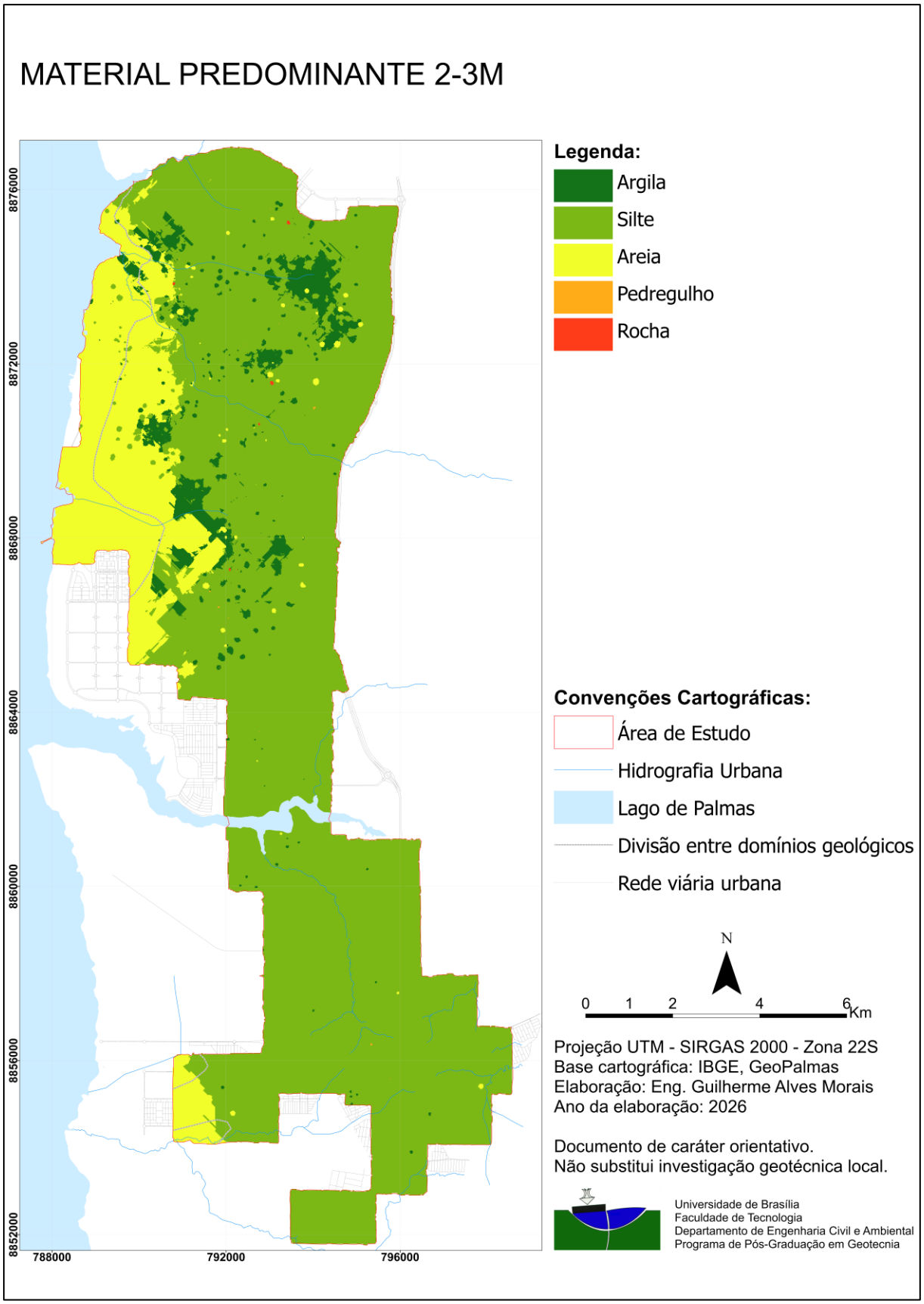


Figura 4.28 - Carta de material predominante para a camadas de 2-3 m.

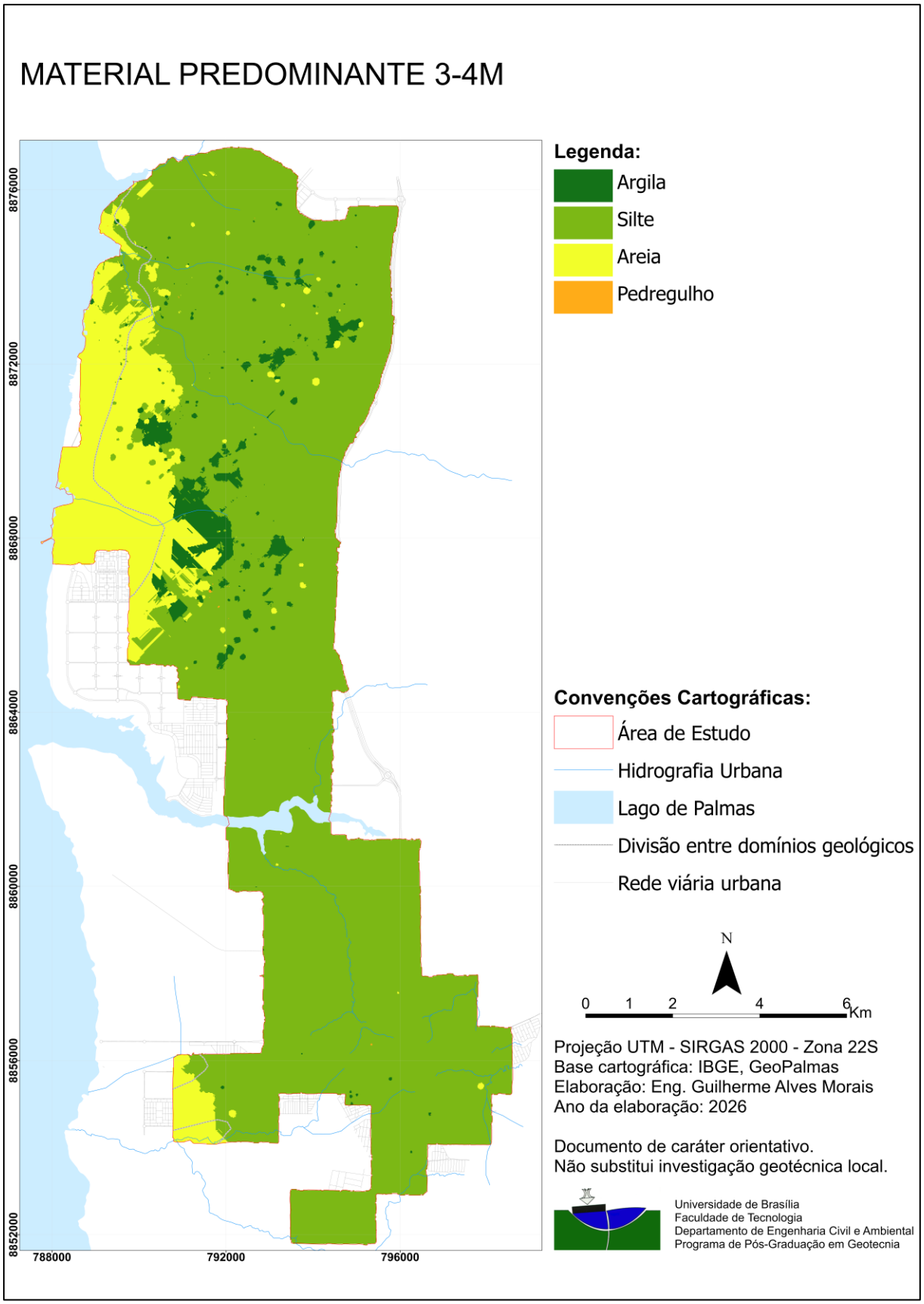


Figura 4.29 - Carta de material predominante para a camadas de 3-4 m.

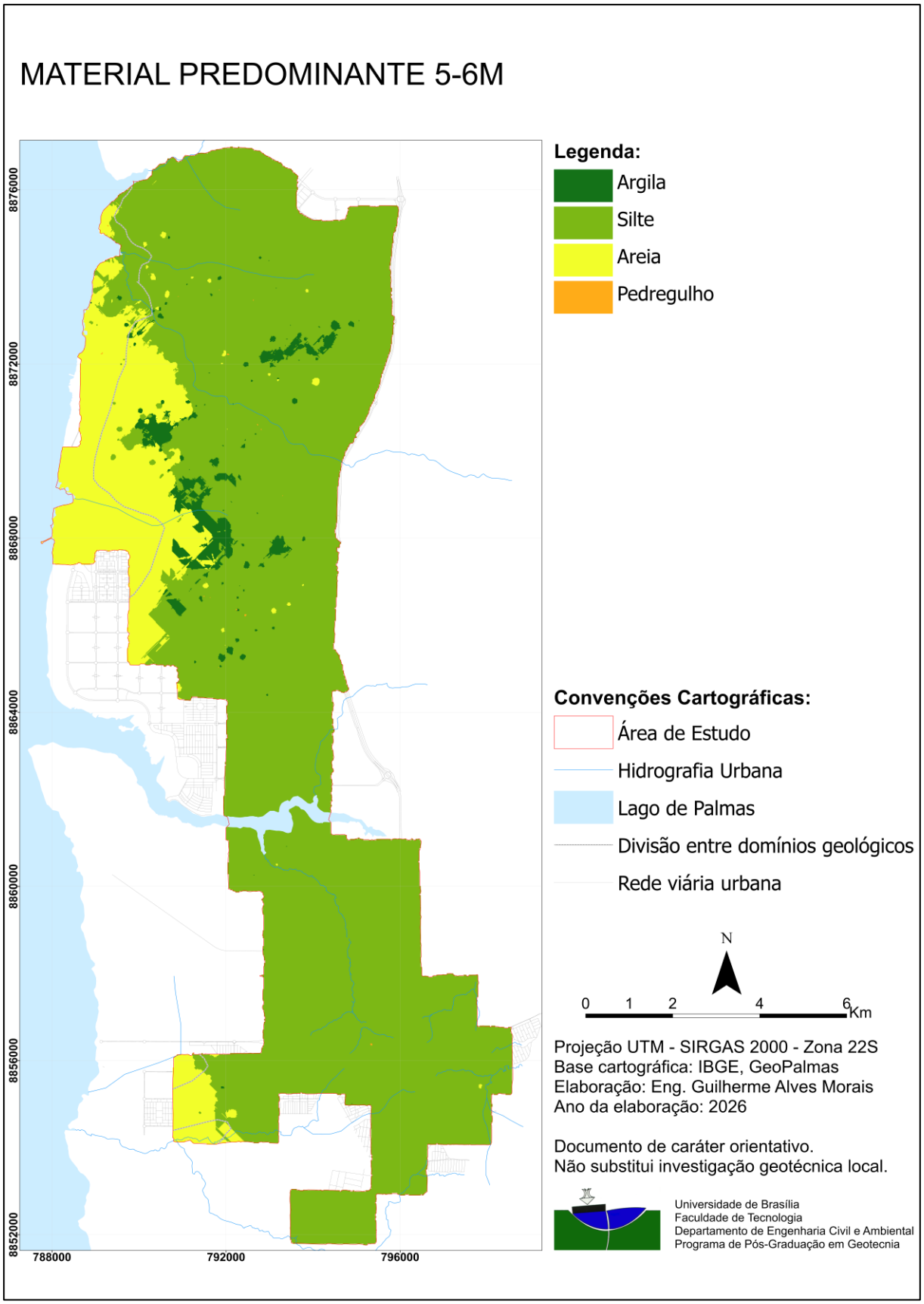


Figura 4.30 - Carta de material predominante para a camadas de 5-6 m.

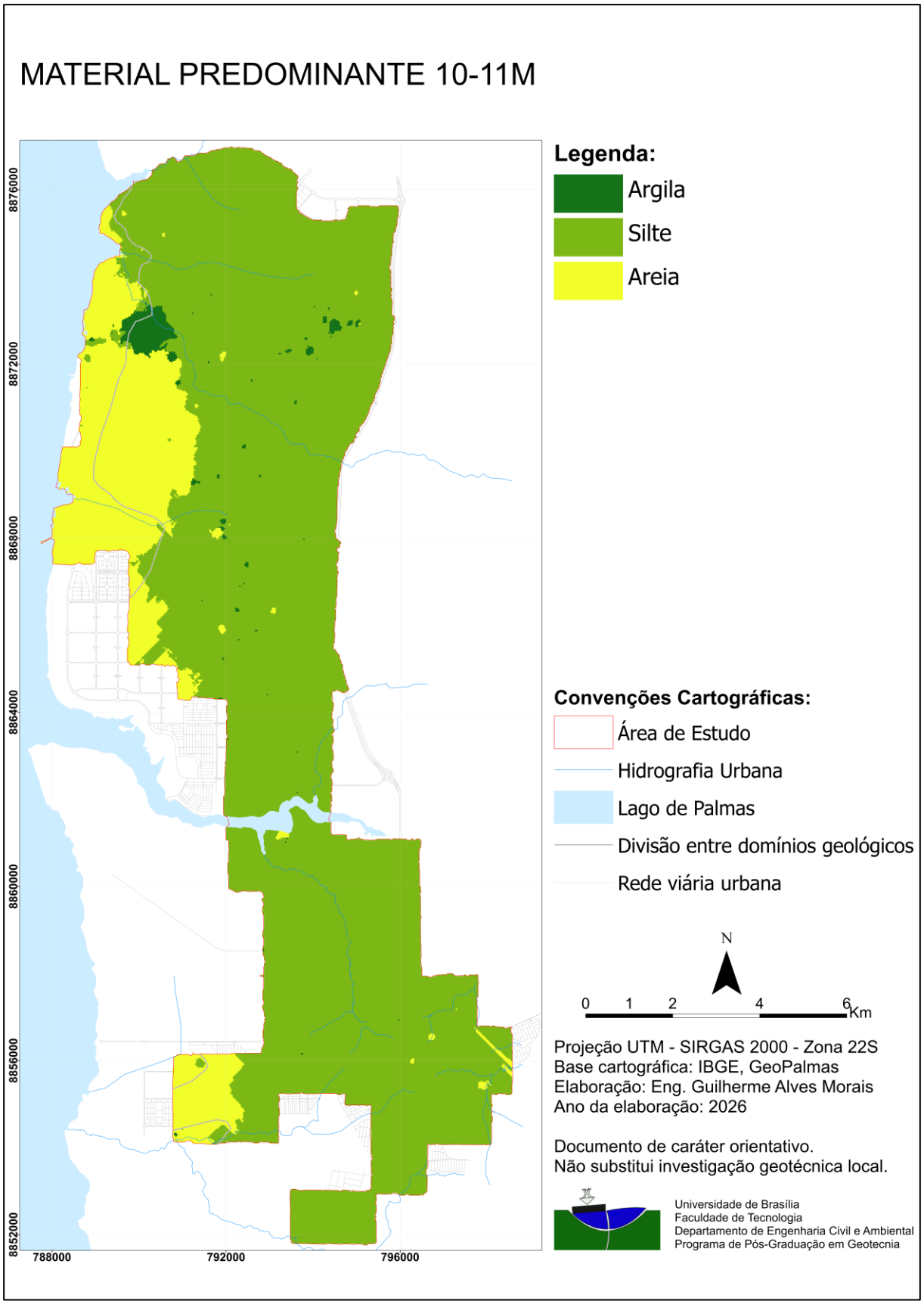


Figura 4.31 - Carta de material predominante para a camadas de 10-11 m.

Nas camadas superficiais, verifica-se elevada heterogeneidade espacial, com transições relativamente abruptas entre diferentes classes de solo predominante, comportamento compatível com a dinâmica deposicional recente da área de estudo e com a influência dos processos fluviais superficiais.

Também foram observadas, nas camadas superficiais, ocorrências pontuais da classe "rocha", especialmente na camada de 1 a 2 m. Essa classificação deve ser interpretada como uma classe geotécnica proveniente dos registros das sondagens, não correspondendo necessariamente à ocorrência de afloramentos rochosos contínuos. Em alguns casos, esses registros podem estar associados à descrição de rocha alterada, laterita endurecida, material de elevada resistência ou possíveis blocos/matacões interceptados pontualmente pela sondagem. Dessa forma, a representação cartográfica dessas ocorrências indica a predominância estimada da classe a partir dos dados disponíveis naquela camada, sem implicar continuidade lateral ou vertical obrigatória do material rochoso.

Ressalta-se ainda que, nos casos em que a sondagem foi paralisada por impenetrabilidade ou encerrada sem continuidade descritiva, a classe "rocha" não foi replicada automaticamente para as camadas subsequentes. Esse procedimento evitou a imposição artificial de continuidade vertical sem registro direto no banco de dados.

Nas camadas intermediárias, destaca-se a persistência dos materiais arenosos no domínio aluvionar, associados localmente à ocorrência de níveis com pedregulhos (secundário), enquanto os setores não aluvionares apresentam predominância de solos residuais mais compactos e materiais finos com maior grau de laterização.

A Figura 4.32 apresenta os resultados das camadas profundas (15-16 m e 20-21 m).

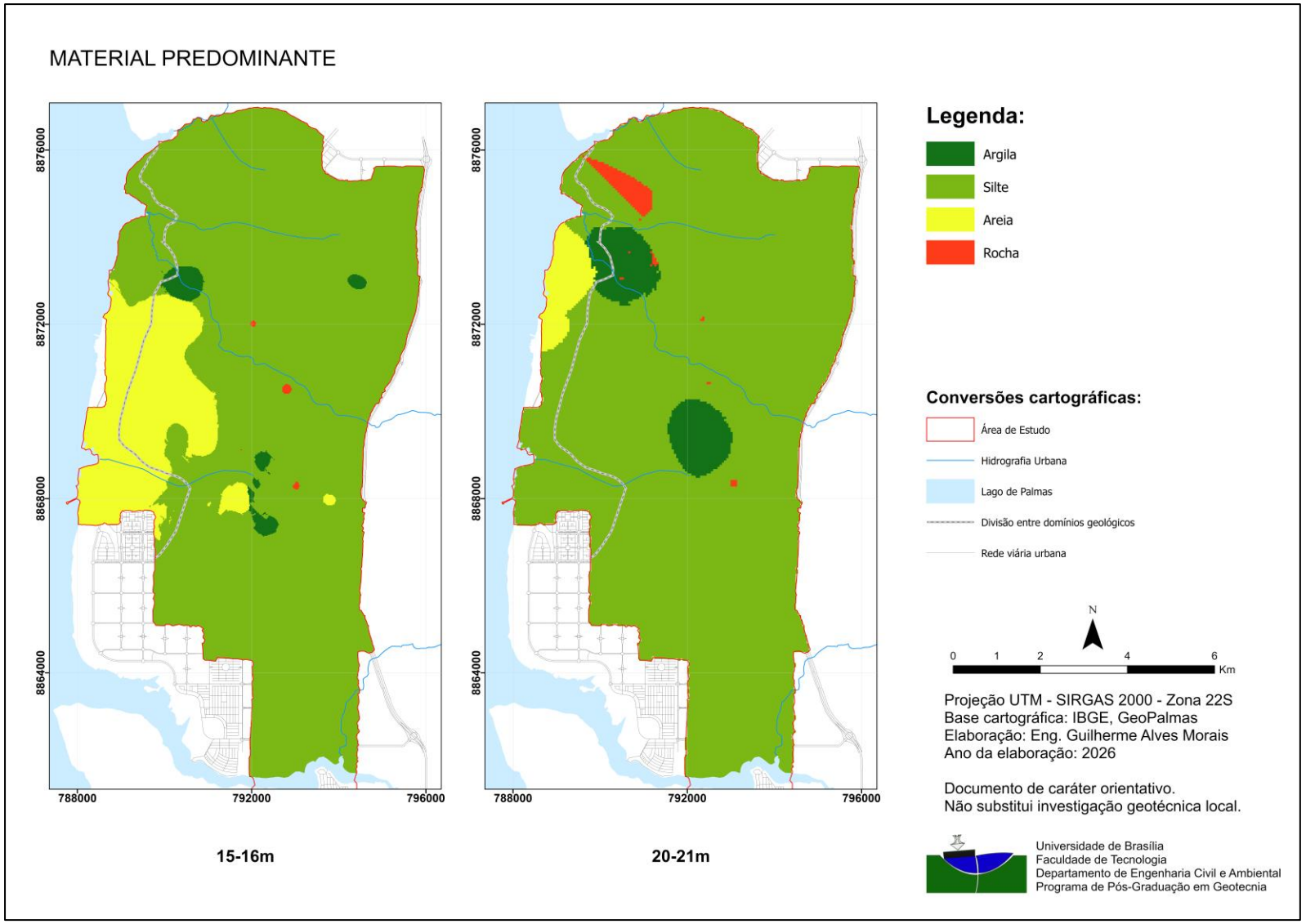


Figura 4.32 - Cartas de material predominante para as camadas profundas (15-16 m e 20-21 m).

Nas camadas profundas, observa-se redução progressiva da definição espacial das classes de solo predominante, associada à menor densidade amostral e ao aumento do espaçamento entre sondagens. Na camada de 20–21 m, predominam padrões regionais mais suavizados, com menor capacidade de representação das heterogeneidades locais. Ainda assim, é possível identificar tendências espaciais coerentes com o contexto geológico regional, especialmente a persistência de materiais arenosos em setores associados aos depósitos aluvionares e de materiais residuais mais resistentes nos compartimentos não aluvionares.

De modo geral, os mapas de predominância do tipo de solo evidenciam padrões espaciais coerentes com o contexto geológico e geomorfológico da área de estudo. Observa-se predominância de materiais finos — principalmente siltes e argilas — em grande parte da área analisada, enquanto materiais mais grosseiros, como areias, pedregulhos e ocorrências localizadas de rocha, apresentam distribuição espacial mais restrita e associada a contextos deposicionais específicos.

A análise integrada das diferentes profundidades evidencia redução progressiva da influência dos depósitos superficiais e aumento da continuidade espacial dos materiais predominantes ao longo do perfil geotécnico.

Os resultados obtidos apresentam coerência com as cartas interpoladas de N_{SPT} e com a distribuição dos depósitos aluvionares identificados na área de estudo, reforçando a consistência integrada das variáveis geotécnicas analisadas e a aplicabilidade da abordagem probabilística para representação espacial do tipo de solo predominante ao longo do perfil geotécnico da área urbana de Palmas.

4.2. Cartas de aptidão à fundação

As cartas de aptidão à fundação foram elaboradas com o objetivo de integrar as variáveis geotécnicas interpoladas em análises aplicadas ao comportamento executivo das fundações na área urbana de Palmas. Foram desenvolvidas cartas orientativas para fundações superficiais e profundas, aptidão à execução de estacas escavadas sem fluido estabilizante, aptidão à execução de estacas hélice contínua monitorada e estimativa do comprimento máximo executivo de estacas.

4.2.1. Critérios geotécnicos e executivos adotados

A análise entre fundações superficiais e profundas foi conduzida por abordagem booleana simplificada, considerando critérios geotécnicos associados à capacidade de suporte dos

materiais superficiais e às limitações executivas das fundações rasas. Essa análise possui caráter predominantemente técnico-econômico, buscando identificar setores mais favoráveis à adoção de fundações superficiais ou profundas em função das condições geotécnicas predominantes.

Para análises de estacas, verificou-se que a adoção do impenetrável ao SPT como critério binário restritivo produzia resultados excessivamente conservadores, especialmente na região central da área de estudo, onde poucas áreas eram classificadas como favoráveis à execução de fundações profundas a partir de 15 m de profundidade. Esse comportamento mostrou-se incompatível com a prática executiva observada no município de Palmas.

Observou-se que os critérios de "impenetrável ao SPT" estabelecidos pela NBR 6484 (ABNT, 2020) nem sempre correspondem à presença de rocha ou de barreira física efetivamente impeditiva à execução de fundações profundas. Em diversos casos analisados, a continuidade da investigação por meio de sondagem mista ou a execução posterior das fundações demonstraram possibilidade de avanço em materiais classificados como resistentes. Dessa forma, o impenetrável passou a ser interpretado como indicador de elevada resistência a perfuração ou dificuldade executiva, e não como delimitação inequívoca de rocha ou impedimento absoluto à perfuração de estacas.

Um exemplo representativo dessa limitação ocorre na região da Orla da Graciosa, inserida no domínio aluvionar da área de estudo. Nessa região, a presença localizada de pedregulhos de quartzo em camadas arenosas frequentemente resulta na paralisação do avanço com trépano de lavagem, embora esses pedregulhos possam ser deslocados pelos trados helicoidais das perfuratrizes, permitindo o avanço da perfuração mesmo após o impenetrável identificado na sondagem SPT.

A Figura 4.33 ilustra esse comportamento no domínio aluvionar, com base no caso em que a sondagem SPT foi interrompida aos 13 m de profundidade devido à impenetrabilidade ao trépano, enquanto as estacas foram projetadas e executadas com aproximadamente 19,5 m de profundidade em relação ao nível do terreno.

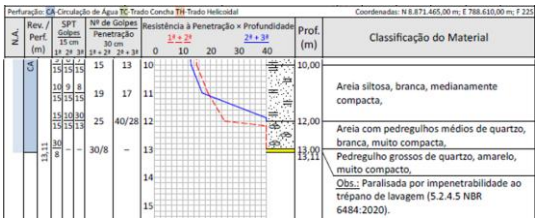
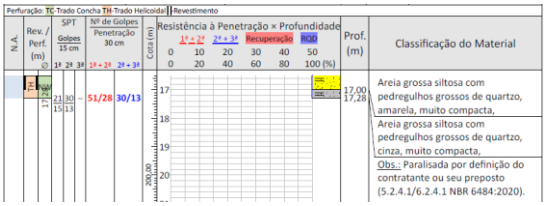
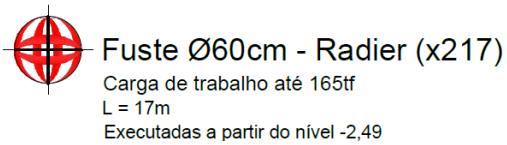
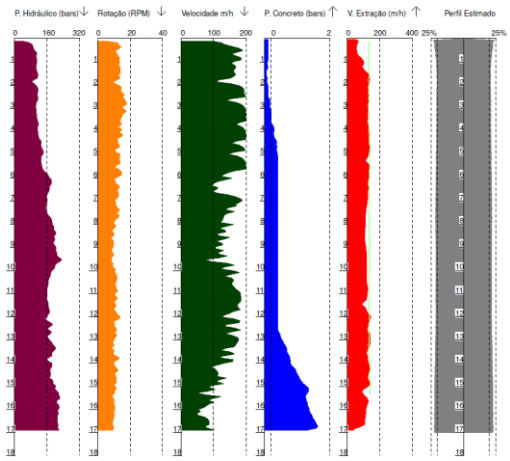
	Profundidade do Impenetrável ao SPT: 13,11m
	Profundidade da sondagem mista: 17,28m
	Profundidade da estaca hélice em projeto: 19,49m (17m + 2,49m)
	Profundidade da estaca hélice no relatório de monitoramento: 17m + 2,49m de escavação prévia

Figura 4.33 - Exemplo de execução de estaca hélice contínua monitorada em profundidade superior ao impenetrável identificado na sondagem SPT em setor aluvionar da Orla da Graciosa.

Os registros de monitoramento executivo indicam que a perfuração foi realizada sob elevados níveis de esforço operacional, evidenciando que materiais associados à maior resistência do terreno podem dificultar significativamente a execução das estacas, embora não impeçam necessariamente sua implantação. Para o caso apresentado, foram executadas estacas

com profundidade aproximadamente 6 m superior ao impenetrável identificado na investigação geotécnica.

Comportamento semelhante também foi observado em setores associados à Formação Pimenteiras. Nessas regiões, ocorrem casos de impenetrável ao SPT não relacionados à presença de rocha, mas à ocorrência de materiais residuais resistentes e níveis com pedregulhos lateríticos. A Figura 4.34 apresenta exemplo de obra em que o impenetrável ao SPT ocorreu na ordem de 18 m de profundidade, enquanto as estacas foram executadas até aproximadamente 20,4 m do nível do terreno após realização de furos teste e prova de carga estática para definição do projeto de fundação, após realização de furos teste e prova de carga estática para definição do projeto de fundação.

Nesse caso, a continuidade da perfuração evidencia que o impenetrável representava predominantemente um fator de dificuldade executiva, cuja influência depende diretamente da capacidade operacional dos equipamentos empregados, especialmente do torque disponível.

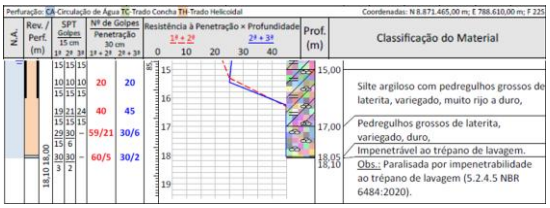
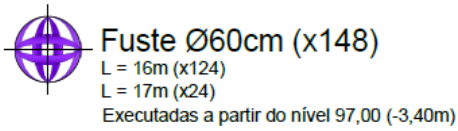
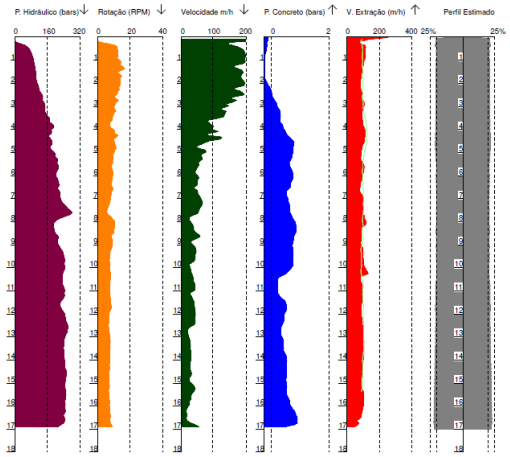
<table>
<tr>
<td>
</td>
<td>Profundidade Impenetrável ao SPT: 18,10m</td>
</tr>
<tr>
<td>
</td>
<td>Profundidade da estaca hélice em projeto: 20,40m (17m + 3,40m)</td>
</tr>
<tr>
<td>
</td>
<td>Profundidade da estaca hélice no relatório de monitoramento: 17m + 3,40m de escavação prévia</td>
</tr>
</table>

Figura 4.34 - Exemplo de execução de estaca hélice contínua monitorada em profundidade superior ao impenetrável identificado na sondagem SPT em setor associado à Formação Pimenteiras.

Os casos supracitados evidenciam que a utilização do impenetrável como critério binário é incapaz de representar adequadamente a realidade executiva local para estacas, justificando o tratamento dessa variável, bem como dos altos valores de N_{SPT}, como indicadores graduais de dificuldade executiva, e não de inviabilidade absoluta.

Considerando que, na região, os equipamentos empregados na execução de estacas escavadas mecanizadas geralmente apresentam menor capacidade operacional em relação às perfuratrizes utilizadas para execução de estacas hélice contínua monitorada, foram adotados critérios mais restritivos para as cartas de aptidão à estaca escavada sem fluido estabilizante e critérios relativamente mais permissivos para as cartas de aptidão à hélice contínua monitorada, tanto para profundidades superiores ao impenetrável quanto para valores elevados de N_{SPT}.

Ressalta-se que os critérios adotados não distinguem modelos nem capacidades operacionais específicas dos equipamentos utilizados na execução de estacas. Assim, a aptidão executiva e os comprimentos máximos estimados podem variar em função de parâmetros como torque, potência e força de avanço.

4.2.2. Orientação para fundação superficial e fundação profunda

A definição das cartas orientativas para fundação superficial e fundação profunda foi baseada na integração entre os resultados interpolados de N_{SPT} e profundidade do nível freático, considerando critérios relacionados à resistência dos materiais superficiais e às limitações executivas associadas às fundações rasas.

Para representação espacial do nível freático, foi adotada a metodologia baseada na diferença entre a superfície piezométrica interpolada e o modelo digital do terreno. Em comparação à interpolação direta da profundidade observada nas sondagens, essa abordagem apresentou maior coerência física na representação do nível de água da área, evidenciando níveis mais rasos nas proximidades das drenagens e regiões de vale. Embora resulte em cenário relativamente mais restritivo, a metodologia adotada mostrou-se fisicamente mais consistente para elaboração das cartas de aptidão à fundação.

A Figura 4.35 apresenta as cartas orientativas para fundação superficial e fundação profunda considerando profundidades de assentamento de 1 m e 2 m.

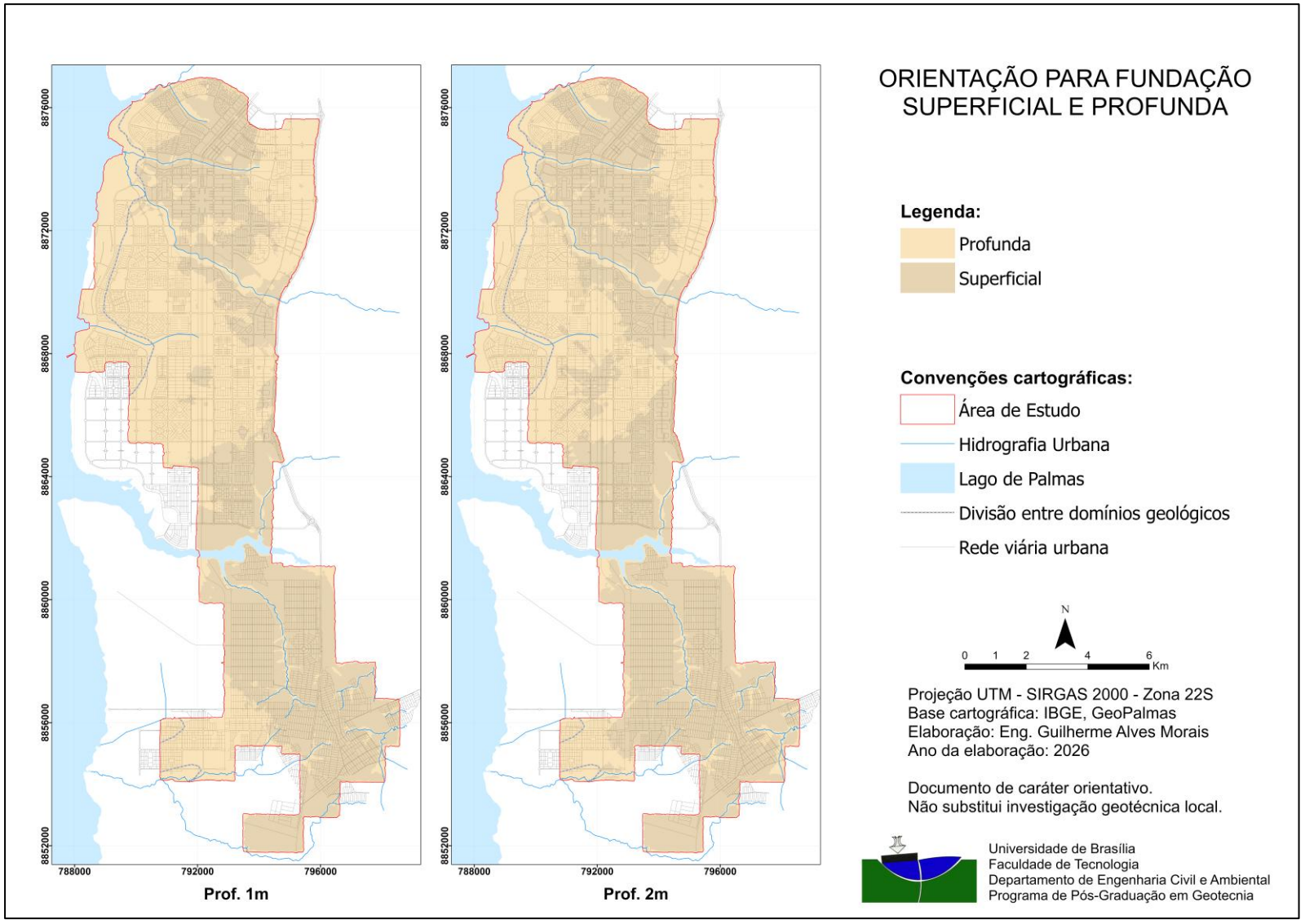


Figura 4.35 - Cartas orientativas para fundação superficial e fundação profunda para profundidades de assentamento de 1 m e 2 m.

A comparação entre as cartas evidencia aumento das áreas classificadas como aptas à fundação superficial na profundidade de 2 m. Embora o critério relacionado ao nível do lençol freático se torne mais restritivo em maiores profundidades, o índice N_{SPT}, apresentou incremento significativo ao longo do perfil geotécnico.

Nas camadas mais superficiais, observa-se maior heterogeneidade espacial e ocorrência mais frequente de valores reduzidos de N_{SPT}, associados à presença de materiais menos resistentes, especialmente em setores aluvionares próximos às drenagens e ao Lago de Palmas. Em contrapartida, na profundidade de 2 m, verifica-se aumento da resistência dos materiais superficiais, resultando em maior número de áreas atendendo ao critério de N_{SPT} mínimo adotado para fundações rasas.

Os resultados indicam que a resistência dos materiais superficiais exerceu influência predominante na definição da aptidão à fundação superficial. Esse comportamento sugere que, em diversos setores da área de estudo, pequenas variações na profundidade de assentamento podem resultar em melhoria significativa das condições geotécnicas para adoção de fundações rasas.

4.2.3. Estacas escavadas mecanizadas sem fluido estabilizante

A análise das estacas escavadas mecanizadas sem fluido estabilizante foi desenvolvida com base nos critérios geotécnicos e executivos definidos anteriormente, considerando a profundidade do nível de água, a ocorrência de rocha ou material impenetrável e a resistência dos materiais em profundidade. Os subitens seguintes apresentam a comparação entre as abordagens de análise e os resultados espaciais obtidos para esse método executivo.

4.2.3.1. Comparação entre análise booleana e com pesos

Com o objetivo de avaliar a representatividade espacial dos critérios adotados para aptidão à execução de estacas escavadas sem fluido estabilizante, foi realizada análise comparativa entre uma abordagem estritamente booleana e a metodologia ponderada adotada neste trabalho, utilizando a camada de 10-11 m como representativa da análise.

Na abordagem booleana, variáveis como profundidade do nível de água, ocorrência de impenetrável ao SPT, presença de rocha e valores elevados de N_{SPT} foram tratadas como critérios totalmente impeditivos, resultando em classificação binária entre áreas aptas e inapta. Em contrapartida, a abordagem ponderada considerou o impenetrável ao SPT e os elevados

valores de N_{SPT} como fatores graduais de dificuldade executiva, permitindo representação intermediária das condições de favorabilidade.

A Figura 4.36 apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelas duas metodologias para a camada de 10-11 m.

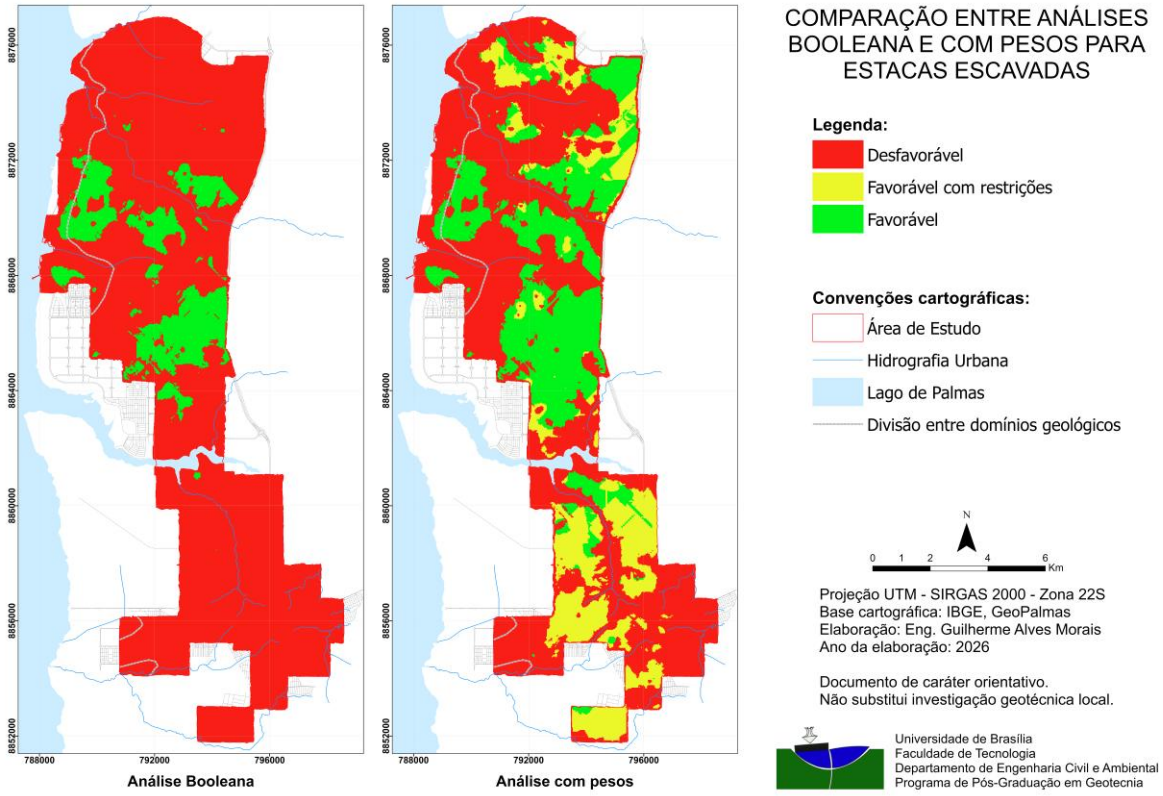


Figura 4.36 - Comparação entre a abordagem booleana restritiva e a abordagem ponderada para aptidão à execução de estacas escavadas sem fluido estabilizante na camada de 10-11 m.

Observa-se que a abordagem estritamente booleana resultou em redução significativa das áreas classificadas como aptas à execução de estacas escavadas, especialmente em setores associados à ocorrência de elevados valores de N_{SPT} e impenetrável ao SPT. Em profundidades maiores, esse comportamento torna-se ainda mais restritivo, resultando na quase eliminação das áreas classificadas como favoráveis a partir da camada de 15 m.

Em contrapartida, a abordagem ponderada apresentou distribuição espacial mais compatível com a prática executiva observada na região, permitindo distinguir áreas totalmente desfavoráveis daquelas onde a execução permanece tecnicamente viável, porém condicionada a maiores dificuldades operacionais. Essa metodologia possibilitou representação mais gradual

das limitações executivas, reduzindo o excesso de rigidez associado à aplicação de critérios puramente binários.

Além disso, a abordagem ponderada permitiu incorporar diferentes níveis de restrição executiva às análises de aptidão, representando de maneira mais realista a influência conjunta do nível de água, resistência dos materiais e profundidade do impenetrável ao SPT sobre a execução das fundações profundas.

4.2.3.2. Resultado espacial

A Figura 4.37 apresenta as cartas de aptidão à execução de estacas escavadas mecanizadas sem fluido estabilizante, obtidas por meio da abordagem ponderada adotada neste trabalho, para as camadas intermediárias de 5-6 m e 10-11 m.

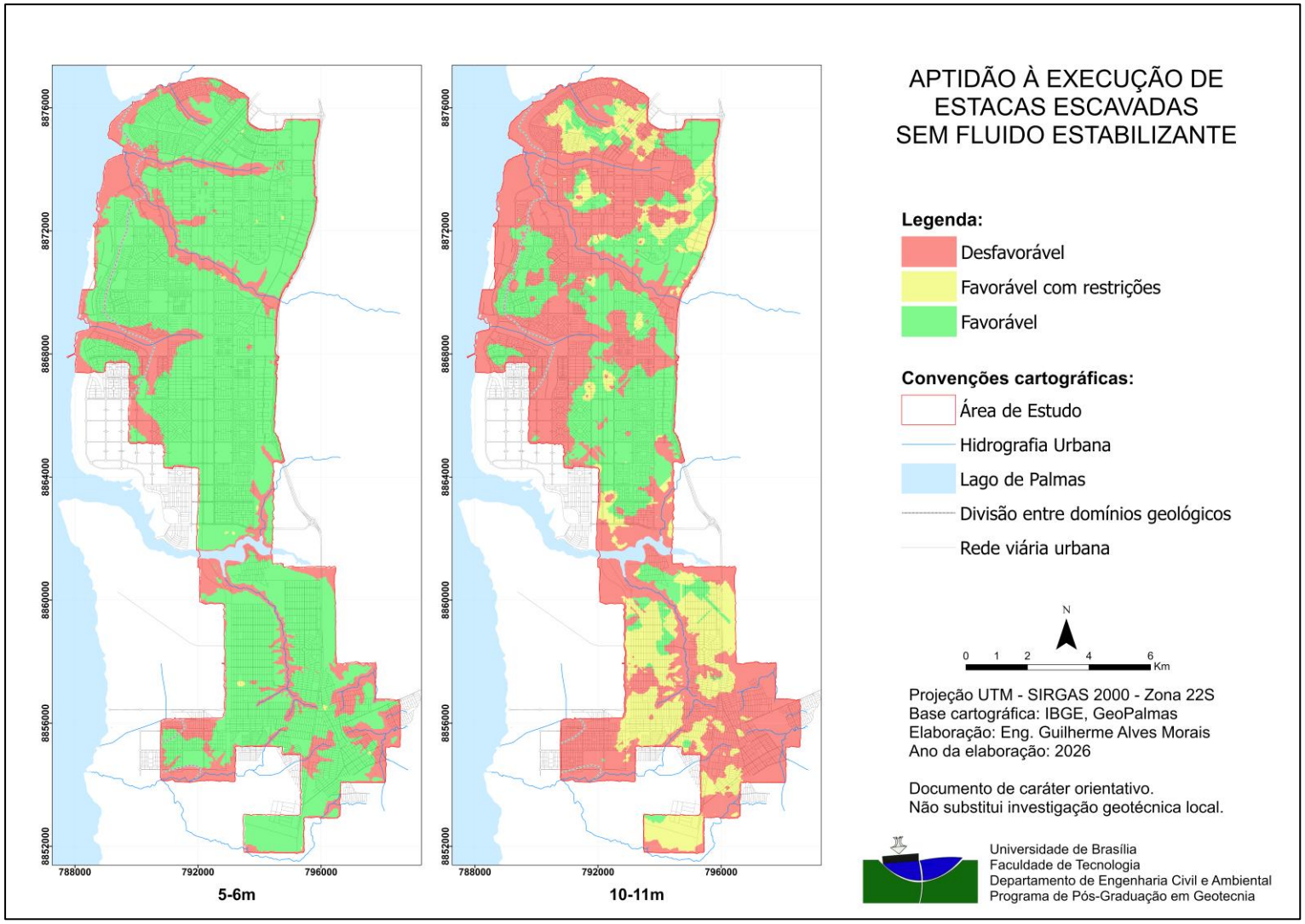


Figura 4.37 - Cartas de aptidão à execução de estacas escavadas sem fluido estabilizante para as camadas de 5-6 m e 10-11 m.

Observa-se redução progressiva das áreas classificadas como favoráveis à execução de estacas escavadas sem fluido estabilizante com o aumento da profundidade. Na camada de 5-6 m, ainda predominam áreas classificadas como favoráveis, especialmente em setores mais afastados das drenagens principais e regiões com maior profundidade do nível de água.

Na camada de 10-11 m, verifica-se aumento expressivo das áreas classificadas como favoráveis com restrições e desfavoráveis, associado principalmente à influência do nível de água subterrâneo e ao aumento da resistência dos materiais em profundidade. Ainda assim, observa-se a permanência de áreas favoráveis em parcela significativa da área de estudo, especialmente em setores mais afastados das drenagens principais e com maior profundidade do nível de água. Em setores aluvionares próximos ao Lago de Palmas e aos principais cursos de água, a presença de nível freático relativamente raso exerceu forte influência restritiva sobre a aptidão à execução de estacas escavadas sem fluido estabilizante.

Observa-se ainda que áreas classificadas como favoráveis com restrições se concentram principalmente em setores onde os elevados valores de N_{SPT} e a proximidade do impenetrável ao SPT indicam aumento da dificuldade executiva, embora sem inviabilizar necessariamente a perfuração mecanizada.

A Figura 4.38 apresenta as cartas de aptidão para as camadas profundas de 15-16 m e 20-21 m.

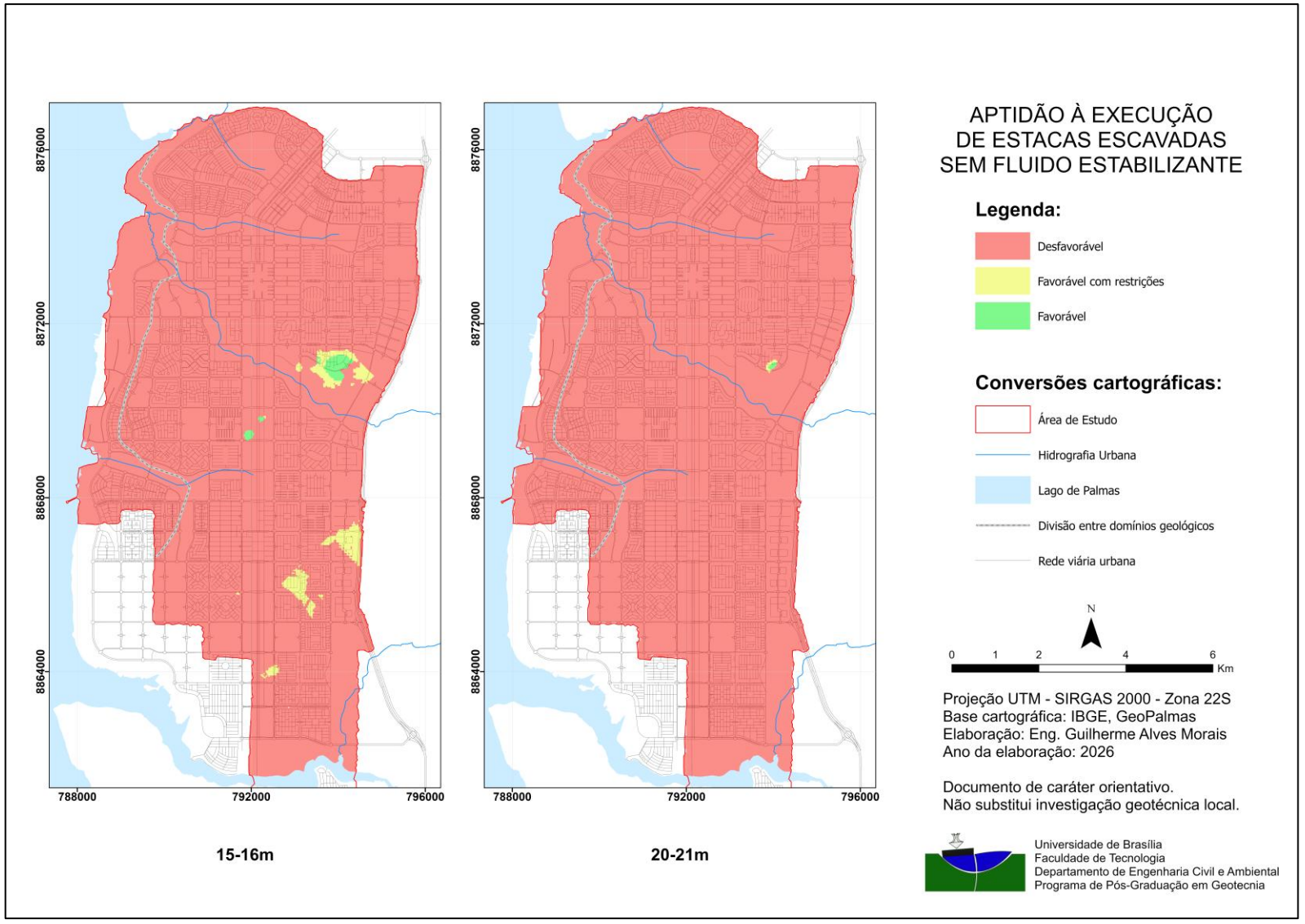


Figura 4.38 - Cartas de aptidão à execução de estacas escavadas sem fluido estabilizante para as camadas de 15-16 m e 20-21 m.

Na camada de 15-16 m, ainda são observadas pequenas áreas classificadas como favoráveis com restrições, associadas principalmente a setores com maior profundidade do nível freático e menores limitações executivas relativas. Entretanto, na camada de 20–21 m, verifica-se predominância praticamente total das classes desfavoráveis, evidenciando forte limitação executiva para estacas escavadas mecanizadas sem utilização de fluido estabilizante nessas profundidades.

4.2.4. Estacas Hélice contínua monitorada

A análise das estacas hélice contínua monitorada foi desenvolvida com base nos critérios geotécnicos e executivos definidos anteriormente, considerando a ocorrência de rocha ou material classificado como impenetrável e a resistência dos materiais em profundidade. Diferentemente das estacas escavadas sem fluido estabilizante, a profundidade do nível de água não foi considerada como fator limitante para esse método. Os subitens seguintes apresentam a comparação entre as abordagens de análise e os resultados espaciais obtidos para esse método executivo.

4.2.4.1. Comparação entre análise booleana e com pesos

Com o objetivo de avaliar a representatividade espacial dos critérios adotados para aptidão à execução de estacas hélice contínua monitorada, foi realizada análise comparativa entre a abordagem estritamente booleana e a metodologia ponderada adotada neste trabalho, utilizando a camada de 15-16 m como representativa da análise.

Na abordagem booleana, variáveis como ocorrência de impenetrável ao SPT, elevados valores de N_{SPT} e presença de rocha foram tratadas como critérios totalmente impeditivos à execução das fundações em hélice contínua. Em contrapartida, a abordagem ponderada considerou parte dessas variáveis como fatores graduais de dificuldade executiva, permitindo representação intermediária das condições de favorabilidade e maior compatibilidade com a prática executiva observada na região.

A Figura 4.39 apresenta a comparação entre os resultados obtidos pelas duas metodologias para a profundidade de 15-16 m.

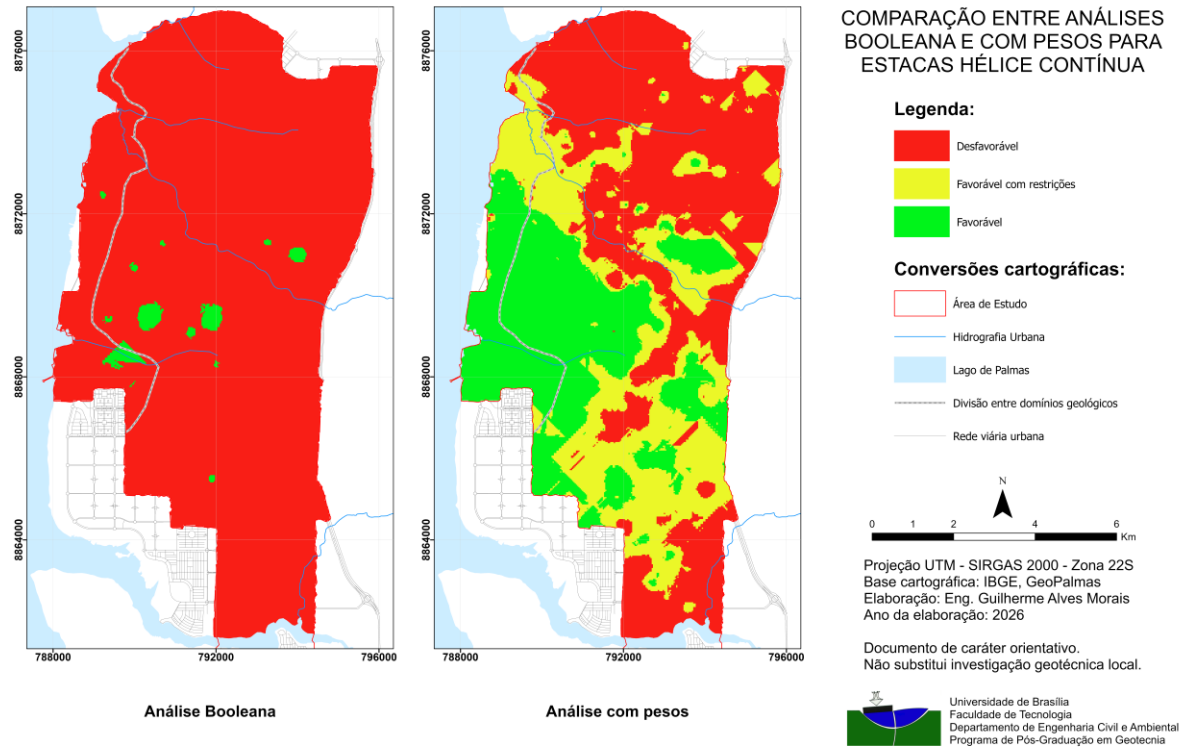


Figura 4.39 - Comparação entre a abordagem booleana restritiva e a abordagem ponderada para aptidão à execução de estacas hélice contínua monitorada na camada de 15-16 m.

Observa-se que a abordagem estritamente booleana resultou em classificação predominantemente desfavorável em praticamente toda a região norte-central da área de estudo, restringindo significativamente as regiões consideradas aptas à execução de estacas hélice contínua monitorada. Esse comportamento mostrou-se excessivamente conservador quando comparado à prática executiva observada no município de Palmas, especialmente em setores onde há registro de execução de estacas em profundidades superiores ao impenetrável identificado nas sondagens SPT.

Em contrapartida, a abordagem ponderada apresentou distribuição espacial mais compatível com as condições executivas reais, permitindo distinguir áreas totalmente desfavoráveis daquelas onde a execução permanece tecnicamente viável mediante utilização de equipamentos com maior capacidade operacional ou adoção de soluções executivas específicas.

Destaca-se que as áreas classificadas como favoráveis ou favoráveis com restrições concentram-se principalmente em setores associados aos depósitos aluvionares e regiões onde os valores de N_{SPT} e as profundidades relacionadas ao impenetrável ao SPT indicam condições executivas mais compatíveis com os critérios adotados e com a prática executiva observada

para os equipamentos usualmente empregados na região. Nessas áreas, os elevados valores de N_{SPT} e o impenetrável ao SPT passaram a representar aumento gradual da dificuldade executiva, e não impedimento absoluto à execução das fundações.

Além disso, observa-se que a abordagem ponderada permitiu distinguir setores onde a execução permanece tecnicamente viável mediante utilização de equipamentos de maior torque e ferramentas reforçadas, especialmente em regiões com ocorrência de materiais resistentes e níveis localizados de pedregulho. Esse comportamento reforça a interpretação adotada nos critérios de aptidão, segundo a qual o impenetrável ao SPT representa aumento da dificuldade executiva, mas não necessariamente impedimento absoluto à execução de estacas.

4.2.4.2. Resultado espacial

A Figura 4.40 apresenta as cartas de aptidão à execução de estacas hélice contínua monitorada, obtidas por meio da abordagem ponderada, para as camadas intermediárias de 5-6 m e 10-11 m.

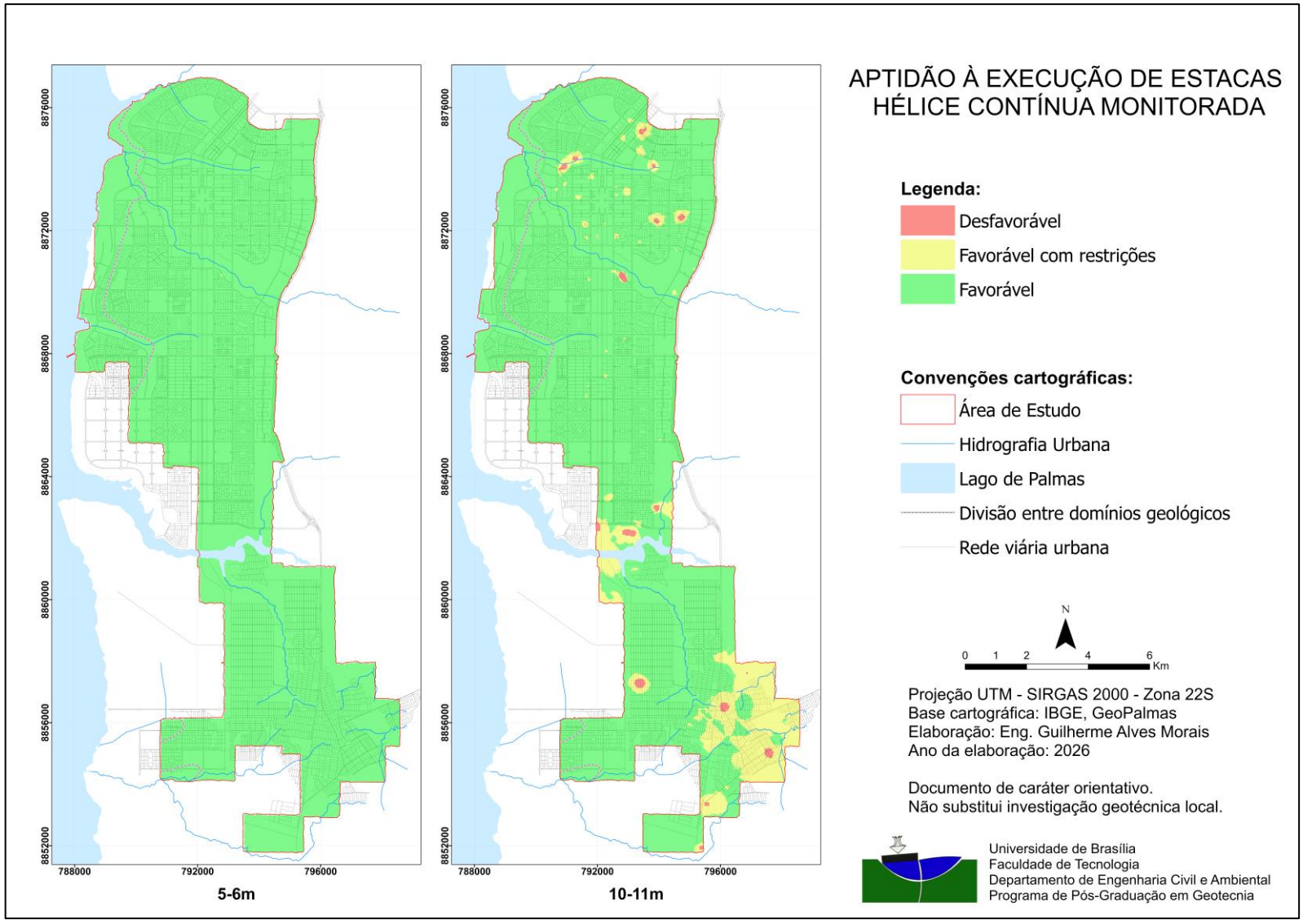


Figura 4.40 - Cartas de aptidão à execução de estacas hélice contínua monitorada para as camadas de 5-6 m e 10-11 m.

Nas camadas intermediárias, observa-se predominância de áreas classificadas como favoráveis à execução de estacas hélice contínua monitorada, especialmente na profundidade de 5-6 m. Esse comportamento está associado à elevada capacidade operacional dos equipamentos empregados na região para execução de estacas em profundidades moderadas, mesmo em setores com ocorrência localizada de materiais resistentes e profundidades reduzidas do impenetrável ao SPT.

Embora sejam observadas restrições pontuais associadas a elevados valores de N_{SPT} e à ocorrência de materiais mais resistentes, verifica-se que tais condicionantes não inviabilizam necessariamente a execução das fundações por hélice contínua em menores profundidades.

Na camada de 10-11 m, observa-se aumento das áreas classificadas como favoráveis com restrições e desfavoráveis, associado principalmente ao incremento progressivo da resistência dos materiais em profundidade e à maior proximidade do impenetrável ao SPT. Ainda assim, permanecem extensas áreas classificadas como aptas à execução, evidenciando maior capacidade adaptativa do método executivo em comparação às estacas escavadas sem fluido estabilizante.

A Figura 4.41 apresenta as cartas de aptidão para as camadas profundas de 15-16 m e 20-21 m.

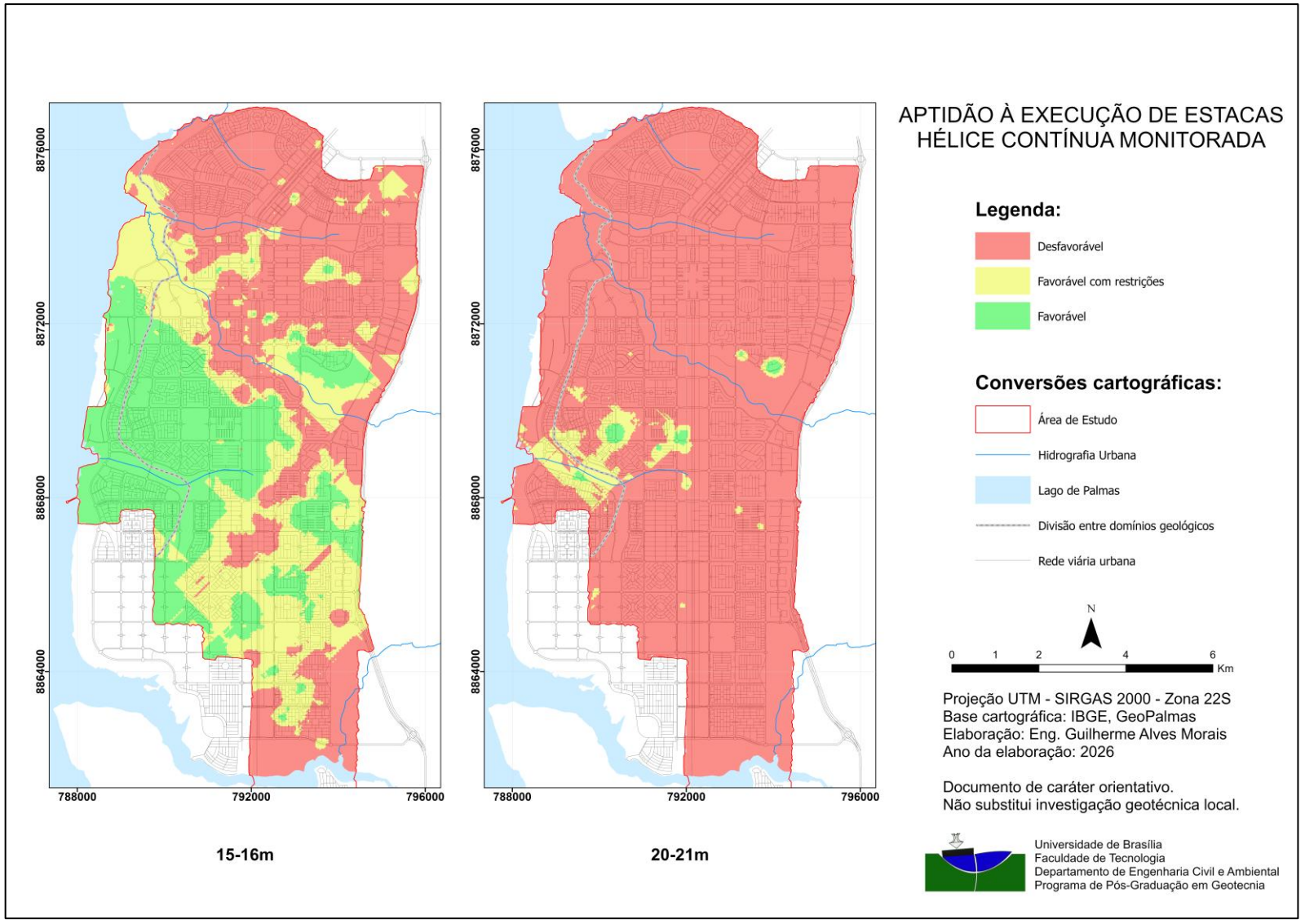


Figura 4.41 - Cartas de aptidão à execução de estacas hélice contínua monitorada para as camadas de 15-16 m e 20-21 m.

Nas camadas profundas, verifica-se redução significativa das áreas classificadas como favoráveis, acompanhada do aumento das regiões enquadradas como favoráveis com restrições e desfavoráveis. Esse comportamento reflete o aumento da resistência dos materiais em profundidade e a maior ocorrência de condições associadas a elevados valores de N_{SPT} e profundidades superiores ao impenetrável ao SPT.

Na camada de 15-16 m, ainda são observadas áreas com aptidão relativa à execução de estacas hélice contínua monitorada, principalmente em setores associados aos depósitos aluvionares e regiões com materiais menos resistentes em profundidade. Nessas áreas, a execução permanece tecnicamente viável, embora frequentemente condicionada à utilização de equipamentos de maior capacidade operacional.

Já na camada de 20-21 m, observa-se predominância quase generalizada de áreas classificadas como desfavoráveis, indicando limitação executiva significativa para execução de estacas hélice contínua monitorada nessas profundidades. Mesmo assim, permanecem ocorrências pontuais de áreas classificadas como favoráveis com restrições, associadas principalmente a setores onde os materiais apresentam menor resistência relativa em profundidade.

4.2.5. Comprimento máximo de estacas

As cartas de comprimento máximo estimado de estacas foram elaboradas com o objetivo de representar, de forma orientativa, a profundidade máxima potencialmente executável para os métodos de fundação profunda analisados, considerando as limitações geotécnicas e executivas identificadas ao longo do perfil do subsolo.

Ressalta-se que a capacidade executiva das fundações profundas está diretamente relacionada às características operacionais dos equipamentos empregados. No caso das estacas escavadas mecanizadas sem fluido estabilizante, a execução é inviável com presença de água e tende a apresentar maiores limitações em materiais de elevada resistência, especialmente em maiores profundidades, em função do menor torque normalmente disponível nesses equipamentos. Em contrapartida, as perfuratrizes utilizadas para execução de estacas hélice contínua monitorada apresentam, em geral, maior capacidade operacional, possibilitando avanço da perfuração em materiais mais resistentes e em profundidades superiores, além de que o seu método executivo permite a perfuração mesmo com a presença de lençol freático acima do comprimento máximo da estaca.

Adicionalmente, condições geotécnicas desfavoráveis podem ser parcialmente superadas mediante a utilização de equipamentos de maior torque, ferramentas reforçadas e trados especiais com elementos de corte adaptados, como exemplo o emprego de bits, para materiais resistentes e níveis localizados de pedregulho. Dessa forma, a capacidade executiva efetivamente observada em campo pode variar em função das características dos equipamentos empregados e das estratégias adotadas em cada obra.

Considerando essa variabilidade operacional, optou-se por utilizar exclusivamente as áreas classificadas como favoráveis nas análises de aptidão executiva para a elaboração das cartas de comprimento máximo. Essa abordagem buscou representar cenários compatíveis com condições executivas usuais observadas na região de Palmas, reduzindo a influência de situações que demandariam adaptações significativas do método construtivo, emprego de equipamentos especiais ou acréscimos substanciais de custo operacional. Assim, os comprimentos máximos estimados devem ser interpretados como valores orientativos para condições executivas correntes, podendo variar em função das características específicas de cada empreendimento.

4.2.5.1. Resultado espacial

A Figura 4.42 apresenta as cartas de comprimento máximo estimado para execução de estacas escavadas sem fluido estabilizante e estacas hélice contínua monitorada.

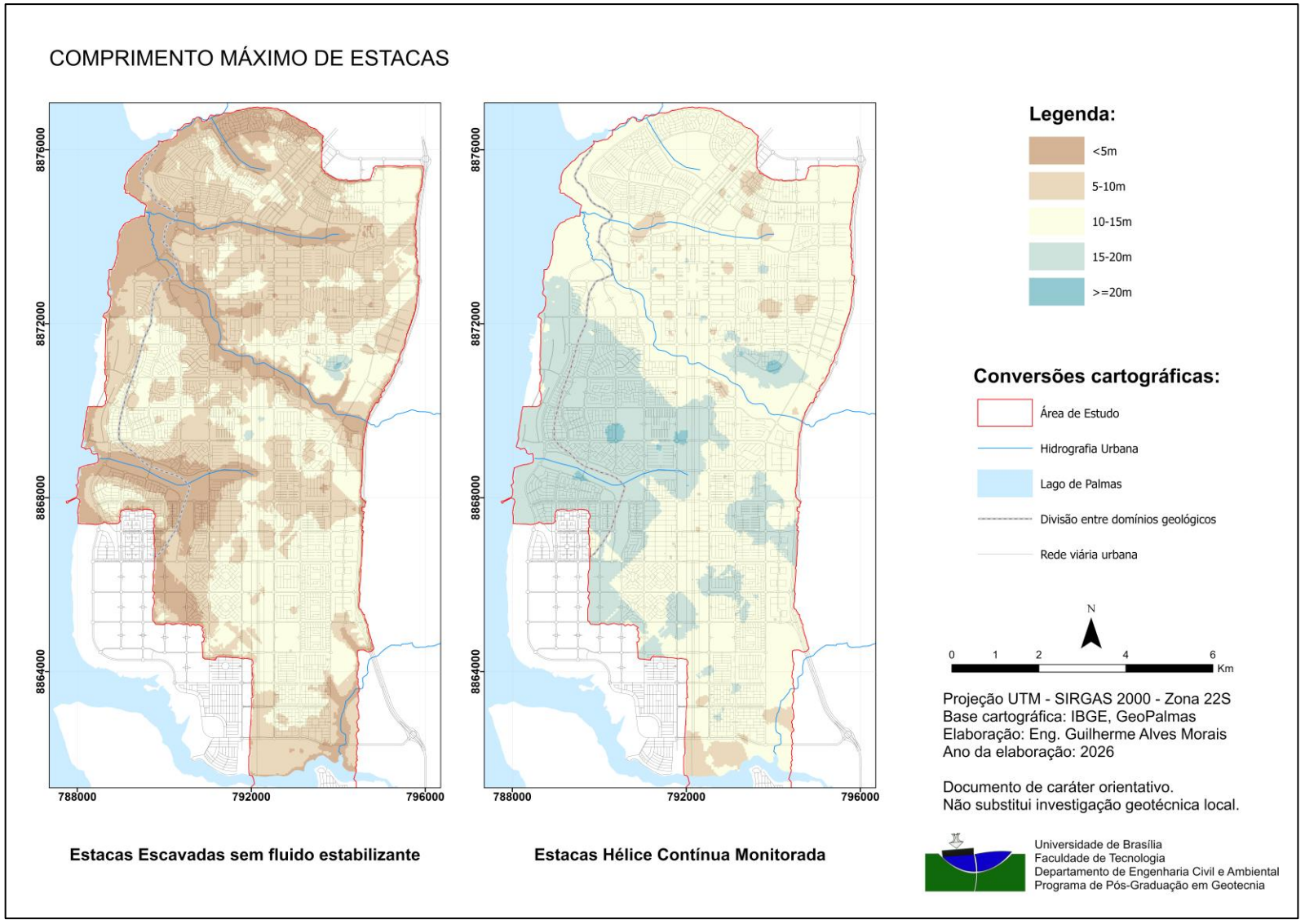


Figura 4.42 - Cartas de comprimento máximo estimado para estacas escavadas sem fluido estabilizante e estacas hélice contínua monitorada.

Conforme observado na Figura 4.42 e quantificado na Tabela 4.4, verifica-se diferença expressiva entre o potencial executivo dos dois métodos analisados, evidenciada pela distribuição das áreas ocupadas por cada classe de comprimento máximo estimado.

Tabela 4.4 - Áreas por classe de comprimento máximo estimado para estacas escavadas sem fluido estabilizante e estacas hélice contínua monitorada

Comprimento máximo de estaca	Estaca Escavada sem fluido estabilizante		Estaca Hélice Contínua Monitorada	
	Área (km²)	Área (%)	Área (km²)	Área (%)
<5m	16,55	20,91%	0,01	0,01%
5-10m	35,06	44,29%	2,97	3,75%
10-15m	27,24	34,41%	53,67	67,80%
15-20m	0,29	0,37%	22,10	27,92%
>=20m	0,02	0,03%	0,41	0,52%
Total	79,16	100%	79,16	100%

Para as estacas escavadas sem fluido estabilizante, predominam os comprimentos máximos estimados inferiores a 10m, que correspondentes a 51,61 km², ou 65,20% da área de estudo. Esse comportamento ocorre especialmente em setores próximos às drenagens principais e ao Lago de Palmas, estando diretamente associado às limitações executivas impostas pela profundidade do nível freático, pela resistência dos materiais em profundidade e pela menor capacidade operacional dos equipamentos normalmente empregados para esse método na região.

As áreas classificadas com comprimentos máximos inferiores a 5 m concentram-se principalmente em regiões associadas a menores profundidades do nível de água e condições geotécnicas menos favoráveis à estabilidade da escavação sem utilização de fluido estabilizante. Em contrapartida, os setores classificados entre 10 e 15 m ocorrem predominantemente em áreas mais afastadas das drenagens e com condições relativamente mais favoráveis do ponto de vista geotécnico.

Observa-se ainda que as áreas com comprimentos máximos estimados superiores a 15 m para estacas escavadas apresentam ocorrência bastante restrita, enquanto regiões classificadas com potencial superior a 20 m são praticamente inexistentes. Esse comportamento evidencia as limitações executivas desse método em maiores profundidades.

Em contrapartida, as estacas hélice contínua monitorada apresentam potencial executivo significativamente superior em praticamente toda a área de estudo. Predominam setores classificados com comprimentos máximos estimados entre 10 e 20 m, que abrangem, em

conjunto, 75,77 km², equivalentes a 95,72% da área analisada. Esse resultado evidencia a maior capacidade operacional desse método em materiais resistentes e maiores profundidades.

As áreas classificadas com potencial superior a 20 m concentram-se principalmente em setores associados aos depósitos aluvionares e regiões onde os materiais apresentam menores limitações relativas à perfuração em profundidade. Nessas áreas, a maior capacidade operacional das perfuratrizes hélice contínua monitorada permite avanço da perfuração mesmo em condições associadas a elevados valores de N_{SPT} e profundidades superiores ao impenetrável ao SPT.

Observa-se ainda que as regiões classificadas com menores comprimentos máximos estimados para hélice contínua correspondem, em geral, a setores com ocorrência de materiais extremamente resistentes, elevados valores de N_{SPT} e condições associadas à maior dificuldade executiva em profundidade.

4.2.6. Validação com casos reais

A validação das cartas de aptidão à fundação foi realizada por meio da comparação entre os resultados obtidos na modelagem espacial e casos reais de fundações projetadas e/ou executadas na área de estudo. Essa etapa teve como objetivo verificar a coerência entre as classes indicadas nas cartas e as soluções de fundação efetivamente adotadas em empreendimentos localizados no Plano Diretor de Palmas.

Ressalta-se que a validação proposta possui caráter qualitativo-comparativo, não tendo como objetivo verificar o dimensionamento estrutural das fundações ou reavaliar a capacidade de carga dos elementos executados. O foco da análise consiste em avaliar se as tipologias de fundação observadas em obras reais são compatíveis com as tendências geotécnicas indicadas pelas cartas produzidas, considerando a escala regional do estudo e o caráter orientativo dos produtos cartográficos elaborados.

Os casos reais foram agrupados conforme a tipologia de fundação adotada, distinguindo-se fundações superficiais, estacas escavadas, estacas hélice contínua monitorada e demais soluções observadas. A espacialização desses pontos permitiu avaliar sua distribuição em relação à carta de orientação entre fundações superficiais e profundas, adotada como mapa-base para a análise inicial da validação.

A Figura 4.43 apresenta a distribuição espacial dos casos reais de fundações conhecidos, sobrepostos à carta de aptidão à fundação superficial para a profundidade de 2 m. A simbologia

adotada permite diferenciar as tipologias de fundação observadas, sendo os pontos vermelhos correspondentes às fundações superficiais, os pontos laranja às estacas escavadas, os pontos verdes às estacas hélice contínua monitorada e os pontos cinza às demais soluções, como estacão e tubulão.

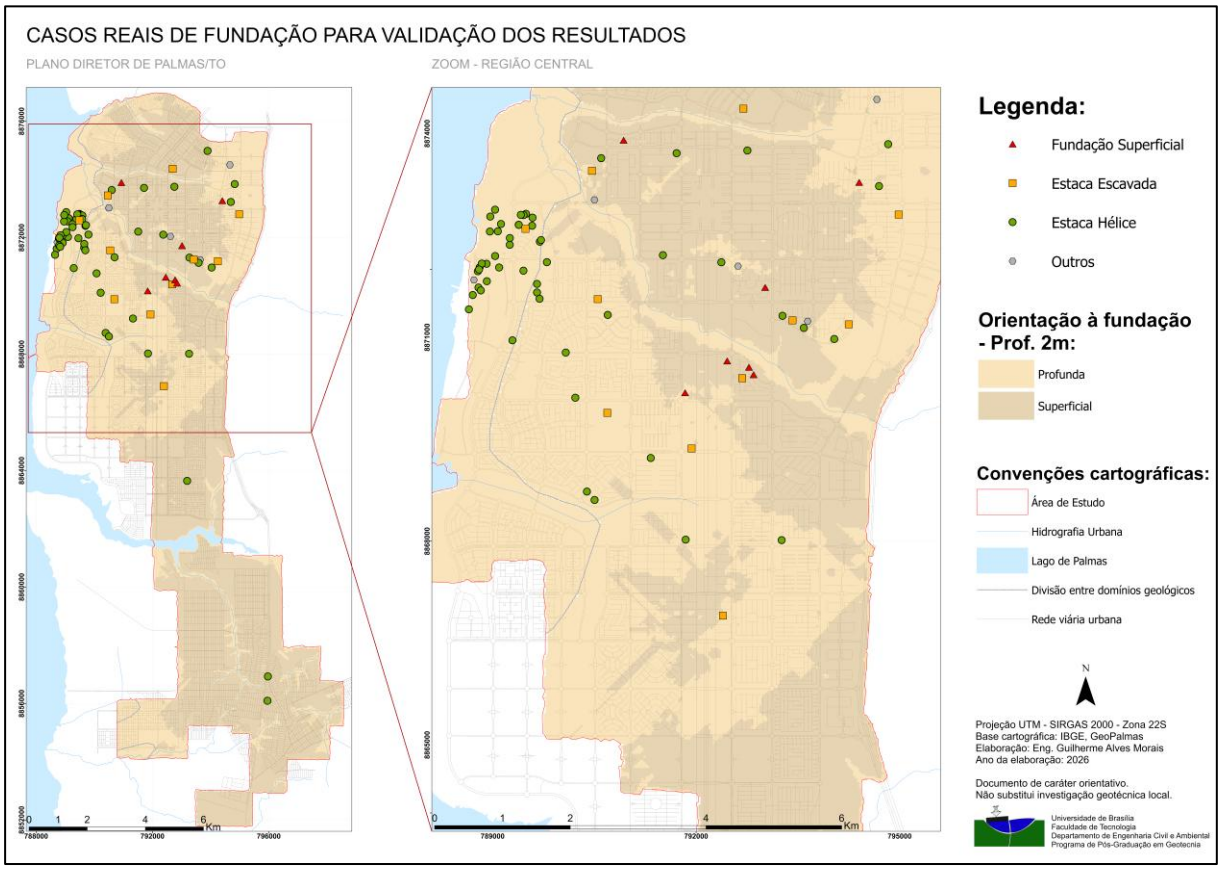


Figura 4.43 - Distribuição espacial dos casos reais de fundações utilizados na validação das cartas de aptidão, com destaque para a região central do Plano Diretor de Palmas.

Observa-se que os registros disponíveis se concentram predominantemente na região central do Plano Diretor, especialmente nas áreas de maior adensamento urbano e verticalização. Por esse motivo, a figura apresenta também um recorte ampliado da região central, permitindo melhor visualização dos pontos e das relações espaciais entre as tipologias executadas e as classes de aptidão indicadas pela carta.

A utilização da carta de aptidão à fundação superficial como fundo da análise permite uma leitura integrada entre as soluções executadas e o comportamento geotécnico regional. Entretanto, é importante destacar que áreas classificadas como aptas à fundação superficial não impedem a adoção de fundações profundas. Em empreendimentos com maiores solicitações estruturais, presença de subsolos, restrições construtivas ou estratégias específicas de projeto,

fundações profundas podem ser adotadas mesmo em regiões onde o terreno apresenta condições favoráveis ao uso de fundações rasas.

Nesses casos, a presença de fundações profundas em áreas aptas à fundação superficial deve ser interpretada com cautela. A carta indica que o terreno apresenta condições compatíveis com soluções rasas sob os critérios adotados, mas a escolha final da fundação depende também de fatores estruturais, econômicos e executivos. Assim, em regiões com maior aptidão para fundações superficiais, a adoção de estacas pode estar associada não necessariamente à inviabilidade das fundações rasas, mas à maior magnitude das cargas, à padronização construtiva ou à necessidade de atender condicionantes específicas de projeto.

De modo geral, espera-se que, em áreas com maior suporte geotécnico nas camadas superficiais, as fundações profundas, quando adotadas, apresentem menores comprimentos ou maior dificuldade executiva relativa, quando comparadas a regiões com solos menos resistentes. Essa interpretação reforça o caráter orientativo das cartas, que devem ser utilizadas como instrumentos de apoio ao planejamento preliminar de fundações e ao direcionamento de investigações geotécnicas e não como critério único de definição da solução de fundação.

A distribuição espacial dos casos reais também evidencia a menor disponibilidade de registros na porção sul da área de estudo. Essa limitação é particularmente relevante para a análise das fundações profundas, uma vez que a validação de estacas escavadas e estacas hélice contínua depende da existência de obras com informações conhecidas de profundidade, diâmetro e tipologia executiva. Dessa forma, as análises comparativas envolvendo fundações profundas foram concentradas principalmente na região central do Plano Diretor, onde há maior densidade de dados e melhor suporte para interpretação dos resultados.

A validação foi organizada em três grupos principais. Inicialmente, são discutidos os casos de fundações superficiais, com destaque para situações compatíveis com a aptidão indicada pela carta e para casos localizados em zonas de transição. Em seguida, são analisados os registros de fundações em estacas escavadas, buscando verificar sua compatibilidade com as cartas de aptidão e com os limites executivos observados. Por fim, são avaliados os casos de estacas hélice contínua monitorada, com ênfase nas regiões da Orla de Palmas e condomínios Alphaville I e II, associadas aos depósitos aluvionares, e em setores da região central próximos ao Parque Cesamar, associado à Formação Pimenteiras, onde essa tipologia se mostrou recorrente em empreendimentos de maior porte.

4.2.6.1. Casos de fundação superficial

A validação das cartas de aptidão para fundações superficiais foi realizada a partir da comparação entre a classificação espacial obtida no modelo e casos reais de obras executadas com fundações rasas na área de estudo. A análise buscou verificar se as regiões indicadas como aptas à fundação superficial apresentam coerência com as soluções efetivamente adotadas em projetos e obras conhecidas, considerando o caráter regional e orientativo das cartas elaboradas.

A Figura 4.44 apresenta casos reais compatíveis com a aptidão indicada pela carta de fundações superficiais. No primeiro caso, observa-se uma obra residencial executada com sapatas apoiadas a 1,73 m de profundidade, localizada em área classificada como apta à fundação superficial. Ainda na mesma figura, são apresentados empreendimentos de maior porte na região do Parque Cesamar, nos quais foram adotadas soluções do tipo sapata e radier, mesmo em obras com subsolo, escavações profundas e contenções periféricas. No caso dos empreendimentos com subsolo, embora as fundações tenham sido executadas em cotas inferiores às profundidades diretamente avaliadas nas cartas de 1 m e 2 m, a tipologia adotada permanece coerente com a indicação regional de aptidão à fundação superficial.

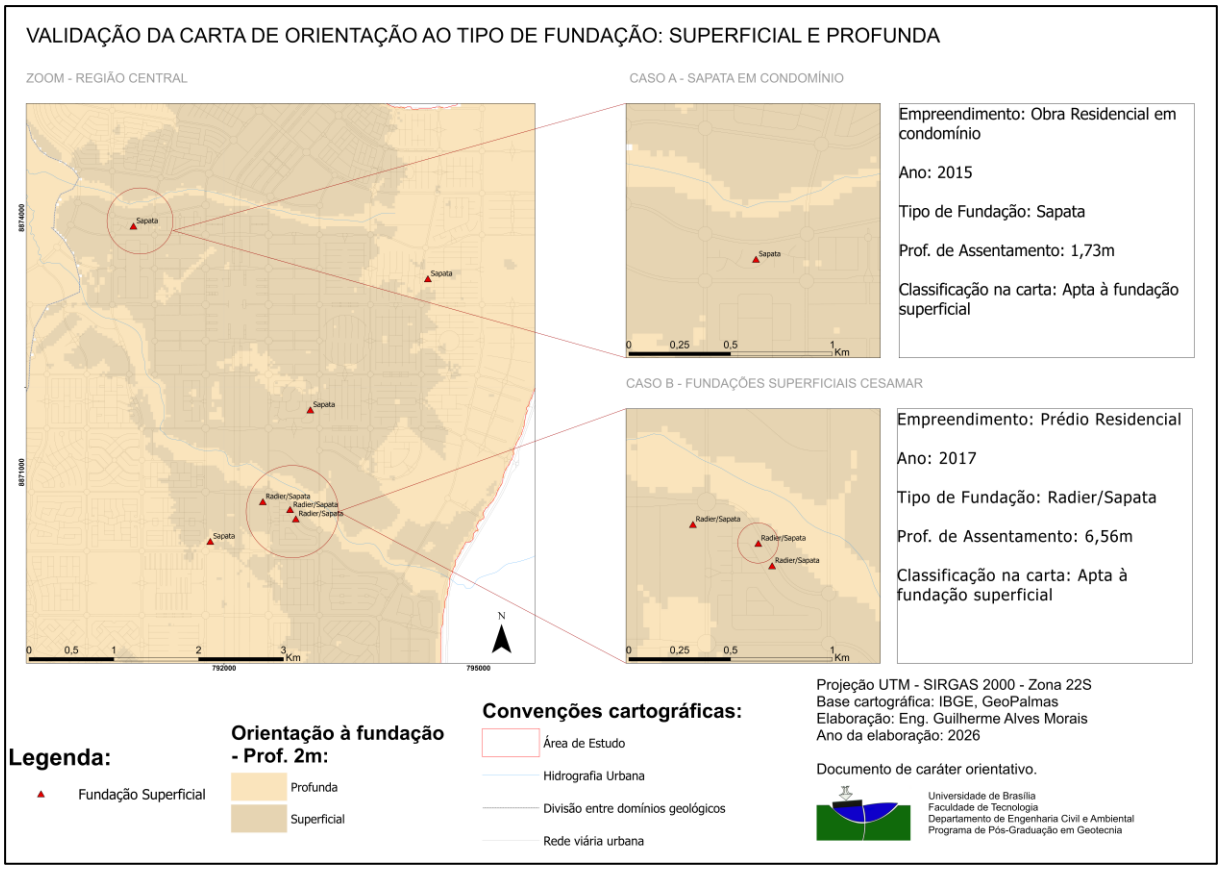


Figura 4.44 - Casos reais compatíveis com a aptidão à fundação superficial indicada pela carta.

Além dos casos diretamente compatíveis, também foram observadas ocorrências pontuais de fundações superficiais executadas em zonas de transição entre áreas classificadas como aptas à fundação rasa e regiões direcionadas para fundações profundas. A Figura 4.45 apresenta casos representativos desse comportamento.

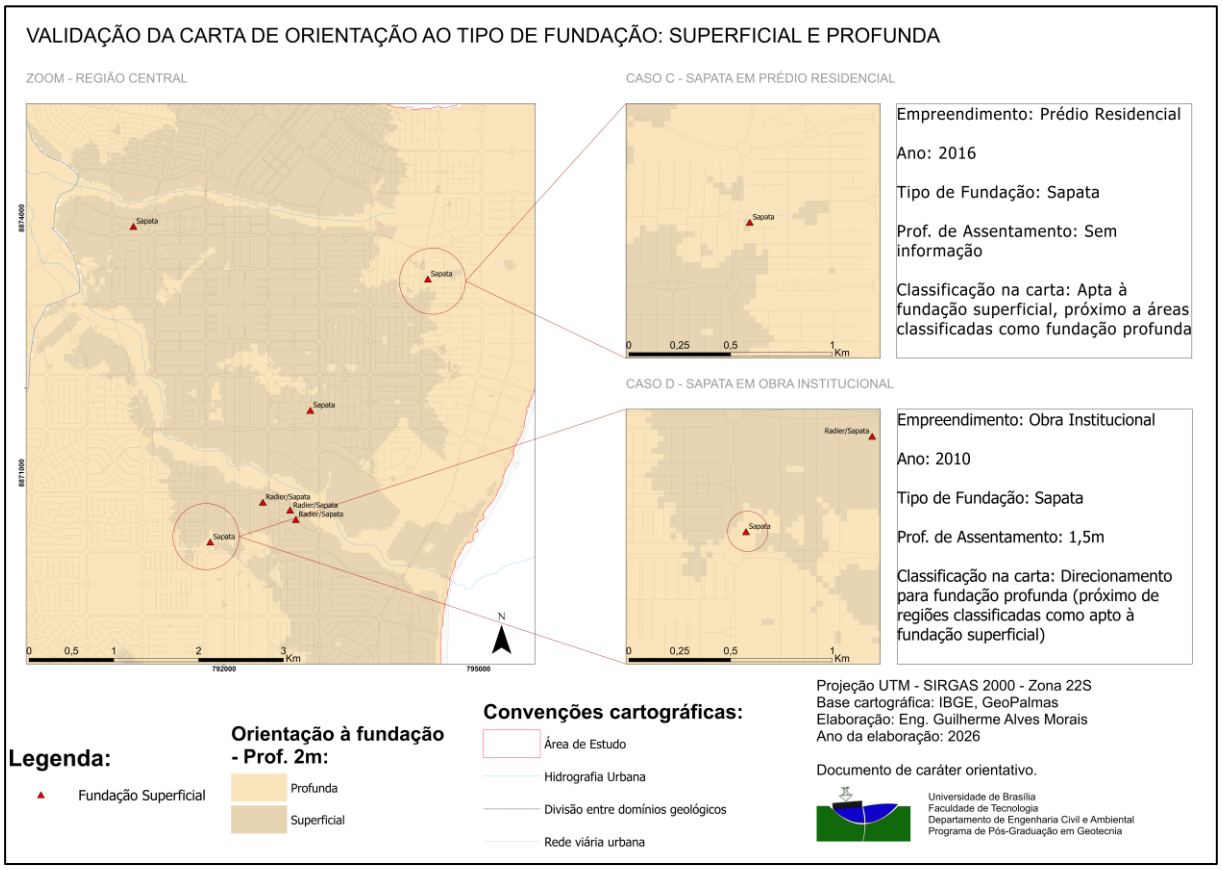


Figura 4.45 - Fundações superficiais executadas em zona de transição entre aptidão à fundação superficial e direcionamento para fundação profunda.

Um exemplo corresponde ao empreendimento do Caso C, executado com fundações em sapata em área situada próxima ao limite entre classes de aptidão. Embora não haja informação disponível sobre a profundidade de assentamento das fundações, o caso evidencia comportamento compatível com o caráter transicional observado nas cartas produzidas.

Comportamento semelhante foi identificado em uma obra institucional (Caso D) executada com sapatas apoiadas a aproximadamente 1,5 m de profundidade. Nesse caso, o ponto encontra-se inserido pontualmente em célula classificada com direcionamento para fundações profundas, porém em proximidade imediata com áreas classificadas como aptas à fundação superficial. Tal resultado evidencia que os limites entre as classes de aptidão não devem ser interpretados como fronteiras rígidas, mas como faixas de transição associadas à variabilidade natural do subsolo, à resolução espacial da modelagem e ao caráter regional das cartas produzidas.

Sendo assim, observa-se que os exemplos diretamente compatíveis reforçam a representatividade regional da modelagem, enquanto os casos em zonas de transição evidenciam o caráter orientativo das cartas. Dessa forma, os resultados devem ser compreendidos como instrumentos de apoio ao planejamento geotécnico, não substituindo investigações locais e análises específicas em nível de projeto executivo.

4.2.6.2. Casos de fundação em estaca escavada

A validação das cartas relacionadas às estacas escavadas foi realizada a partir da comparação entre as profundidades executadas em obras conhecidas e a carta de comprimento máximo estimado para essa tipologia. Para essa análise, foram considerados pontos com informações disponíveis de profundidade, os quais foram sobrepostos à carta de comprimento máximo executável de estacas escavadas, conforme apresentado na Figura 4.46.

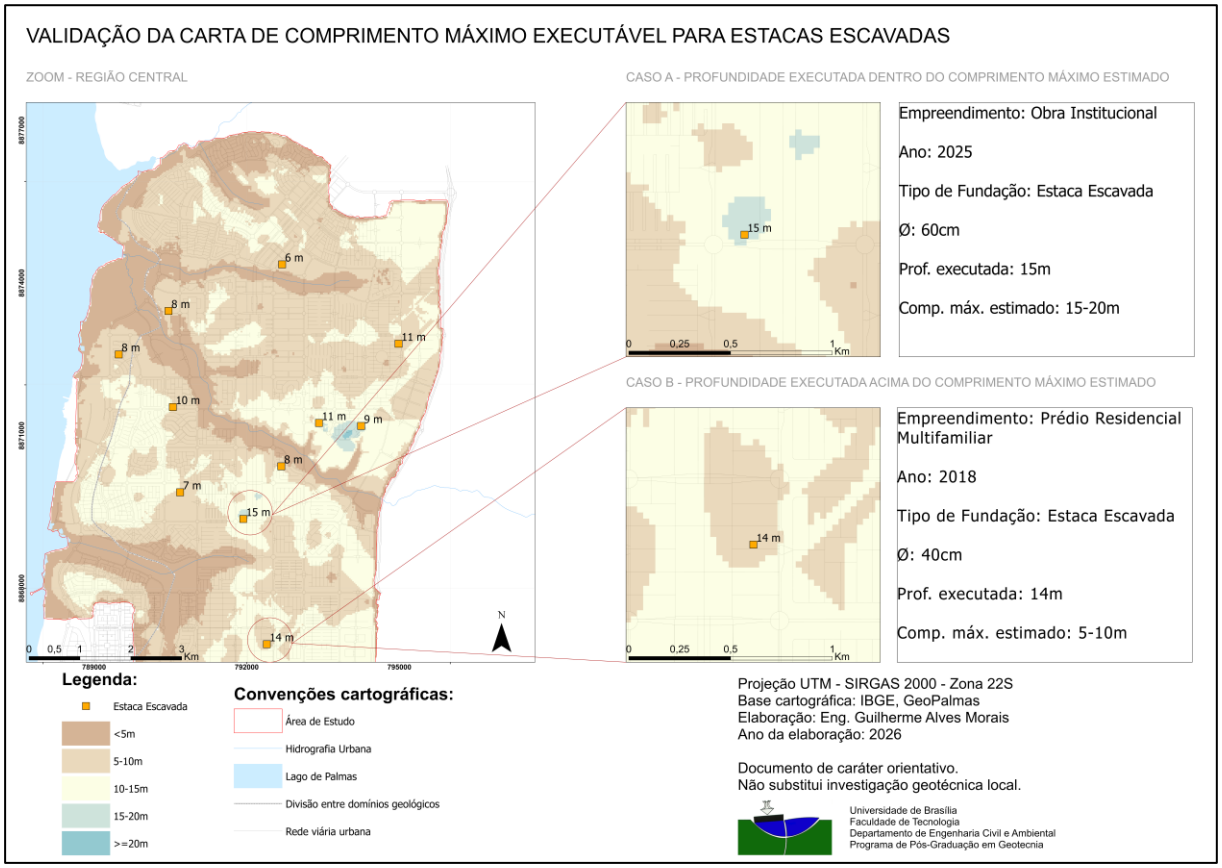


Figura 4.46 - Profundidades executadas em estacas escavadas sobrepostas à carta de comprimento máximo estimado para a tipologia.

De modo geral, as profundidades observadas nas obras analisadas variaram entre aproximadamente 6 m e 15 m, não tendo sido identificados, no conjunto avaliado, casos de estacas escavadas com profundidades superiores a esse intervalo. Esse comportamento é compatível com as limitações executivas associadas ao método, especialmente em relação à

presença de nível de água e à capacidade operacional dos equipamentos de perfuração, incluindo limitações de torque em solos mais resistentes.

Observa-se que os pontos analisados apresentam boa compatibilidade com as faixas de comprimento máximo indicadas pela carta. A maior parte das estacas escavadas foi executada em regiões classificadas com comprimento máximo igual ou superior à profundidade efetivamente adotada, indicando coerência entre os registros executivos disponíveis e os resultados obtidos pela modelagem. Destaca-se, nesse contexto, o ponto com estaca de 15 m (Caso A), localizado em área restrita classificada com maior potencial de comprimento executável, evidenciando concordância direta entre a profundidade observada e a tendência espacial indicada pela carta.

Na região próxima ao Parque Cesamar e às quadras 306/308 Sul, a carta indica possibilidade de execução de estacas escavadas com maiores profundidades. Entretanto, entre os casos reais observados nessa área, a maior profundidade identificada foi da ordem de 11 m. Esse resultado não representa contradição com a carta, uma vez que o comprimento máximo estimado corresponde a uma condição potencial de execução, e não à profundidade necessariamente demandada pelas edificações. Assim, a adoção de estacas mais curtas pode estar associada às solicitações estruturais, ao porte das edificações e às estratégias de projeto adotadas.

Foram observados poucos casos pontuais em que a profundidade executada ultrapassou a faixa estimada pela carta. Destaca-se o Caso B, relativo à estaca escavada de 14 m, localizada em área classificada predominantemente na faixa de 5 m a 10 m, porém situada próxima a regiões com maior potencial de comprimento executável. Em análise complementar das classes de aptidão, verificou-se que o ponto se encontra no limite entre a condição favorável com restrição e a condição desfavorável na camada de 10 m a 11 m, passando a ser classificado como inapto na camada de 15 m a 16 m. Assim, embora a profundidade executada tenha ultrapassado o comprimento máximo estimado, o caso indica uma condição de dificuldade executiva entre 10 m e 15 m, e não necessariamente de impedimento absoluto, o que atenua a aparente inconsistência entre a carta e a profundidade executada e reforça a influência de pequenas variações locais das condições geotécnicas e da resolução espacial da modelagem. Também foi observado um ponto com estaca de 11 m inserido em região indicada na faixa de 5 m a 10 m. Tais ocorrências devem ser interpretadas com cautela, considerando o caráter

regional e orientativo da carta, a variabilidade natural do subsolo e a capacidade dos equipamentos empregados.

De forma geral, os resultados indicam boa coerência entre as profundidades reais observadas e a carta de comprimento máximo executável para estacas escavadas. A ausência de registros com grandes profundidades, a concentração das obras em faixas compatíveis com a estimativa cartográfica e a influência evidente das regiões com restrição por nível de água reforçam a adequação dos critérios adotados para essa tipologia. Assim, a carta mostra-se compatível com a prática executiva observada, devendo ser interpretada como instrumento de orientação preliminar para avaliação da viabilidade de estacas escavadas em escala regional.

4.2.6.3. Casos de fundação em estaca hélice contínua

A validação das cartas relacionadas às estacas hélice contínua foi realizada por meio da comparação entre as profundidades executadas em obras conhecidas e a carta de comprimento máximo estimado para essa tipologia. Foram avaliados casos distribuídos em diferentes regiões da área de estudo, com destaque para a Orla da Graciosa, os condomínios Alphaville I e II e a região próxima ao Parque Cesamar, onde se concentram grande parte dos registros disponíveis.

A Figura 4.47 apresenta a distribuição regional das profundidades executadas em estacas hélice contínua sobrepostas à carta de comprimento máximo estimado. Observa-se forte coerência entre as profundidades adotadas nas obras analisadas e as classes de comprimento máximo indicadas pela modelagem. De maneira geral, as maiores profundidades executadas concentram-se em regiões classificadas com maior potencial executivo, enquanto as regiões com menores profundidades observadas coincidem predominantemente com faixas intermediárias da carta.

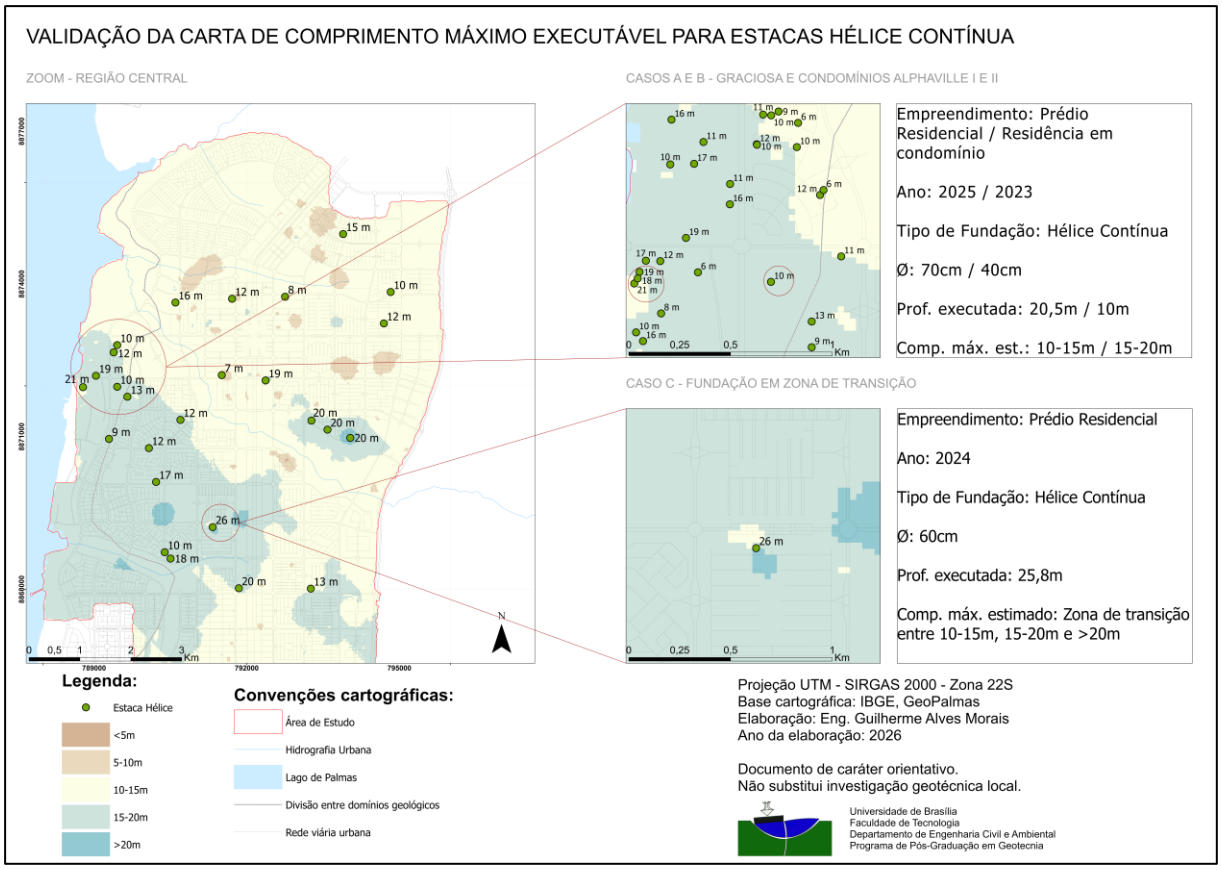


Figura 4.47 - Profundidades executadas em estacas hélice contínua sobrepostas à carta de comprimento máximo estimado para a tipologia.

Na região da Orla da Graciosa predominam estacas com profundidades elevadas, frequentemente superiores a 15 m e atingindo valores próximos de 20 m, compatíveis com as classes de maior potencial executivo indicadas pela carta. Em contraste, nos condomínios Alphaville I e II predominam profundidades entre aproximadamente 8 m e 12 m, associadas a regiões classificadas em faixas intermediárias de comprimento executável (casos A e B).

Também se destacam os casos localizados na região próxima ao Parque Cesamar e às quadras 306/308 Sul, onde foram observadas estacas hélice contínua com profundidades próximas de 20 m. Esses resultados evidenciam forte coerência entre os casos reais e a modelagem elaborada, além de indicar tendência de adoção de comprimentos superiores aos observados para estacas escavadas na mesma região, compatível com a maior capacidade executiva da tipologia hélice contínua.

Foram observadas algumas ocorrências pontuais em que a profundidade executada ultrapassou a faixa predominante indicada pela carta. Destaca-se o caso A, na região da Graciosa, correspondente à estaca hélice contínua de 20,5 m executada em área classificada predominantemente na faixa de 10 m a 15 m, porém situada próxima a regiões classificadas

entre 15 m e 20 m. Em análise complementar das classes de aptidão, verificou-se que, na camada de 20 m, o ponto se encontra em condição limítrofe entre as classes favorável com restrição e desfavorável. Dessa forma, embora o comprimento executado tenha superado a faixa predominante estimada pela carta, sua posição em zona de transição indica que a execução de profundidades da ordem de 20 m é compatível com uma condição de dificuldade executiva elevada, e não necessariamente com impedimento absoluto. Esse comportamento reforça o caráter orientativo da carta e evidencia que equipamentos com maior capacidade operacional e torque podem viabilizar profundidades superiores às estimadas para determinada faixa.

Também foram identificados casos de estacas com aproximadamente 16 m em regiões classificadas entre 10 m e 15 m, bem como estacas de aproximadamente 12 m em áreas classificadas predominantemente entre 5 m e 10 m. Tais ocorrências reforçam que os limites entre classes devem ser interpretados como zonas de transição, influenciadas pela variabilidade natural do subsolo e pela resolução espacial da modelagem.

Destaca-se ainda um caso de estaca com aproximadamente 26 m executada em região de transição entre áreas classificadas nas faixas de 10 m a 15 m, 15 m a 20 m e superiores a 20 m. Esse caso evidencia a heterogeneidade geotécnica local e demonstra que pequenas variações espaciais das condições do subsolo podem influenciar significativamente as soluções adotadas em projeto, reforçando a necessidade de investigações geotécnicas específicas em nível executivo.

Os resultados indicam forte compatibilidade entre as profundidades executadas em estacas hélice contínua e os padrões espaciais indicados pela carta de comprimento máximo estimado. Mesmo nos casos em que a profundidade executada excede ligeiramente a classe predominante da carta, observa-se proximidade imediata com classes adjacentes de maior comprimento executável. A coerência observada entre os casos reais e a modelagem elaborada reforça a aplicabilidade das cartas como instrumento de apoio ao planejamento geotécnico preliminar e à avaliação regional da viabilidade executiva dessa tipologia de fundação.

Sendo assim, o capítulo seguinte apresenta as principais conclusões do estudo, bem como suas limitações e recomendações para trabalhos futuros.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados obtidos demonstraram que a integração entre dados de sondagens SPT, técnicas geoestatísticas e ferramentas SIG permitiu a elaboração de cartas geotécnicas coerentes com o contexto geológico e geotécnico da área urbana de Palmas. A metodologia adotada possibilitou representar espacialmente variáveis relevantes ao planejamento preliminar de fundações, evidenciando o potencial do uso de bancos de dados geotécnicos em análises urbanas regionais.

As análises estatísticas, geoestatísticas e de validação cruzada mostraram que diferentes variáveis exigem abordagens metodológicas específicas. Ressalta-se que os modelos foram ajustados assumindo isotropia; contudo, os fenômenos analisados podem apresentar comportamento anisotrópico. Portanto, essa limitação deve ser considerada na interpretação dos resultados, especialmente em análises locais.

Para a profundidade do impenetrável, apesar das diferenças estatísticas observadas entre os domínios geológicos, a segmentação espacial não resultou em melhoria significativa dos indicadores geoestatísticos, indicando comportamento regional relativamente contínuo da variável. Dessa forma, optou-se pela modelagem global da área de estudo.

No caso do lençol freático, a modelagem baseada na cota do nível de água apresentou maior coerência física e melhor estrutura geoestatística quando comparada à interpolação direta da profundidade. As análises também indicaram que a separação dos dados do nível de água entre períodos seco e úmido não produziu ganhos significativos na representação espacial regional do fenômeno. A incorporação de pontos de controle associados à hidrografia contribuiu para reduzir inconsistências físicas e melhorar a coerência da superfície piezométrica interpolada.

Para os valores de N_{SPT}, verificou-se forte influência do contexto geológico nas camadas rasas, justificando a separação entre domínios aluvionares e não aluvionares nessas profundidades. Em maiores profundidades, entretanto, observou-se convergência do comportamento geotécnico e redução dos ganhos associados à segmentação espacial, levando à adoção de modelos globais.

As análises relacionadas ao tipo de solo demonstraram que métodos de interpolação contínua aplicados diretamente sobre códigos numéricos texturais produzem distorções espaciais artificiais e padrões incompatíveis com a natureza categórica da variável. Em contrapartida, a abordagem probabilística baseada em variáveis indicadoras e classificação por

probabilidade máxima apresentou maior coerência geológica e permitiu também avaliar a confiabilidade espacial da classificação.

As cartas de aptidão à fundação evidenciaram diferenças importantes entre os métodos executivos avaliados. Para fundações superficiais, os resultados indicaram maior favorabilidade em áreas com N_{SPT} mais elevados nas camadas rasas e níveis freáticos mais profundos. Para estacas escavadas sem fluido estabilizante, o nível de água mostrou-se o principal fator limitante. Já as estacas hélice contínua monitorada apresentaram elevada favorabilidade executiva em grande parte da área de estudo.

As validações realizadas evidenciaram ainda que a condição de impenetrabilidade registrada nas sondagens SPT não deve ser interpretada automaticamente como impedimento absoluto à execução de fundações profundas, mas sim como indicador de dificuldade executiva associado à resistência do terreno e à capacidade operacional dos equipamentos utilizados. Os resultados observados em obras executadas na região confirmaram essa interpretação, especialmente em áreas com presença de pedregulhos ou solos muito resistentes.

As cartas produzidas mostraram elevada aplicabilidade como ferramenta de apoio ao planejamento preliminar de fundações, interpretação regional do comportamento geotécnico e direcionamento de investigações futuras.

Quanto à abrangência espacial dos produtos, a delimitação da área de estudo pelo perímetro de cobertura das curvas de nível disponibilizadas pelo GeoPalmas constitui uma limitação a ser considerada. Embora essa opção tenha assegurado suporte altimétrico homogêneo e evitado a integração de bases com diferentes origens e resoluções espaciais, resultou na exclusão de alguns setores urbanizados e áreas recentes de expansão urbana, incluindo condomínios implantados ao norte do Plano Diretor e novos loteamentos situados na porção sul da área urbana. Dessa forma, os produtos cartográficos elaborados devem ser interpretados exclusivamente dentro do limite espacial adotado neste estudo.

Adicionalmente, as cartas de aptidão executiva e de comprimento máximo estimado foram elaboradas com base em critérios gerais e nas condições executivas representadas pelos dados e casos analisados, sem diferenciação entre modelos ou capacidades operacionais específicas dos equipamentos. Dessa forma, equipamentos com diferentes níveis de torque, potência e capacidade de avanço podem apresentar desempenhos distintos diante das mesmas condições geotécnicas, alcançando profundidades superiores ou inferiores às estimadas. Assim, os comprimentos apresentados não devem ser interpretados como limites absolutos de execução.

Ressalta-se, ainda, que os produtos elaborados possuem caráter orientativo e regional, sendo condicionados pela densidade amostral disponível, pelas limitações inerentes à interpolação geoestatística e pela redução do suporte de dados em maiores profundidades. Não foram incorporadas às cartas características das superestruturas ou cargas de projeto, uma vez que os produtos se destinam à avaliação regional preliminar da aptidão geotécnica e executiva, e não ao dimensionamento de fundações. Assim, as cartas geotécnicas não substituem investigações específicas para projetos executivos.

Por fim, com base nos resultados obtidos, nas limitações identificadas e nas possibilidades de aprimoramento da metodologia proposta, apresentam-se a seguir algumas sugestões para trabalhos futuros, visando ampliar a aplicabilidade das cartas geotécnicas e contribuir para o refinamento das análises desenvolvidas:

- Realizar estudos em escala local em regiões com maior complexidade geotécnica e/ou maior densidade de dados, como Orla da Graciosa, Parque Cesamar e condomínios da região norte de Palmas;
- Ampliar continuamente o Banco de Dados Geotécnico, incorporando novas sondagens SPT, investigações mistas e dados geotécnicos complementares;
- Expandir a área de estudo mediante a incorporação de bases altimétricas compatíveis e atualizadas, de modo a contemplar os setores urbanizados e as áreas de expansão não abrangidos pelas curvas de nível do GeoPalmas;
- Desenvolver cartas de aptidão executiva e de comprimento máximo calibradas para diferentes classes de equipamentos, considerando parâmetros como torque, potência, força de avanço e dados de monitoramento da execução;
- Aplicar a metodologia em outras cidades, permitindo avaliar o comportamento do modelo em diferentes contextos geológicos; e
- Expandir as aplicações das cartas geotécnicas para outras análises, tais como: escavabilidade, planejamento urbano, obras enterradas, drenagem urbana, definição de diretrizes de ocupação territorial, entre outras.

REFERÊNCIAS

ABREU, M. C., CASTRO, T., A. D., OLIVEIRA, N. L., REMPEL, K., SILVA, P. S., SENHORINHO, E. M., PAULA, T. L. F. (2025). Mapa hidrogeológico do estado de Tocantins. (Serviço Geológico do Brasil, Agência Tocantinense de Saneamento, Org.).

AHUALLI, L.A. (2019). Aplicação da cartografia geotécnica como subsídio para planejamento urbano no setor habitacional FERCAL. Dissertação de mestrado em Geotecnia - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 225 p.

AL-HASHEMI, H. M. B., AL-RAMADAN, B. M., AL-SHAYEA, N. (2018). *Utilisation of GIS Concepts for Foundation Design on Problematic Eastern Saudi Arabian Sabkha Soil. Geotechnical and Geological Engineering*, v. 36, n. 4, 13 p. DOI: 10.1007/s10706-018-0477-z.

ALVES, P.C. (2009). Cartografia geotécnica para obras subterrâneas: condições de construções de garagens subterrâneas e metrô no Plano Piloto de Brasília. Dissertação de mestrado em Geotecnia - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 185 p.

AMERATUNGA, J., SIVAKUGAN, N., DAS, B.M. (2016). Correlations of Soil and Rock Properties in Geotechnical Engineering. New Delhi Heidelberg New York Dordrecht London: Springer, 2016. 236 p. DOI: 10.1007/978-81-322-2629-1.

ANDRIOTTI, J. L. S. (2004). Fundamentos de Estatística e Geoestotística. Editora unisinos. São Leopoldo, RS. 166 p.

ARAUJO, W. D. S., FONSECA, F. V. B., JÚNIOR, J. V. D. L., MELO, R. D. O. (2018). Análise e dimensionamento de fundações profundas, visando a viabilidade econômica e segurança estrutural. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento, v. 08, n. 12, 24p. Disponível em: https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/dimensionamento-de-fundacoes#artigocientifico. Acesso em: 21 jun. 2026.

ABGE. (2023a). Norma ABGE 103/2023: Sondagem à percussão. São Paulo, SP, 78 p.

ABGE. (2023b). Norma ABGE 104/2023: Sondagem rotativa e sondagem mista. São Paulo, SP, 53 p.

ABNT. (1983). NBR 8036: Programação de sondagens de simples reconhecimento dos solos para fundações de edifícios. Rio de Janeiro, RJ, 3 p.

ABNT. (2001). NBR 6484: Solo – Sondagens de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 17 p.

ABNT. (2016a) NBR 6459: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, RJ, 9 p.

ABNT. (2016b) NBR 7180: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, 7 p.

ABNT. (2019). NBR 6122: Projeto e execução de fundações. Rio de Janeiro, RJ, 120 p.

ABNT. (2020). NBR 6484: Solo – Sondagem de simples reconhecimento com SPT – Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 32 p.

ABNT. (2022). NBR 6502: Solos e rochas – Terminologia. Rio de Janeiro, RJ, 44 p.

ABNT. (2025). NBR 7181: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, 18 p.

ASTM. (2017). D 2487: *Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. West Conshohocken, PA, 3 p.

AWAN, T. A., ARSHID, M. U., RIAZ, M. S., HOUDA, M., ABDALLAH, M., SHAHKAR, M., AGHDAM, M. M., AZAB, M. (2022). *Sub-Surface Geotechnical Data Visualization of Inaccessible Sites Using GIS. ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 11, n. 7, 15p. DOI: 10.3390/ijgi11070368.

BERBERIAN, D. (2015). Engenharia de Fundações: Passo a passo. 2. ed. Infrasolo/Fundex, UnB, Brasília, DF, 1153 p.

BOUMPOULIS, V., DEPOUNTIS, N., PELEKIS, P., SABATAKAKIS, N. (2021). *SPT and CPT application for liquefaction evaluation in Greece. Arabian Journal of Geosciences,* v. 14, n. 16, 15 p. DOI: 10.1007/s12517-021-08103-1.

BOZIO, A.F. (2022). Modelagem conceitual aplicada ao mapeamento geotécnico de aptidão às fundações. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 166 p.

CARVALHO, T. R. R. D. (2014). Suscetibilidade a Processos Geodinâmicos e Aptidão à Urbanização na Bacia do rio Maracujá, Ouro Preto, MG. Mestrado em Geotecnia - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro preto, MG, 142 p.

CASTRO, B.C.D. (2018). Uso de resistividade elétrica em investigação geotécnica: o caso de Palmas-TO. 2018. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 298 p.

CELIK, F., MUHAMMED, Z. Ö., MEHMET F. Ş., ARIÖZ, Ö., ERBIL, M. (2021). *Mapping investigation based on engineering geology of a developing urban area (Niğde, Turkey).* [S. l.], 2021. 17 p. DOI: 10.1007/s12517-021-07699-8/Published. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s12517-021-07699-8.

CINTRA, J.C.A., AOKI, N. (2010). Fundações por estacas: projeto geotécnico. Oficina de textos, São Paulo, SP, 1ª edição, 96 p.

CRUZ, A. C., NAVARRO, R. G. O., AGUIRRE, J. J. C., MAGNO, R. N. T., DERECHO, J. J. M. (2023). *Geostatistical Modeling of SPT data to determine the minimum number and depth of future borehole investigations. International Journal of GEOMATE*, v. 25, n. 107, 8 p. DOI: 10.21660/2023.107.3769.

DA SILVA, A.M., SCHULZ, H.E. (2007). Verificação de viabilidade de metodologia para avaliação de erosão e transporte de sedimentos em microbacia urbana - Estudo de caso do Ribeirão Água Fria - Palmas Tocantins. Evento do experimento piloto de gerenciamento integrado de bacias urbanas para o plano diretor de São Carlos, São Carlos, SP, DOI: 10.13140/RG.2.1.2399.6648.

DANIYAL, M., SOHAIL, G. M., MUHAMMAD, H., RASHID, A. (2022). *GIS-Based Mapping of Geotechnical and Geophysical Properties of Lahore Soils. Environmental Earth Sciences*, v. 1, 24 p. DOI: 10.21203/rs.3.rs-1963057/v1.

DE ALMEIDA, L.L. (2022). Carta de resistência à penetração: estudo de caso setor Taquari. Dissertação de mestrado - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 88 p.

DE JESUS, J.S. (2020). Evolução do médio rio tocantins durante o quaternário tardio. Dissertação de mestrado - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 108 p.

DÉCOURT, L. (1982). *Prediction of the bearing capacity of piles based exclusively on N values of the SPT*. Em: *European Symposium on Penetration Testing*, 2. Anais, Amsterdam, 15 p.

DÉCOURT, L., QUARESMA, A. R. (1978). Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. Em: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES 1978, Rio de Janeiro, RJ. Anais. Rio de Janeiro: ABMS. 9 p.

EDUCA CIVIL. (2020). Estaca Hélice Contínua - Processo de Execução. Disponível em: https://educacivil.com/estaca-helice-continua-processo-de-execucao/. Acesso em: 20 jun. 2026.

EMBRAPA. (2025). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília, DF, 393 p.

ETEMADIFAR, M., VAZIRI, N. S., AGHAMOLAIE, I., MOGHADDAS, N. H., LASHKARIPOUR, G. R. (2018). *Heterogeneity evaluation of soil engineering properties based on kriging interpolation method. Case study: North east of iran, west of mashhad. Soils and Rocks*, v. 41, n. 2, 9 p. DOI: 10.28927/SR.412193.

FALCONI, F.; CORRÊA, C.N., ORLANDO, C., SCHIMDT, C., ANTUNES, W.R., ALBUQUERQUE, P.J., HACHICH, W., NIYAMA, S. (2019). Fundações: teoria e prática. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 3ª edição, 804 p.

GARCIA, A. F. (2017). Cartografia geotécnica para a cidade de Palmas/TO: determinação das cotas de impenetrável e nível freático por meio de sondagem SPT. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Tocantins, Palmas, TO, 88 p.

HASUI, Y., CARNEIRO, C.D.R., ALMEIDA, F.F.M.D.; BARTORELLI, A. (2012). Geologia do Brasil. São Paulo, SP, primeira edição, 906 p.

HOLTZ, R. D., KOVACS, W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. New Jersey. 733 p.

IBGE. (2025). Cidades. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/to/palmas/panorama. Acesso em: 13 jun. 2025.

INPE. (2001). Introdução à ciência da Geoinformação. São José dos Campos, 345 p. Disponível em: http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43/doc/publicacao.pdf. Acesso em: 8 jan. 2026.

KOKKALA, A.; MARINOS, V. (2022). *An engineering geological database for managing, planning and protecting intelligent cities: The case of Thessaloniki city in Northern Greece. Engineering Geology*, v. 301, 18p. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106617.

LANDIM, P.M.B. (2000). Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas. Rio Claro. Disponível em: http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html. Acesso em: 4 jul. 2025.

LANDIM, P. M. B. (2010). Introdução à análise estatística de dados geológicos multivariados. (IGCE, UNESP DGA, Org.) Texto Didático 15, Rio Claro, SP, 229 p. Disponível em: http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/textodi.html. Acesso em: 7 mar. 2026.

LEPSCH, I. F. (2010). Formação e Conservação dos Solos. Oficina de Textos. 2. ed. São Paulo, SP, 216 p.

LORENZI, V. (2022). Fundações na prática. FSC Treinamentos em Engenharia Civil Ltda, Cascavel, PR, 384 p.

MARCUZZO, F. F. N., GOULARTE, E. R. P. (2013). Caracterização do Ano Hidrológico e Mapeamento Espacial das Chuvas nos Períodos Úmido e Seco do Estado do Tocantins. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 06, n. 01, 8 p. Disponível em: www.ufpe.br/rbgfe. Acesso em: 7 dez. 2025.

MENEZES, M.S.D.S. (2011). Sondagens de simples reconhecimento com SPT considerações sobre correlações e confiabilidade. Boletim Eletrônico Nº 56 da ABENC.

MOHAMMED A. H., SHAKIR, R. R. (2022). *Geotechnical map of Thi Qar governorate using geographical information systems (GIS). Materials Today: Proceedings*, v. 60, 10 p. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.09.138.

MORAIS, F.; E SOUZA, L.B. (2009). Cavernas em arenito na porção Setentrional da Serra do Lajeado Estado do Tocantins, Brasil. Revista de Biologia e Ciências da Terra, Universidade Estadual da Paraíba, Paraíba, Brasil, v. 9, n. 2: 1–13. Disponível em: http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=50016937001. Acesso em: 13 jun. 2025

NAVES, L.A.V. (2018). Análise comparativa Técnico-econômica entre fundações tipo estaca escavada e hélice contínua monitorada para um projeto de edificação situado na Orla 14 em Palmas - TO. Trabalho de conclusão de curso. Centro Universitário Luterano de Palmas, Palmas, TO, 54 p.

OLIVEIRA, B.R.D. (2018). Cartografia geotécnica de grande escala: estudo de caso setor habitacional Asa Taquari. Dissertação de mestrado em Geotecnia - Universidade de Brasília, Brasília, DF, 160 p.

OLIVEIRA, B.R.D. (2023). Modelagem conceitual e implementação de banco de dados geotécnicos tridimensionais (BDGT). Universidade de Brasília, Brasília, DF, 315 p.

PALMAS. (2026). GeoPalmas: Sistema Municipal de Informações Geográficas. Disponível em: https://geo.palmas.to.gov.br/. Acesso em: 26 fev. 2026.

PINTO, C.D.S. (2006). Curso básico de mecânica dos solos. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 3ª ed., 355 p.

REBELLO, Y. C. P. (2011). Fundações: guia prático de projeto, execução e dimensionamento. Editora Zigurate, São Paulo, SP, 3a ed., 239 p.

REHMAN, A., SONG, J., HAQ, F., AHAMAD, M. I., SAJID, M., ZAHID, Z. (2021). *Geo-physical hazards microzonation and suitable site selection through multicriteria analysis using geographical information system. Applied Geography*, v. 135, 14 p. DOI: 10.1016/j.apgeog.2021.102550.

SACHS, L. L. B., ARAÚJO, E. T. D.; GODOY, M. M. (2020). Mapa Geológico: Região Metropolitana de Palmas - TO. (CPRM, Org.) Goiânia, GO.

SANTOS, J.V.D. (2016). 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. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 200 p

SCHNAID, F., ODEBRECHT, E. (2012). Ensaios de campo e suas aplicações à engenharia. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 2. ed., 254 p.

SEED, H. B.; WHITMAN, R. V. (1967). *Design of earth retaining structures for dynamic loads.* Ithaca. Cornell University. 44 p.

SILVA, C.P.L.D. (2011). Cartografia geotécnica tridimensional do setor noroeste de Brasília. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 265 p.

SOARES, W.C. (2011). Banco de dados geológico-geotécnicos com base em sondagens à percussão e uso de SIG: Análise espacial da profundidade do lençol freático e do Nspt para obras de fundação em João Pessoa - PB. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 215 p.

STALIN, V. K.; MURUGAN, R. B. A. (2015). *Geographic information system for the development of soil suitability map in south Chennai*, India. *Arabian Journal of Geosciences*, v. 8, n. 3, 22 p. DOI: 10.1007/s12517-014-1323-0.

THIESEN, S. (2016). 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. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 207 p.

VAZ, L.F. (1996). Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rocha em regiões tropicais. Solos e Rochas, v. 19: 117–136.

YAMAMOTO, J.K. (2020). Estatística, análise e interpolação de dados geoespaciais. Gráfica Paulos, São Paulo, SP, 308 p.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. (2013). Geoestatística: conceitos e aplicações. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 213 p.

ZUQUETTE, L.V.; GANDOLFI, N. (1992). Algumas reflexões sobre o mapeamento geotécnico. Anuário do Instituto de Geociências, Rio de Janeiro, v. 15: 181–184. Disponível em: https://doi.org/10.11137/1992_0_181-184. Acesso em: 13 mar. 2025.

ZUQUETTE, L. V. (1993). Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio-físico: fundamentos e guia para elaboração. Tese (Livre docência), Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP), São Carlos, SP, 369 p.

ZUQUETTE, L. V., GANDOLFI, N. (2004). Cartografia geotécnica. Oficina de Textos, São Paulo, SP, 192 p.