



UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAPÁ

DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS

COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

RONALDO UMBELINO ROLIM DA SILVA

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTA SIG PARA A INTERPOLAÇÃO DE DADOS
OBTIDOS EM ENSAIOS SPT: ANÁLISE DA PROFUNDIDADE DO LENÇOL
FREÁTICO, DO IMPENETRÁVEL E DOS VALORES DE N_{SPT} DA REGIÃO
CENTRAL DE MACAPÁ – AP.**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MACAPÁ
2019

RONALDO UMBELINO ROLIM DA SILVA

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTA SIG PARA A INTERPOLAÇÃO DE DADOS
OBTIDOS EM ENSAIOS SPT: ANÁLISE DA PROFUNDIDADE DO LENÇOL
FREÁTICO, DO IMPENETRÁVEL E DOS VALORES DE N_{SPT} DA REGIÃO
CENTRAL DE MACAPÁ – AP.**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Universidade Federal do Amapá apresentado para a Coordenação de Engenharia Civil – CEC – como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Engenheiro Civil. Sob a orientação do **Prof. Esp. Luís Henrique Rambo**.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central da Universidade Federal do Amapá
Elaborado por Cristina Fernandes - CRB2/1569

Silva, Ronaldo Umbelino Rolim da.

Aplicação de ferramenta SIG para a interpolação de dados obtidos em ensaios SPT: análise da profundidade do lençol freático, do impenetrável e dos valores de N_{spt} da região central de Macapá – AP / Ronaldo Umbelino Rolim da Silva; Orientador, Luís Henrique Rambo. – Macapá, 2019.

77 f.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Fundação Universidade Federal do Amapá, Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil.

1. Sistema de Informações Geográficas (SIG). 2. Sondagens SPT. 3. Mapeamento Geotécnico. 4. Geoprocessamento. I. Rambo, Luís Henrique, orientador. II. Fundação Universidade Federal do Amapá. III. Título.

910.285 S586a
CDD. 22 ed.


RONALDO UMBELINO ROLIM DA SILVA

**APLICAÇÃO DE FERRAMENTA SIG PARA A INTERPOLAÇÃO DE DADOS
OBTIDOS EM ENSAIOS SPT: ANÁLISE DA PROFUNDIDADE DO LENÇOL
FREÁTICO, DO IMPENETRÁVEL E DOS VALORES DE N_{SPT} DA REGIÃO
CENTRAL DE MACAPÁ – AP.**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Universidade Federal do Amapá apresentado para a Coordenação de Engenharia Civil – CEC – como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Engenheiro Civil, sob a orientação do **Prof. Esp. Luís Henrique Rambo**.

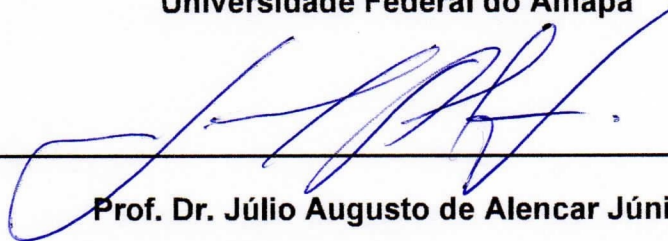
Macapá, 22 de novembro de 2019.

BANCA EXAMINADORA



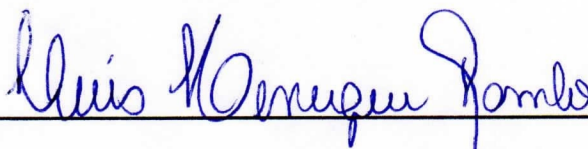
Prof. Msc. Fábio Araújo Pereira

Universidade Federal do Amapá



Prof. Dr. Júlio Augusto de Alencar Júnior

Universidade Federal do Pará



Prof. Esp. Luís Henrique Rambo

Universidade Federal do Amapá

Orientador

Aos meus pais, Marta da Silva Rolim e Rogério Umbelino da Silva, que tomaram para si meu objetivo de encerrar a formação em Engenharia Civil, que me deram a vida e todos os meios de chegar até aqui. Ao meu irmão e melhor amigo, Rogerio Junior. A minha namorada e amiga, Kirlany Maia.

A eles devo toda gratidão e amor.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, sou grato a Deus pela oportunidade de, em breve, alcançar meu mais almejado objetivo. Ele é conhecedor de todos os esforços que empenhei ao longo desses cinco anos de curso e sempre estará comigo, acolhendo-me como seu filho e me dando amparo para superar qualquer obstáculo pelo qual precisei e precisarei passar.

Também devo gratidão aos meus pais, Rogério Silva e Marta Rolim, que não pouparam meios para garantir minha formação basilar e minha graduação superior. Não é apenas minha vitória, mas também deles, que, com certeza, se veem realizados ao presenciarem minha chegada ao final desta jornada. Todos os conselhos, valores e profundo carinho que recebi deles foram extremamente importantes para o caminho que trilhei durante a faculdade e serão levados adiante na minha vida profissional que estou prestes a iniciar.

Ademais, sou grato pelos meus amigos e familiares, que me tomam como exemplo e com os quais divido minha felicidade, que acrescentam na minha formação como cidadão. Ao meu irmão, Rogério Júnior, que sempre foi e sempre será o melhor exemplo de amigo, que muito acrescenta à minha vida e agora está prestes a iniciar o ciclo ao qual chego ao fim. A minha companheira e amiga Kirlany Maia, que amo muito e na qual me espelho todos os dias por, apesar das dificuldades e das fraquezas, nunca desistir dos seus objetivos de concluir sua graduação e proporcionar um conforto melhor pra si e pra sua família.

Ao meu orientador, Mestre Luís Henrique Rambo, que, pacientemente, forneceu orientações e subsídios técnicos para que eu pudesse encerrar esta etapa importante, tornando este desafio ainda mais leve. Tomarei como exemplo de profissional em minha carreira, pois foi capaz de despertar em mim o anseio pelo saber e o amor pela Engenharia, mostrando-se com condutas éticas e respeitáveis, sendo muito mais que meu professor, meu amigo pessoal.

Aos demais professores e coordenadores do colegiado, que se mostraram empenhados em fornecer o melhor de si durante aulas e avaliações, sendo de grande importância para minha formação superior e para que eu pudesse decidir a qual área me dedicar dentro da Engenharia Civil.

À Caixa Econômica Federal, de forma geral, e em especial aos profissionais do setor da Gerência Executiva de Governo - GIGOVMC, onde pude estagiar por quase dois anos, que tiveram peso considerável na etapa importante que é o estágio para o acadêmico. Exemplos de seres humanos, profissionais e amigos que puderam me ensinar a Engenharia na prática e tem grande importância para minha formação profissional, os quais o laço ultrapassa o ambiente da unidade onde desempenhei minhas atividades. A Caixa foi, para mim, ambiente acolhedor e com políticas internas educativas, de extrema importância para todo estagiário.

“Pois qual de vós, pretendendo construir uma torre, não se assenta primeiro para calcular a despesa e verificar se tem os meios para a concluir? Para não suceder que, tendo lançado os alicerces e não a podendo acabar, todos os que a virem zombem dele, dizendo: Este homem começou a construir e não pôde acabar.”

(Lucas 14:28-30)

RESUMO

Com o rápido avanço da construção civil na cidade de Macapá, principalmente no que diz respeito à verticalização da cidade, seria indispensável, como forma de planejamento urbano, o levantamento de informações geotécnicas que possibilitem a criação de mapas que venham subsidiar interpretações mais rápidas dos parâmetros de interesse da construção civil. Neste trabalho, usou-se 36 furos de sondagens SPT (Standard Penetration Test), que se encontravam dentro da área de estudo, no intuito de obter informações do solo que possibilitassem a criação de mapas que permitam visualizar em planta a profundidade do lençol freático, o nível do impenetrável à percussão e os valores de NSPT. Para isso, o Sistema de Informações Geográficas (SIG) se torna indispensável para a criação de mapas, visto que é por meio do SIG que se realiza o tratamento computacional dos dados geográficos. No desenvolvimento dos mapas, um banco de dados foi criado com informações retiradas dos perfis de sondagens, e buscou-se as coordenadas geográficas de cada furo por meio de ferramentas auxiliares. O banco de dados foi lançado no *software ArcMap 10.3* e, através dele, foi aplicada a interpolação por krigagem ordinária dos atributos do solo para a criação das superfícies presentes nos mapas.

Palavras chave: Sistema de Informações Geográficas (SIG). Sondagens SPT. Mapeamento Geotécnico. Macapá-AP.

ABSTRACT

With the rapid advancement of civil construction in the city of Macapá, especially with regard to the verticalization of the city, it would be indispensable, as a form of urban planning, the survey of geotechnical information to enable the creation of maps that will support faster interpretations of the parameters of interest to the building industry. In this work, 36 Standard Penetration Test (SPT) drillholes were used, which were within the study area, in order to obtain soil information that allows the creation of maps that allow the visualization of the groundwater depth in plan, the impenetrable percussion level and the NSPT values. For this, the Geographic Information System (GIS) becomes indispensable for the creation of maps, since it is through GIS that the computational treatment of geographic data is performed. In the development of the maps, a database was created with information taken from the drill profiles, and the geographic coordinates of each hole were sought through auxiliary tools. The database was launched in ArcMap 10.3 software and through it, ordinary kriging interpolation of the soil attributes was applied to create the surfaces present in the maps.

Keywords: Geographic Information System (GIS). Standard Penetration Test (SPT). Geotechnical Mapping. Macapá-AP.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estados de compacidade, consistência e resistência.	25
Tabela 2 - Comparação dos métodos de interpolação.....	45

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do uso do TIN.	37
Quadro 2 - Vantagens e desvantagens do Inverso Ponderado da Distância.	39
Quadro 3 - Vantagens e desvantagens da Krigagem.....	44
Quadro 4 - Principais unidades geológicas encontradas no Amapá	49
Quadro 5 - <i>Inputs</i> lançados no <i>software</i>	55
Quadro 6 - Função de cada <i>input</i> lançado no <i>software</i>	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Equipamentos utilizados no ensaio SPT.....	22
Figura 2 - Exemplo de perfil geotécnico de um furo.....	24
Figura 3 – Relação entre o geoprocessamento e as geotecnologias.....	26
Figura 4 - Banco de dados com diversas informações.....	27
Figura 5 - Exemplo da unificação das feições no SIG.....	28
Figura 6 - Esquematização geral da utilização de um SIG.....	30
Figura 7 - Componentes de um SIG.....	32
Figura 8 - Ilustração do processo de interpolação espacial da precipitação no sul de Portugal.....	34
Figura 9 - Exemplo de TIN.	36
Figura 10 – Exemplo de cálculo do inverso ponderado da distância.....	38
Figura 11 - Geometria do bloco a ser estimado por 5 amostras.....	40
Figura 12 - Semivariograma experimental, modelo teórico e seus parâmetros.	43
Figura 13 - Localização da capital do Amapá.....	47
Figura 14 - Ângulo de incidência dos raios solares de acordo com a latitude.....	48
Figura 15 - Unidades morfoestruturais do estado do Amapá.....	50
Figura 16 - Fluxograma do método do trabalho.	51
Figura 17 - Furos de sondagem locados e área de estudo delimitada.....	53

LISTA DE MAPAS

Mapa 1 - Profundidade do lençol freático.....	58
Mapa 2 - Nível do impenetrável à percussão.....	60
Mapa 3 - NSPT (Profundidade 1 m).....	62
Mapa 4 - NSPT (Profundidade 2 m).....	63
Mapa 5 - NSPT (Profundidade 3 m).....	64
Mapa 6 - NSPT (Profundidade 4 m).....	65
Mapa 7 - NSPT (Profundidade 5 m).....	66
Mapa 8 - NSPT (Profundidade 6 m).....	67
Mapa 9 - NSPT (Profundidade 7 m).....	68
Mapa 10 - NSPT (Profundidade 8 m).....	69

LISTA DE SIGLAS

AP – AMAPÁ.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária.

GIS – Geographical Information System.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

NA – Nível d'água.

MDT – Modelo Digital de Terreno.

NBR – Norma Brasileira.

NSPT – Índice de resistência a penetração.

SHAPEFILE – Formato de arquivo gerado pelo *software ArcMap 10.3*.

SIG – Sistema de Informações Geográficas.

SPT - Standard Penetration Test (Ensaio de Sondagem de Simples Reconhecimento).

UTM – *Universal Transversa de Mercator*.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. OBJETIVOS	16
1.2.1. OBJETIVO GERAL	16
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	17
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1. FUNDAÇÕES	18
2.1.1. ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES	19
2.2. INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS.....	19
2.2.1. SONDAGEM STANDARD PENETRATION TEST.....	20
2.2.1.1. PROCEDIMENTO.....	21
2.2.1.2. CRITÉRIOS DE PARALISAÇÃO DO ENSAIO.....	22
2.2.1.3. RELATÓRIO DEFINITIVO.....	23
2.2.1.4. CLASSIFICAÇÃO DO SOLO QUANTO AO NSPT	24
2.3. GEOPROCESSAMENTO	25
2.3.1. DEFINIÇÃO DE GEOPROCESSAMENTO	25
2.3.2. SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS.....	26
2.3.3. O USO DO SIG	29
2.3.4. COMPONENTES DO SIG.....	30
2.4. ANÁLISE ESPACIAL.....	32
2.4.1. CONCEITOS BÁSICOS	33
2.4.2. INTERPOLAÇÃO ESPACIAL	34
2.4.3. TIPOS DE INTERPOLAÇÃO.....	34
2.4.3.1. TRIANGULAÇÃO COM INTERPOLAÇÃO LINEAR.....	36
2.4.3.2. INVERSO PONDERADO DA DISTÂNCIA.	37
2.4.3.3. KRIGAGEM.....	39
2.4.3.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS.....	45
2.4.4. EXEMPLOS DE TRABALHOS.	45
3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	47
3.1. FATORES CLIMÁTICOS	48
3.2. GEOLOGIA	48
3.3. GEOMORFOLOGIA.....	49
4. MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1. LEVANTAMENTO E AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	52
4.2. CRIAÇÃO DO BANCO DE DADOS	52

4.2.1.	LOCAÇÃO DOS FUROS	52
4.2.2.	ESCOLHA DOS FUROS	54
4.2.3.	ELABORAÇÃO DA PLANILHA	54
4.3.	PROCESSAMENTO DOS DADOS EM SIG	56
5.	APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS	57
5.1.	PROFUNDIDADE DO LENÇOL FREÁTICO	57
5.2.	NÍVEL DO IMPENETRÁVEL	59
5.3.	VALORES DE NSPT.	61
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
6.1.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
6.2.	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	73
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74

1. INTRODUÇÃO

Em toda obra civil que se deseja obter conforto, segurança e prolongar a vida útil da estrutura, faz-se necessário conhecer as características geotécnicas do solo sobre o qual o empreendimento será construído. Uma das formas de investigação do solo mais comum no Brasil é a sondagem SPT (Standard Penetration Test), é através dessa investigação do subsolo que será possível definir a solução de fundação mais adequada para o empreendimento, levando em consideração, principalmente, questões de segurança e economia.

Este trabalho consiste na criação de mapas geotécnicos objetivando a caracterização geotécnica da parte central da cidade de Macapá, através da elaboração de um banco de dados com informações geotécnicas retiradas de perfis de sondagens realizadas por uma empresa privada que forneceu o conteúdo. A criação dos mapas geotécnicos deste tipo tem como função principal fornecer informações que venham permitir o engenheiro antecipar problemas que possam acarretar acidentes geotécnicos.

Ademais, é indispensável conhecer as características do solo para o controle do uso e ocupação do solo, assim como a boa prática da engenharia através do emprego de soluções técnicas seguras e viáveis.

Dessa forma, após fazer união de todas as informações de solo coletadas nos perfis de sondagem, foi necessário utilizar um *software* com ambiente em Sistema de Informações Geográficas (SIG) para criar superfícies a partir da interpolação destas informações e apresentá-las em forma de mapas.

Como não existe uma quantidade satisfatória de sondagens distribuídas por toda a cidade, se concentrando apenas na parte central da cidade, foi definida uma área com a maior quantidade de sondagens possível. Isto foi feito para que o *software* possa chegar o mais próximo da realidade, com menor erro.

1.1. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVO GERAL

Este estudo tem como objetivo geral elaborar mapas, da parte central de Macapá, a partir da interpolação de dados geotécnicos conhecidos, retirados de perfis de sondagens, para estimar valores em locais ainda não conhecidos, por meio de um

banco de dados criado e lançado em um ambiente SIG, com o intuito de auxiliar no planejamento urbano e obras de fundações.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Localizar os pontos de sondagens por meio de suas coordenadas geográficas;
- Selecionar a área onde exista o maior número de sondagens;
- Criar um banco de dados dos atributos característicos do solo obtidos nos perfis de sondagens;
- Aplicar a técnica da Krigagem Ordinária para estimar valores dos atributos em locais ainda não conhecidos, a partir da interpolação do banco de dados;
- Gerar mapa da profundidade do nível d'água;
- Gerar mapa do nível do impenetrável à percussão; e
- Gerar mapa do NSPT característico da região.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. FUNDAÇÕES

Fundações são elementos estruturais que devem suportar carregamentos advindos dos esforços oriundos do peso próprio dos elementos estruturais e, claro, dos carregamentos provenientes das sobrecargas presentes nos elementos estruturais. Além de suportar os carregamentos, a fundação deve distribuir os esforços estruturais para o solo, proporcionando estabilidade para a estrutura. (SALGADO, 2014)

Na Engenharia Civil é possível dividir as fundações em dois tipos comumente utilizados e que sua escolha depende, em grande parte das vezes, da capacidade suporte do solo. Os dois grupos de fundações são:

- Fundações Superficiais (diretas ou rasas): são mais utilizadas quando os esforços provenientes da estrutura não são consideráveis, como em residências de apenas um pavimento, e quando o nível d'água não se encontra tão próximo da superfície, porém, os fatores citados não são os únicos determinantes para a escolha da fundação. Quando a capacidade suporte do solo for suficiente para absorver o carregamento de estruturas maiores que apenas uma residência, não existe nada que impeça o uso de fundação superficial para esse caso.

Alguns exemplos de fundações superficiais são: bloco, sapata corrida, sapata associada, Radier.

- Fundações Profundas: quando as camadas mais próximas da superfície não são suficientes para suportar os carregamentos da estrutura ou quando o nível do lençol freático se encontra aflorado, uma alternativa é utilizar fundações profundas. A norma 6122 define como fundação profunda aquela onde a base está acomodada a uma profundidade maior que duas vezes sua menor dimensão e que seja de pelo menos 3 metros de profundidade. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2010)

Como exemplo de fundações profundas, é possível citar: estaca escavada, estaca cravada, tubulão.

2.1.1. ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES

A Engenharia de Fundações é uma área da engenharia civil que visa o estudo da geotecnia para o conhecimento das diversas características que o solo pode apresentar e do cálculo estrutural, para o dimensionamento da infraestrutura de determinada obra.

Engenharia de Fundações é a aplicação e a prática dos princípios básicos da mecânica dos solos e da mecânica das rochas no projeto de fundações de diversas estruturas. [...]. Também envolvem a análise e o projeto de estruturas de contenção de terra, como muros de arrimo, cortinas de estaca-prancha e escavações escoradas. (DAS, 2007, p. 1)

Outro ponto importante na engenharia de fundações é a experiência adquirida com o decorrer das obras executadas pelo engenheiro, tendo em vista as peculiaridades que cada tipo de solo possui e o comportamento que o tipo de fundação escolhido terá em conjunto com o solo onde está assentada. (VELLOSO, 2010)

Portanto, Hachich et al. (1998, p. 51) defende que “todo desenvolvimento de técnicas de projeto e de execução das fundações depende do entendimento dos mecanismos de comportamento dos solos”.

2.2. INVESTIGAÇÕES GEOTÉCNICAS

Como etapa prévia para o dimensionamento das fundações, é preciso conhecer adequadamente o solo na qual essa fundação será assentada para entender como ele irá se comportar e se deformar ao receber as tensões advindas dos carregamentos da estrutura. Para isso, faz-se necessário realizar ensaios *in loco* que venham identificar e classificar as camadas componentes dos substratos a serem analisados, bem como obter parâmetros para conhecer suas propriedades de engenharia.

Na escolha perfeita do tipo de fundação é indispensável não só ter conhecimento das cargas que irão atuar sobre solo, mas também é preciso conhecer as características do solo que irá suportar os esforços.

Dessa forma, para conhecer o solo são realizadas investigações geotécnicas, através de sondagens, que tem o objetivo de realizar uma prospecção das camadas profundas do solo e conhecer o tipo de solo, suas propriedades e a presença do lençol freático.

Logo, é por meio da sondagem que ocorre a retirada de amostras deformadas do solo, que imediatamente são identificadas por metro de profundidade e analisadas em laboratório por um técnico capacitado que fará o relatório final das amostras.

Em seu livro, Hachich ed al. (1998, p. 51) conta um pouco da história do início da investigação geotécnica

O conhecimento do comportamento deste material, disposto pela natureza em depósitos heterogêneos e apresentando comportamento demasiadamente complicado para tratamentos teóricos rigorosos, se deveu em grande parte, aos trabalhos de Karl Terzaghi [...]. Seus trabalhos, identificando o papel das pressões da água nas tensões nos solos, e apresentando uma solução matemática para a evolução dos recalques das argilas com o tempo após o carregamento, são reconhecidos como o marco inicial de uma nova ciência de engenharia, que recebeu o nome de Mecânica dos Solos.

2.2.1. SONDAGEM STANDARD PENETRATION TEST

O Standard Penetration Test (SPT) é, reconhecidamente, a forma de investigação geotécnica mais popular e econômica praticada em todo o mundo. Para Schnaid (2012, p. 24), as principais vantagens desse ensaio que o fazem o mais utilizado é a “simplicidade do equipamento, baixo custo e obtenção de um valor numérico de ensaio que pode ser relacionado por meio de propostas não sofisticadas, mas diretas, com regras empíricas de projeto.”

Além disso, os métodos de dimensionamentos de fundações superficiais e profundas mais utilizados, especialmente no Brasil, utilizam os resultados do índice de resistência a penetração (NSPT) que é obtido na sondagem SPT e servem como parâmetro de dimensionamento.

Porém, esta forma de investigação recebe fortes críticas por causa da diversidade de procedimentos utilizados e por muitas empresas não respeitarem a padronização dos equipamentos assim como a execução da sondagem. No entanto, essa sondagem predomina na prática da engenharia de fundações.

Hachich (1998) conta que no final da década de oitenta foi apresentado em um evento organizado pela International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering, um documento com o título International Reference Test Procedure, que tratava dos procedimentos recomendados para a execução de sondagens SPT, as iniciais em inglês de Standard Penetration Test. Já no Brasil, atualmente o ensaio é regido pela

Associação Brasileira de Normas Técnicas por meio da Norma Brasileira 6484, que vigora desde 2001.

2.2.1.1. PROCEDIMENTO

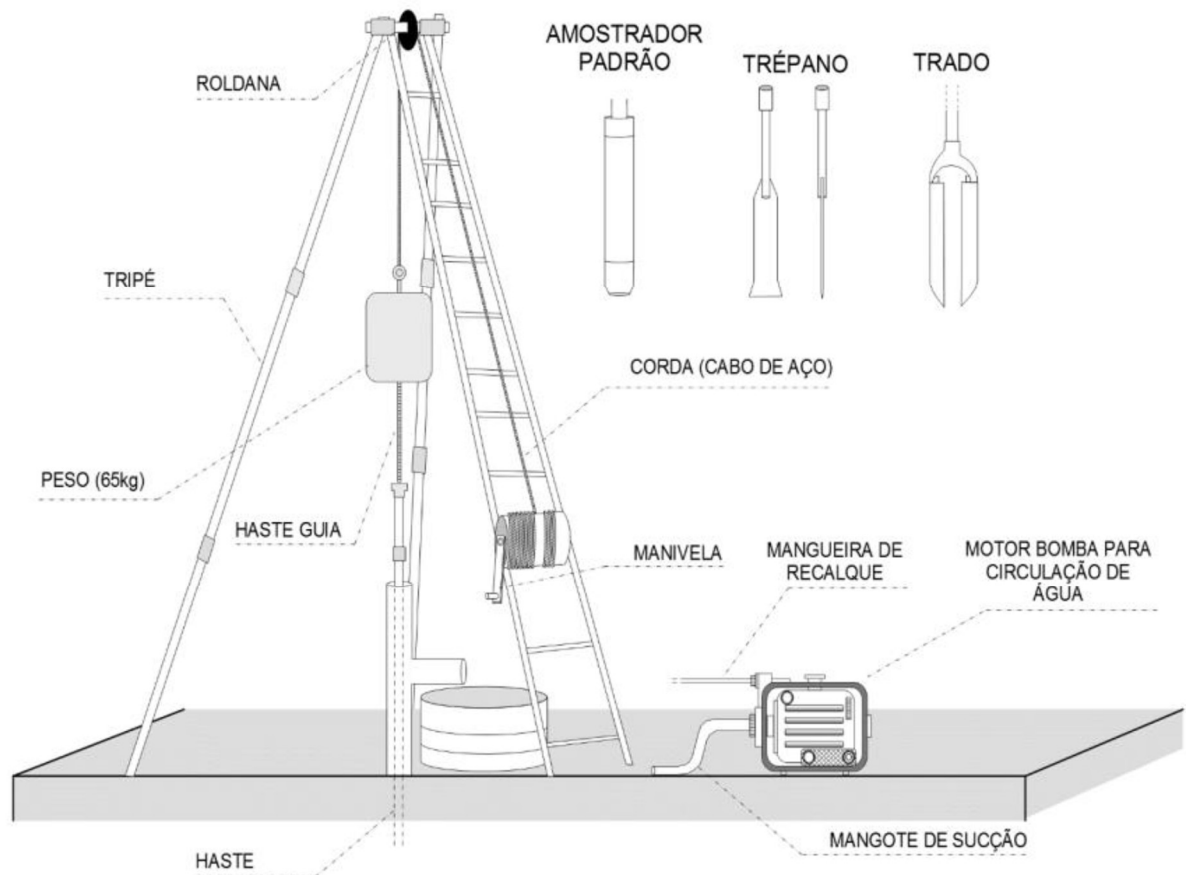
A norma 6484/2001 recomenda que a locação dos furos de sondagem deve ser feita com a cravação de um piquete de madeira com a identificação do furo e fixado de forma que não solte facilmente.

O processo começa com a montagem do tripé e a coleta de uma amostra de solo disponível no nível natural do terreno. Com a utilização do trado manual, a primeira camada de 1 metro deve ser escavada com o intuito de eliminar a camada menos resistente e alinhar o primeiro seguimento do tubo amostrador. Após apoiar o amostrador padrão do tipo Terzaghi-Peck na base do furo e alinhar a haste de perfuração, marca-se com giz na haste três linhas espaçadas por 15cm. Logo, inicia-se o processo de cravação através do impactado do martelo de 65kg que é erguido até uma altura de 75cm e cai em queda livre na haste, cada impactado do martelo representa 1 NSPT que é contabilizado por um operário, o processo é repetido até que 45cm do amostrador seja penetrado no solo.

Durante o ensaio é registrado a quantidade de golpes (impacto do martelo na haste) necessário para cravar cada um dos três trechos de 15cm. Dessa forma, o índice de resistência à penetração (NSPT) naquela camada de 1 metro é representado pela soma dos golpes que foram necessários para cravar os últimos 30cm. A cada metro de profundidade deve ser coletado a amostra de solo que ficou retida no amostrado, sendo armazenada em recipientes herméticos.

Para iniciar o ensaio da próxima camada, é utilizado novamente o trado manual para a escavação dos próximos 55 cm, sendo o amostrador apoiado no fundo do furo para que o processo se repita novamente até a coleta das amostras.

Figura 1 – Equipamentos utilizados no ensaio SPT.



Fonte: Thiesen (2016) apud Higashi (2016).

A partir das amostras coletadas, serão desenvolvidos os perfis geotécnicos que possuem a função de apresentar a classificação do solo e os resultados do NSPT para cada camada, a apresentação do perfil se dá por furo de sondagem.

2.2.1.2. CRITÉRIOS DE PARALISAÇÃO DO ENSAIO

O ensaio se prolonga por lavagem, associado aos ensaios penetrométricos, até que os critérios de paralisação previstos na NBR 6484/2001 sejam observados. Os critérios são:

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

A camada onde os critérios acima citados se fizeram presente será considerada impenetrável e será encerrada a sondagem.

2.2.1.3. RELATÓRIO DEFINITIVO

Segundo a norma 6484, o relatório de sondagem é o documento que tem a função de apresentar os resultados das sondagens de simples reconhecimento em relatórios numerados, datados e assinados por responsável técnico pelo trabalho, perante o Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia - CREA. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2001)

Dessa forma, deve constar no relatório:

- Nome da empresa responsável pela sondagem e o nome do contratante;
- Local e tipo da obra;
- Descrição do método e dos equipamentos utilizados na sondagem;
- Total perfurado em metros;
- Declaração do cumprimento das normas.
- Croqui da planta onde foi realizado os furos, cotada e com indicações do logradouro;

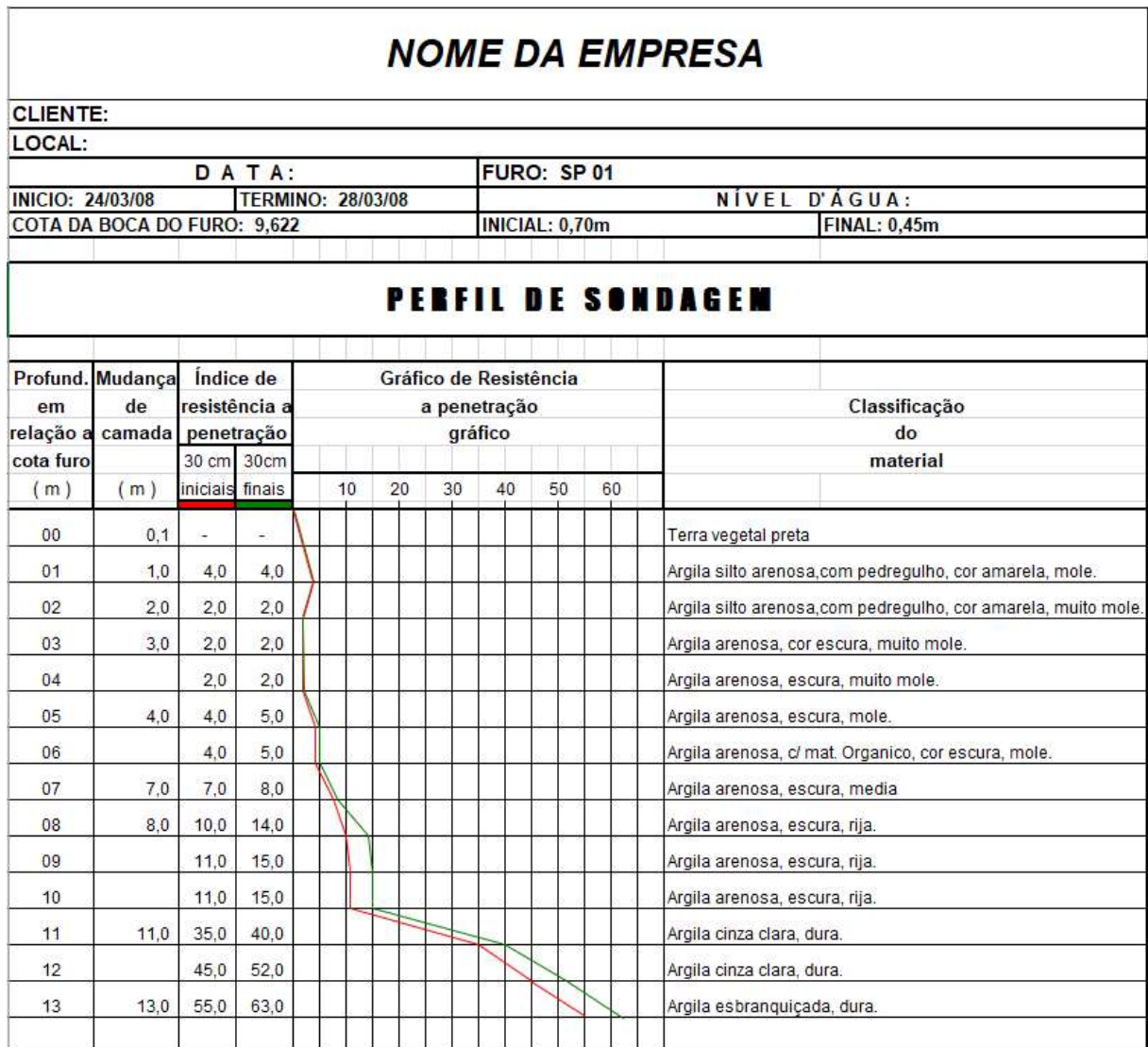
Além disso, é obrigatório que o relatório sempre acompanhe o perfil individual de cada furo de sondagem. O perfil deve conter:

- Nome da empresa responsável pela execução, nome do contratante, local da obra, nome do engenheiro civil ou geólogo responsável pelo trabalho;
- Número do furo de sondagem;
- Cota das bocas dos furos de sondagem;
- Posição das amostras colhidas;
- As profundidades, em relação a boca do furo, de cada camada e do final da sondagem;
- NSPT ou relações do número de golpes pela penetração;
- Identificação dos solos coletados e convenção gráfica dos mesmos;

- Posição do lençol freático ou indicação da não ocorrência, quando não encontrado; e
- Data de início e término de cada sondagem;

Na figura 2 é apresentado um exemplo de perfil de sondagem comumente utilizado pelas empresas de sondagens

Figura 2 - Exemplo de perfil geotécnico de um furo.



Fonte: Adaptado de Pinheiro Construções e Engenharia LTDA.

2.2.1.4. CLASSIFICAÇÃO DO SOLO QUANTO AO NSPT

Como já citado anteriormente, o número de golpes obtidos pelo ensaio SPT é amplamente utilizado em métodos de dimensionamentos empíricos e semi empíricos, na caracterização do tipo de solo, no cálculo da tensão admissível e da capacidade de carga (SANTOS, 2016).

Atualmente é possível ter acesso a literaturas que citam praticamente todos os possíveis tipos de correlações com o NSPT. Como exemplo, Cintra e Aoki (2010) utilizam o NSPT para o cálculo da resistência de ponta e lateral, da coesão e atrito, do peso específico e do coeficiente de recalque.

Para isso, a tabela 1, que é um anexo da NBR 6484/2001, tem a função de classificar o grau de compactidade ou consistência do solo com base no NSPT obtido na sondagem.

Tabela 1 - Estados de compactidade, consistência e resistência.

Solo	NSPT	Designação
Areia e Silte Arenoso	≤ 4	Fofa (o)
	5 a 8	Pouco fofa (o)
	9 a 18	Medianamente compacta (o)
	19 a 40	Compacta (o)
	> 40	Muito compacta (o)
Argila e Silte argiloso	≤ 2	Muito Mole
	3 a 5	Mole
	6 a 10	Média (o)
	11 a 19	Rija (o)
	> 19	Dura (o)

Fonte: NBR 6484/2001.

2.3. GEOPROCESSAMENTO

2.3.1. DEFINIÇÃO DE GEOPROCESSAMENTO

O estudo é totalmente baseado no geoprocessamento, não é por acaso que esta parte do trabalho possui grande importância. Por isso, abaixo será brevemente explicado, segundo alguns autores, o conceito do geoprocessamento.

Para o INPE (1998, p. 8), o termo Geoprocessamento

denota a disciplina do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento da informação geográfica. Esta tecnologia, denotada por *Geoprocessamento*, influencia de maneira crescente as áreas de Cartografia, Análise de Recursos Naturais, Transportes, Comunicações, Energia e Planejamento Urbano e Regional.

Segundo Rosa (2013), geoprocessamento pode ser entendido como um conjunto de tecnologias que são destinadas a coletar e tratar informações espaciais, mas também para o desenvolvimento de novas informações geográficas.

Resumindo, o geoprocessamento pode ser relacionado a profissionais que trabalham com cartografia digital, processamento digital de imagens e sistemas de informações geográficas. Estas atividades estão intimamente relacionadas e usam as mesmas características de *hardware*, porém, *softwares* diferentes.

Neste sentido, o geoprocessamento é o processamento informatizado que visa integrar grandes bancos de dados georreferenciados, permitindo a análise estatística através da sua principal ferramenta, o Geographical Information System (GIS), conhecido também como Sistema de Informações Geográficas (SIG). (HAMADA e GONÇALVES, 2007)

Portanto, existe uma diferença entre geoprocessamento e o SIG, sendo que jamais devem ser considerados iguais. O SIG é apenas umas das geotecnologias que o geoprocessamento utiliza para gerar novas informações geográficas, porém, existem outras, como mostra a figura 3.

Figura 3 – Relação entre o geoprocessamento e as geotecnologias.



Fonte: Medeiros (2012) apud ClickGeo¹.

2.3.2. SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Eastman (1998, p. 4) conceitua SIG como “um sistema auxiliado por computador para a aquisição, armazenamento, análise e visualização de dados geográficos. Atualmente uma variedade de ferramentas de *software* estão disponíveis para auxiliar nessa atividade [...]”

Para Burrough e McDonnell (1998, p. 11) *apud* Fitz (2008, p. 22), SIG é uma ferramenta com a capacidade de armazenar, recuperar, transformar e visualizar dados coletados dentro de um espaço definido e utilizá-los para uma determinada finalidade.

¹ Disponível em: <http://www.clickgeo.com.br/geotecnologias-parte1/>. Acesso em 28 nov. 2019.

O INPE (1998, p. 13) relata que

o termo *Sistemas de Informação Geográfica* (SIG) é aplicado para sistemas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos. Um SIG armazena a geometria e os atributos dos dados que estão *georreferenciados*, isto é, localizados na superfície terrestre e representados numa projeção cartográfica. Os dados tratados em geoprocessamento têm como principal característica a diversidade de fontes geradoras e de formatos apresentados.

Com esse sistema é possível realizar análises complexas a partir da união de dados das mais diversas vertigens de estudos, tudo de forma automatizada, garantindo uma menor probabilidade de erros e diminuindo o tempo de confecção comparado ao fazer manual.

Rosa (2013) descreve que o objetivo geral de um SIG é ser um instrumento eficiente para diversas áreas do conhecimento que necessitem utilizar mapas, e proporciona:

- Integrar em um único banco de dados, informações que representem vários aspectos do estudo de uma região;
- Permite inserir dados de diversas formas;
- Possibilita combinar dados de diferentes fontes para gerar novos tipos de informações; e
- Consegue gerar diferentes tipos de relatórios e documentos gráficos.

Como principal vantagem do SIG, pode-se citar a capacidade de integrar em um único banco de dados diversas informações a respeito do meio no qual o geoprocessamento está presente. A figura 4 exemplifica de forma intuitiva essa vantagem.

Figura 4 - Banco de dados com diversas informações.



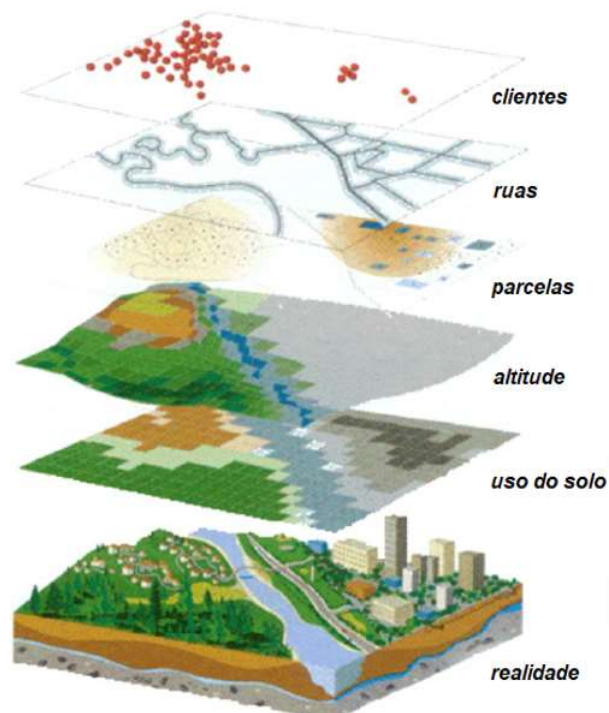
Fonte: Elaborado pelo autor.

Além de modernizar a produção de documentos cartográficos, “as ferramentas computacionais para Geoprocessamento [...] (SIG), permitem realizar análises complexas, ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados.” (INPE, 1998, p. 8)

Logo, dentro de um ambiente SIG sempre existirá uma dualidade básica permanente entre os objetos georreferenciados e seus respectivos atributos.

Além disso, o SIG permite criar e unir diversas feições para tentar representar ao máximo o local no qual ele está sendo aplicado, ou seja, por permitir integrar no mesmo banco de dados informações do sistema viário, uso do solo e o relevo da região, é possível unir todas essas informações e criar uma superfície o mais próximo da realidade.

Figura 5 - Exemplo da unificação das feições no SIG.



Fonte: Adaptado de CivilGeeks².

Para o INPE (1998), existem três principais finalidades para a utilização de SIG:

- Produção de mapas;
- Suporte para análise espacial; e

² Disponível em: <https://civilgeeks.com/2011/12/21/cartografia-y-sistemas-de-informacion-geografica-en-el-manejo-integrado-de-cuencas/>. Acesso em: 29 nov. 2019.

- Banco de dados geográficos, com função de armazenar e recuperar informações espaciais.

Dessa forma, pode-se entender que SIG é um sistema totalmente informatizado que pode armazenar, analisar e visualizar dados geográficos para o melhor e correto entendimento seja qual for a vertigem de estudo dos dados coletados.

2.3.3. O USO DO SIG

O SIG se faz uma importante ferramenta em qualquer linha de pesquisa que necessite georreferenciar dados distribuídos espacialmente. O que chama a atenção é a rapidez e a precisão na qual ele funciona, proporcionando a criação de elementos cartográficos que facilite a visualização do problema central da pesquisa. “Porém, para os analistas experientes o SIG torna-se simplesmente uma extensão do pensamento analítico, é uma ferramenta, tal como a estatística.” (HAMADA e GONÇALVES 2007, p. 13, *apud* EASTMAN, 1997)

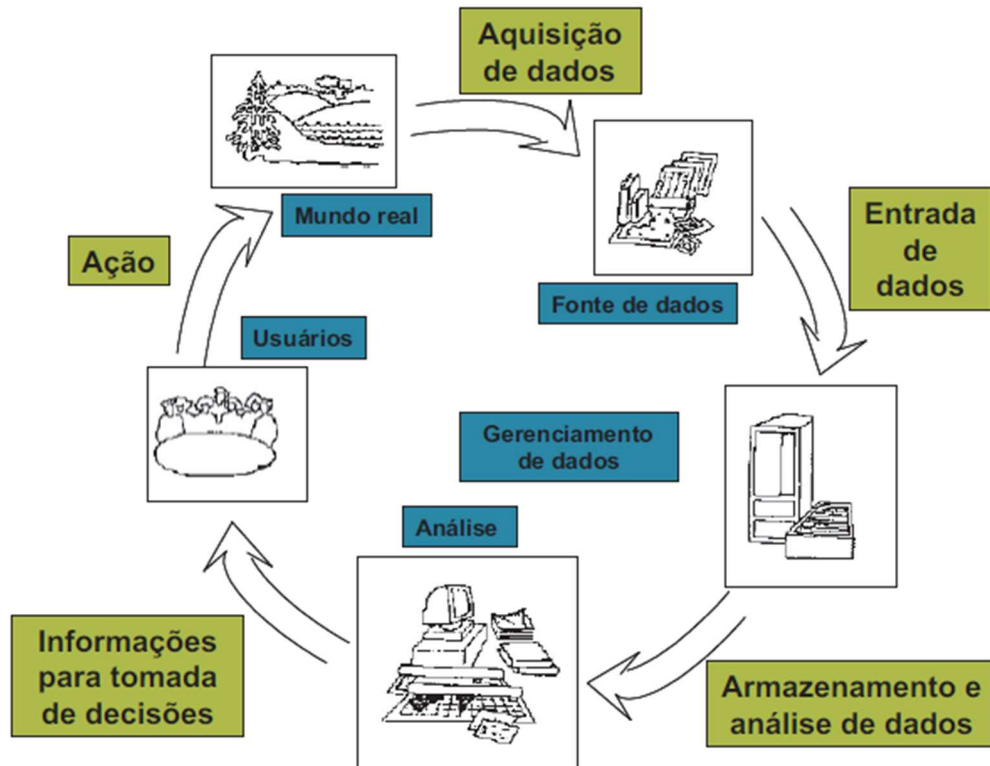
As vantagens que impulsionam a utilização do SIG são que, uma vez inseridos os dados no sistema, é possível manipulá-los com rapidez. Além disso, o SIG permite realizar diferentes análises dos dados com mais eficiência, por meio de ferramentas matemáticas e estatísticas e com menor subjetividade do que se fossem feitas de forma manual.

Salame e Júnior (2006) consideram que o uso do SIG é essencial pois

as informações são elementos indispensáveis para qualquer planejamento e tomada de decisões. Na área da engenharia de fundações também se constitui elemento primário para definição adequada de projeto e processo executivo da obra. Todavia, muitas destas informações são extraviadas pela inexistência de um banco de dados que armazene todo o conhecimento e experiências anteriores na prática de fundações das obras realizadas, tanto no passado distante, como no presente.

A figura 6 representa o funcionamento de um SIG, é possível perceber que o ciclo é contínuo e dividido em três etapas. A primeira etapa corresponde a coleta de dados, está por sua vez é a representação da realidade. Em seguida, após a coleta dos dados que serão analisados, ocorre o lançamento destes no SIG para que o software possa armazenar, analisar e processar uma representação para aquela situação. Como etapa final, ocorre a confecção de mapas que irão auxiliar com informações para uma tomada de decisão correta e eficaz.

Figura 6 - Esquemática geral da utilização de um SIG.



Fonte: Hamada e Gonçalves (2007)

Portanto, o SIG é considerado uma importante ferramenta com diversos mecanismos que permitem o planejamento e o tomar de decisão mais viável. Para ter êxito no seu manuseio, é importante haver um contínuo controle da sua correta utilização para que os objetivos almejados sejam alcançados.

2.3.4. COMPONENTES DO SIG

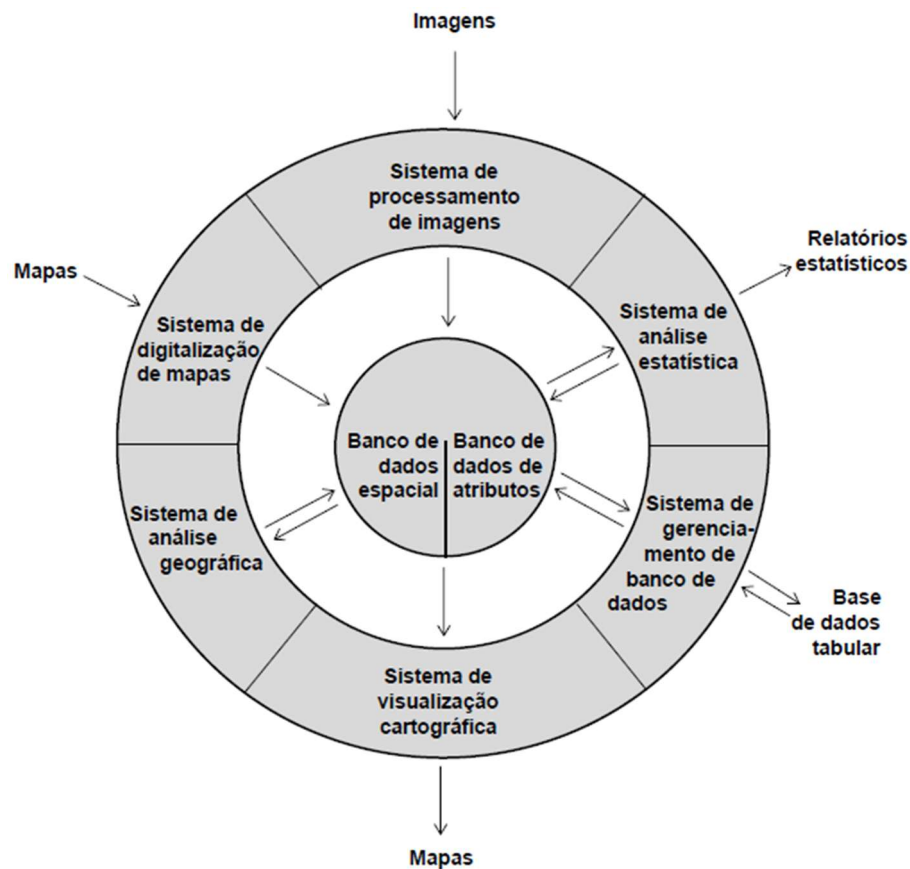
Para uma melhor compreensão da importância de cada elemento que compõem um SIG, a figura 7 foi adicionada no trabalho com o intuito de visualizar com um olhar mais abrangente.

Como é possível visualizar na figura, o banco de dados espaciais e o banco de dados de atributos estão no centro por serem as informações essenciais para começar a utilizar um SIG, ao redor estão diversos componentes de *software* com suas funções, tais componentes estão em constante relacionamento com os bancos de dados.

Para este estudo, os principais componentes utilizados serão o sistema de análise estatística e o sistema de visualização cartográfica, pois irão permitir, respectivamente, a interpolação dos dados e a criação da superfície do mapa. Abaixo será brevemente explicado a função de cada componente de um SIG.

- a) Banco de dados: O banco de dados espaciais tem a função de descrever a geografia das feições, já o banco de dados de atributos descreve as características ou qualidades dessas mesmas feições;
- b) Sistema de processamento de imagens: é possível, por meio deste componente, interpretar imagens de sensoriamento remoto e, além disso, realizar análises estatísticas;
- c) Sistema de digitalização de mapas: este componente de software tem a importante função de digitalizar mapas e assim converter mapas em meio físico para o meio digital;
- d) Sistema de análise geográfica: através deste sistema, é viável analisar dados baseados em sua posição geográfica e analisar feições com distribuições espaciais divergentes;
- e) Sistema de visualização cartográfica: neste estudo o sistema de visualização cartográfica será essencial para a apresentação dos mapas, pois ele “permite, a partir de elementos selecionados do banco de dados, produzir mapas de saída na tela ou em alguns dispositivos de saída em meio sólido como uma impressora ou plotter.” (Eastman, 1998, p. 5)
- f) Sistema de gerenciamento de banco de dados: também conhecido como SGBD, o *software* é usado como input, gerenciamento e análise de dados de atributos e dados espaciais; e
- g) Sistema de análise estatística: para a análise estatística de dados espaciais, este procedimento oferece os métodos tradicionais e métodos mais específicos, visto que alguns casos os dados espaciais exigem um manuseio mais específico para a inferência dos valores.

Figura 7 - Componentes de um SIG.



Fonte: Eastman (1998).

2.4. ANÁLISE ESPACIAL

Coelho, Alves e Oliveira (2007) relatam que o geoprocessamento está sendo usada cada vez mais no meio técnico científico por ser prático e possuir grande aplicabilidade no que diz respeito ao planejamento urbano. O motivo do crescente uso é a possibilidade de realizar análises espaciais que permitam a tomada de decisão.

Por ser uma ferramenta com enorme potencial, o SIG possibilita o tratamento em paralelo de diversos parâmetros devido sua aptidão em gerenciar grandes bancos de dados espaciais de atributos para posterior manipulação e investigação dos resultados.

Por conseguinte, o SIG vem sendo amplamente utilizado na elaboração de mapas geotécnicos por proporcionar ao usuário a criação de modelagens matemáticas fundamentadas no banco de dado inserido. Dessa forma, com o intuito de elaborar mapas geotécnicos de uma determinada área de estudo, são utilizadas técnicas de interpolação, a partir dos SIG's, para a análise espacial. (Santos, 2016)

Para o INPE (2004, p. 4), “compreender a distribuição espacial de dados oriundos de fenômenos ocorridos no espaço constitui hoje um grande desafio para a elucidação de questões centrais em diversas áreas do conhecimento”, como a geologia.

A criação de mapas coloridos gerados por meio de modelagens matemática que usam como base um banco de dados georreferenciados é uma das tarefas do SIG. Existem diversos métodos diferentes de colocar em prática a criação destas superfícies, porém, cabe ao usuário decidir qual o método que melhor representa a superfície real.

2.4.1. CONCEITOS BÁSICOS

Segundo INPE (2004), o conceito principal para compreender os fenômenos espaciais é a dependência espacial. A primeira lei da geografia, de acordo com Waldo Tobler, relata que *“todas as coisas são parecidas, mas coisas mais próximas se parecem mais que coisas mais distantes”*. Na mesma via de pensamento, Noel Cressie afirma que *“a dependência [espacial] está presente em todas as direções e fica mais fraca à medida em que aumenta a dispersão na localização dos dados.”*

Dessa forma, é possível entender que, independentemente do tipo de análise que está sendo realizada, o atributo em estudo estará sempre depende da distância. Por exemplo, se houver vazamento de petróleo em uma plataforma em alto mar, possivelmente os locais mais próximos estarão contaminados, porém, com o afastamento esta contaminação irá diminuir até se tornar nula.

O INPE (2004) classifica três tipos de análise espacial:

- Eventos ou padrões pontuais: são fenômenos expressos por pontos localizados no espaço e são denominados processos pontuais.

Exemplos: ocorrência de doenças e localização de crimes.

- Superfícies contínuas: são estimadas a partir de um conjunto de amostradas coletas em campo, podendo estar distribuídas regularmente ou não.

Exemplo: mapeamento geológico.

- Áreas com contagens e taxas agregadas: são dados associados a levantamentos populacionais e que se referem a indivíduos localizados em pontos exatos.

Exemplo: Censo e estatísticas de saúde.

2.4.2. INTERPOLAÇÃO ESPACIAL

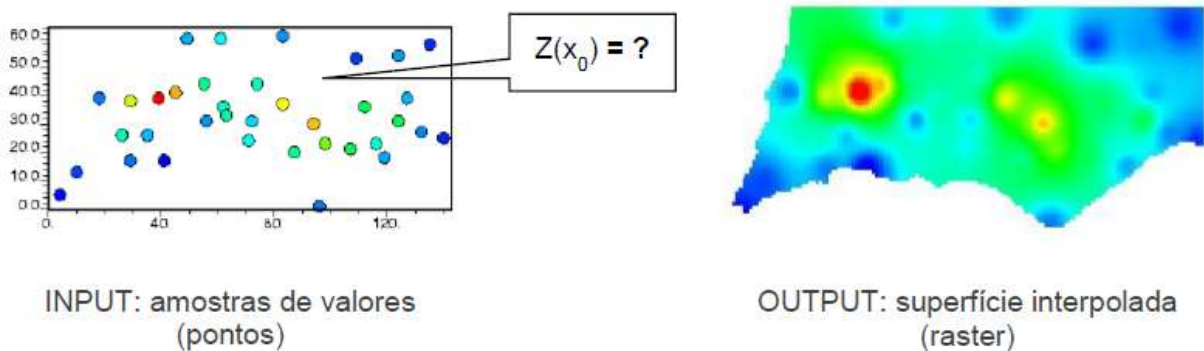
A interpolação espacial é o procedimento que utiliza um atributo conhecido de um dado ponto qualquer, para prever, ou seja, estimar, os valores de atributos em pontos que ainda possuem dados conhecidos.

O procedimento é bastante comum na matemática, onde sempre se procura estimar novos pontos tendo como referência pontos já conhecidos, criando funções que se ajustem aos pontos para prever um modelo de distribuição espacial e os valores nos quais ainda não há dados.

“Como tal, podem ser utilizados métodos de interpolação para estimar valores desconhecidos a partir dos dados de um ponto geográfico, tais como elevações, precipitação, concentrações químicas, níveis de ruído e muito mais.” (ALATORRE, 2014, p. 5, tradução nossa)

A interpolação espacial tem como principal função estimar o valor de um atributo (Zx_0) em um local no qual não foi amostrado (x_0) tendo como base um conjunto de amostras próximas ao ponto que se quer estimar ($Zx\alpha$).

Figura 8 - Ilustração do processo de interpolação espacial da precipitação no sul de Portugal.



Fonte: Goovaerts (1999), *apud*, Nova IMS (2015).

Existem diferentes tipos de interpolações, cada uma com uma metodologia diferente, cabe ao usuário estudar e verificar qual se encaixa no objetivo que se quer alcançar e qual melhor representa a superfície tendo como base a variabilidade espacial no qual estão distribuídas suas amostras. A seguir será citado alguns dos principais tipos de interpolação frequentes nos ambientes SIG's.

2.4.3. TIPOS DE INTERPOLAÇÃO

Quando é possível obter uma grande quantidade de dados que estejam distribuídos regularmente, os resultados gerados pelos diferentes métodos de interpolação são

similares. Em contrapartida, quando os dados são limitados e distribuídos aleatoriamente, existe uma variação perceptiva nos resultados produzidos. (NOVA IMS, 2015)

Para Caruso e Quarta (1998), cada tipo de interpolação possui suas vantagens e desvantagens e depende diretamente da característica do conjunto dos dados, como o fenômeno estudado e a distribuição espacial das amostras. Por exemplo, um método pode ser a melhor alternativa para um banco de dados, mas pode não representar da melhor forma outro conjunto de dados. Dessa forma, é necessário especificar qual o objetivo da interpolação pois diferentes objetivos podem reproduzir diferentes critérios de avaliação de uma interpolação.

Yamamoto e Landim (2013) relatam que a diferença fundamental entre os métodos é baseada em como os dados estão distribuídos e na forma como o peso de cada atributo é aplicado durante o processo de estimativa. Dessa forma, os métodos podem ser divididos em modelos determinísticos e modelos estocásticos:

- Modelos determinísticos: a interpolação determinística supõe que a localização será sempre associada a apenas um valor. Dessa forma, a localização está associada a uma variável determinística, ou seja, não aleatória. O método leva em consideração apenas a relação com a distância, e não considera a correlação espacial dos dados. Este método é pouco preciso quando se tem poucas amostras e quando não estão regularmente distribuídas. (NOVA IMS, 2015)
- Modelos estocásticos: a interpolação estocástica pressupõe que a cada localização (amostrada, ou não) está associada uma variável aleatória, que tem uma certa distribuição de probabilidade. Esta distribuição não é geralmente conhecida, nem é uma limitação destes métodos. O fato dos interpoladores estocásticos se basearem no conceito de variável aleatória, permite usar conceitos da teoria das probabilidades para determinar a formulação dos interpoladores e para avaliar a incerteza das estimativas. (NOVA IMS, 2015)

Em seguida serão apresentados os principais métodos de interpolação, tanto determinísticos como estocásticos.

2.4.3.1. TRIANGULAÇÃO COM INTERPOLAÇÃO LINEAR.

Segundo Santos (2016, p. 62), este tipo de interpolação foi desenvolvido “com a finalidade de formar uma malha triangular irregular [...], o modelo de triangulação interliga os pontos amostrados através de linhas, perfazendo, respectivamente, os vértices e as arestas dos triângulos.”

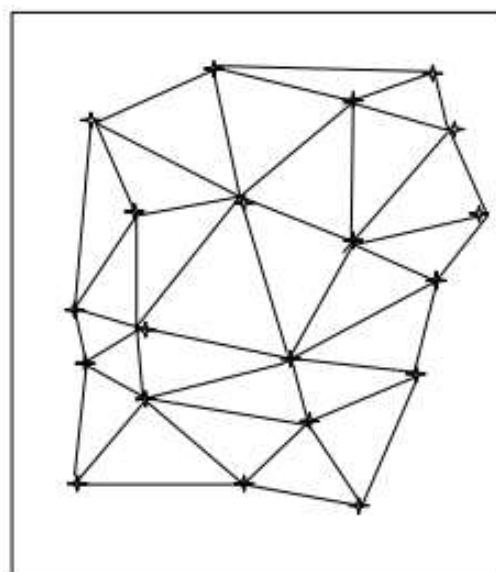
Este método também é conhecido pelo termo TIN, Triangular Irregular Network e considera um comportamento linear dentro do triângulo possibilitando estimar o valor de um ponto dentro da malha triangular.

Desta maneira, o valor de qualquer ponto inserido no triângulo pode ser estimado por meio dos atributos conhecidos e pelas coordenadas dos vértices, a partir de uma álgebra simples para a solução de equações lineares.

Bulhões e Drumond (2012) relatam que o TIN é um interpolador exato e trabalha com a criação de triângulos, a conexão é perfeita de forma que os triângulos não se sobreponham. O resultado no grid é um mosaico de superfícies triangulares ao longo de sua extensão.

Landim (2000) salienta que a técnica não permite a extrapolação, ou seja, as estimativas dos valores são restritas ao triângulo no qual o ponto a ser estimado se encontra.

Figura 9 - Exemplo de TIN.



+ Ponto amostral

Fonte: INPE (1998).

O quadro a seguir foi desenvolvido por Landim (2000) com o objetivo de demonstrar as vantagens e desvantagens da triangulação linear.

Quadro 1 - Vantagens e desvantagens do uso do TIN.

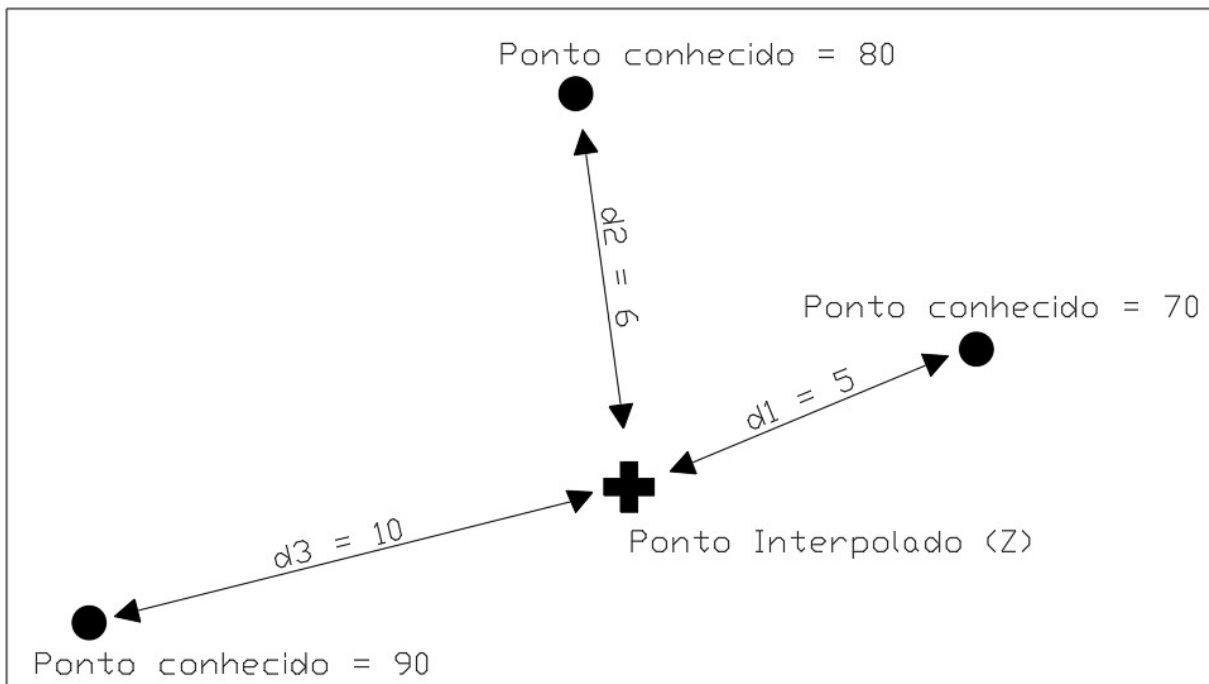
Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de compreender. • Rápido de processar os dados. • Fiel aos dados originais. • Proporciona uma boa visualização dos resultados. • Superfície pode ser interpolada entre os pontos amostrados. 	<ul style="list-style-type: none"> • Valores acima ou abaixo dos valores reais não podem ser extrapolados. • Valores além da área de distribuição dos pontos amostrados não podem ser extrapolados • Contornos podem ser angulares nas bordas dos triângulos. • Rede triangular não é a única, podendo distorcer os resultados.
Uso indicado	Uso não indicado
<ul style="list-style-type: none"> • Dados distribuídos regularmente pela área de estudo. • Valores estimados necessários apenas dentro da área amostrada. • Presença de grandes diferenças entre os dados. • Dados topográficos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Quando o objetivo for um mapa com contornos suaves. • Alguns dados coletados em linhas e outros com distribuição irregular. • Com grande volume de dados de computação, pode torna-se lenta.

Fonte: Adaptado de Landim (2000).

2.4.3.2. INVERSO PONDERADO DA DISTÂNCIA.

No início da interpolação por esse método, são atribuídos pesos para os pontos conhecidos próximos aos pontos que se quer conhecer. Porém, a influência de um peso dado a um ponto diminui conforme a distância aumenta. “Pontos amostrados de localização próxima ao nó a ser estimado recebem peso maior que os pontos amostrados de localização mais distante.” (LANDIM, p. 5, 2000)

Figura 10 – Exemplo de cálculo do inverso ponderado da distância.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A expressão matemática que define o método é apresentada a seguir, equação (1). Dessa forma, a expressão considera o valor de cada vizinho ponderado pelo inverso da distância entre ele e o ponto de interesse. Portanto, vizinhos mais distantes influenciam com peso menor para o valor final que vizinhos mais perto.

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{\beta h_{ij}}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{\beta h_{ij}}} \quad (1)$$

Em que:

Z = valor interpolado;

Z_i = valor da i -ésimo ponto vizinho;

h_{ij} = distância entre o i -ésimo ponto de vizinho e o ponto de interesse;

β = Expoente de ponderação (Peso);

n = número de pontos amostrados utilizados para interpolar o ponto em questão.

Percebe-se então que este método considera apenas relações que são baseadas na distância, sem considerar qualquer correlação dos dados espaciais.

Quadro 2 - Vantagens e desvantagens do Inverso Ponderado da Distância.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Fácil de compreender matematicamente; • Algoritmo bem conhecido e discutido; • Disponível em muitos <i>softwares</i>. • Utiliza pouco tempo de computação; • É razoavelmente fiel aos valores amostrados originais; • Não estima valores de amostras maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados; • Bom para estimativas de espessura, concentração química e propriedades físicas; • Muito bom para analisar variações de pequena amplitude (anomalias) entre os dados irregularmente distribuídos; • Bom estimador para propósitos gerais; • Pode interpolar por setor, onde o usuário pode escolher a quantidade de amostras, por setor, que serão levadas em consideração, em uma determinada estimativa de valor. 	<ul style="list-style-type: none"> • Não estima valores maiores ou menores que os valores máximos e mínimos dos dados; • Muito difícil obter a localização precisa de uma determinada isolinha se os valores amostrados não contiverem este valor; • Influência de valores locais anômalos é dificilmente removida; • Dados dispostos em conjuntos de semelhantes podem influenciar as estimativas de modo bastante tendencioso. • Cria muitas observações ilusórias devido às limitações do método de interpolação, o que pode ser reduzido ou eliminado se o raio de busca for reduzido, se a tendência for removida previamente ou se ocorrer mudanças no expoente utilizando, no tamanho da grade, no número de pontos utilizados e ponderação direcional.
Uso indicado	Uso não indicado
<ul style="list-style-type: none"> • Estimativas de propósito gerais; • Distribuição uniforme dos dados; • Para destacar anomalias locais. 	<ul style="list-style-type: none"> • Dados agrupados; • Tendência pronunciada presente; • Dados com falhas e distribuídos de forma esparsa; • Não quiser imperfeições no modelo;

Fonte: Thiessen (2016), apud Landim (2000).

2.4.3.3. KRIGAGEM.

A krigagem surgiu como um método de estimação estocástico, “com denominação sugerida por Matheron em homenagem aos trabalhos pioneiros de Daniel Krige, ao introduzir o uso de médias móveis para evitar a superestimação sistemática de reservas em mineração.” (SOARES, 2006, *apud*, EMBRAPA, 2015)

Daniel Krige era o engenheiro de minas responsável por analisar os dados de teores de ouro dentro de uma reserva de minério localizada na África do Sul, ele percebeu a

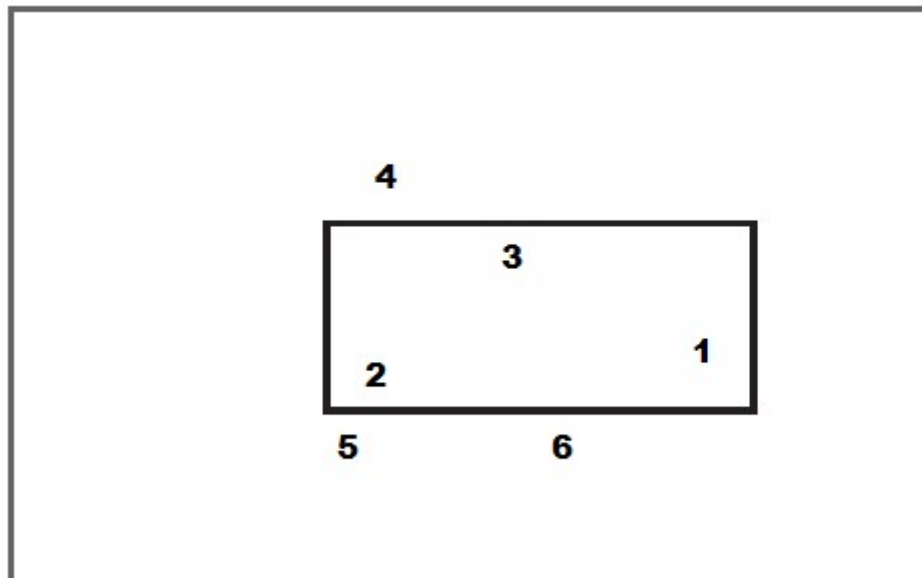
existência de erros sistemáticos quando fazia a avaliação dos teores médios de blocos³ pela utilização apenas das amostras dentro do bloco, desprezando as amostras próximas por estarem fora.

Assim, o erro fazia com que os blocos ricos fossem superestimados e os blocos pobres fossem subestimados, ou seja, ocorria a redundância de valores tendo em vista que um peso maior era atribuído por considerar na média do bloco apenas as amostras que estavam dentro do bloco, desconsiderando as amostras que se encontravam fora mas que estavam próximas e melhor representavam a superfície.

Landim (2006) explica o pensamento de Daniel Krige a partir do exemplo a seguir. Levando em consideração que, na figura 11, as amostras 1, 2 e 3 possuíam altos teores de ouro, a média do teor de ouro seria alta dentro do bloco. No entanto, as amostras 4, 5 e 6, que estavam próximas do bloco, mas do lado de fora, possuíam baixo teor de ouro e não eram levadas em consideração.

Daniel Krige percebeu que, dessa forma, existia uma superestimação do bloco por não considerar a dependência espacial das amostras e acreditar que as variações de um local para o outro seriam totalmente aleatórias.

Figura 11 - Geometria do bloco a ser estimado por 5 amostras.



Fonte: Adaptado de Landim (2006).

No começo as análises estatísticas dos dados consideravam as variáveis aleatórias, sem qualquer dependência umas com outras, ou seja, as amostras vizinhas não

³ Nas reservas minerais, o planejamento das estimativas ocorre pela divisão da mina em blocos.

exerciam influência alguma sobre a outra. Porém, na natureza isso não ocorre, os fenômenos naturais se apresentam com uma estruturação entre os vizinhos. (ANGÉLICO, 2006)

Logo, Krige notou que seria necessário considerar, além da distância, a dependência espacial dentre as inúmeras amostras conhecidas. Daí surge a geoestatística, que considera a dependência espacial por meio da localização geográfica das amostras.

O matemático Matheron estudou as observações de Krige e desenvolveu a teoria das variáveis regionalizadas. Matheron chegou à conclusão que uma simples função matemática não seria capaz de representar sua teoria, pois uma variável regionalizada é uma função numérica com distribuição espacial e sempre varia de um ponto a outro com continuidade aparente. (INPE, 1998)

O que distingue a krigagem dos outros métodos de interpolação é a criação de uma matriz da covariância espacial que determina o valor dos pesos que serão atribuídos às diferentes amostras, sempre tenta minimizar a redundância dos dados amostrais, considera os vizinhos no procedimento inferencial e estima o erro associado ao valor estimado. Ademais, a Krigagem cria estimadores com a função de evitar a tendenciosidade e aumentar a eficiência. (INPE, 2004)

Para Landim (2006), a krigagem preocupa-se

com o entendimento, por meio de análise matemática, da gênese e leis naturais que governam fenômenos interpretados como regionais. Isso traz como consequência direta a estimativa das variáveis regionais usando informações e relações a partir de um conjunto discreto de amostras, juntamente com a avaliação dos erros de estimativa, para estabelecer o grau de segurança em previsões e os padrões ótimos de amostragem, que assegure que um erro máximo de estimativa não seja excedido.

Landim (2000) afirma que nas variáveis regionalizadas existe uma continuidade espacial, permitindo que dados obtidos por amostragem possam ser usados como parâmetros de estimação de pontos onde o valor da variável seja desconhecido.

De acordo com Santos (2016, p. 64), “para verificar a existência de continuidade espacial e identificar os parâmetros que caracterizam o comportamento regionalizado deve-se realizar uma análise variográfica”.

O semivariograma é o instrumento que mede a semelhança entre amostras próximas, apresentando o grau de dependência espacial entre elas, isto é, a distância máxima

na qual os valores ainda irão se correlacionar. Contudo, o semivariograma é uma medida da variabilidade geológica condicionada pela distância. (LANDIM, 2006)

A ocorrência da dependência espacial expressa no semivariograma segue a hipótese básica na qual dados da vizinhança são mais parecidos do que dados distantes. (EMBRAPA, 2015)

Segundo Landim (2000, p. 27), “a krigagem usa informações a partir do semivariograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras que irão estimar um ponto, uma área ou um bloco.”

Nessa sequência, Embrapa (2015) afirma que a análise e ajuste do semivariograma é um dos aspectos mais importantes da geoestatística, pois deve-se buscar a maior dependência espacial, a menor variância e tomar decisões para possíveis ocorrências de anisotropias⁴.

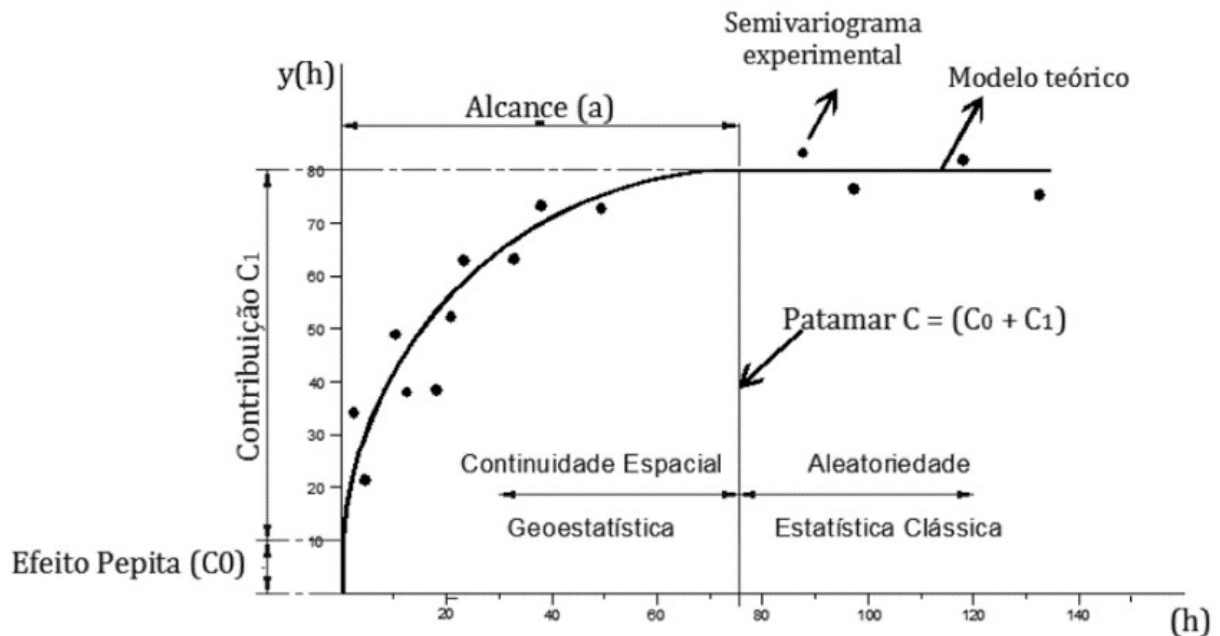
Ladim (2006) também afirma que em um estudo geoestatístico, a determinação do semivariograma, a partir de várias modelagens e ajustes, é a parte fundamental. Além disso, todo cuidado deve ser tomado na análise variográfica com o intuito de obter uma rígida análise geoestatística.

“O variograma experimental ou variograma das amostras $\gamma(h)$ é calculado a partir da diferença média quadrada entre pares de dados que pertencem a uma certa classe de distância.” (SANTOS, 2016, p. 64)

É necessário ressaltar que o semivariograma experimental deve ser adaptado a um modelo teórico, no qual os parâmetros de ajustes são apresentados na Figura 12.

⁴ Anisotropia é o fenômeno no qual a característica de um meio é privilegiada em determina direção.

Figura 12 - Semivariograma experimental, modelo teórico e seus parâmetros.



Fonte: Santos (2016), *apud* Dias (2013).

Teoricamente a variância tende a crescer com o aumento da distância até atingir um valor constante que representa às variações aleatórias. Contudo, para ajustar um modelo matemático aos valores estimados, são definidos os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma, que são o efeito pepita (C_0), o patamar ($C_0 + C_1$) e o alcance. (SANTOS, 2016)

É por meio do semivariograma que a krigagem consegue atribuir pesos ótimos aos pontos desconhecidos, utilizando técnicas de regressão. A técnica, segundo Silva et al. (2008) *apud* Santos (2016), procura minimizar a variância estimada por considerar a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço.

Apesar das inúmeras vantagens, a krigagem também possui algumas desvantagens e casos no qual seu uso não é indicado. No quadro 3 a seguir, Ladim (2000) resume as vantagens e desvantagens da krigagem, assim como quando seu uso é ou quando não é indicado.

Quadro 3 - Vantagens e desvantagens da Krigagem.

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> • Valores estimados baseiam-se no semivariograma, que, se apropriado, fornece as seguintes informações: <ul style="list-style-type: none"> • Parâmetros adequados de amostragem: número de amostras, distribuição e densidade; • Parâmetros adequados de busca: tamanho da área de busca, forma (circular ou elipsoide) e, se elipsoide, orientação do eixo principal; • Parâmetros adequados da grade: tamanho, forma e orientação; • Natureza da distribuição espacial da variável investigada, uniformidade da distribuição, importância relativa da influência espacial x causal; • Previsibilidade da variação espacial da variável avaliada; • Permite a determinação das melhores estimativas sem tendenciosidade, o melhor estimador é aquele que produz a melhor precisão (menor variância); • Permite o estabelecimento de limites de confiança, indicando se os resultados são aceitáveis e se a estratégia de amostragem deve ser modificada; 	<ul style="list-style-type: none"> • O usuário pode não compreender o uso dos controles matemáticos e apesar disto resultados são sempre obtidos. • É necessário tempo para preparo do variograma e entendimento da geoestatística. • Pode não ser possível a construção de um variograma adequado devido à natureza da variação espacial da variável analisada. Isto pode ocorrer devido à magnitude da amostragem e por erros analíticos. • Requer longo tempo de computação para grupos de dados grandes ou complexos. • Necessidade de <i>software</i> capacitado.
Uso indicado	Uso não indicado
<ul style="list-style-type: none"> • Estiverem presentes tanto tendências regionais quanto anomalias locais. • Quiser estimar com base em uma média global. • Tiver dados irregularmente amostrados ou agrupados (<i>clustered</i>). 	<ul style="list-style-type: none"> • Menos de 30 pontos amostrados: número insuficiente de pares para modelar o variograma. • Erro grande e inexplicado (efeito pepita pronunciado). • Amostras de populações diversas.

Fonte: Thiessen (2016), apud Landim (2000).

2.4.3.4. COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS

A título de comparação entre os principais métodos de interpolação, Krajewski e Gibbs (1966) *apud* Landim (2000), elaboraram a tabela a seguir tendo como melhor resultado o número 1 e pior o 5.

Tabela 2 - Comparação dos métodos de interpolação.

Algoritmo	Fidelidade aos dados originais	Suavidade das curvas	Velocidade de computação	Precisão geral
Triangulação	1	5	1	5
Inverso da Distância	3	4	2	4
Krigagem	2	3	5	1

Fonte: Adaptado de Krajewski e Gibbs, 1966, *apud* Landim, 2000.

Percebe-se então que, como já era de se esperar, a krigagem possui uma maior precisão geral e possui fidelidade aos dados originais, parâmetros no qual qualquer trabalho busca alcançar. Dessa forma, se torna o melhor método de interpolação para a realização do estudo.

2.4.4. EXEMPLOS DE TRABALHOS.

Adiante será relatado diversos trabalhos que foram desenvolvidos com a mesma metodologia, objetivando elaborar mapas a partir de perfis sondagens SPT.

Soares (2011) em sua tese de doutorado, realiza a análise e modelagens espaciais utilizando a geoestatística baseado em um banco de dados de sondagens SPT com o intuito de elaborar mapas, principalmente, para a profundidade do lençol freático e os valores de NSPT, com o objetivo de subsidiar obras de fundações.

Com a utilização de ferramenta SIG e criação de um banco de dados, Santos (2016) realizou a interpolação dos dados com o objetivo de gerar cartas que representassem a superfície do impenetrável e do lençol freático, assim como cartas com isovalores de NSPT para diversas camadas.

Marinoni & Tiedemann (1998), *apud* Soares (2011), analisaram diversos furos de sondagem na capital Berlim e mostraram que por intermédio de análise geoestatística, é possível gerar modelos geológicos, desde que se conheça a correlação espacial dos dados geométricos inseridos, como dados morfológicos.

Fonteles (2003) criou um banco de dados com informações de sondagens de simples reconhecimento e, por meio deste banco de dados, elaborou, a partir da

geoestatística, um modelo geológico 3D e mapas de atributos como o nível do lençol freático, valores de NSPT e nível do impenetrável à percussão. Além disso, o autor exalta que a krigagem ordinária é uma excelente ferramenta para alcançar estes objetivos.

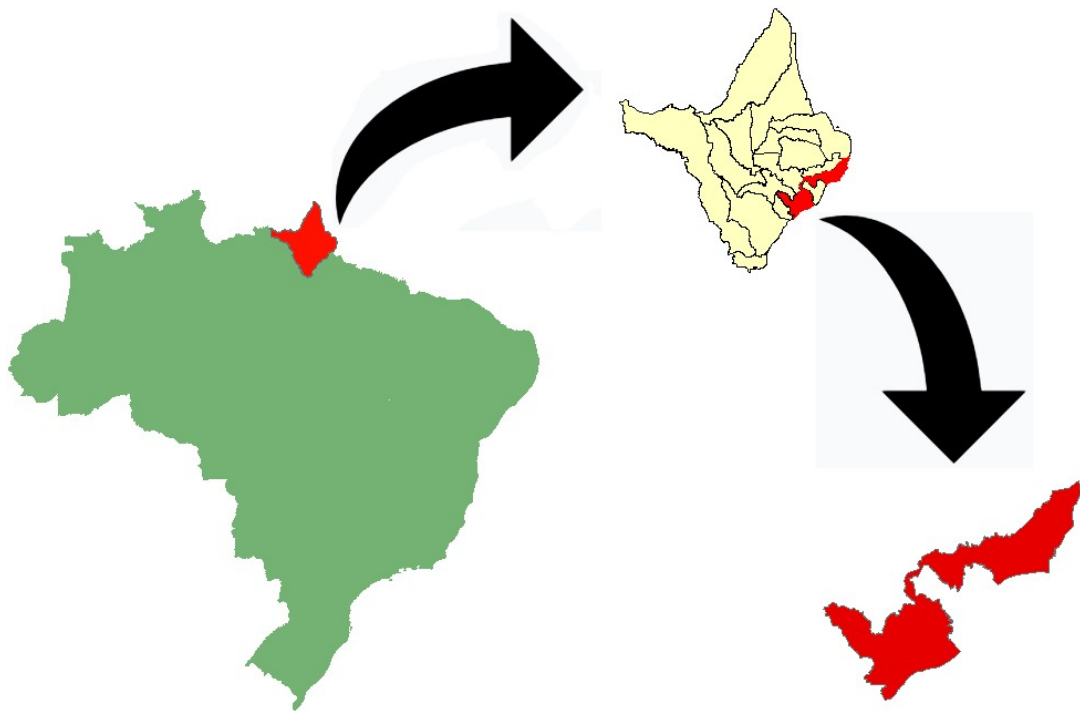
Sturaro (1994), apud Soares (2011), realizou interpolação por krigagem ordinária para estimar a resistência do solo e cokrigagem para estimar o nível do lençol freático e o nível do impenetrável.

Salame e Júnior (2006) realizaram, via SIG, o mapeamento dos tipos de fundações da cidade de Belém, assim como também desenvolveram mapas das áreas de várzea e terra firme, do perfil geotécnico esquemático do terreno, da profundidade provável das fundações e do percentual custo relativo das fundações.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Macapá, capital do estado do Amapá, está localizada no sudoeste do estado que fica no extremo norte do Brasil. A capital é cortada pela linha do equador e, por esse motivo, parte está sobre o hemisfério sul e parte sobre o hemisfério norte. Macapá está 16,48 metros acima do nível do mar e é a única capital do Brasil que faz margem com o Rio Amazonas, ao norte, o estado também é banhado pelo Oceano Atlântico. Segundo o IBGE, em seu último censo realizado no ano de 2010, o município de Macapá tem uma área total de 6.563,849 km² e possui uma população de 398.204 habitantes.

Figura 13 - Localização da capital do Amapá.



Fonte: Elaborado pelo autor.

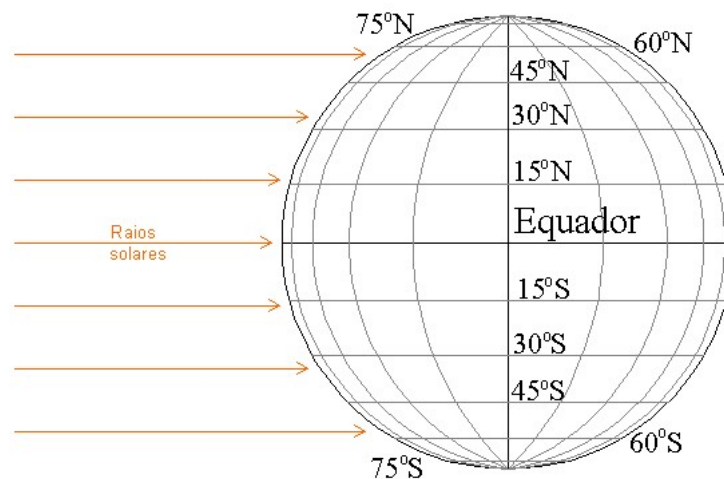
A capital amapaense é relativamente nova, possui apenas 261 anos de idade, economicamente depende fortemente do funcionalismo público e é a única capital estadual do Brasil que não possui qualquer tipo de interligação por rodovias, ficando totalmente dependente dos aeroportos e portos que se fazem presente na capital ou em municípios próximos.

O Amapá está localizado nas encostas leste do Maciço das Guianas, sendo o único estado da federação que possui fronteira com território de dominação europeia, a Guiana Francesa.

3.1. FATORES CLIMÁTICOS

No Amapá, o clima predominante é o equatorial quente e úmido, que se caracteriza por altas temperaturas com chuvas abundantes, clima característico da região amazônica. A alta incidência dos raios solares pode ser explicada pela baixa latitude, próxima de zero. Como o estado se encontra em cima da linha do equador, os raios solares atingem a superfície mais diretamente, pois não possui qualquer inclinação, tendo em vista que quanto maior a latitude, maior será a inclinação. Dessa forma, as temperaturas mínimas costumam variar de 22° a 25° e as temperaturas máximas variam de 30° a 37°. A figura 14 exemplifica a questão acima citada.

Figura 14 - Ângulo de incidência dos raios solares de acordo com a latitude.



Fonte: Blog Astrosurf⁵.

O regime pluviométrico na região é dividido em duas estações, o inverno, período chuvoso, e o verão, período de seca. O inverno amapaense costuma durar de janeiro a julho com índices pluviométricos que podem ultrapassar 2500mm³ por ano. Já o verão, durando de agosto a dezembro, é o período no qual pode passar meses completos sem qualquer indício de chuva.

3.2. GEOLOGIA

Macapá fica situada ao Leste do Estado e encontra-se na Planície Costeira do Amapá que ocupa extensa faixa ao longo do litoral. Sua geologia é formada basicamente de sedimentos inconsolidados recentes de origem fluvial e marinha do período quaternário. Predominantemente a cidade encontra-se sobre depósitos de Planície fluvio-Estuarina com a forte prevalência de argila e silte.

⁵ Disponível em: www.astrosurf.com/skyscapes/disc/latitude/latitude.html. Acesso em: 15 out. 2019.

Mais ao centro da cidade é possível encontrar outra unidade geológica, a Formação de Barreiras, esta é caracterizada pela presença de sedimentos areno-argilosos e de sedimentos argilosos semi-inconsolidados. No quadro 4 abaixo, são apresentadas as principais unidades geológicas encontradas no Amapá.

Quadro 4 - Principais unidades geológicas encontradas no Amapá

ERA	PERÍODO	DESCRIÇÃO
CENOZÓICO	QUATERNÁRIO	Depósitos de Planície Flúvio-Estuarina Marinha - sedimentos pelíticos (argila e silte) a silticos-arenosos em áreas de acreção e assoreamento ocorrendo como planícies e bancos. Formação de canais de maré.
		Depósitos de Planícies Flúvio-Estuarina 2 - sedimentos pelíticos (argila e silte) a silticos-arenosos, coloração cinzenta na base e amarelada no topo, em áreas de várzea, influenciados diariamente total ou parcialmente pelas marés.
		Depósitos de Planície Flúvio-Estuarina 1 - sedimentos pelíticos (argila e silte) de coloração cinza amarelada, influenciados sazonalmente pelas águas pluviais e/ou eventualmente pelas marés, distribuídos ao longo dos campos inundáveis.
	TERCIÁRIO	Formação Barreiras - sedimentos areno-argilosos, semi-inconsolidados, de coloração amarelo-avermelhada contendo lentes e níveis centimétricos de microconglomerados e conglomerados para o topo do perfil. Concreções lateríticas distribuem-se principalmente no contato entre porções mais argilosas e mais arenosas.
		Formação Barreiras - sedimentos argilosos, semi-inconsolidados, de coloração cinza esbranquiçada, mosqueados, gradando para sedimentos argilo-arenosos para o topo, contendo concreções lateríticas. Localmente são encontradas lentes argilosas de coloração cinza escura, contendo restos vegetais.

Fonte: Adaptado de IEPA (2006).

3.3. GEOMORFOLOGIA

Macapá fica na zona costeira do Estado do Amapá e sofre forte influência do Rio Amazonas e do Oceano Atlântico. Por esse motivo, na zona costeira do Amapá formou-se uma planície devido os depósitos fluviomarinhos de sedimentos de origem quaternárias carregados pela maré.

Chamada de Planície fluviomarinha Macapá-Oiapoque, ao norte a planície é considerada predominantemente marinha e ao sul os processos fluviais foram determinantes para sua formação.

De acordo com o IBGE (2009), as planícies fluviomarinhas são caracterizadas por áreas planas resultantes de processos de acumulação fluvial e marinha, sujeita a

inundações periódicas, onde podem comportar canais fluviais, manguezais, cordões arenosos e deltas. Ocorre principalmente nas baixadas litorâneas, próximo às embocaduras fluviais.

Outra zona geomorfológica presente no Amapá está situada na parte centro-oeste e cobre grande parte do Estado, são os Escudos das Guianas ou Planalto das Guianas, estes representam morros ou picos que ultrapassam 600 metros ao nível do mar, como é o caso da Serra do Tumucumaque.

Figura 15 - Unidades morfoestruturais do estado do Amapá.



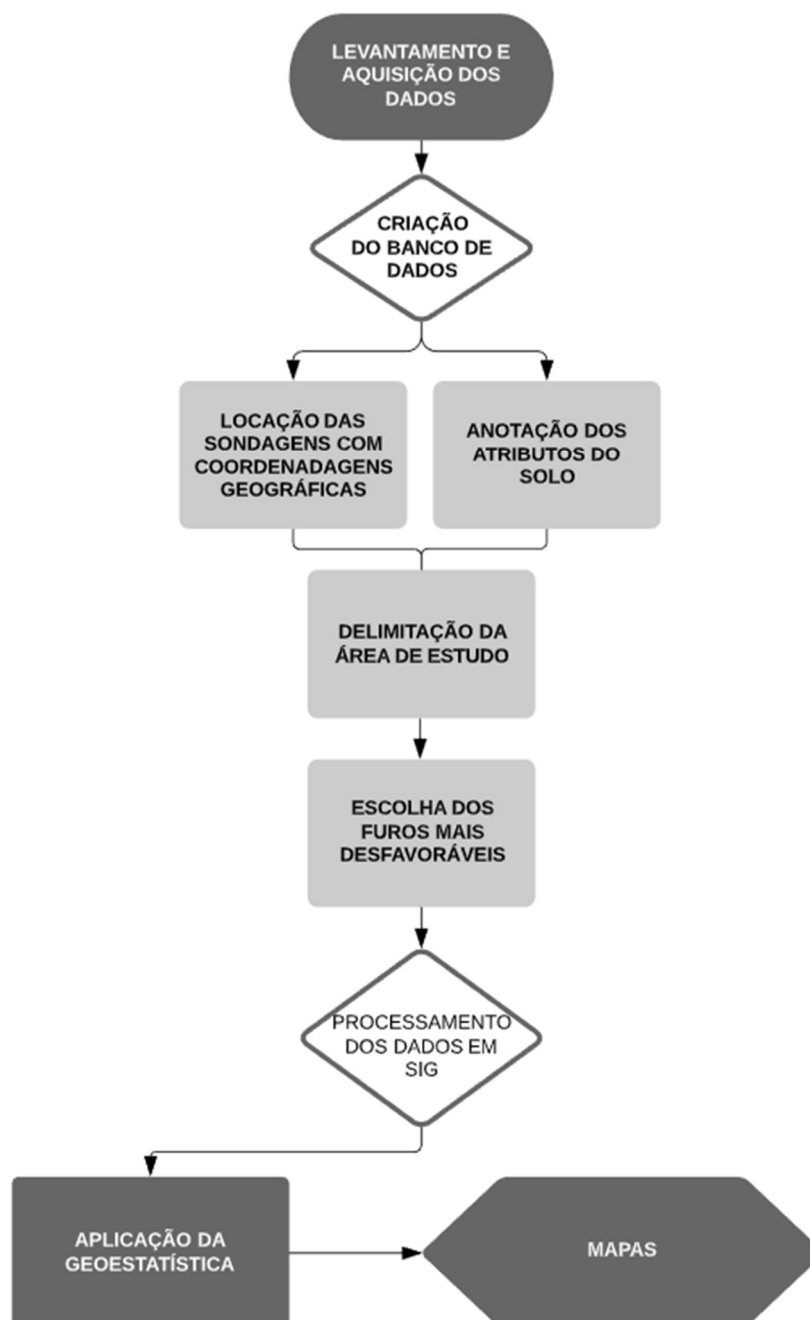
Fonte: Boaventura e Narita (1974); Lima et al. (1991) apud Silveira (1998).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta etapa do trabalho será explanado o procedimento utilizado para levantamento, tratamento e confecção dos mapas, em plataforma SIG, que serão feitos a partir dos dados obtidos das sondagens que foram disponibilizados por uma das poucas empresas especializadas em sondagem que existem na capital amapaense.

Todo o procedimento, desde a aquisição dos dados até os mapas finais, pode ser visualizado no fluxograma da figura 16.

Figura 16 - Fluxograma do método do trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.1. LEVANTAMENTO E AQUISIÇÃO DOS DADOS

Os dados utilizados durante o trabalho foram disponibilizados pela empresa Pinheiro Construções e Engenharia LTDA. No acervo disponibilizado pela empresa, se faziam presentes 132 sondagens distribuídas por todo o estado e algumas em ilhas do Pará que fazem fronteiras com o Amapá. Desse total de sondagens, 36 sondagens se encontravam dentro da área de estudo e, por motivos óbvios, se tornaram objeto de estudo.

No material repassado pela empresa existiam os arquivos referentes as sondagens em diversos formatos (Word, Excel, DWG), os materiais necessitaram de um tratamento especial para se obter o banco de dados geotécnicos, elemento fundamental para a criação dos mapas que estão em questão neste estudo.

4.2. CRIAÇÃO DO BANCO DE DADOS

A elaboração do banco de dados é uma etapa que necessita bastante atenção pois sua estrutura deve garantir que o *software* consiga fazer a leitura corretamente dos dados de entrada que ali estão sendo inseridos. O banco de dados é onde está representado os atributos do solo (NSPT, NA e a cota do impenetrável) que foram retirados dos perfis de sondagens.

A confecção do banco de dados se divide na locação dos furos de sondagens dentro da área de estudo, na escolha do furo mais desfavorável e na criação da planilha em Excel.

4.2.1. LOCAÇÃO DOS FUROS

Para a locação dos furos de sondagens, os perfis de sondagens, disponibilizados em planilhas Excel, e as plantas de localização, disponibilizadas em arquivo DWG, se tornaram peças essenciais para a consulta do endereço correto.

Tendo em vista que nenhum dos laudos disponibilizados pela empresa possuíam as coordenadas geográficas dos furos, foi necessário buscar nas plantas de localização e no relatório de sondagem o endereço da área onde a sondagem foi realizada. Somente com as coordenadas o georreferenciamento dos furos se tornou exequível.

O *software ArcGis 10.3* foi muito importante na obtenção das coordenadas a partir de sua base OpenStreetMap, foi através dele que se identificou cada endereço e obteve-se a coordenada geográfica. A obtenção das coordenadas a partir do *software*

supracitado se justifica pela facilidade em encontrar o endereço e, ao mesmo tempo, obter as coordenadas no sistema escolhido.

O levantamento das coordenadas foi realizado no sistema de coordenadas *Universal Transverso de Mercator* (UTM), utilizando-se o Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas datado em 2000, SIRGAS 2000, na Zona 22N.

Como o maior volume de obras civis se concentra na parte central da cidade, grande parte dos furos estavam presentes nessa área. Dessa forma, para obter um melhor resultado na interpolação, foi definida uma área que tentou encaixar o maior número de sondagens possíveis para que os resultados da aplicação da geoestatística fossem satisfatórios.

Figura 17 - Furos de sondagem locados e área de estudo delimitada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A área de estudo é o limite onde será interpolado os dados, está representada pela linha em vermelho e o os furos mais desfavoráveis de cada sondagem realizada estão representados pelos círculos em amarelo.

O campo delimitado pela linha em vermelho pois uma área total de 4,9 km², tem início na Avenida Iracema Carvão Nunes, descendo para Rua Hidelmar Maia, retorna para a frente da cidade pela Avenida dos Caramurus e contorna a parte frontal da cidade

até se encontrar com o início da delimitação. A parte da cidade que será estudada contempla todo o bairro Central e do Trem e parte dos bairros Santa Rita e Beírol.

Para delimitar a área de estudo, foi criado um *shapefile* de pontos dentro do *ArcMap* e adicionou-se diversos pontos com a finalidade de nortear o caminho correto da área. Posteriormente, criou-se um *shapefile* de polígono e, a partir dos pontos locados anteriormente, foi possível criar o polígono que representou a área de estudo e será um elemento importante para a aplicação da krigagem dos dados.

4.2.2. ESCOLHA DOS FUROS

Grande parte das sondagens possuíam mais de um furo, em média três, porém, para se obter um melhor resultado da interpolação, foi escolhido apenas um furo de cada obra. Com o objetivo de adicionar ao banco de dados apenas as informações do furo mais desfavorável de cada trabalho realizado, criou-se parâmetros para a escolha com grau de importância pela ordem no qual se encontram adiante:

- O furo com a menor média de golpes necessários para cravar os 30cm finais;
e
- O furo com o lençol freático mais aflorado.

4.2.3. ELABORAÇÃO DA PLANILHA

Como já citado anteriormente, na elaboração da planilha necessitou-se de bastante atenção pois qualquer informação que o *software* pudesse entender incorretamente comprometeria o trabalho.

Ademais, para que o *software* conseguisse processar os dados, foi preciso criar um banco de dados através de planilhas em *Excel*, totalmente compatível com o *software*, com todos os dados necessários para a interpolação. As informações básicas do banco de dados são as coordenadas geográficas obtidas de cada furo, o NSPT de cada camada, o nível do lençol freático e o nível do impenetrável à percussão.

Na confecção da planilha contento o banco de dados é possível destacar dois procedimentos que foram feitos. O primeiro foi criar colunas, cada uma com sua finalidade. Logo, outro passo importante foi preencher as informações retiradas dos perfis de sondagens, assim como as coordenadas geográficas no sistema escolhido, que foram obtidas a partir do endereço de cada sondagem presente no relatório de

sondagem. Para um melhor entendimento, abaixo está representado como a planilha foi elaborada.

Quadro 5 - *Inputs* lançados no *software*.

ID	X	Y	NA	NSPT1	NSPT2	NSPT3	NSPT4	NSPT5	NSPT6	NSPT7	NSPT8	NSPT9	NSPT10	IMPENETRÁVEL
54	492542	4674	1	4	4	7	14	14	24	50	50	50		9
52.2	492343	4042	4,9	8	33	34	43	50	50	50	50			8
12	492528	3923	9	2	11	12	13	21	22	30	36	43	15	10
33	492661	3874	0,6	4	2	4	10	2	2	9	13	25	50	10
7	492965	3426	10	2	2	16	19	26	32	40	47	50		9
17.2	493091	3805	9	5	13	17	18	27	34	48	50	50		9
24.2	493081	3453	6,9	14	6	27	34	45	47	50	50	50	17	10
22	493302	3441	0,8	2	4	2	2	2	6	7	6	9	50	10
45.1	493553	4048	3,6	8	13	12	7	15	22	50	50	50	50	10
4	493727	4172	9,9	6	16	28	27	32	37	46	50	50		9
55.3	494015	4216	6	13	21	22	26	42	50	14	14	50	14	10
1	493696	3740	0,7	2	1	1	1	1	1	8	12	14		9
53	494172	3664	0,75	4	2	2	2	17	46	50	50			8
2	494162	3634	0,51	3	2	2	2	2	2	2	2	35	9	10
46	494109	3255	0,9	3	6	2	28	10	2	2	7	9	32	10
51.2	494383	4082	5	16	17	21	22	19	12	11	18	24		9
28.2	492154	2449	7	11	13	23	27	35	43	50				7

Fonte: Elaborado pelo autor.

Cada coluna tem uma função específica que será interpretada pelo *software* para que se possa localizar o furo a partir da coordenada que consta na planilha e, posteriormente, interpolar os valores dos atributos de cada ponto georreferenciado através da tabela. Abaixo será descrito qual a função de cada coluna.

Quadro 6 - Função de cada *input* lançado no *software*.

COLUNAS	DESCRIÇÃO
ID	Nome do ponto (furo de sondagem). Neste caso, o nome foi escolhido por ordem de locação dos furos.
X	Coordenadas UTM da longitude em SIRGAS 2000, Zona 22N, em metros.
Y	Coordenadas UTM da latitude em SIRGAS 2000, Zona 22N, em metros.
NA	Nível do lençol freático daquele furo específico.
NSPT	Representam o número de golpes necessário para cravar os últimos 30cm do amostrador no solo para cada camada de um metro.
IMPENETRÁVEL	Profundidade na qual não foi possível continuar a sondagem, de acordo com os critérios de paralisação presentes na NBR 6484/2001.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Com o objetivo de padronizar e obter um melhor resultado da interpolação, os furos que obtiveram um NSPT superior a 50 golpes foram representados por 50 golpes. Os valores das colunas dos NSPT's que foram marcados de amarelo, possuíam valor maior que 50 golpes, mas foi modificado para 50. Dessa forma, será possível obter

um mapa com menos classificações e, por consequência, mais confortável de visualizar.

Da mesma forma foi feito na coluna do NA, onde não foi encontrado a profundidade do lençol freático, está sendo considerada a profundidade do impenetrável do furo em questão. Essa medida foi tomada afim de conseguir interpolar o máximo de furos possíveis, visto a quantidade limitada de sondagens disponíveis.

4.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS EM SIG

Finalizada a confecção do banco de dados, deu-se início a aplicação da geoestatística para elaborar os mapas geotécnicos dentro da área de estudo.

Quanto ao tipo de interpolação, foi utilizada a krigagem do tipo ordinária por se tratar de um método já consagrado na ciência do solo (PESCIM, URBANO, DEMÉTRIO, 2010, *apud*, SANTOS, 2016). Porém, em cada mapa foi feita a observação do semivariograma.

No intuito de se obter o menor erro possível, foram feitas análise de alguns semivariogramas para os modelos diferentes de krigagem. Após a análise, identificou-se que, apesar da pouca diferença entre eles, o modelo exponencial apresentava o menor erro padrão médio. Dessa forma, optou-se por utilizar o modelo exponencial.

Portanto, aplicou-se a interpolação do tipo krigagem ordinária sobre o banco de dados criado e obteve-se como resultado os mapas que serão apresentados no capítulo em seguida.

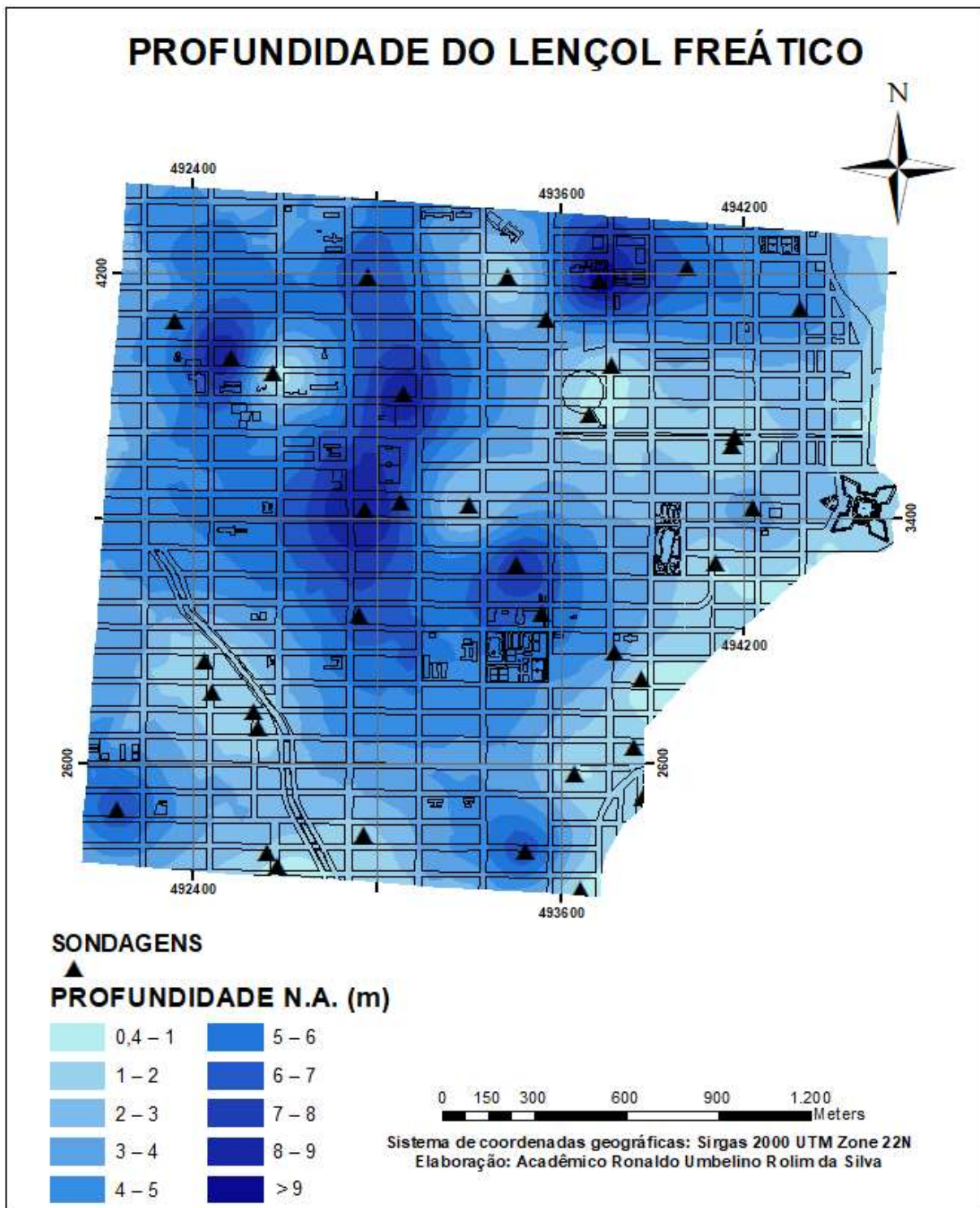
5. APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

O presente capítulo tem o objetivo de apresentar os resultados alcançados do estudo em termos de geração de superfícies que representassem o nível do lençol freático, a cota do impenetrável à percussão e os valores do NSPT, delimitado pela área de estudo que se encontra na cidade de Macapá-AP.

5.1. PROFUNDIDADE DO LENÇOL FREÁTICO.

O Mapa 1, que representa a profundidade do lençol freático, foi desenvolvido a partir de todas as sondagens disponíveis. As sondagens onde o lençol freático não foi alcançado, considerou-se a cota do impenetrável do furo, o procedimento foi adotado com o objetivo de utilizar o máximo de sondagens disponível para gerar um produto mais próximo da realidade.

Mapa 1 - Profundidade do lençol freático.



Fonte: Elaborado pelo autor.

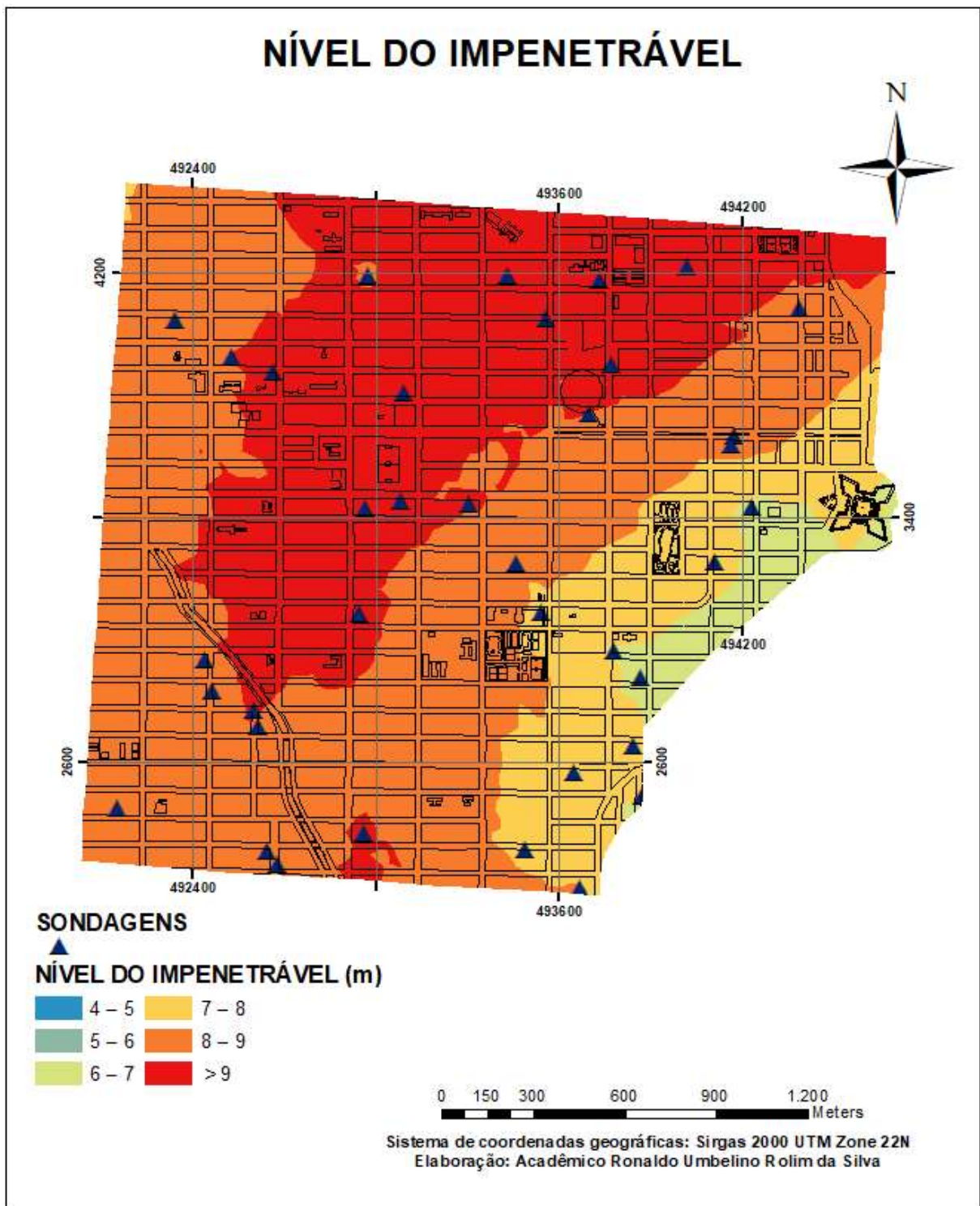
Ao analisar Mapa 1, é possível verificar que o nível freático se encontra mais aflorado nas regiões mais claras, as quais tendem a situar-se próximas ao Rio Amazonas, representando a porção leste da área de estudo. Ademais, nas regiões mais claras que não fazem fronteira com o Rio Amazonas, o lençol freático próximo a superfície se justifica pelos dois canais presentes na área de estudo, estes canais são

responsáveis pela drenagem das águas pluviais da cidade e se encontram em áreas mais baixas.

5.2. NÍVEL DO IMPENETRÁVEL.

A superfície do impenetrável à percussão foi gerada aplicando-se a técnica de krigagem a partir de todos os furos dentro da área de estudo. Cerca de 85% dos furos atingiram o impenetrável na camada de 10 metros, os que foram além. O Mapa 2 apresenta o mapa de profundidade do impenetrável à percussão para a área de estudo.

Mapa 2 - Nível do impenetrável à percussão.



Fonte: Elaborado pelo autor.

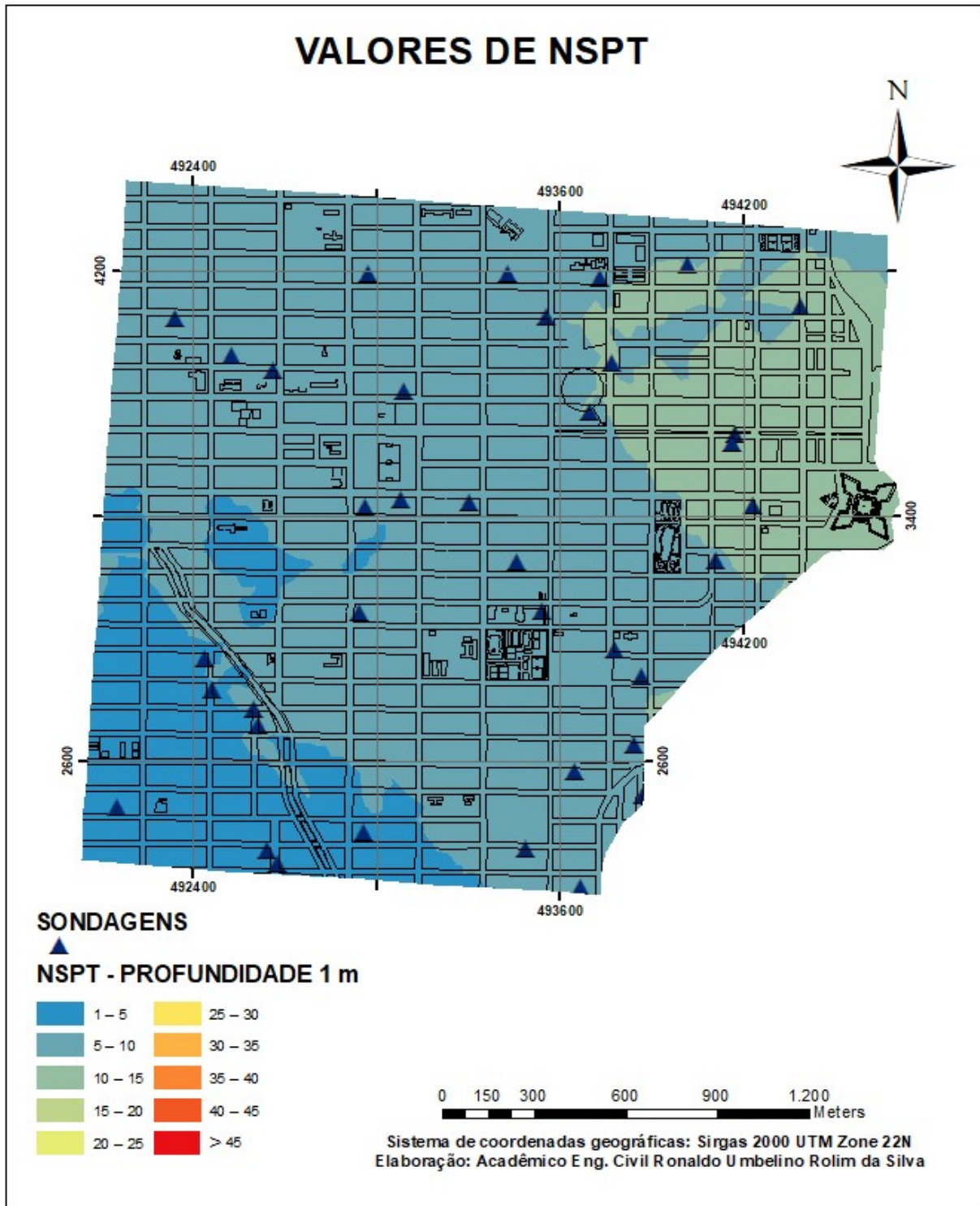
As cores mais claras do mapa representam um nível do impenetrável mais próximo ao Rio Amazonas, enquanto que o impenetrável com mais de nove metros de profundidade se concentra na parte norte e central da área de estudo.

5.3. VALORES DE NSPT.

A princípio o objetivo era gerar dez mapas que representasse o NSPT até a décima camada. Porém, conforme algumas sondagens foram atingindo o impenetrável, as mesmas estavam sendo retiradas do banco de dados, ou seja, não estavam sendo usadas na aplicação da interpolação. Como a quantidade de sondagens já é limitada, cada sondagem dentro da área de estudo tem sua importância para conseguir alcançar mapas com o menor erro possível.

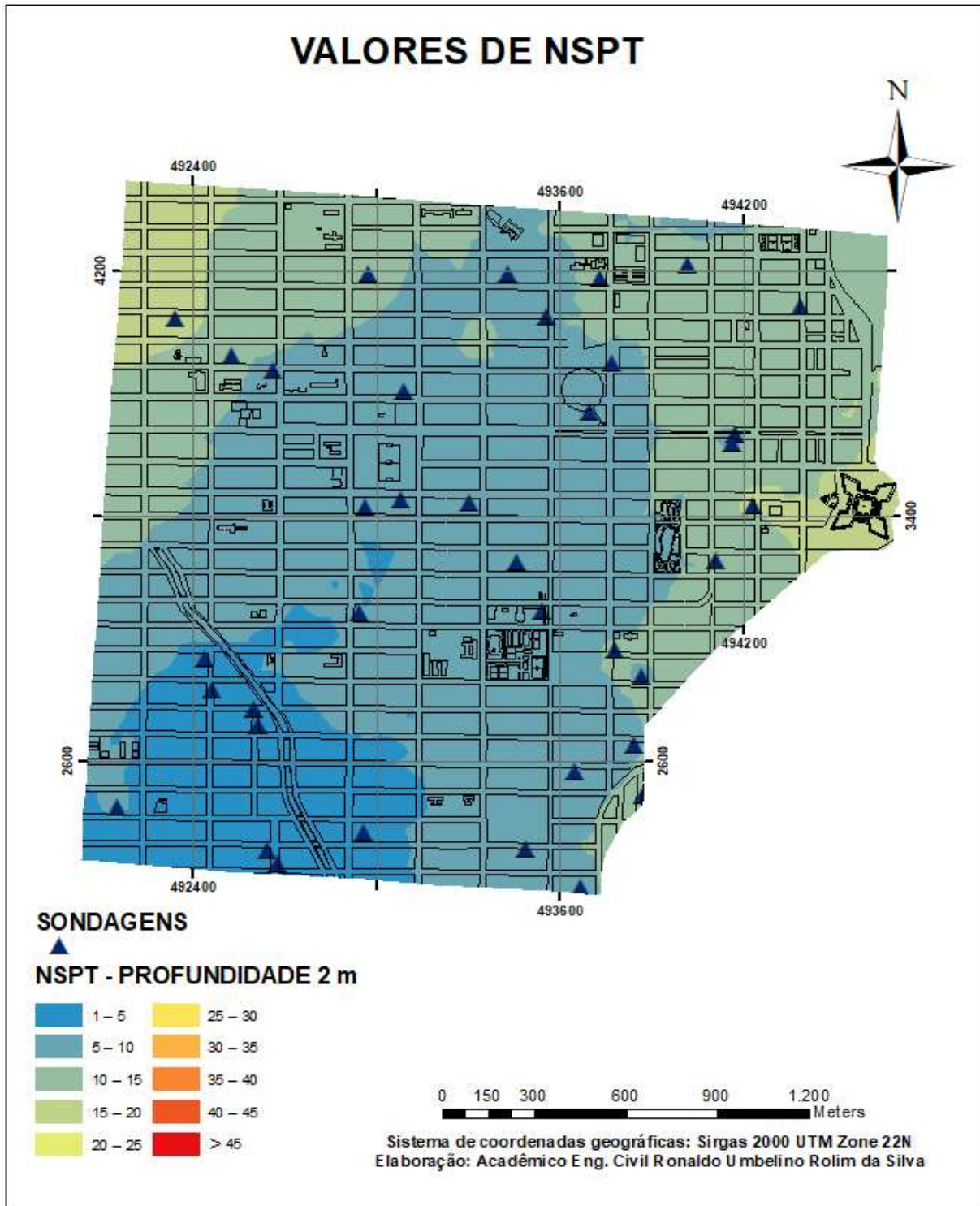
Deste modo, percebeu-se que, com as sondagens que restaram, só compensava gerar mapas com erros satisfatórios até os oito metros de profundidade. Portanto, serão apresentados a seguir oito mapas dos valores de NSPT, cada mapa representando uma camada de um metro.

Mapa 3 - NSPT (Profundidade 1 m).



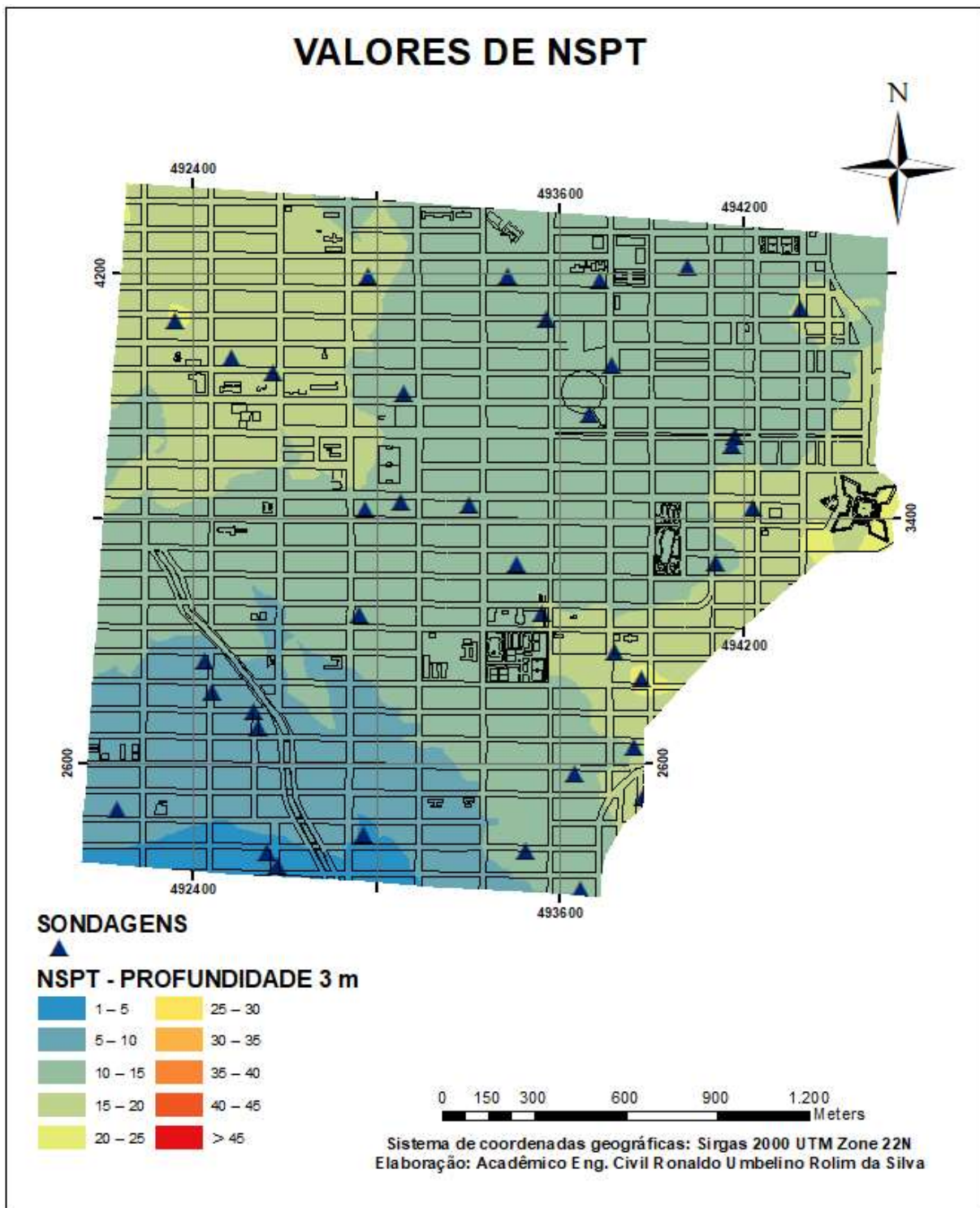
Fonte: Elaborado pelo autor.

Mapa 4 - NSPT (Profundidade 2 m).



Fonte: Elaborado pelo autor.

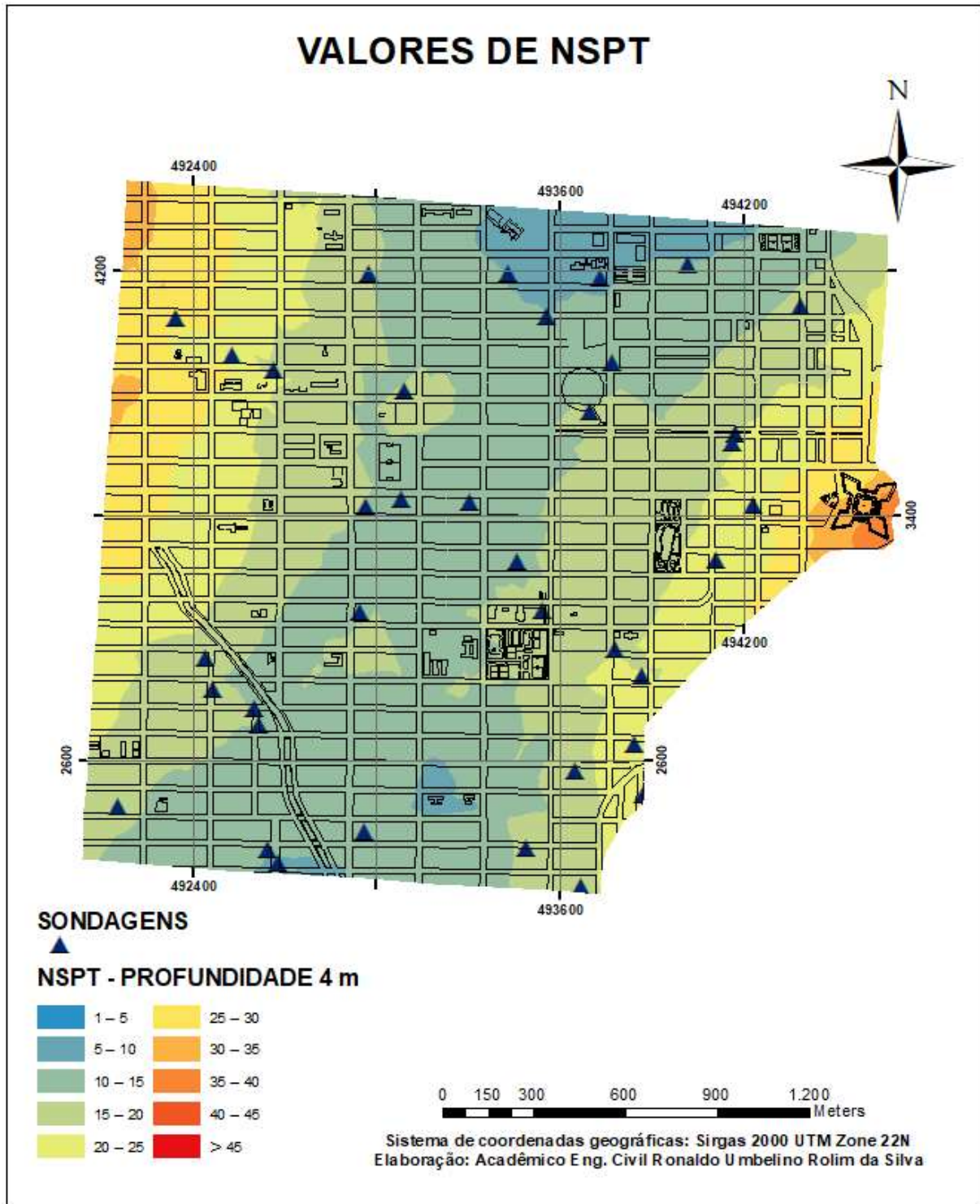
Mapa 5 - NSPT (Profundidade 3 m).



Fonte: Elaborado pelo autor.

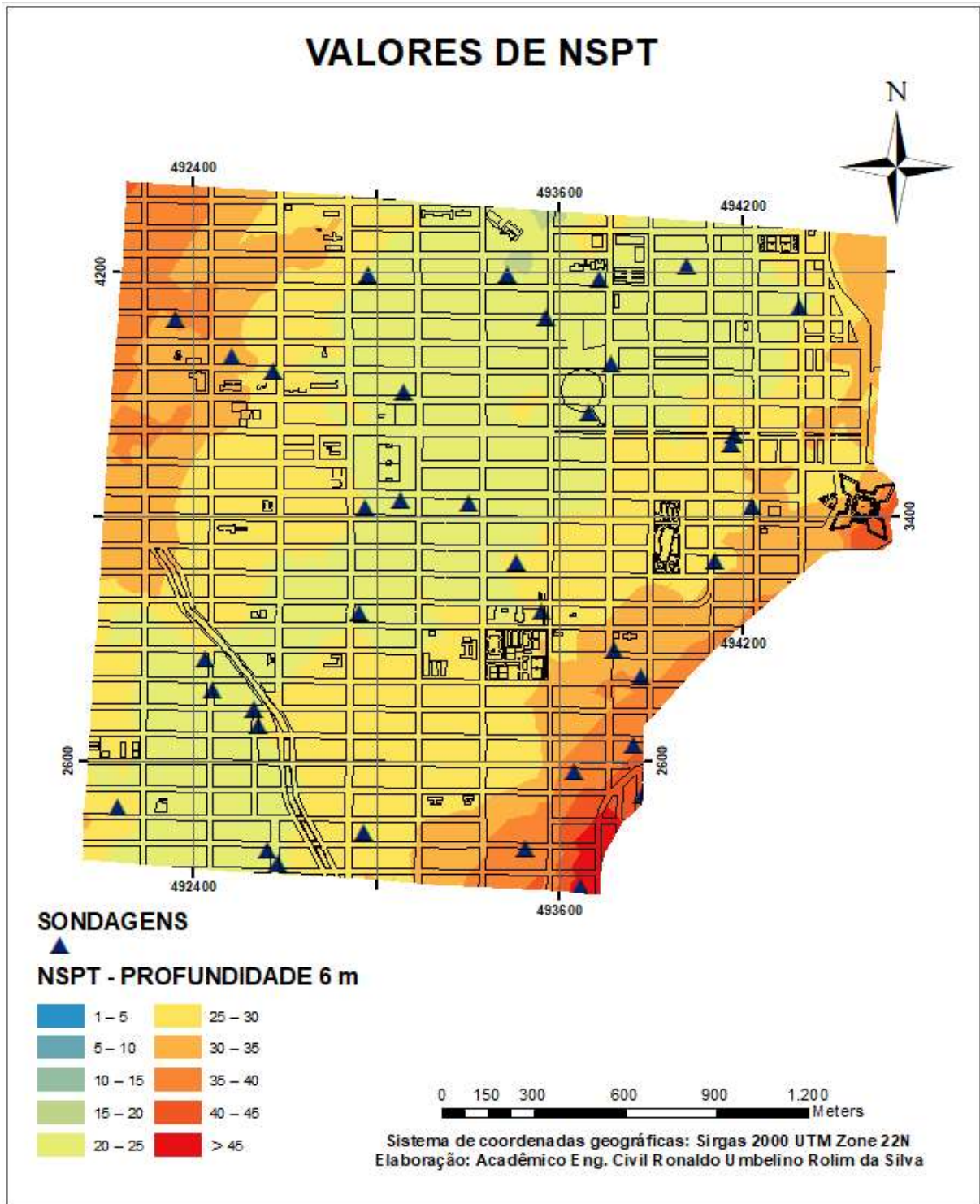
Ao analisar o Mapa 3, visualmente, é possível perceber tonalidades azuladas para o primeiro metro de profundidade, correspondentes as faixas de valores reduzidos de NSPT, ao longo de toda a área de estudo. Porém, a 3 metros de profundidade (Mapa 5), há um avanço em partes das regiões noroeste e leste para tonalidades inerentes a valores de NSPT intermediários (tons esverdeados).

Mapa 6 - NSPT (Profundidade 4 m).



Fonte: Elaborado pelo autor.

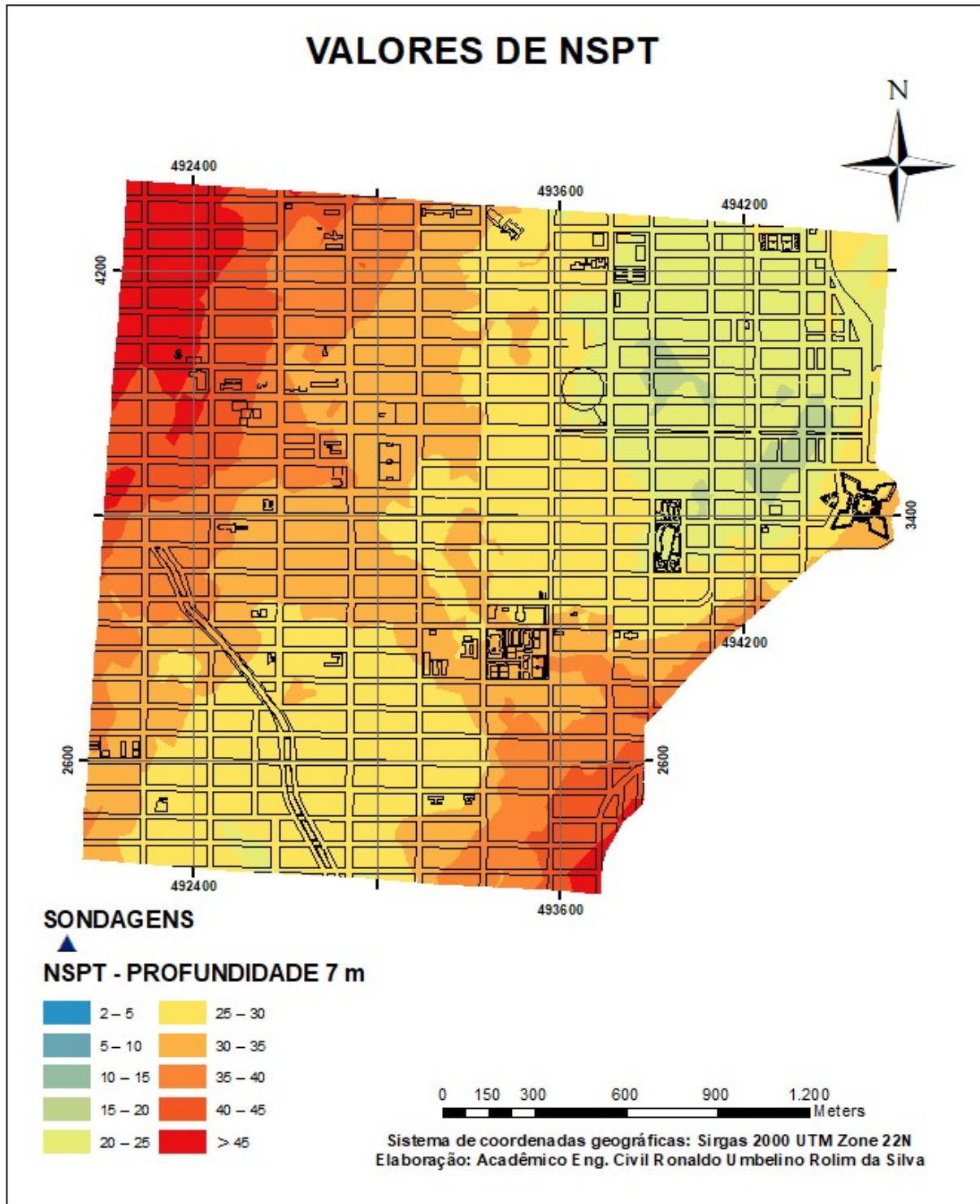
Mapa 8 - NSPT (Profundidade 6 m).



Fonte: Elaborado pelo autor.

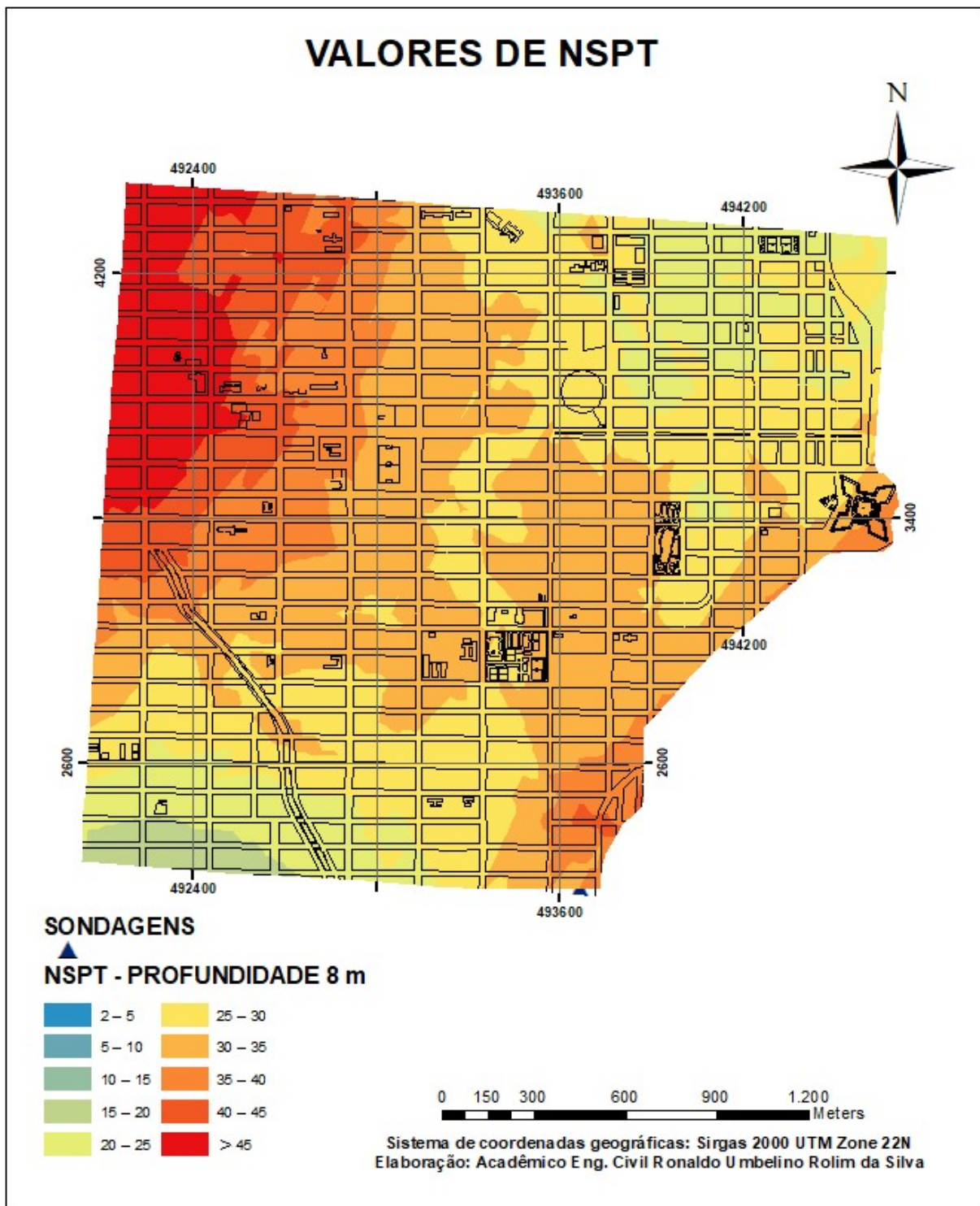
Os mapas gerados para 4 metros (Mapa 6), 5 metros (Mapa 7) e 6 metros de profundidade (Mapa 8) evidenciam o aumento progressivo da resistência do solo, em termos de NSPT, principalmente na região que faz margem com o Rio Amazonas e na região noroeste.

Mapa 9 - NSPT (Profundidade 7 m).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Mapa 10 - NSPT (Profundidade 8 m).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os Mapas desenvolvidos para 7 metros (Mapa 9) e 8 metros de profundidade (Mapa 10) indicam o início de uma consolidação de altos valores de NSPT (tonalidades amarelo e vermelho), visto que, no primeiro mapa, cerca de 85% da área de estudo se encontra dentro da faixa de resistência do solo mais elevada (NSPT entre 25 - 50),

enquanto que, na segunda, esse percentual aumenta para 90%. Tais valores de NSPT são considerados elevados e próximos ao impenetrável à percussão.

De modo geral, os solos de menores resistências (coloração azul e esverdeada) vão reduzindo sua participação nas camadas mais profundas até o momento em que desaparecem. Conseqüentemente, a medida em que a profundidade aumenta, cresce o percentual de área que possui valores altos de NSPT. Tal comportamento é percebido nas zonas próximas ao Rio Amazonas e na região Noroeste da área estudada.

Os mapas não apresentaram mais áreas com tons de vermelho pois, pela limitação de furos, só foi possível chegar com resultados satisfatórios até a oitava camada. No entanto, se tivéssemos conseguido gerar mapas para camadas mais profundas, muito provavelmente os tons de vermelho estariam mais presentes.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente capítulo apresenta as considerações finais do trabalho desenvolvido, mediante a observação dos seus objetivos e de recomendações deixadas para estudos futuros.

6.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho trata do desenvolvimento de um banco de dados geotécnico para posterior lançamento em ambiente SIG por meio de informações retiradas de laudos de sondagens SPT de furos que se encontravam dentro da área de estudo. Desse modo, foram apresentadas no trabalho as etapas que antecederam a criação do banco de dados, desde o seu levantamento e tratamento dos dados até o lançamento dos dados georreferenciados e a criação dos mapas. Em continuidade, cabe relatar que a maior dificuldade ao realizar o trabalho foi obter as coordenadas geográficas de cada furo, tendo em vista que nenhum dos furos utilizados possuíam essa informação em seus respectivos laudos.

Adiante, o estudo apresenta o potencial do uso do banco de dados para análise do perfil geológico-geotécnico. Nesse sentido, o uso da ferramenta SIG se mostrou indispensável, tendo em vista que a interface do *software* permite realizar, de maneira prática e eficiente, as operações de georreferenciamento e, principalmente, a aplicação da modelagem geoestatística para realização das interpolações, gerando os mapas apresentados ao longo deste estudo.

Na análise dos mapas, algumas características da região puderam ser extraídas. A princípio, verificou-se que a área de estudo é composta por solos moles, propriedade das argilas, especialmente na região central e próxima aos dois canais da cidade. Por outro lado, a região a noroeste da área de estudo apresentou subsolo com característica de solos residuais, visto que se situam em locais de maiores altitudes face as demais zonas analisadas e possuem resistência mais elevada quando comparados aos solos sedimentares.

Acerca das superfícies de impenetrável à percussão, não se verificou a predominância de uma profundidade específica. Por outro lado, houve uma distribuição quase uniforme entre as profundidades, prevalecendo a camada de 8 a 9 metros, porém a diferença não é tão grande para as demais profundidades. Dessa forma, o nível do

impenetrável mais visto no mapa varia de 6 metros até profundidades maiores que 9 metros.

Já no mapa da profundidade do lençol freático, identificou-se o nível d'água mais aflorado nas áreas que fazem margem ao Rio Amazonas, como era de se esperar. No entanto, nas áreas mais centrais da área de estudo, o nível d'água está mais profundo, isto se explica por serem áreas com maiores altitudes levando o escoamento das águas pluviais para as áreas mais baixas.

Outra contribuição do trabalho foi o desenvolvimento de mapas de isovalores de NSPT e, ao realizar a análise visual, percebe-se o progressivo aumento dos valores médios de NSPT no decorrer do aumento da profundidade, principalmente nas margens do Rio Amazonas e na região noroeste da área de estudo, regiões essas que contém solos de maiores resistências.

Apesar do trabalho, a necessidade de sondagem nunca deve ser descartada, visto a variabilidade que envolve os solos. Nesse pensamento, Zuquette (2004) afirma que o mapeamento geotécnico tem o intuito de orientar, mas nunca substituir as investigações geotécnicas locais. Dessa forma, os mapas produzidos tem a função de orientar acerca da aptidão do subsolo de parte da cidade de Macapá em termos de obras de fundação e, portanto, não devem substituir as investigações geotécnicas pontuais para obtenção de parâmetros específicos para o correto dimensionamento dos elementos estruturais do empreendimento.

Os resultados do estudo tem o propósito de apresentar subsídios técnicos que possa nortear à tomada de decisão dos profissionais que trabalham na construção civil e demais interessado, visto que o banco de dados criado proporciona o conhecimento geográfico dos tipos de solos existentes na área de estudo, além de importantes parâmetros geotécnicos, fornecendo informações para a elaboração de tarefas da construção civil e ao planejamento urbano. Ademais, o banco de dados lançado no ambiente SIG e os mapas temáticos gerados, são suscetíveis a futuras atualizações e complementações.

Dessa maneira, os resultados apresentados neste estudo mostraram-se apropriados para serem usados como base para as próximas construções, compras de terreno, na orientação quanto ao tipo de fundação e no seu dimensionamento, também na análise dos investimentos preliminares, tendo em vista que será admissível prever a

profundidade das sondagens e as prováveis resistências que serão encontradas, possibilitando melhorar as estimativas, reduzir o tempo e os custos na fase de análise da viabilidade dos projetos. Ademais, os mapas podem contribuir para a comparação dos resultados de sondagens contratadas posteriormente, assim como proporciona a estimativa dos serviços de movimentação de terra que a determinada obra irá necessitar.

Portanto, o trabalho desenvolvido tem o intuito de contribuir na fundamentação das ações de planejamento e gestão de uso do solo e a instalação de futuros empreendimentos na parte central da cidade de Macapá-AP, à medida que expõem informações a respeito da presença e distribuição espacial de aspectos e parâmetros geológicos importantes para a engenharia de fundações.

6.2. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Apesar do trabalho, a limitação de informações dificultou o estudo, mas não inviabilizou a criação dos mapas. Para tanto, sugere-se para estudos futuros as seguintes questões:

- Obter mais laudos de sondagens junto a outras empresas através de cooperação técnica com a comunidade acadêmica, tendo como objetivo futuro realizar a continuidade do trabalho. Porém, com mais dados, aumenta-se a confiabilidade dos mapas em face do maior número de informações e, conseqüentemente, diminui o erro das estimativas;
- Conforme se obtenha mais laudos de sondagens, ampliar a área de estudo para abranger mais bairros, até englobar toda a cidade;
- Obter junto a Prefeitura Municipal de Macapá ou o Exército, a planta topográfica da cidade para gerar um Modelo Digital de Terreno (MDT) para auxiliar na análise dos mapas;
- Selecionar furos de sondagens em períodos chuvosos e de seca para analisar o comportamento do lençol freático por meio de mapas criados;

Por fim, é válido destacar a importância da contínua atualização do banco de dados geológico-geotécnicos, assim como a complementação de novas informações são recomendadas, pois a autenticidade dos mapas gerados é diretamente proporcional à robustez do banco de dados utilizado.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALATORRE, Luis C. *et al.* Spatial and Temporal Evolution of the Static Water Level of the Cuauhtemoc Aquifer during the Years 1973, 1991 and 2000: A Geographical Approach. **Journal of Geographic Information System**, 2014, Vol. 6, nº 5, p. 572-584. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.4236/jgis.2014.65047>. Acesso em: 10 out. 2019.

ANGELICO, J. C. Desempenho da co-krigagem na determinação da variabilidade de atributos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 2006, Vol. 30, nº 6, p. 931-936. ISSN 1806-9657. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000600002>. Acesso em: 14 out. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6122: Projeto e execução de fundações**. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6484: Solo - Sondagens de simples reconhecimento com SPT - Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2001.

BULHÕES, Eduardo Manuel R.; DRUMOND, Minouche Klecz. Análise e testes de métodos de interpolação para dados batimétricos e granulométricos: estudo de caso em armação dos Búzios, Rio de Janeiro, Brasil. **Caderno de Estudos Geoambientais – CADEGEO**, 2012, Vol. 3, nº 1, p. 05-31. Disponível em: <http://www.cadegeo.uff.br/index.php/cadegeo/article/view/6>. Acesso em: 20 out. 2019.

CARUSO, C.; QUARTA, F. Interpolation Methods Comparison. **Journal Computers Math Applic**, Great Britain, Vol. 35, nº 12, p. 109-126, 1998. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0898122198001011?via%3Dihub>. Acesso em: 14 out. 2019.

CINTRA, J. C. A.; AOKI, N. **Fundações por estacas: projeto geotécnico**. 1 Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

COELHO, A. M.; ALVES, M. G.; OLIVEIRA, M. G. O uso de técnicas de geoprocessamento e mapeamento geológico-geotécnico na elaboração do mapa de potencial de uso e ocupação do solo do município de Itaperuna/RJ. In: **XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), INPE, p. 2447-2454**. Florianópolis, 2007.

DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. Tradução All Tasks. 6 Ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

EASTMAN, J. R. **IDRISI for Windows**: Introdução e Exercícios tutoriais. Tradução de Heinrich Hasenack e Eliseu Weber. Porto Alegre: UFRGS Centro de Recursos Idrisi, 1998.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Geoestatística aplicada na agricultura de precisão utilizando o vesper**. Brasília, EMBRAPA, 2015. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1039734/geoestatistica-aplicada-na-agricultura-de-precisao-utilizando-o-vesper>. Acesso em: 13 out. 2019.

FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicações**. 1 Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.

FONTELES, H. R. N. **Caracterização Geotécnica do Subsolo da Porção Nordeste do Município de Fortaleza (CE) com Base em Geoestatística**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2003.

HACHICH, Waldemar. Ed al. **Fundações**: teoria e prática. 2 Ed. São Paulo: PINI, 1998.

HAMADA, Emília; GONÇALVES, R. R. V.. **Introdução ao Geoprocessamento**: princípios básicos e aplicação. 1 Ed. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2007.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de geomorfologia**. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. ISSN 0103-9598 Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv66620.pdf>. Acesso em: 02 out. 2019.

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília, EMBRAPA, 2004. ISBN: 85-7383-260-6. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/index.html>. Acesso em: 10 out. 2019.

_____. **Geoprocessamento para projetos ambientais**. 2 Ed. rev. e aum. São José dos Campos: INPE, 1998. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/. Acesso em: 05 out. 2019.

LANDIM, Paulo M. B. **Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas**. Lab. Geomatemática, DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Texto Didático 03, 2000.

LANDIM, Paulo M. B. **Sobre Geoestatística e mapas**. Disponível em: https://www.fca.unesp.br/Home/Instituicao/Departamentos/CienciadoSolo/gepag/t_didatica_2006_v02n01_p019-033_landim.pdf. Acesso em: 09 out. 2019.

TecGEO Módulo 5: Geoestatística, 2015. 1 vídeo (7m22s). 2015. Publicado pelo canal NOVA IMS – NOVA Information Management School. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=8ESB4bTInqo>. Acesso em: 10 out. 2019.

ROSA, Roberto. **Introdução ao geoprocessamento**. Laboratório de Geoprocessamento, IG, UFU, Nota de aula, 2013.

SALAME, Antonio Massoud; JÚNIOR, Júlio Augusto de A. **Fundações em Belém-PA: práticas e mapeamentos**. 1 Ed. Belém: UNAMA / UFPA, 2006.

SALGADO, Júlio C. P. **Técnicas e práticas construtivas: da implantação ao acabamento**. 1 Ed. São Paulo: Érica, 2014.

SANTOS, Juliana Vieira dos. **Aplicação de SIG para análise do perfil geológico-geotécnico do campus sede da UFSC e elaboração de cartas de aptidão para fundações utilizando sondagem SPT**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2016.

SCHNAID, Fernando; ODEBRECHT, Edgar; **Ensaio de Campo: e suas aplicações à Engenharia de Fundações**. 2 Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.

SOARES, Wanessa Cartaxo. **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**. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2011.

THIESEN, Stephanie. **Aplicação de ferramenta SIG para mapeamento geotécnico e cartas de aptidão para fundação a partir de ensaios SPT – um estudo de caso em Blumenau/SC**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em

Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Florianópolis, 2016.

VELLOSO, Dirceu A.; LOPES, Francisco R. **Fundações**: critérios de projeto, investigação do subsolo, fundações superficiais, fundações profundas. 1 Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

YAMAMOTO, Jorge K.; LANDIM, Paulo M. B. **Geoestatística**: conceitos e aplicações. 1Ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

ZUQUETTE, Lázaro V.; GANDOLFI, Nilson. **Cartografia Geotécnica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.