

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

GABRIEL SMITH NUNES DA SILVA

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO NA REGIÃO NORDESTE DA ÁREA URBANA DE
CAÇAPAVA DO SUL/RS**

**Caçapava do Sul
2021**

GABRIEL SMITH NUNES DA SILVA

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO NA REGIÃO NORDESTE DA ÁREA URBANA DE
CAÇAPAVA DO SUL/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Geologia.

Orientador: Me. Diogo Peixoto Cordova

**Caçapava do Sul
2021**

GABRIEL SMITH NUNES DA SILVA

MAPEAMENTO GEOTÉCNICO NA REGIÃO NORDESTE DA ÁREA URBANA DE CAÇAPAVA DO SUL/RS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Geologia da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 01 de outubro de 2021.

Banca examinadora:

Prof. Me. Diogo Peixoto Cordova
Orientador
(UNIPAMPA)

Me. Fernando A. Cantini Cardozo

Geóloga Haline Dugolin Ceccato



Assinado eletronicamente por **DIOGO PEIXOTO CORDOVA, PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 06/10/2021, às 10:38, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.

Assinado eletronicamente por **Haline Dugolin Ceccato, Usuário Externo**, em 06/10/2021, às 12:19,



conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



Assinado eletronicamente por **Fernando Alves Cantini Cardozo, Usuário Externo**, em 08/10/2021, às 09:00, conforme horário oficial de Brasília, de acordo com as normativas legais aplicáveis.



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.unipampa.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0632913** e o código CRC **DA3C3BFE**.

Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul

GABRIEL SMITH NUNES DA SILVA

**MAPEAMENTO GEOTÉCNICO NA REGIÃO NORDESTE DA ÁREA URBANA DE
CAÇAPAVA DO SUL/RS**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Geologia da
Universidade Federal do Pampa, como
requisito parcial para obtenção do Título de
Bacharel em Geologia.

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 01 de outubro de 2021.

Banca examinadora:

Prof. Me. Diogo Peixoto Cordova
Orientador
(UNIPAMPA)

Me. Fernando A. Cantini Cardozo

Geóloga Haline Dugolin Ceccato

Dedico este trabalho à minha mãe, Maria Amélia, e ao meu Pai, Luiz Ricardo, exemplos de amor, dedicação e companheirismo.

AGRADECIMENTOS

O agradecimento, em seu sentido literal é relacionado ao reconhecimento e corresponde a gratificação por algo ou alguém. Dito isso, agradeço a vida e a toda sua complexidade que coincide com a sua perfeição. Agradeço a oportunidade de ter acesso a um ensino público e de qualidade, que com certeza me proporcionou ensinamentos que vão muito além dos conhecimentos técnicos e científicos.

Agradeço aos meus pais Ricardo e Milu, ao meu irmão Bruno, e a minha prima Rafaela, pessoas da qual tenho orgulho de dizer que são minha família, minha base e ponto de descanso necessário para enfrentar todos os “B.Os” vividos nestes quase 6 anos de faculdade.

Agradeço aos parceiros de vida, em especial Gian e Ricardo que mesmo estando longe sempre que podiam vinham a Caçapava para vivermos momentos que foram marcantes para todos nós.

Agradeço aos amigos que desenvolvi durante o curso:

- Ayrton, Juliana e Ravi (o bebê da turma), pessoas que compartilhei o teto por quase quatro anos e me ensinaram muito;

- Toda galera da República Geoloki (lugar de resistência, estudo e de vez em quando muita farra), deixo um destaque ao meu parceiro André Gustavo (Andrézin), pessoa que me proporcionou momentos incríveis nesta cidade.

- Amigos que marcaram ao menos uma parte deste período que levarei para sempre em meu coração. Deixo um agradecimento especial para: Divino Augusto (Gutin), Ju Gomides, Alê Carniel, Dimitri, Andreza (Psarin), V. Gabriel (VG), Kiara, Jean (Salamin), Caio Segall, Jeferson (Geólogo Careca) e Renan (Fly), pessoas que com certeza sempre que houver a oportunidades estaremos juntos.

Agradeço ao meu orientador Diogo Cordova, pelas incansáveis ajudas para a elaboração do projeto juntamente com Lenon e Marcus Vinicius, pessoas que tiveram um papel importante na elaboração dos resultados do trabalho.

Deixo um agradecimento especial a pessoa que sem ela, essa graduação não seria a mesma coisa. Ela que foi a primeira pessoa que conversei antes mesmo de chegar na cidade e foi quem mais acompanhou todas as fases deste período. Gabriela, obrigado pelo carinho e amor compartilhado durante esse período. Levarei na minha memória todos os momentos que vivemos juntos, e não poderia deixar de dizer que: NO FIM DEU TUDO CERTO, estamos nos formando!!!

Por fim agradeço a todos aqueles que contribuíram diretamente ou indiretamente para que eu chegasse até aqui (colegas de faculdade, professores e toda comunidade acadêmica). O sentimento de gratidão é enorme.

“Eu abri meu coração, fechei minha armadura. A meta é amadurecer sem perder a ternura”.

Djonga

RESUMO

O crescimento urbano tem se intensificado com o passar dos anos, sucedendo a uma ocupação territorial desordenada por parte da população. Este crescimento favorece instalações de comunidades em zonas de risco do ponto de vista geotécnico e ambiental. Representando uma quantia significativa nas causas de desastres naturais, os deslizamentos de terra assolam muitas regiões e a carência de estudos geológicos-geotécnicos em regiões propensas a deslizamentos, ainda é alta. Neste contexto este trabalho teve como objetivo investigar e identificar áreas dentro do perímetro urbano município de Caçapava do Sul/RS com potenciais riscos de desastres naturais. Através do conhecimento do meio físico (rochas, materiais inconsolidados, água e relevo) foi possível verificar a estabilidade de encostas. O trabalho teve como metodologia o adensamento de análises em regiões propícias a deslizamentos para averiguar a estabilidade destas áreas. Dentre os dados coletados em campo, foram realizadas amostragens de solo para classificação, coleta de amostras de rochas, para ensaios de resistência, além do levantamento de perfis geofísicos para caracterização do contato solo, rocha alterada e rocha sã, além de quantificar as espessuras de cada camada. O uso de aerofotogrametria, por Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS, do inglês *Remotely Piloted Aircraft System*) e de dados de imagens de satélite, auxiliaram no desenvolvimento do trabalho para mapeamento e localização das áreas com as maiores variações topográficas, possibilitando a geração de um modelo digital de terreno (MDT). Com a integração dos dados obtidos, isto é, MDT, perfis geofísicos e ensaios realizados, foi criado um modelo de secção crítica definida para análise de estabilidade. O método utilizado foi o de equilíbrio limite, considerando um perfil de ruptura do tipo circular, com a verificação do fator de segurança. Foram realizadas também análises de sensibilidade para verificar os impactos causados pela variação dos parâmetros de entrada, no resultado do modelo. Com o resultado obtido foi possível identificar a situação do local, gerar um mapa de zoneamento para a área e assim sugerir a adoção de cuidados para a ocupação do solo.

Palavras-chave: Mapeamento geotécnico, Zonas de risco, Mapa de zoneamento, Estabilidade de taludes.

ABSTRACT

The urban growth has intensified over the years, succeeding a disorderly territorial occupation by the citizens, leading to the installation of communities in risk areas, from the geotechnical and environmental points of view. Representing a significant amount in natural disasters, the landslides desolate many places, and the lack of geological-geotechnical studies is still high. In this context, this work has the purpose of investigating and identifying areas in the urban perimeter of Caçapava do Sul/RS with potential risk of natural disasters. Through material knowledge (rocks, unconsolidated materials, water and relief) it was possible to verify the slope stability. The work used as methodology the densification of analyzes in favorable regions of landslides to verify the stability of these areas. Among the field data collected, soil samples were carried out for classification, rock collection, for resistance tests, and survey of geophysical profiles for soil contact characterization, altered rock and healthy rock, and to quantify the thickness of each layer. The use of aerophotogrammetry, by Remotely Piloted Aircraft System (RPAS) and satellite image data, helped in the development of the work for mapping and locating the greatest variations areas, enabling the generation of a digital elevation model (DEM). With the collected data integration (DEM, geophysical profiles, and geotechnical tests) were created a critical model of stability. The method used was the limit equilibrium, considering a circular rupture profile, with the safety factor verification. Sensitivity analyzes was created to verify the impacts determined by input parameters variation on the model's result. With the found result, was possible to identify a local situation, generating a zoning map and directing the land occupation cares.

Keywords: Geotechnical map, Risk areas, Zoning map, Slope stability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de Localização da Área urbana de Caçapava do Sul	18
Figura 2 - Comparativo da Área Urbana de Caçapava do Sul nos anos de 2007 e 2020	19
Figura 3 - Mapa pedológico da área.....	20
Figura 4 - Zoneamento do Perímetro urbano de Caçapava do Sul	22
Figura 5 - Mapa Geológico da Área de Estudo	24
Figura 6 - Subdivisão dos tipos de deslizamento	26
Figura 7 - A) Superfície de escorregamento de material homogêneo; (B) Superfície de escorregamento de material firmado em rocha	27
Figura 8 - Valores de GSI para maciços rochosos	30
Figura 9 - Projeção estereográfica de um plano com mergulho para ESE.....	33
Figura 10 - Captação de imagens de mesmo ponto com diferentes ângulos a partir de fotos aéreas.....	35
Figura 11 - Configuração tetraeletródica usual de campo	37
Figura 12 - Classificação do Método de Eletrorresistividade - detalhamento.....	38
Figura 13 - Mapa de zoneamento com os graus de risco da área de estudo.....	40
Figura 14 - Mapa de zoneamento ambiental da área estudada	41
Figura 15 - Mapa de zoneamento com os graus de risco da área de estudo.....	42
Figura 16 - Fluxograma	44
Figura 17 - Composição de imagens referente ao levantamento aéreo: A) planejamento prévio do voo; B) Execução do voo em campo.....	46
Figura 18 - Configurações do software Electro Pro.....	47
Figura 19 - Mapa de localização dos perfis geofísicos.....	48
Figura 20 - Composição de imagens referente ao levantamento geofísico: A) Resistivímetro; B) Posicionamento dos eletrodos	49
Figura 21 - Ortofoto gerada através do software <i>MetaShape</i>	50
Figura 22 - Progresso na classificação de pontos de terreno e demais pontos a serem desconsiderados na construção da malha triangularizada do terreno	51
Figura 23 - Arranjo de blocos e pontos de resistividade aparente.....	52
Figura 24 - Mapa de Declividade - Área Urbana de Caçapava do Sul	54
Figura 25 - Modelo Digital do Terreno - Zona nordeste de Caçapava do Sul-RS	55
Figura 26 - Afloramento de granito.....	56

Figura 27 - Granito fraturado.....	57
Figura 28 - Saprólito.....	57
Figura 29 - Horizontes de solos, sendo: A para o solo orgânico e B para o solo residual.....	58
Figura 30 - Diagrama de Roseta de Frequência	59
Figura 31 - Indicador cinemático em descontinuidades na direção NW-SE.....	59
Figura 32 - Mapa de Localização dos perfis e sua sequência.....	60
Figura 33 - Perfil 1 com os respectivos valores de resistividade e a classificação geológica correspondente	61
Figura 34 - Perfil 2 com os respectivos valores de resistividade e a classificação geológica correspondente	62
Figura 35 - Perfil 3 com os respectivos valores de resistividade e a classificação geológica correspondente	63
Figura 36 - Perfil 4 com os respectivos valores de resistividade e a classificação geológica correspondente	64
Figura 37 - Composição das imagens: A) Bloco diagrama com os quatro perfis posicionados e tendo o perfil transversal a eles; B) Perfil transversal gerado	65
Figura 38 - Resistência da rocha sã.....	66
Figura 39 - Resistência da rocha fraturada	67
Figura 40 - Resistência do saprólito	68
Figura 41 - Composição de imagens: a esquerda, análise de estabilidade da encosta analisada; a direita, gráfico de superfícies analisadas	70
Figura 42 - Gráfico de sensibilidade.....	71
Figura 43 - Composição de imagens que mostram imagens representativas para cada uma das regiões classificadas.....	72
Figura 44 - Mapa de Zoneamento da Área de Estudo	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Parâmetros de resistência de rochas	28
Tabela 2 - Tipos de solo associados a intervalos médios de coesão e angulo de atrito	31
Tabela 3 - Fatores de Segurança.....	32
Tabela 4 - Critérios para definição do grau de probabilidade de ocorrência de processos destrutivos de escorregamentos	34
Tabela 5 - Classificação litológica baseada na resistividade.....	39
Tabela 6 - Litologia de acordo com a resistividade em ohm.m.....	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas
ALOS - *Advanced Land Observing Satellite*
APP - Áreas de Preservação Permanente
CE - Caminhamento Elétrico
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ESrg - Escudo Sul-Rio-Grandense
FS - Fator de Segurança
GSI - *Geological Strength Index*
IAEG - *International Association of Engineering Geology*
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas
JAXA - *Japan Aerospace Exploration Agency*
kPa - Quilopascal
MDT - Modelo Digital de Terreno
NBR - Norma Brasileira
PALSAR - *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*
PERF - Perfilagem Elétrica
PLT - *Point load test*
RPAS - *Remotely Piloted Aircraft System*
RQD - *Rock Quality Designation*
RS - Rio Grande do Sul
SED - Sondagem Elétrica Dipolar
SEV - Sondagem Elétrica Vertical
UgCS - *Universal Ground Control System*

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Objetivos	16
1.1.1	Objetivos gerais	16
1.1.2	Objetivos específicos	16
1.2	Justificativa	16
2	ÁREA DE ESTUDO.....	18
2.1	Localização	18
2.2	Aspectos fisiográficos	19
2.3	Plano diretor.....	20
2.4	Contexto geológico	23
3	CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA.....	25
3.1	Mapeamento geotécnico em áreas de risco	25
3.2	Mecanismos para movimentos de massa	25
3.2.1	Rastejo.....	25
3.2.2	Deslizamentos.....	26
3.2.3	Quedas.....	27
3.2.4	Corridas	27
3.3	Crítérios de ruptura	27
3.3.1	Crítério de Mohr-Colomb.....	28
3.3.2	Crítério de Hoek-Brown.....	29
3.3.3	Crítérios de resistência para solos	30
3.4	Análise de estabilidade de taludes.....	31
3.4.1	Projeções estereográficas	32
3.4.2	Classificação de risco de movimentos de massa.....	33
3.5	Aerofotogrametria.....	35
3.6	Geofísica aplicada a geotecnia.....	36
3.6.1	Método de eletrorresistividade	36
3.6.2	Dipolo-Dipolo	38
3.6.3	Meios físicos e suas respectivas respostas a eletrorresistividade.....	38
3.7	Trabalhos anteriores aplicados	39
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
4.1	Levantamento de áreas de risco	45

4.2	Levantamentos de campo.....	45
4.2.1	Levantamentos aéreos	45
4.2.2	Levantamentos geotécnicos.....	46
4.2.3	Levantamentos geofísicos	47
4.3	Processamento dos dados	49
4.3.1	Geração do MDT	49
4.3.2	Geração dos perfis geofísicos.....	51
4.3.3	Análise de estabilidade	52
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
5.1	Definição de Áreas de Risco no perímetro urbano.....	54
5.2	Modelo Digital de Elevação.....	55
5.3	Caracterização geológica.....	55
5.3.1	Litologia.....	56
5.3.2	Estrutural.....	58
5.4	Perfis geofísicos	60
5.4.1	Perfil 1.....	61
5.4.2	Perfil 2.....	62
5.4.3	Perfil 3.....	62
5.4.4	Perfil 4.....	63
5.5	Perfil crítico para análise de estabilidade.....	64
5.6	Resistência dos maciços	65
5.7	Fator de segurança.....	68
5.8	Mapa de zoneamento.....	71
6	CONCLUSÕES	74
	REFERÊNCIAS	76

1 INTRODUÇÃO

O crescimento populacional tem se intensificado em todo o planeta, isto é materializado pelo crescimento urbano, seja em sua extensão e/ou por sua densidade. Centros urbanos estão cada vez maiores e por muitas vezes esse crescimento é desorganizado e avança para todas as direções, sendo um desafio para a ciência a compreensão de suas causas e consequências (POLIDORI, 2004).

O modelo socioeconômico vigente induz famílias de baixa renda a instalarem-se em locais não apropriados, como em áreas de inundação, áreas de preservação permanente (APP) ou até mesmo em áreas com elevada declividade e consequentemente com risco de movimentos de massa. Além disso, estas ocupações geralmente se demonstram com uma enorme precariedade no saneamento básico e na rede de abastecimento de água, tornando a vulnerabilidade das áreas ainda maior (CARVALHO; GALVÃO, 2006).

Na tentativa de contornar os problemas ocasionados pelo crescimento populacional, o governo federal elaborou o Plano Diretor (BRASIL, 2001) como ferramenta primordial na ordenação e no desenvolvimento de cidades maiores que 20 mil habitantes. Compreender o terreno da área urbana é de extrema importância na elaboração do Plano Diretor, pois através de análises geológicas-geotécnicas é possível detectar áreas que podem oferecer riscos a determinada população (IAEG, 1992). Zaine (2000) complementa a compreensão do meio físico geológico é fundamental tanto para a correção dos problemas de natureza geológica-geotécnica em áreas urbanas, tanto para o planejamento de ocupações futuras. Deste modo, para áreas que apresentem possibilidades de ocasionar desastres naturais é de extrema importância a realização de Mapeamentos geotécnicos detalhados (SOBREIRA; SOUZA, 2012).

O município de Caçapava do Sul apresenta em sua área urbana uma geomorfologia sinuosa em determinadas regiões, conduzindo a instalação de casas em áreas que, supostamente, são inapropriadas para a ocupação. Neste contexto este trabalho tem como objetivo investigar, identificar áreas com potenciais riscos de desastres naturais e aferir a estabilidade de uma determinada encosta.

A utilização de geotecnologias como Sistemas de Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPAS) se fazem importante para a geração de modelos digitais de terreno (MDT), que com auxílio de outras ferramentas como a geofísica e análises do solo e

rocha auxiliarão no reconhecimento do meio físico. Por fim, através de análises e elaboração de mapas o projeto trará um estudo conciso a respeito dos riscos e vulnerabilidade da região nordeste do município de Caçapava do Sul/RS

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Identificar áreas com potencial de risco geotécnico e realizar um estudo geológico-geotécnico na porção nordeste da mancha urbanada do município de Caçapava do Sul e desenvolver um mapa geotécnico de possíveis áreas de riscos encontrados na região.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Detectar e mapear as áreas de risco presentes no núcleo urbano;
- b) Realizar levantamentos aéreos e geofísicos para compreender a dinâmica do local;
- c) Analisar e avaliar a estabilidade de taludes em zonas de risco;
- d) Caracterizar e classificar unidades geotécnicas dispostas na área de estudo;
- e) Elaborar mapas geológicos-geotécnicos, com classificação de risco.

1.2 Justificativa

Nas últimas décadas o Brasil sofreu inúmeros danos socioeconômicos devido aos desastres naturais que ocorreram no país, sendo que, os deslizamentos estão entre as principais ocorrências. Muitos desastres poderiam ser evitados se houvessem estudos preliminares para avaliar os parâmetros físicos de uma área. Ademais o termo “desastre natural” diversas vezes perde seu caráter “natural” devido à má utilização do solo por parte da comunidade. Portanto se faz necessário instruir a população no devido uso do solo, e suas maneiras de ocupá-lo.

A Lei Federal nº 12.608/2012 elaborada a partir de desastres naturais que ocorreram em 2011 no estado do Rio de Janeiro, junto as alterações do Estatuto da Cidade (BRASIL, 2001) obriga municípios a realizarem o mapeamento das áreas de risco, realizar sua devida identificação, além de tomar medidas para prevenção e

mitigação dos eventuais desastres. Bitar (2015) menciona a importância da elaboração de cartas geotécnicas de aptidão à urbanização para que gestores atendam os requisitos presentes na Lei.

Feições geológicas-geotécnicas são importantes condicionantes para o estudo sobre deslizamentos de terra, sua compreensão e o diálogo com a comunidade são ferramentas primordiais para eludir-se de desastres naturais. A importância deste trabalho se justifica por dois principais motivos: Diagnosticar problemas de áreas de risco para o município de Caçapava do Sul-RS e contribuir para o planejamento urbano na expansão da cidade.

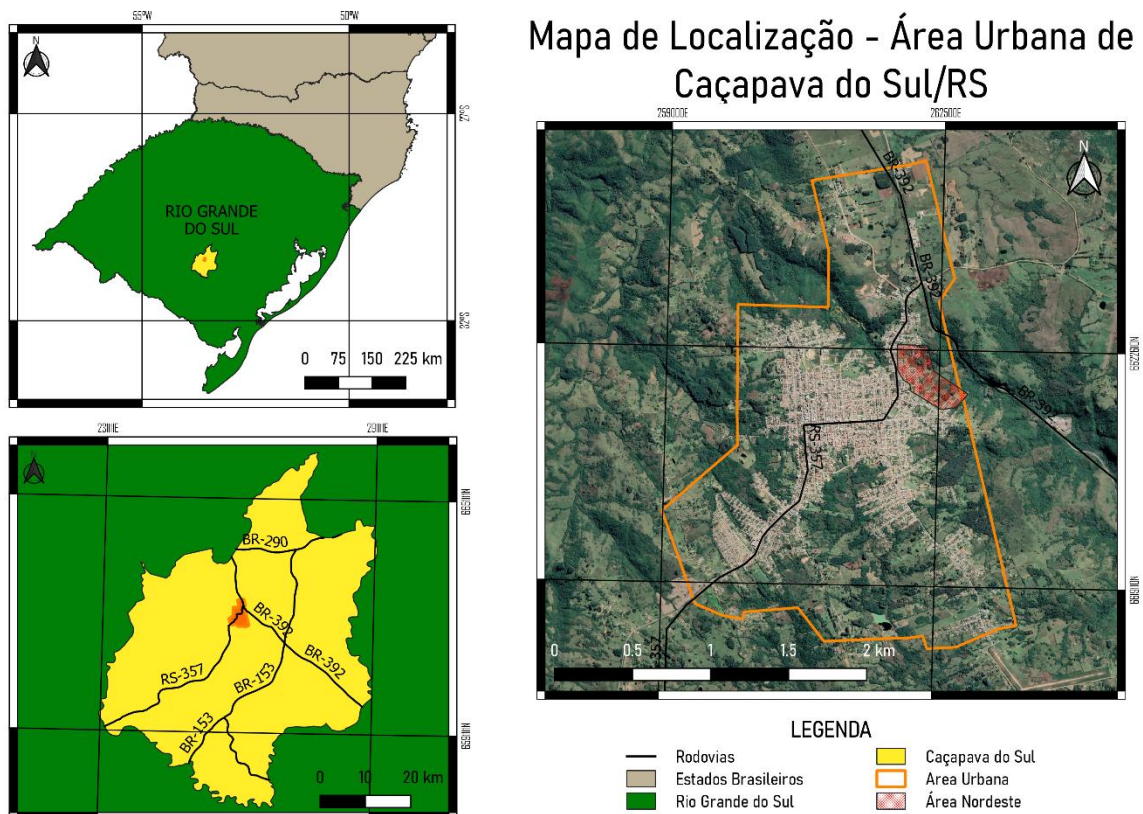
2 ÁREA DE ESTUDO

2.1 Localização

A área urbana de Caçapava do Sul, local do estudo, é localizada na porção central do estado do Rio Grande do Sul e seu acesso é dado pela rodovia federal BR-392 ou pela rodovia estadual RS-357 (Figura 1). O município é distante aproximadamente 260 km da capital do estado, Porto Alegre. Partindo da capital é necessário percorrer 245 km pela rodovia federal BR-290, sentido interior do estado, e em seguida acessando a rodovia BR-392 sentido Bagé. Após 16 km a oeste está localizada a entrada da cidade.

Através de algumas análises, a serem mencionadas nos próximos tópicos, determinou-se as áreas que necessitem de um maior adensamento de dados. Esta área fica localizada na zona nordeste da área urbana e seu acesso é dado pela Av. Presidente Kenedy, na altura do número 1400, em sentido leste por cerca de 200 metros. Área em questão representada na cor vermelha no mapa a seguir.

Figura 1 - Mapa de Localização da Área urbana de Caçapava do Sul



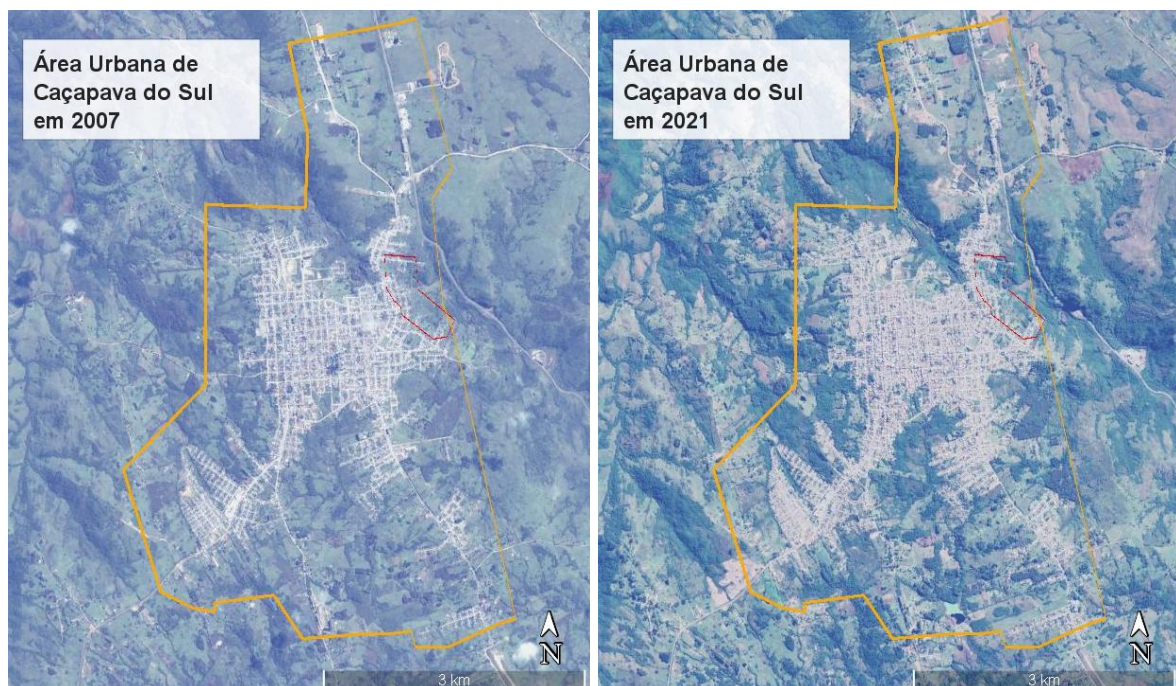
Fonte: Autor (Dados de SIG extraídos do banco de dados CPRM e UFRGS).

2.2 Aspectos fisiográficos

Com uma altitude próxima dos 450 metros, Caçapava do Sul possui clima temperado e úmido com verão quente, sendo assim classificada pela classificação climática de Köppen-Geiger pela sigla CFA (Clima Subtropical úmido) (PORCHER, 2012), apresentando temperaturas médias que variam entre 16 e 19°C. A média de precipitação anual varia em torno de 1300 e 1600 mm, possibilitando um intemperismo químico forte a moderado (BECKER; BURIOL; STRECK, 2012). Em termos geomorfológicos a área está inserida em uma unidade morfoestrutural do Escudo Sul-riograndense (ESrg) apresentando relevos dissecados em forma de colinas acentuadas (PORCHER, 2012).

Em relação aos aspectos demográficos, o município de Caçapava do Sul conta com uma população de 33.690 habitantes, sendo destes, aproximadamente 75% moradores da área urbana do município (IBGE, 2010). Através da ferramenta *Google Earth* (2009) é possível fazer um comparativo entre a área urbana de 2007 e 2021 (Figura 2), onde nota-se um crescimento territorial sem uma orientação preferencial.

Figura 2 - Comparativo da Área Urbana de Caçapava do Sul nos anos de 2007 e 2020

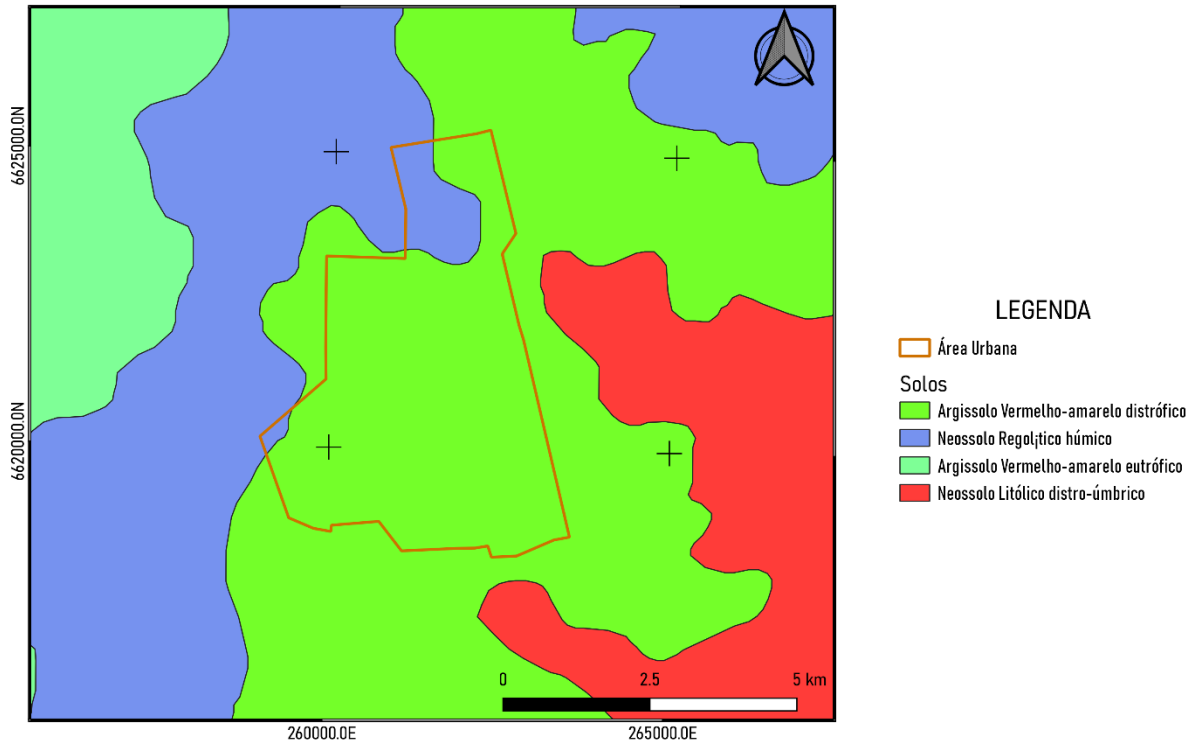


Fonte: Google Earth (2009).

A pedologia do local pode ser descrita basicamente por solos rasos, de textura arenosa, classificado como neossolos regolíticos e argisolo vermelho-amarelo

distrófico (Figura 3). Em geral, trata-se de solos recentes desenvolvido a partir de variadas rochas de litologias distintas (associados a afloramentos rochosos) e pode ser encontrado nas mais diversas condições de relevo e drenagem (NEOCORP DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS E SERVIÇOS LTDA, 2010).

Figura 3 - Mapa pedológico da área



Fonte: Autor (Dados de SIG extraídos do banco de dados CPRM).

2.3 Plano diretor

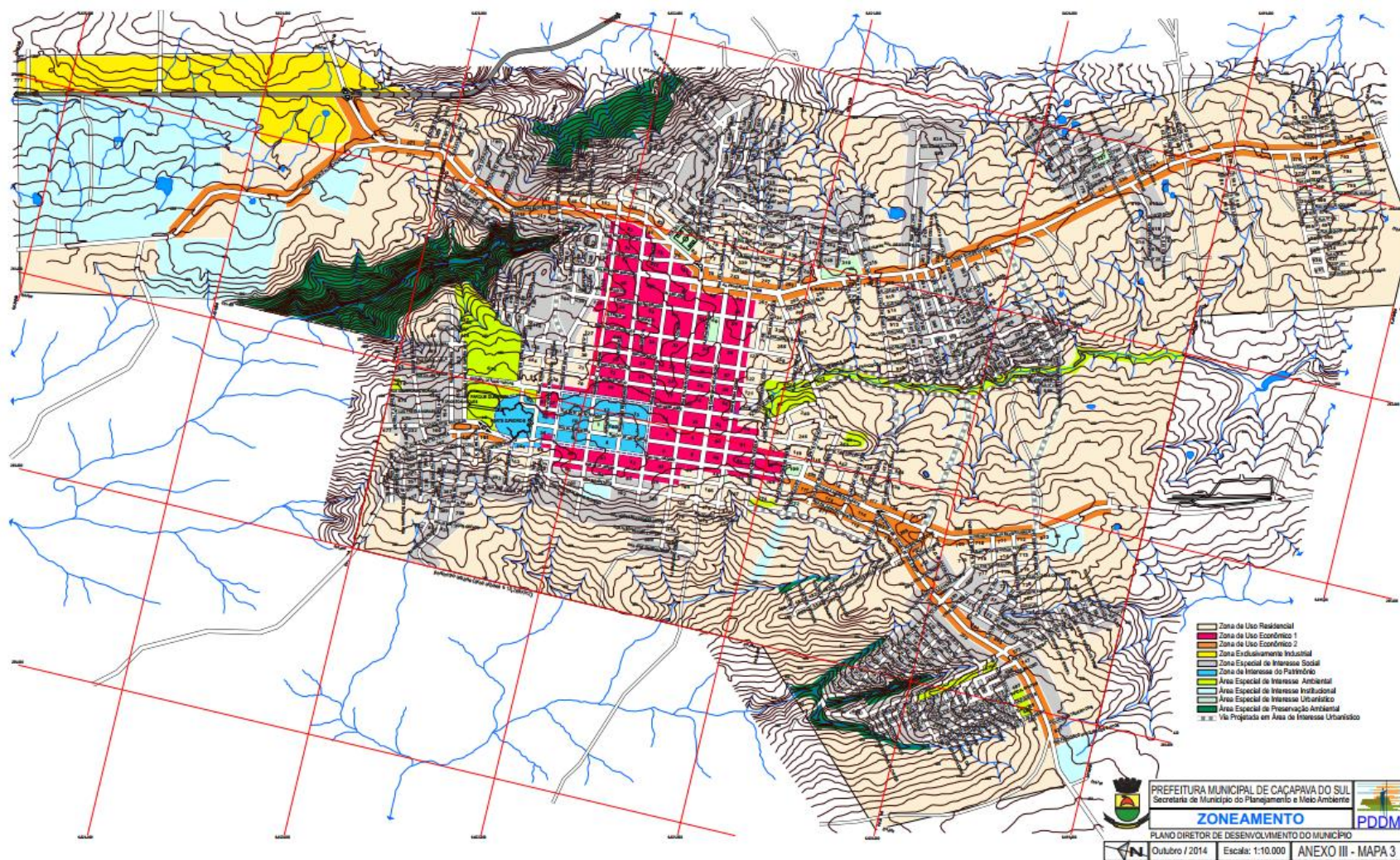
Com o intuito de auxiliar no desenvolvimento e planejamento urbano, o município de Caçapava do Sul-RS desenvolveu o Plano diretor (CAÇAPAVA DO SUL, 2006). Nele, o perímetro urbano é categorizado em zonas de acordo com sua ocupação (Figura 4). Dentre as zonas de habitação da população encontra-se a Zona de Uso Residencial e a Zona Especial de Interesse Social, sendo esta, caracterizada pela carência de infra-estrutura e loteamentos irregulares. De acordo com o Plano Diretor, segundo o Art. 78 os objetivos desta zona são:

- I – Complementar a infra-estrutura básica;
- II – Implantar equipamentos públicos, espaços verdes e de lazer;
- III – Promover a urbanização e a regularização fundiária dos núcleos habitacionais de baixa renda, respeitando o direito de propriedade privada;

- IV – Incentivar a construção de novas unidades de habitação de interesse social;
- V – Conter a ocupação de áreas ambientalmente sensíveis (CAÇAPAVA DO SUL, 2006).

Nota-se uma vulnerabilidade socioeconômica para residências presentes nas margens do centro da cidade. Portanto, é de extra importância a realização de estudos que apontem para riscos geológicos nestas regiões, pois estes, tendem a somar em alguns dos objetivos estabelecidos pelo plano diretor do município.

Figura 4 - Zoneamento do Perímetro urbano de Caçapava do Sul



Fonte: Extraído de Caçapava do Sul (2006).

2.4 Contexto geológico

A região de Caçapava do Sul está situada na porção meridional da Província Mantiqueira, sendo está um sistema orogênico neoproterozóico-cambriano. A porção em questão é contemplada com o Escudo Sul-riograndense (ESrg), que por sua vez é constituída por terrenos que vão do arqueano ao paleoproterozoico (2,26-2,0 Ga) além de algumas unidades do neoproterozóico (900-535 Ma) representando os ciclos Transamazônico e Brasileiro/Pan-Africano, respectivamente (ALMEIDA *et al.*, 1981; HARTMANN; CHEMALE JR.; PHILIPP, 2007). Os diferentes ciclos e regimes tectônicos permitem que o ESrg seja segregado por lineamentos regionais em 4 domínios, Taquarembó, São Gabriel, Tijucas e Pelotas. O Terreno São Gabriel, local de estudo, possui uma assinatura juvenil (neoproterozóico) e suas diversas associações petrotectônicas permitem uma diversidade de unidades litológicas diferentes.

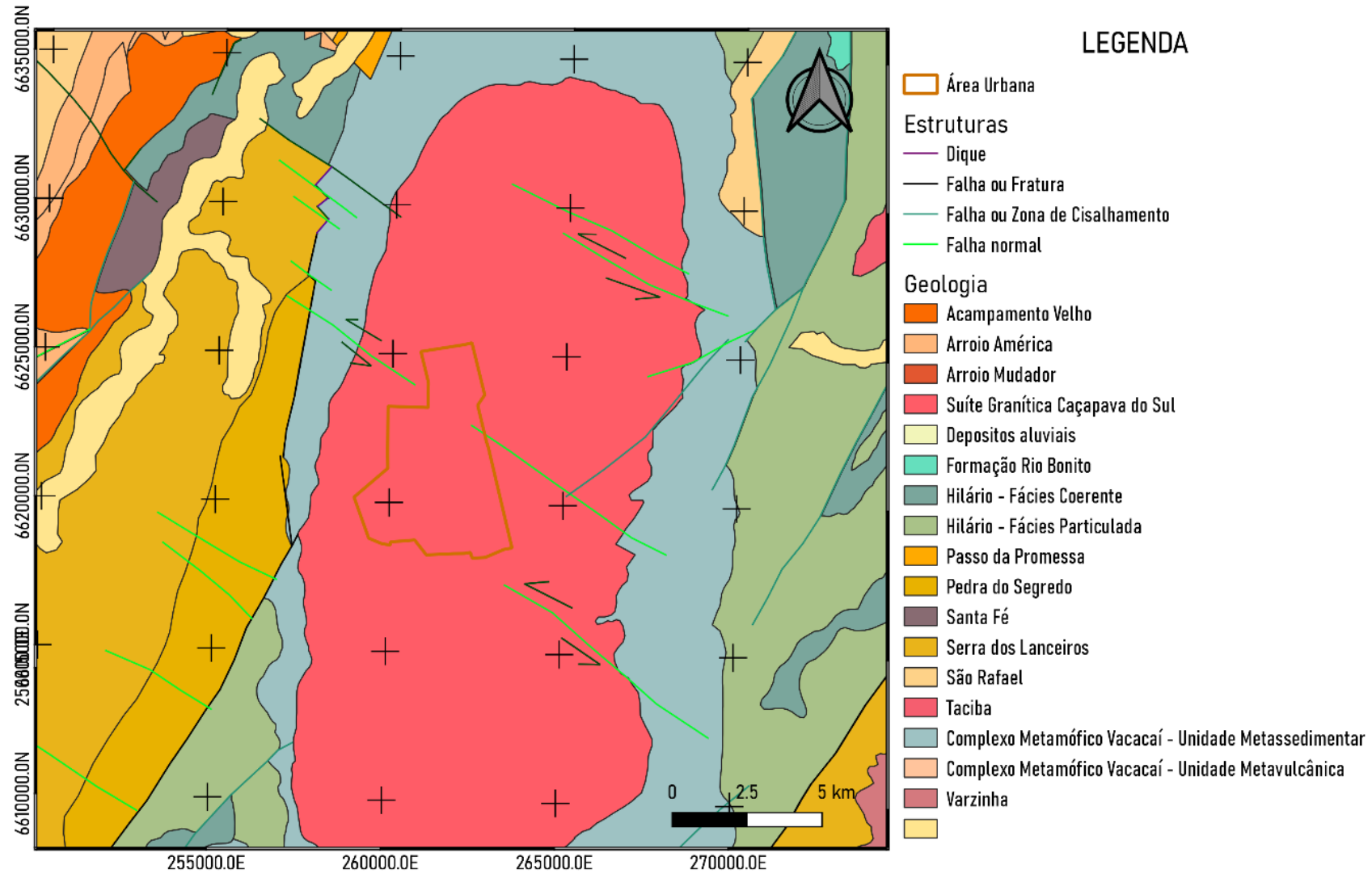
A área de estudo está inserida na unidade geológica conhecida como Suíte Granítica Caçapava do Sul (Figura 5). A suíte é formada por Granitóides subalcalinos com médio a alto potássio (NARDI; BITENCOURT, 1989), associados às rochas máficas apresentando idades próximas a 550 Ma¹. Pode ser subdividida em três diferentes fácies sendo: fácies Monzogranito Granodiorito, fácies Sienogranito e fácies Sienogranito Milonitizado.

Em geral, rochas graníticas são rochas ígneas intrusivas, que devida baixa influência do intemperismo e erosão (quando comparado a outros tipos de rochas), podem estar associados a solos de baixa espessura.

Além da formação de solos de baixa espessura, a característica estrutural do granito é representada por inúmeras falhas e fraturas de diferentes escalas, que por sua vez, potencializam a erosão da rocha. Na Figura 5, nota-se as diferentes classificações para as discontinuidades estruturais encontradas na região. Em geral as discontinuidades presentes na Suíte Granítica Caçapava do Sul-RS apresentam direção NW-SE, e uma delas corta o perímetro urbano do município na porção nordeste.

¹ Datação por Rb/Sr (Sartori e Kawashita, 1985) e datação por U/Pb (Leite et al. 1995).

Figura 5 - Mapa Geológico da Área de Estudo



Fonte: Autor (Dados de SIG extraídos do banco de dados CPRM e UFRGS).

3 CONCEITOS GERAIS E REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Mapeamento geotécnico em áreas de risco

O entendimento geológico-geotécnico do meio físico de determinada área é imprescindível para o devido uso e manejo do solo. O estudo do meio físico é dado pela avaliação das rochas, dos materiais inconsolidados, das águas, do relevo e suas inter-relações. Segundo Zuquette (1993), o estudo geológico-geotécnico está ligado a estudos de outros campos de conhecimento, tais como: geografia, hidrologia, oceanografia e meteorologia. A compreensão do conjunto de todas essas variáveis, permitem a aferição da susceptibilidade a processos erosivos de uma região. A definição de área de risco pode ser dada como: “área passível de ser atingida por fenômenos ou processos naturais que causem efeito adverso com magnitude de danos e/ou consequências socioeconômicas” (BRASIL, 2007).

Portanto o Mapeamento Geotécnico em áreas de risco é o estudo que tem como finalidade processar os parâmetros dos meios físicos e categorizá-los de acordo com seu risco (CERRI, 2006). Estas informações podem ser fornecidas ao usuário por meio de um conjunto de documentos gráficos que compõem o mapeamento geotécnico para fins construtivos e para uma expansão urbana de forma segura (EL MAY; DLALA; CHENINI, 2010).

3.2 Mecanismos para movimentos de massa

Por definição, movimentos de massa são movimentos descendentes de solo e/ou rocha, sob efeito da gravidade (TOMINAGA, 2012). Esta movimentação pode ser dada em encostas naturais como em encostas antropizadas. Augusto Filho (1992) classifica os movimentos de massa no meio físico em quatro classes, sendo elas: Rastejo, Deslizamentos, Quedas e Fluxo de detritos. Estes, serão descritos a seguir.

3.2.1 Rastejo

O rastejo é um fenômeno relacionado movimento descendente, lento e contínuo de massa de solo, não apresentando superfície de rupturas marcantes e geometria. Ocorre em horizontes de solo, e segundo Queiroz (2009) este fenômeno pode estar associado a solos residuais em zonas com alto intemperismo, acarretando

um adensamento de camadas de solo que por sua vez podem sofrer movimentação de rastejo devido a ação da gravidade. Por apresentar um baixo risco devido ao seu movimento lento este fenômeno é por vezes desprezado, entretanto pode ser observado através de árvores e troncos recurvados, deslocamento de obras, postes elétricos e muros de contenção.

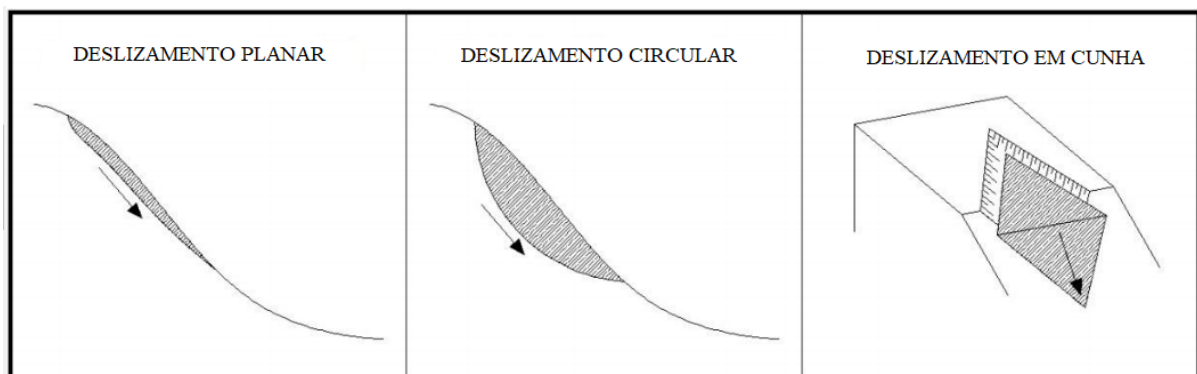
3.2.2 Deslizamentos

Deslizamentos podem ser classificados como movimentos rápidos com uma superfície de ruptura bem definida. Pode ser considerado o mecanismo mais destrutivo e conseqüentemente trará consigo problemas socioeconômicos a determinada região.

Vedovello e Macedo (2007) associam estes movimentos de materiais sólidos ao longo de terrenos inclinados, isto é, terrenos com altos ângulos de declividade apresentam maiores vulnerabilidades para a ocorrência do deslizamento. Além disso, altas quantidades pluviométricas auxiliam a ocorrência do fenômeno.

O fenômeno pode ser subdividido em três categorias, sendo elas: Deslizamentos planares (solos pouco espessos ou em material rochoso em planos de fraqueza, tais como falhas e fratura); Circulares (associadas a aterros, solos espessos homogêneos e a material rochoso intensamente fraturado); Cunha (Interseção de planos de fraqueza em rochas) (Figura 6).

Figura 6 - Subdivisão dos tipos de deslizamento



Fonte: Adaptado de IPT (2009).

De acordo com Fernandes e Silva Filho (1998) para um deslizamento ser circular é necessário que a superfície seja homogênea e que não apresente um plano

preferencial. Caso o deslizamento seja de material rochoso ou solos bandeados com propriedades contrastantes em sua fundação o deslizamento deve ser classificado como não circular, possibilitando assim a existência de planos de fraqueza (Figura 7).

Figura 7 - A) Superfície de escorregamento de material homogêneo; (B) Superfície de escorregamento de material firmado em rocha

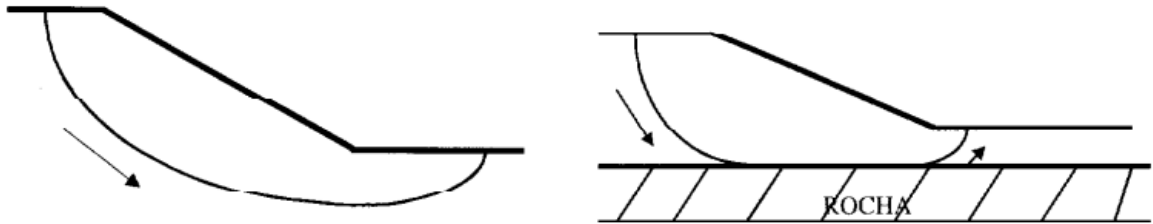


Figura A

Figura B

Fonte: Extraído de Fernandes e Silva Filho (1998).

3.2.3 Quedas

Mecanismo que não apresenta planos de deslocamento preferencial, sendo um movimento com velocidades elevadas. Consiste na queda de material rochoso desconexo do maciço rochoso que, devido a ação da gravidade caem de um declive em queda livre ou rolamento. As causas são diversas, porém podem estar associadas a maciços resistentes ao intemperismo que tendem a de aflorar em matacões (como é o caso de rochas graníticas) e localizam-se na borda de encostas íngremes. Sua geometria é variável (lascas, placas, blocos e etc) com pequenos a médios volumes.

3.2.4 Corridas

Fenômeno associado ao deslocamento de materiais viscoso em uma velocidade média a alta podendo alcançar longas distâncias com o grande fluxo de material movimentado. No geral são gerados devido a movimentos gravitacionais complexos, associado a eventos pluviométricos excepcionais.

3.3 Critérios de ruptura

Os critérios de ruptura são funções de tensões associadas ao estado de ruptura de um determinado material, podendo ser associado a tensões referentes ao topo da

curva tensão vs deformação (AZEVEDO; MARQUES, 2002). Para cada classificação de rocha (íntacta, maciço rochoso ou descontinuidades) existem diferentes critérios de ruptura que analisam os variados modos para que se ocorra a ruptura. Para maciços rochosos, dois critérios se destacam, Mohr-Coulomb e Hoek-Brown.

3.3.1 Critério de Mohr-Colomb

O critério de Mohr-Coulomb é baseado na análise gráfica de uma reta entre a tensão de cisalhamento e a tensão normal que tangencia os círculos de Mohr resultando em uma envoltória linear. Esta envoltória pode ser definida pela equação:

$$\tau = c' + \sigma' \times \tan \phi' \quad (1)$$

Em que:

τ = Resistência ao cisalhamento

c' = Coesão

σ' = Ângulo de atrito interno

$\tan \phi'$ = Tangente do ângulo de atrito

O termo independente desta equação é a coesão (c'), já o coeficiente angular está relacionado ao ângulo de atrito (ϕ), ambos podem ser obtidos através de ensaios triaxiais de amostra de rocha íntacta. Na ausência de ensaios, Azevedo e Marques (2002) determinaram parâmetros base na resistência de diferentes rochas (Tabela 1).

Tabela 1 - Parâmetros de resistência de rochas

Rocha	Porosidade	c' (MPa)	ϕ (°)	Pressão confinante (MPa)
Ardosia Texas:				
carregada a		26,2	21,0	34,5-276
30° com a clivagem	NI	70,3	26,9	34,5-276
90° com a clivagem				
Arenito Pottsville	14,0	14,9	45,2	0-68,9
Basalto Nevada	4,6	66,2	31,0	3,4-34,5
Dolomito Hasmark	3,5	22,8	35,5	0,8-5,9
Folhelho Muddy	4,7	38,4	14,4	0-200

(Continua)

(Conclusão)

Rocha	Porosidade	c' (MPa)	ϕ (°)	Pressão confinante (MPa)
Gnaisse xistoso				
90° com a xistosidade	0,5	46,9	28,0	0-69
30° com a xistosidade	1,9	14,8	27,6	0-69
Granito Stone Mountain	0,2	55,1	51,0	0-68,9
Mármore Georgia	0,3	21,2	25,3	5,6-68,9
Quartzito Sioux	NI	70,6	48,0	0-203
Siltito Indiana	19,4	6,7	42,0	0-9,6
Siltito Repetto	5,6	34,7	32,1	0-200

Fonte: Adaptado de Azevedo e Marques (2002).

3.3.2 Critério de Hoek-Brown

O critério de Hoek-Brown é empírico e se baseia nas principais tensões do maciço, que podem ser expressas através da função:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \sqrt{m_i (\sigma_3/\sigma_{ci}) + s} \quad (2)$$

Em que:

m_i = constante petrográfica

σ_{ci} = Resistência a compressão uniaxial de rocha intacta







s = Parâmetro ajustável (obtido a partir de ensaios triaxiais)

Quando comparado com o critério de Mohr-Coulomb o critério de Hoek-Brown se destaca pelo fato de trazer consigo informações a respeito da resistência da rocha intacta e do maciço rochoso. Para isso, é levado em consideração aspectos como: Resistência à compressão uniaxial da rocha intacta, RQD (*Rock Quality Designation*), espaçamento entre descontinuidades, condições das descontinuidades e influência da água.

Todos os cinco parâmetros citados se baseiam em um sistema determinado por Marinov e Hoek (2000) que estima a redução da resistência do maciço rochoso sob variadas condições geológicas, esse sistema é chamado de GSI (*Geological*

Strength Index). Na Figura 8 pode-se observar seus valores para as diferentes estruturas dos maciços rochosos.

Figura 8 - Valores de GSI para maciços rochosos

<p>ÍNDICE DE RESISTÊNCIA GEOLÓGICA PARA MACIÇOS FRATURADOS (Hoek & Marinos, 2000)</p> <p>A partir da litologia, estrutura e condições da superfície das descontinuidades, estima-se o valor médio de GSI. Não tente ser tão preciso. Citar um alcance de 33 a 37 é mais realístico do que afirmar que GSI = 35. Observe que a tabela não é aplicável a rupturas controladas estruturalmente. Onde existir planos estruturais de fraqueza com orientação desfavorável em relação à face da escavação, estes controlarão o comportamento do maciço rochoso. A resistência ao cisalhamento de superfícies rochosas propensas a sofrer deterioração com as variações de umidade será reduzida quando existir presença de água. Quando trabalhar com rochas de categoria razoável a muito pobre, um deslocamento para a direita pode ser feito em condições de saturação. Pressão de água é avaliada através de análises de tensão efetiva.</p>		<p>CONDIÇÕES DA SUPERFÍCIE</p>				
<p>ESTRUTURA</p>		<p>DECRÉSCIMO DA QUALIDADE DA SUPERFÍCIE →</p>				
<p>DECRÉSCIMO DO INTERTRAVAMENTO DE BLOCOS ROCHOSOS ↓</p>		MUITO BOA	BOA	RAZOÁVEL	POBRE	MUITO POBRE
 <p>INTACTA OU MACIÇA – rocha intacta ou maciça com poucas descontinuidades, largamente espaçadas</p>	<p>90</p> <p>80</p>				N/A	N/A
 <p>FRATURADA – maciço rochoso bem intertravado não perturbado constituído por blocos cúbicos formados por três famílias de descontinuidades que se interceptam</p>	<p>70</p> <p>60</p>					
 <p>MUITO FRATURADA – intertravado, maciço parcialmente perturbado com blocos angulares com várias faces formados por quatro ou mais famílias de descontinuidades</p>	<p>50</p> <p>40</p>					
 <p>FRATURADA/PERTURBADA "COSTURADA" – dobrada com blocos angulares formados por muitas famílias de descontinuidades interceptadas. Persistência de planos de acamamentos ou xistosidades</p>	<p>30</p>					
 <p>DESINTEGRADA – pobremente intertravada, maciço rochoso intensamente quebrado, com uma mistura de pedaços rochosos angulares e arredondados</p>	<p>20</p>					
 <p>LAMINADA/CISALHADA – ausência de blocos devido ao estreito espaçamento de xistosidades fracas ou planos de cisalhamento</p>	<p>10</p>	N/A	N/A			

Fonte: Adaptado de Marinos e Hoek (2000).

3.3.3 Critérios de resistência para solos

Para toda e qualquer análise de ruptura é necessário a determinação de alguns parâmetros de resistência do material. Este procedimento requer análises laboratoriais. Nunes (1958, p. 52 apud SILVA, 2016) correlaciona os tipos de solo (de

acordo com a granulometria) com intervalos de valores para a coesão do solo e seu ângulo de atrito (Tabela 2).

Tabela 2 - Tipos de solo associados a intervalos médios de coesão e angulo de atrito

Tipos de Terreno	Coesão (kgf/cm²)	Ângulo de atrito (graus)
Areia seca	0	35 - 37
Silte	0,1 – 0,3	30 - 35
Argila	0,05 - 0,5	16 - 28
Argilo-arenoso	0,2 - 0,3	26 - 30
Argilo-orgânico	0,05 - 0,5	12 - 18

Fonte: Adaptado de Nunes (1958, p. 52 apud SILVA, 2016).

3.4 Análise de estabilidade de taludes

A análise de estabilidade dos taludes naturais ou artificiais é fundamental para definição de segurança, sendo estas, cruciais para o mapeamento geotécnico em áreas de risco. O cálculo da estabilidade leva em questão três forças: peso próprio, presença de água e resistência ao cisalhamento. Fernandes e Silva Filho (1998) dizem que os métodos de estabilidade de taludes partem da premissa de equilíbrio entre forças que atuam na base de uma superfície de escorregamento pré-determinada, esta superfície pode ser circular se possuir o mesmo material e não apresentar um plano preferencial para descontinuidade, ou não circular caso sua fundação for rochosa possibilitando a existência de planos de fraqueza da rocha.

O método mais vantajoso para a análise da estabilidade dos taludes é o Método Analítico por quantificar o grau de segurança, definida pelo Coeficiente ou Fator de Segurança (FS) (PIMENTA JUNIOR, 2005; SILVA, 2016). Dentre os métodos determinísticos destacam-se os métodos Bishop (para rupturas circulares considerando como sendo nulo o somatório correspondente as forças horizontais atuantes na lamela) e o método Jambu (para qualquer superfície de ruptura) (Fernandes & Silva Filho, 1998). O FS é definido a partir da resistência ao cisalhamento do solo (τ_f) sobre a tensão cisalhante atuante (τ_{mob}). Para valores de FS maiores do que 1, tem-se a estabilidade, isto é, forças resistentes são maiores que as forças desestabilizadoras, enquanto valores de FS menores do que 1 sinalizam uma instabilidade cuja forças resistentes são menores do que forças desestabilizadoras. A

norma técnica NBR 11682 determina os valores de FS para a classificação dos níveis de segurança contra danos a vidas e a materiais (ABNT, 2009) (Tabela 3).

Tabela 3 - Fatores de Segurança

Nível de segurança contra danos materiais e ambientais	Nível de segurança contra danos a vidas humanas		
	Alto	Médio	Baixo
Alto	1,5	1,5	1,4
Médio	1,5	1,4	1,3
Baixo	1,4	1,3	1,2
* No caso de variabilidade nos resultados dos ensaios geotécnicos, os fatores devem ser majorados em 10%.			
** No caso de estabilidade de blocos rochosos, devem ser usados parâmetros parciais em função da incerteza desses parâmetros. O método de cálculo deve considerar um fator mínimo de 1,1.			
*** Essa tabela não se aplica a rastejos, voçorocas, ravinas ou queda e rolamento de blocos.			

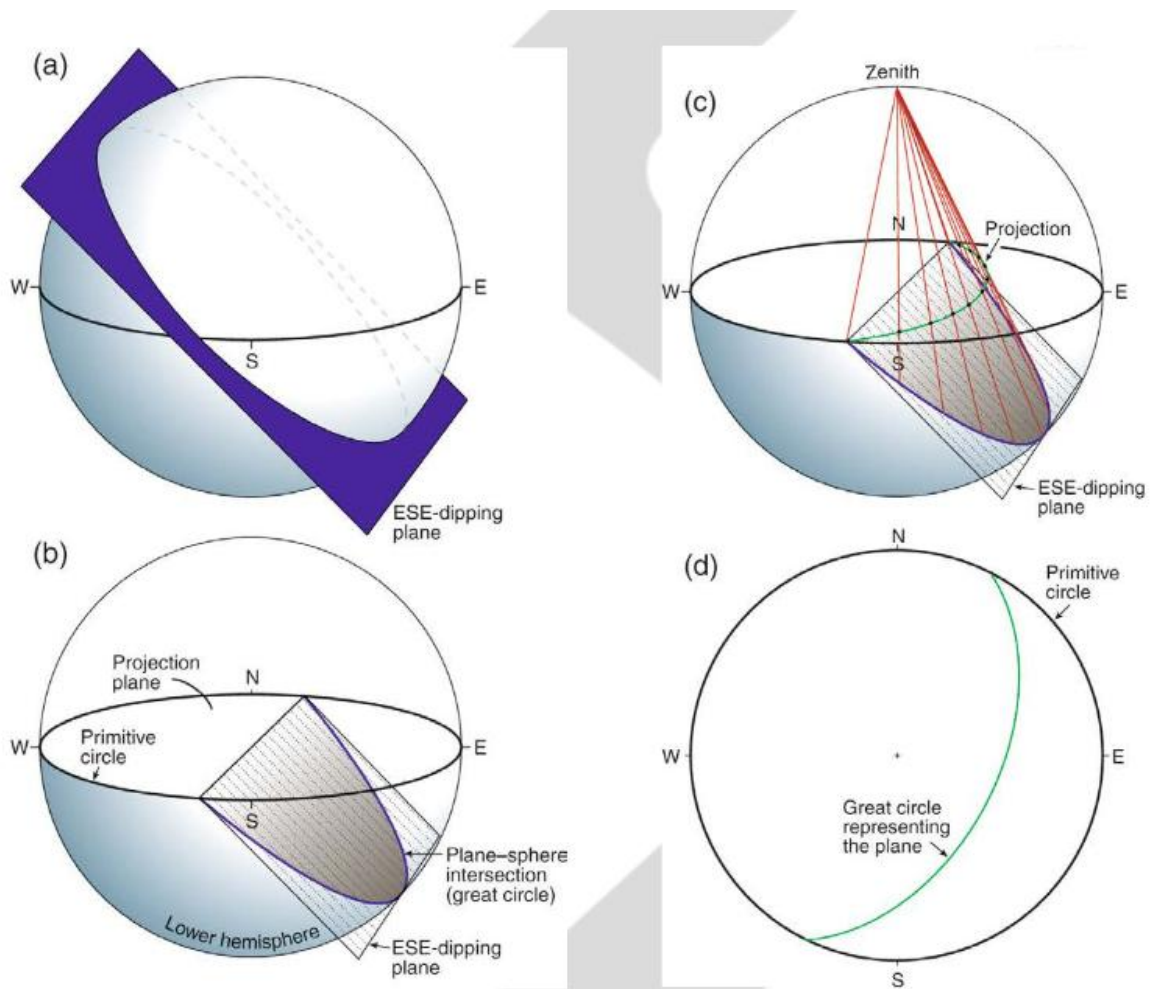
Fonte: Modificado de ABNT (2009).

3.4.1 Projeções estereográficas

Para a análise de estabilidade em materiais rochosos, Sá (2010) aponta para a utilização de projeções estereográficas como ferramenta na identificação do tipo de deslizamento e ou até mesmo para investigar a direção da qual o maciço tende a deslizar através do método cinemático. As projeções estereográficas levam em consideração a orientação das descontinuidades em relação a geometria do talude.

O estereograma consiste em uma representação esférica, em que um plano orientado (atitude) atravesse o centro da esfera. A linha de intersecção entre a esfera e o plano é representado por um círculo. O plano equatorial da esfera é horizontal e este é o plano de projeção. Nele, irá conter atitude de planos representados em duas dimensões como mostra a Figura 9 (FOSSEN, 2012).

Figura 9 - Projeção estereográfica de um plano com mergulho para ESE



Fonte: Extraído de Fossen (2012, p. 529).

Medidas estruturais tais como falhas e fraturas permitem determinar as famílias de descontinuidades e suas direções preferenciais após o devido tratamento. Como resultado são gerados estereogramas e/ou diagramas de roseta para frequência e comprimento das descontinuidades, possibilitando assim a análise inter-relação entre os sistemas de descontinuidades e o plano do talude a fim de verificar a estabilidade do corpo.

3.4.2 Classificação de risco de movimentos de massa

Como forma de determinar a potencialidade de ocorrência de acidentes, o Ministério das Cidades, em parceria com o IPT, definiu uma metodologia para categorizar os riscos em diferentes graus (BRASIL, 2007), como é mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Critérios para definição do grau de probabilidade de ocorrência de processos destrutivos de escorregamentos

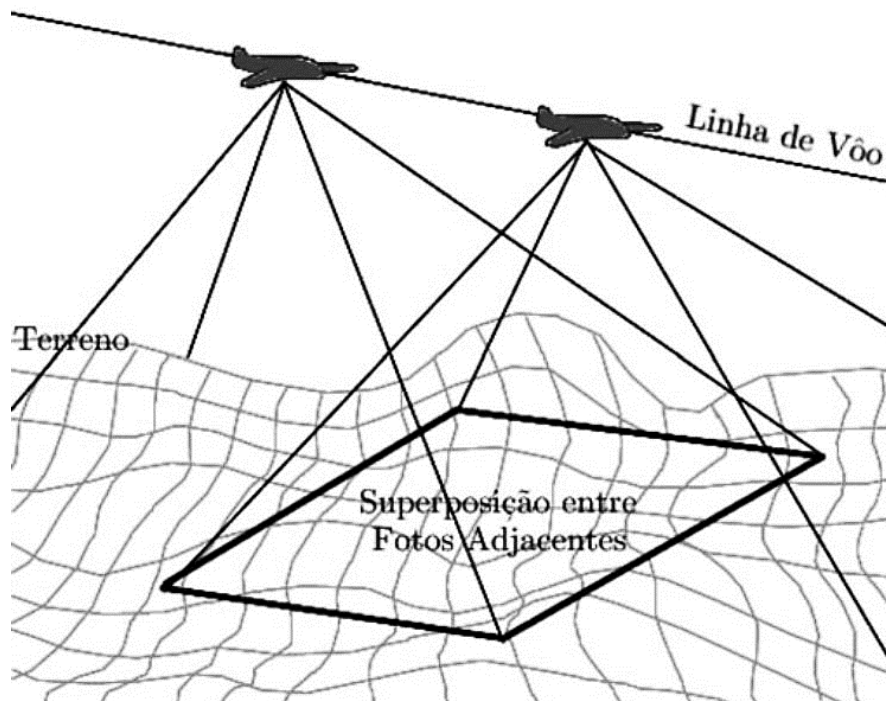
Grau de probabilidade	Descrição
R1 BAIXO	1. Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação e tipo de terreno) e o nível de intervenção no setor são de baixa ou nenhuma potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. 2. Não observa(m) feição/evidência(s) de instabilidade. Não há indícios de desenvolvimento de processos de instabilização de encostas e de margens de drenagens. 3. Mantidas as condições existentes não se espera a ocorrência de eventos destrutivos no período compreendido por uma estação chuvosa normal.
R2 MÉDIO	1. Os condicionantes geológico-geotécnico predisponentes (inclinação, tipo de terreno etc.) e o nível de intervenção no setor são de média potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. 2. Observa-se a presença de algum(s) sinal/feição/evidência(s) de instabilidade (encostas e margens de drenagens), porém incipiente(s). Processo de instabilização em estágio inicial de desenvolvimento. 3. Mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.
R3 ALTO	1. Os condicionantes geológico-geotécnicos predisponentes (inclinação, tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. 2. Observa-se a presença de significativo(s) sinal/feição/evidência(s) de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, etc.) Processo de instabilização em pleno desenvolvimento, ainda sendo possível monitorar a evolução do processo. 3. Mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas, no período compreendido por uma estação chuvosa.
R4 MUITO ALTO	1. Os condicionantes geológico-geotécnico predisponentes (inclinação/tipo de terreno, etc.) e o nível de intervenção no setor são de muito alta potencialidade para o desenvolvimento de processos de escorregamentos e solapamentos. 2. Os sinais/feições/evidências de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, trincas em moradias ou em muros de contenção, árvores e postes inclinados, cicatrizes de escorregamentos, feições erosivas, proximidade da moradia em relação às margens de córregos, etc.) são expressivas e estão presentes em grande número ou magnitude. Processo de instabilização em avançado estágio de desenvolvimento.

Fonte: BRASIL (2007).

3.5 Aerofotogrametria

Fotogrametria é a arte, ciência e tecnologia para obtenção de informações sobre um determinado objeto físico, que, permitem medições, interpretações de imagens fotográficas entre outros (JENSEN, 2009). A invenção do avião, junto ao avanço da tecnologia permitiu a evolução dos métodos de fotogrametria, gerando assim, a aerofotogrametria. Fitz (2008) segrega a fotogrametria em duas áreas, sendo elas: métrica (obtenção de dados quantitativos) e interpretativa (obtenção de dados qualitativos). Entretanto, na aerofotogrametria, o segundo caso é mais explorado por tem como objetivo reconhecer e/ou identificar objetos ou feições. A aerofotogrametria permite uma representação do terreno nas três dimensões, através da sobreposição de fotografias. Para isso, é desejável ao menos duas fotografias de ângulos diferentes para viabilizar a visão tridimensional (COELHO; BRITO, 2007), como mostra a Figura 10.

Figura 10 - Captação de imagens de mesmo ponto com diferentes ângulos a partir de fotos aéreas



Fonte: Extraído de Coelho e Brito (2007).

O mapeamento aerofotogramétrico tem como produto a geração de ortofotos e ortomosaicos (2D) e modelos digitais de elevação e do terreno (3D). Esta ferramenta tem ganhado cada vez mais espaço nas geociências, isto é dado pela sua praticidade

e custo baixo, uma vez que RPAS estão cada vez mais acessíveis no mercado. Silva Junior (2019) relata a grande vantagem da utilização de RPAS que, além da acessibilidade a ferramenta permite a ampliação da capacidade de captação de resultados num tempo relativamente baixo, com boa resolução espacial e nitidez, sendo possível a captação de imagens a qualquer época do ano. Assim, contribuindo veemente na confecção das cartas geotécnicas voltadas ao planejamento urbano e diretrizes para uso e ocupação de solo em zonas de risco.

3.6 Geofísica aplicada a geotecnia

A Geofísica é uma ferramenta indireta muito utilizada para investigações geológica-geotécnicas em sub superfície, através dela é possível determinar espessura do solo, profundidade de superfície rochosa, saturação de água no solo, nível do lençol freático entre outros. Souza (2006) diz que métodos geofísicos permitem a visualização contínua do subsolo sem que haja interferências no meio. O mesmo autor relata sobre a importância da escolha do método geofísico a ser empregado, sendo fundamentais análises prévias para a averiguação da aplicabilidade de um método, em outras palavras é necessário a existência de contrastes em propriedades físicas dos materiais, para que sejam detectas anomalias no meio.

Dentre os principais métodos geofísicos, os métodos geoeletricos são os que mais se destacam e tem sua eficácia comprovada para encostas que apresentem riscos de deslizamento (LUCAS, 2015; RIBEIRO, 2013; XAVIER, 2010). Dentre os diferentes métodos elétricos destacam: Polarização Induzida (baseado nas medições das variações de voltagem baseado no tempo ou frequência), Potencial Espontâneo – SP (análise da diferença de potenciais) e o Método de Eletrorresistividade (estudo do potencial elétrico de campos elétricos naturais ou artificialmente provocados. Diferentes são as aplicabilidades de cada um dos métodos. Para o objetivo proposto, o método de eletrorresistividade é o que se demonstra mais efetivo.

3.6.1 Método de eletrorresistividade

Método baseado em medições do potencial elétrico como forma de determinar a resistividade elétrica dos materiais, que por sua vez permitem o reconhecimento de

estruturas geológicas em subsuperfície (TELFORD; GELDART; SHERIFF, 1990). O método é fundamentado pela Lei de Ohm, esta lei pode ser definida entre a relação entre a resistividade (ρ) e a resistência (R) de um condutor homogêneo. De forma sucinta a resistividade pode ser determinada como sendo a medida da dificuldade que a corrente elétrica apresenta durante a passagem de um dado material (BRAGA, 2006). Considerando que a corrente elétrica flui de forma tridimensional e considerando que o subsolo tenha uma resistividade constante pode-se determinar sua fórmula como sendo:

$$\rho = 2\pi r (V/I) \quad (3)$$

Em que:

ρ = resistividade

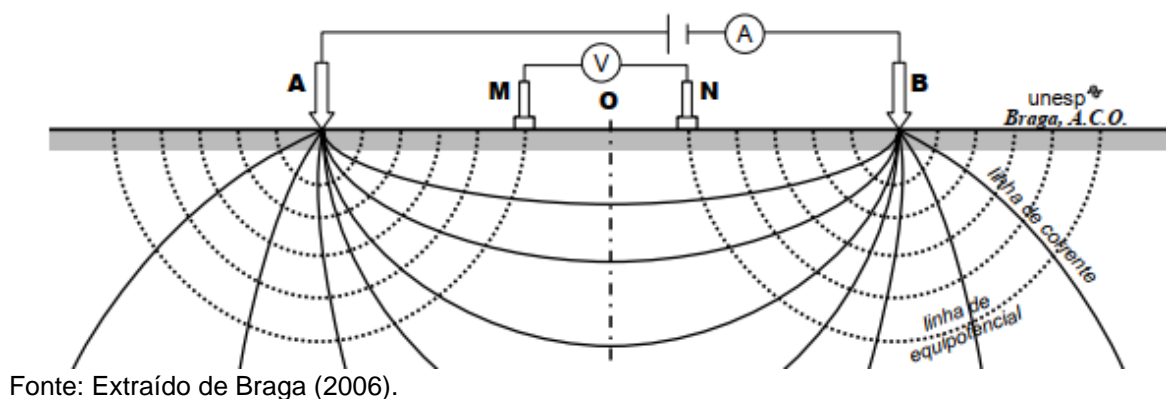
r = distância entre o eletrodo de corrente e o ponto em que o potencial é medido

V = potência

I = Intensidade da corrente

A Intensidade da corrente pode ser medida através da conexão entre um cabo condutor de uma bateria a um eletrodo de corrente. Já a diferença de potencial entre dois pontos pode ser mensurada através de um voltímetro conectado a quatro eletrodos ou mais dado uma distância (r). A Figura 11 perfila os 4 eletrodos e suas respectivas correntes.

Figura 11 - Configuração tetraeletródica usual de campo

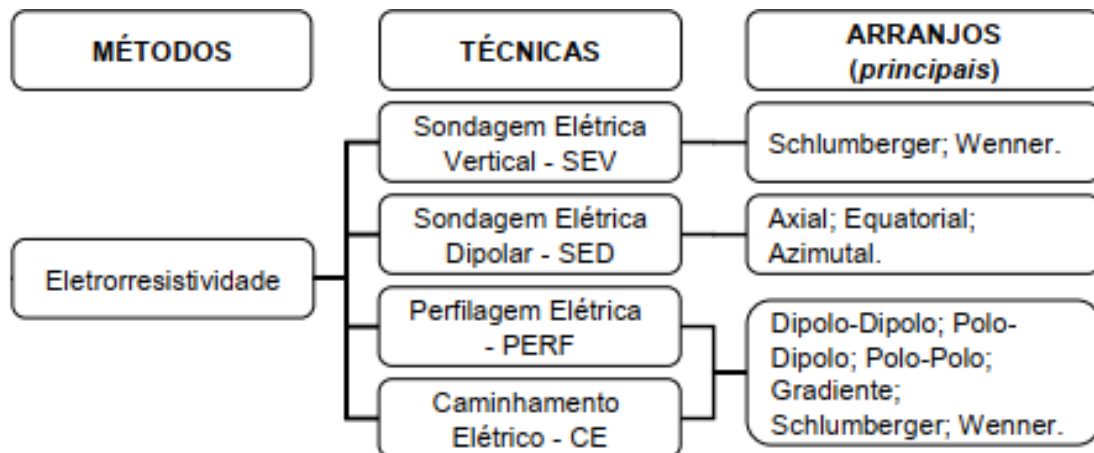


Fonte: Extraído de Braga (2006).

Braga (2006) classifica a realização do método em quatro diferentes técnicas de campo, sendo elas: Sondagem Elétrica Vertical (SEV), Sondagem Elétrica Dipolar

(SED), Perfilagem Elétrica (PERF) e Caminhamento elétrico (CE). Para cada técnica de campo diferentes procedimentos (arranjos) de campo podem ser utilizados, como mostra a Figura 12.

Figura 12 - Classificação do Método de Eletorresistividade - detalhamento



Fonte: Modificado de Braga (2006).

3.6.2 Dipolo-Dipolo

Este arranjo determina uma corrente de potencial fixa para todo o levantamento, e cada afastamento entre pares de eletrodo representam um nível de profundidade, portanto quanto maior a distância entre pares, maior será a profundidade (MUSSETT; KHAN, 2000). Para a recepção, os eletrodos (MN) recebem as correntes emitidas pelos eletrodos e emissão (AB). Cada medida obtida através desse arranjo parte da leitura dos eletrodos MN que vão se intercalando. A profundidade atingida para cada nível investigado é dada pela distância entre os centros dos dipolos considerados (AB e MN) sobre quatro (BRAGA, 2006).

3.6.3 Meios físicos e suas respectivas respostas a eletorresistividade

Os materiais com diferentes propriedades físicas tendem a apresentar diferentes respostas a eletorresistividade, que é medida na unidade (ohm.m). Materiais menos porosos, como por exemplo rochas maciças de material ígneo ou metamórfico apresentam altos valores de resistividade, enquanto materiais de alta porosidade, como é o caso dos solos saturados, apresentam valores mais baixos. Fernandes (1984) atenta para rochas com o alto grau de fraturamento, uma vez que, a alta incidência de água entre as fraturas da rocha propiciam valores de resistividade

mais baixos quando comparados a rochas intactas. Reynolds (1997) determina alguns valores base para a interpretação geológica a partir das respostas de eletrorresistividade de cada material. A Tabela 5 mostra detalhadamente a baixa resistividade em solo (zonas saturadas) e a alta resistividade para rochas. Para Braga (2006) a ampla gama de variação na zona não saturada é dada pelas variações no conteúdo de água em sedimentos ou rochas.

Tabela 5 - Classificação litológica baseada na resistividade

TIPO LITOLÓGICO	RESISTIVIDADE ($\Omega.m$)
Zona não saturada	100 a 30.000
Zona saturada	20 a 200
Basalto	10 a $1,3 \times 10^7$
Diabásio	200 a 5×10^7
Calcário	50 a 1×10^7
Gnaisse	3.000 a 5.000
Granito	5.000 a 1×10^6
Quartzo	$< 1 \times 10^6$

Fonte: Adaptado de Reynolds (1997).

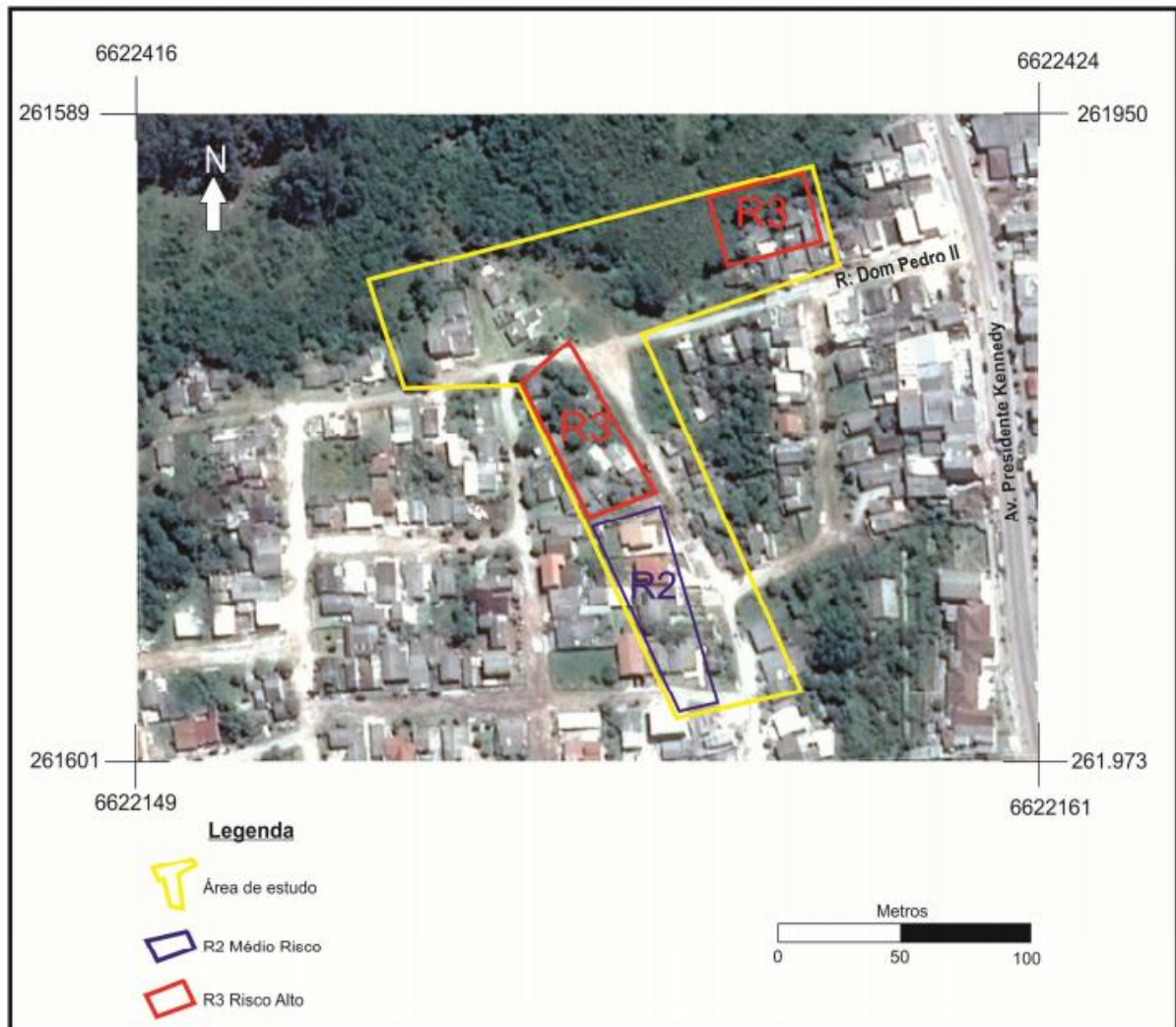
3.7 Trabalhos anteriores aplicados

Estudos anteriores foram realizados no município de Caçapava do Sul cujo o foco concentrou-se na avaliação geológico-geotécnico com ênfase nas áreas de riscos presentes no perímetro urbano. A seguir será abordado de modo sucinto os pontos principais de cada trabalho.

Lucas (2015) aponta para necessidade de estudos geológicos-geotécnicos em áreas que apresentem riscos de deslizamento, como forma de prevenção de acidentes com danos socioeconômicos. Após a interpretação de fotos aéreas na região, escolheu-se uma área poucos metros a oeste do centro do perímetro urbano que apontasse para uma grande variação topográfica, onde, análises geofísicas (eletrorresistividade pelo caminhamento elétrico) permitiram identificar o contato entre a rocha e o solo, além de caracterizar as dimensões da zona saturada e os planos preferenciais de escorregamento. Após a copilação dos dados de geofísica e análise geotécnica realizados in situ, realizou-se a classificação da área com base nos critérios estabelecidos por Brasil (2007) (Figura 13). A autora orienta futuros trabalhos na região para a produção de estudos e realização de documentos específicos para

orientar a prefeitura de Caçapava do Sul-RS sobre possíveis locais de riscos de ocupação.

Figura 13 - Mapa de zoneamento com os graus de risco da área de estudo

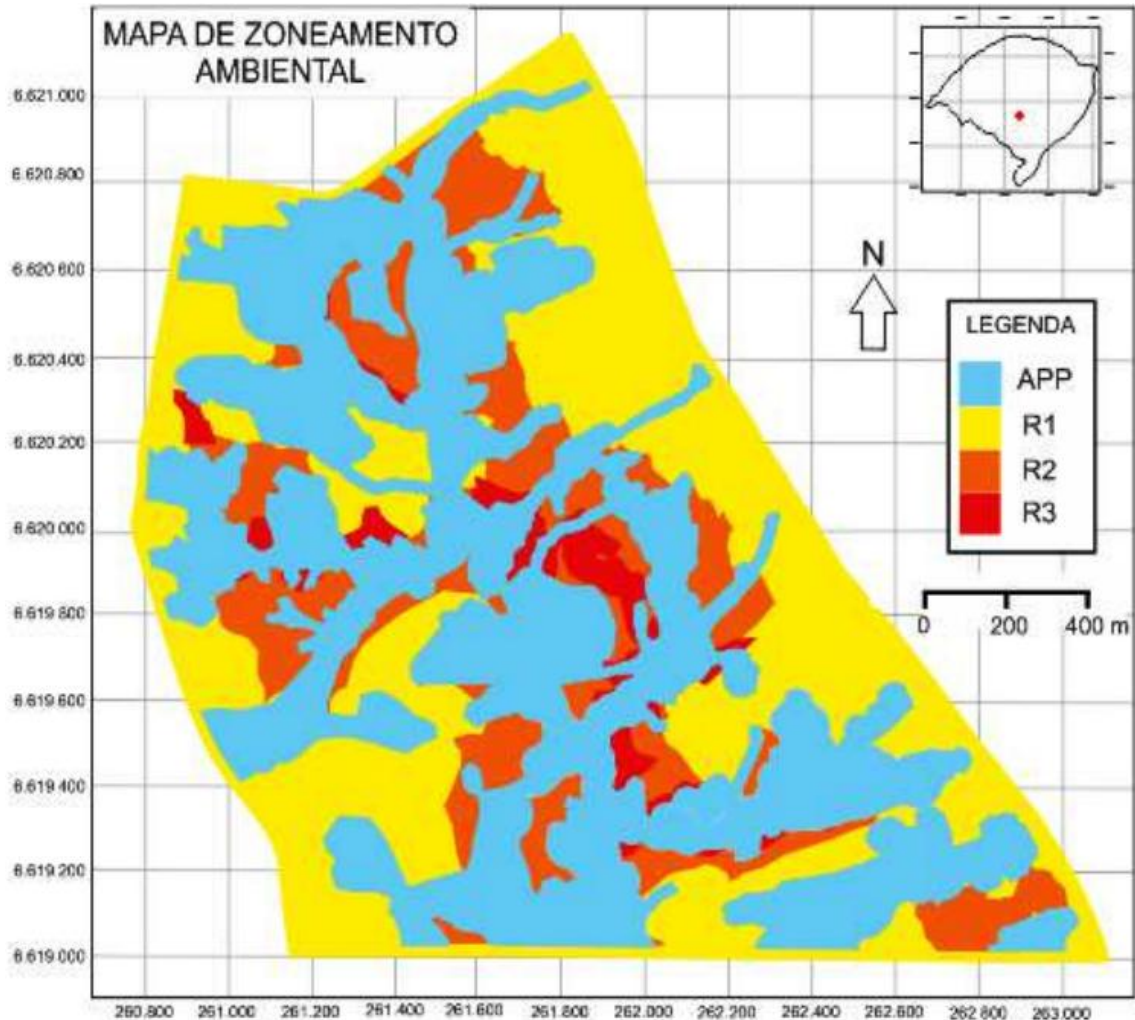


Fonte: Extraído de Lucas (2015).

Tendo em vista o elevado crescimento urbano que vem ocorrendo em Caçapava do Sul - RS, Pereira Barbosa *et al.* (2016a) elaborou um estudo geológico-geotécnico e ambiental em uma área de interesse para a expansão urbana do município. O estudo foi executado na região sul da área urbana, com dimensões equivalentes a 20% do perímetro urbano. A área de estudo foi categorizada em índices de risco à ocorrência de impactos ambientais ou acidentes geológico-geotécnicos. Como produto elaborou-se um mapa de zoneamento ambiental (Figura 14). Após a análise dos parâmetros do meio físico não foram identificados dados desfavoráveis à

ocupação urbana. Porém destaca-se a importância da preservação das APPs, que contemplam boa parte da área estudada.

Figura 14 - Mapa de zoneamento ambiental da área estudada



Fonte: Extraído de Pereira Barbosa *et al.* (2016a).

Neste mesmo ano, os autores supracitados realizaram um novo estudo, porém, na região nordeste do município. Neste trabalho, por intermédio do método sísmico realizado na Rua Barão de Caçapava, os autores concluíram que a as laterais do talude analisado, apresenta solo de baixa espessura, porém, com embasamento de granito muito fraturado e alterado. Além disso, a presença de zonas de água somada aos fatores descritos acima, os autores destacam tratar-se de uma área de vulnerabilidade, portanto, faz-se necessário o monitoramento regular da área a fim de evitar acidentes (BARBOSA *et al.*, 2016a, 2016b). Pereira (2017) também direcionou seu estudo para a região nordeste do município que, através de interpretações aerofotográficas, localizou encostas urbanas que justificavam o estudo geológico-

geotécnico geofísico na área. A área de estudo é localizada na rua Barão de Caçapava, esquina com a rua Afonso Fabrício, bairro periférico na zona nordeste do perímetro urbano. A autora concluiu neste estudo, que a área avaliada encontra-se em risco e como produto final, gerou um mapa de zoneamento conforme apresentado na Figura 15.

Figura 15 - Mapa de zoneamento com os graus de risco da área de estudo



Fonte: Extraído de Pereira (2017).

Como conclusão observa-se um adensamento de análises na zona nordeste do perímetro urbano de Caçapava do Sul, a maioria dos trabalhos basearam suas pesquisas na metodologia do sistema de classificação do Ministério das Cidades em

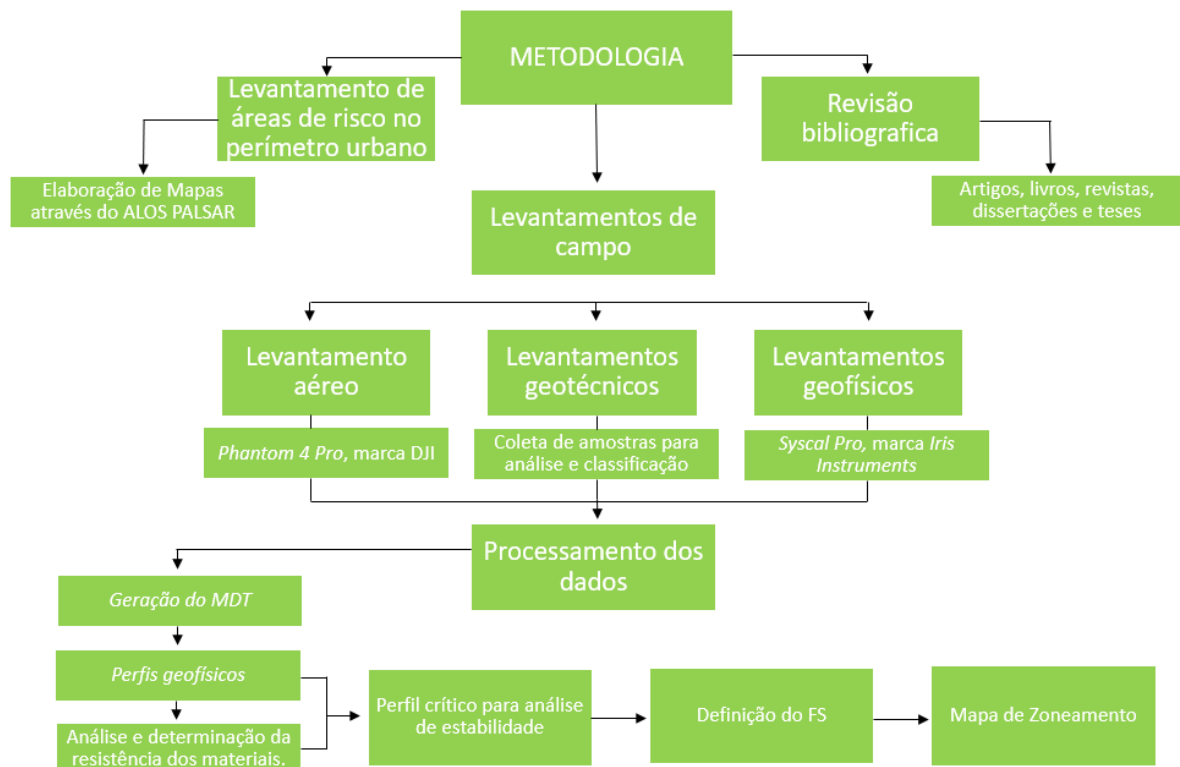
parceria com o IPT para a classificação da área segundo seu grau de risco geológico-geotécnico, diferenciando-as em: R1, R2, R3 e R4 (BRASIL, 2007). Os resultados obtidos juntos a conclusões geradas apontam para a importância de novos estudos na região.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O início da pesquisa se deu através de pesquisas bibliográficas a respeito do mapeamento geológico-geotécnico de risco para compreender a metodologia e definir os objetivos a serem alcançados. Posteriormente realizou-se um inventário de todos os trabalhos já desenvolvidos na área de estudo, conforme apresentado no item 3.7. A definição dos polígonos de área urbana e demais polígonos da região foram extraídos do Plano Diretor do município (CAÇAPAVA DO SUL, 2006), de acordo com Figura 4 apresentado no item 2.3.

Os materiais utilizados, bem como os métodos para a realização deste projeto, serão divididos em itens a fim de se obter uma discussão metodológica mais qualificada. O fluxograma a seguir demonstra de forma mais efetiva a metodologia proposta.

Figura 16 - Fluxograma



Fonte: Autor.

4.1 Levantamento de áreas de risco

O levantamento de áreas de risco presentes no núcleo urbano foi a etapa base para a elaboração do projeto. Para isso, utilizou-se de imagens oriundas de sensores remotos. O banco de dados processado a partir das imagens do satélite ALOS (*Advanced Land Observing Satellite*) da empresa *Japan Aerospace Exploration Agency* (2014) permitiu a extração de dados topográficos por interferometria, possibilitando a geração de modelos digitais de superfície. O sensor utilizado foi o sensor de micro-ondas PALSAR (*Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar*), que apresenta as melhores resoluções espaciais quando comparado a outros sensores remotos (12,5 m/pixel). A partir da detecção de áreas com altas variações topográficas foi possível selecionar as áreas necessárias para estudos mais aprofundados. O software *QGis 3.14* possibilitou a geração de um mapa de declividade de toda a área urbana.

O mapa de declividade, com a classificação proposta por Embrapa (1979), permitiu visualizar as variações topográficas presentes no perímetro urbano e, com base nesta informação, orientou a área a ser escolhida como foco desta pesquisa.

4.2 Levantamentos de campo

A metodologia de campo foi dividida em três etapas: Levantamentos aéreos, levantamentos geofísicos e levantamentos geotécnicos.

4.2.1 Levantamentos aéreos

O levantamento aéreo foi realizado através de um RPAS modelo *Phantom 4 Pro*, marca DJI com câmera de 12,4 megapixels. Antes de ir a campo para a captação das fotografias, foi realizado um planejamento dos voos, por meio do software *Universal Ground Control System (UgCS)* versão 3.7 (Figura 17A). Para obtenção de uma resolução espacial constante, as linhas de voos foram definidas mantendo-se constante a distância entre o solo e a aeronave, propiciando uma homogeneização da resolução espacial que foi de 3 cm/pixel. Em campo utilizou-se um notebook e um smartphone, acoplado ao controle remoto para a visualização da câmera da aeronave (Figura 17B).

Figura 17 - Composição de imagens referente ao levantamento aéreo: A) planejamento prévio do voo; B) Execução do voo em campo



Fonte: Autor.

4.2.2 Levantamentos geotécnicos

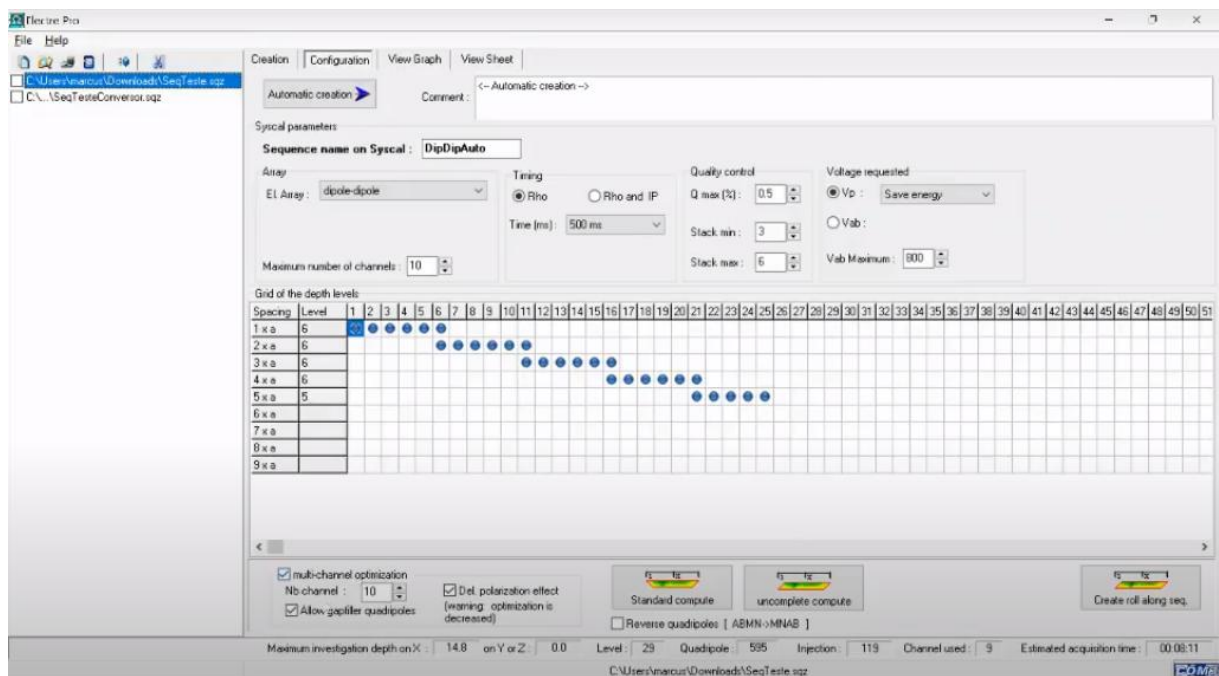
Na etapa de investigação geotécnica, foi realizado o reconhecimento da área, com observações e descrições estruturais das discontinuidades presentes nas rochas, caracterização e classificação do solo. Além disso, foram coletadas amostras de solo para posteriormente serem descritas, assim como, amostras de rochas, para obtenção em laboratório da resistência do material. Para as etapas descritas acima, foi utilizado bússola para obter medidas estruturais, martelo, câmera fotográfica e sacos plásticos para armazenar as amostras coletadas. Nesta etapa, a área de estudo foi dividida em quatro diferentes meios físicos, sendo eles: Rocha sã, rocha fraturada, saprólito e solo (orgânico proveniente de aterro, e, por vezes, residual).

Por fim, foi elaborado um checklist, com observações necessárias para a avaliação de possíveis áreas com potencial de risco, conforme metodologia proposta por Brasil (2007). Desta forma, foi levado em consideração: o padrão das moradias, o tipo de talude (se naturais ou de corte), distância da moradia ao topo ou à base dos taludes, inclinação dos taludes, presença de água na área, e por fim os sinais de movimentação de massa. Através desta avaliação foi possível elaborar o mapa de zoneamento da área de estudo.

4.2.3 Levantamentos geofísicos

O levantamento geofísico propiciou um melhor entendimento do subsolo da área de estudo. A escolha para a utilização desta ferramenta partiu da premissa de ser um método investigativo sem qualquer impacto físico e de rápida execução que apresentasse ótimas respostas. O método que mais se adequa para o objetivo do trabalho foi o método de eletrorresistividade, tendo como técnica de campo o caminhamento elétrico com o arranjo dipolo-dipolo. A escolha foi baseada na literatura e por ser um mecanismo com boa resposta às variações laterais de resistividade. Para o planejamento da operação foi utilizado o software *Electro Pro* onde foi configurado o tipo de levantamento, número de eletrodos a serem utilizados e o espaçamento entre eles (Figura 18). Para o levantamento optou-se pela utilização de 36 eletrodos com o espaçamento médio de 2,5m gerando perfis de 90m de comprimento com profundidade média de 15 metros. Após a geração do arquivo de extensão “.sqz” o dado foi carregado no aparelho para ser feito a medição.

Figura 18 - Configurações do software Electro Pro

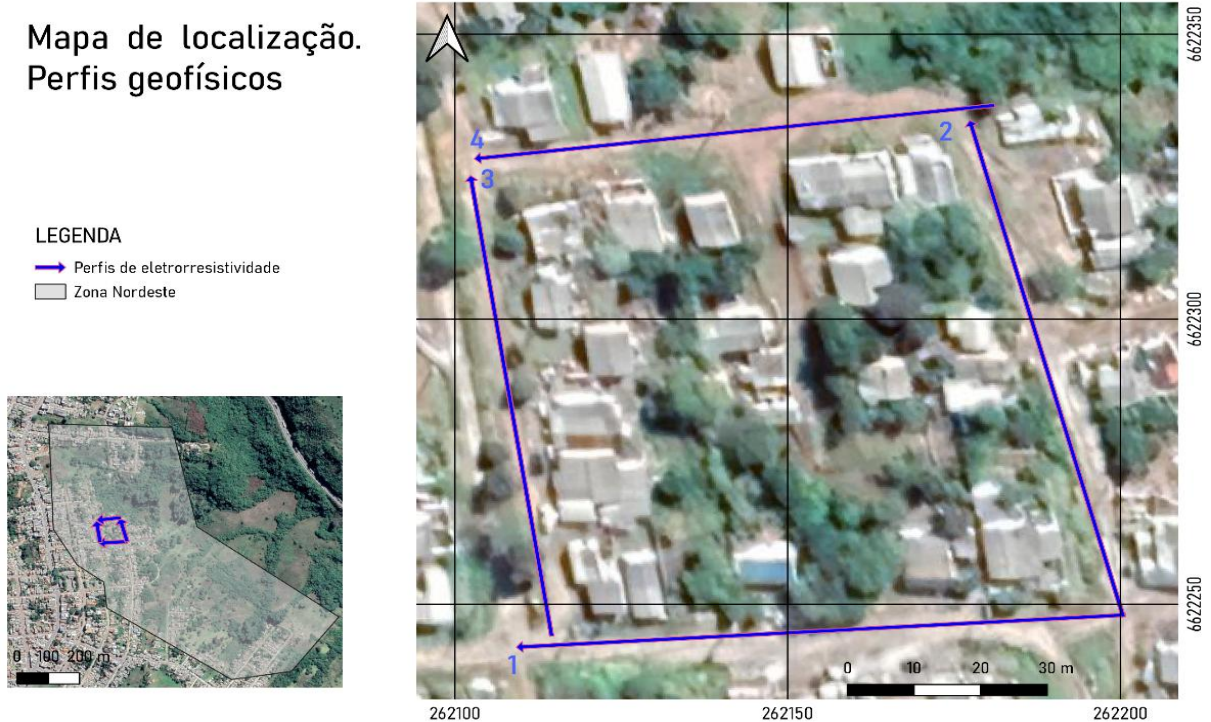


Fonte: Autor.

O local escolhido para o levantamento foi definido a partir de estudos preliminares baseados no MDT gerado para a área de estudo. A localização dos perfis é dada no mapa (Figura 19) com cada perfil realizado sendo representado por uma

seta seguindo a numeração de coleta. Os quatro perfis foram gerados a partir do mesmo arquivo “.sqz”, portanto, apresentam as mesmas configurações.

Figura 19 - Mapa de localização dos perfis geofísicos



Para a medição foi utilizado um resistivímetro da marca *Iris Instruments*, modelo *Syscal Pro* com operação em 10 canais de saída e potência de 250 watts (Figura 20A). Após o *download* do arquivo gerado na etapa anterior, os eletrodos foram posicionados de acordo com o previsto para cada um dos perfis gerados (Figura 20B). O levantamento foi realizado após alguns dias de muita chuva na região, aumentando assim a saturação do solo e obtendo resultados de resistividade bem definidos.

Figura 20 - Composição de imagens referente ao levantamento geofísico: A) Resistivímetro; B) Posicionamento dos eletrodos



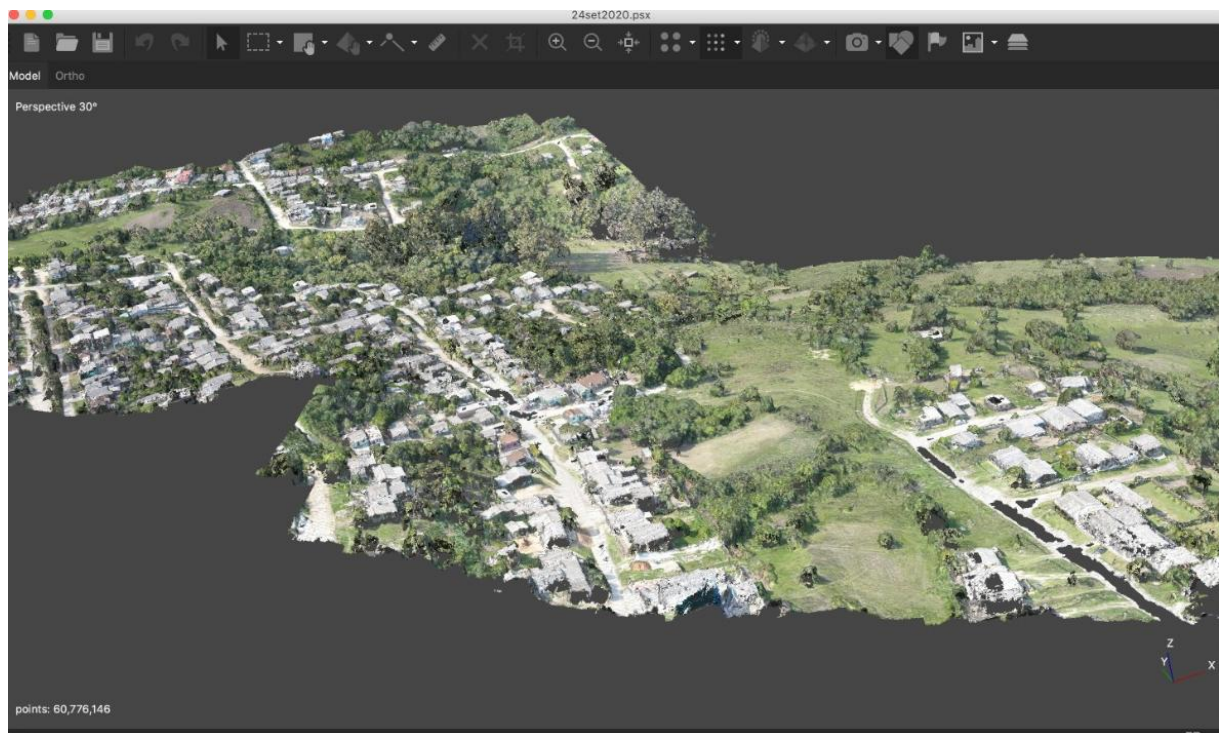
Fonte: Autor.

4.3 Processamento dos dados

4.3.1 Geração do MDT

As fotografias obtidas pelo RPAS foram extraídas para o software *Agisoft Metashape* para geração da ortofoto, junto a um modelo tridimensional da área que permitiu a criação do modelo digital do terreno (MDT). Após a importação das fotos ao software foi realizado o modelo de nuvem esparsa, que possibilitou a geração da nuvem densa de pontos para que, após pequenos ajustes no processo, foi gerado a ortofoto (Figura 21).

Figura 21 - Ortofoto gerada através do software *MetaShape*



Fonte: Autor.

Para obtenção do MDT, através do software *Agisoft Metashape* foi necessário fazer uma classificação por intermédio da ferramenta *Classify Ground Points*, para que construções e vegetações fossem desconsideradas na geração do MDT. A classificação automática ideal foi encontrada após algumas tentativas, como mostra a Figura 22. Os parâmetros utilizados que melhor classificaram os pontos foram 15° de ângulo máximo, 0,5m de distância máxima e 200m de tamanho de célula.

Os pontos classificados, representados na Figura 22 com a cor marrom, correspondem aos pontos relativos à superfície do terreno. Já os pontos representados na cor branca, correspondem aos pontos a ser desconsiderados, por tratar-se de construções civis, árvores, veículos, etc. para a geração da malha 3D triangularizada.

Figura 22 - Progresso na classificação de pontos de terreno e demais pontos a serem desconsiderados na construção da malha triangularizada do terreno



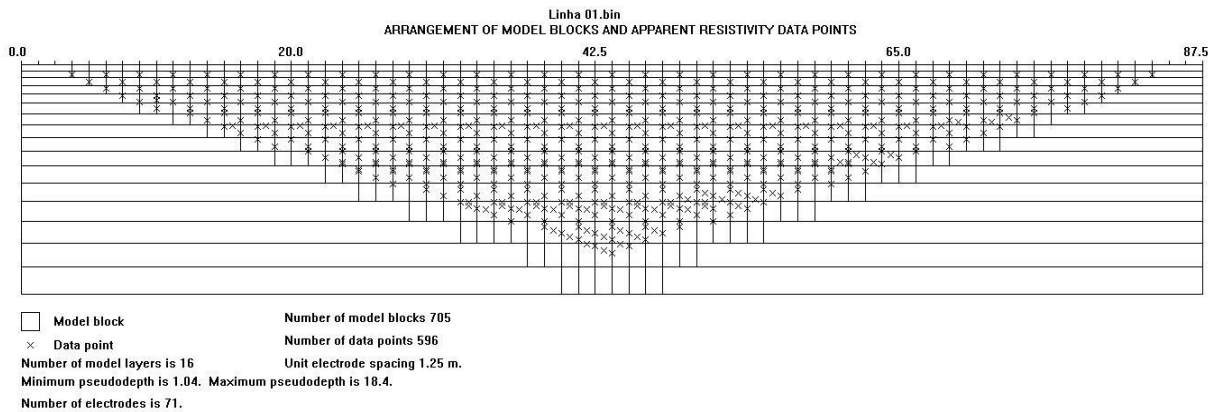
Fonte: Autor.

4.3.2 Geração dos perfis geofísicos

Após a coleta em campo, foi realizado o upload dos dados através do software *Prosys II* também da empresa *IRIS Instruments*. Após a averiguação na qualidade do levantamento o dado foi extraído na extensão “.dat” para o seu devido processamento.

As medidas de resistividade coletadas em campo representam valores aparentes e não os verdadeiros valores do material. Portanto, foi necessário fazer a inversão dos dados, isto é, a mudança iterativa de parâmetros para se obter o melhor ajuste. Para a inversão dos dados e geração dos perfis geoeletricos utilizou-se o software *RES 2D INV* da empresa *GEOTOMO SOFTWARE*, através dele foi possível realizar a inversão do dado bruto permitindo a geração dos perfis geoeletricos mostrando a relação entre distância e profundidade para a resistividade em cada uma das seções. Aplicando os parâmetros básicos, juntamente com a topografia adquirida pelo MDT é possível gerar os perfis geoeletricos. Na Figura 23, observa-se o arranjo de blocos realizada pelo software a fim de estimar a resistividade por todo o perfil. Na imagem é possível observar o número de dados gerados no levantamento, e o número de eletrodos junto ao espaçamento entre eles. Optou-se por não realizar a extrapolação do dado, apresentando os resultados em formato de trapézio.

Figura 23 - Arranjo de blocos e pontos de resistividade aparente



Fonte: Autor.

4.3.3 Análise de estabilidade

A análise cinemática ficou a critério do *Stereo32*, que após introduzir as medidas estruturais coletadas em campo proporcionou a geração de diagramas de roseta que representa a frequência das direções das descontinuidades.

Para a devida análise de estabilidade é necessário definir propriedades físicas do material, portanto foi realizada uma análise laboratorial para a determinação da compressão uniaxial de rocha intacta. Foram analisadas duas amostras coletadas de afloramentos presentes no decorrer do perfil geofísico 1 e foram analisadas no Laboratório de Mecânica de Rochas, da UFRGS em Porto Alegre. Foi realizado um ensaio de carga pontual (PLT) parametrizado pela norma da Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas (ISRM, 1985). Através do valor obtido, utilizou-se o software *Rocscience RocLab*, e junto a algumas estimativas para variáveis não determinadas em laboratório foi possível definir as propriedades de resistência dos materiais e gerar os diagramas para cada um deles.

Os dados obtidos dos levantamentos geofísicos permitiram a caracterização geológica da área, e com o intuito de mensurar o fator de segurança na direção de mergulho do talude (direção diagonal aos perfis gerados), as quatro interpretações geológicas provenientes dos perfis foram integradas no software *Micromine*, para que fossem interpolados em um perfil transversal. Utilizando o MDT e as interpretações geológicas georreferenciadas foi possível gerar o perfil transversal.

Por fim, por meio do software *Rocscience Slide 2D* determinou-se os fatores de segurança (FS) do talude analisado, admitindo uma superfície de ruptura do tipo circular, tendo como métodos de equilíbrio Bishop e Janbu. Para o solo foi utilizado o

critério de ruptura de Mohr-Coulomb, já para o saprólito, rocha fraturada e rocha sã, se utilizou o critério de Hoek-Brown.

A geometria utilizada na análise foi obtida a partir do software *Micromine*, tendo sido exportada em formato "dxf". O peso das casas no solo foi incluído na análise, sendo definido como uma carga distribuída de 30 kPa, distribuída ao longo do talude. Após isso foram definidas as propriedades de cada uma das litologias previamente descritas. Para a análise dos Fatores de segurança (FS) utilizou-se a norma ABNT NBR 11682 (2009).

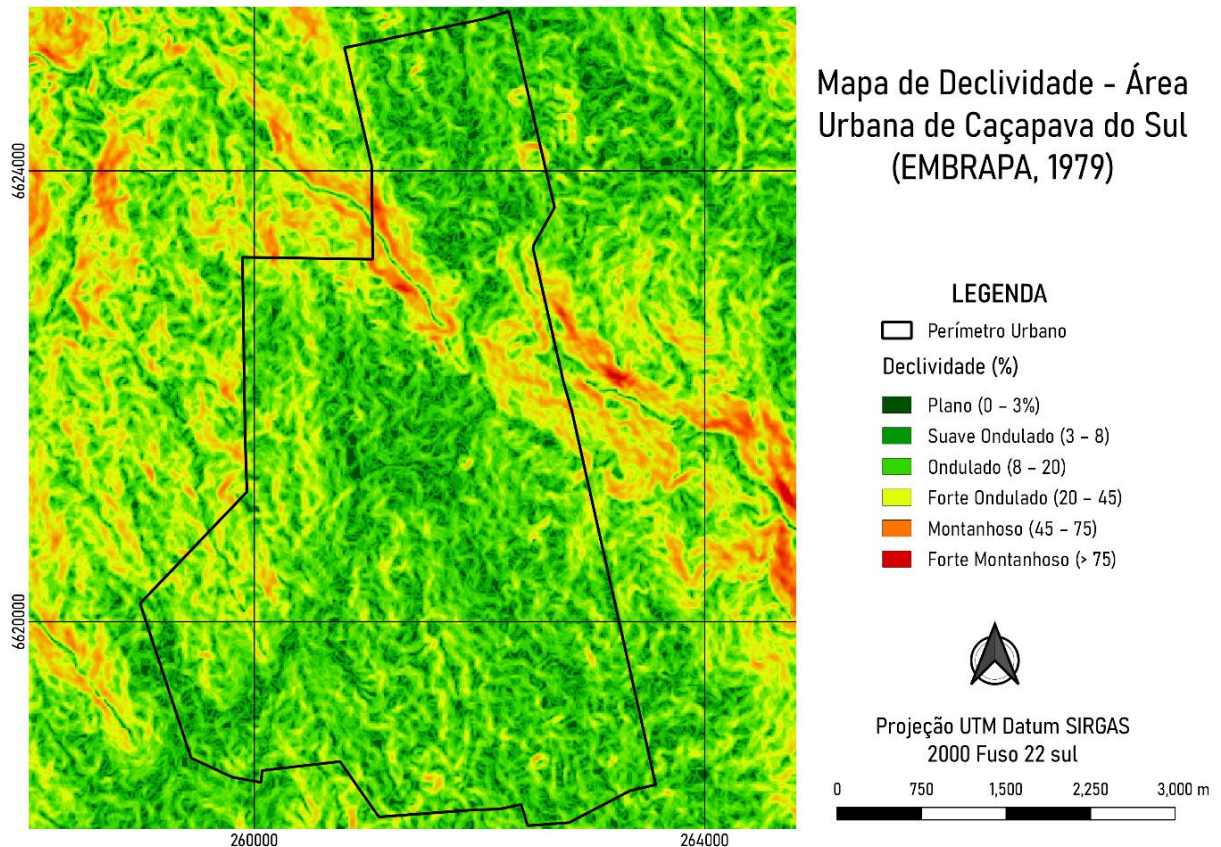
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Definição de Áreas de Risco no perímetro urbano

Para uma análise prévia de áreas de risco presentes no município, utilizou-se o mapa gerado através do Satélite ALOS PALSAR (JAXA, 2014) que possibilitou a visualização de áreas que necessitam de um olhar mais detalhado. Percebe-se que toda a região central do perímetro urbano apresenta declividades planas a onduladas, demonstrando ser áreas estáveis quanto a deslizamentos, conforme pode ser observado na Figura 24.

Já a porção nordeste da área de estudo, apresenta as maiores variações topográficas, categorizando-se na classe de Forte Ondulado a Montanhoso, de acordo com a classificação Embrapa (1979). Portanto, essa área pode ser classificada previamente como sendo uma área de risco, sendo assim a região utilizada como o foco do trabalho, necessitando um mapeamento detalhado.

Figura 24 - Mapa de Declividade - Área Urbana de Caçapava do Sul



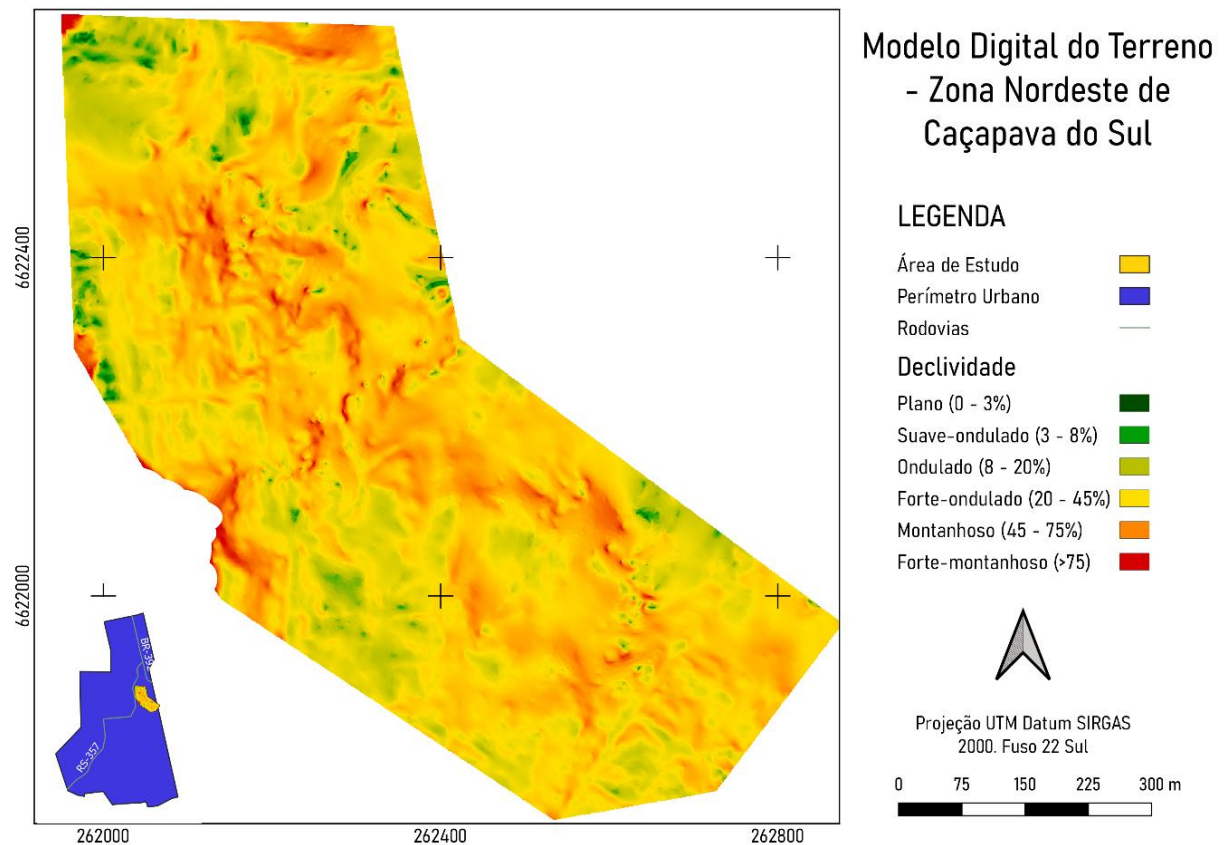
Fonte: Autor, banco de dados extraído de Jaxa (2014).

5.2 Modelo Digital de Elevação

Através do levantamento de áreas de risco descrito acima, escolheu-se a região a ser feito o levantamento aéreo, a fim de obter-se imagens de alta resolução espacial – 3cm/pixel – que, após o processamento das imagens possibilitou a elaboração de um Modelo Digital de Terreno (MDT), conforme observado na Figura 25.

O MDT foi classificado de acordo a declividade, onde é possível observar valores predominantemente da ordem de 20% a 75% de declividade, correspondente a um terreno classificado de “forte-ondulado” a “montanhoso”, segundo classificação EMBRAPA (1979).

Figura 25 - Modelo Digital do Terreno - Zona nordeste de Caçapava do Sul-RS



5.3 Caracterização geológica

Durante as visitas de campo, no reconhecimento da área pode-se fazer a caracterização dos meios físicos encontrados e suas respectivas descontinuidades.

5.3.1 Litologia

Pode-se observar a presença de rocha de baixo grau de alteração com coloração vermelha em superfície de alteração e em superfície fresca. Rocha equigranular de textura fina a média, tendo como minerais essenciais: Feldspato alcalino subédrico a anédrico (50%), Quartzo subédrico (25%), Plagioclásio anédrico (15%) e Biotita subédrica (10%). Por vezes notou-se um certo lineamento entre os minerais, sendo este uma milonitização de baixo grau na rocha, portanto, pode-se dizer que a área de estudo se encaixa na fácies sienogranito milonitizado, de acordo com a categorização implantada por Nardi e Bitencourt (1989). A Figura 26 mostra um dos afloramentos descritos no local.

Figura 26 - Afloramento de granito



Fonte: Autor.

Em outros pontos notou-se a presença de rocha com propriedades idênticas a rocha descrita no parágrafo acima. A diferença geológica para este grupo fica a cargo do excesso de descontinuidades presentes na rocha. No geral foram identificadas duas famílias principais de descontinuidades, conforme pode-se observar na Figura 27.

Figura 27 - Granito fraturado



Fonte: Autor.

Por vezes observou-se a presença de rocha de coloração marrom claro com elevado grau de alteração (saprólito). O estado de alteração da rocha impossibilitou a descrição mineralógica, porém, partes do saprólito menos alteradas indicam tratar-se do mesmo granito já descrito. A Figura 28 demonstra o saprólito encontrado na área.

Figura 28 - Saprólito



Fonte: Autor.

A cobertura de boa parte da área é predominantemente por solo de coloração marrom claro com grãos de tamanho areia a argila, angulosos a sub-angulosos. A textura arenosa associada a mineralogia semelhante a encontrada na rocha *in situ* presente na região indica um solo residual de alteração do sienogranito, que através dos parâmetros físico-químicos podem ser classificados como neosolo regolítico de granulometria areia argilosa com média compactidade. A Figura 29 mostra dois horizontes de solo, o horizonte A representa solos ricos em matéria orgânica com textura fina indicando ser antrópico, possivelmente material utilizado como aterro. O horizonte B representa o solo residual descrito acima.

Figura 29 - Horizontes de solos, sendo: A para o solo orgânico e B para o solo residual

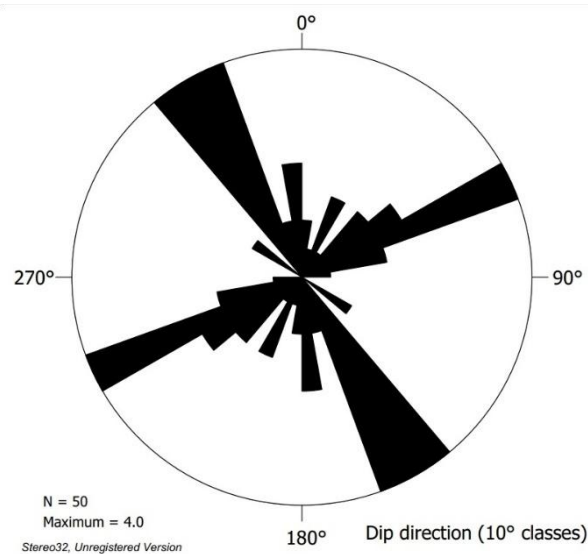


Fonte: Autor.

5.3.2 Estrutural

A partir da coleta de cinquenta medidas estruturais coletadas na notação *dip/dip direction* foi possível realizar um diagrama de roseta que mostra a frequência das descontinuidades (Figura 30). Observou-se inúmeras descontinuidades na região, mas no geral foram caracterizadas duas principais famílias, sendo uma disposta na direção NE, e a outra, com maior predomínio estrutural disposta na direção NW. Esta pré-disposição das descontinuidades coincide com lineamentos estruturais visualizados na etapa pré-campo.

Figura 30 - Diagrama de Roseta de Frequência



Fonte: Autor.

Algumas das discontinuidades de orientação NW-SE apresentaram movimentação cinemática, e através da análise de indicadores cinemáticos pode-se concluir que algumas das discontinuidades de orientação NW-SE são falhas de movimento sinistral (Figura 31). Portanto sugere-se que a região tenha sido afetada por uma zona de cisalhamento rúptil que através de tensões permitiu o falhamento regional. Falhamento este que permitiu a percolação de água entre a rocha elevando seu nível de alteração em inúmeros pontos da área de estudo.

Figura 31 - Indicador cinemático em discontinuidades na direção NW-SE

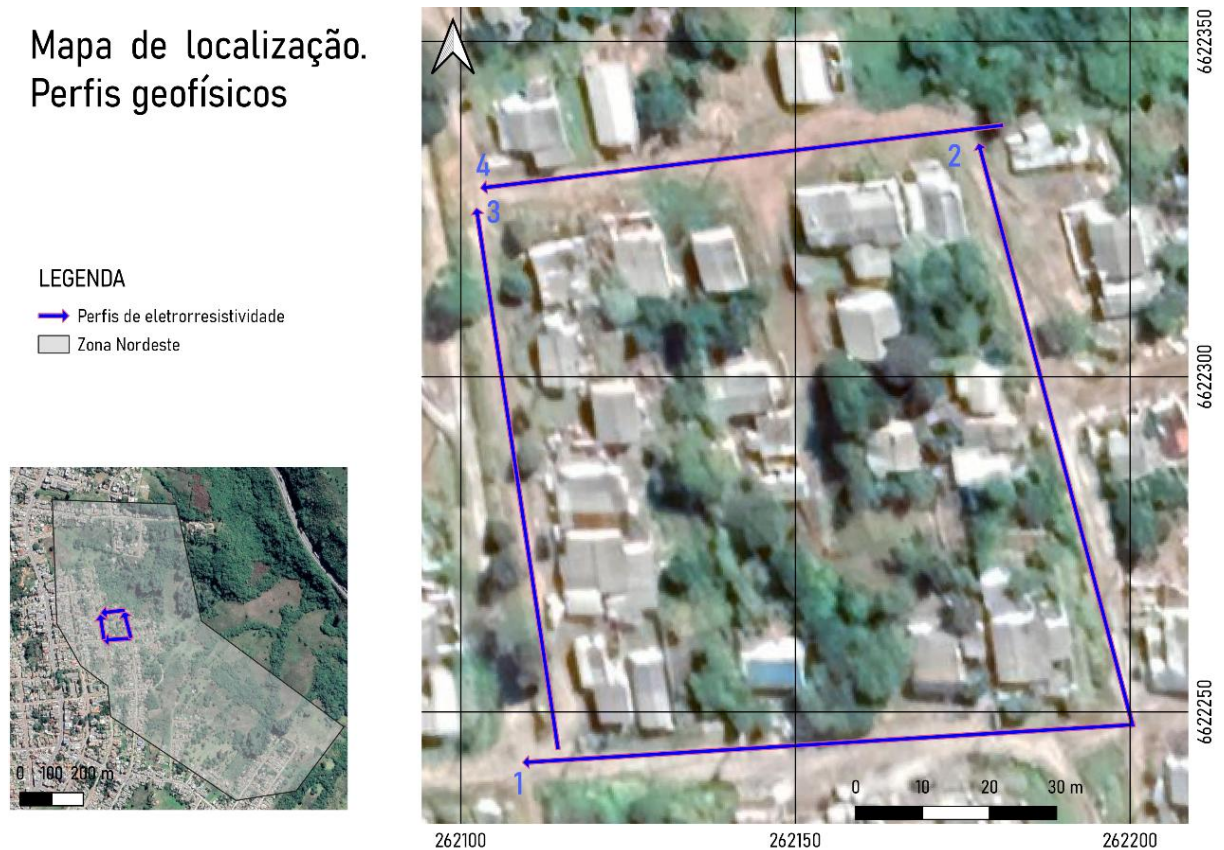


Fonte: Autor.

5.4 Perfis geofísicos

A análise do MDT juntamente a ocupação urbana foram essenciais na escolha da área para o levantamento geofísico (Figura 32). Após o devido processamento dos dados, os valores de resistividade apresentados pelas seções variam de 21 a 5.730 ohm.m.

Figura 32 - Mapa de Localização dos perfis e sua sequência



Fonte: Autor.

Baseado na categorização geológica feita em campo e de acordo com a bibliografia, adequando para a escala das imagens, optou-se por fazer a interpretação geológica utilizando os valores citados na Tabela 6. A nomenclatura “solo saturado” foi definida devido a alta quantidade de chuva no período da realização do levantamento.

Tabela 6 - Litologia de acordo com a resistividade em ohm.m

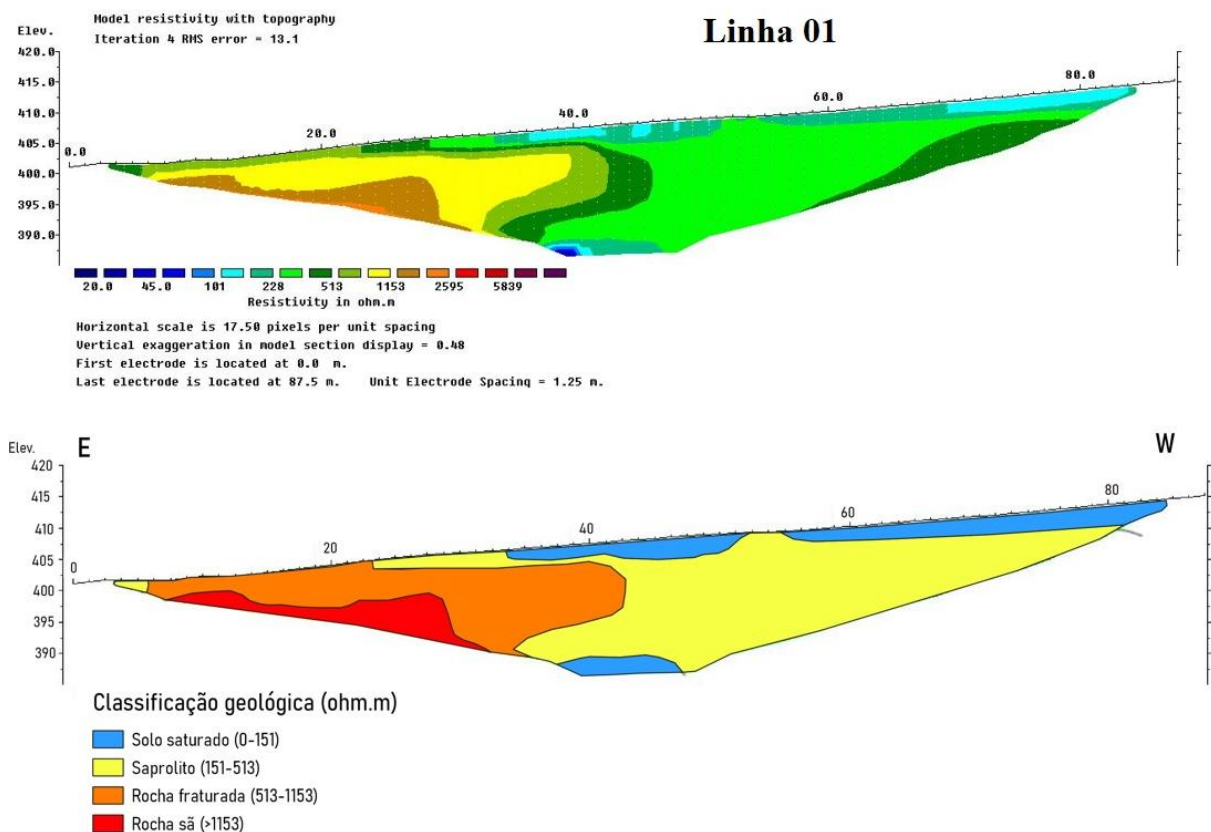
Tipo Litológico	Resistividade (ohm.m)
Solo saturado	0 a 151
Rocha alterada (saprólito)	151 a 513
Rocha fraturada	513 a 1000
Rocha sã	>1000

Fonte: Autor.

5.4.1 Perfil 1

A Figura 33 mostra o perfil um com erro RMS de 13,1% apresentando as quatro camadas geoeletricas. Na superfície central até o lado oeste, nota-se a presença de solo possivelmente residual com espessura média de 2 metros. Abaixo do solo e em alguns pontos em superfície, encontra-se uma espessa camada de rocha alterada (saprólito). A leste, em superfície, nota-se a presença do granito fraturado de espessura média de um metro, tendo como embasamento a rocha em seu estado mais bem conservado.

Figura 33 - Perfil 1 com os respectivos valores de resistividade e a classificação geológica correspondente

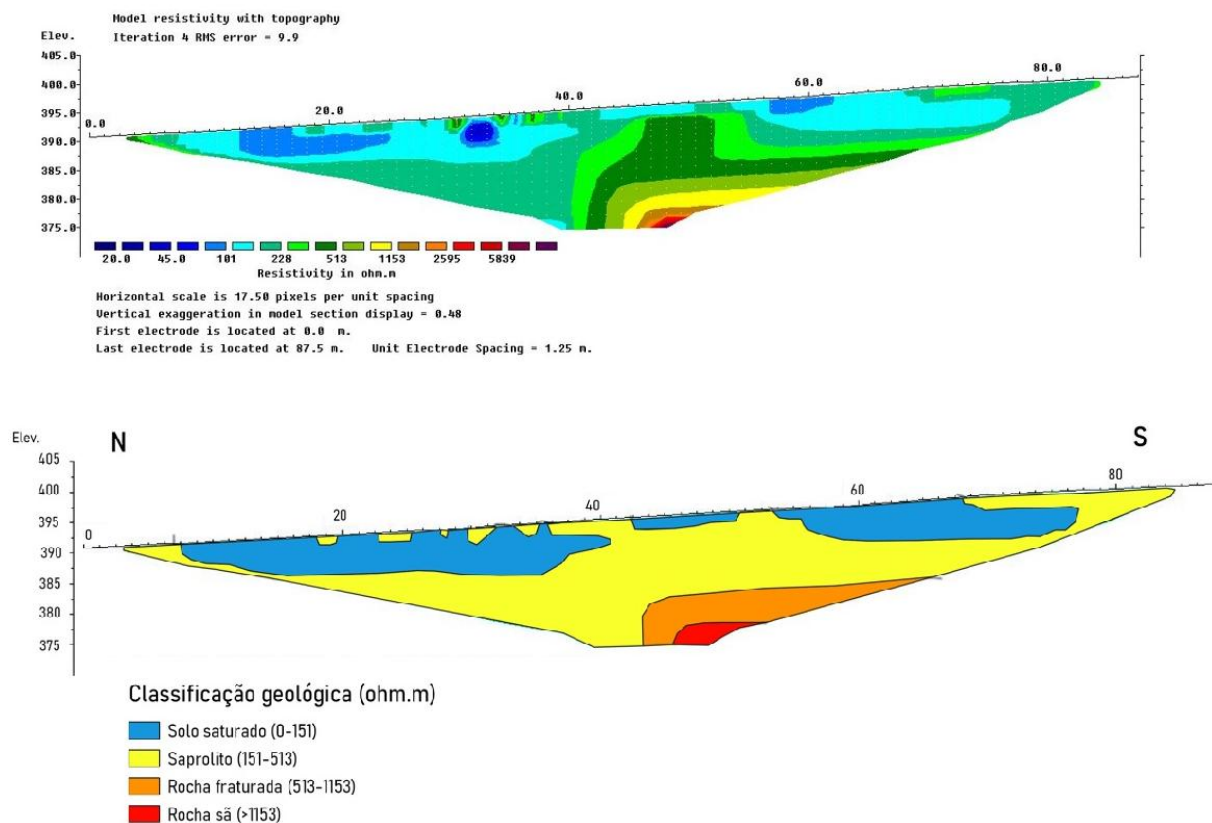


Fonte: Autor.

5.4.2 Perfil 2

A Figura 34 mostra o perfil dois com um erro RMS de 9,9% com as quatro camadas presentes. Nota-se camadas de solo saturado de até cinco metros de espessura dispostos sob a superfície do perfil. O solo por vezes é intercalado pela rocha alterada (saprólito), este que é também o embasamento para o solo saturado. Próximo ao centro do perfil, cerca de 10 metros a norte nota-se uma circunferência de baixa resistividade. Em campo, pode-se observar que se trata de um duto responsável por escoar o esgoto proveniente das casas dispostas na direção oeste. Todo caminho do esgoto é ao ar livre, com exceção do duto, que tem seu topo a 0,5m da superfície.

Figura 34 - Perfil 2 com os respectivos valores de resistividade e a classificação geológica correspondente



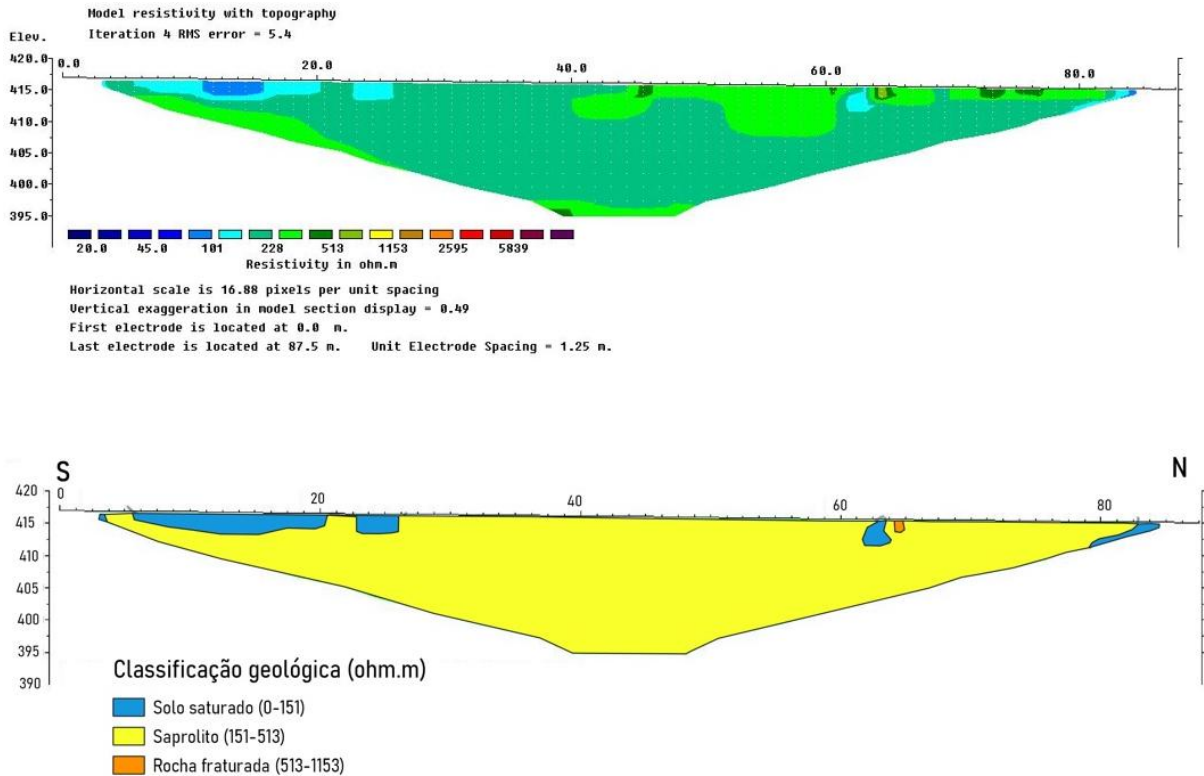
Fonte: Autor.

5.4.3 Perfil 3

A Figura 35 mostra o perfil três com erro RMS de 5,4% com a presença de três camadas, tendo como o predomínio a rocha alterada (saprólito). Em poucos pontos superficiais observa-se a presença do solo saturado e com até 3 metros de espessura.

A rocha fraturada presente no perfil é correspondente é um matacão métrico exposto a superfície.

Figura 35 - Perfil 3 com os respectivos valores de resistividade e a classificação geológica correspondente

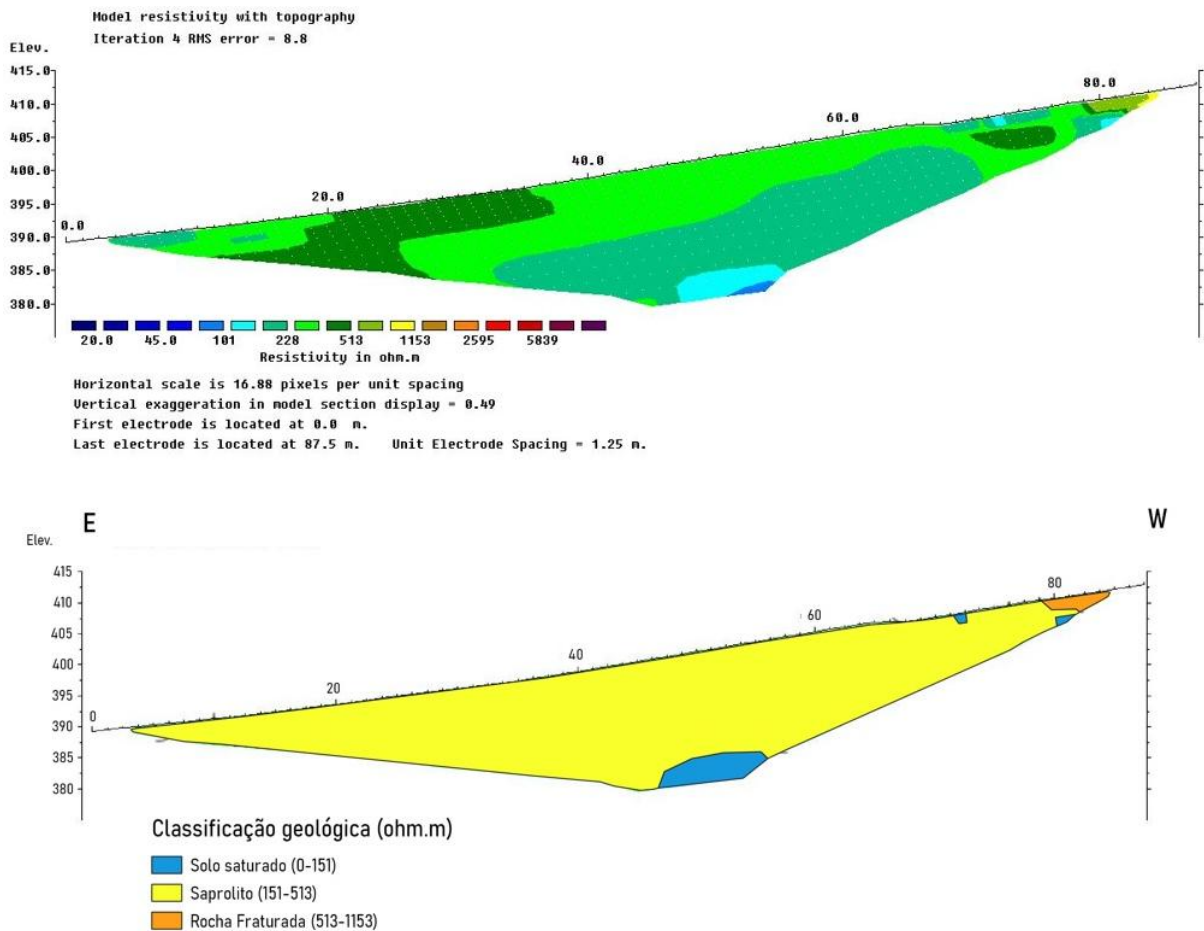


Fonte: Autor.

5.4.4 Perfil 4

A Figura 36 mostra a presença de três camadas no perfil quatro, sendo o predomínio da rocha alterada (saprolito), e nos últimos 10 metros a oeste do perfil nota-se um afloramento de rocha fraturada. Somente a aproximadamente 8 metros de profundidade observou-se a presença de solo residual.

Figura 36 - Perfil 4 com os respectivos valores de resistividade e a classificação geológica correspondente

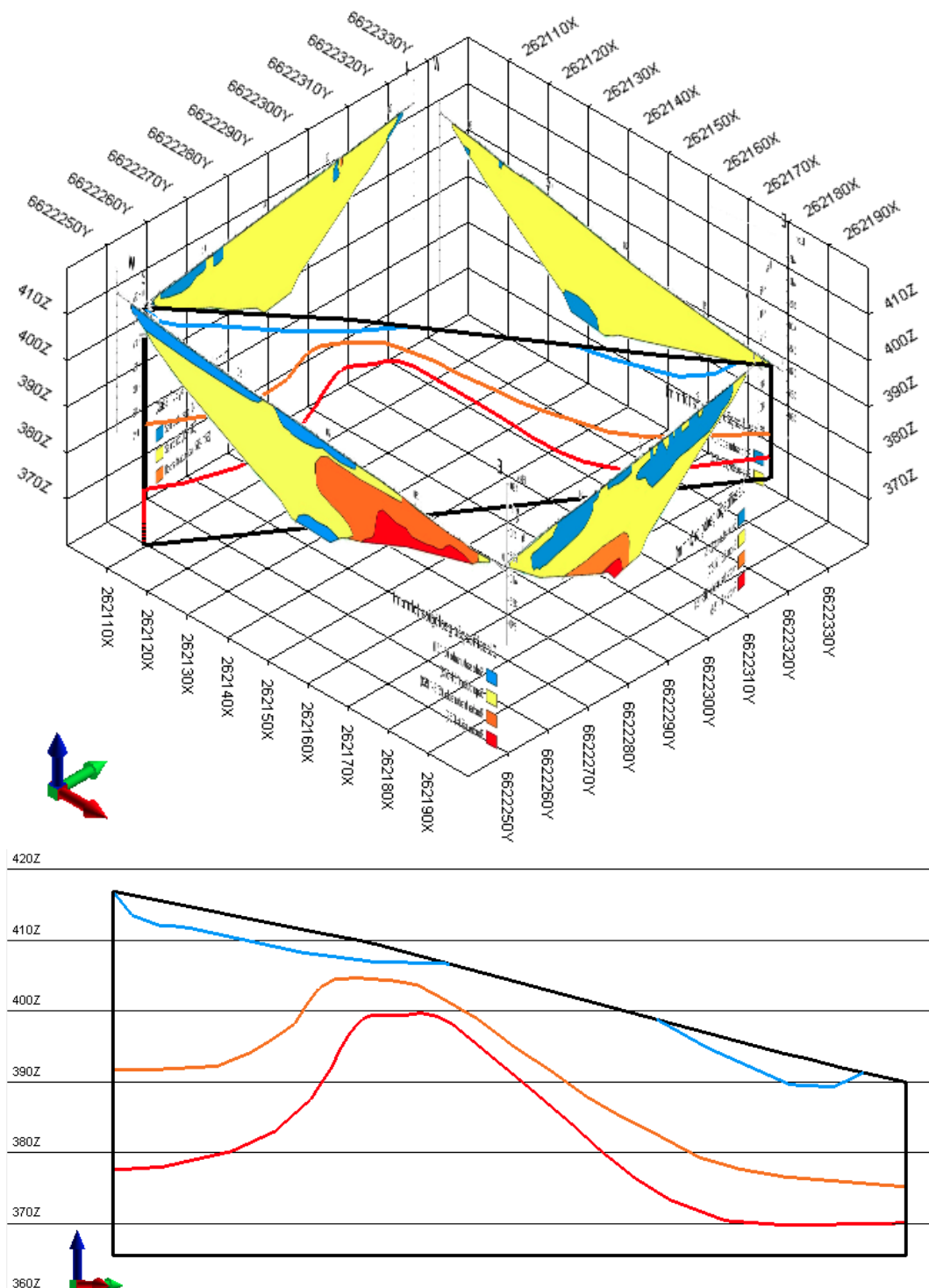


Fonte: Autor.

5.5 Perfil crítico para análise de estabilidade

Para a análise da estabilidade da região optou-se por definir um perfil crítico, transversal aos demais perfis (Figura 37A) tendo assim uma secção com superfície paralela ao mergulho da encosta. No perfil interpolado através do software *Micromine* (Figura 37B) é possível um talude com 15° de inclinação, composto por finas camadas de solo em superfície próxima as bordas da secção. Em seu embasamento e em superfície, na porção central observa-se a presença do saprolito e em profundidade encontra-se a rocha fraturada tendo como base a rocha sã, ambas na região central do perfil.

Figura 37 - Composição das imagens: A) Bloco diagrama com os quatro perfis posicionados e tendo o perfil transversal a eles; B) Perfil transversal gerado



Fonte: Autor.

5.6 Resistência dos maciços

Baseado nas classificações geológicas realizadas em campo, verificou-se a resistência de cada um dos materiais. Através dos valores obtidos em laboratório

determinou-se a resistência a compressão uniaxial para a rocha que apresentou baixo grau de alteração e ela no estado fraturado. Para a rocha com alto grau de alteração, o valor de σ_{ci} foi estimado. O valor de GSI foi o que mais diferenciou os maciços pois é um atributo diretamente correlacionado ao estado de conservação do material. As Figuras 38, 39 e 40 demonstram as propriedades de ruptura obtidas respectivamente para, rocha sã, rocha fraturada e saprólito.

Figura 38 - Resistência da rocha sã

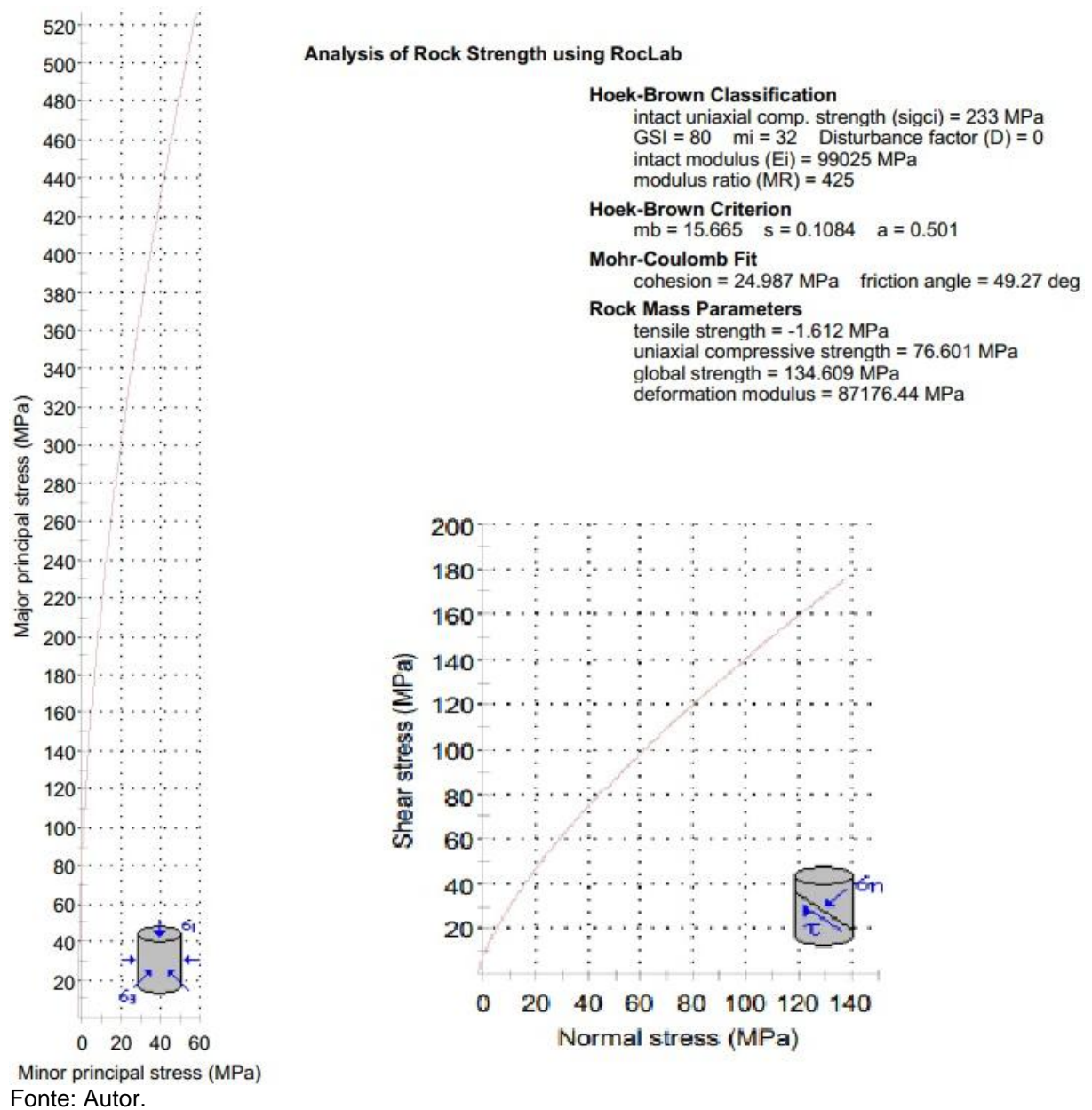
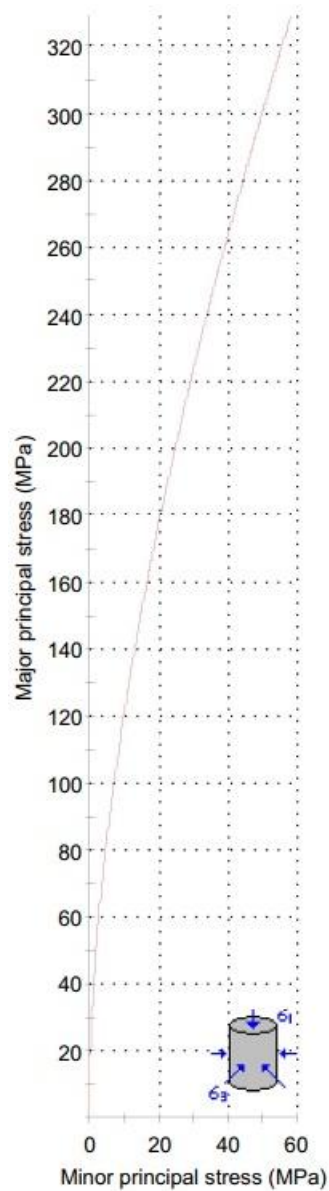


Figura 39 - Resistência da rocha fraturada



Analysis of Rock Strength using RocLab

Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 233 MPa
 GSI = 50 m_i = 32 Disturbance factor (D) = 0
 intact modulus (E_i) = 99025 MPa
 modulus ratio (MR) = 425

Hoek-Brown Criterion

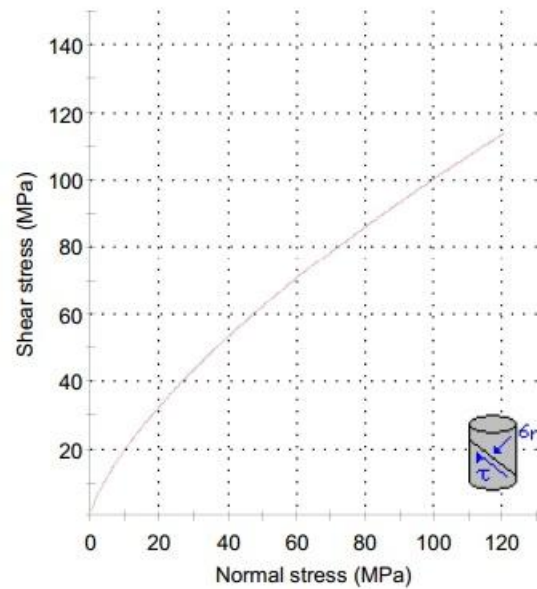
m_b = 5.366 s = 0.0039 a = 0.506

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 16.455 MPa friction angle = 40.60 deg

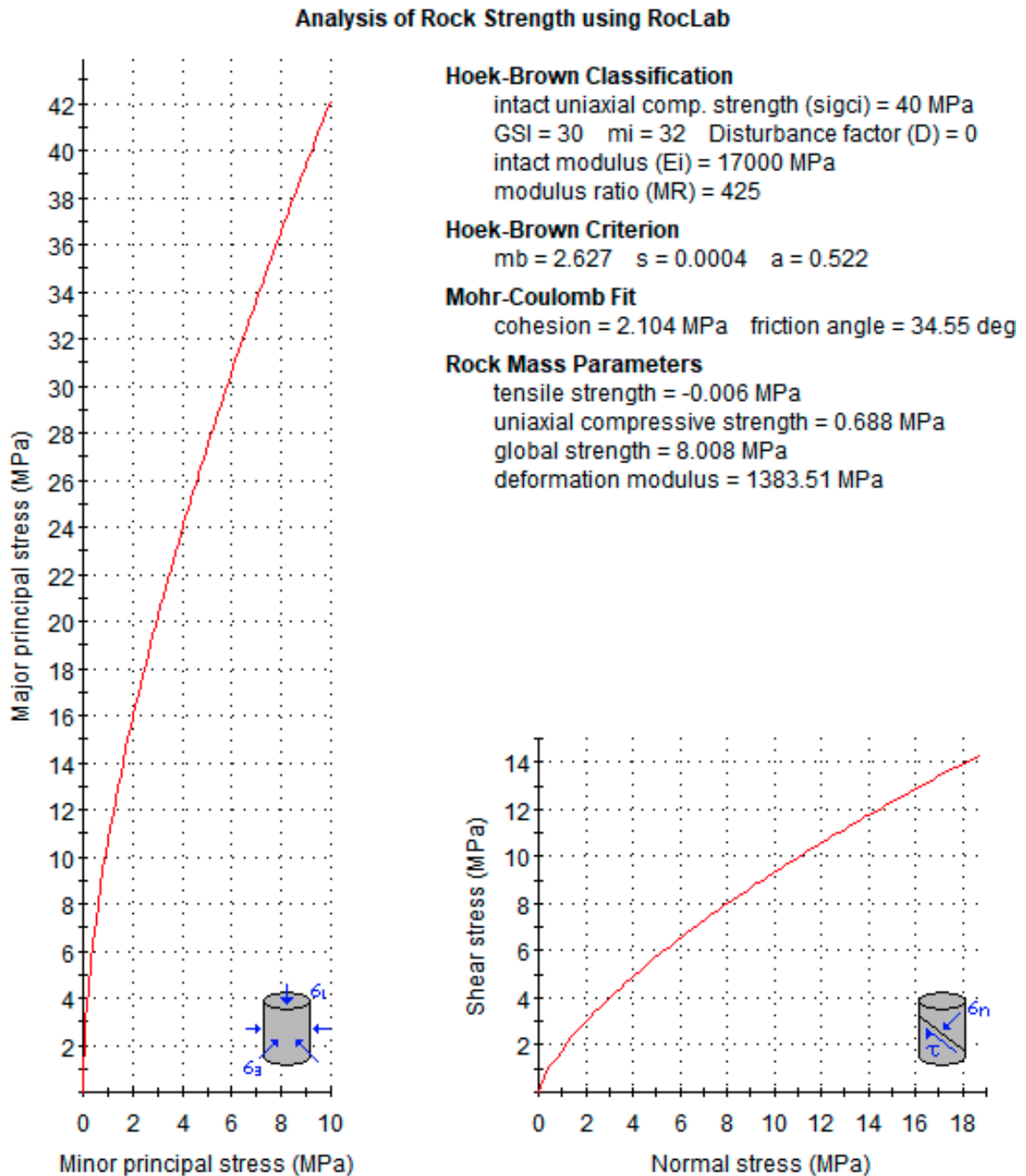
Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.168 MPa
 uniaxial compressive strength = 14.033 MPa
 global strength = 71.552 MPa
 deformation modulus = 30419.08 MPa



Fonte: Autor.

Figura 40 - Resistência do saprólito



Fonte: Autor.

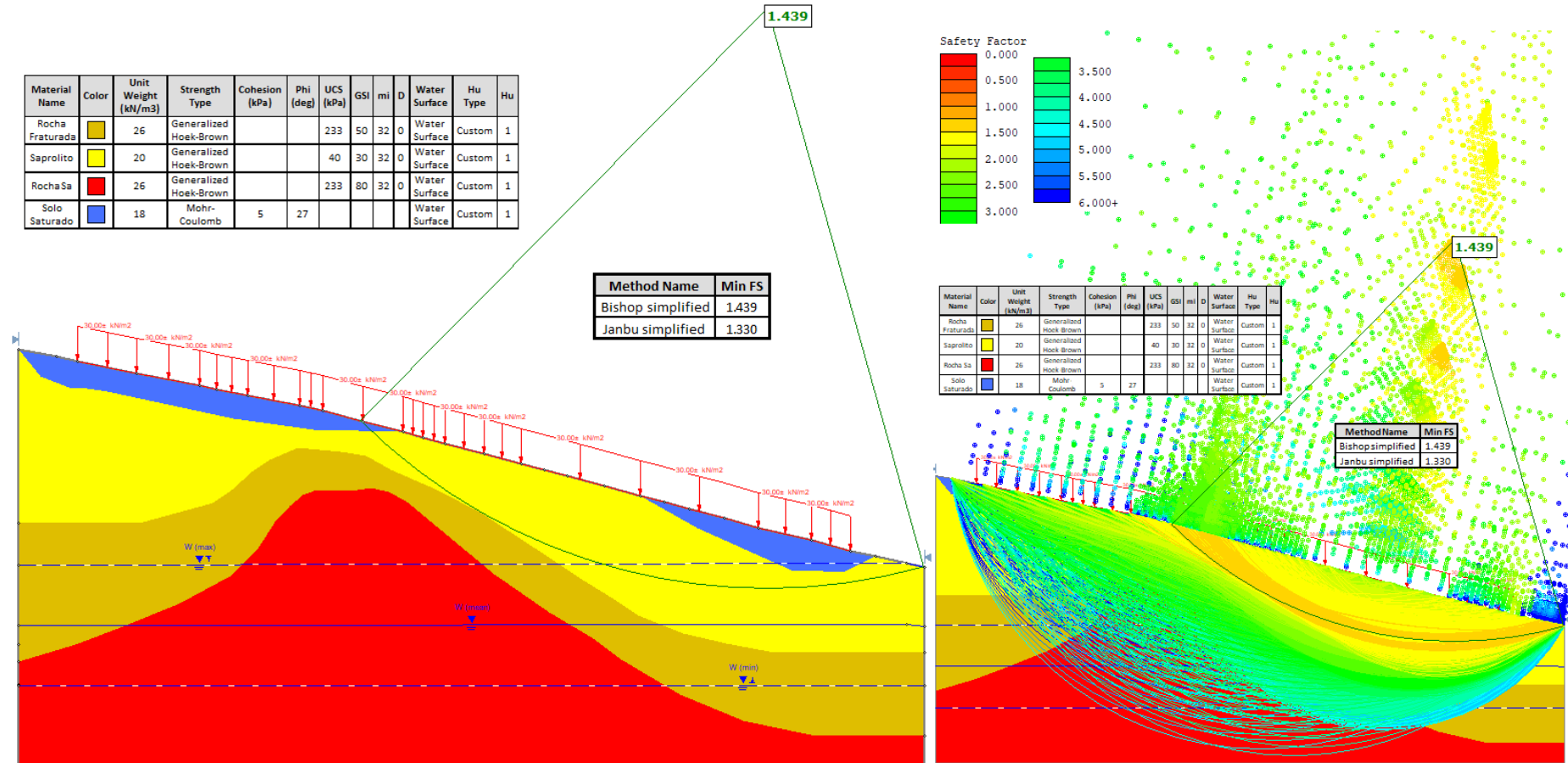
5.7 Fator de segurança

Após a definição seção crítica a ser analisada, bem como a definição da carga distribuída devido o efeito das casas, determinou-se também o posicionamento do nível d'água. Os parâmetros físicos das rochas foram os mesmos pré-determinados na etapa anterior. Para os solos, através da caracterização táctil-visual feita e, utilizando valores base recolhidos da literatura determinou-se: 18 kN/m³ para o peso específico, 27° para o ângulo de atrito e 5 kPa para coesão. Utilizando o método

generalizado de Hoek-Brown para as rochas e o método de Mohr-Coulomb para o solo, foi realizada a análise de estabilidade.

Considerando os parâmetros citados acima, foi obtido o valor do fator de segurança de 1.44 pelo método Bishop, e 1.33 pelo método Janbu (Figura 41). Estes valores indicam estabilidade da encosta, porém estão um pouco abaixo do recomendado pela NBR 11682 (ABNT, 2009), que considera o risco a danos materiais, ambientais e danos contra vidas humanas. A norma estabelece o valor de 1.5 para taludes com alto nível de segurança.

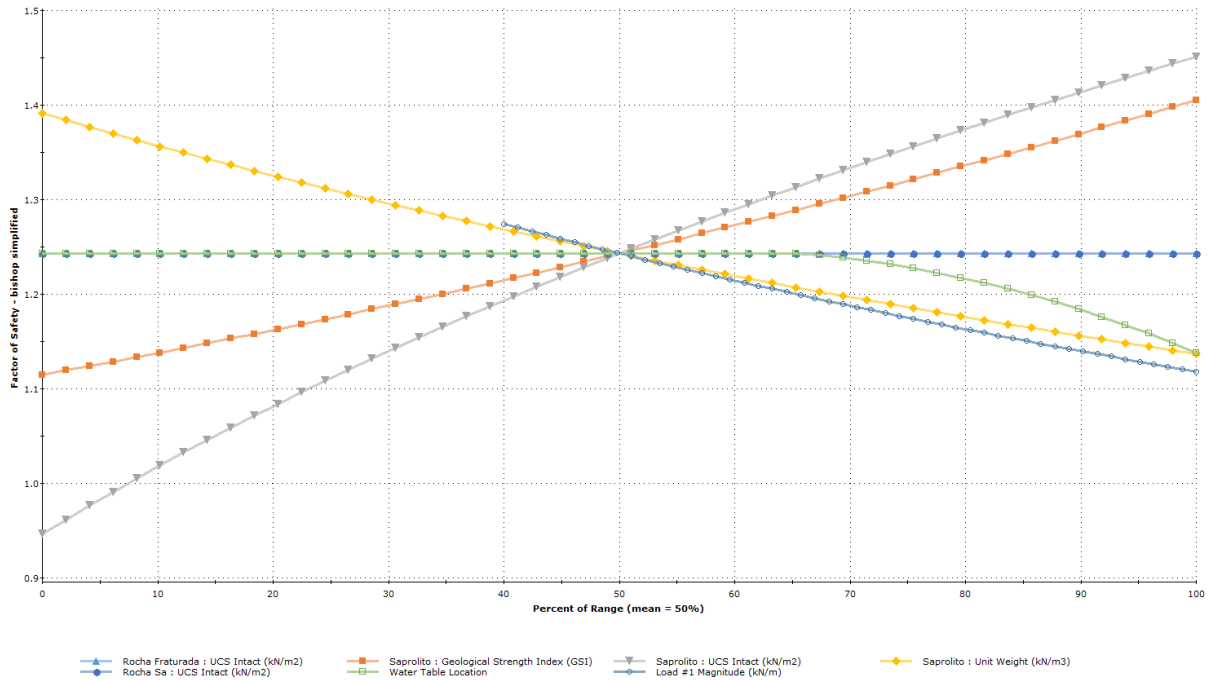
Figura 41 - Composição de imagens: a esquerda, análise de estabilidade da encosta analisada; a direita, gráfico de superfícies analisadas



Fonte: Autor.

A Figura 42 mostra um gráfico de sensibilidade que avalia a sensibilidade da variação de cada parâmetro utilizado, na determinação do FS. Nele, é possível observar quais são os parâmetros que mais influenciam no valor do FS. São eles: os parâmetros de compressão uniaxial de rocha intacta para o saprólito e seu fator GSI.

Figura 42 - Gráfico de sensibilidade



Fonte: Autor.

5.8 Mapa de zoneamento

Levando em consideração os parâmetros determinados pelo Ministério das Cidades em parceria com o IPT foi possível realizar uma análise qualitativa das condicionantes geológicas e classificar a área de estudo de acordo com o seu grau de probabilidade de ocorrências de processos de instabilização (BRASIL, 2007).

As regiões mais a oeste, que se localizam mais próximas ao núcleo urbano, foram classificadas com grau R1 (Figura 43A), pois apresentaram baixas variações topográficas e ausência de evidências de instabilidade. Boa parte da região foi contemplado com o grau R2 (Figura 43B), com pequenas evidências de instabilidade em taludes. Por fim, foram identificadas três regiões com grau R3, regiões que possibilitam a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas dentro de um ciclo chuvoso (Figura 43C). Em uma das casas situadas em região de grau R3 foram identificadas extensas rachaduras milimétricas

perpendiculares a direção de mergulho do talude (Figura 43D), demonstrando ser um ponto crítico para o monitoramento.

Figura 43 - Composição de imagens que mostram imagens representativas para cada uma das regiões classificadas

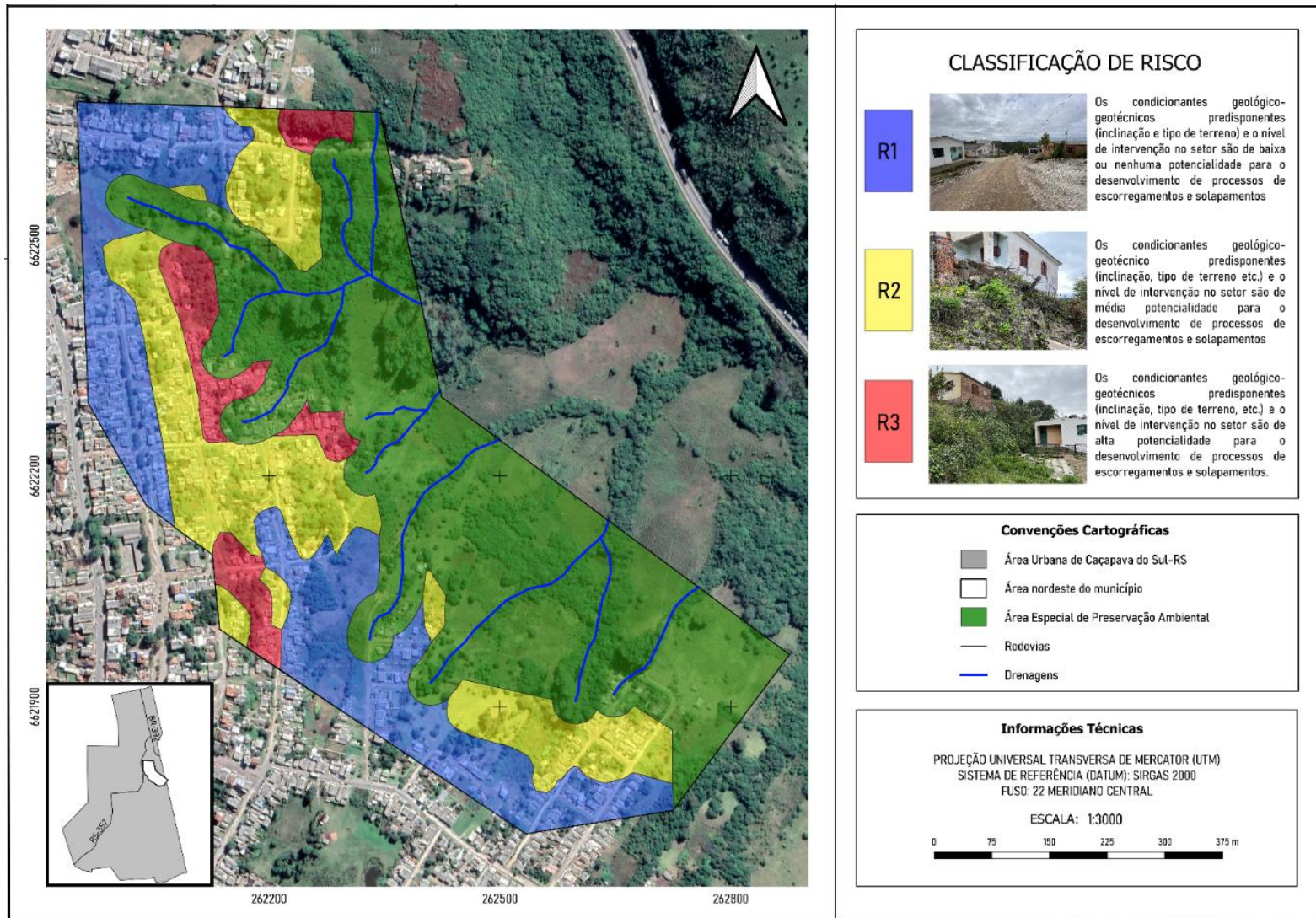


Fonte: Autor.

Através do mapa de zoneamento gerado foi possível categorizar o grau de risco de deslizamentos atribuídos a área de estudo. As cores azul, amarelo e vermelho representam a situação de risco em baixo, médio e alto, respectivamente (Figura 44).

Para a geração do mapa, a porção mais a sul, classificada como R3 contou com os resultados apresentados no estudo de Pereira (2017), as demais regiões, foram caracterizadas por meio da copilação de informações coletadas ao longo desta pesquisa.

Figura 44 - Mapa de Zoneamento da Área de Estudo



Fonte: Autor.

6 CONCLUSÕES

Com os devidos levantamentos realizados, juntamente dos ensaios e processamentos e interpretações, pode-se determinar que uma parte significativa da área de estudo apresenta um risco moderado a alto para movimentos de massa, sendo, portanto, necessário um monitoramento contínuo da região.

Os levantamentos geofísicos apresentaram resultados moderadamente bons, com erros RMS variando entre 5.4 a 13.1%. Estes erros são relativamente altos devido ao baixo número de interações realizado. A versão gratuita do programa, utilizada para o projeto, permite apenas 4 interações. Portanto com a licença do software seria possível obter dados ainda mais precisos.

A análise de estabilidade realizada no software *Slide 2D* demonstrou valores próximos aos exigidos pela norma NBR 11682 (ABNT, 2009), considerando os maiores riscos possíveis. Porém, deve-se levar em consideração o fato de que muitas variáveis (peso específico, coesão e ângulo de atrito) utilizadas para o cálculo em questão partiram de valores médios encontrados na literatura. Sendo assim, se recomenda um maior aprofundamento nos ensaios e na caracterização da resistência dos materiais, em especial para o saprólito, pois seus parâmetros se demonstraram os mais sensíveis na determinação do FS. No geral os ensaios laboratoriais permitirão que a incerteza associada ao fator de segurança diminua, permitindo afirmar com maior exatidão se de fato o fator de segurança é insatisfatório perante a norma.

O mapa de zoneamento apontou para dezenas de casas que estão em áreas de risco alto para deslizamentos (R3). Uma análise domiciliar poderia auxiliar para determinação ainda mais efetiva na categorização nas áreas, uma vez que somente alguns moradores foram consultados durante as saídas de campo. A definição de Área de Preservação Permanente (APP) apresentada levou em consideração o polígono indicado pelo plano diretor, sendo acrescentado somente o entorno de drenagens, que de acordo com o artigo 4 da Lei nº 12.651 de 2012 é considerado APP as faixas marginais de cursos d'água. Para cursos d'água com largura menor que 10 metros, é considerado área de preservação permanente faixas marginais de 30 metros (BRASIL, 2012). Em geral foram identificadas inúmeras moradias situadas em APPs e/ou em áreas de risco de deslizamento. Portanto fica a cargo do poder público concretizar a função social e proporcionar alternativas habitacionais para a população

de vulnerabilidade socioeconômica que ocupa os espaços de forma irregular e realizar monitoramentos periódicos para a aferição de estabilidade na região.

Por fim, pode-se concluir que a metodologia proposta se mostrou eficaz e o trabalho atingiu os objetivos almejados. Espera-se que o presente trabalho possa auxiliar na tomada de decisões no planejamento e desenvolvimento urbano da zona nordeste de Caçapava do Sul-RS, sendo este, um material que somado ao Plano Diretor se faz importante para que aspectos ambientais e estruturais sejam vistos como primordiais para a ocupação humana na região de estudo.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. *et al.* Brazilian Structural Provinces: an introduction. **Earth Science Reviews**, [S. l.], v. 17, p. 1-29, abr. 1981.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 11682**: estabilidade de encostas. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. *In*: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 2., 1992, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro, 1992. v. 2. p. 721-733.

AZEVEDO, I. C. D.; MARQUES, E. A. G. **Introdução à mecânica das rochas**. Viçosa: UFV, 2002.

BECKER, E. L. S.; BURIOL, G. A.; STRECK, N. A. Clima e Intemperismo na Formação dos solos do Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife, v. 5, n. 1, p. 33-46, 2012.

BITAR, O. Y. **Guia Cartas geotécnicas [livro eletrônico]**: orientações básicas aos municípios. São Paulo: IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2015.

BITENCOURT, M. F.; NARDI, L. V. S. Late- to post-collisional brasileiro magmatism in southernmost Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 65, p. 3-16, 1993.

BRAGA, A. C. O. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas**: uma abordagem metodológica e prática. 2006. 126 f. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2006.

BRASIL. Lei nº 10.257, de 10 de julho de 2001. Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 11 jul. 2001.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC [...]. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 11 abr. 2012.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nºs 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006 [...]. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**: seção 1, Brasília, DF, p. 1, 28 maio 2012.

BRASIL. Ministério das Cidades. Instituto de Pesquisas Tecnológicas. **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios**. Brasília: MCidades; IPT, 2007.

CAÇAPAVA DO SUL. **Lei nº 2.004, de 05 de setembro de 2006**. Dispõe sobre o desenvolvimento de Caçapava do Sul, institui o Plano Diretor de desenvolvimento do município e dá outras providências. Caçapava do Sul: Gabinete do Prefeito Municipal, 2006. 62 p.

CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. (Orgs.). **Prevenção de riscos de deslizamento em encostas**: guia para elaboração de políticas municipais. Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, 2006. 111 p.

CERRI, L. E. S. Mapeamento de riscos nos municípios. *In*: CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. (Orgs.). **Prevenção de riscos de deslizamento em encostas**: guia para elaboração de políticas municipais. Brasília: Ministério das Cidades; Cities Alliance, 2006. p. 47-55.

COELHO, L.; BRITO, J. N. **Fotogrametria digital**. Rio de Janeiro: Eduerj, 2007.

EL MAY, M.; DLALA, M.; CHENINI, J. Urban geological mapping: Geotechnical data analysis for rational development planning. **Engineering Geology**, Amsterdam, v. 116, p. 129-138, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. *In*: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10., 1979, Rio de Janeiro. **Súmula** [...]. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1979. 83p.

FERNANDES, C. E. **Fundamentos de prospecção geofísica**. Rio de Janeiro: Interciência, 1984. 190 p.

FERNANDES, M. O.; SILVA FILHO, F. C. Análise de Estabilidade de Taludes pelos Métodos de Fellenius, Bishop e Janbu. **Revista Tecnologia**, [S. l.], n. 19, p. 91- 98, 1998.

FITZ, P. R. **Cartografia básica**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. 144 p.

FOSSEN, H. **Geologia estrutural**. Tradução: Fábio R. D. de Andrade. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 584 p.

GOOGLE. **Google Earth**. 2009. Disponível em: <http://earth.google.com/>. Acesso em: 17 ago. 2021.

HARTMANN, L. A.; CHEMALE JR., F.; PHILIPP, R. P. Evolução Geotectônica do Rio Grande do Sul no Pré-Cambriano. *In*: IANUZZI, R.; FRANTZ, J. C. **50 anos de Geologia**: Instituto de Geociências. Contribuições. Porto Alegre: Comunicação e Identidade, CIGO e IG-UFRGS, 2007. 399 p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Demográfico 2010**. Brasília: IBGE, 2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **Ocupação de encostas**. São Paulo: IPT, 1991.

INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY. **Statutes. Newsletter**, Paris, n. 19, dez. 1992.

ISRM. Suggested method for determining point load strength. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, [S. l.], v. 22, n. 2, p. 51-60, 1985.

JAPAN AEROSPACE EXPLORATION AGENCY. **ALOS-2 Project / PALSAR-2**. 2014. Disponível em: <https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS-2/en/about/palsar2.htm>. Acesso em: 12 ago. 2021.

JENSEN, J. R. **Sensoriamento remoto do ambiente: uma perspectiva em recursos terrestres**. São José dos Campos: Parêntese, 2009. 598 p.

LUCAS, A. M. C. **Estudo geofísico e geotécnico em uma área de risco no município de Caçapava do Sul, RS**. 2015. 60 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) - Universidade Federal do Pampa, Caçapava do Sul, 2015.

MUSSETT, A. E.; KHAN, M. A. **Looking into the earth: an introduction to geological geophysics**. New York: Cambridge University Press, 2000.

NARDI, L. V. S.; BITENCOURT, M. F. Geologia, petrologia e geoquímica do complexo granítico de Caçapava do Sul, RS. **Revista Brasileira de Geociências**, Porto Alegre, v. 19, n. 2, p. 153-169, fev. 1989.

NEOCORP DESENVOLVIMENTO DE PROJETOS E SERVIÇOS LTDA **Elaboração do Plano Ambiental Municipal de Caçapava do Sul – RS**. Porto Alegre, 2010. 277p. Disponível em: http://www.prefeitura.cacapava.net/site/sec_planejamento/20130913.pdf. Acesso em: 20 out. 2020.

PEREIRA, S. M. **Desastres naturais: estudo e mapeamento de uma área de escorregamento no município de Caçapava do Sul, RS**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal do Pampa, Bagé, 2017.

PEREIRA BARBOSA, L. *et al.* Análise da Estabilidade de talude utilizando dados geofísicos em uma área no município de Caçapava do Sul. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, 48., 2016, Porto Alegre. **Anais [...]**. Porto Alegre: SBGEO, 2016a.

PEREIRA BARBOSA, L. *et al.* Mapeamento geotécnico e ambiental aplicado ao crescimento urbano na cidade de Caçapava do Sul. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA GEOTÉCNICA*, 18., 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte, 2016b.

PIMENTA JUNIOR, I. **Caracterização geotécnica e análise de estabilidade de taludes de mineração em solos da Mina de Capão Xavier**. 2005. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

POLIDORI, M. C. **Crescimento urbano e ambiente**: um estudo exploratório sobre as transformações e o futuro da cidade. 2004. 353 f. Tese (Doutorado em Ecologia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

QUEIROZ, R. C. **Geologia e geotecnia básica para engenharia civil**. São Carlos: RiMa, 2009. 406p.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. New York: John Wiley & Sons, 1997. 796p.

RIBEIRO, G. G. **Caracterização eletromagnética e geotécnica de um solo fino de Brasília**. 2013. 94 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

SÁ, G. **Caracterização litoestrutural e parametrização geomecânica das superfícies de ruptura em taludes na Mina de N4E. Carajás - PA**. 2010. 217 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.

SILVA, T. Q. **Análise de risco geológico-geotécnico em áreas sujeitas à movimentos de massa**. 2016. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

SILVA JUNIOR, E. E. A. **Geotecnologias e planejamento urbano**: proposta metodológica e avaliação de dados obtidos por Aeronaves Remotamente Pilotadas (RPA) como contribuição à cartografia geotécnica. 2019. 298 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

SOBREIRA, F. G.; SOUZA, L. A. Cartografia geotécnica aplicada ao planejamento urbano. **Revista Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental**, São Paulo, v. 2, n. 2, p. 79-97, 2012.

SOUZA, L. A. P. **Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de áreas submersas rasas**. 2006. 311 f. Tese (Doutorado em Oceanografia Química e Geológica) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied geophysics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. 770p.

TOMINAGA, L. K. Análise e mapeamento de risco. *In*: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Orgs.). **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. 2. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2012. p. 147-160.

VEDOVELLO, R.; MACEDO, E. Deslizamentos de encostas. *In*: SANTOS, R. F. (Org.). **Vulnerabilidade ambiental**: desastres naturais ou fenômenos induzidos? Brasília: MMA, 2007.

XAVIER, F. F. Geofísica elétrica aplicada a geotecnia para investigação de estabilidade de taludes. *In*: SIMPÓSIO DE PRÁTICA DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DA REGIÃO SUL, 7., 2010, Foz do Iguaçu. **Anais [...]**. Foz do Iguaçu: ABMS, 2010.

ZAINE, J. E. **Mapeamento geológico-geotécnico por meio do método do detalhamento progressivo**: ensaio de aplicação na área urbana do município de Rio Claro (SP). 2000. 149 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2000.

ZUQUETTE, L. V. **Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio-físico**: fundamentos e guia para elaboração. 1993. 265 f. v. 1. Tese (Doutorado em Geotécnica) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993.