

**Adrianna Jakeline Silva**

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM PETRÓPOLIS (RJ)  
ATRAVÉS DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS ERT E GPR**

**Trabalho Final de Curso  
(Geologia)**

2022



UFRJ

**Adrianna Jakeline Silva**

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM PETRÓPOLIS (RJ)  
ATRAVÉS DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS ERT E GPR**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientadora:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Gleide Alencar do Nascimento (Depto. Geologia, IGEO/UFRJ)

UFRJ  
Rio de Janeiro  
2022

Silva, Adrianna Jakeline

**Estudo da Estabilidade de Taludes em Petrópolis (RJ) Através dos Métodos geofísicos ERT e GPR/** Adrianna Jakeline Silva - Rio de Janeiro: UFRJ / IGeo, 2021., 57p : il.; 30cm

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Geologia) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2021.

Orientador: Prof<sup>ª</sup> Dr. Gleide Alencar Dias do Nascimento.

1. Geologia. 2. Instituto de Geociências —Trabalho de Conclusão de Curso. I. Prof<sup>ª</sup> Dr. Gleide Alencar do Nascimento. II.

**Adrianna Jakeline Silva**

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM PETRÓPOLIS (RJ)  
ATRAVÉS DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS ERT E GPR**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Geologia do Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, apresentado como requisito necessário para obtenção do grau de Geólogo.

Orientadora:

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Gleide Alencar do Nascimento (Depto. Geologia, IGEO/UFRJ)

Aprovada em:

Por:

---

Orientadora: Gleide Alencar do Nascimento (UFRJ)

---

João Wagner Alencar Castro

---

José Eduardo Ramalho Dantas

A coisa mais incompreensível sobre o mundo é que ele é compreensível.  
- Albert Einstein

## AGRADECIMENTOS

A orientadora e professora Gleide Alencar do Nascimento, pela orientação ao longo dos quatro anos de trabalho e pesquisa.

A bolsa PIBEX – UFRJ oferecida pelo Laboratório de Geofísica, possibilitando desenvolver diversas atividades de pesquisa e extensão.

Ao Departamento de Geologia da UFRJ, por sempre proporcionarem um ensino de qualidade.

Aos meus companheiros e amigos do laboratório de Geofísica que fiz ao longo dos anos de pesquisa e extensão.

Aos meus amigos de graduação, em especial Jairysson e Diego, os quais estiveram comigo durante toda minha caminhada.

Minha família por sempre terem me dado apoio e suporte em todos os momentos, em especial meus pais Maria José e Moacyr Dias.

## Resumo

SILVA, Adrianna Jakeline. **ESTUDO DA ESTABILIDADE DE TALUDES EM PETRÓPOLIS (RJ) ATRAVÉS DOS MÉTODOS GEOFÍSICOS ERT E GPR**. 2021, 57 f. Trabalho Final de Curso (Geologia) – Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

O método geofísico de eletrorresistividade (ERT) é baseada no potencial elétrico dos campos elétricos naturais ou artificias. Este trabalho visa mostrar a aquisição de dados de eletrorresistividade obtidas na Rua Mato Grosso, no bairro de Quitandinha, Petrópolis (RJ), nas coordenadas (22°31'14''S e 43°13'5''W), a qual é suscetível a inúmeros deslizamentos de encostas e taludes, tal como ocorreu em 2022 causando mais de 200 óbitos. Foram utilizados para aquisição de dados 24 eletrodos com espaçamento de 2m de distancia entre cada um, por meio do arranjo dipolo-dipolo, com processamento de dados no programa Res2Dinv e uma simulação de dados no programa RES2MOD. Os resultados obtidos foram comparados com outro método geofísico, o de Radar de Penetração do Solo (GPR), que estuda as propriedades físicas do solo por meio de ondas eletromagnéticas de altas frequências, entre 10 e 2500 MHz, sendo utilizado o equipamento SIR 300 (GSSI), com antena de 200 MHz, e processamento de dados realizados no programa ReflexW. Nos resultados das seções de GPR e ER foi constatado uma diferença de solo consolidado e inconsolidado em aproximadamente 1,5m de profundidade, que pode gerar futuros deslocamentos de terra, assim como a presença de blocos de diversos tamanhos espalhados pela área, sendo indícios de que a área já sofreu com deslizamentos de terras. Na seção de Eletrorresistividade foram detectados pontos drenagem e acúmulo de água elevando os riscos de deslizamento. O uso de métodos geofísicos vem a contribuir na análise da instabilidade de taludes e evitar desastres com perdas humanas.

Palavras-chave: deslizamento, GPR, ERT

## ABSTRACT

STUDY OF SLOPE STABILITY IN PETRÓPOLIS (RJ) THROUGH THE GEOPHYSICAL METHODS ERT AND GPR. 2022. XVI, 57p. Course Completion Work (Bachelor of Geology) - Department of Geology, Institute of Geosciences, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.

The geophysical method of Electroresistivity (ERT) is based on the electric potential of natural or artificial electric fields. This work aims to show the acquisition of electroresistivity data obtained at Mato Grosso Street, in the neighborhood of Quitandinha, Petrópolis (RJ), at the coordinates (22°31'14"S and 43°13'5"W), which it is susceptible to numerous landslides from slopes and slope, as occurred in 2022 causing more than 200 deaths. Twenty-four electrodes spaced 2m apart were used for data acquisition, through the dipole-dipole arrangement, with data processing in the Res2Dinv program and a data simulation in the RES2MOD program. The results obtained were compared with the geophysical mapping of Ground Penetration Radar (GPR), where it studies the physical properties of the soil through high frequency electromagnetic waves, between 10 and 2500 MHz, using the SIR 300 equipment (GSSI), with a 200 MHz antenna, and data processing performed in the ReflexW program. In the results of the GPR and ER sections, a difference between consolidated and unconsolidated soil at approximately 1.5 m depth was observed, which can generate future earth displacements, as well as the presence of blocks of different sizes scattered throughout the area, indicating that the area has already suffered from landslides. In the Electroresistivity section, drainage points and water accumulation were detected, increasing the risks of landslides. The use of geophysical methods contributes to the analysis of slope instability and avoids disasters with human losses.

Keywords: landslides , GPR, ERT

## Figuras

Figura 1: (A) Mapa do Brasil com localização do Rio de Janeiro e Petrópolis. (B) Esquema sem escala da localização do bairro de Quitandinha dentro dos distritos de Petrópolis.....	23
Figura 2: Mapa com as principais vias de acesso a Petrópolis, com marcação da Rua Mato Grosso.....	23
Figura 3: (A) Mapa de declividade do primeiro distrito, delimitação do bairro de Quitandinha em verde, sem escala. (B) Desmatamento da na rua Mato grosso em Quitandinha .....	24
Figura 4: (A) Mapa de declividade do primeiro distrito com delimitação do bairro de Quitandinha em verde, sem escala.(B) Relevo de Petrópolis através da rua Mato Grosso .....	24
Figura 5: Mapa de vegetação do primeiro distrito de Petrópolis, com delimitação do bairro de Quitandinha em Azul.....	25
Figura 6 (A) Mapa geológico do primeiro distrito, Quitandinha delimitada em verde. (B) Falha geológica no bairro de quitandinha em Petrópolis, na parte Sul do primeiro distrito. ...	25
Figura 7: Solo raso localizado em Quitandinha.....	26
Figura 8: Gráfico com a relação da pluviosidade com o número dos movimentos de massa em Petrópolis no período de 1960 até 1999. ....	26
Figura 9: Movimentos de massa em função da velocidade do deslocamento e tempo. ....	31
Figura 10: Classificação de movimentos de massa. ....	31
Figura 11: Tipos de movimentos de massa. ....	32
Figura 12: (A) Mapa de suscetibilidade de escorregamentos. (B) Escorregamento registrado no bairro de Quitandinha em 2017. ....	33
Figura 13: (A) Quedas de blocos registrada no bairro de Quitandinha em 2017. (B) Corrida no Morro da Oficina (Petrópolis) .....	33
Figura 14: Esquema com arranjo das antenas e propagação de ondas no GPR.....	38
Figura 15: (A) Esquema da técnica Commom off-set.(B) Equipamento System-3000 utilizado para aquisição .....	38
Figura 16(A): Esquema da técnica CMP. (B) Esquema da técnica WARR .....	38
Figura 17: Esquema da técnica de trans-iluminação .....	39
Figura 18: 12 linhas de aquisição de GPR da Rua Mato Grosso.....	39
Figura 19: (A) Local da aquisição de dados da linha 1. (B) coloração do solo avermelhado do solo. ....	39
Figura 20: (A) Linha de aquisição 1 da Rua Mato Grosso não processada. (B) Linha processada.....	40
Figura 21: Local da aquisição de dados da linha 2 .....	40
Figura 22: (A) Linha 2 não processada. (B) linha processada. Ambas na Rua Mato Grosso em Quitandinha .....	40
Figura 23:Esquema do método de eletrorresistividade.....	45
Figura 24:Esquema com parâmetros de resistividade. ....	45
Figura 25:(A) Potencial no semi-espaço. (B) Diferença de potencial no campo.....	46
Figura 26: Configuração usual do método de Eletrorresistividade usado em campo.....	46
Figura 27: (A) Resistividade em meio homogêneos. (B) Resistividade em meio heterogêneo. ....	46
Figura 28: Curva de descarga IP no domínio do tempo .....	47
Figura 29: (A): Técnica do caminhamento elétrico. (B) Técnica da sondagem elétrica vertical. ....	47
Figura 30:(A) Arranjo de campo Schlumberger. (B) Arranjo de campo Wenner. ....	47
Figura 31: Arranjo de campo Dipolo-Dipolo - CE.....	48
Figura 32: Interpretação do CE – Dipolo-Dipolo, com o software Res2DInv. ....	48

Figura 33: Sistema de plotagem pelas médias triangulares – CE/Dipolo-Dipolo .....	48
Figura 34: Esquema de arranjo de Blocos do Modelo de Resistividade Aparente.....	50
Figura 35: (A) Equipamento Syscal kid Switch-24. (B) Aquisição de dados em campo.....	51
Figura 36: (A) Pseudo-seção de resistividade aparente gerada. (B) Modelo de eletrorresistividade feito no programa RES2MOD. ....	51
Figura 37: Variações nos valores de resistividade para materiais geológicos .....	51
Figura 38: Seção de resistividade aparente realizada na Rua Mato Grosso. ....	52

## **Tabelas**

Tabela 1: Subtipos de vegetação com suas característica de altitude e ocorrência no primeiro distrito de Petrópolis.....	27
Tabela 2: Classificação de solos por inspeção táctil – visual.....	27
Tabela 3: Variação da velocidade do movimento de massa .....	34
Tabela 4: Grupos de movimentos de massa com suas características. ....	34
Tabela 5: Relação das frequências das antenas com suas respectivas profundidades de investigação. ....	41
Tabela 6: Diferença dos arranjos Schlumberger e Wenner .....	48

## **Lista de símbolos e abreviaturas**

$J$ corrente de condução
$E$ campo elétrico
$\sigma$ condutividade
$\rho$ resistividade
$R$ resistência
$D$ corrente de deslocamento
$\epsilon$ permissividade dielétrica
$k$ constante dielétrica
$K$ coeficiente geométrico
$H$ campo magnético
$B$ indução magnética
$\mu$ permeabilidade magnética
$c$ velocidade da luz
$L$ comprimento
$A$ área
$V$ potencial
$\Delta V$ diferença de potencial
$I$ corrente
$r$ distancia
$t$ tempo
$n$ níveis de investigação
$Z$ profundidade teórica investigada
$f_x$ filtro de nivelamento horizontal
$f_z$ filtro de planicidade verticais
$J$ matriz de derivadas parciais
$u$ fator de amortecimento
$d$ vetor perturbação modelo
$g$ vetor discrepância

$\gamma$  plutonismo félsico

GPR Radar de Penetração do Solo

ERT Eletrorresistividade

PMP Prefeitura Municipal de Petrópolis

DRM-RJ Departamento de Recursos Minerais – Rio de Janeiro

CMP *Commom Mid Point*

WARR *Wide Angle Refletction and Refraction*

IP Polarização Induzida

SEV Sondagem Elétrica Vertical

CE Caminhamento Elétrico

## Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>19</b>
1.1 Objetivos.....	20
<b>2. ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>20</b>
2.1 Acessibilidade local.....	20
2.2 Vegetação.....	20
2.3 Geomorfologia.....	21
2.4 Geologia regional .....	21
2.5 Geologia local .....	21
2.6 Solo.....	22
2.7 Clima.....	22
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>27</b>
3.1 Estágios de movimento de massa.....	28
3.2 Classificação de movimentos de massa .....	28
3.3 Tipos de movimentos de massa.....	29
3.4 Movimentos de massa típicos no Primeiro Distrito .....	30
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>34</b>
<b>5. MÉTODO DO GPR .....</b>	<b>35</b>
5.1 Condutividade elétrica .....	35
5.2 Permissividade dielétrica .....	35
5.3 Permeabilidade magnética .....	36
5.4 Profundidade de investigação x resolução .....	36
5.5 Técnicas de aquisição .....	37
5.6 Aquisição e processamento de dados (GPR) .....	37
<b>6. MÉTODO DA ELETORRESISTIVIDADE (ERT) .....</b>	<b>41</b>

6.1	Princípios básicos.....	41
6.2	Fluxo de corrente .....	41
6.3	Propriedades elétricas das rochas .....	42
6.4	Método da polarização induzida (IP).....	43
6.5	Técnicas de Aquisição de dados .....	43
7.	PROGRAMA RES2MOD E RES2DINV .....	49
7.1	Aquisição e processamento de dados (ERT) .....	50
8.	RESULTADOS.....	52
9.	DISCUSSÃO .....	53
10.	REFERÊNCIAS .....	54

## 1. INTRODUÇÃO

O deslizamento de encostas e taludes é um fenômeno natural que ocorre em todo mundo. Sendo nas áreas urbanas, desencadeado devido à atividade humana, tais como: impermeabilização do solo, excesso de construções, poluição do solo e ar. Nas áreas rurais, pode ser agravado por: compactação do solo, assoreamento de rio, construções sem fiscalização, desmatamento e queimadas. Como é o caso de Quitandinha, bairro localizado em Petrópolis, cidade localizada no município da região serrana do Estado do Rio de Janeiro, a qual teve sua origem em 1843, inicialmente como uma cidade planejada e projetada através do Plano Köeler, mas abandonado ao longo dos anos devido ao seu crescimento desordenado. Na cidade ocorreram inúmeros movimentos de massa ao longo dos anos, como em 2011, que atingiu toda a região serrana, causando um total de 947 óbitos, sendo 71 em Petrópolis, de acordo com Guerra & Jorge (2014). Já em 2022, o número de mortes causadas por esse evento foi de 223, somente em Petrópolis, devido a construções de moradias irregulares e precárias, a maioria feitas com restos de materiais impróprios para construção, sem nenhum tipo de estudo de implementação para a construção de casas, fazendo com que aumente os riscos de acidentes, principalmente durante os períodos de chuva. O desmatamento do local e despejo inadequado de lixo também cresce por conta do número crescente de moradias, em sua maioria de formas irregulares, principalmente em encostas e taludes. Segundo Marques (2016), onde a Rua Mato Grosso está dentro das áreas de riscos de locais suscetíveis a deslizamentos.

O movimento de massa possui diferentes definições, segundo Silva (2006), é caracterizado pelo deslocamento de parte do solo, rocha ou podendo ocorrer à combinação de ambos em um plano inclinado, no qual sofre ação de forças internas e externas, denominadas de encostas. Já para Varnes (1984), é caracterizado por processos geológicos exógenos que englobem o deslocamento de matéria, como rocha, solo e detritos, que pode ocorrer de forma natural ou artificial. Com base em Highland & Bobrowsky (2008), o processo de deslizamento ocorre quando há um movimento de rocha, solo ou ambos, em declive, que acarreta na ruptura de uma superfície, ocasionando um escorregamento rotacional quando ocorre uma ruptura curva ou escorregamento translacional no caso de uma ruptura planar, podendo ocorrer ambos os casos ou até mesmo outros tipos durante o deslocamento do material em movimento. Já o talude é a denominação que se dá para superfície inclinada de um maciço de solo ou rocha, podendo ser natural, chamado de encosta, ou construído pelo homem, como, por exemplo, os aterros e cortes.

A utilização de métodos geofísicos vem sendo amplamente empregados em estudos como: ambiental, mineração, hidrogeologia, dentre outros, devido a sua praticidade, por serem métodos não invasivos que permitem a visualização do solo de forma mais rápida em comparação com outros métodos convencionais, como os ensaios diretos, otimização do tempo na aquisição e execução dos dados. Sendo os métodos de Eletroresistividade (*Electrical Resistivity Tomography* - ERT) e Radar de Penetração do Solo (*Ground Penetrating Radar* - GPR), cada vez mais empregado nesses tipos de estudos. Através do método geofísico de Eletroresistividade (ERT) é possível obter informações como: nível d'água no solo, tamanho da camada de solo, geometria e localização do embasamento, presença ou ausência de fraturas, tamanho dos fragmentos rochosos e identificar planos preferenciais de escorregamento, determinação de plumas de contaminação, tanto no solo como em aquíferos. Já com o método de Radar de Penetração do Solo (GPR), pode ser utilizado em uma variedade de aplicações geológicas, como: imageamento de solo raso e de

estruturas de rocha em alta resolução, na identificação de canais enterrados e no mapeamento do lençol freático. Dentro da área ambiental, podem ser empregados estudos de determinação de plumas de contaminação, tanto no solo como em aquíferos. Assim como estudo de locais propensos para a construção de moradias.

## 1.1 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a verificação da estabilidade do talude da Rua Mato Grosso, no município de Petrópolis, localizado no topo de um morro. Através da utilização dos métodos geofísicos de ERT e GPR para o mapeamento em campo, por meio dos equipamentos *Syscal kid Switch-2* e *System-3000* respectivamente.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

O município de Petrópolis esta localizada na Região Serrana, pertencente à cidade do Rio de Janeiro, em uma altitude superior a 838m, área total de 795,798 km<sup>2</sup> que corresponde a 1.8% da área do Estado do Rio de Janeiro e 11,55% da Região Serrana, com aproximadamente 306.002 moradores. É limitado por São José do Vale do Rio Preto ao Norte, por Teresópolis e Magé a leste, Duque de Caxias e Miguel Pereira ao Sul e Paty de Alferes, Paraíba do Sul e Areal a Oeste, segundo IBGE (2005), mostrado nas figura 1A. Também pode ser subdividido em cinco distritos (figura 1B), estando o bairro de Quitandinha localizado no primeiro, tendo o distrito tem uma área total de 143Km<sup>2</sup>. Segundo a Gonçalves & Guerra (2006) por ser o distrito mais populoso de Petrópolis, além das características físicas, é também o com maior número de casos relacionados a movimento de massa.

### 2.1 Acessibilidade local

O principal acesso ao município de Petrópolis se dá através da BR-40, rodovia que liga o Rio de Janeiro com o Distrito Federal, passando por Juiz de Fora e Belo Horizonte. Porém, também é possível através da BR-495, rodovia que interliga o distrito de Teresópolis com Itaipava, chegar à Br-40. Em relação à Baixada Fluminense em direção a Petrópolis, é possível chegar através da RJ-107, que conecta a serra com Magé, conforme pode ser visto na figura 2. Também pode ser acessado pelas coordenadas (22°31'14''S e 43°13'5''W).

### 2.2 Vegetação

Segundo Gonçalves & Guerra (2006) a cobertura vegetal típica de Petrópolis é formada por floresta ombrófila densa devido ao clima tropical, conforme mostrado na figura 3A, onde o bairro de quitandinha esta delimitado pela cor azul. A cobertura ombrófila pode ser subdividida de acordo com a altitude, sendo encontrados no primeiro distrito quatro subtipos de acordo com a tabela 1. Em relação à vegetação secundária, principalmente no local onde ocorreu desmatamento da cobertura florestal típica da área, tem como características raízes mais superficiais, sendo um fator que aumenta as chances de deslizamento de massa (figura 3B).

### 2.3 Geomorfologia

Petrópolis faz parte da Unidade Geomorfológica da Serra dos Órgãos, com município inserido na Região das Escarpas e Reversos da Serra do Mar, formado por um relevo montanhoso, com uma ampla variedade de escarpas e declividades (figura 4B). Devido às rochas extremamente fraturadas, a região possui uma variedade de fases erosivas com remobilização de blocos graníticos, onde as drenagens retilíneas e os longos vales acarretam no aumento da erosão. Na área sul do primeiro distrito, o relevo varia entre 850 e 1600 metros, além de costões com grandes declividades. Já em direção à parte central do distrito as declividades são menores, gerando áreas menos montanhosas com a formação de mais solos. Na figura 4A, é possível observar que o bairro Quitandinha delimitado pela cor verde, está inserido em quatro faixas de declividades, sendo as encostas com declividade até 10° consideradas estáveis. A variação de 10° até 30° são características de áreas com predomínio de aluviões e colúvios, entre 30° e 45° em sua maioria típica de áreas de colúvios e solos residuais maduros, de 45° e 60° com predomínio de áreas de colúvios e solos residuais, Varanda (2006).

### 2.4 Geologia regional

A Serra do Mar é composta por grande parte de granitos e gnaisses, estando no Complexo Cristalino Brasileiro, Salgado (2013). O desenvolvimento geológico da região se deu há 630 Ma com o início do magmatismo  $\gamma_1$  dos complexos Rio Negro e Trabajano, através de arcos magmáticos formados durante processo de subducção. Por volta de 590-570 Ma os arcos magmáticos colidiram com a margem crustal passiva causando a sua duplicação crustal, processos metamórficos e magmatismo sin-colisional  $\gamma_{1-2}$  e  $\gamma_2$ , definido pelas suítes Turvo, Imbé, Cordeiro e o Complexo Anta. Por volta de 570-560 Ma, se deu as ultimas etapas de colisão criando o magmatismo calci-alcálico  $\gamma_3$  da Suíte Serra dos Órgãos. Até 500 Ma ocorreu o metamorfismo na fácies anfíbolito superior a granulito, além da gnaissificação devido à deformação plástica cisalhante durante a etapa colisional. Entre 500 e 480 Ma, em que ocorreu o processo orogênico, foram criadas zonas de cisalhamento do tipo dúcteis-répteis transtracionais, servindo como um conduto para os granitos pós-colisionais  $\gamma_6$  da Suíte Nova Friburgo, segundo Tupinambá *et al.* (2012). Na figura 5 é possível ver o mapa geológico simplificado da Serra do Mar, onde estão no Estado do Rio de Janeiro, os municípios de Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo, onde, com base em Guerra *et al.* (2007 p.81), os migmatitos e granitoides de Petrópolis com idade Pré-Cambriana, extremamente fraturados e falhados, são propícios para o aumento dos índices de deslizamentos de terra, principalmente em locais de ocupação inadequada em encostas. Também se encontram sedimentos do Quaternário em áreas fluviais como no rio Piabanha.

### 2.5 Geologia local

O bairro de Quitandinha, localizado no primeiro distrito está contido na folha de Petrópolis 1:50.000, com afloramento das rochas de Unidade Rio Negro (Unidade Santo Aleixo e Bingen), foram mapeados por Penha *et al.* (1979). Para Varanda (2006) predominam na área a Unidade Bingen com biotita-gnaisses graníticos, com uma gnaissificação moderada a ausente, grão variando de médios a fino, a ausente, com grãos médios a fino, coloração clara, estruturas nebulítica a schlieren. Também é possível observar restos de migmatitos e porfiroblastos localmente. Já na Unidade Santo Aleixo, tem contato transicional com a Unidade Bingen, sendo composta por migmatitos com estrutura estromática dobrada,

compostas por leucossoma granítico a leptnítico e melanossoma (com variação de biotita xistos a anfíbolitos), vistos na figura 6A.

## 2.6 Solo

Com base em Guerra *et al.* (2007, p.81), os solos predominantes da região são o Latossolo com coloração vermelho-amarelo e o Argissolo vermelho-amarelo. Porém, também se encontram Cambissolos. Segundo Marques (2006), o bairro de Quitandinha possui poucos afloramentos com rocha sã e solos bem intemperizados, com variações de cores e granulometria, onde, visitas técnicas à Rua Mato Grosso em Quitandinha, foi constatado a presença de solos com granulometria variando de areia fina a média, silte e argila, conforme visto na tabela 2. Varanda (2006) também realizou uma análise pedogenética do solo do primeiro distrito de Petrópolis, constatando a presença de solo raso em Quitandinha, com camadas de variações entre 1 a 2 metros sobre os afloramentos, com solos possuindo blocos variando de centímetros a metros, podendo ter grandes quantidades de matéria orgânica (figura 7).

## 2.7 Clima

De acordo com Nimer (1989), entre as altitudes de 250m e os 1.600m de altitude o clima é definido com “tropical mesotérmico, brando, super úmido”, sendo coincidente com a altitude do município de Petrópolis, mesmo a região estando sob área de predomínio tropical. Porém, com base em Hack *et al.* (2003), podem ocorrer grandes variações de temperaturas devido ao encontro das massas Tropical Atlântica e Polar, gerando diminuição nos índices de pluviosidade e a criação de nevoeiros durante o inverno. Já no verão, esse fenômeno causa chuvas intensas com trovoadas, além do aumento da velocidade do ar, devido à altitude topográfica da cidade. Segundo Canedo (2011), a maioria das chuvas no município de Petrópolis são causadas pelo acumulo de massas úmidas vindas da planície de Magé, levadas pelos ventos para a serra de Petrópolis, caracterizadas por três diferentes entradas, uma pelo sul no vale do rio Palatino, a segunda através do vale dos rios Quitandinhas, por sudoeste, e a ultima pelo vale do rio Itamarati, pelo leste, sendo as que provocam mais chuvas as vindas dos rios Palatino e Quitandinha. Outros fatores que contribuem para a elevação dos índices pluviométricos de Petrópolis, principalmente dos bairros localizados no primeiro distrito, dentre eles o de quitandinha são a elevada altitude e a proximidade da encosta com o mar, que acaba retendo umidade, com índice pluviométrico anual da cidade variando entre 1500mm e 2600mm, no verão com valores superiores a 200mm/mês, de acordo com Oliveira *et al.* (2003), conforme visto na figura 8.

Durante os períodos mais chuvosos o número de movimentos de massa sofre um aumento, pois o solo sofre um aumento em sua massa, além da diminuição de sua coesão devido à elevação do grau de saturação. Guidicini & Nieble (1984), indicam que a elevação dos índices de movimentos de massa é causado pela quantidade de água no solo, pois ao se infiltrar, a água ocupa os vazios no solo, consequentemente exercendo pressão nos grãos (poropressão).

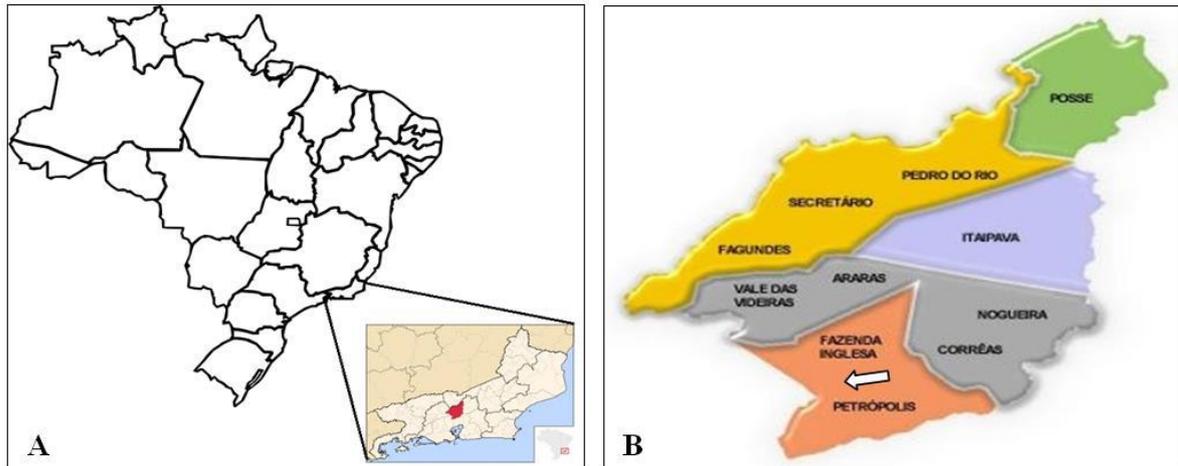


Figura 1:(A) Mapa do Brasil com localização do Rio de Janeiro e Petrópolis. Fonte: Marques (2016). (B) Esquema sem escala da localização do bairro de Quitandinha dentro dos distritos de Petrópolis. Fonte: PETRONEWS (2015). Adaptada pela autora.

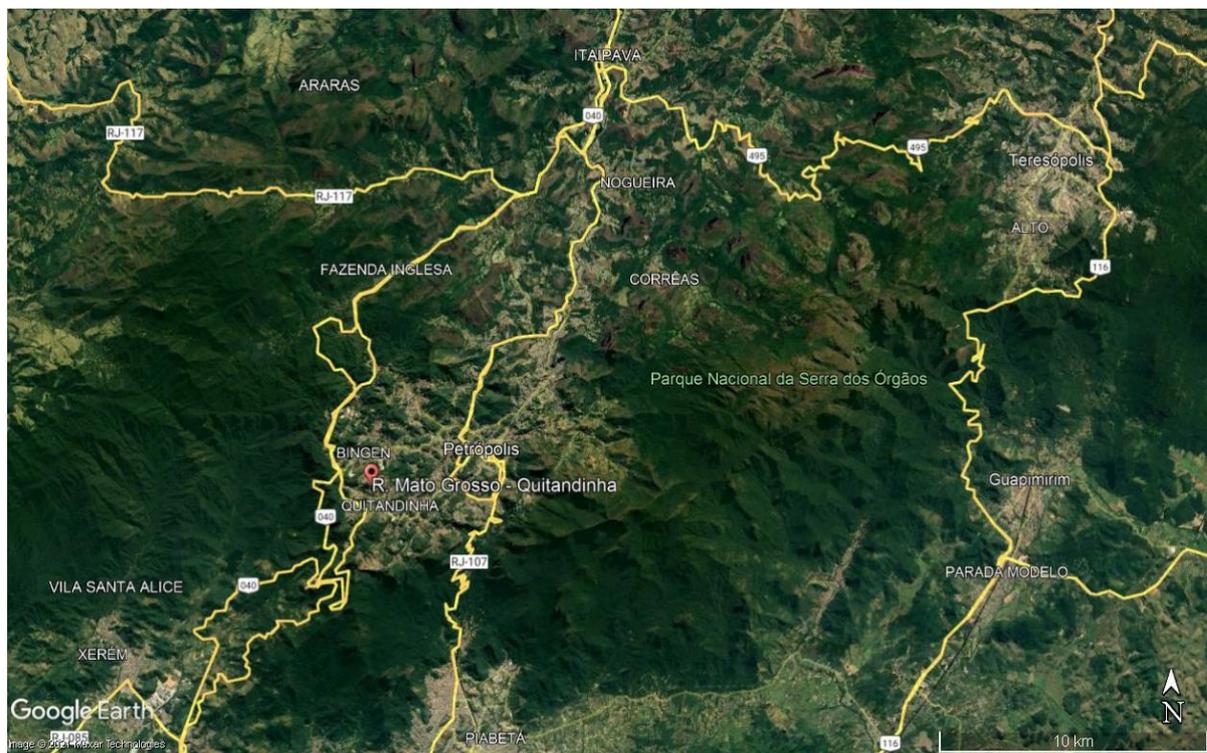


Figura 2: Mapa com as principais vias de acesso a Petrópolis, com marcação da Rua Mato Grosso. Fonte Google Earth™.

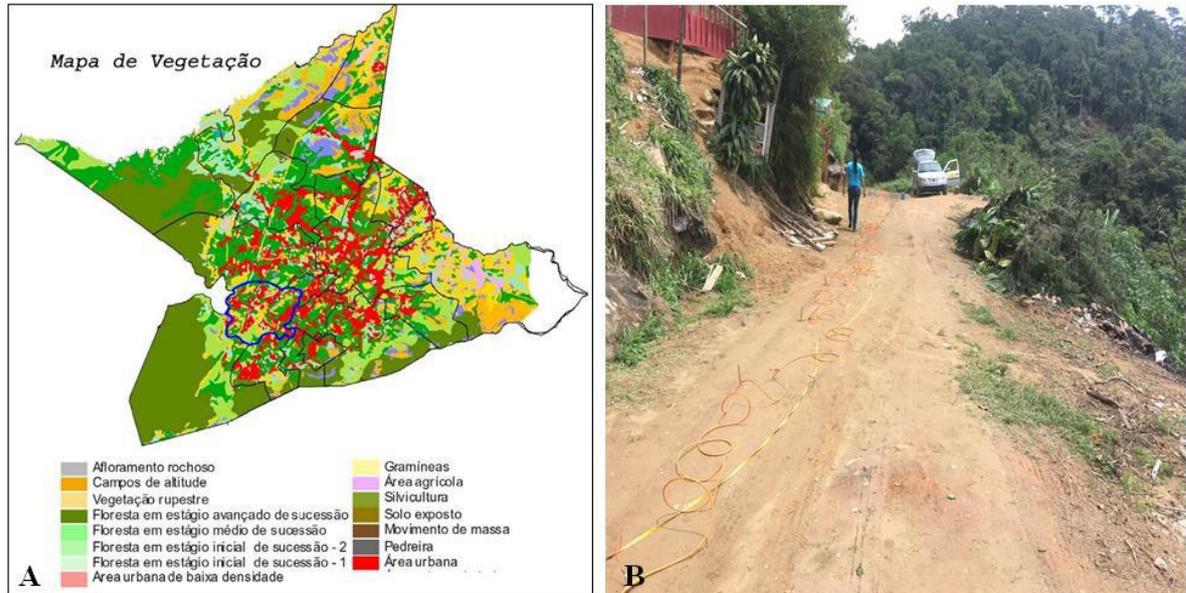


Figura 3: (A) Mapa de declividade do primeiro distrito com delimitação do bairro de Quitandinha em verde, sem escala. Fonte: Varanda (2006). Adaptado pela autora. (B) Desmatamento da na rua Mato grosso em Quitandinha. Fonte: autora.

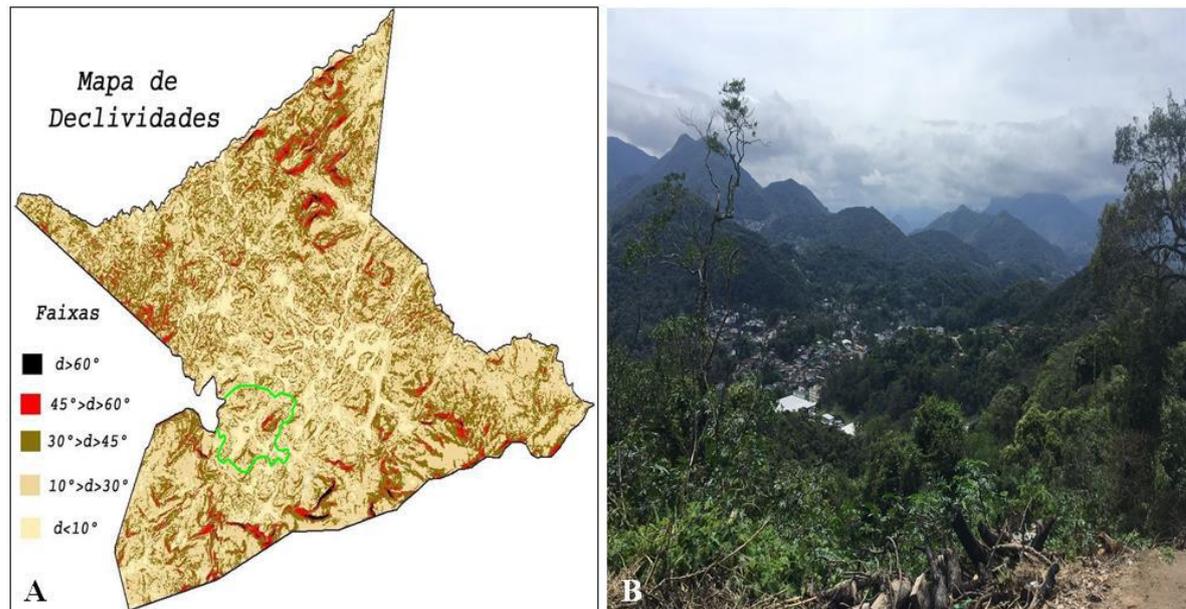


Figura 4: (A) Mapa de declividade do primeiro distrito com delimitação do bairro de Quitandinha em verde, sem escala. Fonte: Varanda (2006). Adaptado pela autora. (B) Relevo de Petrópolis através da rua Mato Grosso. Fonte: autora.

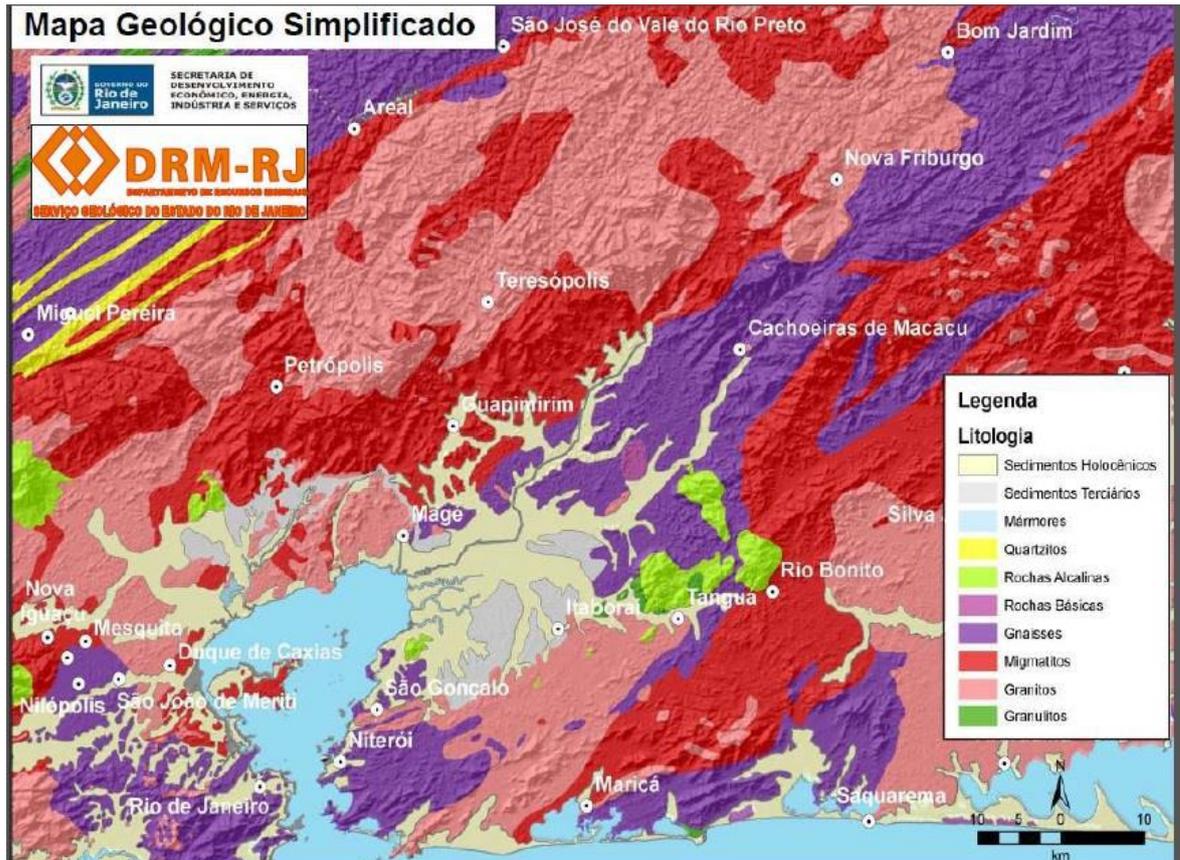


Figura 5: Mapa de vegetação do primeiro distrito de Petrópolis, com delimitação do bairro de Quitandinha em Azul. Fonte: Varanda (2006). Adaptado pela autora.

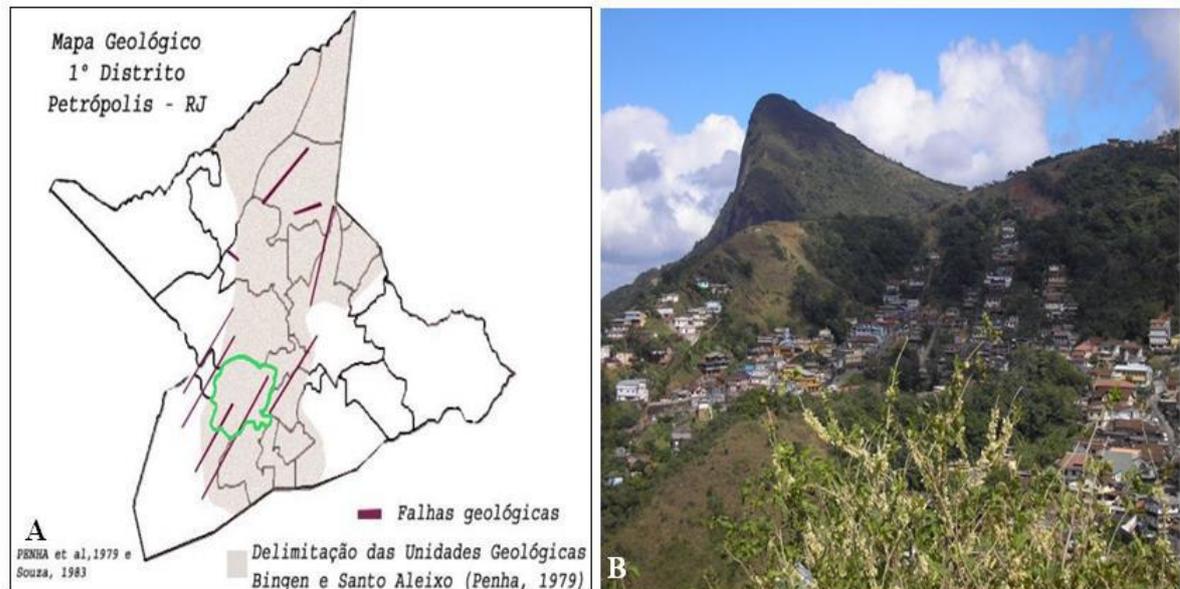


Figura 6: (A) Mapa geológico do primeiro distrito, Quitandinha delimitada em verde. (adaptado de PENHA *et al.* 1979 e SOUZA, 1983). (B) Falha geológica no bairro de quitandinha em Petrópolis, na parte Sul do primeiro distrito. Fonte: Varanda (2006)



Figura 7: Solo raso localizado em Quitandinha. Fonte: Varanda (2006).

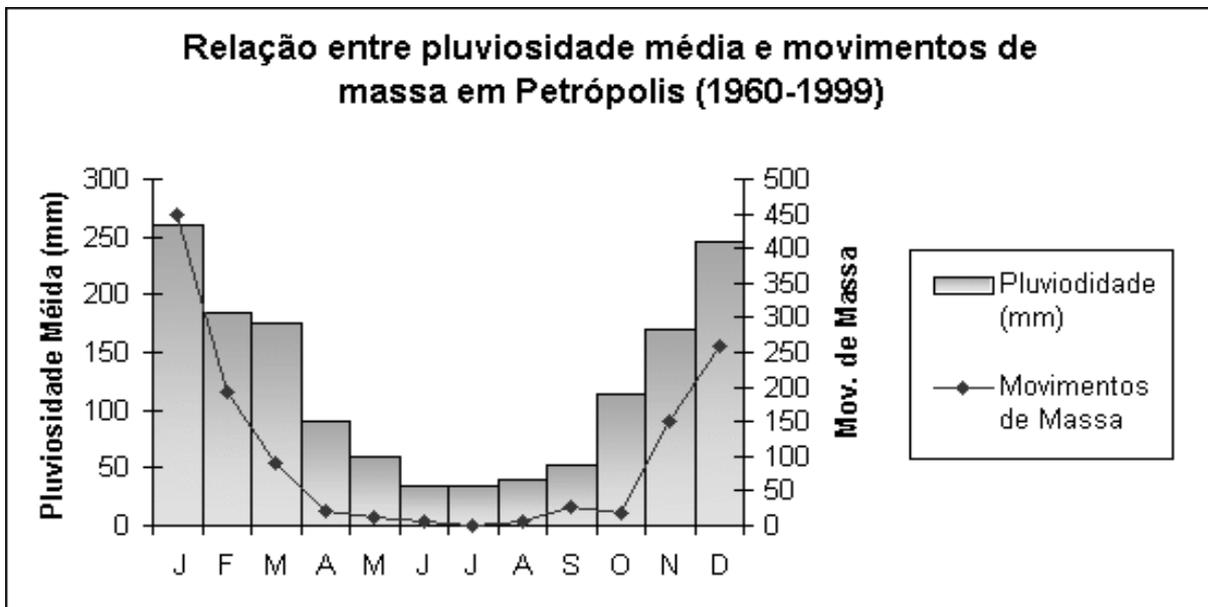


Figura 8: Gráfico com a relação da pluviosidade com o número dos movimentos de massa em Petrópolis no período de 1960 até 1999. Fonte: OLIVEIRA *et al*, 2003

**Tabela 1:** Subtipos de vegetação com suas características de altitude e ocorrência no primeiro distrito de Petrópolis. Adaptado de Gonçalves & Guerra (2006)

	<b>FLORESTA SUBMONTANA</b>	<b>FLORESTA MONTANA</b>	<b>FLORESTA ALTO MONTANA</b>	<b>VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA</b>
<b>ALTITUDE</b>	entre 50 e 500 m	entre 500 e 1.500 m	superior a 1.500m	variadas
<b>OCORRÊNCIA</b>	maciços isolados e em encostas de interior	áreas de altas declividades e altitudes	Em altas altitudes com mais baixas temperaturas	variadas

**Tabela 2:** Classificação de solos por inspeção tátil – visual. Fonte: Neves *et al*, (2005).

<b>CLASSIFICAÇÃO</b>	<b>TEXTURA E APARÊNCIA DO SOLO</b>
<b>AREIA</b>	Possui textura granular. É possível observar o tamanho dos grãos.
<b>SOLO ARENOSO</b>	Apresenta textura granular, porém com quantidade de silte e argila que dá para observar a sua coesão.
<b>SOLO SILTOSO</b>	Fina, textura com moderada quantidade de areia fina e pouca de argila, tendo forma compacta quando está seco.
<b>SOLO ARGILOSO</b>	Fina textura, sendo fraturado quando está no estado seco. Já quando está úmido, se adere às mãos.
<b>SOLO ORGÂNICO</b>	Com textura esponjosa e cheiro típico de matéria orgânica, que é mais destacado quando é aquecido ou umedecido.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Em relação à intensidade do deslizamento, para Guidicini & Nieble (1984), os movimentos de massa variam com base em no tipo de morfologia, geologia e geomorfologia do terreno, aliados com os parâmetros antrópicos, caso ocorram em áreas que tenham ocorrido intervenção humana, tais como construções irregulares ou desordenadas, desmatamento, poluição e contaminação do solo. Em relação ao material envolvido no movimento de massa, Hungr *et al*. (2001) propõe a divisão com base em terra, lama e detritos para os movimentos de fluxo:

- I. Terra: caracterizado por material inconsolidado, formado pelos processos de intemperismo, como argilas ou rochas meteorizadas.

- II. Lama: Constituído pela combinação de terra, argila e água, tornando-o um material mole com índice de plasticidade maior que 5%, além de índice líquido superior a 0,5 no movimento.
- III. Detrito: Composto pela mistura de outros materiais como areia, cascalho, argila, e material orgânico dependendo tipo de ambiente que ocorrer o movimento de massa. Devido a sua composição, também é considerado um material de baixa plasticidade.

### 3.1 Estágios de movimento de massa

Segundo Leroueil *et al.* (1996), todos os tipos de movimento de massa passam por quatro estágios de desenvolvimento, pré-ruptura, ruptura, pós-ruptura e o estágio de reativação, que ocorrem em sequência (figura 9).

- I. Primeiro estágio, de pré-ruptura, qualquer modificação na área pode dar início ao processo de deformação, conseqüentemente iniciar superficialmente a ruptura da massa. Alguns dos fatores que influenciam e acarretam esse processo são as modificações na resistência do material, tanto por processo natural como antrópico, rastejo ou ruptura contínua.
- II. Estágio de ruptura, a superfície de cisalhamento já está formada, o movimento de massa pode ocorrer a qualquer momento devido ao material ter desprendido do seu conjunto. É caracterizado pela fase mais importante do movimento, por ser o estágio que ocorre antes do movimento mais acelerado da massa.
- III. Estágio de pós-ruptura, vai desde o término de ruptura do material até o fim do seu deslocamento, onde a velocidade do movimento varia de acordo com o tipo de superfície e inclinação do terreno.
- IV. Estágio de reativação é o último do processo, relacionado ao início de um novo ciclo de movimento de massa, por conta de uma ruptura pré-existente.

### 3.2 Classificação de movimentos de massa

Os movimentos de massa podem ser classificados com base em fatores de cinemática do movimento, tipo de material que é composto o terreno, e geometria. A cinemática do movimento é baseada no deslocamento na massa, em função da velocidade, direção e sequência de deslocamentos. O tipo de material é definido com base na matéria que sofreu o deslocamento, como o solo, rocha, detritos, dentre outros. Na figura 10, é possível ver que geometria é definida pelo tamanho e formato da superfície de ruptura da encosta do terreno, com base em dados da (GEORIO, 2014). Assim, quanto mais lento for o movimento do deslocamento, o tipo de movimento será o de rastejo, podendo ser o material seco ou úmido, se for ocorrer de forma rápida e seca, o tipo de movimento característico é a queda. Assim, conforme a figura 10, o tipo de movimento será definido por esses três tipos extremos.

A velocidade dos movimentos de massa pode ser classificada e estimada de acordo com a Sociedade Internacional de Geotecnia da UNESCO (WP/WLI, 1995) e Cruden e Varnes (1996), onde a resposta ao movimento varia de acordo com a sua descrição (tabela 3). Para Hungr *et al.* (2014), devido a grande variedade de classificações possíveis, o termo que cada pesquisador irá usar em sua pesquisa e trabalho deve se baseado no que apresenta a maior variedade de informações, com isso, evitando-se unir mais de um tipo de movimento, logo, cada termo selecionado para um movimento de massa específico deve representar o foco particular do pesquisador, e que, por exemplo; uma classe definida como complexa não tem

utilidade porque quase todos os movimentos de massa são complexos. Em presença de um movimento complexo, a terminologia utilizada deve incluir a maior parte da informação sem precisar mencionar outro tipo de movimento.

### 3.3 Tipos de movimentos de massa

Augusto Filho (1994) caracterizou 53 tipos de movimentos de massa em quatro grupos com base nas suas características, sendo eles: rastejos (*creep*), escorregamentos (*slides*), corridas (*flows*) e quedas de blocos (*falls*) (tabela 4). Sendo alguns dos principais tipos de movimentos de massa que atinge as regiões do Rio de Janeiro a queda, tombamento, escorregamento, rastejo e corrida, definidos como:

#### I. Queda

Segundo GEORIO (2014) esse tipo de movimento é formado pela união da força gravitacional com a ação do intemperismo, em áreas íngremes ou penhascos, acarretado em sua maioria pela ação da água. O volume do material que sofre o movimento varia de centímetros a milhares de metros cúbicos, com velocidade rápida que variando em função da inclinação da encosta (figura 11A).

#### II. Tombamento

Caracterizado pela desagregação de blocos ou solo em superfícies verticais com a presença de descontinuidades em locais que possuem em sua maioria afloramentos rochosos, que podem ter se desprendido pelos processos de intemperismo físico e químico, ou até mesmo ações antrópicas como escavação (figura 11B). Em relação à velocidade do movimento do tombamento, pode variar de extremamente lenta a extremamente rápida, em função da declividade e distancia de deslocamento, devido o material que sofreu movimento ser deslocado pela da atuação da gravidade, Oliveira (2004).

#### III. Escorregamento

Movimentos com velocidade decrescente, devido à força de atrito entre o chão e o material em transporte, fazendo com que sua velocidade vá diminuindo até chegar ao nível de rastejo. O escorregamento ocorre de forma translacional com movimento rotacional ou inclinado para trás, sendo composto por solo, rochas ou a combinação de ambos. Esse tipo pode ser subdividido de acordo com Augusto Filho (1992) em:

##### A) Escorregamento Rotacional (circular)

Guidicini & Nieble (1984) definem como material arredondado com movimento giratório em volta do seu eixo de rotação, podendo ocorrer de forma sucessiva com massas de variados tamanhos de comprimentos, como por exemplo, superiores a 20 metros. (Figura 11C)

##### B) Escorregamento Translacional (Planar)

Caracterizado pela à ruptura de forma planar, devido a sua movimentação ocorrer através de um eixo imaginário GEORIO (2014). Suas características, em geral estão associados a massas de solo ou entre o solo e rocha, por conta de descontinuidades mecânicas

e hidrológicas, segundo Augusto Filho (1992). Onde a poro-pressão é elevada por conta de chuvas intensas, aumentando a saturação do material, fazendo com que o solo sobre a rocha, com ou sem a cobertura de vegetação escorregue de maneira lenta ou rápida, podendo percorrer longas distâncias (figura 11D).

### **C) Escorregamento em Cunha**

Segundo Oliveira (2004), é formado através do escorregamento translacional, onde a combinação de massas, em sua maioria a direção do movimento coincide com a linha de intercessão de ruptura (figura 11E). Para Guidicini & Nieble (1984), ocorrerá a grande maioria em áreas que tiveram atividade antrópica como locais que tiveram escavações e perfurações, Guidicini & Nieble (1984).

## **IV. Rastejo**

Ocorre de forma lenta com velocidades normalmente inferiores a  $10^{-7}$  m/s, fazendo com que se torne imperceptível ao olho nu, com ocorrência em terrenos de baixas altitudes, em sua maioria. Um dos fatores que influencia esse movimento lento é a presença de água, pois acarreta na alteração da poropressão da massa de solo, onde durante os períodos com menos chuva, principalmente os de seca, ocorre uma estagnação do movimento de massa (figura 11F). Assim, com a presença de água, a velocidade do movimento pode ser aumentada, e até mesmo transformá-lo em um escorregamento, Silva (2006). Alguns dos indicadores desse movimento são através de inclinação de postes, deslocamentos de cercas e árvores inclinadas, Oliveira (2004).

## **V. Corrida**

Para Silva (2006), ocorre o rápido movimento do material, causado geralmente pelo excesso de água no solo, fazendo com que fique mais fluido e conseqüentemente com menos atrito entre o solo (figura 11G).

### **3.4 Movimentos de massa típicos no Primeiro Distrito**

Segundo Nakazawa & Cerri (1990), por Petrópolis possuir grandes declividades no terreno, os movimentos mais frequentes são os de ocorrência rápida como os escorregamentos, principalmente os escorregamentos planares e as quedas de blocos. Sendo os mais comuns os escorregamentos, pela maioria das áreas possuem encostas com variação entre 10 e 45°. Com base na Defesa Civil de Petrópolis, através da PMRR, foram classificadas como áreas de alto e muito alto risco no primeiro distrito de Petrópolis os bairros de: 24 de Maio, Alto da Serra, Bingen, Centro, Chácara Flora, Dr. Thouzet, Duarte da Silveira, Duques, Independência, Quitandinha, Sargento Boening, São Sebastião e Valparaíso, de acordo com o PMP (2013). Quitandinha possui áreas com níveis de suscetibilidade variando de baixa até alta (figura 12A), pois, o ângulo de declividade do terreno pode influenciar no tipo de movimento de massa que pode ocorrer na área, assim, encostas com declividade abaixo de 10°, são menos suscetíveis ao movimento de massa devido à baixa declividade do terreno, sendo assim consideradas como encostas estáveis. Declividades entre 10 e 30° são mais frequentes os movimentos de massa do tipo rastejo e escorregamento. Entre 30 e 60° podem ocorrer escorregamentos com velocidades maiores de acordo com o ângulo da encosta.

Declividades superiores a  $60^\circ$  são mais comuns movimentos de massa do tipo queda de fragmento por conta da alta declividade, Varanda (2006).

No bairro de quitandinha, os movimentos de massa mais frequentes são de rastejo e escorregamento, onde em 2017, na Av. Ayrton Sena, causou destruição de moradias (figura 12B). Porém, também podem ocorrer quedas de fragmentos (figura 13A), pois no mesmo ano ocorreu deslizamento de terra do tipo queda de blocos, causando a destruição de casas, ruas, e vítimas. Segundo Guerra & Jorge (2014), entre os dias 17 e 18 de março de 2013, devido à intensa chuva que se se acumulou no solo, ocorreram diversos casos de deslizamentos de terra em Petrópolis, sendo registrados mais de 100 notificações, sendo 75% no bairro de Quitandinha e Independência. DRM-RJ (2013), também foi registrou que 70% dos deslizamentos foram ocasionados em encostas que sofreram ação antrópica como escavações para construções de moradias ou estradas e vias de acesso sem nenhum sistema de drenagem, com apenas 2% dos deslizamentos em encostas naturais sem intervenção humana. Já em 2022, as fortes chuvas de verão causaram mais de 700 deslizamentos por toda cidade de Petrópolis, além do alagamento de ruas deixando mais de 200 óbitos e centenas de desabrigados, com o movimento de massa do tipo corrida causador do maior número de vítimas (figura 13B), pois os moradores não tiveram tempo para deixar suas residências.

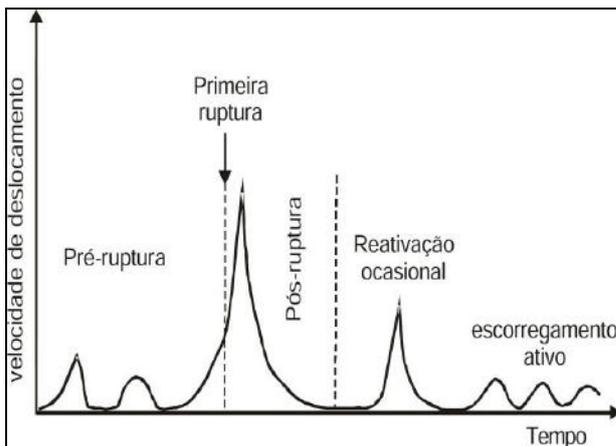


Figura 9: Movimentos de massa em função da velocidade do deslocamento e tempo. Fonte: Modificado de Leroueil *et al.*(1996).

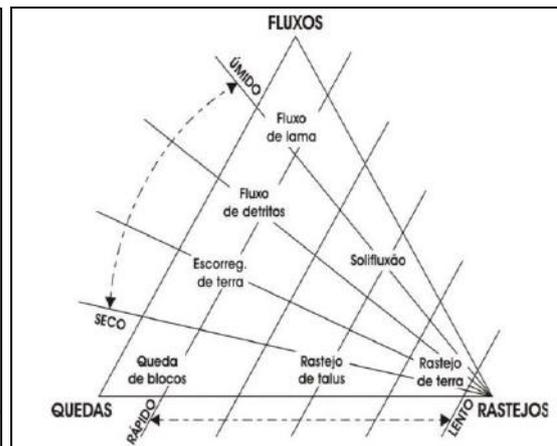


Figura 10: Classificação de movimentos de massa. Fonte: adaptada de Carson & Kirkby (1975)

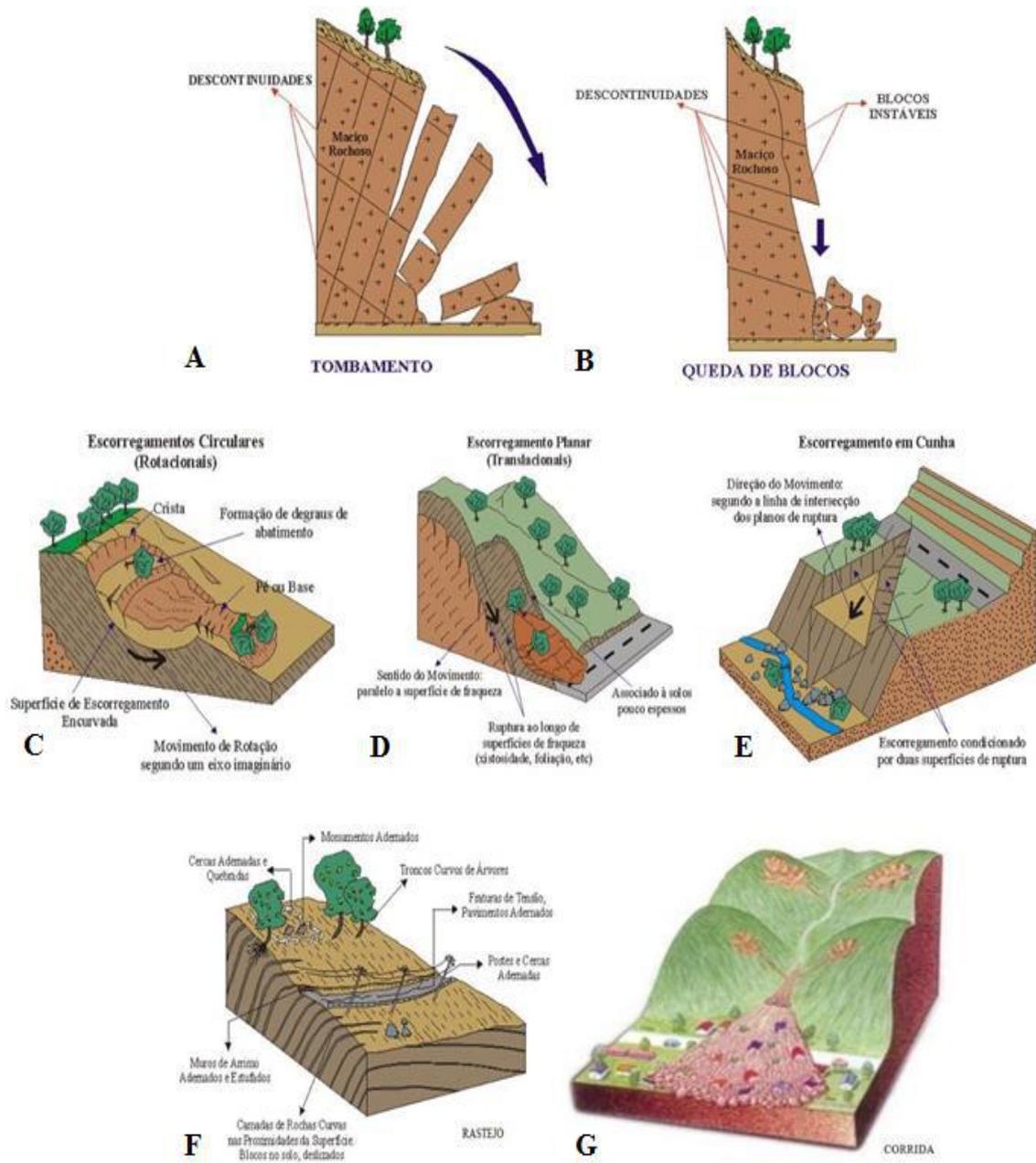


Figura 11: Tipos de movimentos de massa. Fonte: Brollo (2010).

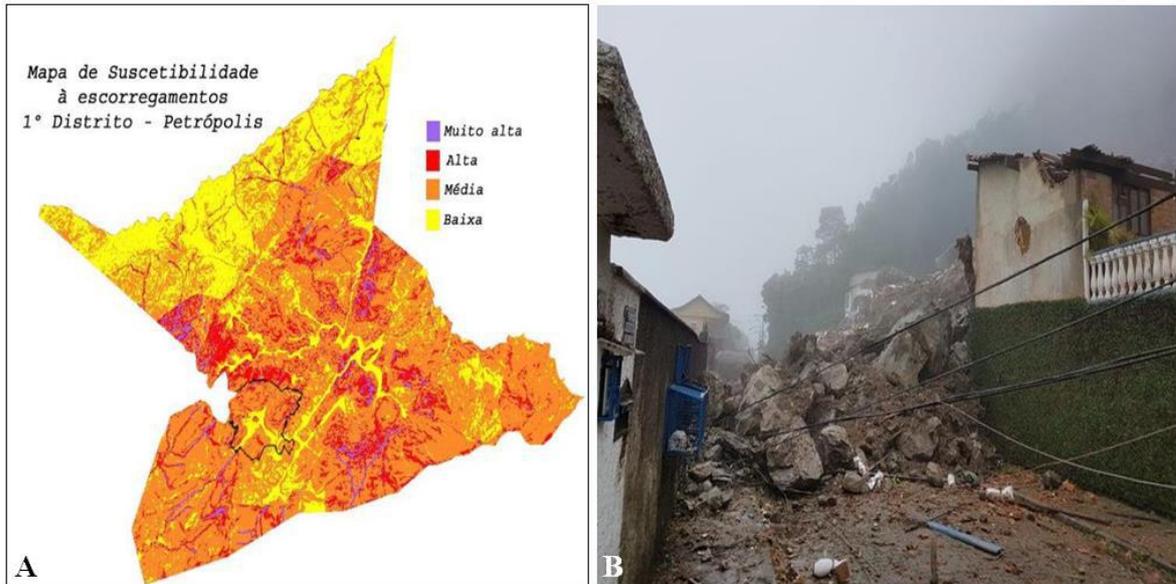


Figura 12: (A) Mapa de suscetibilidade de escorregamentos. Fonte: Varanda (2006), adaptado pela autora. (B): Escorregamento registrado no bairro de Quitandinha em 2017. Fonte: G1 (2017)



Figura 13: (A) Quedas de blocos registrada no bairro de Quitandinha em 2017. Fonte: G1 (2017). (B) Corrida no Morro da Oficina (Petrópolis) Fonte: Folhapress (2022).

**Tabela 3:** Variação da velocidade do movimento de massa. Fonte: WP/WLI (1995) e Cruden & Varnes (1996). Baseado em Hungr (1981)

Classificação	Descrição	Velocidade (mm/s)	Velocidade típica	Resposta <sup>a</sup>
7	Extremadamente rápido	$5 \times 10^3$	5 m/s	Nehuma
6	Muito rápido	$5 \times 10^1$	3m/min	Nehuma
5	Rápido	$5 \times 10^{-1}$	1.8 m/h	Evacuação
4	Moderado	$5 \times 10^{-3}$	13 m/mês	Evacuação
3	Devagar	$5 \times 10^{-5}$	1.6m/ano	Manutenção
2	Muito devagar	$5 \times 10^{-7}$	16mm/ano	Manutenção
1	Extremadamente devagar			Nula

<sup>a</sup>Baseado em Hungr (1981).

**Tabela 4:** Grupos de movimentos de massa com suas características. Fonte: Sestini (1999)

TIPOLOGIAS		CARACTERÍSTICAS
Rastejo ( <i>creep</i> )		Ocorre lentamente em declive acima de 35°, causando deslocamento da porção superior do solo, em baixa profundidade.
Escorregamentos ou ( <i>slides</i> )	Deslizamentos	Envolvem a combinação de água no processo. Típico de relevo de alta amplitude, com elevada pluviosidade.
Corrida de massa ( <i>flow</i> )		Envolve grande quantidade de água, com transporte de massa em suspensão ou saltação.
Quedas de blocos ( <i>falls</i> )		Movimentos típicos de encostas com ângulos próximos ou superiores a 90°. Por conta disso ocorre queda livre de material (rochas, solos), sem a água ser o transportador da massa.

#### 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente foi realizado o estudo bibliográfico sobre os tipos e comportamento dos movimentos de massa existentes, assim como os que mais ocorrem na área de estudo. Foi preciso compreender e estudar os métodos geofísicos, principalmente os de Radar de Penetração do Solo (GPR) e Eletorresistividade, desde a sua fundamentação teórica até sua aquisição e processamento de dados, para analisar sua aplicabilidade, vantagens e desvantagens para o estudo da verificação da estabilidade de taludes. Com base nas seções de radargrama da aquisição de GPR que já se tinha da área de estudo realizada por Marques (2016), e o conhecimento bibliográfico da região, criou-se uma pseudo-seção teórica de resistividade aparente bidimensional (2D) no programa gratuito RES2DMOD, para ser obter uma comparação com a seção obtida através da aquisição de dados de campo com o equipamento de eletorresistividade.

## 5. MÉTODO DO GPR

O Radar de Penetração do Solo (GPR) gera onda eletromagnética de alta frequência (10 - 4000 MHz) que se propaga no solo de acordo com as características elétricas dos materiais. Após entrar em contato com o material, parte do sinal transmitido é refletido para um receptor em superfície, que posteriormente é processado gerando a seção de radargrama (figura 14). Como as rochas sedimentares, metamórficas e ígneas são consideradas semicondutoras ou dielétricas, podendo ser definidos por três propriedades: condutividade elétrica, permissividade dielétrica e permeabilidade magnética.

As propriedades do GPR são baseadas nas equações de Maxwell, através da teoria de propagação de ondas eletromagnéticas. Ao ser perturbado as partículas eletromagnéticas carregadas, se propagam no meio, gerando as ondas eletromagnéticas. Em meios magnéticos e polarizáveis as equações de Maxwell são:

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (4)$$

### 5.1 Condutividade elétrica

A condutividade elétrica é definida pela capacidade do material em conduzir corrente elétrica. A Lei de Ohm liga a densidade de corrente de condução ( $\vec{J}$ ) ao campo elétrico ( $\vec{E}$ ):

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad (5)$$

Para os materiais geológicos a condutividade ( $\sigma$ ) ou a resistividade ( $\rho$ ), podem variar até 20 ordens de magnitude, sendo algumas das principais causas que alteram a condutividade elétrica nesses materiais: quantidade de umidade, quantidade de minerais condutivos, salinidade, porosidade e a quantidade de fração de argila.

### 5.2 Permissividade dielétrica

O campo elétrico ( $\vec{E}$ ) pode ser ligado com a corrente de deslocamento ( $\vec{D}$ ), sendo a constante de proporcionalidade a permissividade dielétrica do material ( $\epsilon$ ), dada por:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (6)$$

É preciso saber a condutividade elétrica por inferir na atenuação e a permissividade dielétrica por afetar a propagação das ondas emitidas pelo radar.

A permissividade dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) ou constante dielétrica ( $\mathbf{k}$ ), é dada por:

$$\mathbf{K} = \epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \quad (7)$$

Sendo:

$\epsilon$  = permissividade dielétrica do material (F/m).

$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m, a permissividade dielétrica no vácuo.

### 5.3 Permeabilidade magnética

Definida pela relação do campo magnético ( $\mathbf{H}$ ) com o de indução magnética ( $\mathbf{B}$ ), sendo a constante de proporcionalidade a permeabilidade magnética do material ( $\mu$ ), que pode ser adquirida por:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (8)$$

Utilizando-se das equações de Maxwell, é possível obter as equações de propagação de onda em um meio, sendo a velocidade e a atenuação as principais características. A velocidade do campo eletromagnético pode ser obtida por:

$$\mathbf{v} = \frac{\mathbf{c}}{\sqrt{\mathbf{k}}} \quad (9)$$

Com:

$\mathbf{C}$  = velocidade da luz =  $2,997 \times 10^8$  m/s

$\mathbf{K}$  = constante dielétrica dos materiais ou permissividade dielétrica

### 5.4 Profundidade de investigação x resolução

Segundo Souza (2005), a profundidade de investigação está relacionado com a frequência da onda eletromagnética em sub-superfície. Com o aumento da frequência da onda transmitida resulta em uma resolução maior da sub-superfície, porém com uma profundidade de penetração menor. Diminuindo a frequência, tem-se o aumento da profundidade de investigação, conseqüentemente uma menor resolução. As propriedades elétricas dos materiais também é outro fator que está relacionado com a profundidade de investigação. Na tabela 5, é possível observar os valores da relação da frequência central das antenas com as profundidades de investigação, pois de acordo com Porsani (1993), esses valores foram obtidos por meio de experimentos práticos com diversas empresas criadoras de equipamentos de GPR, podendo ser utilizada em situações com poucos dados ou nenhum dado geológico da área de estudo.

## 5.5 Técnicas de aquisição

É possível obter três modos de operação com o GPR: perfil de reflexão com afastamento constante (*commom off-set*), sondagens de velocidade e arranjo de trans-iluminação (tomografia). As sondagens de velocidades são obtidas indiretamente por meio do CMP (*Commom Mid Point*) e WARR (*Wide Angle Reflection and Refraction*), sendo as duas utilizadas para saber a velocidade aproximada do sinal de GPR em função da profundidade de investigação, porém é preciso que se tenha variação do espaçamento das antenas. No Afastamento constante (*Commom off-set*) são deixadas as antenas transmissora e receptora separadas por uma distância fixa, sendo movidas pela superfície (figura 15A), sendo o método utilizado por Marques (2016) para o mapeamento geofísico de GPR da Rua Mato Grosso no bairro de Quitandinha em Petrópolis, devido a otimização do processamento de dados e praticidade de aquisição (figura 15B). Através do método CMP, ocorre o deslocamento simétrico entre as antenas receptora e transmissora, de forma que se distanciem para a esquerda e direita saindo de um ponto central, sendo geralmente o *offset* inicial usado S1 (1m de distancia entre as antenas), (figura 16A). Nesse esquema as antenas não podem possuir um espaçamento máximo da frequência de *Nyquist*, sendo o intervalo de amostragem variando de  $\frac{1}{4}$  até  $\frac{1}{2}$  do comprimento de onda ( $\lambda$ ), Annan (1992) Através do método WARR, a antena transmissora fica fixa, ocorrendo o deslocamento somente da antena receptora, sendo preciso cuidado com os refletores internos por serem sensíveis a inclinações, (figura 16B). No arranjo de trans-iluminação ocorre o posicionamento das antenas receptora e transmissora em lados opostos, cobrindo o meio de investigação, sendo uma das antenas é fixa e a outra movendo-se de forma paralela, utilizada principalmente em cavernas, poços e construção civil (figura 17).

## 5.6 Aquisição e processamento de dados (GPR)

Durante o mapeamento da Rua Mato Grosso em Quitandinha, Marques (2016) utilizou o equipamento TerraSIRch SIR (*Subsurface Interface R/adar*) System-3000, produzido pela *GeophysicalSurvey Systems Incorporated, Inc* (GSSI), e antena blindada monoestática de 200 MHz . Através do perfil de reflexão de afastamento comum (*commom off-set*), foram obtidos doze perfis em linha reta ao longo da rua, com um afastamento constante de 30cm, (figura 18). Segundo Marques (2016), para o processamento de dados do GPR foi utilizado o programa REFLEX – Interpex, através das etapas: ajuste tempo-zero (*timezero*), *dewow*, *remove background*, filtro passa-banda (*band-pass filter*), ganho (*AGC Gain*), migração 2d (*2dmigration*).

A intercessão do processamento de dados das linhas 1 e 2 correspondem aproximadamente ao dado obtido com o método de Eletroresistividade (EM), (figura 19A). Na área da linha 1, o solo é extremamente intemperizado, arenoso-argiloso, com a presença de poucos fragmentos de rochas com variação de cm a metros, a medida que progride em direção a área da linha 2 passa a ter uma coloração mais avermelhada (figura 19B). Foi obtida a seção perpendicularmente ao talude com direção SW-NE, com aproximadamente 40 metros de extensão, onde na seção de radargrama (figuras 20 A e B), foi constatado entre 1 e 2 metros de profundidade o contato entre o solo friável e o solo compacto, presença de formas hiperbólicas indicando fragmentos de tamanhos variados espalhados por toda a seção.

Na área da linha 2, o solo é arenoso-argiloso, com a coloração avermelhada e (figura 21). Na seção de radargrama foi constatado fragmentos rochosos de tamanhos variados, dispersos pela área com a maioria concentrados em profundidade superiores a 5m, porém também fragmentos dispersos entre 1 e 4m de profundidade, com tamanhos variados (figura

22 A e B), com contato do solo arenoso e friável variando até 1,5m de profundidade, sendo a aquisição de dados obtida com direção SW-NE, e a seção com aproximadamente 40 metros de extensão.

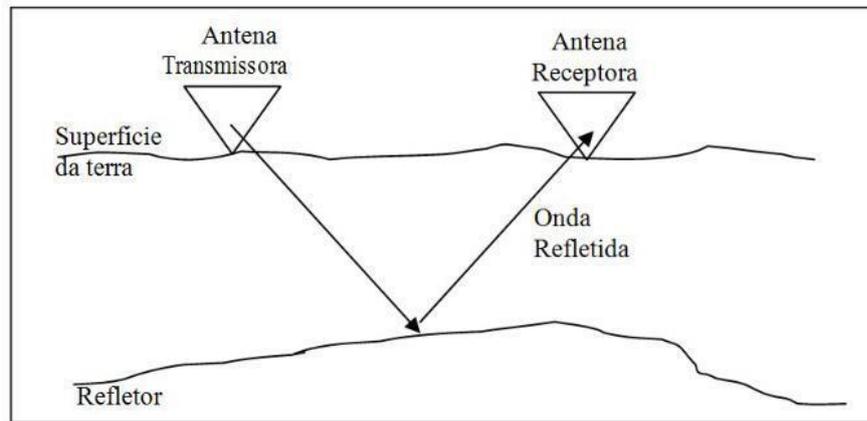


Figura 14: Esquema com arranjo das antenas e propagação de ondas no GPR. Fonte: Braga (2006).

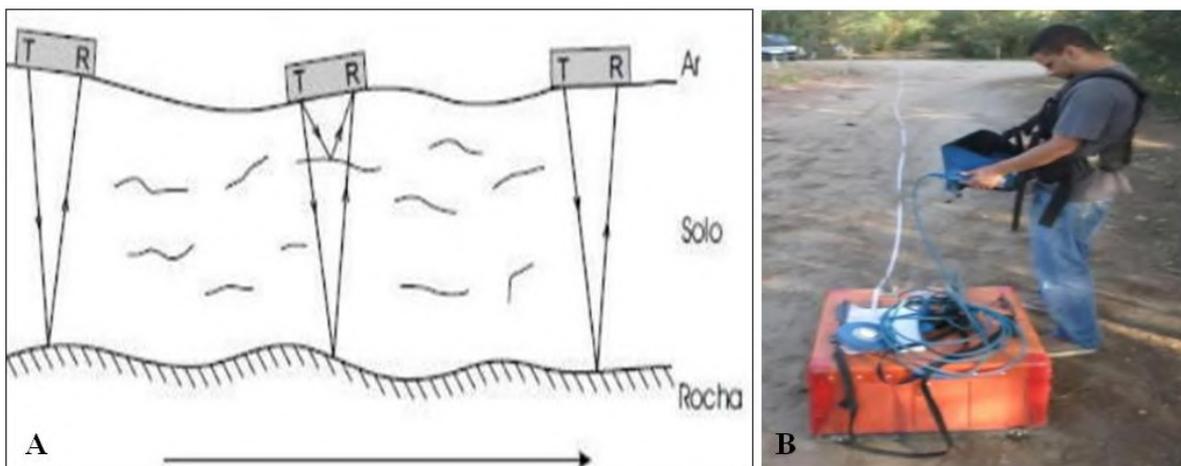


Figura 15: (A) Esquema da técnica Common off-set. Fonte: Pinto (2007). (B) Equipamento System-3000 utilizado para aquisição. Fonte: Marques (2016).

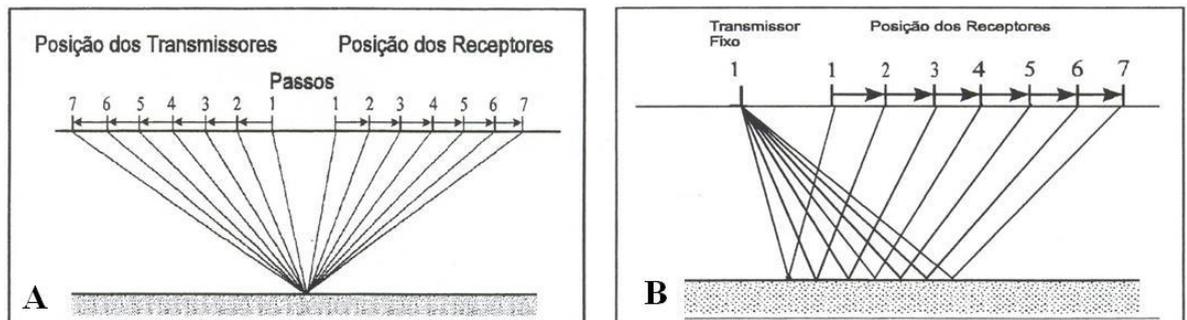


Figura 16(A): Esquema da técnica CMP. (B): Esquema da técnica WARR. Fonte: Porsani (1999).

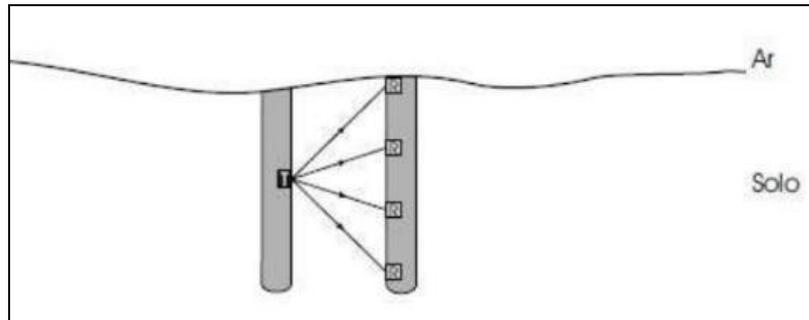


Figura 17: Esquema da técnica de trans-iluminação. Fonte: Pinto (2007).

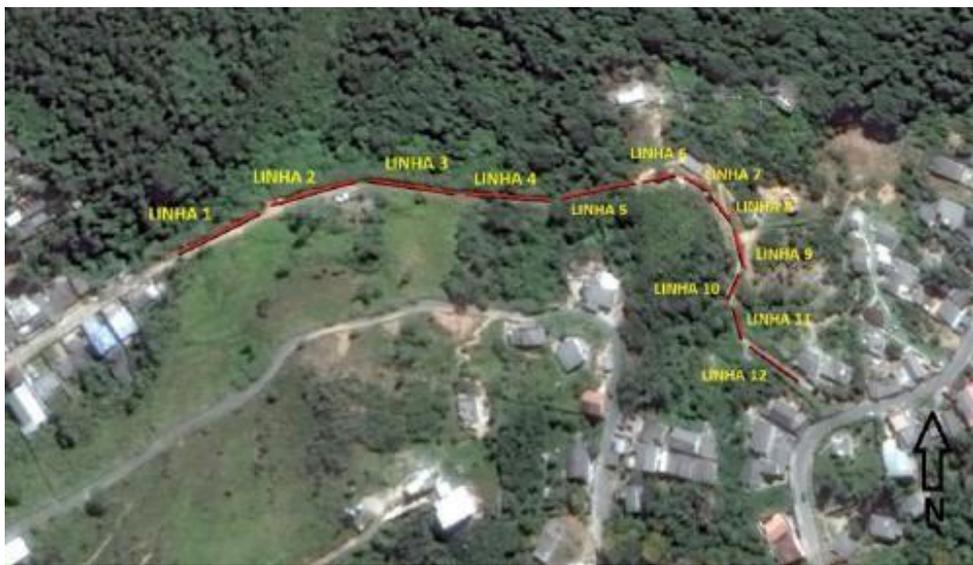


Figura 18: 12 linhas de aquisição de GPR da Rua Mato Grosso. Fonte: Marques (2016).



Figura 19: (A) Local da aquisição de dados da linha 1. (B) coloração do solo avermelhado do solo. Fonte: Marques (2016).

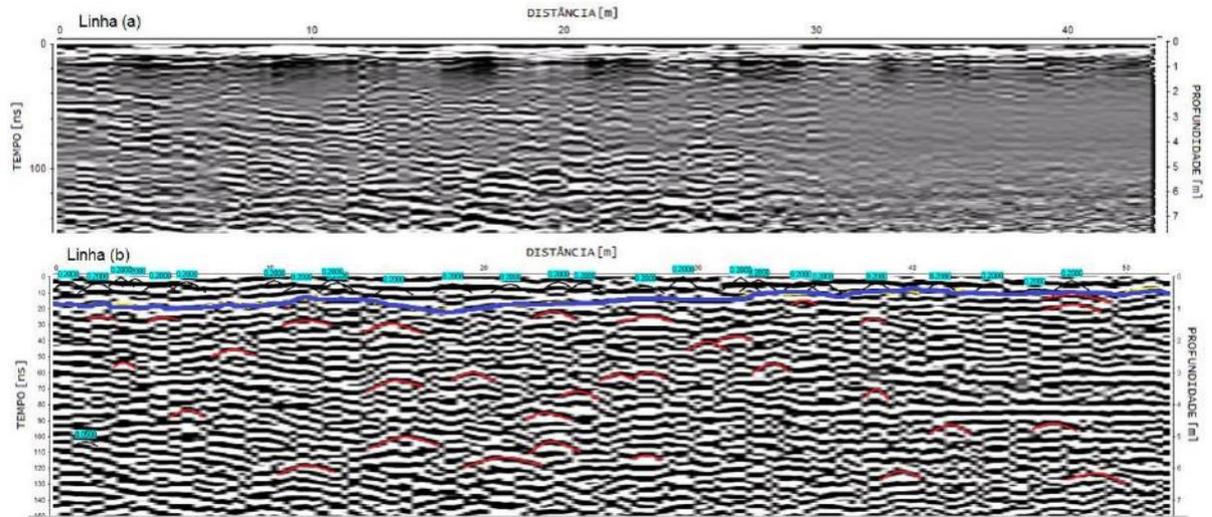


Figura 20: (A) Linha de aquisição 1 da Rua Mato Grosso não processada. (B) Linha processada. Fonte: Marques (2016).



Figura 21: Local da aquisição de dados da linha 2. Fonte: Marques (2016).

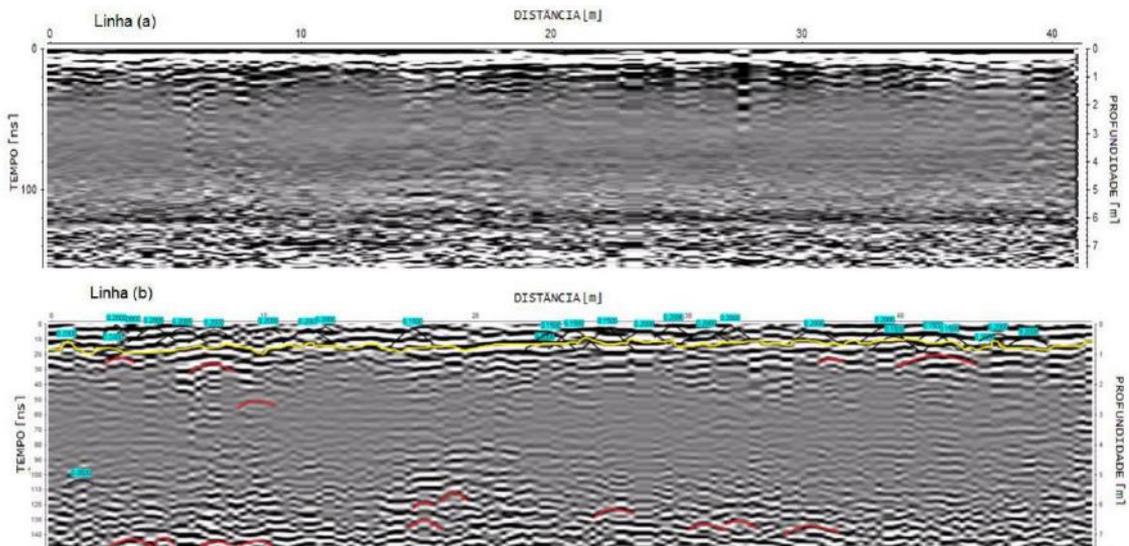


Figura 22: (A) Linha 2 não processada. (B) linha processada. Ambas na Rua Mato Grosso em Quitandinha. Fonte: Marques (2016).

**Tabela 5:** Relação das frequências das antenas com suas respectivas profundidades de investigação. Fonte: Porsani (1999).

Frequência central (MHz)	Profundidade máxima de penetração (m)
1000	1
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

## 6. MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE (ERT)

O método de eletroresistividade (ERT) é baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais, onde em conjunto com a constante dielétrica e a permeabilidade magnética, indicam as propriedades eletromagnéticas dos solos e rochas. Para isso é utilizado uma corrente elétrica artificial contínua ou alternada de baixa frequência (menos de 10 Hz) na área de estudo, através de dois eletrodos localizados na superfície, a fim de medir o potencial gerado entre dois eletrodos nas proximidades do fluxo de corrente (figura 23).

### 6.1 Princípios básicos

Os materiais geológicos possuem propriedades como resistividade elétrica, a qual é indicadora de algumas características de estados em relação a algumas propriedades como alteração, faturamento e saturação. Pela lei de Ohm-m, é possível relacionar resistividade ( $\rho$ ) e a resistência ( $R$ ) de um condutor homogêneo, de forma cilíndrica ou prismática, através da equação:

$$R = (\rho \cdot L) / A \text{ (ohms)} \quad (10)$$

Sendo a resistividade elétrica do material definida como resistividade elétrica (ohm-m) entre as faces opostas de um único cubo unitário do material, em um cilindro condutor de resistência  $R$ , comprimento  $L$  e área de seção transversal  $A$  (figura 24). Com a unidade de medida no S.I em Ohm-m. A resistividade  $\rho$  é obtida por:

$$\rho = (R \cdot A) / L \text{ (ohm.m)} \quad (11)$$

### 6.2 Fluxo de corrente

A corrente flui por diversos caminhos, em qualquer material tridimensional (figura 25A). Quando a bateria é aterrada em dois pontos distantes um do outro por meio do cabo e do eletrodo, não ocorre o isolamento ideal, fazendo com que ocorra a condução de corrente

gerada pela bateria. Considerando a resistividade do solo uniforme e aplicando a equação 11 nesse modelo, é obtido:

$$\rho = (2 \pi r) V/I \text{ (ohm.m)} \quad (12)$$

V = potencial

I = corrente

$\rho$  = resistividade

r = distância entre o eletrodo de corrente eo ponto onde o potencial é medido.

Segundo Braga (2006), ao ser conectado o cabo do condutor da bateria ao eletrodo de corrente (figura 25B), é possível determinar o valor de intensidade de corrente (I) conectando-se um voltímetro a dois eletrodos, sendo um eletrodo perto ao de corrente e o outro mais afastado, tornando possível calcular a diferença de potencial ( $\Delta V$ ), entre os dois. Como os dois eletrodos ficam a uma distancia muito grande um do outro, esse método não é usual em trabalhos de campo, pois a distancia entre eles deve ser reduzida (figura 26), com o uso de quatro eletrodos (AMNB). Nesse método um par de eletrodos é utilizado para introduzir corrente no subsolo (AB), e o outro par de eletrodos para medir a diferença de potencial entre eles (MN), que é resultante da passagem dessa corrente, onde o potencial resultante deste campo elétrico gerado pode ser determinado pela corrente elétrica de intensidade I que é introduzida no subsolo através dos eletrodos A e B, sendo o potencial V gerado medido por meio dos eletrodos M e N. Para Braga (2006), comparando-se os meios homogêneos e heterogêneos, ao se utilizar a mesma matriz de eletrodos, a diferença de potencial observada  $\Delta V$  será diferente nesses dois meios, devido ao campo elétrico ser afetado pela heterogeneidade dos materiais geológicos (figuras 27 A e B).

### 6.3 Propriedades elétricas das rochas

A resistividade das rochas é considerada uma das propriedades físicas mais importantes na prospecção elétrica, sendo medida a dificuldade de transporte de cargas livres pelo meio, podendo ser utilizada para a caracterização dos materiais geológico em relação à alteração, fraturamento, saturação, contatos litológicos, espessura dos estratos, profundidade do embasamento e profundidade do nível d'água integrada com resultados da utilização de outros métodos geofísicos. Segundo Telford *et al.*(1990), basicamente a corrente elétrica se propaga nos materiais por meio de três processos distintos: transporte eletrônico (ôhmico), eletrolítico e dielétrico, com o primeiro típico de objetos metálicos, por contém elétrons livres, no segundo ocorre o transporte da carga pelos íons, além do fluxo de corrente ser mais baixo em comparação com o primeiro processo. Já a condução dielétrica é típica de materiais isolantes. As resistividades das águas que saturam os materiais no subsolo tendem a apresentar uma variação ampla, com baixos valores, onde estas soluções aquosas possuem diversos sais minerais dissolvidos, tais como o cloreto de sódio (NaCl), com a resistividade das águas inversamente proporcional à concentração destes sais dissolvidos, devido ao fato das rochas possuírem poros, que podem ser preenchidos por eletrólitos, fazendo com que as rochas se tornem condutoras iônicas, com a corrente elétrica fluindo praticamente através do eletrólito de saturação, em casos em que a estrutura mineral da rocha seja mal condutora de corrente elétrica. Muitas rochas são compostas por minerais praticamente isolantes em relação à corrente elétrica, como as constituídas por quartzo, silicatos, calcita, dentre outras.

#### 6.4 Método da polarização induzida (IP)

Por volta de 1920, Conrad Schlumberger ao fazer trabalhos geofísicos de campo com a utilização de métodos geolétricos nas proximidades de jazidas de sulfetos, observou que ao ser introduzido no subsolo a corrente elétrica e posteriormente interrompida, o campo elétrico criado não sumia bruscamente, mas sim de forma gradual, Orellana (1974). Segundo Braga (2006), a polarização induzida é medida como uma variação de voltagem em função do tempo (IP-Domínio do Tempo) ou frequência (Domínio da Frequência), tendo sido utilizado nesse trabalho à técnica de domínio do tempo (figura 28). Na técnica de domínio do tempo é aplicada uma diferença de potencial  $\Delta V$  primária ao solo, através dos eletrodos cravados na base do terreno, fazendo com que seja provocada conseqüentemente uma polarização. A diferença de potencial primária ( $\Delta V_p$ ) não é estabelecida e nem anulada instantaneamente após a corrente ser emitida e cortada em pulsos sucessivos, onde ela varia em função do tempo formando uma curva  $\Delta V_{IP} = f(t)$ , que liga a assíntota  $\Delta V_p$  em regime estacionário com a assíntota zero após o corte da corrente. Para Gallas (2005), são utilizadas as técnicas e arranjos eletródicos para levantamentos por polarização induzida, em métodos de mapeamento com eletrorresistividade, com os equipamentos utilizados para fazer o ensaio de polarização induzida podem medindo a eletrorresistividade com o potencial espontâneo. Como os fenômenos físico-químicos capazes de explicar a polarização induzida são complexos e pouco conhecidos, de acordo com Braga (2006), a maioria dos autores distingue entre duas possíveis fontes de polarização induzida:

- A) Polarização metálica ou eletrônica: em um corpo submetido a uma corrente elétrica, em sua superfície limite ocorre à passagem da condução iônica para a eletrônica, assim como o contrário. Isso ocorre devido a duas superfícies opostas do corpo produzirem concentrações de íons, que não pegaram elétrons do corpo nem deram para ele.
- B) Polarização de membrana: tem ocorrência principalmente em rochas com poucas substâncias metálicas, causado por uma alteração na mobilidade entre os ânions e cátions, gerados pela presença de minerais de argila. Ao ser gerado um potencial elétrico, os íons transportadores com cargas positivas passarão pela nuvem de cátions, porém os transportadores com cargas negativa se acumularão, com isso formando uma membrana seletiva de íons, fazendo com que tenham vários cátions em um lado da membrana e vários ânions no outro lado. Sendo o gradiente de concentração de íons oposto ao fluxo de corrente, diminuindo a mobilidade geral dos íons, assim como a polarização resultante ser baseada em função da diferença de mobilidade entre cátions e ânions.

#### 6.5 Técnicas de Aquisição de dados

São utilizadas duas principais técnicas principais para o método de Eletrorresistividade em mapeamento da subsuperfície, a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o Caminhamento Elétrico (CE), que podem ser utilizadas para investigação vertical e lateral, respectivamente, Sendo escolhido para a realização desse trabalho a técnica do caminhamento elétrico (CE), onde, de acordo com Telford *et al.* (1990) propagação da corrente elétrica é dada através da distribuição espacial dos eletrodos de corrente e potencial, podendo-se obter investigações laterais de subsuperfície, conforme é mostrado na figura 29A. Ao longo terreno, são realizadas diversas medições de resistividade aparente na superfície com a disposição fixa dos eletrodos de corrente e potencial ( $AB = MN$ ) ao longo do perfil, criando perfil lateral da área de estudo, podendo ser utilizado uma variedade de arranjos nessas técnicas: dipolo-dipolo,

polo-dipolo, gradiente, Schlumberger, Wenner, dentre outros, Braga (2006). Com base em Telford *et al.* (1990) por meio da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) são obtidos os valores de resistividade aparente de camadas de diferentes profundidades, em relação ao ponto central do arranjo de campo, sendo posteriormente através de modelagem geofísica determinadas a verdadeira resistividade e espessura das camadas geoeletricas, realizadas através da injeção de corrente no solo e medido a diferença de potencial obtida (figura 29B). Sendo a corrente elétrica transmitida por meio de dois eletrodos cravados no solo denominados AB ou eletrodos de corrente, medindo-se a diferença de potencial estabelecida no campo através de um voltímetro sensível que é conectado a outro par de eletrodos MN ou eletrodos de potencial, entre os eletrodos e fixado no centro do arranjo é estabelecido o ponto de investigação. Já em relação à profundidade alcançada, irá depender da passagem da corrente pelo meio geológico subterrâneo e distância entre os eletrodos de corrente (AB), pois conforme os eletrodos de corrente são afastados tem-se uma profundidade da investigação maior, pela corrente passar por diversas camadas superficiais até que a profundidade de interesse seja atingida, obtendo-se o valor de resistividade, denominado resistividade aparente.

Os dois métodos principais de arranjo de campo utilizados em mapeamento geofísico de ERT são o Schlumberger e Wenner, com poucas diferenças entre ambos (tabela 6). Para Braga (2001), no arranjo de Schlumberger é movido dois eletrodos, além das leituras no dispositivo serem menos afetadas, devido interferências causadas por ruídos indesejáveis, podendo ser utilizado para aquisição em locais heterogêneos, por ser menos propício a erros em relação ao arranjo de Wenner (figura 30A), já o arranjo Wenner está mais propício a erros de interpretação devido à heterogeneidade lateral (figura 30B), segundo Braga (2001). No Dipolo-Dipolo é possível utilizar em conjunto vários dipolos de recepção (MN) dispostos ao longo da linha a ser levantada (figura 31), com cada dipolo MN ligado a um nível de investigação. A profundidade teórica atingida em cada nível de investigação é definida de acordo com alguns autores, como  $Z = R/2$  (metros), sendo R é a distância entre os centros dos dipolos considerados (AB e MN), mas na prática, essa relação é mais real se for tomada como sendo aproximadamente  $R/4$ . O espaçamento entre as estacas é constante, variando em função das profundidades de investigações que se requer, pois o espaçamento entre os dipolos e os números de dipolos utilizados indicam as profundidades de investigações que irá se alcançar, também sendo atribuídas à interseção de linhas retas a  $45^\circ$  dos centros de AB e MN. Assim como em cada estação, a distância movida pelos dois dipolos é igual a X, e os dados obtidos são plotados nas posições  $n = 1, 2, 3, 4$ , e assim por diante, onde com o fim da disposição do arranjo no terreno e as obtendo-se as respectivas leituras, os dados são interpolados para criar uma pseudo-seção de resistividade aparente, e a estrutura é interpretada de forma qualitativa, seguido de modelagem quantitativa por meio de programas específicos, Telford *et al.* (1990).

A resistividade aparente é ser obtida pela equação:

$$P = K \Delta V/I \quad (13)$$

Com coeficiente geométrico K dado por:

$$K = 2\pi \cdot G \cdot x \quad \text{com} \quad G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}} \quad (14)$$

Sendo  $K$  o fator geométrico que depende da disposição dos eletrodos ABMN na superfície do terreno,  $x$  o espaçamento dos dipolos AB e MN adotado e  $n$  o nível de investigação correspondente, com geralmente as anomalias resultantes de corpos ou estruturas geológicas indicando dois flancos anômalos nas pseudo-seções, sendo um em função dos eletrodos de potenciais e outro em relação aos eletrodos de corrente e a intensidade desses flancos variando em função da geologia local (figura 32). Também é possível fazer a filtragem das pseudo-seções, para que se determine com precisão maior a posição na superfície do terreno das anomalias qualitativas identificadas, através da retirada dos flancos resultantes (figura 33), com uma das técnicas utilizadas o sistema de plotagem denominado de médias dos triângulos, com as médias triangulares obtidas de duas maneiras. A primeira através das médias triangulares totais, em que se obtêm as de todos os valores dentro do triângulo, considerando os níveis investigados, e a segunda por meio das médias triangulares laterais, onde é feito as médias dos valores externos do triângulo, sendo que em ambos os sistemas, ocorre a plotagem dos valores médios no centro do triângulo, de forma vertical, Braga (2006).

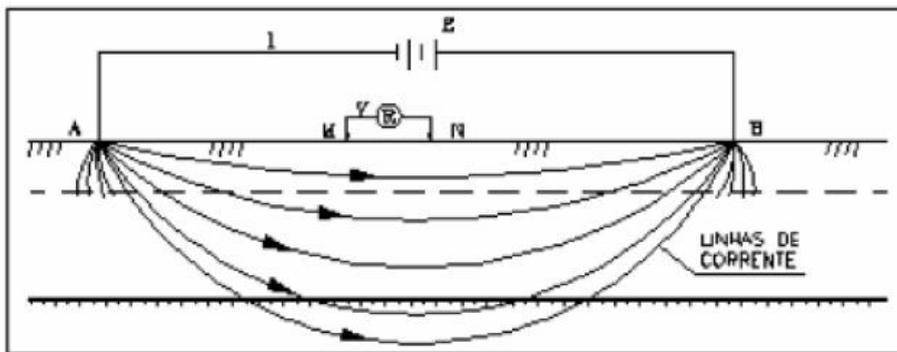


Figura 23:Esquema do método de eletrorresistividade. Fonte: Lago *et al.* (2006).

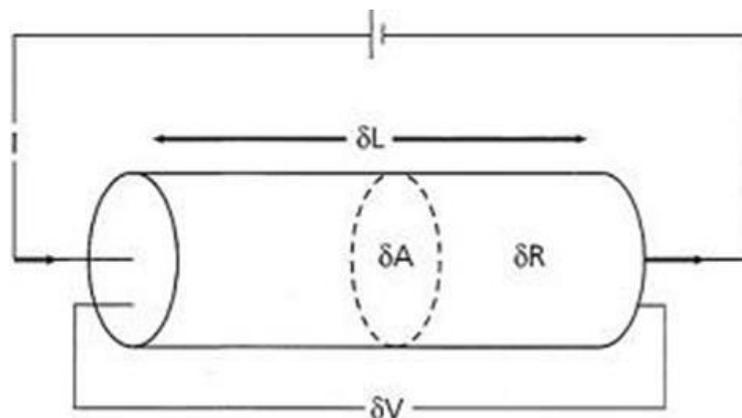


Figura 24:Esquema com parâmetros de resistividade. Fonte: Kearey *et al.* (2002).

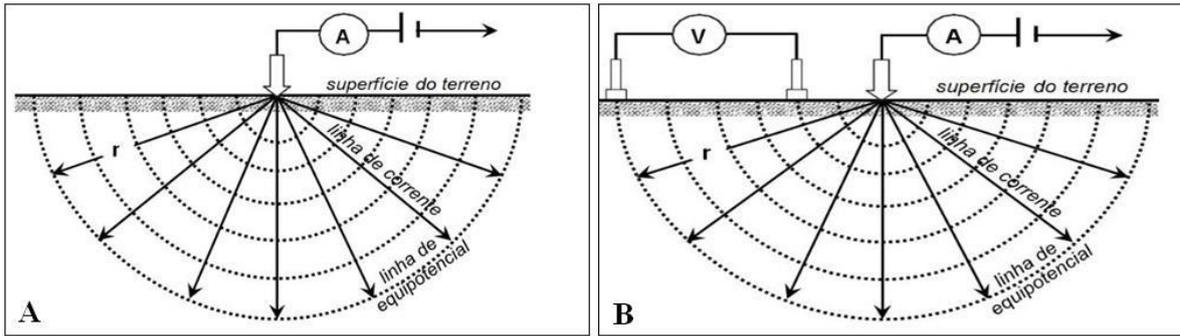


Figura 25:(A) Potencial no semi-espaço. (B) Diferença de potencial no campo. Fonte: Braga (2006).

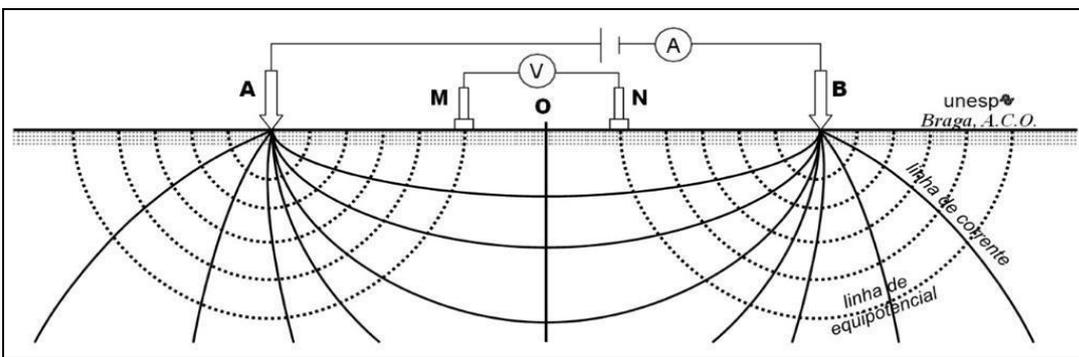


Figura 26: Configuração usual do método de Eletrorresistividade usado em campo. Fonte: Braga (2016).

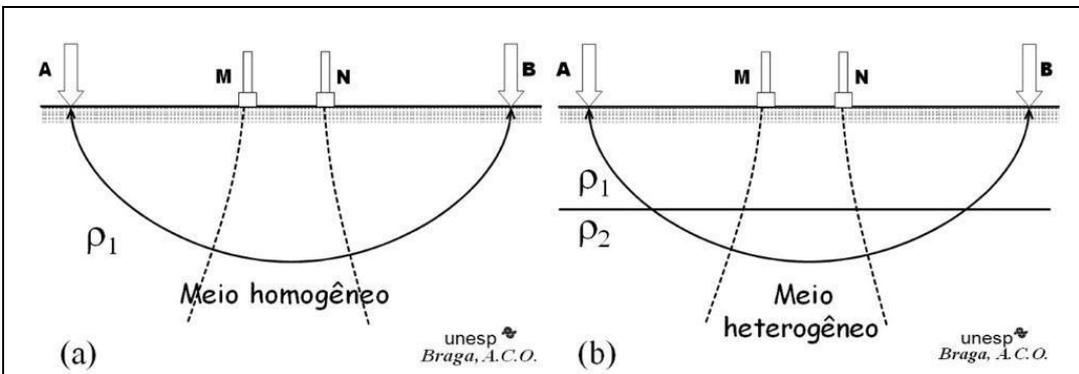


Figura 27: (A) Resistividade em meio homogêneos. (B) Resistividade em meio heterogêneo. Fonte: Braga (2006).

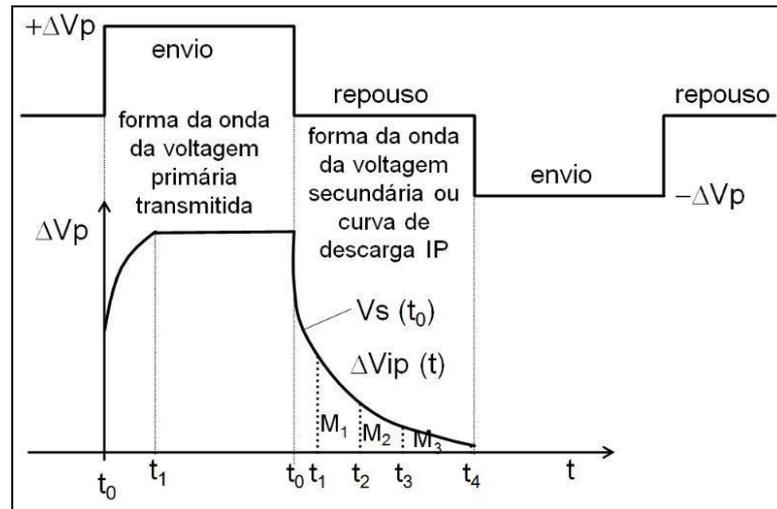


Figura 28: Curva de descarga IP no domínio do tempo. Fonte: Braga (2006).

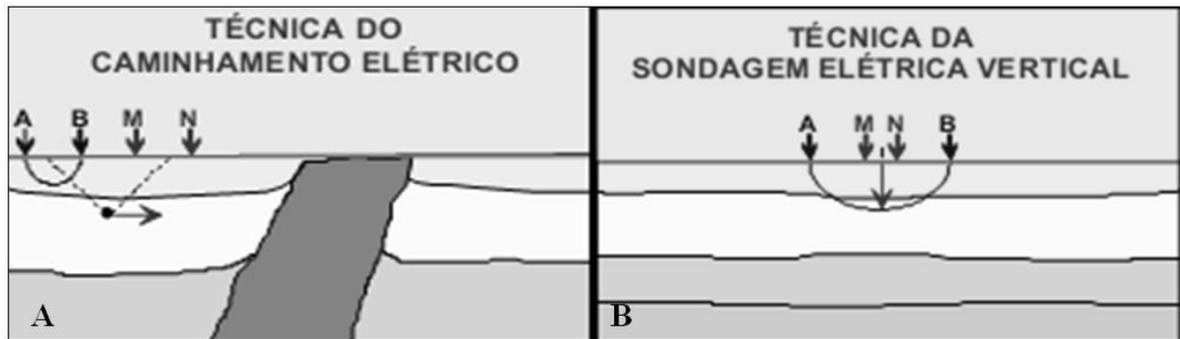


Figura 29: (A): Técnica do caminhamento elétrico. (B): Técnica da sondagem elétrica vertical. Fonte: Braga (2001).

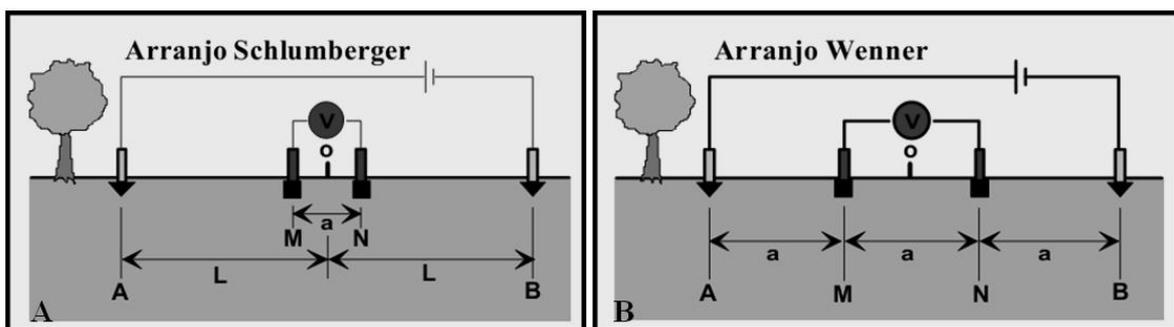


Figura 30: (A) Arranjo de campo Schlumberger. (B) Arranjo de campo Wenner. Fonte: Braga (2001).

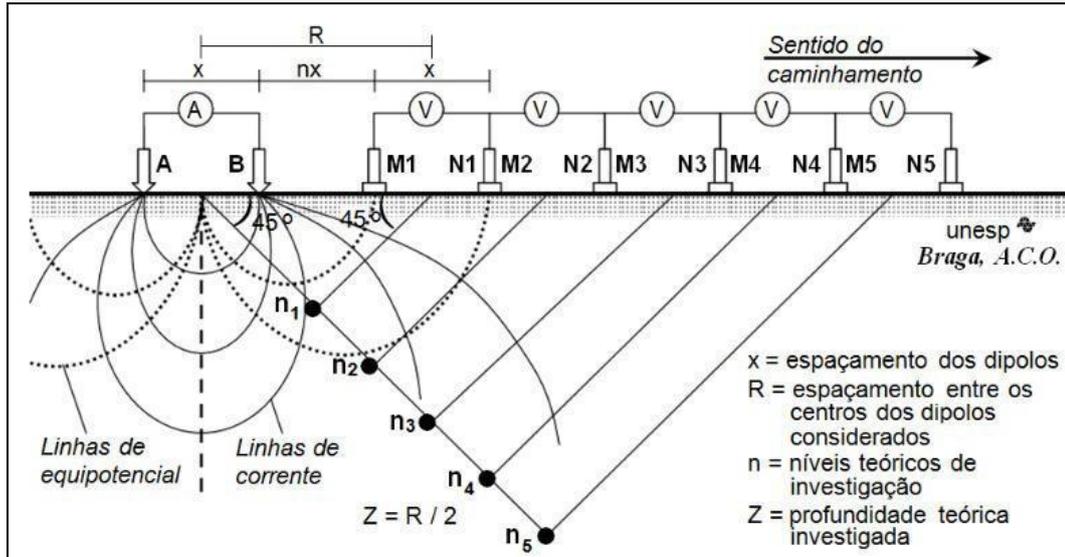


Figura 31: Arranjo de campo Dipolo-Dipolo - CE. Fonte Braga (2006).

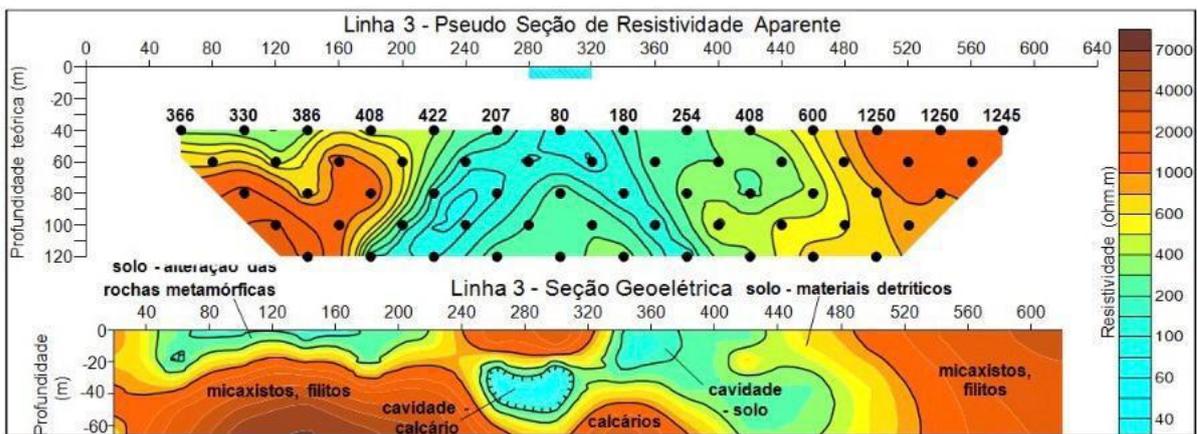


Figura 32: Interpretação do CE – Dipolo-Dipolo, com o software Res2Dinv. Fonte: Braga (2006).

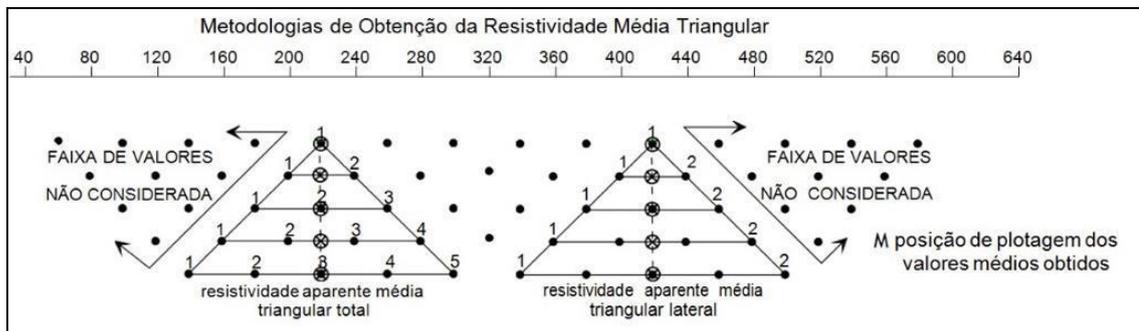


Figura 33: Sistema de plotagem pelas médias triangulares – CE/Dipolo-Dipolo. Fonte: Braga (2006).

**Tabela 6:** Diferença dos arranjos Schlumberger e Wenner. Fonte: (Braga 2006).

<b>SCHLUMBERGER</b>	<b>WENNER</b>
Mais prático no campo, é necessário o deslocamento de apenas dois eletrodos (AB).	Menos prático no campo, é necessário o deslocamento dos quatro eletrodos (AMNB).

As leituras estão menos sujeitas às interferências produzidas por ruídos indesejáveis;	As leituras estão mais sujeitas às interferências produzidas por ruídos indesejáveis;
Menos suscetível a erros interpretativos em terrenos não homogêneos.	Mais suscetível a erros interpretativos devido a heterogeneidades laterais.
	Ideal para medidas da resistividade e/ou resistência do solo para fins, por exemplo, de aterramento.

## 7. PROGRAMA RES2MOD E RES2DINV

Segundo Loke (2002), e criado por DEY & MORRISON (1979), o programa RES2MOD é gratuito e fornecido em conjunto com o RES2DINV. Nele é possível calcular a pseudo-seção teórica de resistividade aparente para um modelo de subsuperfície 2D definido pelo usuário, com o programa aceitando diversos arranjos: Schlumberger, Wenner (alfa, beta e gama), gradiente, Polo-Polo, Polo-Dipolo e Dipolo-Dipolo, dentre outros, sendo no cálculo das resistividades aparentes é possível serem utilizadas rotinas de diferenças finitas ou de elementos finitos. Onde a rotina de diferença finita é considerada mais rápida e a de elementos finitos deve ser utilizada quando for necessário aplicar correção topográfica nos dados, sendo em relação à grade de elementos finitos, formada por blocos retangulares, enquanto que mais próximo à superfície se torna mais delgado, conforme se aumenta a profundidade, torna-se mais espesso, de acordo com Gandolfo (2007).

O programa (RES2DINV, 2003) possui a rotina de inversão baseada no método dos mínimos quadrados com vínculos de suavização restringida (*smoothness-constrained least-square inversion*). Com a suavização forçada do método de quadrados mínimos dada por:

$$(J^T J + uF)d = J^T g \quad (15)$$

Onde:

$$F = f_x f_x^T + f_z f_z^T \quad (16)$$

Sendo:

$f_x$  = filtro de nivelamento horizontal

$f_z$  = filtro de planicidade verticais

$J$  = matriz das derivadas parciais

$u$  = fator de amortecimento

$d$  = vetor perturbação modelo

$g$  = vetor discrepância

Uma das maiores vantagens de se utilizar esse método é poder ajustar de acordo com diferentes tipos de dados que se quer obter, com base nos fatores de amortecimento e nivelamento dos filtros (figura 34), sendo usado para determinar a resistividade do bloco retangular por meio da resistividade aparente. Caso sejam utilizadas as matrizes pólo-pólo, dipolo-dipolo e pólo-dipolo, irá se obter respectivamente o ajuste da espessura com

aproximadamente 0.9, 0.3 e 0.6 vezes a distância entre os eletrodos, já para os arranjos Wenner e Schlumberger, a espessura da primeira camada do bloco é definida em 0.5 vezes o espaçamento do eletrodo. Outra característica desse método é que ele tenta diminuir a diferença entre a resistividade aparente e os valores calculados e medidos, através do ajuste da resistividade dos blocos do modelo.

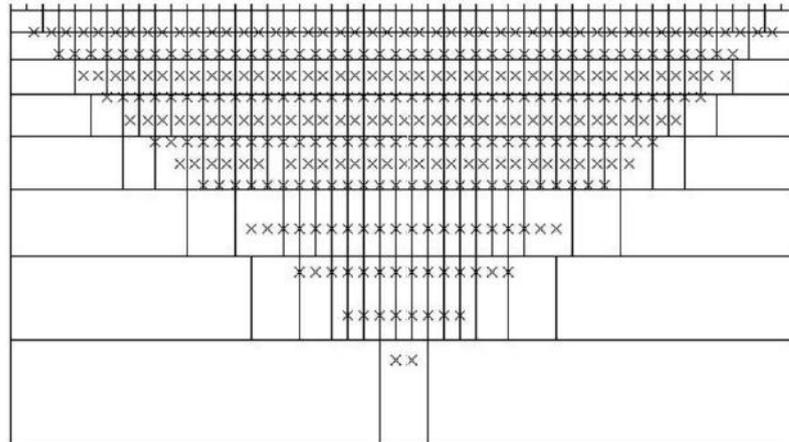


Figura 34: Esquema de arranjo de Blocos do Modelo de Resistividade Aparente. Fonte: Manual Res2Dinv.

### 7.1 Aquisição e processamento de dados (ERT)

A aquisição dos dados ERT foram realizadas através do equipamento de eletrorresistividade *Syscal kid Switch-2* com 24 eletrodos (figura 35A). Tendo como base o arranjo didopo-dipolo, com a técnica de caminhamento elétrico (figura 35B), por ser o mesmo arranjo utilizado durante a aquisição em campo. Se fez necessário delimitar o contato do embasamento com o solo compacto através da pseudo-seção obtida em campo, por não ter detectado nas seções de radargrama de GPR, e a colocação de pontos indicando saturação de água, por ter sido observados durante a aquisição em campo. A seção escolhida para criação do modelo possui aproximadamente 98 m com base na junção das seções de radargrama das linhas 1 e 2 do GPR, com espaçamento entre os eletrodos de 2 m entre eles, por ser a mesma configuração usada em campo, com o arranjo dipolo-dipolo.

A pseudo-seção teórica de resistividade aparente gerada no programa RES2DMOD, através do modelo de eletrorresistividade, é baseada nas junções das seções de radargrama (figura 20B e figura 22B) obtidas pelo mapeamento do GPR no campo com base no arranjo dipolo-dipolo, com o espaçamento de 2m entre os eletrodos, devido a seção de eletrorresistividade adquirida através da aquisição em campo, ter sido realizada entre as linhas 1 e 2 de aquisição do GPR (figura 18). Obtendo-se um parâmetro comparativo de interpretação entre a seção de simulação feita no programa RES2MOD, com a seção da aquisição de campo feita pelo programa RES2DINV, com a pseudo-seção possuindo cerca de 20m de profundidade e aproximadamente 98m de comprimento (figuras 36A e B) e os valores de resistividade baseados na resistividade das rochas e solo encontrados no local de estudo (figura 37).

Com o programa RES2DINV, foi realizado o modelo de inversão, através da suavização forçada, gerando uma pseudo-seção de resistividade aparente similar do valor obtido durante o mapeamento geofísico em campo, através do arranjo dipolo-dipolo. Durante a aquisição, foram dispostos eletrodos com espaçamento de 2m entre eles, sendo a escolha dos valores de resistividade com base nos valores médios das propriedades físicas das rochas (figura 38).



Figura 35: (A) Equipamento Syscal kid Switch-24 .Fonte: Directindustry(2022). (B) Aquisição de dados em campo.Fonte: Autora

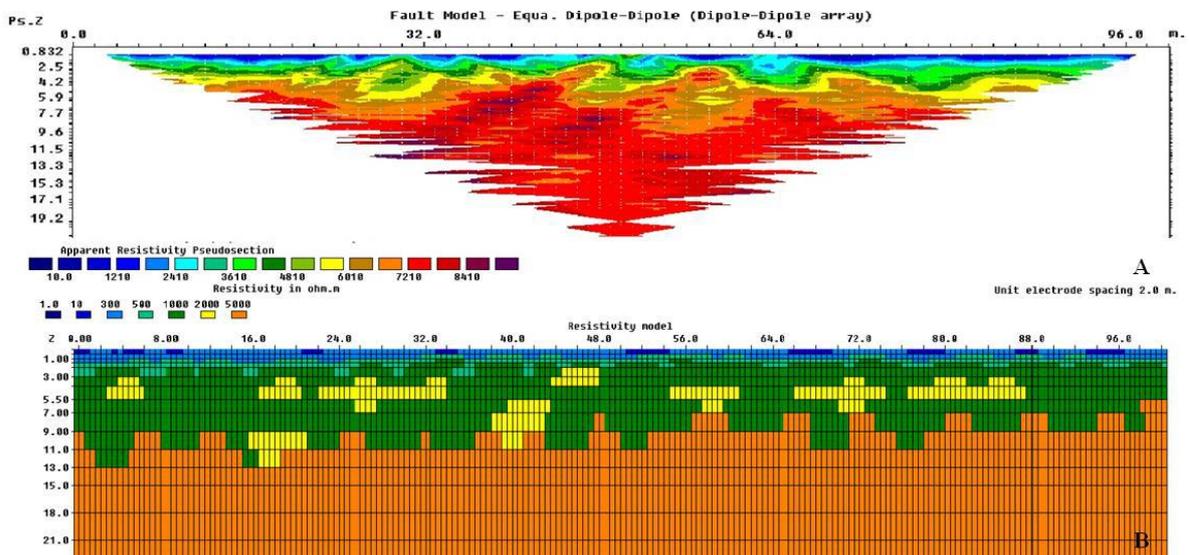


Figura 36: (A) Pseudo-seção de resistividade aparente gerada. (B) Modelo de eletrorresistividade feito no programa RES2MOD. Fonte: autora.

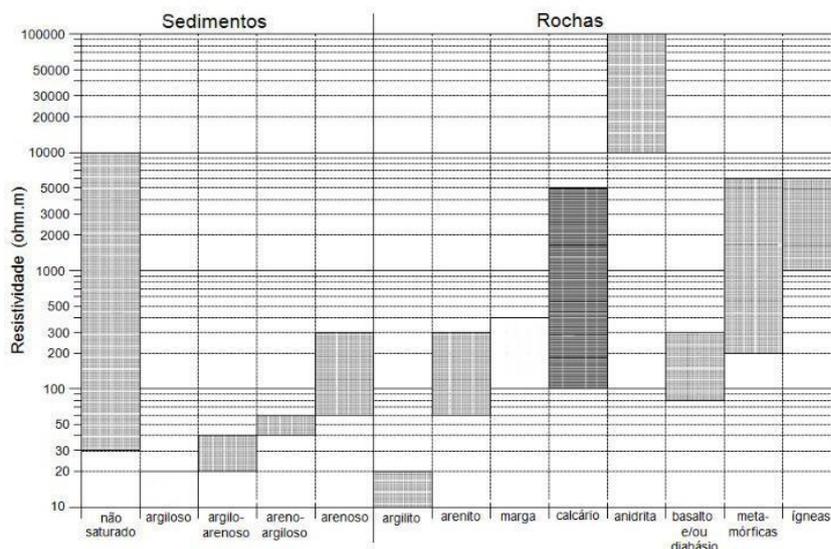


Figura 37: Variações nos valores de resistividade para materiais geológicos. Fonte: Braga ( 2006).

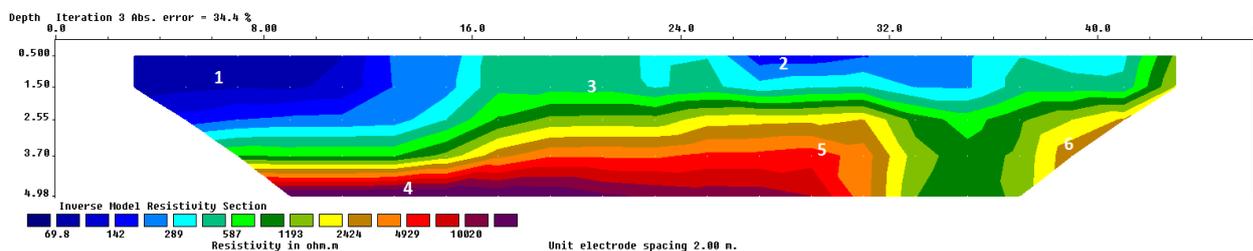


Figura 38: Seção de resistividade aparente realizada na Rua Mato Grosso. Fonte: autora.

## 8. RESULTADOS

O contato entre o embasamento e solo friável observado entre as profundidades de 7m e 13m, se deu por meio da aquisição da seção de eletrorresistividade obtida em campo, levando-se em consideração o fato de não ter sido detectado nas seções de radargrama, em profundidade de até 7m. No contato entre o solo friável e o solo compacto entre as profundidades de 1m e 2m aproximadamente, podem ser observadas profundidades similares aos da seção de eletrorresistividade com o RES2DINV, sendo respectivamente caracterizados pelos valores de resistividade de 300 Ohm-m (coloração verde água) e 500 Ohm-m (cor azul claro). Os pontos de simulação de saturação de água, com valores de resistividade variando até 100 Ohm-m (cor azul escura), indicaram percolações de água de profundidade variadas, de até 3.5m, o qual também são condicentes com os da seção obtidas com o programa RES2DINV. Já o contato entre o solo compacto e o embasamento ocorre de forma brusca com grandes variações de profundidade e comprimento, sendo na seção gerada pelo RES2DINV, o contato de forma suave, com poucas variações de profundidade. Os blocos espalhados, indicados pelas cores amarela, verde escuro, e verde claro, com valores de resistividade variando de 300 até 2.000 Ohm-m, possuem similaridade de profundidade e tamanho com os observados na seção obtida pelo RES2DINV.

A seção transversal de resistividade aparente gerada no programa RES2DINV, após o processamento de dados, indicam que um tipo litológico pode possuir uma ampla variedade nos valores de resistividade, tendo como base os valores de resistividade para sedimentos não saturados e saturados, e rochas, já conhecidos, conforme mostrados na figura 38. Assim, em solos secos, com localização acima do nível d'água, os valores de resistividades dos solos são considerados atípicos por possuírem uma ampla faixa de variação (tais como 100 a 10.000 ohm-m), os quais são constatados na seção obtida com o programa RES2DINV, pelo fato da aquisição ter sido realizada em uma altitude de 1034m.

Nas regiões 1 e 2, é possível observar áreas de baixa resistividade, indicando ser zonas de saturação, que se formaram por conta da declividade e elevação do terreno. Na região 1, uma zona de saturação mais profunda com cerca de 3.5m e 16m de extensão, devido a maior proximidade da zona de vale, sendo um ponto de escoamento da área, podendo ser a zona de vale. Na região 2, caracterizado pelo acúmulo de água da chuva, que se infiltra até cerca de 1,5m de profundidade e aproximadamente 10m de extensão, podendo ter sido causado pelo desmatamento do local, elevando os riscos de novos deslizamentos ou remobilização do solo, por ter diminuído a sua coesão, principalmente na região 1, onde a percolação de água ocorre de forma mais intensa. O contato entre o solo friável e o solo compacto ocorre entre 1 e 2,5 metros de profundidade em grande parte da seção, definido pela mudança de cor entre o azul escuro e o azul claro, o qual pode ser observado nas duas seções de GPR, aproximadamente na mesma profundidade, sendo o contato mais profundo na área 1, pela presença de drenagem

de água, estando entre 2 e 3m de profundidade. No ponto 3, é possível observar uma área de solo compacto, que delimita as áreas onde ocorre as saturações nas áreas 1 e 2, indicados pela diferença de cor azul claro para a verde água, sendo também é possível observar a variação de profundidade entre as camadas de solo compacto e friável, assim como ocorre nas seções de GPR das linhas 1 e 2. No ponto 4, se tem rochas do embasamento, devido ao altos valores de resistividade, superiores a 5.000 Ohm-m (cor vinho escuro), que se localizam em uma profundidade superior a 4.5m e uma extensão de aproximadamente 30m. Já nos pontos 5 e 6, podem ser caracterizados por blocos de diversos tamanhos, espalhados pela área com resistividade variando entre 2.500 Ohm-m e 3.000 Ohm-m (coloração amarronzada), em profundidade superior a 3m, sendo também encontrados na linha 2 da seção de GPR.

O uso do método do GPR se mostrou mais eficaz em relação à eletrorresistividade para a identificação do local exato e tamanho dos blocos espalhados pela área de estudo. Porém, através do método de eletrorresistividade, foi possível obter os locais em que ocorrem saturação de água, e a identificação da presença de blocos espalhados pelo local. Logo, para um estudo mais detalhado da estabilidade de taludes, é recomendado a utilização dos dois métodos geofísicos, por serem complementares e eficazes para o estudo ambiental.

## 9. DISCUSSÃO

A correlação dos métodos geofísicos de GPR e Eletrorresistividade aliados com estudo da geologia regional e local se mostrou uma boa estratégia para a verificação dos típicos de movimentos de massa na área de estudo, assim como a estabilidade do talude. Através da análise dos dados geofísicos aliados a estudos sobre deslizamentos na área, é possível concluir que o talude apresenta risco médio de deslizamento, devido a ocorrer pontos com mais de 8m de comprimentos com saturação de água no solo em profundidades superiores a 1m, onde se encontram o contato do solo compacto com o solo friável. Agravado pela intensificação do desmatamento do local para a construção de moradias e uso irregular do solo, tais como: concentração de lixo, entulho, e remobilização do solo, indicando que pode correr a qualquer momento um movimento de massa na área estudada, sendo necessário um estudo mais detalhado e urgente para remediar e controlar a situação do solo no local.

Uma alternativa para minimizar os riscos de deslizamentos de terra, é fazer o mapeamento geofísico de Eletrorresistividade e GPR por toda a Rua Mato Grosso, para identificar todas as áreas com passagem de drenagens, blocos soterrados e zonas de infiltração, com isso detectar os locais com uma maior probabilidade de deslizamento, para que em conjunto com os dados da Defesa Civil, sejam determinadas as áreas de alto risco, sendo possível a elaboração de planos de evacuação, assim como a criação e aplicação de técnicas para minimizar o movimento do solo. Pois, a presença de diversos blocos espalhados pelas camadas das seções de GPR e Eletrorresistividade, indica que já ocorreram diversos movimentos de massa na Rua Mato Grosso, sendo eles de média até alta energia por conta do tamanho dos blocos transportados.

Também é preciso fiscalização mais intensa a respeito da construção de moradias, por conta das crescentes construções irregulares no local, que geram desmatamento da mata que contribui para a estabilização do talude, assim como o aumento da quantidade de lixo espalhados pela rua e falta de saneamento básico, onde o esgoto das casas é jogado diretamente na rua, sem nenhum tipo de tratamento, fazendo com que ao se infiltrar no solo, também contribua para o desmatamento, contaminação e saturação.

## 10. REFERÊNCIAS

ANNAN, A. P. COSWAY, S. W. Ground penetrating radar survey desing. Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems, 1992.Vol. 2, pp. 329-352.

AUGUSTO FILHO, O."Caracterização Geológico-Geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica". In: I Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas. 1992, pp. 721-733, Rio de Janeiro.

AUGUSTO FILHO, O. Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP. São Paulo. 1994, 162p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica -Universidade de São Paulo.

BRAGA, A.C.O. Métodos Geoeletricos Aplicados. Apostila Curso de Graduação. Universidade estadual paulista - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2001.

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. Tese livre-docente. Universidade estadual paulista - Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Rio Claro, 2001.

BRAGA, A. C. D. O. (2006), Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática.

BROLLO, M. J. “Atuação do Instituto Geológico na prevenção de desastres naturais”. In: Seminário de Defesa Civil de Lins, Governo de São Paulo, São Paulo, 2010.

CANEDO, Paulo. Mitigação das Cheias: Proteção do Centro Histórico de Petrópolis. Palestra apresentada na 5ª Reunião Extraordinária do Comitê Piabanha em 22/09/2011.

CARSON, M. A.; KIRKBY, M. J. Hillslope form and process. London: Cambridge University Press 1975,475 p.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J.Landslide types and processes. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. Lanslides investigation and mitigation. Washington, DC: Transportation research board. 1996, Cap. 3, p. 36-75.

DEY, A. MORRISON, H.F (), Resistivity Modelling for Arbitrary Shaped Two-Dimensional Structures. Geophysical Prospecting. 1979, cap27,pp 1020-1036.

DIRECTINDUSTRY. Syscal kid Switch-24. Acessado em 30 de novembro de 2022. Disponível em <https://pdf.directindustry.com/pt/pdf-en/iris-instruments/syscal-kid-switch/236717-955448.html>.

DRM-RJ. Departamento de Recursos Minerais. Desastre março/13 de escorregamentos em Petrópolis, Governo do Estado do Rio de Janeiro - SEDEIS, 2013.

FOLHAPRESS. Acesso: março de 2022. Disponível em [https:// folhapress.folha.com.br/paginas/imagens/ bancoimagemens/index.shtml](https://folhapress.folha.com.br/paginas/imagens/bancodeimagens/index.shtml) .

G1. Chuva na madrugada desta segunda causa deslizamentos em Petrópolis. 20 de março de 2017. Acesso: 03/05/2017. Disponível: <https://g1.globo.com/rj/regiao-serrana/noticia/2017/02/de-slizamentos-atingem-casa-e-estrada-durante-chuva-em-petropolis.html>.

GANDOLFO, O.C.B. Um estudo do Imageamento Geométrico na Investigação Rasa. Tese Doutorado – Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, 2007.

GEORIO. Manual Técnico de Encostas. Fundação Geo-Rio, Prefeitura do Rio de Janeiro. 2014, v.1.

GONÇALVES, L.F.H. & GUERRA, A.J.T. "Movimentos de Massa na Cidade de Petrópolis (Rio de Janeiro)". In: Impactos Ambientais Urbanos no Brasil. Ed. Bertrand. 2006, v.1. p.189-251, Rio de Janeiro, Brasil.

GUERRA, Antônio Teixeira *et al.* Características geográficas e geomorfológicas da APA Petrópolis, RJ. Revista Brasileira de Geomorfologia - Ano 8, nº 1. 2007. Acesso 08/10/2021. Disponível em [http://www.ugb.org.br/home/artigos/RBG\\_8\\_1/6\\_RBG\\_F.pdf](http://www.ugb.org.br/home/artigos/RBG_8_1/6_RBG_F.pdf).

GUIDICINI, G. & NIEBLE, C.M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. Edgard Blucher/EDUSP, 1984.

GUERRA, A. J. T. & JORGE, M. C. O. Desastre na Região Serrana -Petrópolis - RJ. Lagesolos/ UFRJ, 2014.

GUERRA, Antônio Teixeira *et al.* Características geográficas e geomorfológicas da APA Petrópolis, RJ. Revista Brasileira de Geomorfologia - Ano 8, nº 1. 2007. Acesso 05/10/2021. Disponível em [http://www.ugb.org.br/home/artigos/RBG\\_8\\_1/6\\_RBG\\_F.pdf](http://www.ugb.org.br/home/artigos/RBG_8_1/6_RBG_F.pdf).

GUIDICINI, G. & NIEBLE, C.M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. Edgard Blucher/EDUSP, 1984.

HACK, Lucy Pinto, NEVES, S. & HUTTER, M.H. As mais recentes calamidades pluviiais ocorridas em Petrópolis: os episódios de 2001 e 2003. Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. Anais. Rio de Janeiro: UERJ. 11 p. 2003. Acesso 25/07/2021. Disponível em <http://geografia.igeo.uerj.br/xsbgfa>.

Highland, L.M., Bobrowsky, P. O Manual de Deslizamento: Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2008.

HUNGR, O. *et al.* A review of the classification of landslides of the flow type. Environmental & Engineering Geoscience. 2001, v. VII, n. 3, p. 221-238.

HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides. 2014, n. 11, p. 167-194.

IBGE –Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Setor Censitário. Rio de Janeiro, 2005.

ICMBIO – Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. Área de Proteção Ambiental da Região Serrana de Petrópolis. Brasília, DF, março de 2007.

Kearey P., Hill I. and Brooks M. (2002). An Introduction to Geophysical Exploration (Ed). Tj International Ltd., Padstow, Cornwall, United Kingdom, 21-122.

LAGO, A. L.; ELIS, V. R; GIACHETI, H. L. Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. Revista Brasileira Geofísica. Vol.24 no.3 São Paulo July/Sept. 2006.

LEROUEIL, S. *et al.* Geotechnical characterisation of slope movements. Proceedings of 7th International Symposium on Landslides. Trondhwim. 1996, p. 53-74.

LOKE, M. H. RES2DMOD ver. 3.01 for Windows 95/98/Me/2000 and NT – Rapid 2D Resistivity Forward Modelling Using the Finite-Difference and Finite-Element Methods. M. H. Loke Software User's Manual, 2002.

MARQUES, M. S. O estudo da estabilidade de encostas na rua Mato Grosso no Bairro de Quitandinha, Petrópolis – RJ, através do Radar de Penetração do solo (GPR). Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Geociências, Rio de Janeiro, 2016.

NAKAZAWA, V.A. & CERRI. T.E.S., Os Escorregamentos Ocorridos em Petrópolis – Rj em fevereiro de 1988: Ações Emergenciais. I Simpósio Latino Americano sobre Risco Geológico Urbano. 1990, pp 325-333, São Paulo.

NIMER, Edmon, Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 421p.

OLIVEIRA, F. L.; GUERRA, A. J. T. & GONÇALVES, L. F. H. “Análise comparativa dos dados históricos de movimentos de massa ocorridos em Petrópolis RJ, das décadas de 1960 até 1990”. In: X Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. 2003, pp. 1175 a 1180, Rio de Janeiro.

OLIVEIRA, L. C. D. E, Análise Quantitativa de Risco de Movimentos de Massa com Emprego de Estatística Bayesiana. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2004.

Orellana, E. 1974. Prospeccion geoelectrica por campos variables. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Tecnica Philips, 571 p.

PENHA, H. M *et al.* Projeto Carta Geológica do Estado do Rio de Janeiro- Convênio DRM/IG –UFRJ - Projeto Folha Petrópolis. 1979, Vol. I, Relatório Final,(Inédito).256pp.

PETRONEWS. Acesso em 07/01/2022. Disponível em [https://www.facebook.com/serratempo/about/?ref=page\\_internal](https://www.facebook.com/serratempo/about/?ref=page_internal).

PINTO, M. V. Imageamento de depósitos sedimentares análogos a reservatórios de hidrocarbonetos da Bacia do Recôncavo utilizando o GPR, Trabalho Final de graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2007.

PORSANI, J. L. (1999), Ground penetrating radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológicos-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado SP. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campos de Rio Claro – SP. 145 p.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS. Plano de contingência de proteção e defesa civil. Petrópolis, RJ, 2013.

PREFEITURA MUNICIPAL DE PETRÓPOLIS (PMP). Acesso em 23/08/2012. Disponível em :[www.pmp.rj.gov.br](http://www.pmp.rj.gov.br).

SALGADO, J. C. R. S. S. Avaliação e Modelação da Suscetibilidade d Movimentos de Vertente Superficiais Translativos em Nova Friburgo. Dissertação. Faculdade De Letras Universidade do Porto, 2013.

SESTINI, M. F., 1999. Variáveis geomorfológicas no estudo de deslizamentos em Caraguatatuba – SP utilizando imagens TM-LANDSAT e SIG. São José dos Campos: INPE. 140p.

SILVA, D. C. O. Aplicação do modelo shalstab na previsão de deslizamentos em Petrópolis. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2006.

SILVA, W. C. S. Aplicação do método da eletrorresistividade na investigação e mapeamento da contaminação por cemitérios – o exemplo do cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP /. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. 2008, P.156.

SOUZA, L. A. D.E, Geologia da Região de Itaipava-Araras (RJ), Tese de M. Sc.,Programa de Geologia/UFRJ, Rio de Janeiro, 1983.

SOUZA, M. M. Uso de Georadar (GPR) em investigações ambientais. Tese de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, PUC, Rio de Janeiro. 2005, p.120.

Telford, W. M.; Telford, W.; Geldart, L.; Sheri , R. E. e Sheri , R. E. (1990) Applied geophysics, vol. 1, Cambridge university press.

TUPINAMBÁ, M. *et al.* Geologia e Recursos Minerais da folha Nova Friburgo SF.23-Z-B-II, estado do Rio de Janeiro escala 1:100.000;organizador Luiz Carlos da Silva.Belo Horizonte: CPRM, 2012.

VARANDA, E. Mapeamento Quantitativo de risco de escorregamentos para o primeiro distrito de petropolis, RJ utilizando sistemas de informacoes geograficas. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, 2006.

VARNES, D.J. Landslide Harzard Zonation a Review of Principles and Practice. Natural Harzard, 3, UNESCO, 1984.