

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DA VULNERABILIDADE  
FÍSICA ASSOCIADA A PROCESSOS DE DESLIZAMENTOS  
DE ENCOSTAS**

**MARIA TÂMARA DE MORAES GUIMARÃES SILVA, MSc.**

**ORIENTADOR: HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ  
CARVAJAL**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIA**  
**PUBLICAÇÃO GTD – 113/15**

**BRASÍLIA / DF: 17 DE DEZEMBRO / 2015**

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

**AVALIAÇÃO QUANTITATIVA DA VULNERABILIDADE  
FÍSICA ASSOCIADA A PROCESSOS DE DESLIZAMENTOS  
DE ENCOSTAS**

**MARIA TÂMARA DE MORAES GUIMARÃES SILVA, MSc.**

**ORIENTADOR: HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ  
CARVAJAL**

**TESE DE DOUTORADO EM GEOTECNIASUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR.**

**APROVADO POR:**

\_\_\_\_\_  
**HERNÁN EDUARDO MARTÍNEZ CARVAJAL, DSc (UnB)  
(ORIENTADOR)**

\_\_\_\_\_  
**CARLOS PETRÔNIO LEITE DA SILVA, DSc (IFB)  
(COORIENTADOR)**

\_\_\_\_\_  
**ANDRÉ LUÍS BRASIL CAVALCANTE, DSc (UNB)  
(EXAMINADOR EXTERNO - SUPLENTE)**

\_\_\_\_\_  
**PAULO ROBERTO FARIAS FALCÃO, DSc (MIN. DA INTEGRAÇÃO)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

\_\_\_\_\_  
**ANDRÉ PACHECO DE ASSIS, DSc (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

\_\_\_\_\_  
**NEWTON MOREIRA DE SOUZA, DSc (UnB)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

**BRASÍLIA / DF: DEZEMBRO / 2015**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

SILVA, MARIA TÂMARA DE MORAES GUIMARÃES

Avaliação Quantitativa da Vulnerabilidade Física Associada a Processos de Deslizamentos de Encostas;

xiii, 105 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Doutora, Geotecnia, 2015)

Tese de Doutorado - Universidade de Brasília.

Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental

1. Vulnerabilidade                      2. Risco Geológico Geotécnico

3. Deslizamentos de terra

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

GUIMARÃES SILVA, M. T. M. (2015). Avaliação Quantitativa da Vulnerabilidade Física Associada a Processos de Deslizamentos de Encostas; Tese de Doutorado, Publicação G.TD - 113/15, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 105 p.

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Maria Tâmara de Moraes Guimarães Silva

TÍTULO DA TESE DE DOUTORADO: Avaliação Quantitativa da Vulnerabilidade Física Associada a Processos de Deslizamentos de Encostas.

GRAU / ANO: Doutora / 2015

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

---

Maria Tâmara de Moraes Guimarães Silva  
Av. Presidente Kennedy, nº 1932, Jardim Alexandrina.  
CEP 75096-360–Anápolis-GO – Brasil.

## DEDICATÓRIA

*Vovó Tâmara, a você que sempre foi toda carinho, cuidado e amor.  
Amo você para todo o sempre!*

## **AGRADECIMENTOS**

Para expressar a gratidão que sinto por todos os momentos vividos durante essa caminhada a palavra “obrigada” não é suficiente para agradecer aos professores, familiares e amigos que foram o meu alicerce para que eu conseguisse fechar esse ciclo.

Além disso, não poderia deixar de agradecer à Inteligência Suprema pela minha capacidade de caminhar e alcançar mais esse degrau.

Agradeço o apoio, a credibilidade, o incentivo dos meus pais, que nunca mediram esforços para que eu pudesse ir além – vocês são a minha força! Às minhas irmãs que fizeram parte dessa caminhada, agradeço o carinho e a torcida!

Ao meu amor-e aos meus filhotes, agradeço demais o suporte, o carinho, o cuidado e o apoio nos bastidores dessa jornada, vocês foram meu maior estímulo!

Agradeço a minha avó Tâmara que fez sua passagem antes da conclusão desse trabalho, mas que sempre esteve na torcida, rezando nos momentos difíceis e sendo toda amor e carinho.

Agradeço ao professor Hernán Carvajal por toda transferência de conhecimento, pelas oportunidades de crescimento acadêmico, pela atenção, pelo entusiasmo, pela motivação e por ter tornado o caminho mais leve. Na nossa primeira reunião orientador – orientanda, ele me disse “temos que ter uma boa convivência, afinal o doutorado é uma longa jornada” e agradeço por termos cumprido também esse objetivo!

Agradeço ao Programa de Pós Graduação em Geotecnia da Universidade de Brasília pelo acolhimento desde 2006, quando cheguei para o mestrado, aos ilustres professores por todo conhecimento transferido – vocês sempre serão exemplo!

Agradeço aos amigos do grupo de risco, George, Eduardo e Edilce, pelos momentos de estudo e de apoio e de descontração, – todo sucesso do mundo pra vocês!

Agradeço aos amigos irmãos que tenho, por entenderem a ausência, por me darem teto nas minhas estadias em Brasília e por dispensarem a mim um carinho e apoio especial – vocês me fazem mais feliz!

Agradeço ao Instituto Federal de Brasília e ao Instituto Federal de Goiás pelo estímulo e pela apoio para conclusão do trabalho.

Por fim, agradeço aos colegas de trabalho, aos meus alunos-e a todos que sempre estiveram na torcida!

Agradeço ao CNPq e à Pró Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação do Instituto Federal de Goiás (IFG) pelo apoio financeiro.

## RESUMO

Risco é a probabilidade e a gravidade de um evento adverso à vida, à saúde, aos bens e ao ambiente (FELL *et al.*, 2005). Quantitativamente, o risco é o produto de três variáveis: da ameaça, do potencial de perda do elemento exposto e do custo desse elemento, ou seja, o risco reflete as perdas prováveis de um ou mais elementos expostos diante da ocorrência de um evento adverso e as consequências por ele acarretadas.

Eventos de movimentação de massa, como os escorregamentos, sempre envolvem uma análise complexa de avaliações e ações de gerenciamento de risco. Uma componente fundamental dessa análise é a vulnerabilidade que trata do potencial de perdas de um elemento ou um grupo de elementos expostos ao evento adverso.

Recentes eventos de escorregamentos no Brasil, especificamente o desastre natural ocorrido em janeiro de 2011, na região serrana do Rio de Janeiro, suscitaram a abordagem desse tema. A área de estudo foi definida pelos limites do município de Nova Friburgo, onde houveram mais de 1600 deslizamentos de terra, atingindo áreas urbanas e não urbanas.

A partir do levantamento dessas ocorrências e suas propriedades geométricas, por meio de ferramentas SIG, foi desenvolvida e validada uma metodologia de quantificação da vulnerabilidade das estruturas atingidas pela massa deslizante, possibilitando a quantificação do risco com dados acessíveis ao usuário.

O desenvolvimento da metodologia se deu por meio da aplicação do método em um dos eventos ocorridos na Região Serrana do Rio de Janeiro, que atingiu várias estruturas em Nova Friburgo, o que fomentou a demonstração física matemática da equação proposta. A metodologia foi ratificada pela sua aplicação em uma área de trabalho na cordilheira Andina central, no município de Medellín, Colômbia, e ainda validada por um exercício de comparação com uma metodologia de quantificação da vulnerabilidade desenvolvida e aplicada na Coreia, apresentada por Kang *et al.* (2015).

Após a conclusão desse trabalho a metodologia se apresenta como uma ferramenta sólida e satisfatória para os casos estudados e comprova a importância da quantificação da vulnerabilidade no cálculo do risco e em sua análise, em áreas sujeitas a eventos adversos de deslizamentos de terra.

## **ABSTRACT**

Risk is the probability and the gravity of an adverse event to life, health, goods and the environment (FELL et al., 2005). In quantitative terms, risk is the product of three variables: hazard, potential loss of the exposed element and the cost of this element, which means that risk reflects probable losses of one or more exposed elements facing an adverse event, and its consequences.

Mass movement events, such as landslides, always involve a complex analysis of assessments and risk management actions. A crucial component of this analysis is the vulnerability that deals with the potential loss of an element or a group of elements exposed to the adverse event.

Recent landslide events in Brazil, specifically the natural disaster occurred in January of 2011 in the mountain region of Rio de Janeiro, generated the approach of this topic. The study area was defined by the limits of the city of Nova Friburgo, where more than 1600 landslides took place, hitting urban and nonurban areas.

After gathering these occurrences and their geometric properties, using GIS software, we developed a methodology capable of quantifying the vulnerability of the structures affected by the sliding mass, allowing the quantification of risk with accessible data to the user.

The development of the methodology was accomplished by applying the method to one of the events occurred in the mountain region of Rio de Janeiro that had affected several structures in Nova Friburgo, which supported the mathematical physics demonstration of the proposed equation. The methodology was ratified by its use in a fieldwork in the Central Andes, in the city of Medellín, Colombia, and validated by an exercise of comparison with a methodology of quantification of vulnerability developed and used in Korea, as presented by Kang et al. (2015). After the conclusion of this work, the methodology is presented as a solid and satisfactory tool to the study cases, and proves the importance of quantification of vulnerability in the calculation and analysis of risk in those areas facing adverse events and landslides.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
1.1.	OBJETIVO GERAL.....	15
1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	15
1.3.	ESCOPO DA TESE.....	15
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1.	MOVIMENTOS DE MASSA.....	17
2.2.	TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA.....	18
2.3.	FATORES QUE INTERFEREM NOS MOVIMENTOS DE MASSA.....	21
2.4.	CONCEITOS DA ANÁLISE DE RISCO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO.....	22
2.4.1.	RISCO.....	24
2.4.2.	AMEAÇA.....	26
2.4.3.	SUSCEPTIBILIDADE.....	27
2.4.4.	VULNERABILIDADE.....	27
2.5.	METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO.....	30
2.6.	METODOLOGIAS DE ANÁLISE DA VULNERABILIDADE.....	35
2.7.	SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA.....	48
2.7.1.	USO DE SIG EM ANÁLISES DE DESLIZAMENTOS.....	48
3.	METODOLOGIA.....	50
3.1.	INTRODUÇÃO.....	50
3.2.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO.....	50
3.2.1.	ÁREA DE ESTUDO.....	50
3.2.2.	BASE CARTOGRÁFICA.....	52
3.2.3.	PROGRAMAS COMPUTACIONAIS.....	53
3.3.	LEVANTAMENTO DOS DESLIZAMENTOS.....	54
3.4.	LEVANTAMENTO DAS ESTRUTURAS.....	55
3.4.1.	DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DAS ESTRUTURAS.....	55
3.5.	ESTIMATIVA DA VULNERABILIDADE.....	58
3.6.	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	68
4.	RESULTADOS.....	70
4.1.	ÁREA DE ESTUDO.....	70

4.2. LEVANTAMENTO DOS DESLIZAMENTOS.....	71
4.3. LEVANTAMENTO DAS ESTRUTURAS.....	73
4.4. ESTIMATIVA DA VULNERABILIDADE.....	77
4.5. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA.....	79
4.6. EXEMPLO DE CÁLCULO.....	81
4.7. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE.....	85
5. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA .....	95
6. CONCLUSÕES.....	98
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classificação dos Movimentos de Massa (VARNES, 1978, citado por CRUDEN e VARNES, 1996) Modificado. ....	18
Tabela 2.2 – Diferentes Conceitos de Vulnerabilidade. ....	27
Tabela 2.3 – Valores propostos para o fator de susceptibilidade para tipologia estrutural Uzieli <i>et al</i> (2008) – modificada. ....	41
Tabela 2.4 – Valores propostos para o fator de susceptibilidade para estado de manutenção Uzieli <i>et al</i> (2008). ....	41
Tabela 2.5 – Valores propostos para o fator de resistência para tipologia estrutural de resistência para tipologia estrutural Li <i>et al</i> ,(2010) – modificada. ....	45
Tabela 2.6 – Valores propostos para o fator de resistência para o número de pavimentos Li <i>et al</i> ,(2010) – modificada. ....	46
Tabela 2.7 – Valores propostos para o fator de resistência para o estado de manutenção Li <i>et al</i> ,(2010) – modificada. ....	46
Tabela 3.1 – Resistência calculada a partir dos fatores de resistência definidos para as estruturas impactadas por deslizamentos. ....	57
Tabela 3.2 - Exemplo de cálculo do parâmetro Z para as estruturas impactadas pelo deslizamento 13996. ....	60
Tabela 4.1 – Banco de dados dos deslizamentos de terra ocorridos em Nova Friburgo em Janeiro de 2011. ....	72
Tabela 4.2 – Banco de dados das estruturas impactadas em Nova Friburgo pelo evento de Janeiro de 2011. ....	73
Tabela 4.3–Resistência das estruturas segundo metodologia proposta por Li <i>et al</i> . (2010). ...	75
Tabela 4.4 – Vulnerabilidade observada das estruturas e o dano observado por meio das ferramentas. ....	76
Tabela 4.5–Vulnerabilidade calculada das estruturas. ....	77
Tabela 4.6 – Parâmetros geométricos do deslizamento 4479. ....	82
Tabela 4.7 – Parâmetros geométricos do das estruturas impactadas. ....	82
Tabela 4.8 – Dano observado e determinação dos parâmetros de resistência das estruturas impactadas. ....	84
Tabela 4.9 – Determinação da Vulnerabilidade para estruturas impactadas. ....	84
Tabela 4.10 – Cálculo da resistência das estruturas analisadas. ....	89

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Principais tipos de escorregamentos (INFANTI JR. E FORNASARI FILHO, 1998) .....	20
Figura 2.2 – Componentes do Risco. (ALHEIROS, 1999 adaptado de HAYS, 1991) .....	25
Figura 2.3 – Classificação de risco (Cerri e Amaral 1998, Modificado).....	26
Figura 2.4 – Contornos de análise dos fluxos de detritos sobrepostos em fotografias aéreas .	34
Figura 2.5 – levantamento dos danos sofridos pelas estruturas (Kang <i>et al.</i> 2015, Modificado). .....	34
Figura 2.6 – Curvas de vulnerabilidade ao evento de fluxo de detritos (Kang <i>et al.</i> 2015, Modificado). .....	35
Figura 2.7 – Modelo de avaliação da vulnerabilidade. (FERNÁNDEZ, 2009). .....	38
Figura 2.8 – Relação entre susceptibilidade de estruturas ( $S_{STR}$ ) e susceptibilidade de pessoas ( $S_{PST}$ ) (Uzielli <i>et al.</i> (2008)). .....	42
Figura 2.9 – Relação entre profundidade de fundação $D_{fod}$ e fator de resistência $\xi_{fd}$ .....	47
Figura 2.10 – a) Tendência de vulnerabilidade pelo quociente de intensidade e resistência. (b) Vulnerabilidade para valores de resistência fixos. ....	47
Figura 2.11–Relação entre vulnerabilidade das estruturas e vulnerabilidade das pessoas no interior das estruturas - modificado Li <i>et al.</i> (2010). .....	48
Figura 3.1 – Destaque da área de estudo na carta geológica da região serrana do Rio de Janeiro. (Modificada - DRM-RJ, 1982). .....	51
Figura 3.2 – Imagem ilustrativa de um plano de informação no programa computacional Spring 5.2.4. ....	53
Figura 3.3 – Deslizamentos Urbanos em Nova Friburgo.....	54
Figura 3.4 – Exemplo de alguns deslizamentos urbanos em Nova Friburgo - detalhe.Determinação da Intensidade da Ameaça .....	55
Figura 3.5 – Estrutura 3523 visualizada a partir do <i>Google Earth</i> . (a) Visualização anterior ao evento de deslizamentos; (b) Visualização pósevento de deslizamentos. ....	56
Figura 3.6 –Estrutura 3523 visualizada a partir do <i>Google Street View</i> –lateral direita.....	56
Figura 3.7 –Estrutura 3523 visualizada a partir do <i>Google Street View</i> – frontal e lateral esquerda. ....	57
Figura 3.8 – Exemplo de obtenção da distância entre as estruturas e o ponto de partida da massa deslizante. ....	59
Figura 3.9 – Diagrama esquemático para a função $V=f(T)$ . ....	62

Figura 3.10 – Ajuste para o coeficiente $\delta$ .....	65
Figura 3.11 – Análise do efeito do coeficiente $\delta$ na determinação da vulnerabilidade.....	67
Figura 3.12 – Superfície de Vulnerabilidade considerando a função T e o coeficiente $\delta$ . ....	68
Figura 4.1 – Município de Nova Friburgo após o evento de deslizamento de terra e após a realização do inventário de deslizamentos representados em linhas vermelhas. ....	71
Figura 4.2 – Relação entre Vulnerabilidade calculada e Intensidade em função da Resistência para estruturas com vulnerabilidades observadas diferentes de 1. ....	78
Figura 4.3 – Vulnerabilidade em função da intensidade para valores de resistência fixos.....	79
Figura 4.4 – Relação entre Vulnerabilidade calculada e Intensidade em função da Resistência para todas as estruturas.....	79
Figura 4.5 – Relação entre valores teóricos e valores reais da relação V x I para as estruturas estudadas. ....	80
Figura 4.6 – Relação entre novos valores teóricos e valores reais da relação V x T para as estruturas estudadas. ....	81
Figura 4.7 – Identificação dos elementos – deslizamentos e estruturas afetadas – para análise. ....	81
Figura 4.8 – Cadastro do deslizamento e das estruturas afetadas no programa computacional <i>ArcGis 10</i> .....	82
Figura 4.9 – Análise dos parâmetros de resistência das estruturas afetadas pelo deslizamento 4479 por meio da <i>Google Street View</i> . ....	84
Figura 4.10 – Localização da área de aplicação da metodologia de quantificação da vulnerabilidade. (Siga Ingeniería y Consultoría S.A., 2015) .....	86
Figura 4.11 - Mapa de probabilidade de falha da bacia hidrográfica analisada.....	86
Figura 4.12–Microbacia de aplicação da metodologia e identificação dos pontos críticos. ....	87
Figura 4.13–Pontos críticos definidos para a área estudada.....	87
Figura 4.14–Estruturas georreferenciadas na área de aplicação da metodologia. ....	88
Figura 4.15–Estruturas cadastradas na área de aplicação da metodologia.....	89
Figura 4.16–Variável $d$ em formato raster. ....	90
Figura 4.17–Variável $H$ em formato raster. ....	91
Figura 4.18–Gradiente Modificado $Z$ em formato raster. ....	92
Figura 4.19–Mapa de Vulnerabilidade das Estruturas.....	93
Figura 4.20–Mapa de Vulnerabilidade máxima para as Estruturas. ....	93
Figura 4.21–Mapa de Risco estrutural máxima para as Estruturas. ....	95

Figura 5.1–Deslizamento analisados apresentados por Kang <i>et al.</i> (2015) - Modificado. ....	95
Figura 5.2 – Deslizamento analisados apresentados por Kang <i>et al.</i> (2015) – Modificado.....	96

## 1. INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa estão dentro do grupo de desastres naturais relacionados com a geomorfologia, o grau de intemperismo, processos erosivos e o grau de adensamento do solo. Dentre os tipos de movimentos de massa, os deslizamentos de terra, outra denominação para os escorregamentos, são causados pelo escorregamento de materiais sólidos, geralmente composto por solo e vegetação, ao longo de terrenos inclinados. Esses movimentos de massa estão intimamente ligados a infiltração de água e a saturação do solo das encostas, o que acarreta em uma redução da sua estabilidade (CASTRO, 2003).

Tominaga (2007) reforça que além das características dos movimentos de massa ligadas a geologia, geomorfologia, aspectos climáticos e hidrológicos, a ação do homem, com relação às formas de uso e ocupação do solo, é um importante fator que contribui para ocorrência de escorregamentos.

A presença de edificações expostas a eventos adversos de deslizamentos de terra nas áreas urbanas e periurbanas é comum. A vulnerabilidade dessas estruturas vem sendo abordada pela literatura de forma predominantemente qualitativa. No entanto, essa é uma variável relevante para a análise eficaz do risco, dependendo de um estudo complexo sobre a ameaça, que aborde: estudo dos elementos deflagadores (chuvas, tremores, ação antrópica), identificação de superfícies de ruptura, características geológicas geotécnicas, e ainda da análise da vulnerabilidade dos elementos expostos àquela ameaça.

A abordagem qualitativa da vulnerabilidade é geralmente uma conceituação da intensidade da ameaça ou das consequências sofridas por pessoas ou estruturas. Essa avaliação se dá a partir de informações pré-determinadas associadas a álgebra booleana que forneçam subsídios para a determinação dos conceitos ligados a vulnerabilidade, geralmente classificados como alto, médio ou baixo.

Uzielli *et al.* (2008) propõe uma metodologia de estimação quantitativa da vulnerabilidade física baseada em um cenário específico. O método consiste na parcialização da abordagem probabilística para estimação da vulnerabilidade regional (UZIELLI *et al.*, 2008) o qual proporcione um sistema de quantificação de incertezas na estimação da vulnerabilidade a partir da intensidade do deslizamento de terra e ainda a “susceptibilidade” dos elementos vulneráveis, como estruturas e pessoas.

Outro modelo quantitativo da vulnerabilidade das estruturas expostas a eventos de deslizamentos de terra e também vulnerabilidade das pessoas neste mesmo cenário é atribuído à Li *et al.* (2010), que utiliza como base a intensidade do deslizamento de terra e a resistência

dos elementos expostos, para o caso das estruturas, além de dados como idade e de danos sofridos por pessoas em eventos anteriores.

Este trabalho propõe uma metodologia de quantificação da vulnerabilidade de edificações expostas a eventos adversos de deslizamento de terra. Esta foi desenvolvida a partir de variáveis geométricas simples que relacionam altura do deslizamento com a distância percorrida pela massa deslizante, objetivando alcançar, satisfatoriamente, uma análise prévia do risco. O trabalho apresenta também uma validação da metodologia proposta através da comparação com um modelo existente e ainda uma aplicação do método em uma área de encostas de Medellín, na Colômbia.

### **1.1. OBJETIVO GERAL**

Esta pesquisa propõe uma metodologia para quantificação da vulnerabilidade em eventos de deslizamentos de terra.

### **1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Dentre os objetivos específicos pretendidos por esta pesquisa estão:

- Atualização do inventário de escorregamentos no município de Nova Friburgo, RJ;
- Estudo da relação entre a vulnerabilidade e a intensidade dos eventos de escorregamento de terra em Nova Friburgo, RJ;
- Validação da metodologia proposta para estruturas que sofreram danos parciais e totais;
- Aplicação do método proposto na pesquisa em uma área diferente da região de desenvolvimento da metodologia;
- Ressaltar a importância do estudo da vulnerabilidade, que envolve características da ameaça e dos elementos expostos.

### **1.3. ESCOPO DA TESE**

Esta tese está estruturada em cinco capítulos:

- Capítulo 1 – Introdução

Este capítulo apresenta o panorama do desenvolvimento da tese, justificando a realização desta pesquisa, bem como a apresentação dos objetivos gerais e específicos.

- Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica

Este capítulo apresenta uma revisão da literatura, buscando introduzir os conceitos básicos necessários ao desenvolvimento e entendimento da tese. Os assuntos abordados são: os movimentos de massa e os fatores que interferem nestes processos, estudo sobre risco geológico geotécnico, suas avaliações e metodologias de análise de riscos, estudo sobre a vulnerabilidade e os métodos de obtenção desse parâmetro, e ainda, uma abordagem sobre o uso de ferramentas SIG neste contexto.

- Capítulo 3 – Metodologia

As principais características da região estudada, bem como a apresentação dos insumos necessários para o desenvolvimento da metodologia proposta na tese e sua obtenção e desenvolvimento.

- Capítulo 4 – Resultados

Este capítulo apresenta os resultados dos estudos, dos levantamentos realizados, das análises da quantificação da vulnerabilidade, e ainda, a discussão dos principais resultados obtidos. E também, apresenta a validação da metodologia e mostra um exemplo de cálculo da vulnerabilidade utilizando a metodologia proposta e sua aplicação em uma área de provável ocorrência de eventos adversos.

- Capítulo 5 – Conclusões

As principais conclusões do desenvolvimento e aplicação da metodologia nos estudos realizados neste trabalho, além de sugestões para estudos futuros.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1. MOVIMENTOS DE MASSA**

Os movimentos de massa estão dentro do grupo de desastres naturais relacionados à geomorfologia, ao grau de intemperismo, a processos erosivos e ao grau de adensamento do solo. São fenômenos provocados por escorregamentos de materiais sólidos, como solo, blocos de rocha e vegetação em encostas, pendentes ou escarpas. Tem como característica os movimentos gravitacionais rápidos, deflagrados no momento em que a força gravitacional vence o atrito interno entre partículas, e apresenta superfície de ruptura bem definida pelos limites laterais e pela profundidade (CASTRO, 2003).

Os movimentos gravitacionais de massa são definidos como movimentos induzidos pela atuação da força gravitacional, como exemplos temos: os escorregamentos ou deslizamentos de encostas, as corridas de massa, os rastejos e quedas, os tombamentos ou rolamentos de matacões ou blocos de rocha. Os movimentos de massa possuem contribuições por meio de agentes de transporte – ação da água, do vento, do gelo, entre outros – nos processos de transporte de massa, acontecem pela redução da resistência dos materiais da superfície, induzindo o comportamento plástico e fluido dos solos.

Tominaga (2009) afirma que esses processos de instabilidade são comuns na região tropical úmida brasileira, com destaque para as regiões montanhosas e serranas, onde a sua ocorrência está ligada à chuvas intensas, que são corriqueiras nos meses de verão (outubro a março).

Tominaga (2007) ainda afirma que os movimentos de massa constituem um processo natural de evolução geomorfológica em regiões serranas e montanhosas. Porém, o rápido e desordenado crescimento urbano em áreas desfavoráveis a ocupação humana, sem o devido planejamento do uso do solo, aliado à adoção de técnicas inadequadas de estabilização de encostas, estão disseminando a ocorrência de acidentes, que podem chegar a proporções de desastres naturais.

Geralmente os escorregamentos ocorrem quando a resistência ao cisalhamento do material decresce em relação a tensão de cisalhamento potencial na superfície, diminuindo o fator de segurança da região até o valor unitário, quando o escorregamento acontece. Essa redução da resistência ao cisalhamento é gradativa e gera uma deformação progressiva na massa de material acima da superfície potencial de escorregamento. A velocidade inicial do escorregamento é acelerada, e à medida que o evento ocorre, ela vai diminuindo, até que a massa deslizante se estabilize (GUIDICINI & NIEBLE, 1984).

## 2.2. TIPOS DE MOVIMENTOS DE MASSA

Naturalmente, existem vários tipos de movimentos gravitacionais de massa, envolvendo diversos materiais e processos de fatores condicionantes. O critério mais comum na utilização da classificação dos movimentos é a determinação de suas características, como: tipo do material, velocidade e mecanismo do movimento, modo de deformação, geometria da massa movimentada e quantidade de água. Os métodos mais aceitos na literatura internacional são os de Hutchinson (1968), de Varnes (1978), de Sassa (1989), (citado por CRUDEN E VARNES, 1996 por NOGUEIRA, 2000). No Brasil, destacam-se os trabalhos de Freire (1965), Guidicini & Nieble (1984) e do IPT (1991).

A classificação dos movimentos de massa desenvolvida por Varnes (1978) é adotada pela classificação da IAEG – *International Association of Engineering Geology*. O autor propõe que se leve em conta o tipo de movimento e o tipo de material transportado. Os materiais classificados por esse método são: rocha (*rock*), solos (*earth*) e detritos (*debris*). Já os movimentos de massa classificam-se em quedas (*falls*), tombamentos (*topples*), escorregamentos (*slides*), espalhamentos (*spreads*), corridas e escoamentos (*flows*), possuindo ainda uma subclassificação de acordo com a velocidade e quantidade de água dos materiais envolvidos (CRUDEN & VARNES, 1996).

A Tabela 2.1 a seguir mostra como são classificados os movimentos de massa propostos por Varnes (1978) de acordo com Cruden e Varnes (1996).

**Tabela 2.1 - Classificação dos Movimentos de Massa (VARNES, 1978, citado por CRUDEN e VARNES, 1996) Modificado.**

Tipo de Movimento	Tipo de Material		
	Rocha	Predominância Solos Grossos	Predominância Solos Finos
Queda ( <i>Fall</i> )	Queda de Rocha	Queda de Detritos ( <i>debris</i> )	Queda de Solo
Tombamento ( <i>topple</i> )	Tombamento de Rocha	Tombamento de Detritos ( <i>debris</i> )	Tombamento de Solo
Escorregamento ( <i>slide</i> )	Escorregamento em Rocha	Escorregamento de Detritos ( <i>debris</i> )	Escorregamento em Solo
Espalhamento ( <i>spread</i> )	Espalhamento de Rocha	Espalhamento de Detritos ( <i>debris</i> )	Espalhamento de Solo
Corrida/Escoamento ( <i>flow</i> )	Corrida de Rocha	Corrida de Detritos ( <i>debris</i> )	Corrida de lama

A classificação adotada por Ceped (2011) agrupa os eventos de movimentos de massa nos grupos: escorregamentos ou deslizamentos, corridas de massa, quedas e rastejos, tombamentos e/ou rolamentos de matacões e blocos de rocha.

No Brasil, acidentes naturais originados por escorregamentos são comuns. Dados do EM-DAT (2011) – *Emergency Events Database* - registram a ocorrência de 23 desastres desde 1990, causados por escorregamentos, sendo esta a segunda maior causa de desastres no país. Cabe destacar que os números considerados no banco de dados EM-DAT são de desastres de grande severidade, causadores de dezenas de mortos e centenas de desabrigados, levando os estados e países a buscarem auxílio externo. Assim fenômenos de menor gravidade não são registrados pelo EM-DAT, concluindo-se que o número de desastres ocorridos por escorregamentos no Brasil é bem maior do que o número contabilizado.

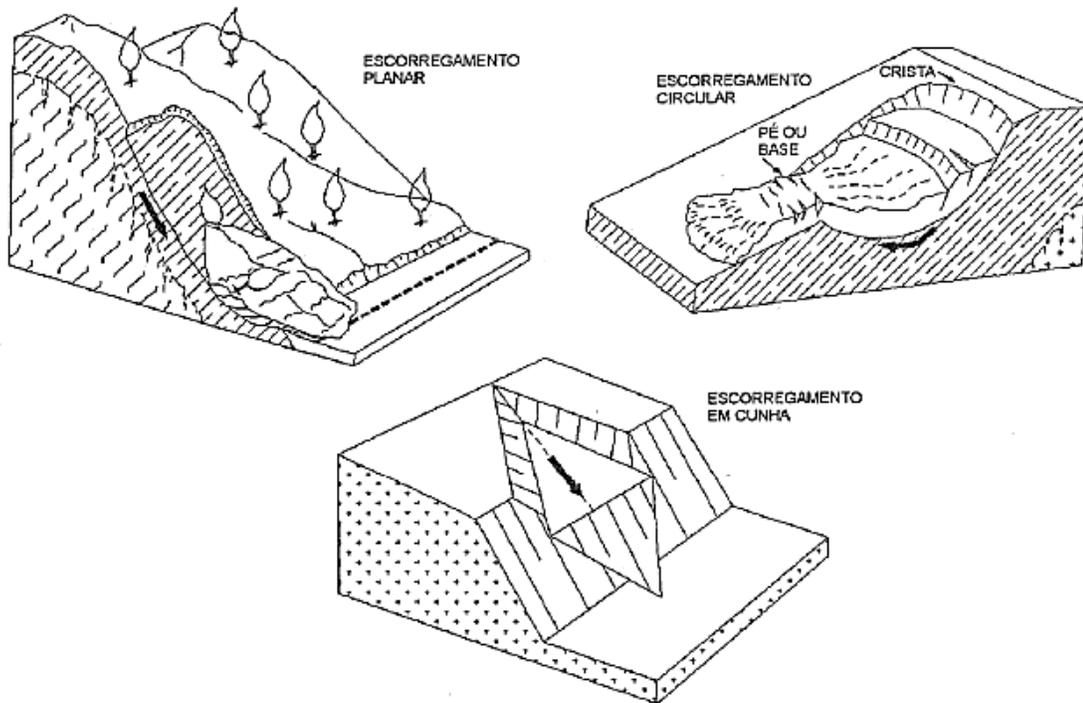
No Estado do Rio de Janeiro, os desastres relacionados a movimentos de massa se concentram na mesorregião do estado, incluindo a capital e região serrana, estando ligados a geologia e a geomorfologia das altas encostas com grandes declividades associadas a fatores condicionantes tal qual elevada pluviosidade, processos erosivos e ação antrópica – construção de edificações na encosta, cortes de taludes, vazamentos de água e esgoto, retirada da vegetação, acúmulo de lixo (CEPED, 2011).

Essa crescente ocorrência de eventos de escorregamentos fez surgir a necessidade de desenvolver uma classificação própria, principalmente regionalizada, como a proposta por Freire (1965) e a de Guidicini & Nieble (1976), que consideram as características locais de onde os estudos de análise e controle de escorregamentos foram realizados.

De acordo com Augusto Filho (1994), as classificações de movimentos de massa são combinações dos critérios:

- Cinemática do Movimento – velocidade, direção e sequência dos deslocamentos em relação ao terreno estável;
- Geometria – tamanho e forma das massas movimentantes;
- Tipo de material – rocha, solos, rochas e solos, depósitos, detritos, estrutura, textura, quantidade de água;

Considerando a geometria e a natureza da massa movimentante, os escorregamentos podem ser classificados em três categorias: escorregamentos translacionais ou planares, escorregamentos rotacionais ou circulares e escorregamentos em cunha, como mostra a Figura 2.1.



**Figura 2.1 – Principais tipos de escorregamentos (INFANTI JR. E FORNASARI FILHO, 1998)**

Segundo Infanti Jr. & Fornasari Filho (1998), os escorregamentos em cunha são característicos de saprólitos e maciços rochosos, onde a interação entre duas estruturas planas instáveis condiciona o deslocamento de uma cunha ao longo do eixo de intersecção entre estes planos. São comuns em taludes de corte e desconfinamentos de encostas pela ação natural ou antrópica. Os escorregamentos circulares ou rotacionais ocorrem geralmente em taludes com uma inclinação acentuada e são caracterizados por um movimento rotacional do maciço de solo formando uma superfície de ruptura curva.

Os escorregamentos translacionais ou planares em solos são os mais frequentes entre todos os tipos de movimentação de massa. Esses ocorrem entre superfícies planas existentes, anteriormente condicionadas a alguma feição estrutural do substrato, como por exemplo o próprio contato entre os diferentes horizontes de alteração (Wolle, 1988).

Considerando o tipo de material envolvido no escorregamento e as classificações de Freire (1965) e de Vargas (1966), os escorregamentos planares ou translacionais são subclassificados, por Guidicini & Nieble (1984), em escorregamentos translacionais de rocha, de solo e de solo e rocha.

Escorregamentos translacionais de rocha são movimentos dos maciços rochosos ao longo de descontinuidades ou planos de fraqueza preexistentes. Podem ocorrer deslocamentos de blocos isolados ou até movimentações de massa de grandes proporções em vertentes montanhosas.

Escorregamentos translacionais de solos ocorrem ao longo de uma superfície plana sob a condição da feição estrutural do substrato. A espessura de material mobilizado é função da natureza das rochas, do clima, da drenagem e da declividade. Geralmente, esse evento é de curta duração e velocidade acelerada, o que culmina num grande poder de destruição. Quando os escorregamentos translacionais estão associados a uma maior quantidade de água, esse movimento pode passar a ser uma corrida.

Nos escorregamentos translacionais de rocha e solos o volume da massa transportada possui uma quantidade relevante de rocha, caracterizado principalmente por ter origem com efeito gravitacional (TOMINAGA, 2007).

Os movimentos translacionais se dão, em sua maioria, em períodos de chuvas intensas. É comum que a superfície de ruptura seja coincidente com a região entre as camadas solo-rocha, a qual possui uma descontinuidade mecânica e hidrológica (Fernandes & Amaral, 1996).

### **2.3. FATORES QUE INTERFEREM NOS MOVIMENTOS DE MASSA**

Os fatores que contribuem para o desencadeamento dos processos de movimentos de massa são principalmente os elementos do meio físico e secundariamente os elementos do meio biótico. Estes elementos fazem parte da dinâmica dos processos naturais (WOLLE, 1988). Guidicini & Nieble (1984) denominam esses elementos como agentes predisponentes, embora a ação do homem seja um fator de grande relevância que favoreça a ocorrência desses processos ou que minimize seus efeitos.

Varnes (1984) afirma que as causas básicas de instabilidade de taludes e encostas, incluindo os processos de escorregamentos, são conhecidas há muito tempo, devido aos estudos realizados a partir de instabilidades específicas. Essa ocorrência podem se dar devido ao tipo de rocha ou solo, pela estrutura e composição dos materiais envolvidos, pela acentuada inclinação das vertentes naturais, pelas variações dos níveis de água subterrânea, por vibrações sísmicas, ou ainda por outros fatores impostos por novos eventos, como atividades construtivas.

Os efeitos causados por esses fatores já conhecidos podem ser determinados, avaliados, mapeados e ainda correlacionados com eventos semelhantes, atuais ou anteriores. O objetivo é entender os mecanismos dos escorregamentos, suas causas, saber reconhecer quando e onde o risco é eminente, possibilitando assim a predição do risco pela extensão da informação local ou pontual para áreas maiores.

Os aspectos geológicos que interferem nas dinâmicas de movimentos de massa são: a composição mineralógica ou físico química das litologias existentes, as propriedades mecânicas e as estruturas geológicas.

Os aspectos climáticos também se mostram como condicionante dos movimentos de massa, principalmente na região tropical úmida do Brasil, onde já existe um conhecimento das ocorrências de escorregamentos relacionados ao período de chuvas intensas. A presença de vegetação, de modo geral, reduz a intensidade dos agentes do clima nas vertentes naturais, colaborando para a estabilidade dessas vertentes não somente em relação a escorregamentos, mas também em relação a movimentos de rastejo e à área afetada, diminuindo os prejuízos a terrenos a jusante.

Por outro lado, Gray & Leiser (1982) afirma que a vegetação também pode ser desfavorável a estabilidade das vertentes naturais quando os troncos das árvores provocam efeitos alavanca, que são absorvidos no terreno como uma força cisalhante.

A ação do homem na modificação do relevo e, por consequência, na estabilidade das vertentes, se apresenta como uma condicionante de maior relevância para a ocorrência de processos de movimentação de massas tratada por diversos autores, tais como, Varnes (1978), Wolle (1980), Augusto Filho & Virgili (1998), entre outros.

A ocupação desordenada das encostas nas regiões de serra do Brasil tem provocado diversos acidentes. Fernandes & Amaral (1996) afirmam que as grandes cidades brasileiras estão convivendo com uma grande incidência de escorregamentos, causados por cortes para construção de moradias, vias de acesso, desmatamentos, atividades de mineração, lançamento de águas servidas e de lixos, gerando grandes prejuízos. Augusto Filho & Virgili (1998) aponta como consequências da ação antrópica na ocupação das vertentes: a remoção da cobertura vegetal, a presença de fossas e o vazamento na rede de abastecimento e de esgoto; lançamento de águas servidas, execução de cortes com geometria inadequada, execução ineficiente de aterros, lançamento de lixo e entulho, vibrações produzidas por tráfego e construções etc.

## **2.4. CONCEITOS DA ANÁLISE DE RISCO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO**

Os eventos geológicos geotécnicos são ocorrências contínuas naturais, resultantes dos processos exógenos ou endógenos que modificam o ambiente geológico com uma determinada magnitude, durante um período, em uma área específica, com o objetivo de equilibrar o sistema terrestre.

Acidentes e desastres naturais são eventos causadores de catástrofes que envolvem perdas de vidas e materiais. Esses eventos são causados por fenômenos da natureza ou pelas intervenções do homem, e o seu estudo permite o entendimento do desenrolar dos processos envolvidos, a avaliação das perdas materiais e humanas e ainda reconhecer as fragilidades dos sistemas envolvidos.

Existem diversos conceitos que abrangem termos ligados ao risco geológico geotécnico. Varnes (1984) propôs definições claras para os diferentes significados de risco, definindo risco específico, *hazard* (ameaça) e vulnerabilidade, na tentativa de uniformizar a terminologia abordada a estudos das áreas de engenharia civil.

No Brasil, foi proposto uma normatização nacional dos termos, conceitos e nomenclaturas associados ao risco por Augusto Filho *et al.* (1990), que ainda passou por diversos debates para serem consolidadas.

Com a necessidade de uma formulação clara de diretrizes para o desenvolvimento da análise e gerenciamento de risco e conseqüente uniformização das nomenclaturas e fixação conceitos, Fell *et al.* (2008) propõem em conjunto com as associações a AGS (*Austrian Geophysical Society*), ISSMGE (*International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*), ISRM (*International Society for Rock Mechanics*), IAEG (*International Association for Engineering Geology and the Environment*), no *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes 1 (JTC1)*, orientações, que foram estabelecidas nos seguintes termos:

- Definições e terminologia para uso internacional;
- Descrições dos tipos e níveis de zoneamento dos deslizamentos de terra;
- Orientações sobre o zoneamento dos locais de deslizamento de terra e planejamento do seu uso caso haja necessidade de enfrentamento de um evento de deslizamento de terra;
- Definições de níveis de zoneamento e escalas sugeridas para o zoneamento e mapas, tendo considerando as necessidades e objetivos do planejamento do uso e ocupação e dos reguladores, e a finalidade do zoneamento;
- Orientações sobre a confiabilidade, validade e limitações dos métodos;
- Aconselhamento sobre as qualificações dos parâmetros.

Fell *et al.*, (2008) ainda sugere que a padronização dos conceitos adotados seja baseada naquela recomendada pelo *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes 32 (JTC32)* de 2004, e deve ser usada para todos os zoneamentos, relatórios técnicos, documentos de ordenamento territorial, estudos de viabilidade econômica e estudos afins.

### 2.4.1. RISCO

O conceito de risco também vem sofrendo alterações ao longo do tempo, com grande diversidade de conceitos e termos ainda em consolidação. Varnes (1984) conceitua risco como o número esperado de vítimas perdidas, pessoas feridas, danos a propriedades, interrupção de atividade econômica, devido a um evento adverso, em uma área e em um período de referência. Augusto Filho *et al.* (1990) afirma que risco é a medida da possibilidade ou probabilidade de ocorrência de algum dano a uma comunidade ou a um segmento dela. É uma condição potencial de ocorrência de um evento adverso.

Para Zuquette (1993) define risco como a probabilidade de que ocorram perdas (econômicas, sociais e ambientais), além do valor considerado normal ou aceitável para um lugar específico, durante um período de tempo determinado. É considerado o resultado da relação entre uma ameaça e a vulnerabilidade dos elementos expostos (seres humanos, residências, entre outros). Já AGS (2007) afirma que risco é uma medida da probabilidade e a gravidade de um evento adverso à saúde, e ao ambiente. Risco é frequentemente estimado pelo produto da probabilidade de ocorrência e as consequências.

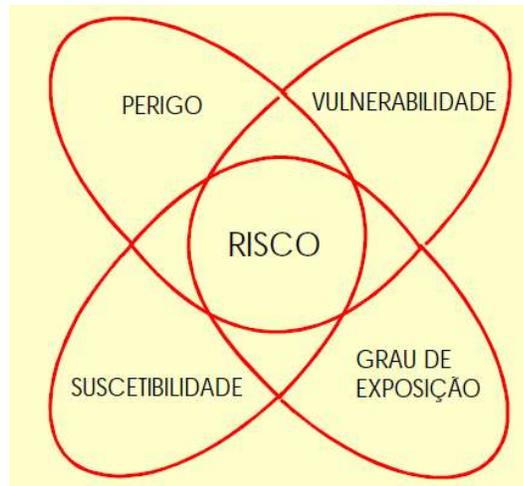
Segundo a ABNT (2009) risco é o efeito da incerteza nos objetivos.

Apesar de ter sido aprofundada a importância e o papel da quantificação de risco e da vulnerabilidade na primeira década do século XXI, os estudos acadêmicos realizados com esse tema de risco associados a deslizamentos de terra, em sua grande maioria, tendem a ser qualitativos.

Fell *et al.* (2008), salientaram o imperativo de se desenvolver uma metodologia quantitativa de gestão de riscos, o que exigiria a criação de métodos quantitativos para análise dos processos de movimentações de massa, da dinâmica das ameaças, de suas consequências e, conseqüentemente, do próprio risco. Os autores destacam ainda que o desenvolvimento dos estudos nesta área encontra-se fomentado pelo desenvolvimento de técnicas de SIG e pelos avanços metodológicos que tornam o zoneamento de risco quantitativo mais interessante.

Alheiros (1999) afirma que a avaliação do risco de uma determinada situação leva em consideração alguns elementos, quais sejam: a susceptibilidade da área, o tipo de evento adverso em estudo, a ameaça potencial, o grau de exposição e a vulnerabilidade dos sistemas existentes naquela área, como mostra a

Figura 2.2.



**Figura 2.2 – Componentes do Risco. (ALHEIROS, 1999 adaptado de HAYS, 1991)**

Na bibliografia existem diversos enfoques tratando da classificação do risco. Processos distintos, porém envolvendo dinâmicas externas do relevo, tais como erosões e movimentações de massa, estão envolvidas são classificados como riscos geológicos. Para alguns autores esses processos são classificados como riscos geomorfológicos. Utiliza-se, em regra, a denominação risco geotécnico nos casos da ameaça estar associada a obras de engenharia.

Kates (1980) caracteriza riscos climáticos ou atmosféricos como os associados aos processos de nevasca, seca, enchentes, ciclones tropicais, tornados e tempestades. Levillain (1987) identifica os processos ligados as inundações e as erosões como riscos hidrológicos.

Augusto Filho *et al.* (1990) sub-classificam os riscos naturais levando em consideração a geosfera em que os processos são gerados. Tomam como riscos atmosféricos os associados aos processos de domínio da atmosfera, e como riscos geológicos os associados aos processos de domínio da hidrosfera e astenosfera.

A classificação dos diferentes tipos de riscos ambientais pode ser construída com base nos fenômenos que constituem a ameaça. Nessa perspectiva, Cerri e Amaral (1998) propõem uma classificação para os riscos ambientais, apresentados pela Figura 2.3.

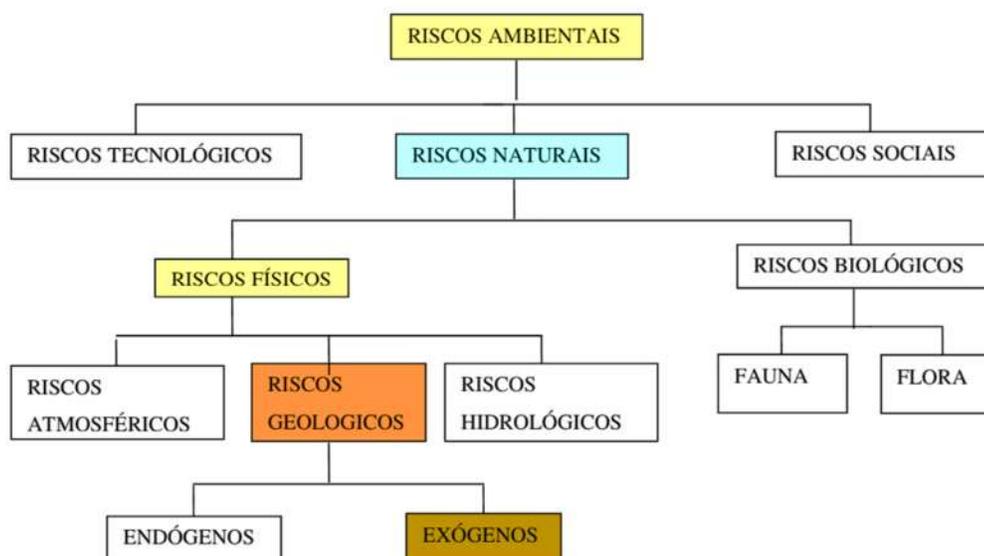


Figura 2.3 – Classificação de risco (Cerri e Amaral 1998, Modificado)

## 2.4.2. AMEAÇA

O termo *hazard*, utilizado na conceituação do risco, pode ser traduzido como perigo ou ameaça, e também foi conceituado por Varnes (1984) como a probabilidade de ocorrência de um evento potencialmente danoso em uma determinada área e em um período de tempo determinado. Zuquette (1993) define *hazard* como um perigo intrínseco que se associa a um fenômeno de origem natural ou provocado pelo homem, que se manifesta em um lugar específico, em tempos determinados, produzindo efeitos adversos nas pessoas, nos bens, e/ou no meio ambiente. Para Castro (1999) *hazard* é a estimativa de ocorrência e magnitude de um acidente, definido em função da probabilidade da ocorrência e da provável magnitude da sua manifestação. Já USGS (2008) afirma que o termo se refere ao potencial de ocorrência de um evento adverso (escorregamento de terra) que cause danos em uma área.

Castro (1999) chama de dano a intensidade ou a severidade de uma ameaça.

O risco está relacionado com o grau de vulnerabilidade dos sistemas receptores ou elementos expostos. Esta vulnerabilidade é uma condição inerente ao sistema receptor e está relacionada com a intensidade do dano e a magnitude da ameaça, caso ela ocorra.

De acordo com Amatruda *et al.* (2004), a intensidade pode ser expressa em termos de energia do impacto, velocidade média e profundidade de solo de zonas potencialmente erodíveis. Segundo Ojeda-Moncayo *et al.* (2004) e Lee & Jones (2004) apud Li *et al.* (2010), a magnitude da ameaça pode ser definida por diversos parâmetros, dentre eles, volume da massa deslizando,

velocidade de deslizamento, área afetada e escoamento superficial. Considera-se que para um evento de deslizamento de magnitude conhecida é possível obter infinitos valores que determinam a intensidade

### 2.4.3. SUSCEPTIBILIDADE

A susceptibilidade refere-se fundamentalmente à probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenômeno numa área conhecida. Zuquette (1993) a conceitua como a possibilidade de que um evento adverso (escorregamento) ocorra em uma área, com base nas características locais do terreno. A susceptibilidade não considera, *a priori*, a probabilidade de ocorrência, que é função dos fatores que detonam o evento, tais como as precipitações ou sismos. Fell (1994), referindo-se a escorregamentos, afirma que susceptibilidade é a possibilidade de ocorrência do deslizamento de terra em uma área conhecida.

Cabe ressaltar que a susceptibilidade demonstra as características predisponentes do meio físico diante dos processos geológicos geotécnicos e da vulnerabilidade.

### 2.4.4. VULNERABILIDADE

Embora no início houvesse uma pluralidade de conceitos de vulnerabilidade, esse termo sempre foi ligado aos conceitos de risco e/ou acontecimentos de desastres.

Com o passar do tempo esses conceitos foram se desvencilhando da probabilidade de ocorrência da ameaça e foram tomando conceituações mais claras.

A tabela a seguir apresenta as diferentes conceituações de vulnerabilidade que foram sendo discutidas e publicadas ao longo do tempo:

**Tabela 2.2–Diferentes Conceitos de Vulnerabilidade.**

Gabor & Griffith (1980)	Vulnerabilidade é a ameaça (de materiais perigosos) que as pessoas estão expostas, incluindo agentes químicos e situações ambientais de comunidades e seus níveis de preparo. Vulnerabilidade é o contexto do risco.
Timmerman (1981)	Vulnerabilidade é o nível que um sistema age adversamente contra a ocorrência de uma ameaça. É uma medida da capacidade de absorver e recuperar de um evento adverso.
Susman <i>et al.</i> (1983)	Vulnerabilidade é o grau de risco em que as classes sociais são diferenciadas.

Varnes (1984)	Vulnerabilidade é o grau de perda de um dado elemento ou grupo de elementos em risco resultante da ocorrência de um fenômeno natural com uma magnitude conhecida. É expressa numa escala de 0 (nenhuma perda) a 1 (perda total).
Mitchel (1989)	Vulnerabilidade é o potencial de perda.
Zuquette (1993)	Vulnerabilidade é uma característica inerente ao sujeito, sistema ou elemento que estão expostos a um evento adverso ( <i>hazard</i> ), correspondendo a uma tendência destes serem afetados ou susceptíveis a perdas. É expressa em uma escala de 0 (sem perdas) a 1 (perdas totais).
Fell (1994)	É o grau de perda para um dado elemento ou conjunto de elementos dentro de uma área afetada por um ou mais escorregamentos. É expressa na escala de 0 (sem danos) a 1 (perda total). Sugere-se a vulnerabilidade total (V), determinada como o produto de vários componentes na forma $V = V_S \times V_T \times V_L$ , onde $V_S$ é a probabilidade de impacto espacial, $V_T$ é a probabilidade de impacto temporal e $V_L$ a probabilidade de perda de vida de um ocupante individual da área impactada.
Canuti&Casagli (1996)	É o nível de perda de um elemento exposto ou grupo de elementos expostos a um risco por um fenômeno natural de uma intensidade conhecida. É expressa na escala de 0 (sem danos) a 1 (perda total). e função da intensidade do fenômeno e da natureza dos elementos em risco.
IUGS-WGL (1997)	Grau de perda de potencial para um elementos ou um grupo de elementos dentro da área afetada por um escorregamento.
Cardona (2001)	Vulnerabilidade é a predisposição de um elemento a sofrer danos ou ser afetado diante da ocorrência de um evento de certa intensidade
Nogueira (2002)	Vulnerabilidade é a susceptibilidade dos elementos, que estão na área de influência da ameaça, sofrerem danos e prejuízos caso ocorra o evento adverso, por sua fragilidade física frente a ele e pela incapacidade de resposta e deficiência para absorver o impacto. Esta susceptibilidade está condicionada as características intrínsecas dos elementos expostos.
ISSMGE TC32 (2004)	O grau de perda para um elemento específico ou conjunto de elementos dentro da área afetada por um evento adverso (ameaça). Ela é expressa numa escala de 0 (sem perda) a 1 (perda total). Além disso, trata-se de um conjunto de condições resultantes de processos físicos, sociais, econômico se fatores ambientais, que aumentam a susceptibilidade de uma comunidade ao impacto das ameaças.

USGS (2008)	Extensão das perdas potenciais para um dado elemento, ou um conjunto de elementos dentro de uma área afetada pela ameaça, expressa na escala de 0 (sem perdas) a 1 (perdas totais) é uma variável formada por condições físicas, sociais econômicas e ambientais)
ISSMGE JTC-1, (2008)	Vulnerabilidade se define como o nível de perdas esperadas em um elemento ou sistema em relação a uma ameaça especificada

A abordagem da estimativa de vulnerabilidade, em que a vulnerabilidade é expressa num intervalo de 0 (sem perda) a 1 (perda total), é conhecida como vulnerabilidade "técnica" ou "física", a qual aborda os efeitos da interação do agente promotor do risco e o ambiente físico. A vulnerabilidade pode ser dividida segundo as perspectivas da análise de sua ameaça (PARRA-PICHARDO, 2004) conforme a seguir, muito embora essa divisão não desconsidere a avaliação do fenômeno como um todo:

- Vulnerabilidade natural – consiste na vulnerabilidade inerente aos seres vivos expostos ao ambiente;
- Vulnerabilidade física – remete a localização dos assentamentos humanos, áreas de perigo, e ainda a infraestrutura inapropriada para absorver os efeitos desses perigos;
- Vulnerabilidade social – remete a coesão das comunidades, como níveis de organização e relacionamentos entre os membros da própria comunidade e entre eles e a sociedade;
- Vulnerabilidade política – consiste no nível de autonomia que a comunidade tem para tomada de decisões que influenciam a vida dos indivíduos da comunidade;
- Vulnerabilidade técnica – associa-se a presença ou ausência de infraestrutura ou projetos de obras civis que possam resistir ou se adaptar a diversidade de ameaças a que eles estão expostos;
- Vulnerabilidade ecológica - definida pelas condições ambientais e ecológicas presentes na área em questão;
- Vulnerabilidade econômica – definida diretamente pelos indicadores de desenvolvimento econômicos presentes em uma população;
- Vulnerabilidade institucional: representada pela presença ou ausência de organizações e comitês para garantir uma boa gestão e coordenação das situações de emergência como consequência de um evento ou uma catástrofe, isto se traduz na capacidade de responder a essas emergências.

Tominaga (2007) reforça que além das características dos movimentos de massa ligadas a geologia, geomorfologia, aspectos climáticos e hidrológicos, a ação do homem com relação às formas de uso e ocupação do solo são fatores que contribuem para ocorrência de

escorregamentos. Portanto os elementos expostos a este contexto devem ser analisados sob a ótica da vulnerabilidade.

Bell & Glade (2004) salientam que pouco trabalho tem sido desenvolvido na avaliação quantitativa da vulnerabilidade. Segundo eles, a vulnerabilidade dos elementos em risco desempenha um papel crucial nas avaliações dos riscos naturais. O risco real pode ser sempre reduzido através da redução da vulnerabilidade dos elementos em risco. Assim, a tomada de decisões ou ações para reduzir a vulnerabilidade pode alterar o risco de inaceitável para um risco aceitável.

Na primeira década do século XXI foram desenvolvidas diversas contribuições de quantificação de risco e de vulnerabilidade, porém os estudos de risco associados a movimentos de massa tendem a ser qualitativos, em sua grande maioria Fell *et al.* (2008).

Fuchs *et al* (2007) afirma que os risco é uma variável definida em função da ameaça, dos elementos em risco e da vulnerabilidade, e por esse motivo essas variáveis devem ser bem estudadas, o autor ressalta que a análise da vulnerabilidade é parte do levantamento das consequências da ocorrência do evento ameaçador. Diversas abordagens não deixam claro ao desenvolver um método proposto para análise de risco vários fatores, tais como, o tipo de processo (deslizamento de terra, fluxo de detritos, rolamentos, etc.), o mecanismo físico (distância percorrida, altura, etc.), a resistência dos elementos estruturais. Em particular, o autor afirma que, as informações sobre a intensidade do processo são frequentemente ausentes e portanto somente descritas semi quantitativamente.

Douglas (2007) explica os motivos pelos quais a vulnerabilidade física é muito pouco abordada de forma quantitativa, sendo esses: priorização natural de registro de vítimas de um evento e o não registro de danos estruturais, falta de dados observacionais da ameaça, o conhecimento dos elementos expostos e os danos que esses elementos já possuem previamente ao evento adverso, a complexidade de mecanismos de estudo de danos estruturais, as escalas temporais e geográficas e a capacidade de modificar o grau da ameaça.

## **2.5. METODOLOGIAS DE ANÁLISE DE RISCO GEOLÓGICO GEOTÉCNICO**

Diversas propostas metodológicas são apresentadas por Zuquette *et al.* (1995) tratando de avaliação e zoneamento de risco com foco nos processos de escorregamentos. O autor ressalta estudos desenvolvidos em áreas específicas em escala igual ou maior que 1:50.000 de Carrara *et al.* (1978), Stevenson (1978 e 1984), Varnes (1985), Brabb (1985 e 1993), Einstein (1988),

Barisone & Bottino (1990), Choubey & Litoria (1990), Ambalagan (1992), além das metodologias ZERMOS (*Zones Exposed to Risk of Soil Movements*) e GASP (*Geotechnical Area Studies Program*), desenvolvidas na França e no Japão respectivamente.

Uma metodologia para análise de risco desenvolvida por Augusto Filho (1994) propõe, a partir de retroanálises de ocorrências de escorregamentos, e da caracterização geológica geotécnica das áreas e dos predisponentes climáticos e topográficos, o desenvolvimento de um zoneamento para a susceptibilidade, que é caracterizado na escala de 1:10.000, no qual obteve um zoneamento da susceptibilidade consistente para a área apresentada em seu estudo. No entanto, para o zoneamento da vulnerabilidade, somente duas situações foram consideradas: áreas urbanas, onde os danos potenciais foram considerados mais elevados, e áreas não urbanas com danos potenciais menores. Dessa forma, o zoneamento final do risco se mostrou ligado as características do meio físico principalmente, pelas duas situações de vulnerabilidade consideradas, e foi denominado risco atual associado a área urbana e risco potencial para as áreas não urbanas.

Douglas (2007) apresenta uma discussão mais focada para eventos adversos de tremores de terra, sobre diferentes abordagens de avaliação do risco, com o objetivo de contribuir para o desenvolvimento futuro de um método que considere ameaça e vulnerabilidade, para vários tipos de risco relacionados com eventos adversos naturais.

No tocante a vulnerabilidade, Douglas (2007) afirma que essa variável muitas vezes não é considerada na análise do risco e comumente é avaliada somente como o nível de risco de determinado elemento.

Fuchs *et al.* (2007) afirma que apesar do conceito de vulnerabilidade ser, para a análise do risco, o grau de perda de um ou mais elementos em risco como a consequência de um certo evento adverso e que o seu valor depende da intensidade de impacto e da susceptibilidade desses elementos, variando de 0 a 1, no geral, em análises de fluxo de detritos (*debrisflow*), esse conceito não resultou em qualquer relação quantitativa entre as intensidades do processo e valores de vulnerabilidade, mesmo com uma considerável perda durante os últimos anos, levando em consideração a abordagem acadêmica reconhecida.

Lari *et al.* (2012) afirma que estudos internacionais têm realizado comparações entre métodos de análise de risco em diferentes países como apresentado por Cardona *et al.* (2004), UNDP (2004) e ESPON (2005), ou identificações de locais de foco, onde o risco de ocorrência de um desastre natural é maior. Entretanto esses estudos consideram o risco na forma qualitativa, baseada em abordagens simplificadas, com indicadores generalizados por região, sem detalhamento de análise espacial da ameaça e elementos em risco padrões.

A avaliação quantitativa do risco tem demonstrado ser eficaz na resolução e na mitigação de situações críticas e ele traz alguns desafios interessantes para as comunidades científicas (LARI *et al.*, 2012).

Sempre que possível, a análise de risco quantitativa (QRA – *Quantitative Risk Analysis*) deve ser priorizada em detrimento a análise qualitativa para casos de desastres naturais, pois ela proporciona uma maior clareza nos objetivos alcançados pela análise e ainda, um levantamento de dados que possibilita uma melhor comunicação entre as autoridades envolvidas em decisões técnicas e políticas.

Bell & Glade (2004) estudaram áreas na Islândia que estão em constante risco pela ameaça de avalanches de neve e deslizamentos de terra. O governo, representado pelo Ministério do Meio Ambiente Islandês, define 3 diferentes faixas de risco para pessoas: zona de risco A – determinada pelo risco de  $0,3 \cdot 10^{-4}$ , zona de risco B – risco de  $1^{-3} \cdot 10^{-4}$  – e zona de risco C que é determinada pelo risco acima de  $3 \cdot 10^{-4}$ . É um regulamento muito rigoroso, que objetiva impedir a utilização das áreas de maior risco.

Os autores apresentam uma abordagem científica para o cálculo do risco, considerando Risco (R) como uma função da probabilidade do evento natural adverso (H) e suas consequências (C)

$$R = H \times C \times E \quad (\text{Eq. 2.1})$$

Bell & Glade (2004) afirmam que a partir de um arquivo raster da área de interesse pode-se analisar o risco de pessoas utilizando *layers* específicas para cada fator de entrada visando o cálculo do risco. Os fatores considerados são: probabilidade de ocorrência do evento adverso (H), probabilidade de impacto espacial do evento adverso ( $P_s$ ), probabilidade de impacto temporal do evento adverso ( $P_t$ ), probabilidade sazonal de ocorrência do evento adverso ( $P_{so}$ ), elementos em risco (número de moradores ou funcionários ( $E_{pe}$ ), vulnerabilidade de estruturas ( $V_p$ ) e vulnerabilidade das pessoas ( $V_{pe}$ ).

Os autores fazem uma análise da susceptibilidade da área, definem a escala de trabalho e partem para a análise da ameaça, a qual foi dividida em dois processos: corrida de lama (*debrisflow*) e rolamento de blocos de rocha. Cada processo obteve sua própria *layer* de classificação da ameaça, podendo ser baixa, média ou alta.

A partir da análise de susceptibilidade ocorre a análise das consequências, que se iniciou com a definição dos elementos em risco, seguida pela análise de vulnerabilidade e a determinação das probabilidades espacial, temporal e sazonal. Para os elementos em risco, foram identificadas as estruturas e determinado um número específico de moradores e funcionários daquele local por pixel no mapa na escala de 1:5000.

Dessa maneira a determinação específica da vulnerabilidade foi realizada através de um estudo bibliográfico em Glade (2003) apud Bell & Glade (2004) e Jonasson & Sigurdsson (1999) e atribuídos valores para vulnerabilidade de estruturas ( $V_p$ ) e a vulnerabilidade das pessoas ( $V_{pe}$ ). A partir da obtenção dos fatores, o risco foi calculado pelo produto simples entre eles e classificado de acordo com a regulamentação da Islândia, gerando mapas de risco de pessoas para uma área específica utilizada pelos autores como exemplo.

Os métodos quantitativos de estimação do risco incluem o estudo da vulnerabilidade entre seus principais parâmetros. Fell *et al.* (2005) citado por Uzielli (2008) se referem à seguinte equação 2.1 de determinação do risco que será abordada no item a seguir:

$$Risco = Ameaça \cdot Vulnerabilidade \cdot Custos \text{ dos elementos expostos} \quad (\text{Eq. 2.2})$$

Essa formulação implica na exploração de um cenário que deve ser analisado também sob a ótica de um produto de vulnerabilidade e do valor dos elementos em risco. A lógica desta formulação estimula especialistas com a experiência pertinente a concentrar os seus estudos em avaliar cada termo dessa equação Uzielli (2008).

Kang *et al.* (2015) apresenta curvas de vulnerabilidade física a partir de estudos realizados com 25 casos de estruturas danificadas em 11 eventos de fluxo de detritos, ocorrido em julho e agosto de 2011, deflagrados por chuvas intensas na Coréia do Sul, com o objetivo de realizar uma avaliação quantitativa do risco em eventos de fluxo de detritos.

Os elementos expostos foram edificações residenciais a jusante de uma encosta de uma montanha e a vulnerabilidade analisada em função das características dessas estruturas. O estudo desenvolvido analisa a relação entre o grau de dano sofrido pela edificação e a intensidade do fenômeno através dos dados de levantamento de campo, os dados espaciais e fórmula empírica.

A metodologia apresentada pelos autores é dividida em três etapas. Na primeira, são realizados os levantamentos das características físicas do fluxo de detritos (área de movimentação da massa deslizante, volume, área de depósito, e vazão de pico) por meio de levantamentos de campo e dados espaciais, como fotografias aéreas e imagens satelitais, conforme apresenta a Figura 2.4:



Figura 2.4 – Contornos de análise dos fluxos de detritos sobrepostos em fotografias aéreas (Kang *et al.* 2015, Modificado)

Os fatores que influenciam na intensidade do fluxo de detritos, tais como, espessura de detritos, velocidade do fluxo e pressão de impacto, foram determinados por cálculos utilizando as características físicas e formulações empíricas. A segunda etapa foi o levantamento dos danos sofridos pelas estruturas, de acordo com tipo da estrutura foram utilizadas fotografias das edificações danificadas e dados de campo, o que direciona a avaliação da vulnerabilidade das estruturas, conforme apresenta a Figura 2.5:



Figura 2.5 – levantamento dos danos sofridos pelas estruturas (Kang *et al.* 2015, Modificado).

E finalmente, as curvas para análise de risco foram elaboradas com base nas relações entre a vulnerabilidade e intensidade do fluxo de detritos obtidos na primeira etapa do estudo, retratada

pelas variáveis: espessura de detritos e velocidade do fluxo e a intensidade do fenômeno representada pelas pressões de impacto sofridas pelas estruturas expostas ao evento adverso, estudadas na segunda etapa, conforme mostra a Figura 2.6.

Kang *et al.* (2015) verificaram que a aplicação da metodologia na área de estudo foi satisfatória visto que as edificações de estruturas simples apresentaram-se com valores altos de vulnerabilidade, o que foi confirmado com as análises de campo e das fotografias das edificações pós evento, o que acarreta um valor maior de risco para essas estruturas. E afirmam também, que as estruturas de concreto reforçadas, por terem risco minimizado pelas suas características, apresentaram vulnerabilidades inferiores o que também foi constatado pelo estudo *in loco* e pelas análises do método apresentado.

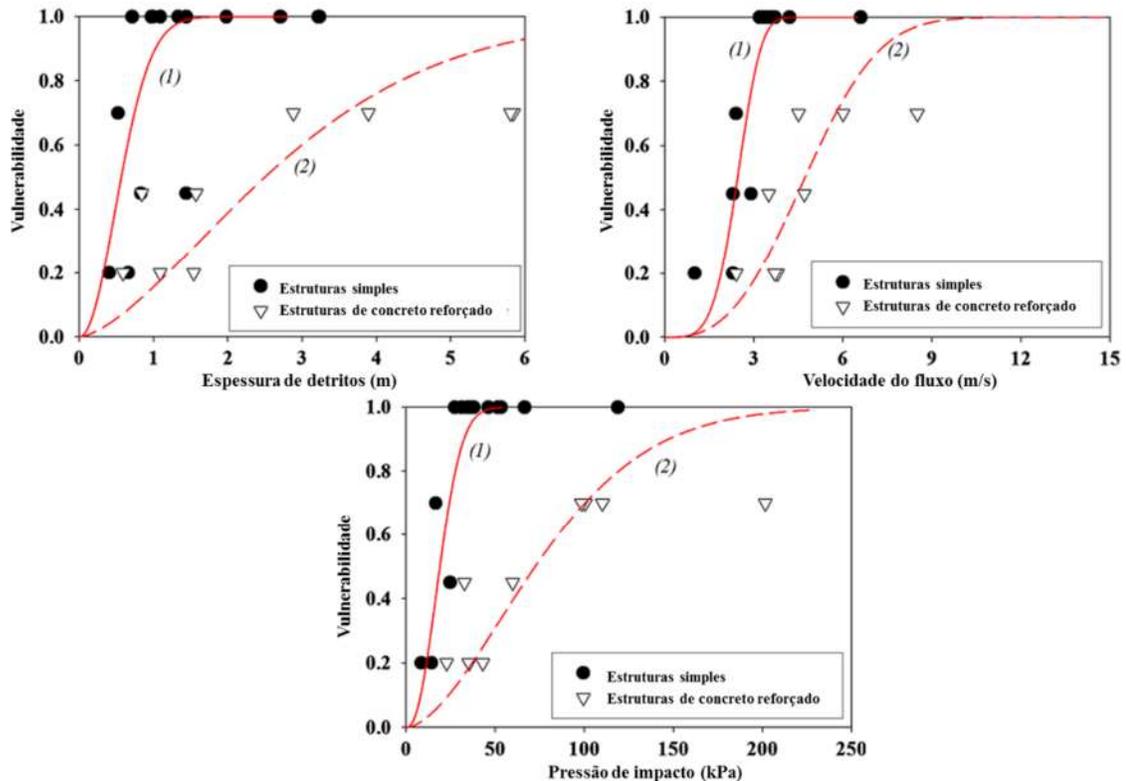


Figura 2.6 – Curvas de vulnerabilidade ao evento de fluxo de detritos (Kang *et al.* 2015, Modificado).

## 2.6. METODOLOGIAS DE ANÁLISE DA VULNERABILIDADE

Mesmo sem existir metodologia definida para definição da vulnerabilidade em situações diferentes, existem alguns modelos que estimam essa variável. O modelo proposto por Cardona (2001a) e Davison (1997) citados por Fernández (2009) utiliza uma soma linear ponderada para determinar a vulnerabilidade. Outros autores desenvolveram técnicas de determinação da

vulnerabilidade, tais como a lógica Fuzzy (Garcia & Hurtado, 2003 citado por Fernández, 2009); análises de componentes principais e sobreposição de mapas (Chardon, 1999 citado por Fernández, 2009); matrizes ou árvores de decisão que adicionam a análise a incerteza dos dados e as deficiências de escala do problema (Dwyer *et al.*, 2004; Smith *et al.*, 2005 citados por Fernández, 2009).

Sabendo disso, pode-se afirmar que o cálculo da vulnerabilidade passa por elementos mensuráveis e não mensuráveis. Qualquer tentativa de entender a vulnerabilidade e os fatores que a controla deve claramente separar os elementos expostos das características que fizeram daqueles elementos vulneráveis, tais como infraestrutura, população, dados econômicos, etc. Também devem ser incluídas na extração da vulnerabilidade as capacidades de determinada comunidade estudada resistir a uma ameaça e a capacidade de recuperação, caso o evento ocorra.

Os elementos que definem a vulnerabilidade podem ser subdivididos, de acordo com a perspectiva que eles representam, em elementos expostos, elementos resistentes e elementos resilientes, assim descritos:

- Elementos expostos estão diretamente associados com a localização geográfica do elemento em relação a ameaça;
- Elementos resistentes ou sensíveis se associam as características das edificações no caso de vulnerabilidade física ou de mobilidade humana em termos de vulnerabilidade social;
- Elementos resilientes se associam a habilidade do elemento atingido pela ameaça retomar as suas capacidades.

Ao mesmo tempo, cada um desses elementos possui uma gama de atributos que os definem, transmitindo informações sobre eles: condições inseguras, pressões dinâmicas e as influências na deflagração do evento.

O processo de avaliação da vulnerabilidade pode ser dividido em duas abordagens que requerem métodos e considerações distintos, além da análise da vulnerabilidade de pessoas e ainda a vulnerabilidade de estruturas.

Apesar de muito importante, a definição do nível de perdas de vidas humanas raramente é considerada e implementada na análise completa do risco.

Na década de 90, Leone *et al.* (1995/1996) citado por Fuchs (2007) desenvolveu uma abordagem de avaliação da vulnerabilidade montando uma matriz de vulnerabilidade baseada na intensidade do dano e a respectiva resiliência dos elementos em risco frente a um evento de deslizamento de terra. O dano foi descrito qualitativamente, considerando os graus de rompimentos estruturais (edificações) e volumes necessários de material de recomposição

(vias). A vulnerabilidade correspondente recebeu um valor numérico que não necessariamente estava ligado a intensidade do evento. Utilizando-se da mesma metodologia, Finlay (1996) propôs uma metodologia com base em dados históricos para a avaliação dos valores atribuídos a vulnerabilidade as edificações condenadas por deslizamentos de terra em Hong Kong.

Uma abordagem qualitativa da vulnerabilidade foi apresentada por Cardinali *et al.* (2002) utilizando a ferramenta de georreferenciamento. O autor propõe três tipos distintos de dano em combinação com a intensidade do *debrisflow*, inferida pela relação entre o tipo de deslizamento esperado e o provável dano que esse deslizamento causaria, que são:

- dano superficial – quando a funcionalidade da edificação e vias permanecem satisfatórias e os danos podem ser reparados rapidamente com baixo custo;
- dano funcional – quando a funcionalidade da estruturas e infraestruturas apresenta-se comprometida e os danos levam bastante tempo para serem recuperados e com alto custo;
- dano estrutural – quando a edificação ou via estão severamente ou completamente destruídas, nesta categoria a demolição e a reconstrução são mais viáveis do que o reparo.

Hartford (1997) propôs um método específico para determinação da vulnerabilidade de elementos expostos a processo de corrida de fluxo (*debrisflow*) a partir de em um estudo de caso na Austrália. Esses valores se relacionavam com o histórico de danos nas edificações e tinham como base uma descrição da intensidade qualitativa da corrida de fluxo – baixa, média e alta.

Michael-Leiba *et al.* (2003) realizou uma análise da vulnerabilidade de pessoas, edificações e vias para eventos adversos de deslizamento de terra em uma escala regional na Austrália. Para estruturas em encostas os dados foram coletados da base de dados de deslizamentos de terra australiana. A vulnerabilidade dos elementos expostos próximos ao escorregamento foi definida como 1, e a vulnerabilidade de elementos expostos mais distantes da área susceptível ao evento adverso obteve o valor de 0,1.

Borter (1999) apresenta uma análise de risco para eventos de movimentos de massa que possui uma abordagem baseada em três passos em função da escala de análise de risco e, é utilizada como procedimento padrão para a mitigação de ameaças naturais na Suíça. Para os casos de fluxo de detritos, o autor indica valores de vulnerabilidade estrutural em função do valor da intensidade do fluxo de detritos, baixa, média ou alta. Para casos de fluxo de detritos em encostas acentuadas o autor indica valores de vulnerabilidade estrutural em função da velocidade do fluxo e altura acumulada e a espessura de solo depositado, respectivamente.

Borter (1999) explica que a tentativa mais importante na literatura disponível é não apenas empiricamente deduzir valores de vulnerabilidade, mas também fornecer o intervalo de amplitudes correspondentes a esses valores atribuídos a vulnerabilidade.

Romang (2004) desenvolve um trabalho sobre a eficácia de muitas medidas de mitigação de executadas na Suíça. A vulnerabilidade das estruturas derivam de dados provenientes do seguro de edificações obrigatório daquele país, e baseia-se na proporção entre valores de prejuízos e reconstruções.

Para os valores de intensidade de fluxo de detritos considerados médios, os valores de vulnerabilidade sugeridos para as edificações foram definidos de acordo com Borter (1999). Entretanto, em relação aos valores de intensidade de fluxo de detritos considerados altos foram atribuídos valores maiores do que os propostos por Borter (1999) devido a singularidade do evento.

Fernández (2009) propõe uma metodologia aplicada a cidade de Medellín, Colômbia, para estimar a vulnerabilidade aplicada a eventos sísmicos. Essa metodologia aplicada aos casos de escorregamentos sofre algumas modificações. Para eventos onde a análise da vulnerabilidade envolve populações localizadas em centros urbanos com riscos de desastres naturais, o principal problema é a obtenção de todas as informações necessárias para a prevenção e mitigação da ameaça.

A Figura 2.7 mostra o modelo conceitual proposto por Fernández (2009) em que para atingir o objetivo, utiliza-se basicamente uma abordagem de duas vias, uma que combina uma série de passos teóricos para avaliação de vulnerabilidades e outra prática, que direciona a abordagem de avaliação da vulnerabilidade a partir de dados municipais disponíveis.

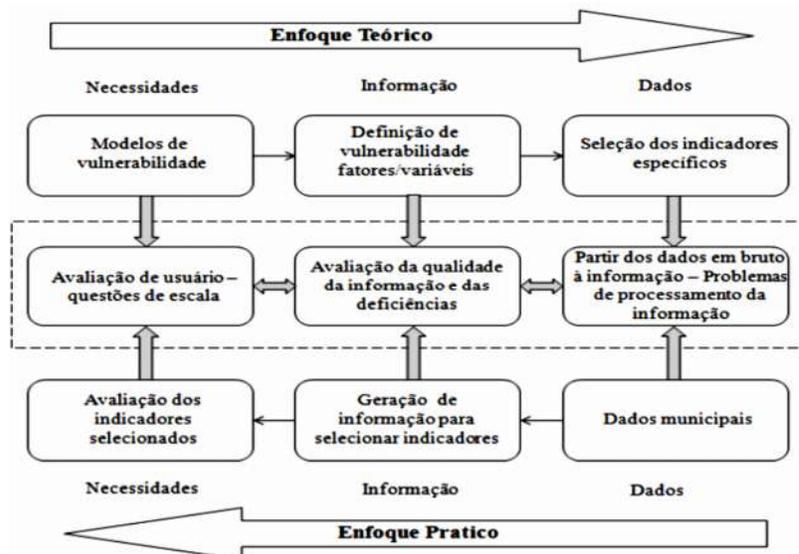


Figura 2.7 – Modelo de avaliação da vulnerabilidade. (FERNÁNDEZ, 2009).

Para a realização do enfoque teórico na avaliação da vulnerabilidade a sequência consiste no levantamento de necessidades de informações e de dados. O levantamento de necessidades consiste em adequar os modelos de vulnerabilidade existentes na literatura sobre gestão de risco a partir de diferentes perspectivas e tipos de vulnerabilidades para ameaças sísmicas. O levantamento de informações consiste na definição dos fatores e variáveis envolvidas na avaliação da vulnerabilidade. Já o levantamento dos dados é a exploração das informações das cidades, objetos de estudos de caso, e da evolução dos indicadores selecionados. Esse enfoque fornece um conhecimento sobre qual informação é necessária com base nos modelos de vulnerabilidade existentes, quais os indicadores relevantes para essa análise e ainda, quais as informações necessárias para avaliar esses indicadores.

O enfoque prático consiste em realizar a avaliação da vulnerabilidade utilizando estudos de caso como base seguindo essencialmente o caminho inverso do enfoque teórico. Esse processo se inicia com a avaliação de dados municipais disponíveis. Esses dados são processados gerando informações relevantes na avaliação de indicadores específicos. Desse modo, esse enfoque lida com o problema de maneira inversa ao teórico. Cada avaliação inicia com a análise de dados municipais coletados para diversos fins e esses dados são processados e se tornam dados relevantes para a tomada de decisões com o objetivo de reduzir a vulnerabilidade local e de avaliar a capacidade das estruturas envolvidas.

A principal característica do modelo de análise da vulnerabilidade proposto por Fernández (2009) divide o evento em três estágios, impacto, assistência e recuperação, os quais são consecutivos e requerem ações municipais diferentes para cada um deles. Considerando isso, a avaliação dos dados na análise da vulnerabilidade em cada fase se inicia com a identificação das informações requeridas, dos indicadores, e seus respectivos atributos.

Jaiswal *et al.* (2011) apresenta a estimativa quantitativa do risco de deslizamento rápidos de terra em encostas naturais nas encostas de Nilgiri, Índia. O risco é estimado para elementos expostos localizados próximo a áreas de rupturas ou de trajetórias de passagens de deslizamentos. O autor utiliza um inventário de 1084 deslizamentos cadastrados no período de 1987 a 2009, em sua maioria deslizamentos translacionais rasos e fluxo de detritos rasos desencadeados por chuvas. Para a avaliação do deslizamento foram coletadas as informações:

- Deslizamentos em encostas naturais agruparam-se em três classes de magnitude com base nos volumes dos deslizamentos;
- O número de deslizamentos futuros em encostas naturais foi determinado pela relação entre o número de deslizamentos em encostas naturais e em encostas provenientes de cortes com

períodos de retorno diferentes utilizando-se um modelo de distribuição de Gumbel (valor extremo);

- Zonas susceptíveis a escorregamentos foram obtidas por um modelo de regressão logística;
- A distribuição dos escorregamentos nas zonas susceptíveis foram obtidas por um modelo de ajuste de comportamento.

As distâncias percorridas pelo deslizamentos foram estimadas empiricamente utilizando os volumes das massas deslizantes e a vulnerabilidade dos elementos em risco estimada com base nos limites dos incidentes históricos.

A partir desses dados, o risco foi calculado considerando os valores de volumes de deslizamentos mínimo, médio e máximo, suas correspondentes distâncias percorridas, mínima, média e máxima, e valores de vulnerabilidade, obtendo-se assim um intervalo de valores de risco por período de retorno analisado.

Uzielli *et al.* (2008) propõe uma metodologia de estimação quantitativa da vulnerabilidade física baseado em um cenário. O método consiste na parcialização da abordagem probabilística para estimação da vulnerabilidade regional (UZIELLI, 2008), o qual proporciona um sistema de quantificação das incertezas na estimação da vulnerabilidade.

A partir dessa abordagem, os autores associam o potencial de dano da ameaça e a capacidade dos elementos expostos lidar e reagir com essa severidade, pela equação:

$$V = I \times S \quad (\text{Eq. 2.3})$$

Onde V indica a vulnerabilidade, I é a intensidade do deslizamento e S a susceptibilidade dos elementos em risco, todas as variáveis são definidas com domínio na faixa de 0 a 1.

Para esse trabalho, os autores explicam que a susceptibilidade se refere a falta de capacidade, inerente dos elementos expostos na área de estudo de preservar sua integridade física e sua funcionalidade pela interação física com uma massa deslizante genérica. Ressaltam que a susceptibilidade é uma característica independente das características do agente do processo, que para o caso estudado se trata de deslizamentos de terra.

A susceptibilidade modelada é proposta pela equação:

$$S = 1 - \prod_{i=1}^{n_s} (1 - \xi_i) \quad (\text{Eq. 2.4})$$

Onde  $\xi_i$  é o número de fatores de susceptibilidade, definidos também numa faixa de 0 a 1. Esses fatores são contribuintes da susceptibilidade dos elementos definidos em função de critérios com base na literatura ou definidos pelo usuário.

Para esse modelo, os autores calcularam a susceptibilidade de estruturas, explicada pela resiliência física a ação do deslizamento e a susceptibilidade de pessoas.

A susceptibilidade estrutural foi definida pelos parâmetros:

- Tipologia estrutural ( $\xi_{STY}$ ) – onde foram propostas seis categorias de estruturas em termos de vulnerabilidade a deslizamentos, como mostra a Tabela 2.3.

O fator de susceptibilidade para o estado de manutenção  $\xi_{SMN}$  expressa a redução da capacidade das estruturas de acordo com o seu grau de manutenção em comparação com a categoria de máximo valor de grau de manutenção, como mostra a Tabela 2.4.

**Tabela 2.3 – Valores propostos para o fator de susceptibilidade para tipologia estrutural Uzieli *et al.* (2008) – modificada.**

<b>Tipologia Estrutural</b>	<b>Resistência</b>	<b><math>\xi_{sty}</math></b>
Construções Simples de Madeira	Nenhuma	1,00
Estruturas Leves	Muitobaixa	0,90
Estruturas mistas (concreto e madeira)	Baixa	0,70
Alvenaria e concreto	Média	0,50
Concreto armado	Alta	0,30
Estrutura reforçada	Muito alta	0,10

**Tabela 2.4 – Valores propostos para o fator de susceptibilidade para estado de manutenção Uzieli *et al.* (2008).**

<b>Estado de Manutenção</b>	<b><math>\xi_{SMN}</math></b>
Muito ruim	0,50
Ruim	0,40
Médio	0,25
Bom	0,10
Muito bom	0,00

A partir da determinação dos fatores de susceptibilidade para a tipologia estrutural e para o estado de manutenção das estruturas é possível quantificar a susceptibilidade estrutural pela equação:

$$S_{STR} = 1 - (1 - \xi_{STY})(1 - \xi_{SMN}) \quad (\text{Eq. 2.5})$$

As pessoas estão ou podem se tornar vulneráveis a deslizamentos de terra em espaços abertos, no interior de veículos e em estruturas. Sendo assim, com base em dados populacionais, como renda per capita, densidade populacional da área em estudo, foram elaborados fatores de susceptibilidade para as pessoas.

O fator de susceptibilidade de pessoas em espaços abertos e em veículos ( $\xi_{PDN}$ ) é definido em função da densidade populacional pois, presume-se que, quanto maior a população em uma determinada área a dificuldade de se escapar de uma ameaça eminente aumenta, tendo em vista que existe maior possibilidade de congestionamento de rotas de fuga, muitas pessoas a serem transportadas, ameaça de pânico generalizado, etc.

O fator da susceptibilidade de pessoas – renda per capita ( $\xi_{GDP}$ ) – se refere ao total de recursos e valor de produtos e serviço de um ano dividido pelo número de pessoas de um país. Esse fator retrata a renda como um fator de minimização da susceptibilidade das pessoas.

O fator da susceptibilidade de pessoas – idade ( $\xi_{AGE}$ ) – retrata a capacidade da pessoas enfrentar e escapar de um deslizamento, estando em função da sua maturidade intelectual e da sua habilidade física.

Para a susceptibilidade das pessoas no interior das estruturas Uzielli *et al.* (2008) utiliza-se de um estudo realizado por Ragozin & Tikhvinsky (2000) que propuseram a relação entre susceptibilidade de estruturas ( $S_{STR}$ ) e susceptibilidade de pessoas ( $S_{PST}$ ) expressa como a soma de acidentes e óbitos, conforme mostra a tabela 2.8.

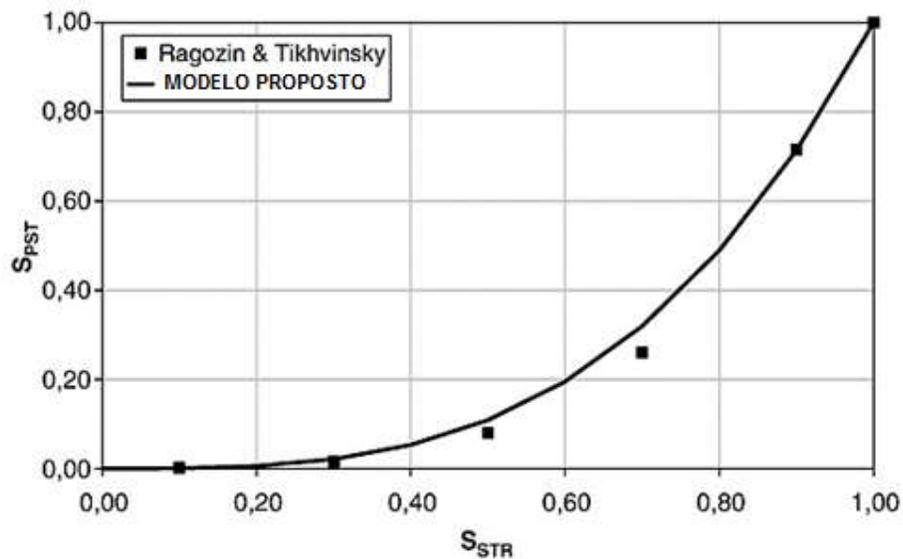


Figura 2.8 – Relação entre susceptibilidade de estruturas ( $S_{STR}$ ) e susceptibilidade de pessoas ( $S_{PST}$ ) (Uzielli *et al.* (2008)).

A intensidade do deslizamento é definida por um grupo de parâmetros distribuídos espacialmente considerando características cinéticas e cinemáticas da interação entre a massa deslizante e a área de estudo, como por exemplo o impacto do deslizamento em uma residência. A intensidade ligada as características cinemáticas se relacionam pelo efeito de magnitude do

processo de deslizamento. Uzielli *et al.* (2008) propõe a equação que descreve a intensidade da ameaça:

$$I = k_s \cdot [r_K \cdot I_K + r_M \cdot I_M] \quad (\text{Eq. 2.6})$$

Onde:

$k_s = A_i/A_t$ , definido como taxa de impacto espacial, sendo  $A_i$  a área afetada pelo deslizamento de terra e  $A_t$  a área total pertencente a área de abrangência do estudo;  $r_K$  é o fator cinético e  $r_M$  é o fator cinemático;  $I_K$  é o parâmetro de intensidade cinética e  $I_M$  é o parâmetro de intensidade cinemático. Os fatores são definidos pelo usuário e retratam a relevância da energia cinética ou cinemática no potencial de destruição do deslizamento, como por exemplo, o dano causado por um deslizamento de terra lento que é, a priori, causado por deformação (predominância do fator cinemático), enquanto que características cinéticas são predominantes em casos de movimentos rápidos, a partir dessa essa relação, os autores limitaram os parâmetros a equação

$$r_K + r_M = 1 \quad (\text{Eq. 2.7})$$

Qualquer parâmetro de intensidade cinética definido pelo usuário deve estar dentro dos limites de 0 a 1, indicando a unidade como máxima intensidade. O parâmetro de intensidade cinética foi definido com base na escala de potencial de destruição de acordo com a velocidade de deslizamentos proposta por Cruden & Varnes (1996) *apud* Uzielli *et al.* (2008), como:

$$I_K = \begin{cases} 0,00 & C < 5 \cdot 10^{-7} \\ 0,10 \cdot [\log_{10}(C) + 6,3] & 5 \cdot 10^{-7} \leq C \leq 5 \cdot 10^3 \\ 1,00 & C > 5 \cdot 10^3 \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.8})$$

Onde  $C$  é a velocidade de impacto (expressa em  $mm/s$ ) da massa deslizante.

O parâmetro de intensidade cinemático é definido em função do tipo de deslizamento e da categoria de elementos expostos a ele. Para as estruturas localizadas no interior da massa deslizante, sofrendo deslocamentos lentos, esse parâmetro é definido por:

$$I_M = \begin{cases} \frac{2D_G^2}{D_{G,t}^2} & \frac{D_G}{D_{G,t}} < 0,5 \\ 1,0 - \frac{2(D_{G,t} - D_G)^2}{D_{G,t}^2} & 0,5 \leq \frac{D_G}{D_{G,t}} \leq 1,0 \\ 1,0 & \frac{D_G}{D_{G,t}} > 1,0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.9})$$

Onde  $D_G$  é o deslocamento absoluto (em  $mm$ ) da superfície,  $D_{G,t}$  é o valor limite acima do qual a estrutural sofre dano estrutural ou perda total de sua funcionalidade. Esse valor pode ser obtido por modelagens teóricas, dados empíricos.

A partir da obtenção dos valores de intensidade de susceptibilidade é possível quantificar a vulnerabilidade dos elementos expostos por categoria de interesse. Uzielli *et al.*(2008) afirma que a quantificação da vulnerabilidade objetivamente não é possível pela natureza subjetiva de alguns dos parâmetros necessários para a aplicação do procedimento e pela ausência de um banco de dados quantitativos de danos causados por deslizamentos de terra no ambiente urbano. No estudo de quantificação da vulnerabilidade desenvolvido por Li *et al.*(2010) também com base no estudo da ameaça e da vulnerabilidade dos elementos expostos, a intensidade da ameaça, é definida como uma função de duas variáveis: o fator de intensidade geométrico ( $I_{gem}$ ) e o fator de intensidade dinâmico ( $I_{dyn}$ ).

O fator de intensidade geométrico considera as características ligadas ao tamanho dos deslizamentos de terra, que arrasta a estrutura quando a mesma se encontra no interior da área do deslizamento – *creeping* ou rastejo. O fator de intensidade dinâmico tem como principal variável a velocidade do deslizamento, cujo impacto acontece contra a estrutura localizada fora da área onde ocorre o desprendimento da massa deslizante, e ambos os fatores são adimensionais. Sendo assim, a intensidade da ameaça pode ser dada por:

$$I = \begin{cases} I_{gem} \cdot I_{dfm}; & \text{Para estruturas dentro da área do deslizamento} \\ I_{dyn} \cdot I_{dpt} & \text{Para estruturas fora da área do deslizamento.} \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.10})$$

Onde:

- $I_{gem}$  – é o fator de intensidade geométrica para estruturas dentro da área do deslizamento.
- $I_{dfm}$  – é o fator que considera a deformação em estruturas localizadas dentro da área do escorregamento que sofreram a ação de deslizamentos com baixas velocidades de escorregamento, os conhecidos *creeping* ou rastejo.
- $I_{dpt}$  – é o fator que considera a profundidade de detritos em metros ( $D_{dpt}$ ) no momento do impacto do deslizamento contra a estrutura, o qual é utilizado para avaliar os elementos exteriores as áreas de deslizamento que ocorreram com altas velocidades, obtidos pela equação:

$$I_{dpt} = D_{dpt} \cdot 0,1 \quad (\text{Eq. 2.11})$$

- O  $I_{dyn}$  então é o fator que relaciona a velocidade da ameaça com a estrutura impactada. Caso a velocidade do deslizamento seja superior a  $5 \times 10^{-1} mm/s$  ( $1,8m/h$ ), Cruden & Varnes (1996) afirmam que as estruturas seriam destruídas, perderiam a funcionalidade ou a condição para manutenção. Já para valores abaixo de  $5 \times 10^{-7} mm/s$  ( $16mm/ano$ ) as estruturas permaneceriam intactas. E assim, o  $I_{dyn}$  referente as estruturas é obtido em função da velocidade e é dado por:

$$I_{dyn} \begin{cases} 0,0 & C \leq 5 \times 10^{-7} \text{ mm/s} \\ \frac{1}{36} (\log_{10} C + 6,30)^2 & C > 5 \times 10^{-1} \text{ mm/s} \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.12})$$

Sendo assim, a determinação da intensidade dos deslizamentos para estruturas fora da área do deslizamento é obtida por:

$$I = I_{dyn} \cdot D_{dpt} \cdot 0,1 \quad (\text{Eq. 2.13})$$

Li *et al.*, (2010) fizeram uma proposta de estimativa da quantificação da vulnerabilidade de estruturas impactadas por deslizamentos por meio de duas variáveis. A primeira ligada à ameaça, que é denominada intensidade, e a segunda relacionada com a resistência do elemento estrutural ameaçado. Essa resistência ( $R_{str}$ ) é uma determinação física, produto de uma análise da estrutura e uma classificação numérica das suas características físicas proposta pelo método, dada por:

$$R_{str} = (\xi_{sty} \cdot \xi_{sht} \cdot \xi_{smn} \cdot \xi_{sfd})^{\frac{1}{4}} \quad (\text{Eq. 2.14})$$

Onde:

- $\xi_{sty}$ - Fator de resistência para tipologia estrutural;
- $\xi_{sht}$  - Fator de resistência para o número de pavimentos;
- $\xi_{smn}$  - Fator de resistência para o estado de manutenção da edificação;
- $\xi_{sfd}$  - Fator de resistência para a profundidade da fundação;

O fator de resistência para tipologia estrutural foi definido por Heinimann (1999) *apud* Li *et al.* (2010) que classificou a estrutura em seis categorias distintas em termos de resistência aos deslizamentos de terra, que possuem diferentes respostas ao contato da massa deslizante. O fator de tipologia estrutural foi atribuído subjetivamente pelo autor e é mostrado na

Tabela 2.5

**Tabela 2.5 – Valores propostos para o fator de resistência para tipologia estrutural de resistência para tipologia estrutural Li *et al.* (2010) – modificada.**

Tipologia Estrutural	Abreviatura	$\xi_{sty}$
Construções Simples de Madeira	LT	0,10
Estruturas Leves	LS	0,20
Estruturas mistas (concreto e madeira)	MS	0,40

Alvenaria e concreto	BC	0,80
Concreto armado	RC	1,30
Estrutura reforçada	RF	1,50

O fator de resistência para o número de pavimentos é um parâmetro definido por quatro diferentes intervalos de altura das estruturas e foram distinguidos conforme a Tabela 2.6:

**Tabela 2.6 – Valores propostos para o fator de resistência para o número de pavimentos Li et al. (2010) – modificada.**

Altura	Abreviatura	Número de Pavimentos	$\xi_{sh}$
Pavimento único	S	1	0,10
Edifício baixo	L	2	0,40
Edifício médio	M	3 a 5	0,90
Edifício alto	H	>6	1,50

O fator de resistência para o estado de manutenção da edificação foi definido por cinco classes, mostradas pela

Tabela 2.7, identificando-o de modo a permitir analisar a mudança no comportamento provável dos edifícios de acordo com o grau de manutenção deles.

**Tabela 2.7 – Valores propostos para o fator de resistência para o estado de manutenção Li et al.(2010) – modificada.**

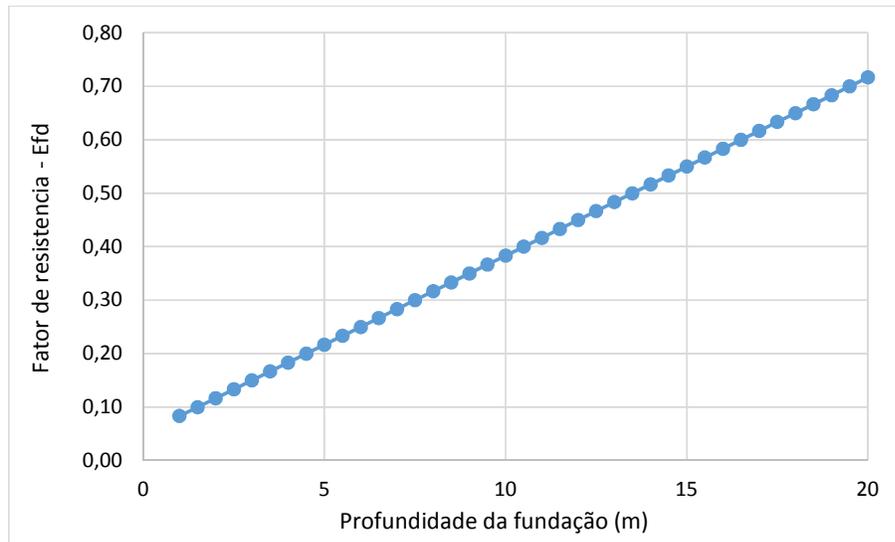
Estado de Manutenção	Abreviatura	$\xi_{sm}$
Muito fraco	VP	0,10
Fraco	P	0,40
Médio	M	0,80
Bom	G	1,20
Muito bom	VG	1,50

O fator de resistência para a profundidade da fundação ( $\xi_{sfd}$ ) foi definido por Ragozin & Tikhvinsky (2000) *apud* Li et al. (2010) como o fator que considera a profundidade em que a fundação de uma estrutura está localizada, em metros.

$$\xi_{sfd} = \left( \frac{D_{fod}}{10} \right)^{\frac{1}{3}} + 0,05 \quad (\text{Eq. 2.15})$$

Onde  $D_{fod}$  é a profundidade da fundação da estrutura em estudo em metros.

A equação considera que o aumento da profundidade da fundação ( $D_{fod}$ ) influencia de forma suave no aumento da resistência da estrutura, como mostrado pela Figura 2.9:

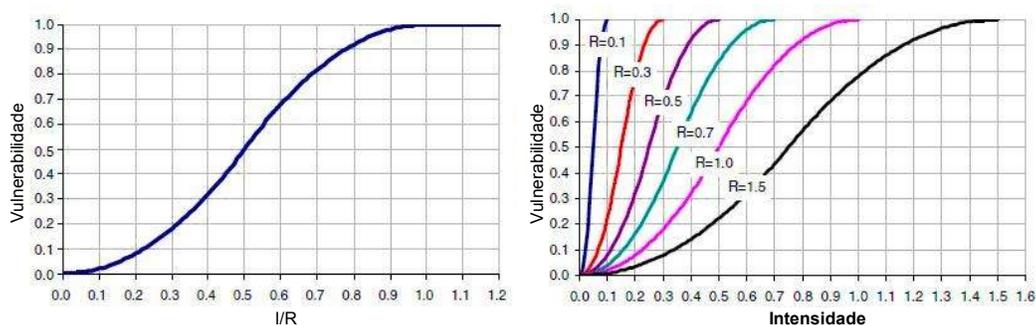


**Figura 2.9 – Relação entre profundidade de fundação  $D_{fod}$  e fator de resistência  $\xi_{fd}$ .**

A vulnerabilidade ( $V$ ), de acordo com Li *et al.* (2010) é definida como uma função da intensidade da ameaça ( $I$ ) associada aos elementos expostos ao risco e a capacidade de resistência ( $R$ ) desses elementos para suportar essa ameaça. Para estimativa da vulnerabilidade são utilizadas as equações da função **Erro! Fonte de referência não encontrada.**:

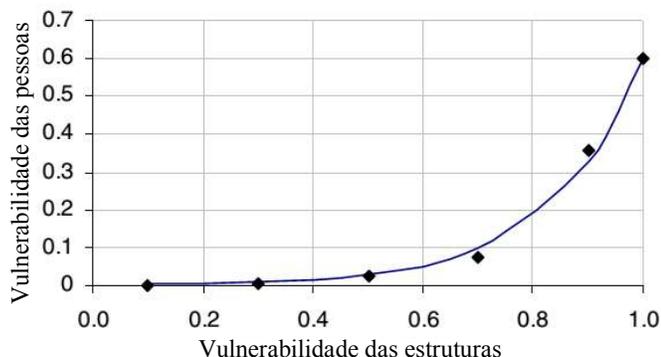
$$V = f(I, R) = \begin{cases} 2 \frac{I^2}{R^2} & \frac{I}{R} \leq 0,5 \\ 1,0 - \frac{2(R - I)^2}{R^2} & 0,5 < \frac{I}{R} \leq 1,0 \\ 1,0 & \frac{I}{R} > 1,0 \end{cases} \quad (\text{Eq. 2.16})$$

A partir do cálculo da vulnerabilidade pode-se determinar a relação da intensidade da ameaça e a resistência da estrutura, sendo que Li *et al.* (2010) apresentaram os seguintes resultados teóricos para esse estudo, como mostra a Figura 2.10:



**Figura 2.10 – a) Tendência de vulnerabilidade pelo quociente de intensidade e resistência. (b) Vulnerabilidade para valores de resistência fixos.**

Li *et al.* (2010) também apresenta um gráfico que relaciona a vulnerabilidade estrutural com a vulnerabilidade das pessoas no interior das estruturas, mostrado pela Figura 2.11.



**Figura 2.11–Relação entre vulnerabilidade das estruturas e vulnerabilidade das pessoas no interior das estruturas - modificado Li *et al.* (2010).**

Nesta pesquisa não foram feitos estudos para a abordagem da vulnerabilidade de pessoas. O gráfico acima, apresentado pela Figura 2.11, foi construído com análises de estudos de casos de eventos de deslizamentos de encostas que ocorreram na China pela ação dos terremotos: *Heicheng County Earthquake* e *Chi-Chi Earthquake*.

## **2.7. SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA**

Os sistemas de informação geográfica (SIG) se apresentam como uma ferramenta na compreensão dos acontecimentos e fenômenos que ocorrem no espaço geográfico, por meio da sua capacidade de agregar um grande soma de dados convencionais de expressão espacial, unindo-os e estruturando-os adequadamente. Tornaram-se instrumentos essenciais para a manipulação de informações geográficas (GARCÍA, 2004).

### **2.7.1. USO DE SIG EM ANÁLISES DE DESLIZAMENTOS**

O progresso das ferramentas computacionais e da geotecnologia está propiciando o desenvolvimento de inúmeras utilizações que permitem o manejo dos mais variados aspectos do ambiente geográfico, tais como: recursos naturais, meio-ambiente, infraestrutura e urbanização, de forma que estes instrumentos proporcionam respostas aos questionamentos impostos em um tempo menor do que aquele requerido antes do seu surgimento (SILVEIRA & RAMOS, 2007).

Os métodos de análise espacial, em conjunto com as técnicas de SIG, assumem um papel relevante na identificação de áreas susceptíveis aos deslizamentos de terra, permitindo-se a elaboração de prognósticos mais completos e confiáveis da área de interesse (BISPO *et al.*, 2009).

Conforme Reis *et al.* (2003), a elaboração de modelos de avaliação de vulnerabilidade cada vez mais complexos, fundamentados em métodos quantitativos, foi permitida pelo uso de SIG, uma vez que esse proporciona a operação de um grande número de temas cartográficos e a análise estatística da relação entre os deslizamentos identificados e as variáveis independentes espacializadas. Desta forma, a fusão entre um bom modelo de avaliação de vulnerabilidade aos movimentos de massa e os sistemas de informação geográfica geram um instrumento poderoso para os profissionais das áreas envolvidas na mitigação dos riscos (GARCÍA, 2004).

### **3. METODOLOGIA**

#### **3.1.INTRODUÇÃO**

Com o objetivo de embasar os dados deste trabalho à aplicação real, tomou-se como referência o evento de chuva extrema ocorrido na região serrana do Rio de Janeiro em janeiro de 2011, o qual gerou uma grande quantidade de escorregamentos e fluxos de detritos (debris-flows) no município de Nova Friburgo. Esse estudo foi realizado para avaliar a metodologia de forma a permitir a análise dos dados, sua aplicabilidade e limitações. Após esse esclarecimento é apresentada a metodologia utilizada na pesquisa.

#### **3.2.CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE TRABALHO**

##### **3.2.1. ÁREA DE ESTUDO**

A primeira visita em campo foi realizada no período de 11 a 16 de fevereiro de 2012, quando foi visitada uma parte dos locais que ocorreram os deslizamentos, objetivando-se a identificação, reconhecimento, delimitação e análise da área de estudo. Foram visitados os municípios de Nova Friburgo, Petrópolis, Conselheiro Paulino, Cachoeiras do Macacu e Bom Jardim. Após esse reconhecimento, o município de Nova Friburgo foi definido como a área de estudo do presente trabalho, por conter número suficiente de deslizamentos e estruturas para o desenvolvimento satisfatório da metodologia.

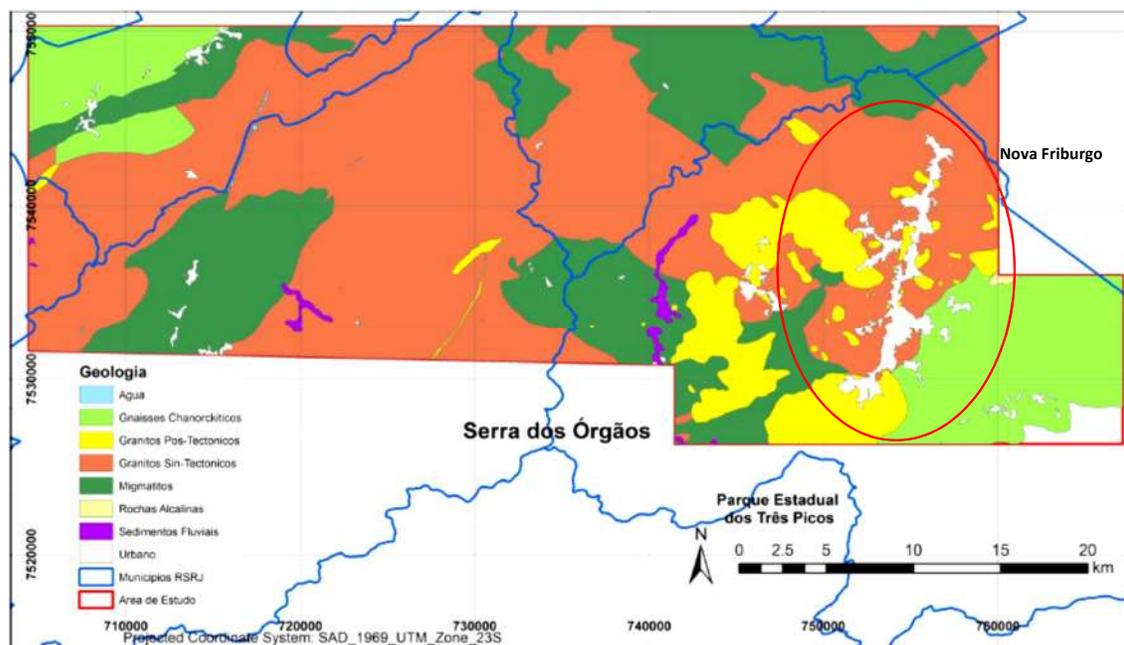
O município de Nova Friburgo está localizado na Região Serrana no centro-norte do estado do Rio de Janeiro, no Brasil, e abrange uma área de  $933,414\text{km}^2$ . As fortes chuvas 11 e 12 de Janeiro de 2011, que atingiram esta região, provocaram 1.620 deslizamentos no Município, dentre os 7.268 movimentos de massa que ocorreram em toda Região Serrana Fluminense, sendo considerado um dos maiores desastres naturais registrados no Brasil (TIGA, 2013).

A segunda visita nesse município foi realizada em março do mesmo ano, com o objetivo de coletar dados já levantados pelos órgãos municipais e estaduais, e estudos realizados para a área pelas universidades locais, Foram visitados a COPPE-UFRJ Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia, IGEO- UFRJ Instituto de Geociências, FEN/UERJ - Faculdade de Engenharia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro, órgãos estaduais como o DRM-RJ - Departamento de Recursos Minerais do Serviço Geológico do Estado do Rio de Janeiro, localizado em Niterói, e órgãos municipais em Nova Friburgo como a Secretaria de Agricultura, Secretaria de Obras, Secretaria de Meio Ambiente, e a Defesa Civil.

O projeto RADAMBRASIL (Brasil, 1983), mostra que na região das escarpas e reversos da Serra do Mar, onde a cidade de Nova Friburgo está inserida, os solos predominantes são os latos solos e os câmbios solos, sobre os quais houve o desenvolvimento da Floresta Ombrófila Densa, que atualmente se encontra, em sua maioria, devastada e substituída por malha urbana e pastagens, sendo preservada apenas nas escarpas mais íngremes da região.

Os solos das encostas com declividades mais altas são pouco espessos e sobrepõem uma base cristalina impermeável, o que propicia um contato solo-rocha bastante sensível, com presença de diversos matações aflorados e soltos na superfície, o que contribui para a instabilidade das encostas da Região Serrana Fluminense.

A área da cidade de Nova Friburgo é dominada por quatro unidades litológicas principais: granitos pós e sin-tectônicos, migmatitos e gnaisses, que abrangem 8,9%, 52,7%, 24,1% e 12,9% da área de estudo respectivamente (AVELAR *et al.*, 2011). A zona urbana do município de Nova Friburgo faz parte da área de granito, como mostra o destaque da Figura 3.1.



**Figura 3.1 – Destaque da área de estudo na carta geológica da região serrana do Rio de Janeiro. (Modificada - DRM-RJ, 1982).**

Trabalhos de campo realizados por (AVELAR *et al.*, 2011) indicam que a rocha predominante na região é um granito equigranular, com granulometria entre 3 e 5mm, composto por quartzo, feldspato, potássico e biotita. Esta rocha é do Proterozóico e é inserida nos mapas geológicos regionais como o Batólito da Serra dos Órgãos e Unidade Granítica de Nova Friburgo (DRM-RJ, 1982). Observações sobre os materiais envolvidos em alguns movimentos de massa mostraram quatro tipos de solos diferentes: (1) saprólitos de coloração cinza, o que representa

a fase inicial do intemperismo do granito, (2) saprólitos de coloração rosa, que se encontram na fase mais avançada do intemperismo, (3) coluviões de coloração vermelha e intensa laterização que cobrem as encostas e (4) coluviões de coloração marrom com blocos de pedra arredondados presentes nos fundos dos vales (AVELAR *et al.*, 2011).

### **3.2.2. BASE CARTOGRÁFICA**

A caracterização da área de trabalho é crucial para que se explorem as possibilidades de, a partir de sua localização, inserir-se o estudo no contexto geológico, das análises já realizadas na mesma área. Para a modelagem, o conhecimento da geologia local aliado ao conhecimento geotécnico aumentam a aplicabilidade dos modelos.

O cadastro da área com georreferenciamento de seus dados e a criação de um banco de dados digital são ferramentas essenciais para manipulação dos dados e assim gerar as análises previstas.

Os dados utilizados para a elaboração do banco de dados da área de estudo foram obtidos com a aquisição da base cartográfica disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), que é:

- Carta topográfica do município de Nova Friburgo, de 1981 na escala de 1:50.000, que apresentam os seguintes dados vetoriais: vias, lagos e rios, bairros, pontos cotados e curvas de nível equidistantes de 20m;
- Carta topográfica do município de Nova Friburgo, de 1998 na escala de 1:25.000, que apresentam os seguintes dados vetoriais: vias, lagos e rios, bairros, edifícios, pontos cotados e curvas de nível equidistantes de 10m, cobrindo toda área de estudo;
- Mapeamento sistemático da área que apresenta uma base vetorial contínua na escala de 1:25.000;
- Modelo digital de elevação do terreno na escala de 1:25.000;
- Ortofotos na escala de 1:25.000;
- Imagem do município de Nova Friburgo disponibilizada pela *GeoEye* após o evento de deslizamentos, datada de 20 de janeiro de 2011;

A Figura 3.2, gerada no programa computacional Spring 5.2.6, mostra uma parte da base cartográfica da área de trabalho.

### 3.2.3. PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

O Sistema de Processamento de Informações Georreferenciadas (SPRING) versão 5.2.6 é um programa computacional oferecido gratuitamente pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais). O Spring 5.2.6 é um SIG com funções de processamento de imagens, análise espacial, modelagem numérica de terreno e consulta de banco de dados espaciais.

A utilização da ferramenta *Spring 5.2.6* proporcionou a criação de um banco de dados digital, reunindo as informações geográficas disponíveis, a localização dos deslizamentos e das estruturas atingidas por eles. Foi utilizado o programa computacional *Google Earth* e o *Google Street View* da empresa *Google*. Esse programa permitiu a visualização da área de estudo e suas modificações no tempo, visualização de mapas, relevo, edifícios em três dimensões, vegetação e ainda a exploração de todo conteúdo geográfico

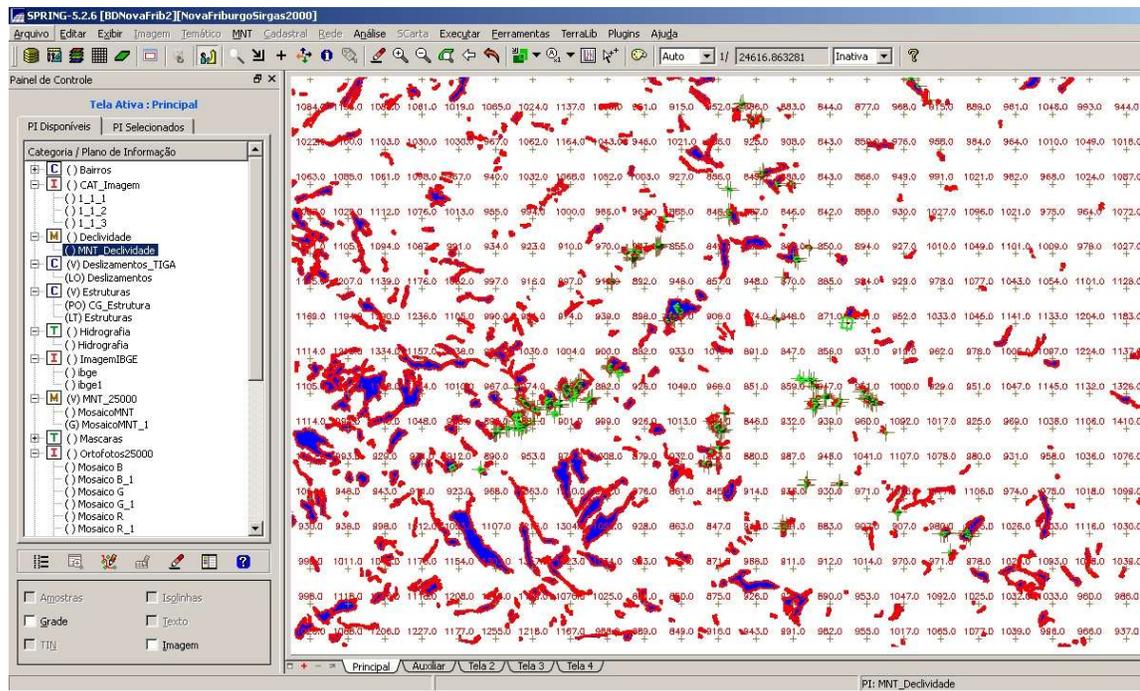


Figura 3.2 – Imagem ilustrativa de um plano de informação no programa computacional Spring 5.2.4.

A pesquisa também utilizou o programa computacional *ArcGIS 10.2* com suas principais extensões, *Spatial Analyst* e *Geoestatistical Analyst*.

O programa Excel 2007 *Microsoft®* é um programa de cálculo em formato de planilha eletrônica, que permitiu todos os cálculos matemáticos necessários.

### 3.3.LEVANTAMENTO DOS DESLIZAMENTOS

Para o desenvolvimento do inventário de deslizamentos da região serrana do estado do Rio de Janeiro, que foi utilizado nesta pesquisa, foram atualizados os mapeamentos feitos por Avelar *et al.* (2011), que mapearam parte da área afetada pelo evento da região serrana do Rio de Janeiro, obtendo 3.622 movimentos de massa, e ainda o mapeamento realizado por Tiga (2013), que acrescentou ao primeiro inventário, por meio da técnica de interpretação visual, deslizamentos e novas cicatrizes dos movimentos de terra, totalizando 7.268 movimentos de massa mapeados em uma área de 1.217,67 km<sup>2</sup>.

Esse inventário atualizado de deslizamentos foi lançado nas ferramentas de SIG e georreferenciados, realizando-se a subsequente correção das alterações de forma, que foram geradas a partir da visualização pela ferramenta *Google Earth* e da técnica empregada pelos outros autores.

Essa atualização permitiu a geração de dados precisos de áreas dos polígonos, perímetro, cotas e declividades máxima, média e mínima de 1.620 deslizamentos. Os dados gerados para todos os deslizamentos foram filtrados para os deslizamentos denominados urbanos (deslizamentos dentro da área urbana da cidade de Nova Friburgo), capazes de gerar dados de vulnerabilidade para as estruturas próximas a eles, um dos objetivos a que este trabalho se propõe atingir. A Figura 3.3 mostra a área urbana onde os dados dos deslizamentos foram levantados e a Figura 3.4 mostra em detalhe a área delimitada de um dos deslizamentos urbanos.



**Figura 3.3 – Deslizamentos Urbanos em Nova Friburgo.**



Figura 3.4 – Exemplo de alguns deslizamentos urbanos em Nova Friburgo - detalhe. Determinação da Intensidade da Ameaça

### 3.4.LEVANTAMENTO DAS ESTRUTURAS

#### 3.4.1. DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA DAS ESTRUTURAS

Para a determinação das resistências das estruturas adotamos a metodologia de cálculo da resistência estrutural a partir de parâmetros de resistência observados, proposta por Li *et al.* (2010). Essa resistência ( $R_{str}$ ) é uma determinação física, produto de uma análise da estrutura e uma classificação numérica das suas características físicas proposta pelo método, dada por:

$$R_{str} = (\xi_{sty} \cdot \xi_{sht} \cdot \xi_{smn} \cdot \xi_{sfd})^{\frac{1}{4}} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Onde:

- $\xi_{sty}$  - Fator de resistência para tipologia estrutural;
- $\xi_{sht}$  - Fator de resistência para o número de pavimentos;
- $\xi_{smn}$  - Fator de resistência para o estado de manutenção da edificação;
- $\xi_{sfd}$  - Fator de resistência para a profundidade da fundação;

Para a estimativa da profundidade das fundações das edificações foi considerada a predominância de tipos de movimentos ocorridos em Nova Friburgo, denominados deslizamentos superficiais planares (*soil slip*) (Anderson & Sitar, 1995) ou deslizamentos translacionais rasos (*Shallow translational slide*) (Avelar *et al.*, 2011) e que caracterizam-se pela espessura muito menor do que o comprimento do movimento e falha subparalela à

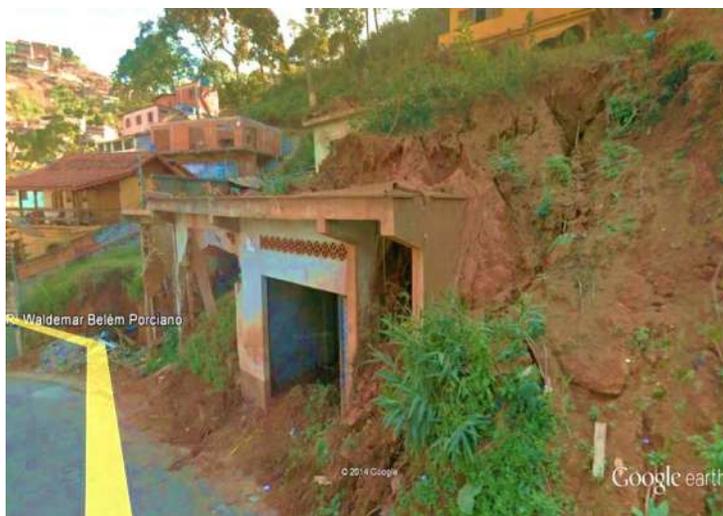
superfície da encosta (Anderson & Sitar, 1995). Essa espessura de solo varia entre 0,5 m e 2m de profundidade onde se encontra o contato com a rocha (Avelar *et al.*, 2011).

Para a determinação da resistência, as estruturas impactadas por deslizamentos urbanos de Nova Friburgo foram cadastradas nas ferramentas SIG, assim como os deslizamentos. Essas estruturas foram identificadas com a ferramenta “Regulador de datas” do programa computacional *Google Earth*, que proporcionou a visualização das estruturas em datas anteriores (12/10/2013) e posteriores (19/01/2011) ao evento que causou os deslizamentos como mostra a Figura 3.5(a) e Figura 3.5 (b).



**Figura 3.5 – Estrutura 3523 visualizada a partir do *Google Earth*. (a) Visualização anterior ao evento de deslizamentos; (b) Visualização pós evento de deslizamentos.**

Por meio da ferramenta *Google Street View*, que é um recurso disponibilizado pelo *Google Maps* e pelo *Google Earth*, que disponibiliza vistas panorâmicas de 360° na horizontal e 290° na vertical, permitindo que os usuários visualizem partes de algumas regiões do mundo ao nível do solo, todas as estruturas receberam as classificações dos parâmetros de resistência, descritos acima, possibilitando assim o cálculo da resistência de cada uma das estruturas impactadas, como mostram a Figura 3.6 e a Figura 3.7.



**Figura 3.6 –Estrutura 3523 visualizada a partir do *Google Street View*–lateral direita.**

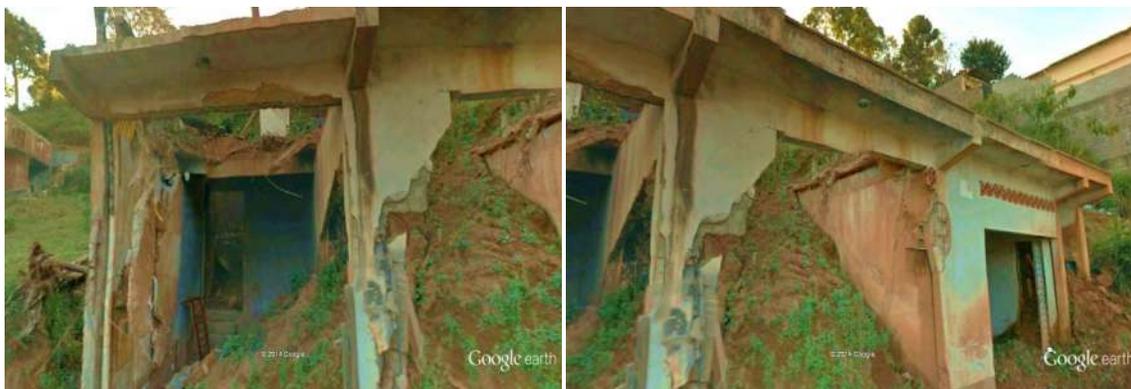


Figura 3.7 –Estrutura 3523 visualizada a partir do *Google Street View* – frontal e lateral esquerda.

Com a visualização pela ferramenta *Google Street View*, foram classificadas 173 estruturas impactadas por deslizamentos e definidos seus parâmetros de resistência, como mostra a Tabela 3.1, com destaque em negrito para a estrutura 3523 que foi apresentada anteriormente.

Tabela 3.1 – Resistência calculada a partir dos fatores de resistência definidos para as estruturas impactadas por deslizamentos.

NOME	$\xi_{sta}$	$\xi_{stv}$	$\xi_{SMN}$	$\xi_{SHT}$	$R_{str}$
3006-1	1	0,8	0,4	0,1	0,42
3149-1	1	0,4	0,4	0,4	0,50
3438-1	1	0,4	0,4	0,4	0,50
3438-2	1	0,8	0,4	0,4	0,60
3438-3	1	0,4	0,4	0,4	0,50
3438-4	0,6	0,4	0,4	0,1	0,31
3461-1	1	0,4	0,1	0,4	0,36
3461-2	1	0,4	0,1	0,4	0,36
3461-3	1	0,4	0,1	0,4	0,36
3461-4	1	0,4	0,1	0,4	0,36
3461-6	1	0,4	0,1	0,4	0,36
3461-7	1	0,4	0,1	0,4	0,36
3503-1	1	0,8	0,4	0,4	0,60
3503-2	1	0,8	0,4	0,4	0,60
3503-3	1	0,8	0,4	0,4	0,60
3517-1	1	0,4	0,1	0,4	0,36
3517-2	1	0,4	0,1	0,4	0,36
3517-3	1	0,4	0,1	0,4	0,36
3517-4	0,6	0,4	0,1	0,1	0,22
3517-6	1	0,4	0,1	0,4	0,36
<b>3523-1</b>	<b>1</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>	<b>0,4</b>	<b>0,71</b>
<b>3523-2</b>	<b>1</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>	<b>0,4</b>	<b>0,71</b>

<b>3523-3</b>	<b>1</b>	<b>0,8</b>	<b>0,8</b>	<b>0,4</b>	<b>0,71</b>
3530-1	1	0,4	0,8	0,4	0,60
3530-2	1,5	0,8	0,8	0,4	0,79
3577-1	1	0,8	0,8	0,1	0,50
3602-1	1	0,8	0,8	0,1	0,50
3602-2	1	0,8	0,8	0,1	0,50
3658-1	1,5	0,8	0,8	0,4	0,79
3692-1	1,5	0,8	0,8	0,4	0,79
3751-1	1,5	0,8	0,8	0,4	0,79
3751-2	1	0,8	0,8	0,1	0,50
3814-1	1	0,4	0,4	0,4	0,50
3975-1	1	0,4	0,4	0,4	0,50
3975-2	1	0,4	0,4	0,4	0,50

De posse desses parâmetros de resistência foram calculadas e definidas as resistências de cada uma das estruturas impactadas por deslizamentos por meio da Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, apresentada anteriormente.

### **3.5. ESTIMATIVA DA VULNERABILIDADE**

Utilizando-se o estudo desenvolvido por Li *et al.*, (2010) para o cálculo da vulnerabilidade das estruturas na área de estudo deste trabalho, foi constatada a dificuldade de obtenção do parâmetro  $D_{dpt}$ , pois se trata de uma variável correspondente a espessura de detritos deixada pela massa deslizante no momento do impacto deslizamento x estrutura. Para isso, o usuário deveria esperar o evento acontecer para observar essa variável ou ainda ter em mãos ferramentas avançadas de simulação de eventos de deslizamento para realizar uma previsão dessa espessura. Com base nessa dificuldade, foi elaborada uma metodologia de cálculo para estimativa de vulnerabilidade das estruturas utilizando parâmetros de fácil acesso ao usuário comum e aplicada a uma equação matemática que simulasse o comportamento do deslizamento com a sua real intensidade. Foram consideradas duas variáveis determinadas geometricamente: a primeira variável é a altura (H) calculada pela diferença entre a cota máxima e a cota mínima do deslizamento, considerando o fenômeno de impacto, e ainda a distância ( $d$ ) entre o centro de gravidade da estrutura e o ponto de partida da massa deslizante, denominado ponto crítico, levando em conta as irregularidades da topografia do terreno, obtida pela ferramenta *Path distance* do programa computacional *ArcGis*. Ambas variáveis foram obtidas com auxílio de imagens de satélite e das ferramentas SIG, como mostra a Figura 3.8.



**Figura 3.8 – Exemplo de obtenção da distância entre as estruturas e o ponto de partida da massa deslizante.**

Heim (1932) *apud* Nocentini *et al.* (2015) avalia o volume e a área total da massa deslizante pela tangente do ângulo *Fahrboschung* ( $\alpha$ ), definido pela relação entre a altura dada pela diferença entre as cotas de início e fim do deslizamento e a distância percorrida horizontal correspondente a esses mesmos pontos.

A segunda variável considerada, denominada gradiente modificado ( $Z$ ), é a relação entre a altura ( $H$ ) e distância real percorrida ( $d$ ), considerando a topografia do terreno, e é apresentada pela Equação (Eq. 3.1). Essa variável incorpora o conceito de gradiente considerando as irregularidades do terreno percorridas pela massa deslizante. E assim, essa variável  $Z$  foi tomada como retrato do comportamento das energias potencial e cinética envolvidas no movimento de deslizamento de terra para o cálculo da vulnerabilidade como mostra a

Tabela 3.2.

$$Z = \frac{H}{d} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

**Tabela 3.2 - Exemplo de cálculo do parâmetro Z para as estruturas impactadas pelo deslizamento 13996.**

ID <sub>estrut</sub>	d	R	ID <sub>dest</sub>	CT <sub>MAX</sub>	CT <sub>MIN</sub>	H	Z	Z/R	V <sub>calc</sub>
3523-1	30,6	0,60	13996	895	844	51,0	1,66	2,78	1,00
3523-2	40,9	0,60	13996	895	844	51,0	1,25	2,08	1,00
3523-3	25,7	0,60	13996	895	844	51,0	1,98	3,31	1,00

ID<sub>estrut</sub> – identificação da estrutura; d – distância entre o centro de gravidade da estrutura e o ponto de partida da massa deslizante em metros; R – resistência calculada; CT<sub>MAX</sub> – cota máxima do deslizamento; CT<sub>MIN</sub> – cota mínima do deslizamento; h – altura do deslizamento em metros; Z – relação h/d; V<sub>calc</sub> – vulnerabilidade calculada pela metodologia proposta;

A intensidade considerada para o desenvolvimento da metodologia proposta no presente trabalho é definida com uma relação dos parâmetros geométricos da ameaça, os deslizamentos que ocorreram na área de estudo, e das estruturas impactadas. Para a resistência, a equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** foi utilizada da mesma forma que no estudo de Li *et al.*, (2010), considerando os fatores de resistência propostos por ele, observados, para as estruturas, por meio das ferramentas: SIG, *Google Earth* e *Google Street View*.

De posse de uma equação simples, desenvolvida a partir dos dados obtidos na área de estudo, apresentada a seguir, foram calculadas as vulnerabilidades para os casos onde as observações realizadas, por meio do *Google Street View*, apontaram para vulnerabilidade da estrutura diferente de 1, o que significa que a estrutura não foi totalmente destruída pelo impacto da massa deslizante.

$$V = f(Z, R) = \left[ 1 + \left( \frac{Z}{R} \right)^{-1/0,04} \right]^{-0,05} \quad (\text{Eq. 3.2})$$

As estruturas nas quais a vulnerabilidade observada foi menor que 1 foram os elementos que fomentaram a consolidação da metodologia proposta, pois os valores de vulnerabilidades iguais a um (V=1), observados nas estruturas totalmente destruídas, não são dados capazes de fornecer repostas consistentes de resistência das estruturas impactadas, já que o elemento foi completamente destruído.

Após o estudo aprofundado e desenvolvimento do método, os dados de vulnerabilidade iguais a um foram lançados e calculados pela metodologia desenvolvida, extrapolando sua aplicação e validando a sua utilização também para esses casos.

Foram comparados os dados teóricos gerados pelo método proposto de cálculo da estimativa de vulnerabilidade com os dados das vulnerabilidades calculados para as estruturas observadas dentro da área de estudo.

Em busca da significação físico-matemática da equação proposta, obteve-se a seguinte dedução matemática e readequação dos termos apresentados pela Equação (Eq. 3.2. A relação entre o gradiente modificado ( $Z$ ) e a resistência das estruturas ( $R$ ) expostas ao evento adverso foi denominada como  $T$ , conforme equação abaixo:

$$T = \frac{Z}{R} \quad (\text{Eq. 3.3})$$

Segundo Badillo (2010), todos os fenômenos naturais possuem a qualidade da beleza, ou seja, são ordenados e simples. A qualidade da ordem significa que esses fenômenos podem ser descritos com equações matemáticas, enquanto que a qualidade da simplicidade significa que as referidas equações são harmônicas. Harmonia significa que as equações devem ser completas e simétricas.

Variáveis “apropriadas” são aquelas que descrevem o fenômeno de forma mais simples possível, por exemplo, ocorrendo uma mudança de volume, o próprio volume ( $V$ ) junto com ( $I + e$ ) são as variáveis apropriadas, enquanto que o índice de vazios ( $e$ ) por si só não o seria. Considerando um fenômeno descrito pelas variáveis “apropriadas”  $x$  e  $y$  de tal forma de  $y = y(x)$  com  $x$  no domínio real de  $0$  a  $\infty$ . Para um conjunto de valores extremos de  $y$ ,  $y_0 = y(0)$  e  $y_\infty = y(\infty)$  o domínio real de  $y$  não está completo. Considere-se então  $z = z(y)$  a função “apropriada” de  $y$  com domínio real completo, ou seja,  $z(y_0) = 0$  e  $z(y_\infty) = \infty$ . Uma característica desta função  $z(y)$  é que mesmo se tratando de uma função mais simples satisfaz as condições mencionadas. Os dois princípios básicos complementares são:

- A equação que relaciona  $y$  e  $x$  pode existir unicamente através de um parâmetro adimensional, e deve, independentemente de pontos críticos, satisfazer as condições de fronteira a saber:  $y_0 = y(0)$  e  $y_\infty = y(\infty)$ .
- A relação entre  $y$  e  $x$  pode existir unicamente através da função “apropriada”  $z$  e deve possuir uma proporcionalidade não-linear satisfatória.

A relação entre  $y$  e  $x$  deve ser dada por:

$$\frac{dz}{z} = a \frac{dx}{x} \quad (\text{Eq. 3.4})$$

Onde  $a$  é um parâmetro adimensional de proporcionalidade.

A equação (Eq. 3.4) define uma “proporcionalidade não linear apropriada” entre  $y$  e  $x$  através de uma função  $z = z(y)$ :

$$z = \frac{1}{y - y_\infty} - \frac{1}{y_0 - y_\infty} \quad (\text{Eq. 3.5})$$

Com  $y_\infty < y_0$ .

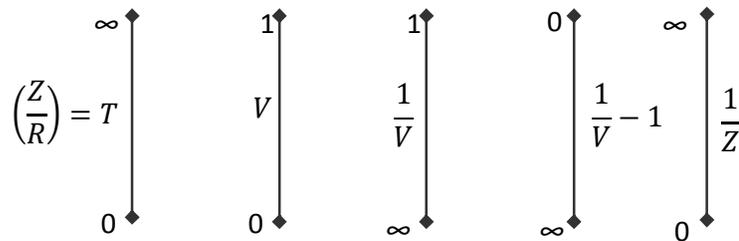
Note-se que na Equação (Eq. 3.5,  $z(y_0)=0$  e  $z(y_\infty)=\infty$ ). Detalhes adicionais são apresentados por Badillo (1985), onde o autor usa esse princípio, chamado “princípio da proporcionalidade natural”, para obter equações gerais de comportamento em problemas clássicos de engenharia geotécnica, como recalques de fundações, adensamento de solos, comportamento cíclico de solos granulares, entre outros (Badillo, 2010).

Tomando o caso da vulnerabilidade física e sua dependência da função  $T$ , encontra-se que o domínio real completo de  $T$  é de  $0$  a  $\infty$ . Por outra parte, a vulnerabilidade  $V$ , assume valores no domínio de  $0$  a  $1$ . O fenômeno de interação entre a massa deslizante e a estrutura fica descrito por meio de duas variáveis simples ( $V$  e  $T$ ). A relação entre elas, de acordo com o princípio da proporcionalidade natural, deve ser feita através de uma função “apropriada”, cujo domínio seja completo de  $0$  a  $\infty$ . Desta forma, as funções mais simples entre  $V$  e  $T$  com domínio completo são  $z = \frac{1}{V} - 1$  e  $T$ . Desta forma, quando  $T$  varia de  $0$  a  $\infty$ ,  $z$  varia de  $\infty$  a  $0$ . A relação entre elas deve ser do tipo:

$$\frac{dz}{z} = -\delta \frac{dT}{T} \quad (\text{Eq. 3.6})$$

Onde  $\delta$  é o coeficiente de proporcionalidade.

A Figura (Eq. 3.3 apresenta um esquema que pode ser usado para melhor visualizar a relação entre as variáveis mencionadas.



**Figura 3.9 – Diagrama esquemático para a função  $V=f(T)$ .**

Note-se que quando  $T$  varia de  $0$  a  $\infty$ ,  $1/z$  também varia de  $0$  a  $\infty$  e desta forma pode ser escrito:

$$\frac{d\frac{1}{z}}{\frac{1}{z}} = \delta \frac{dT}{T} \quad (\text{Eq. 3.7})$$

Então:

$$\frac{d\frac{1}{z}}{\frac{1}{z}} = \frac{-z^2 dz}{\frac{1}{z}} = -\frac{dz}{z} \quad (\text{Eq. 3.8})$$

Obtendo assim a Equação (Eq. 3.6).

A integração da Equação (Eq. 3.8) produz:

$$\ln \int_{z_1}^z z = \ln \int_{T_1}^T T^{-\delta} \quad (\text{Eq. 3.9})$$

Na qual  $(T_1, Z_1)$  é um ponto conhecido. Então:

$$\frac{z}{z_1} = \left(\frac{T}{T_1}\right)^{-\delta} \quad (\text{Eq. 3.10})$$

Introduzindo agora o valor de z:

$$\frac{\frac{1}{V} - 1}{\frac{1}{V_1} - 1} = \left(\frac{T}{T_1}\right)^{-\delta} \quad (\text{Eq. 3.11})$$

A partir o desenvolvimento matemático da Equação (Eq. 3.11), com o ajuste de calibração do modelo partindo-se dos dados observados na área de estudo, no município de Nova Friburgo, foi possível estabelecer uma equação em que V é uma variável diretamente proporcional a T. Foi obtido um valor de controle  $V_1$  que conduz para uma variável de controle  $T_1$  para os casos estudados, foi verificado que a variável T assume o valor de 0,55, na maioria dos casos onde a vulnerabilidade (V) assume o valor de 0,5, e a partir da substituição de desses valores foi possível a dedução da Equação (Eq. 3.14), de quantificação da vulnerabilidade física, conforme a seguir:

$$\frac{1}{V} = \left(\frac{1}{V_1} - 1\right) \left(\frac{T}{T_1}\right)^{-\delta} + 1 \quad (\text{Eq. 3.12})$$

$$V = \frac{1}{\left(\frac{1}{V_1} - 1\right) \left(\frac{T}{T_1}\right)^{-\delta} + 1} \quad (\text{Eq. 3.13})$$

Assumindo que  $V_1 = 0,5$

(Eq. 3.14)

$$V = \frac{1}{\left(\frac{T}{T_1}\right)^{-\delta} + 1}$$

(Eq. 3.15)

$$V = \left[ \left(\frac{T}{T_1}\right)^{-\delta} + 1 \right]^{-1}$$

Assumindo que  $T_1 = 0,55$

(Eq. 3.16)

$$V = \left[ 1 + \left(\frac{T}{0,55}\right)^{-3,5} \right]^{-1}$$

#### A Equação

(Eq. 3.16 foi definida como a fórmula capaz de quantificar a vulnerabilidade física em elementos estruturais expostos a eventos adversos de deslizamentos de terra em condições similares as condições de desenvolvimento desse estudo.

Acredita-se que o coeficiente  $\delta$  é a variável que governa a forma de interação entre o deslizamento e a estrutura. Partindo-se da análise dos dados de campo, da área de estudo, declina-se pelo melhor ajuste gráfico quando o coeficiente  $\delta$  assume o valor de 3,5.

Para o valor de coeficiente  $\delta$  igual a 2,0, infere-se, pela análise do gráfico, uma redução da interação entre a massa deslizante e a estrutura e, conseqüentemente, ocorre uma redução no potencial de dano a estrutura.

Aplicando-se um valor de coeficiente  $\delta$  igual a 5,0 observa-se um comportamento de maior interação entre o deslizamento e a estrutura, observado pelo rápido aumento da vulnerabilidade e por conseguinte, uma aumento de seu potencial de destruição para um mesmo elemento estrutural exposto –Figura 3.10.

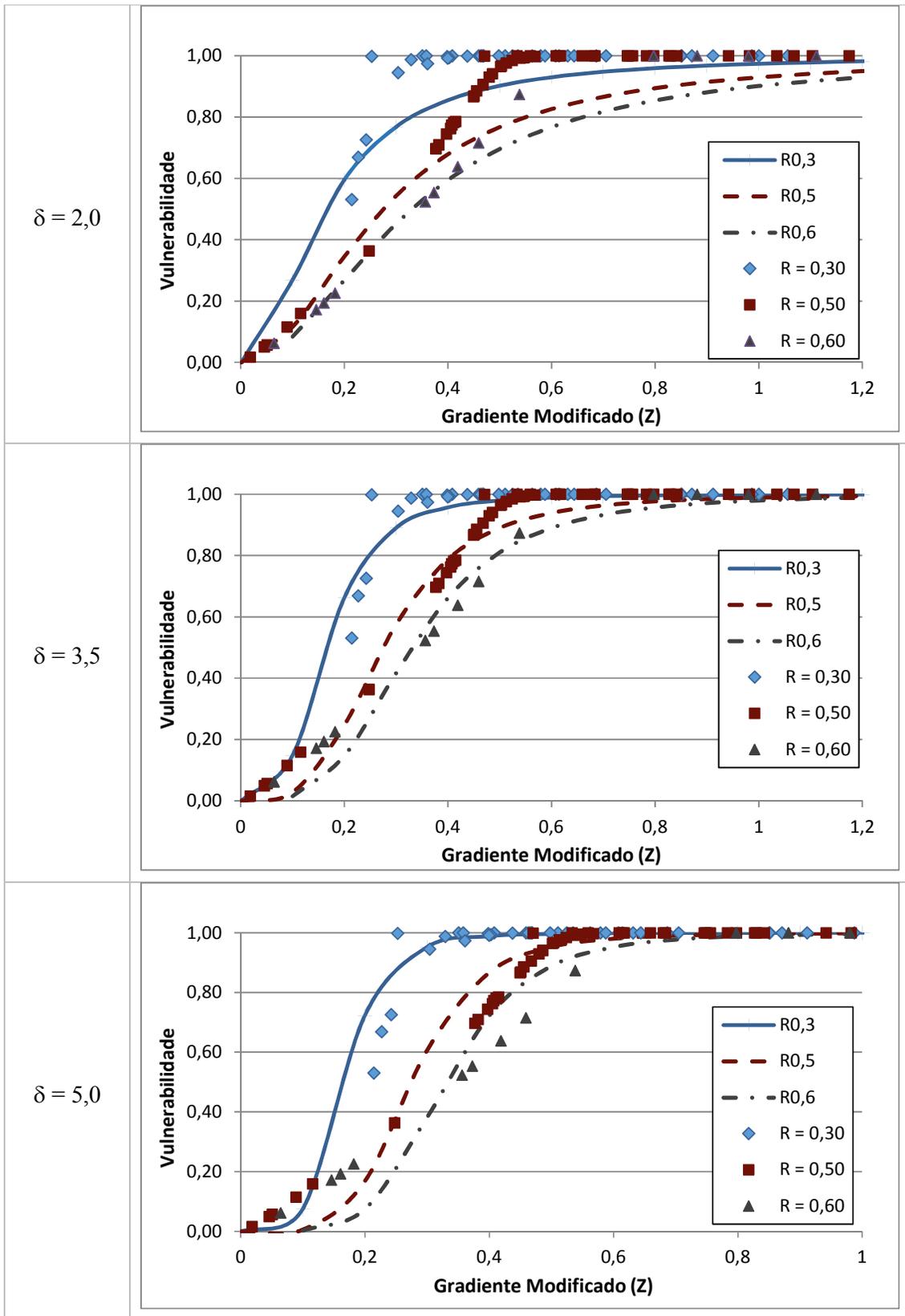


Figura 3.10 – Ajuste para o coeficiente  $\delta$ .

Como mostrado pela Figura 3.10, os valores do coeficiente  $\delta$  interferem diretamente no cálculo da vulnerabilidade da estrutura exposta. Para melhor visualização dessa influência, a Figura 3.11 apresenta a relação desses parâmetros em três casos:

- Caso 1 – A estrutura está com um gradiente modificado –  $Z$  – igual a 1,0, ou seja, a altura do deslizamento, que é a ameaça a essa estrutura, assume um valor igual ou muito próximo a distância que a massa deslizante percorrerá caso o evento ocorra. Nesse caso, o aumento da resistência da estrutura, bem como a variação do coeficiente  $\delta$  não tem capacidade de reduzir a vulnerabilidade. O evento tem uma intensidade alta e a estrutura está muito vulnerável a ele, pela proximidade que a estrutura está do ponto de desprendimento da massa, que está representado pelo valor de gradiente modificado igual a 1,0.
- Caso 2 - A estrutura está com um gradiente modificado –  $Z$  – igual a 0,5, ou seja, a distância na qual a estrutura se encontra do foco de deslizamento é o dobro ou próximo do dobro da altura dele. Nesse contexto, a vulnerabilidade é aumentada pela pequena influência da resistência da estrutura e, é influenciada pela variação do coeficiente  $\delta$ , em que o potencial de dano estrutural é crescente com o aumento da interação entre a massa deslizante e o elemento estrutural, o que mostra que quanto maior o coeficiente  $\delta$  maior é a interação entre a massa deslizante e a estrutura, e com esse aumento de interação, a resistência perde influência na determinação da vulnerabilidade estrutural.
- Caso 3 – A estrutura está com um gradiente modificado –  $Z$  – igual a 0,2, ou seja, a estrutura está muito distante do ponto de desprendimento da massa, cerca de cinco vezes a altura do deslizamento. Para esse caso, o aumento da resistência estrutural reduz consideravelmente a vulnerabilidade e o aumento do coeficiente  $\delta$ , reduz a vulnerabilidade pois, a resistência estrutural exerce uma forte influência na determinação da vulnerabilidade.

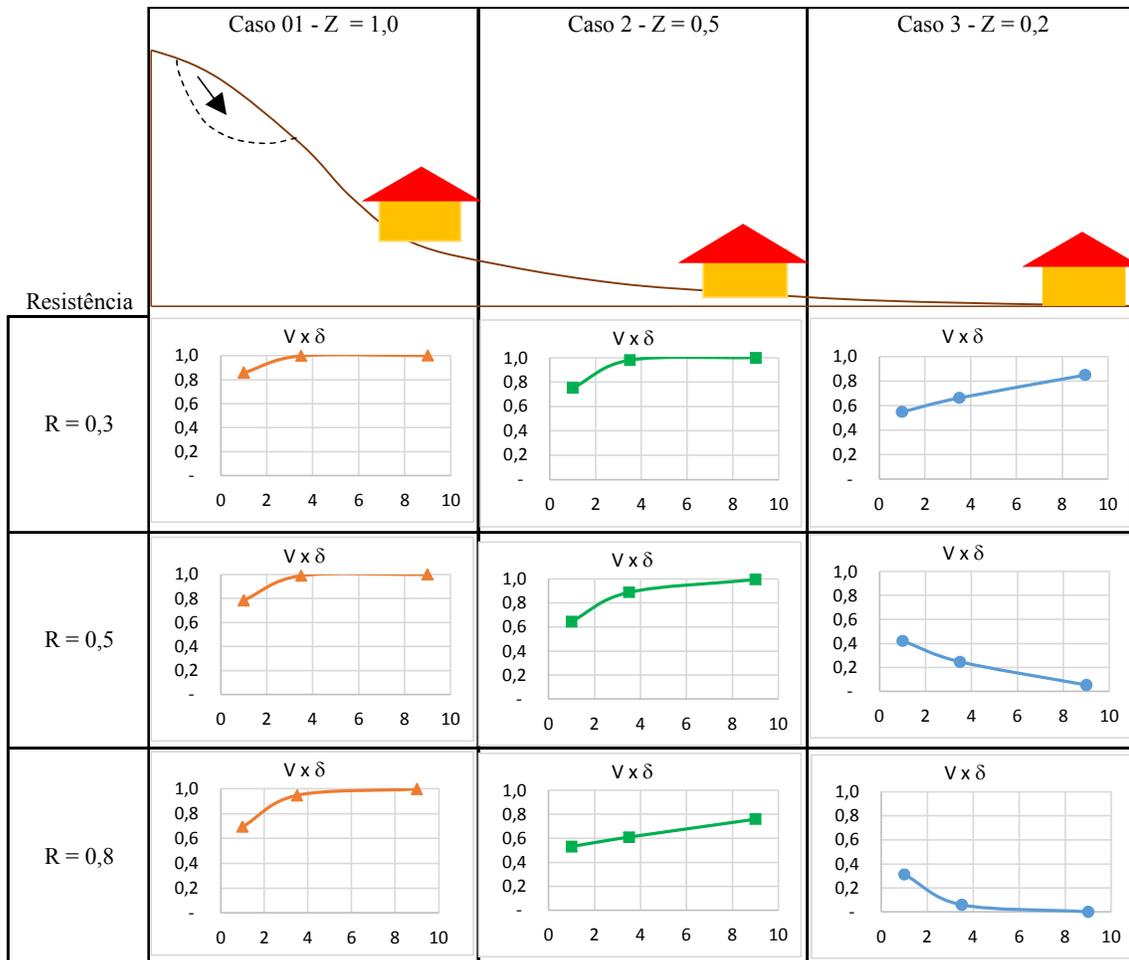


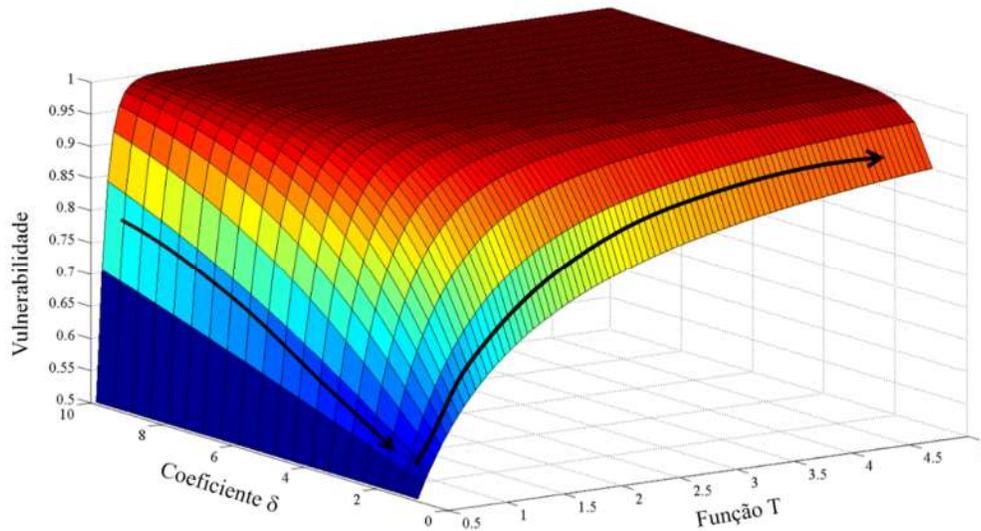
Figura 3.11 – Análise do efeito do coeficiente  $\delta$  na determinação da vulnerabilidade.

Na Figura 3.11 nota-se que em valores de gradiente modificado ( $Z$ ) menores que 1, como por exemplo, 0,2, o comportamento da vulnerabilidade se inverte em função do aumento do coeficiente  $\delta$ . Esse fenômeno é explicado pela distância maior entre a estrutura e o ponto de partida da massa deslizando, quanto maior a distância, menor será o valor do gradiente modificado e a interação massa deslizando/estrutura resultará em uma redução da vulnerabilidade já que estará sob maior influência da resistência estrutural.

A Figura 3.12 apresenta a superfície de vulnerabilidade gerada a partir da análise da variação do coeficiente  $\delta$  e da variável  $T$ . Os limites impostos foram os encontrados nas análises dos dados da área o estudo.

É nítido o crescimento da vulnerabilidade para valores altos de coeficiente  $\delta$ , independentemente da variação do parâmetro  $T$ , que se justifica pelo grande interação entre a massa deslizando e o elemento estrutural, e a pequena influência da resistência estrutural para esse caso. Com o decréscimo de coeficiente  $\delta$ , acredita-se na redução da interação entre o

deslizamento e a estrutura, pela contribuição da resistência estrutural na quantificação da vulnerabilidade.



**Figura 3.12 – Superfície de Vulnerabilidade considerando a função T e o coeficiente  $\delta$ .**

A partir da obtenção e consolidação dos parâmetros da Equação (Eq. 3.16 com desenvolvimento teórico matemático e físico, a metodologia foi aplicada em uma região de encostas na cordilheira central da Colômbia, como é apresentado a seguir.

### **3.6.APLICAÇÃO DA METODOLOGIA**

A aplicação da metodologia desenvolvida foi realizada em uma região de encostas na cordilheira central da Colômbia. Os insumos disponibilizados para a aplicação do método foram:

- Modelo numérico de terreno (MNT) da área de estudo com curvas de nível com equidistância de 2m;
- Mapa de probabilidade de falha a eventos de deslizamentos de terra desenvolvido com base no método de taludes infinitos.

Foram cadastradas e georreferenciadas as 496 estruturas presentes na área de aplicação da metodologia, atribuindo-se valores aos parâmetros de resistência previamente definidos, quais sejam: número de pavimentos, grau de manutenção, tipologia estrutural, profundidade da

fundação e uma variável  $R$ , que representa as resistências das estruturas, calculada pela Equação **Erro! Fonte de referência não encontrada.** A partir da análise dos dados de declividades, juntamente com as probabilidades de falha na área, foram levantados os quatorze pontos mais críticos, ou seja, os pontos com maior probabilidade de falha para deslizamentos de terra na encosta estudada.

Para cada ponto crítico, a metodologia foi aplicada, iniciando pelo cálculo da variável  $d$ , que corresponde a distância entre o centro de gravidade da estrutura e o ponto de partida da massa deslizante, considerando a topografia do terreno. Utilizou-se a ferramenta SIG para o cálculo do caminho crítico, que é o percurso de menor custo, ao adotar o MNT como base de cálculo das distâncias de um pixel para outro.

Para se obter essa distância  $d$  foi utilizada a ferramenta Path Distance, do programa ArcGis vs.10.2.2, utilizando como raster de entrada o raster que contém os pontos críticos da área de estudo, e como superfície de entrada, o modelo numérico do terreno, a ferramenta calcula o caminho de menor custo com base na superfície de entrada a partir de uma origem, assim foi obtido as distâncias entre cada ponto crítico e o centro de gravidade das estruturas da área estudada.

Para a determinação de  $H$ , foi calculada a diferença entre as cotas dos pontos críticos e as cotas dos outros pontos do MNT, também com a ferramenta SIG de álgebra de mapas.

A partir da determinação das variáveis  $d$  e  $H$ , foi possível o cálculo do gradiente modificado  $Z$  para cada ponto crítico analisado.

Com a determinação de  $Z$  e o cálculo de  $R$ , para cada ponto crítico determinado, calculou-se a variável  $T$ . Em seguida, utilizando a equação

(Eq. 3.16 de quantificação da vulnerabilidade definida pela metodologia proposta neste trabalho, com a qual foi determinada a vulnerabilidade física para as estruturas da área estudada. Após a determinação da vulnerabilidade dos elementos expostos, a partir de todos pontos críticos da área, analisou-se o plano de informações de vulnerabilidades máximas, atribuindo-as aos polígonos das construções, dando a cada uma destas sua respectiva vulnerabilidade na análise conjunta dos pontos críticos que ameaçam esta estrutura, possibilitando assim a análise de vulnerabilidade de cada estrutura presente na área estudada, considerando suas características de resistência e localização, diante dos pontos críticos de deslizamentos de terra que as ameacem particularmente.

## 4. RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados gerados no estudo e o desenvolvimento da metodologia de cálculo da estimativa da vulnerabilidade proposta neste trabalho, bem como as análises do método.

### 4.1. ÁREA DE ESTUDO

Como esclarecido no capítulo de metodologia, a definição da área de estudo foi escolhida após o conhecimento da área do município de Nova Friburgo, que está entre as áreas mais afetadas pelos deslizamentos de terra dos dias 11 e 12 de janeiro do ano de 2011, a partir de imagens de satélite disponíveis e tomadas logo após o episódio.

Foi considerado o inventário de movimentos de massa, elaborado por Tiga (2013), utilizando a técnica de interpretação visual de imagens, deflagrados pelo evento de chuvas de janeiro de 2011 na Região Serrana do Rio de Janeiro. Foram mapeados 7.268 movimentos de massa, cobrindo uma área de 1.217,67 km<sup>2</sup>. Destes movimentos, extraiu-se 1.619 deslizamentos, objetos da presente análise. A Figura 4.1 ilustra a frequência de deslizamentos de terra ocorridos dentro dos limites do município de Nova Friburgo.

Foi criado, inicialmente, um banco de dados e um projeto no software SPRING, específicos para os deslizamentos na área de estudo, exatamente no intuito de, além de definir a área física de trabalho, preparar e estruturar as informações espaciais pertinentes ao caso estudado. Destacam-se algumas características do projeto que foram estabelecidas no ato da sua definição: (i) Projeção e Datum utilizados: UTM/Datum SIRGAS 2000; (ii) Retângulo envolvente que define a área piloto de estudo, determinado em coordenadas planas:  $X_1 = 731.184\text{m}$ ;  $Y_1 = 7.518.504\text{m}$ ;  $X_2 = 771.010\text{m}$ ;  $Y_2 = 7.551.441\text{m}$ ;

A partir disto, importaram-se informações geográficas da região, contidas em arquivos sob o formato shape, as quais são originadas do servidor de FTP do modelo de dados e metadados do programa de atualização permanente do IBGE, e dos materiais obtidos em órgãos da administração municipal de Nova Friburgo e do estado do Rio de Janeiro. O conjunto de dados relevantes para a concretização do trabalho engloba o mapeamento sistemático da área, o modelo digital do terreno e ortofotos – todos na escala de 1:25.000 – cartas topográficas de 1:25.000 e 1:50.000 do município, a hidrologia caracterizada pelas linhas de drenagem, malha viária e estruturas presentes, divisão do município por bairros, e ainda imagens de satélites, sendo essas: uma QuickBird, que é uma imagem com resolução espacial de 20m horizontal

(CE90%) e 60cm de resolução espacial em cores naturais e falsas cores e uma imagem *GeoEye-1*, disponibilizada com resolução espacial de 2 m.

Essas informações foram dispostas, organizadas em categorias e em planos de informações definidos, todos sob o formato inicial de entidades vetoriais. A partir do modelo numérico de terreno, derivaram-se os planos de informações referentes à declividade, alturas e distâncias.

Em relação aos parâmetros de caracterização do solo, foram utilizados os resultados presentes na pesquisa de Lacerda, (2004) e Avelar *et al.* (2011), conseguidos a partir de ensaios de laboratório e de campo realizados pelos autores na área de estudo.

A área da Região Serrana delimitada para o estudo foi a porção urbana e periurbana do município de Nova Friburgo. Os deslizamentos cadastrados pelos outros autores foram georreferenciados, realizando-se alguns ajustes de forma, como mostra a Figura 4.1.



**Figura 4.1 – Município de Nova Friburgo após o evento de deslizamento de terra e após a realização do inventário de deslizamentos representados em linhas vermelhas.**

## **4.2. LEVANTAMENTO DOS DESLIZAMENTOS**

Os contornos dos deslizamentos de terra, extraídos a partir das imagens, foram inseridos em uma base topográfica de 1:25.000, escala no qual um MNT – Modelo Numérico de Terreno – foi elaborado, com uma grade de 10x10m, para análises morfométricas posteriores, com apoio de ferramentas computacionais, como o *Spring 5.2* e a *ArcGis 10*. Foi criado um banco de dados do trabalho com registros dos deslizamentos de terra, de acordo com a classificação de Varnes

(1978). As características das formas, especialmente coordenadas, área, perímetro e cotas das superfícies rompidas, foram armazenados no banco de dados. Parte desse banco de dados é mostrada pela Tabela 4.1:

**Tabela 4.1 – Banco de dados dos deslizamentos de terra ocorridos em Nova Friburgo em Janeiro de 2011.**

ID	CT <sub>MAX</sub>	CT <sub>MED</sub>	CT <sub>MIN</sub>	DECL <sub>MAX</sub>	DECL <sub>MED</sub>	DECL <sub>MIN</sub>
13041	978	973	968	26,3	25,3	24,2
13042	983	974	963	21,8	16,3	10,8
13043	960	953	944	19,5	19,2	18,8
13455	1079	1010	941	34,9	27,1	5,6
13456	1052	1014	956	35,4	29,4	13,2
13457	1025	985	939	44,3	35,5	19,6
13458	982	976	967	33,3	16,7	9,4
13459	981	953	919	30,7	20,9	11,7
13466	923	906	885	23,5	18,2	5,6
13502	917	897	879	24,5	18,5	11,9
13553	1019	943	883	30,7	23,6	8,8
13927	1002	969	942	26,3	22,2	19,8
13930	927	922	920	12,3	7,4	2,6
13931	927	925	922	20,6	15,7	10,6
13932	953	946	935	21,3	21,3	21,3
13933	956	952	947	13,5	11,4	8,8
13935	914	908	905	23,1	18,5	15,2
13936	953	942	935	26,3	24,3	21,9
13937	1016	1001	986	24,4	23,8	23,2
13942	922	903	880	26,1	23,1	19,4
13945	933	922	915	27,5	17,5	7,4
13962	910	903	896	21,8	19,9	17,1
13964	933	924	916	24,5	22,8	19,9
13965	929	906	881	22,6	17,6	10,3
13975	927	891	872	42,2	21,3	9,1
13978	965	919	872	37,1	26,6	10,5
13980	894	883	873	25,4	20,1	13,2
13990	916	890	860	21,8	20,3	17,8
13992	879	873	869	23,1	20,3	17,4
13996	876	871	865	21,8	20	18,3
13997	915	887	859	32,6	24,5	9
13999	905	893	881	22,8	22,2	21,8
14052	886	870	857	21,5	20,1	15,3
14084	917	885	859	28,3	23,8	18,4
14085	877	867	857	22,2	17,3	8,2
14086	929	921	908	29,3	23,2	11
14087	906	893	884	24	19,4	12,6
14088	896	896	885	19,8	17,7	14,7

14089	924	902	880	13,8	12,7	11,7
14154	894	893	892	18,7	17,5	16,4

ID – identificação do deslizamento;  $CT_{MAX}$  – cota máxima do deslizamento;  $CT_{MED}$  – cota média do deslizamento;  $CT_{MIN}$  – cota mínima do deslizamento;  $DECL_{MAX}$  – declividade máxima do deslizamento;  $DECL_{MED}$  – declividade média do deslizamento;  $DECL_{MIN}$  – declividade mínima do deslizamento;

Na área de estudo, delimitada pelas fronteiras do município de Nova Friburgo, foram levantados os dados de 1619 deslizamentos, sendo que destes, 360 foram denominados "urbanos", devido à sua localização no interior da malha urbana do Município. Após o cadastro das estruturas impactadas, foi realizado o estudo detalhado de 72 deslizamentos que impactaram mais de 350 estruturas, como será esclarecido a seguir.

### 4.3. LEVANTAMENTO DAS ESTRUTURAS

Conforme detalhado no capítulo de Metodologia, as estruturas foram identificadas como impactadas pela análise das imagens na ferramenta “Regulador de datas”, do *Google Maps* e *Google Earth*, e a partir dessa identificação, foram cadastradas nas ferramentas computacionais *ArcGis10* e *Spring5.2*.

No município de Nova Friburgo foram cadastradas as estruturas que foram impactadas pelos deslizamentos urbanos, totalizando 360 estruturas. Essas foram classificadas de acordo com os parâmetros de resistência reportados por Li *et al.* (2010), o que gerou um banco de dados além das informações obtidas pela análise da imagem, contendo: identificação da estrutura, área, perímetro, localização dada pelas coordenadas, como mostra a Tabela 4.2.

**Tabela 4.2 – Banco de dados das estruturas impactadas em Nova Friburgo pelo evento de Janeiro de 2011.**

ID	Área	Perímetro	Coordenada	Coordenada	d (m)	Fenômeno
	(m <sup>2</sup> )	(m)	X	Y		
4516-1	269	71	754389	7536614	44	2
4516-3	82	39	754434	7536604	88	1
4516-4	95	39	754434	7536613	90	1
4752-1	275	72	754453	7536722	126	1
4160-1	64	37	754526	7536769	50	1
4160-2	37	25	754526	7536752	68	1
4160-3	57	30	754533	7536756	65	1
4160-4	79	36	754541	7536761	63	1
3438-1	45	27	754548	7536904	22	1
3438-2	106	41	754538	7536911	18	1
3438-3	26	22	754547	7536915	27	1
3438-4	48	28	754553	7536917	32	1
3438-5	60	32	754568	7536928	52	1

4078-1	81	38	754508	7536925	20	1
4078-2	46	29	754515	7536932	29	1
4078-4	60	32	754503	7536947	44	1
4078-3	67	35	754494	7536942	33	1
4078-5	65	32	754499	7536957	46	1
4078-6	50	29	754513	7536953	55	1
4078-7	64	33	754521	7536960	66	1
4078-8	56	33	754522	7536945	44	1
4078-9	77	35	754518	7536970	68	1
4078-10	66	36	754507	7536966	58	1
4168-1	111	44	754460	7537003	26	1
3692-1	99	41	754582	7537086	42	1
3692-2	73	35	754575	7537071	57	1
3692-3	70	34	754588	7537073	25	1
3834-1	109	42	755405	7537126	74	1
3834-2	79	37	755390	7537113	71	1
3834-3	138	46	755411	7537141	73	1
3530-1	82	41	755398	7537191	19	2
3530-2	67	33	755390	7537187	16	2
3530-3	62	32	755426	7537160	63	1
3006-1	46	32	755430	7537209	17	1
4089-1	737	118	755303	7537377	144	1
4089-2	167	55	755356	7537394	109	1
4089-3	1437	158	755270	7537396	182	1
4089-4	114	45	755416	7537314	19	2
4089-5	60	31	755389	7537325	46	2
4089-6	85	38	755366	7537365	82	1
4089-7	140	55	755349	7537378	106	1
4089-8	185	56	755394	7537378	5	2
3517-1	130	46	755493	7537232	56	1

ID – identificação da estrutura;  $d$ – distância entre o ponto de partida da massa deslizante e o centro de gravidade da estrutura; Fenômeno – tipo de ação do deslizamento sobre a estrutura;

Durante a análise dos dados, foi determinada a distância entre o centro de gravidade da estrutura e o ponto de partida da massa do deslizamento e foi observado o fenômeno no qual a estrutura foi afetada pelo deslizamento, deslizamento. A partir daí, definiu-se como 1 o fenômeno no qual a estrutura recebe o impacto da massa deslizante, que desprende-se, afetando o objeto estrutural. Já no fenômeno definido como 2, a estrutura sofreu arraste pelo deslizamento, ou seja, a estrutura foi levada juntamente com a massa deslizante. Para o desenvolvimento deste trabalho foram consideradas as estruturas que sofreram o fenômeno 01.

Após esse levantamento, foram calculadas as resistências para cada estrutura de acordo com a metodologia proposta por Li *et al.* (2010), detalhada no capítulo anterior e apresentada pela Tabela 4.3 abaixo:

**Tabela 4.3–Resistência das estruturas segundo metodologia proposta por Li *et al.* (2010).**

ID <sub>estrut</sub>	Área (m <sup>2</sup> )	$\xi_{SFD}$	$\xi_{STY}$	$\xi_{SMN}$	$\xi_{SHT}$	R
3149-2	57,80	0,60	0,40	0,40	0,10	0,31
3317-1	107,70	1,00	0,40	0,40	0,40	0,50
3438-5	60,50	1,00	0,80	0,40	0,40	0,60
3461-5	74,70	1,00	0,40	0,10	0,40	0,36
3517-5	174,00	1,50	0,80	0,80	0,40	0,79
3530-3	61,60	1,00	0,40	0,80	0,40	0,60
3692-2	72,60	1,00	0,80	0,80	0,40	0,71
3692-3	70,50	1,50	0,80	0,80	0,40	0,79
3814-2	54,70	0,60	0,40	0,40	0,10	0,31
3817-1	81,00	1,00	0,80	0,40	0,40	0,60
3817-2	119,70	1,50	0,80	0,80	0,40	0,79
3834-1	108,60	1,00	0,80	0,40	0,40	0,60
3834-2	78,60	1,00	0,40	0,40	0,40	0,50
3834-3	138,10	1,00	0,40	0,40	0,40	0,50
3975-3	197,00	1,00	0,80	1,20	0,40	0,79
4089-2	166,80	1,50	0,80	0,80	0,40	0,79
4089-8	185,20	0,60	0,40	0,40	0,10	0,31
4160-2	37,40	0,60	0,40	0,10	0,10	0,22
4160-3	57,00	0,60	0,40	0,10	0,10	0,22
4160-4	79,10	0,60	0,40	0,10	0,10	0,22
4220-1	138,40	1,50	0,80	0,80	0,40	0,79
4224-6	173,00	1,00	0,40	0,40	0,40	0,50
4251-2	31,20	1,00	0,40	0,40	0,40	0,50
4342-5	41,90	1,50	0,80	0,80	0,40	0,79
4342-6	83,50	1,50	0,80	0,80	0,90	0,96
4479-10	147,50	1,00	0,80	0,40	0,40	0,60
4479-11	70,70	1,00	0,80	0,40	0,40	0,60
4479-12	50,00	1,00	0,80	0,40	0,40	0,60
4479-13	86,50	1,00	0,80	0,40	0,40	0,60
4516-2	31,80	0,60	0,40	0,40	0,10	0,31
4516-4	95,40	0,60	0,40	0,40	0,10	0,31
4549-1	114,60	1,50	0,80	1,20	0,40	0,87
4549-2	228,40	1,50	0,80	1,20	0,40	0,87
4549-3	133,20	1,50	0,80	1,20	0,40	0,87

D<sub>estrut</sub> – identificação da estrutura;  $\xi_{SFD}$  – parâmetro de resistência para a profundidade da fundação;  $\xi_{STY}$  - Fator de resistência para tipologia estrutural;  $\xi_{SMN}$  - Fator de resistência para o estado de manutenção da edificação;  $\xi_{SHT}$  – Fator de resistência para o número de pavimentos; R – Resistência calculada;

Após a realização da observação dos parâmetros de resistência e o cálculo da resistência de cada uma das estruturas estudadas, foram observados os danos sofridos pelas estruturas classificando-os em parcialmente leve, parcial médio, parcial intenso e total, e ainda atribuído um valor para a vulnerabilidade, proveniente, também, de observação, de acordo com a avaria sofrida por cada estrutura, como mostra a Tabela 4.4.

**Tabela 4.4– Vulnerabilidade observada das estruturas e o dano observado por meio das ferramentas.**

<b>ID</b>	<b>R</b>	<b>Vulnerabilidade observada</b>	<b>Dano observado</b>
3149-2	0,31	0,5	Parcial médio
3317-1	0,50	0,6	Parcial médio
3438-5	0,60	0,5	Parcial médio
3461-5	0,36	0,8	Parcial intenso
3517-5	0,79	0,7	Parcial intenso
3530-3	0,60	0,3	Parcial leve
3692-2	0,71	0,1	Parcial leve
3692-3	0,79	0,6	Parcial médio
3814-2	0,31	0,5	Parcial médio
3817-1	0,60	0,4	Parcial leve
3817-2	0,79	0,4	Parcial leve
3834-1	0,60	0,6	Parcial médio
3834-2	0,50	0,8	Parcial intenso
3834-3	0,50	0,8	Parcial intenso
3975-3	0,79	0,5	Parcial médio
4089-2	0,79	0,3	Parcial leve
4089-8	0,31	0,5	Parcial médio
4160-2	0,22	0,8	Parcial intenso
4160-3	0,22	0,8	Parcial intenso
4160-4	0,22	0,7	Parcial intenso
4220-1	0,79	0,6	Parcial médio
4224-6	0,50	0,9	Parcial intenso
4251-2	0,50	0,8	Parcial intenso
4342-5	0,79	0,5	Parcial médio
4342-6	0,96	0,5	Parcial médio
4479-10	0,60	0,5	Parcial médio
4479-11	0,60	0,6	Parcial médio
4479-12	0,60	0,7	Parcial intenso
4479-13	0,60	0,6	Parcial médio
4516-2	0,31	0,2	Parcial leve
4516-4	0,31	0,2	Parcial leve
4549-1	0,87	1,0	Total
4549-2	0,87	1,0	Total
4549-3	0,87	1,0	Total

D – identificação da estrutura; R – Resistência calculada;

#### 4.4. ESTIMATIVA DA VULNERABILIDADE

A metodologia proposta neste trabalho para quantificar a vulnerabilidade das estruturas partiu da análise da relação entre os parâmetros geométricos da ameaça, dos deslizamentos que ocorreram na área de estudo, e das estruturas impactadas.

Nesse contexto, foram determinadas três variáveis importantes:

- Altura do deslizamento ( $H$ ) - definida pela diferença entre a cota máxima e a cota mínima do deslizamento;
- Distância ( $d$ ) – distância entre o centro de gravidade da estrutura e o ponto de partida da massa do deslizamento;
- Gradiente Modificado ( $Z$ ) – relação entre a altura do deslizamento e a distância entre o ponto de partida da massa deslizante e a estrutura impactada, considerando-se a topografia, como mostra a Equação (Eq. 4.1):

$$Z = \frac{H}{d} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

Para a estimativa da vulnerabilidade e proposição da metodologia, foram consideradas, no primeiro momento, apenas as estruturas com vulnerabilidade diferente de 1, ou seja, as estruturas que sofreram o impacto resistindo a ele parcialmente, sendo estas o foco da análise por observação, pois as estruturas que sofreram dano total pelo impacto não fornecem dados confiáveis para a determinação da metodologia de cálculo, visto que não é possível calibrar o cálculo pela vulnerabilidade observada em estruturas completamente destruídas. E pela equação mostrada a seguir, foram determinadas as vulnerabilidades para as estruturas com vulnerabilidades diferentes de um, como mostra a

Tabela 4.5:

$$V = f(Z, R) = \left[ 1 + \left( \frac{Z}{R} \right)^{-1/0,04} \right]^{-0,05} \quad (\text{Eq. 4.2})$$

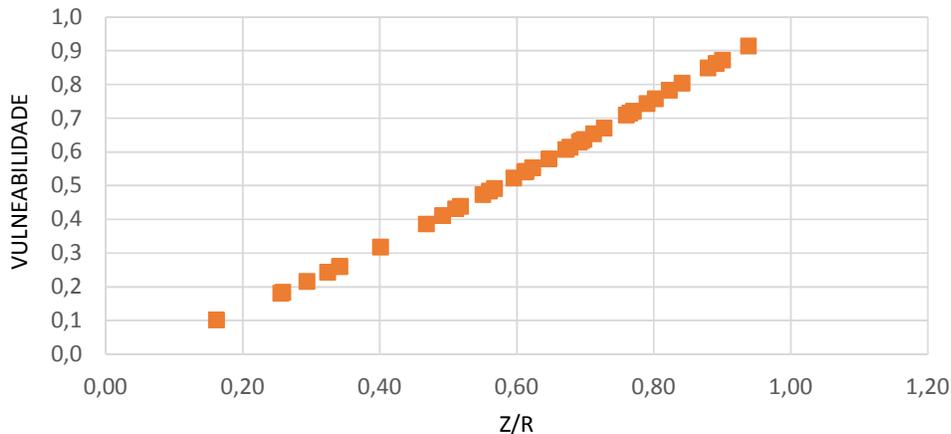
**Tabela 4.5–Vulnerabilidade calculada das estruturas.**

ID <sub>dest</sub>	H (m)	ID <sub>estrut</sub>	d (m)	R	Z	Z/R	V <sub>calc</sub>
13937	20	3317-1	59	0,5	0,3	0,7	0,61
14088	20	3438-5	52	0,6	0,4	0,6	0,58
13933	34	3517-5	48	0,79	0,7	0,9	0,87
13931	15	3530-3	63	0,6	0,2	0,4	0,32
14089	12	3692-2	57	0,71	0,2	0,3	0,22
14089	12	3692-3	25	0,79	0,5	0,6	0,54
13973	13	3817-1	64	0,6	0,2	0,3	0,26

13973	13	3817-2	32	0,79	0,4	0,5	0,43
13930	35	3834-1	74	0,6	0,5	0,8	0,74
13935	34	3975-3	71	0,79	0,5	0,6	0,54
13942	42	4089-2	109	0,79	0,4	0,5	0,41
13042	20	4224-6	42	0,5	0,5	0,9	0,91
13964	28	4251-2	63	0,5	0,4	0,9	0,85
13458	65	4342-5	145	0,79	0,4	0,6	0,49
13458	65	4342-6	144	0,96	0,5	0,5	0,39
13975	55	4479-10	167	0,6	0,3	0,6	0,47
13975	55	4479-11	129	0,6	0,4	0,7	0,65
13975	55	4479-12	119	0,6	0,5	0,8	0,72
13975	55	4479-13	109	0,6	0,5	0,8	0,8
13965	48	4549-1	59	0,79	0,8	1	0,98
13965	48	4549-2	46	0,79	1	1,3	1
13965	48	4549-3	64	0,79	0,7	1	0,93

ID<sub>dest</sub> – identificação do deslizamento; H – diferença entre cota máxima e cota mínima do deslizamento; ID<sub>estrut</sub> – identificação da estrutura; d – distância entre o ponto de partida da massa deslizante e o centro de gravidade da estrutura; R – Resistência calculada; Z – relação h/d; V<sub>calc</sub> – vulnerabilidade calculada pela metodologia proposta;

Os dados calculados foram considerados satisfatórios, pois, como mostra o gráfico apresentado pela Figura 4.2, a relação Vulnerabilidade *versus* relação entre Z e a resistência R obedeceu a mesma tendência de valores propostos na metodologia de Li *et al.* (2010) e está de acordo com o esperado fisicamente. Tanto a intensidade quanto a resistência são expressas em termos adimensionais.



**Figura 4.2 – Relação entre Vulnerabilidade calculada e Intensidade em função da Resistência para estruturas com vulnerabilidades observadas diferentes de 1.**

Foram desenvolvidas curvas teóricas para testar o comportamento da equação para as faixas de resistência calculadas e obtendo-se resultados semelhantes aos esperados. A Figura 4.3 mostra a tendência de mudança teórica de vulnerabilidade em função da intensidade para valores de resistência diferentes.

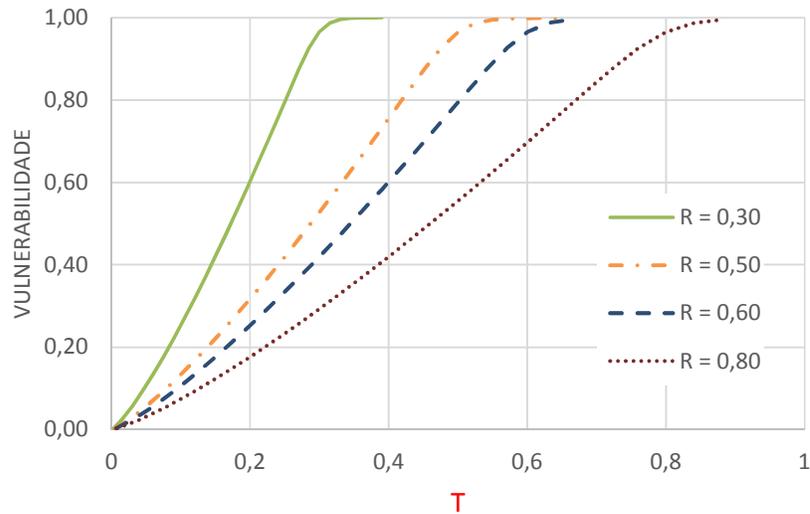


Figura 4.3 – Vulnerabilidade em função da intensidade para valores de resistência fixos.

#### 4.5. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

Ao extrapolar a equação já consolidada para as estruturas que foram totalmente destruídas, ou seja, com dados de vulnerabilidade observados iguais a 1, foram obtidos resultados coerentes com as vulnerabilidades observadas, validando a metodologia proposta e aumentando a concentração de pontos próximos ao valor de vulnerabilidade iguais a 1, conforme mostrado na Figura 4.4 a seguir. Intensidade e resistência são expressas em termos adimensionais.

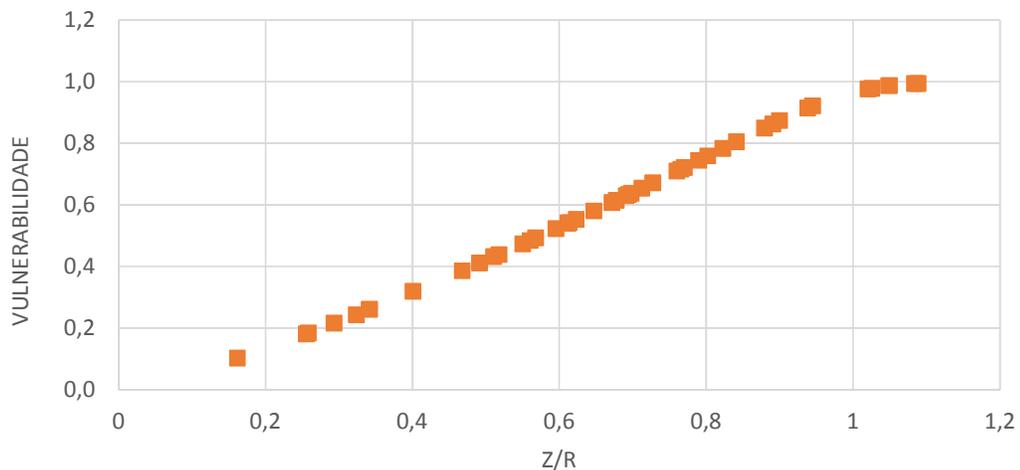


Figura 4.4 – Relação entre Vulnerabilidade calculada e Intensidade em função da Resistência para todas as estruturas.

Os valores de resistência obtidos para as estruturas da área de estudo foram agrupados nas faixas:

- $R = 0,30$  – faixas de valores de 0,0 a 0,40;
- $R = 0,50$  – faixas de valores entre 0,40 a 0,60;
- $R = 0,70$  – faixas de valores entre 0,60 a 1,0;

Quando comparados aos valores teóricos de vulnerabilidade calculados com a metodologia proposta neste trabalho, os resultados se mostraram coerentes com o esperado e são apresentados pela Figura 4.5 a seguir:

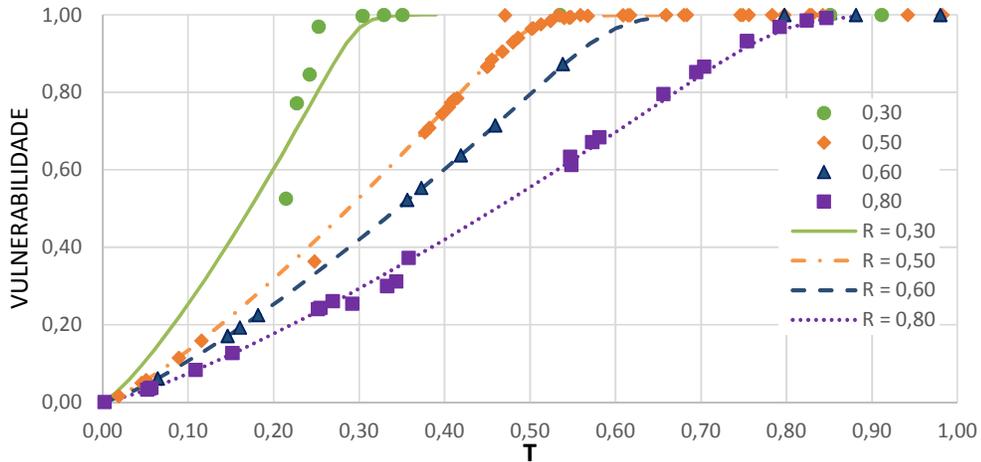
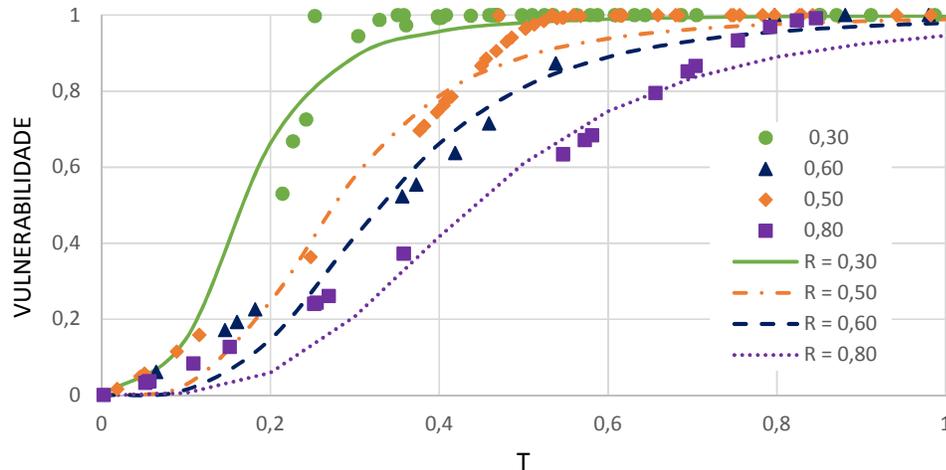


Figura 4.5 – Relação entre valores teóricos e valores reais da relação  $V \times I$  para as estruturas estudadas.

Após a proposição matemática da equação (Eq. 3.2 de quantificação da vulnerabilidade, apresentada no capítulo anterior, foi proposta uma nova equação

(Eq. 3.16 que também se mostrou satisfatória para os resultados esperados. Os resultados de campo comparados aos valores teóricos de vulnerabilidade calculados com a nova equação proposta neste trabalho são apresentados pela Figura 4.6a seguir:



**Figura 4.6 – Relação entre novos valores teóricos e valores reais da relação V x T para as estruturas estudadas.**

A partir de então, o exemplo de cálculo e as análises posteriores de quantificação da vulnerabilidade foram calculadas a partir da equação

(Eq. 3.16 apresentada no capítulo anterior e exposta a seguir:

$$V = \left[ 1 + \left( \frac{T}{0,55} \right)^{-3,5} \right]^{-1} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

#### 4.6. EXEMPLO DE CÁLCULO

Para exemplificar a metodologia de estimativa da vulnerabilidade das estruturas, foi tomado o deslizamento 4479 como exemplo de aplicação.

**1º passo:** Cadastro dos elementos de análise:

Nessa etapa, são analisadas as imagens de satélite do *Google Earth* e *Google Street View* juntamente com a ferramenta Regulador de Datas para identificação do deslizamento e das estruturas afetadas por ele, conforme mostra a Figura 4.7. Após essa etapa, o deslizamento e as estruturas afetadas são inseridas no cadastro na ferramenta SIG, conforme apresenta a Figura 4.8:



**Figura 4.7 – Identificação dos elementos – deslizamentos e estruturas afetadas – para análise.**



**Figura 4.8 – Cadastro do deslizamento e das estruturas afetadas no programa computacional ArcGis 10. 2º passo: Cadastro de dados dos deslizamentos e da estrutura:**

A partir da imagem georreferenciada por meio da ferramenta SIG, realiza-se a análise os parâmetros geométricos do deslizamento e das estruturas impactadas. Os dados do deslizamento são apresentados a seguir pela Tabela 4.6:

**Tabela 4.6 – Parâmetros geométricos do deslizamento 4479.**

ID <sub>desl</sub>	Área (m <sup>2</sup> )	CT <sub>MAX</sub>	CT <sub>MED</sub>	CT <sub>MIN</sub>	DECL <sub>MAX</sub>	DECL <sub>MED</sub>	DECL <sub>MIN</sub>
4479	4312	927	891,4	872	42,20	21,34	9,05

ID<sub>desl</sub> – identificação do deslizamento; CT<sub>MAX</sub> – cota máxima do deslizamento; CT<sub>MED</sub> – cota média do deslizamento; CT<sub>MIN</sub> – cota mínima do deslizamento; DECL<sub>MAX</sub> – declividade máxima do deslizamento; DECL<sub>MED</sub> – declividade média do deslizamento; DECL<sub>MIN</sub> – declividade mínima do deslizamento;

Com a ferramenta Regulador de Datas foi possível a identificação de 13 estruturas impactadas pelo deslizamento 4479. Para a análise dessas estruturas, primeiramente foram levantados os parâmetros geométricos (Tabela 4.7)

**Tabela 4.7 – Parâmetros geométricos do das estruturas impactadas.**

ID <sub>estrut</sub>	Área(m <sup>2</sup> )	Coordenada X	Coordenada Y	d(m)
4479-1	95	753946,7	7538609	128
4479-2	159,2	753960,5	7538611,9	139
4479-3	49,6	753966,2	7538606,5	140
4479-4	57,2	753956,6	7538601,3	131
4479-5	87,7	753948,3	7538592,5	124
4479-6	34,9	753973	7538596,9	142
4479-7	83,2	753964,9	7538595,3	134
4479-8	58,7	753954,6	7538590,8	122
4479-9	150,3	753985,7	7538610,9	157
4479-10	147,5	753989,6	7538622,7	167

4479-11	70,7	754015,3	7538639,9	129
4479-12	50	754009,6	7538638,8	119
4479-13	86,5	753999,7	7538636,4	109

ID<sub>estrut</sub> – identificação da estrutura; d – distância entre o ponto de partida da massa deslizante e o centro de gravidade da estrutura;

Para a obtenção dos parâmetros de resistência, além da ferramenta SIG, foi utilizado o *Google Street View*, conforme mostram as imagens apresentadas na Figura 4.9, possibilitando a determinação da resistência das estruturas impactadas apresentada na Tabela 4.8 a seguir.





**Figura 4.9 – Análise dos parâmetros de resistência das estruturas afetadas pelo deslizamento 4479 por meio da Google Street View.**

**Tabela 4.8 – Dano observado e determinação dos parâmetros de resistência das estruturas impactadas.**

ID <sub>estrut</sub>	V <sub>obs</sub>	Dano observado	Parâmetros de resistência				R
			$\xi_{sfd}$	$\xi_{STY}$	$\xi_{SMN}$	$\xi_{SHT}$	
4479-1	1,0	Total	0,6	0,8	0,4	0,1	0,37
4479-2	1,0	Total	0,6	0,8	0,4	0,1	0,37
4479-3	1,0	Total	0,6	0,8	0,4	0,1	0,37
4479-4	1,0	Total	1	0,8	0,4	0,4	0,6
4479-5	1,0	Total	1	0,8	0,4	0,4	0,6
4479-6	1,0	Total	0,65	0,8	0,8	0,4	0,64
4479-7	1,0	Total	0,8	0,8	0,8	0,4	0,67
4479-8	1,0	Total	0,9	0,8	0,8	0,4	0,69
4479-9	1,0	Total	1	0,8	0,4	0,4	0,6
4479-10	0,5	Parcial médio	1	0,8	0,4	0,4	0,6
4479-11	0,6	Parcial médio	1	0,8	0,4	0,4	0,6
4479-12	0,7	Parcial intenso	1	0,8	0,4	0,4	0,6
4479-13	0,6	Parcial medio	1	0,8	0,4	0,4	0,6

ID<sub>estrut</sub> – identificação da estrutura;  $\xi_{sfd}$  – parâmetro de resistência para a profundidade da fundação;  $\xi_{STY}$  - Fator de resistência para tipologia estrutural;  $\xi_{SMN}$  - Fator de resistência para o estado de manutenção da edificação;  $\xi_{SHT}$  – Fator de resistência para o número de pavimentos; R – Resistência calculada; V<sub>obs</sub> – vulnerabilidade observada;

### 3º passo: Cálculo da Vulnerabilidade

A partir dos dados extraídos das análises e ferramentas computacionais, obteve-se a vulnerabilidade calculada das estruturas que foram impactadas pelo deslizamento exemplificado, o que é apresentado na Tabela 4.9 a seguir:

**Tabela 4.9 – Determinação da Vulnerabilidade para estruturas impactadas.**

ID <sub>estrut</sub>	H (m)	d (m)	Resistência	Z	Intensidade	V <sub>calc</sub>	V <sub>obs</sub>
----------------------	-------	-------	-------------	---	-------------	-------------------	------------------

4479-1	55	114,9	0,4	0,5	1,3	1,0	1,0
4479-2	55	127,0	0,4	0,4	1,2	1,0	1,0
4479-3	55	129,4	0,4	0,4	1,0	0,9	1,0
4479-4	55	119,4	0,4	0,5	1,2	1,0	1,0
4479-5	55	111,9	0,4	0,5	1,3	1,0	1,0
4479-6	55	130,8	0,4	0,4	1,1	1,0	1,0
4479-7	55	123,4	0,4	0,5	1,2	1,0	1,0
4479-8	55	112,8	0,4	0,5	1,3	1,0	1,0
4479-9	55	145,8	0,4	0,4	1,0	1,0	1,0
4479-10	55	152,9	0,7	0,4	0,5	0,4	0,5
4479-11	55	124,7	0,7	0,4	0,6	0,6	0,6
4479-12	55	118,8	0,7	0,5	0,7	0,6	0,7
4479-13	55	110,4	0,7	0,5	0,7	0,6	0,6

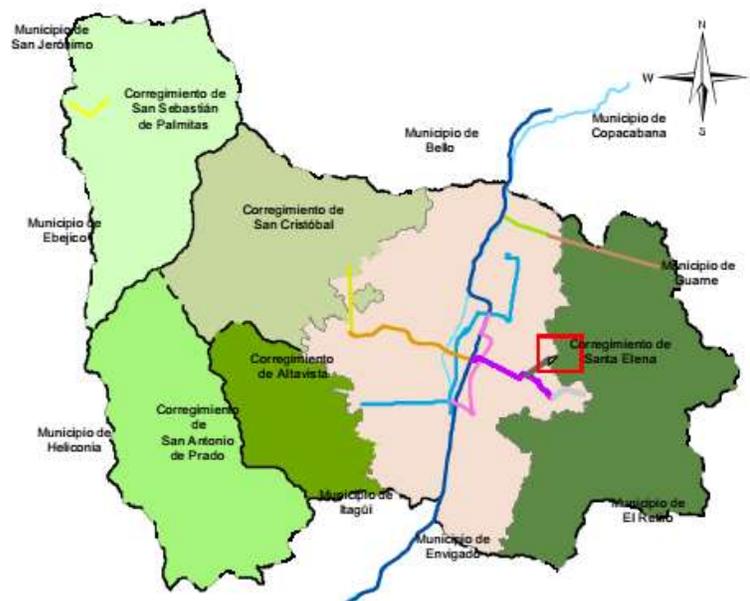
ID<sub>estrut</sub> – identificação da estrutura; H – diferença entre cota máxima e cota mínima do deslizamento; d – distância entre o ponto de partida da massa deslizando e o centro de gravidade da estrutura; Z – Relação entre H/d; Intensidade – Relação entre Z/R; V<sub>calc</sub> – Vulnerabilidade calculada; V<sub>obs</sub> – vulnerabilidade observada;

E assim, foi possível a comparação entre a vulnerabilidade calculada pela metodologia proposta e a vulnerabilidade observada, mostrando-se a aplicabilidade da metodologia.

A metodologia desenvolvida até aqui se apresenta como uma alternativa de quantificação da vulnerabilidade de estruturas ameaçadas por deslizamentos de terra utilizando-se parâmetros de resistência, e características da ameaça a partir da observação e da utilização de ferramentas SIG.

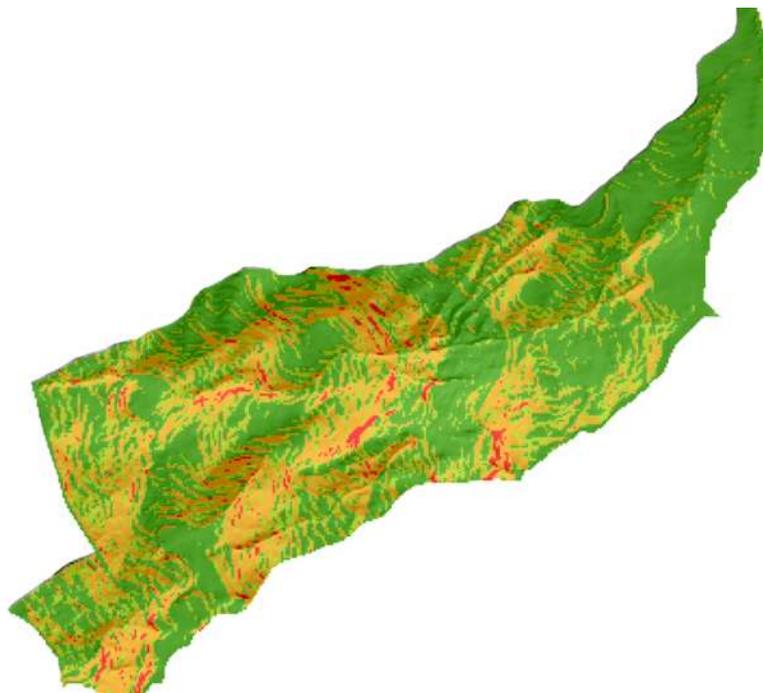
#### **4.7. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE QUANTIFICAÇÃO DA VULNERABILIDADE**

Para consolidar a metodologia proposta por esse trabalho, foi realizado uma análise de campo para a aplicação do método de quantificação da vulnerabilidade. A área é uma região de encostas na cordilheira central da Colômbia, na cidade de Medellín, que é mostrada pela Figura 4.10:



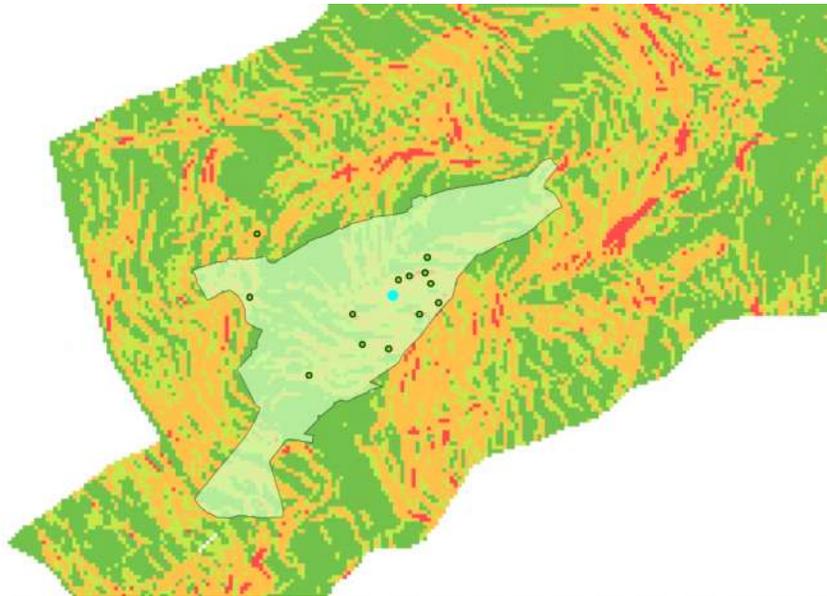
**Figura 4.10 – Localização da área de aplicação da metodologia de quantificação da vulnerabilidade. (Siga Ingeniería y Consultoría S.A., 2015)**

Como insumo para tal atividade, utilizou-se um mapa de probabilidade de falha, gerado a partir das análises de estabilidade de taludes pelo método de taludes infinitos, onde os pontos em vermelho demonstram os locais com maiores probabilidades de ruptura, e conseqüentemente, mais chances de ocorrência do evento adverso, como retrata a figura a seguir:

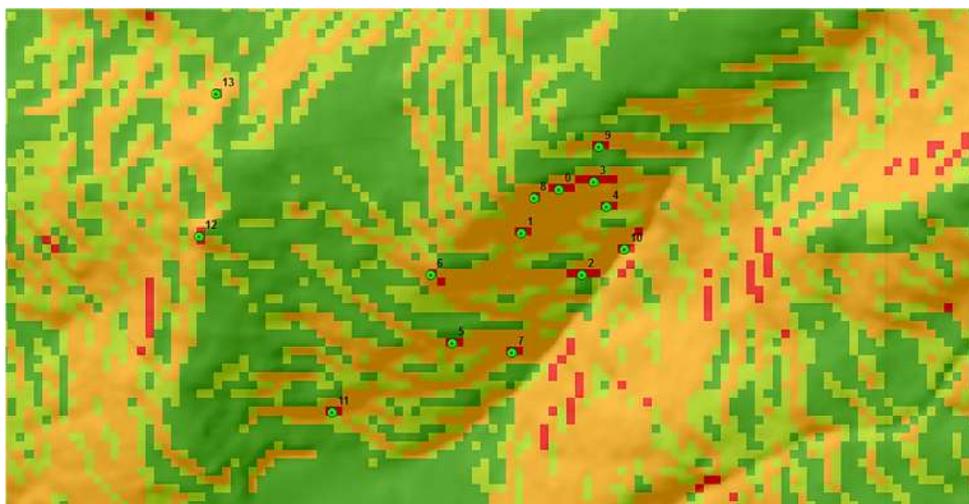


**Figura 4.11 - Mapa de probabilidade de falha da bacia hidrográfica analisada.**

A partir da análise do mapa de probabilidade de falha e da localização das estruturas na área de aplicação da metodologia, foi determinada uma área dentro da bacia que delimitou o estudo, apresentada pela Figura 4.12. A análise do mapa de probabilidade de falha, da topografia local e do modelo numérico de terreno determinou o posicionamento de 14 pontos críticos (Figura 4.13), que são pontos com valores altos de probabilidade de falha e que estão próximos as estruturas presentes na área de análise. Esses pontos foram lançados na ferramenta SIG, e a partir deles se deu as análises para quantificação da vulnerabilidade.



**Figura 4.12**–Microbacia de aplicação da metodologia e identificação dos pontos críticos.



**Figura 4.13**–Pontos críticos definidos para a área estudada.

Dentro da área analisada cadastrou-se 496 estruturas como polígonos, os quais foram georreferenciados, como mostram as Figura 4.14 e Figura 4.15.

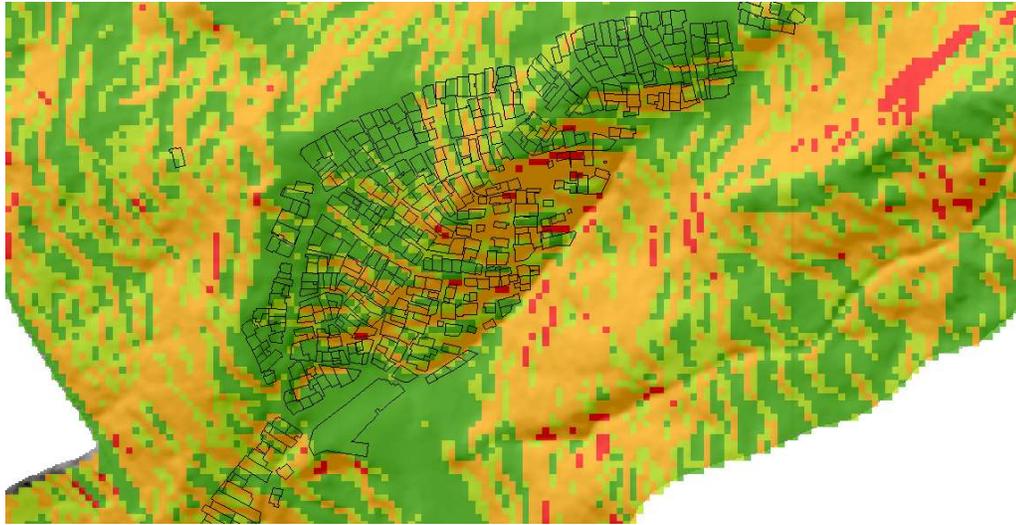


Figura 4.14—Estruturas georreferenciadas na área de aplicação da metodologia.

Os parâmetros de resistência que foram registrados para cada estrutura são: tipologia estrutural, grau de manutenção, número de pavimentos e profundidade da fundação (Tabela 4.10) e calculou-se a resistência da estrutura de acordo com a equação já apresentada anteriormente:

$$R_{str} = (\xi_{sty} \cdot \xi_{sht} \cdot \xi_{smn} \cdot \xi_{sfd})^{\frac{1}{4}} \quad (\text{Eq. 4.4})$$





**Figura 4.15**–Estruturas cadastradas na área de aplicação da metodologia.

Após o lançamento dos dados de resistência calculados na ferramenta SIG, os polígonos que representam as estruturas passaram a incorporar na tabela de seus atributos os dados de resistência calculados.

**Tabela 4.10** – Cálculo da resistência das estruturas analisadas.

<b>ID<sub>estrut</sub></b>	$\xi_{SFD}$	$\xi_{STY}$	$\xi_{SHT}$	$\xi_{SMN}$	<b>R</b>
1	0,50	0,80	0,40	0,80	0,60
2	0,50	0,80	0,90	0,80	0,73
3	0,50	0,80	0,40	1,20	0,66
4	0,50	0,80	0,40	0,80	0,60
5	0,50	0,80	0,40	0,80	0,60
6	0,50	0,80	0,40	0,80	0,60
7	0,50	0,80	0,90	0,80	0,73

8	0,50	0,80	0,40	0,80	0,60
9	0,50	0,80	0,10	0,80	0,42
10	0,50	0,80	0,90	0,80	0,73
11	0,50	0,80	0,10	0,80	0,42
12	0,50	0,80	0,90	1,20	0,81
13	0,50	0,80	0,90	1,20	0,81
14	0,50	0,80	0,90	0,80	0,73
15	0,50	0,80	0,10	0,80	0,42
16	0,50	0,80	0,40	0,80	0,60
17	0,50	0,80	0,40	0,80	0,60
18	0,50	0,80	0,10	0,80	0,42
19	0,50	0,80	0,40	0,80	0,60
20	0,50	0,80	0,90	0,80	0,73

ID<sub>estrut</sub> – identificação da estrutura;  $\xi_{SFD}$  – parâmetro de resistência para a profundidade da fundação;  $\xi_{STY}$  - Fator de resistência para tipologia estrutural;  $\xi_{SMN}$  - Fator de resistência para o estado de manutenção da edificação;  $\xi_{SHT}$  – Fator de resistência para o número de pavimentos; R – Resistência calculada;

A análise da área estudada na plataforma SIG permitiu realizar o cálculo da variável  $d$ , que como já foi dito, é a distância entre o ponto de desprendimento da massa deslizante e a estrutura ameaçada por esse evento, considerando-se a topografia do local. Para o caso de aplicação da metodologia foram considerados os pontos críticos provenientes do mapa de probabilidade de falha, ou seja, os pontos de maiores probabilidade de acontecer uma ruptura e iniciar um evento de deslizamento de terra foram os pontos de partida para o cálculo da variável  $d$ .

O cálculo da variável  $d$  em toda área de estudo, se deu pela ferramenta *Path distance* que compõe o programa ArcGis, que calcula em formato raster, a dimensão do percurso crítico que o ponto de partida, definido pelo usuário, irá percorrer, considerando-se as variações do modelo numérico de terreno, como mostra o exemplo de cálculo da variável  $d$  para o ponto crítico 1, retratado pela Figura 4.16.

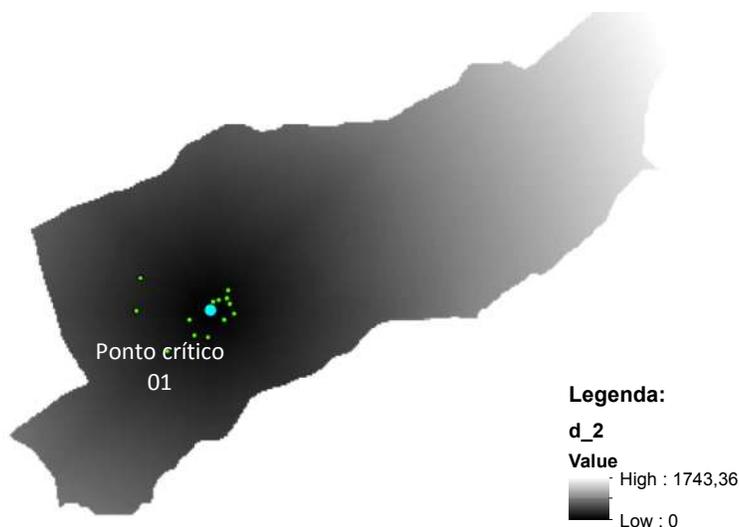
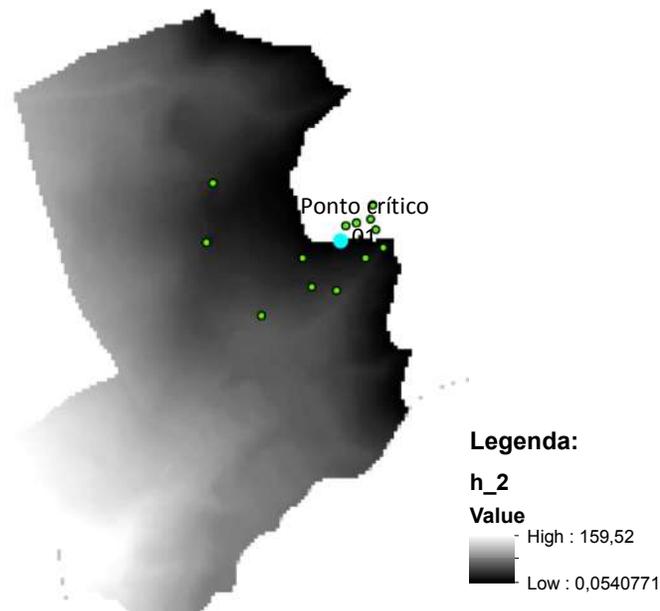


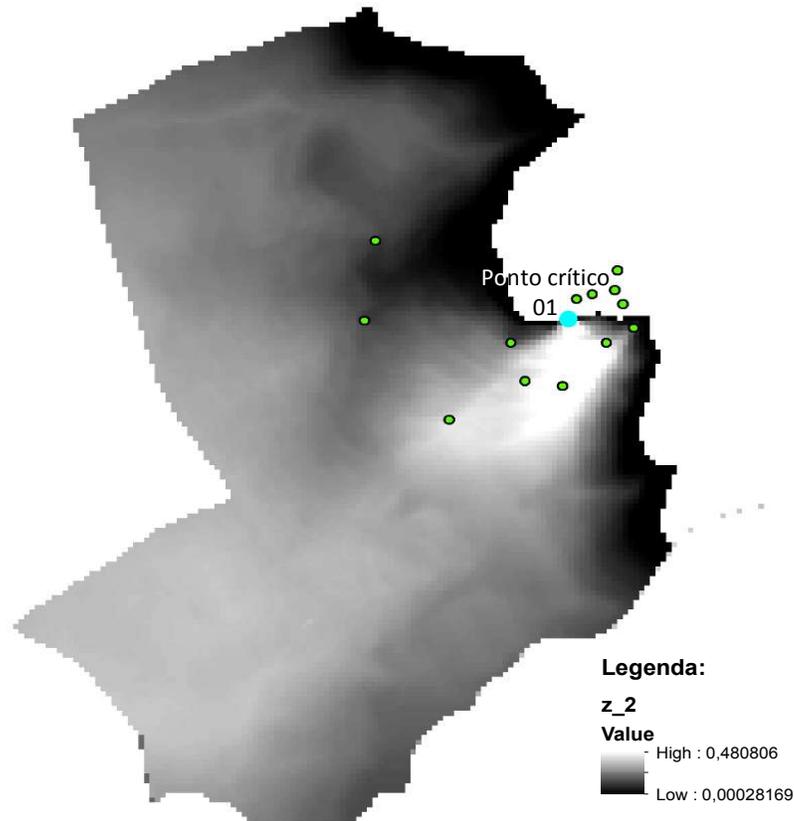
Figura 4.16–Variável  $d$  em formato raster.

A variável  $H$ , é a diferença de cotas entre o ponto crítico analisado e a cota da estrutura analisada. Para o caso do cálculo em formato raster na plataforma SIG, criou-se um plano auxiliar de informações contendo todos os pontos com cota igual a cota do ponto crítico em tela. A seguir, por meio da calculadora raster, foi realizada a subtração entre este plano auxiliar e o modelo numérico de terreno obtendo-se assim as diferenças de cotas desejadas para toda área em análise e gerando um plano de informações da variável  $H$  como mostra a Figura 4.17seguir. Os valores negativos foram anulados por não ter sentido físico, já que o resultado negativo da subtração demonstra que o MNT tem cota maior que o ponto crítico, sendo portanto impossível o deslizamento ocorrer em sentido ascendente.



**Figura 4.17–Variável  $H$  em formato raster.**

Após a definição das variáveis  $d$  e  $H$  calculou-se, também em formato raster, o gradiente modificado –  $Z$  – para cada ponto crítico analisado, conforme a equação (Eq. 3.1) apresentada no capítulo anterior, e gerou-se um plano de informações de  $Z$ , conforme mostra a Figura 4.18.

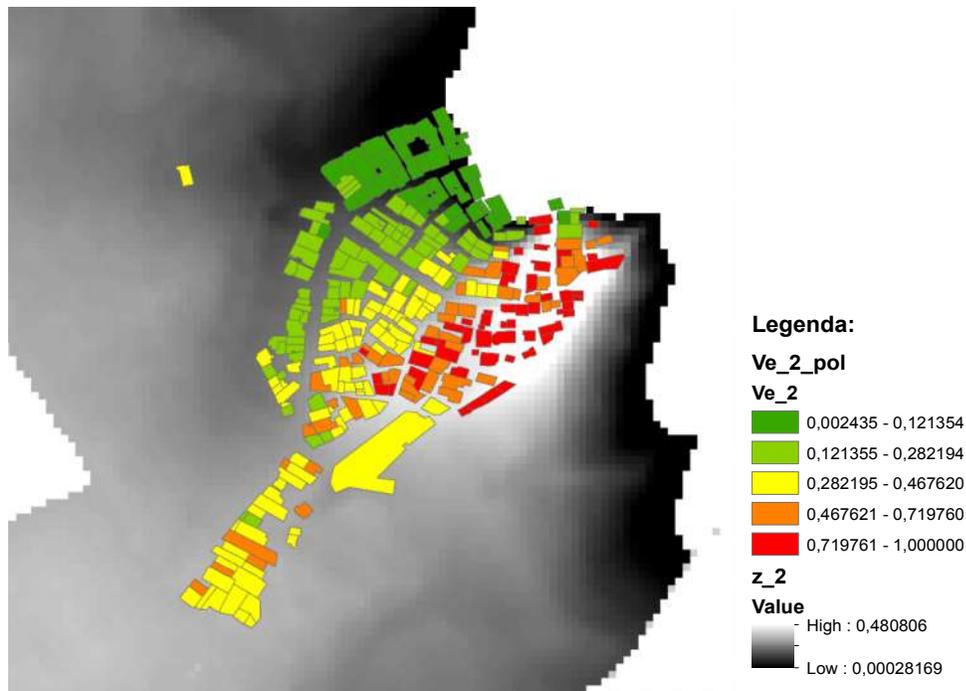


**Figura 4.18–Gradiente Modificado Z em formato raster.**

A sombra mais clara apresenta os maiores valores de gradiente modificado, indicando uma região de trajetórias de deslizamentos possíveis partindo do ponto crítico analisado, fornecendo-se insumos para uma análise da intensidade do evento provável.

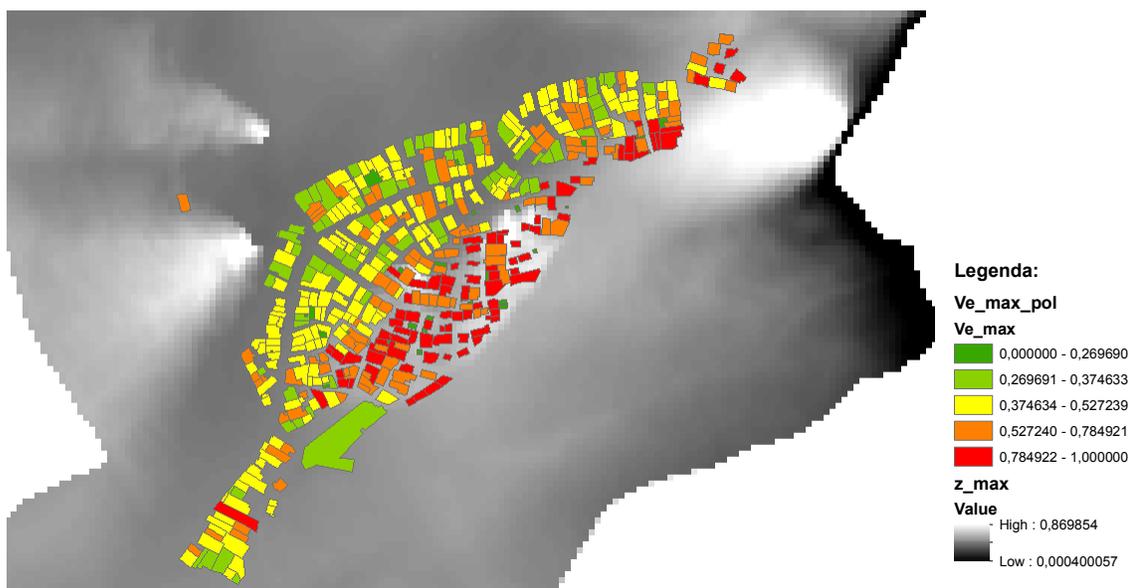
A partir da determinação de  $Z$ , gradiente modificado, e das resistências calculadas  $R$  de cada estrutura dentro da área de análise, calculou-se a vulnerabilidade por meio da Equação (Eq. 4.3 em formato raster, da área estudada para cada ponto crítico. Atribui-se ao centroide de cada polígono de estrutura o valor de vulnerabilidade contido no pixel de vulnerabilidade calculado, construindo-se assim um mapa de vulnerabilidade das estruturas da área para cada ponto crítico, conforme apresenta Figura 4.19:

A partir da análise do mapa de vulnerabilidade de um ponto crítico específico pode-se tomar decisões extremas, como por exemplo a retirada da estrutura da área analisada ou também aumentar a resistência estrutural, o que reduziria o seu potencial de perdas.



**Figura 4.19–Mapa de Vulnerabilidade das Estruturas.**

Após o cálculo e a obtenção dos mapas de vulnerabilidade para cada ponto crítico da área estudada, foi desenvolvido um plano de informação com as vulnerabilidades estruturais máximas, ou seja, um plano que filtrou as maiores vulnerabilidades calculadas para cada residência pela análise década ponto crítico, tornando-se o produto para a análise de vulnerabilidade das estruturas no qual demonstra a máxima vulnerabilidade calculada para determinada residência a partir de qualquer ponto que a ameace, conforme mostra a Figura 4.20:



**Figura 4.20–Mapa de Vulnerabilidade máxima para as Estruturas.**

Esse mapa de vulnerabilidade máxima para as residências possibilitou a análise das consequências que a ocorrência de um evento adverso de deslizamento de terra poderá gerar. Podemos localizar as zonas vermelhas e alaranjadas, onde as vulnerabilidades se encontram acima de 0,50 aproximadamente, o que pode indicar, em uma análise de gerenciamento do espaço e de gerenciamento de riscos, uma área de atenção e provável desapropriação do ponto de vista do seu potencial de perdas.

Para as zonas amarelas, onde a vulnerabilidade se encontra entre 0,35 e 0,50 aproximadamente, o reforço da estrutura pode reduzir esse potencial de perdas materiais, e ainda, obras de contenção podem reduzir essa vulnerabilidade estrutural, e tornar a área mais segura.

As zonas verdes indicam baixa vulnerabilidade, com valores entre 0,0 e 0,35, o que demonstra que essas estruturas têm um potencial de perdas menor e podem ser mantidas em suas atuais condições estruturais.

Aliando as informações da ameaça, por meio do mapa de probabilidade de falha, foi possível o desenvolvimento do mapa de fator de risco estrutural para área em questão, utilizando-se a equação demonstrada no início do trabalho, que demonstra que o risco é o produto da ameaça pelas suas consequências, conforme a seguir:

$$Risco = Ameaça \cdot Vulnerabilidade \cdot Custos \text{ dos elementos expostos} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

O mapa de fator de risco (*FR*) gerado considera o produto da ameaça pela vulnerabilidade dos elementos expostos a ela, sem avaliar o custo, já que essa variável pode ser dada em diferentes unidades, como por exemplo, custo/m<sup>2</sup> da área estudada, custo/estrutura, custo/m<sup>2</sup> de área construída, dentre outros. O custo é a variável que define a unidade do risco que deve ser analisada conforme a análise de gerenciamento de risco local.

O fator de risco, conforme mostra Equação (Eq. 4.5) é um número proveniente de um produto entre a ameaça, representada pelo mapa de probabilidade de falhas, e a vulnerabilidade, quantificada pela metodologia proposta nesse trabalho, sendo duas variáveis que tem uma faixa de possíveis valores entre 0 a 1.

$$FR = PF \cdot V \quad (\text{Eq. 4.5})$$

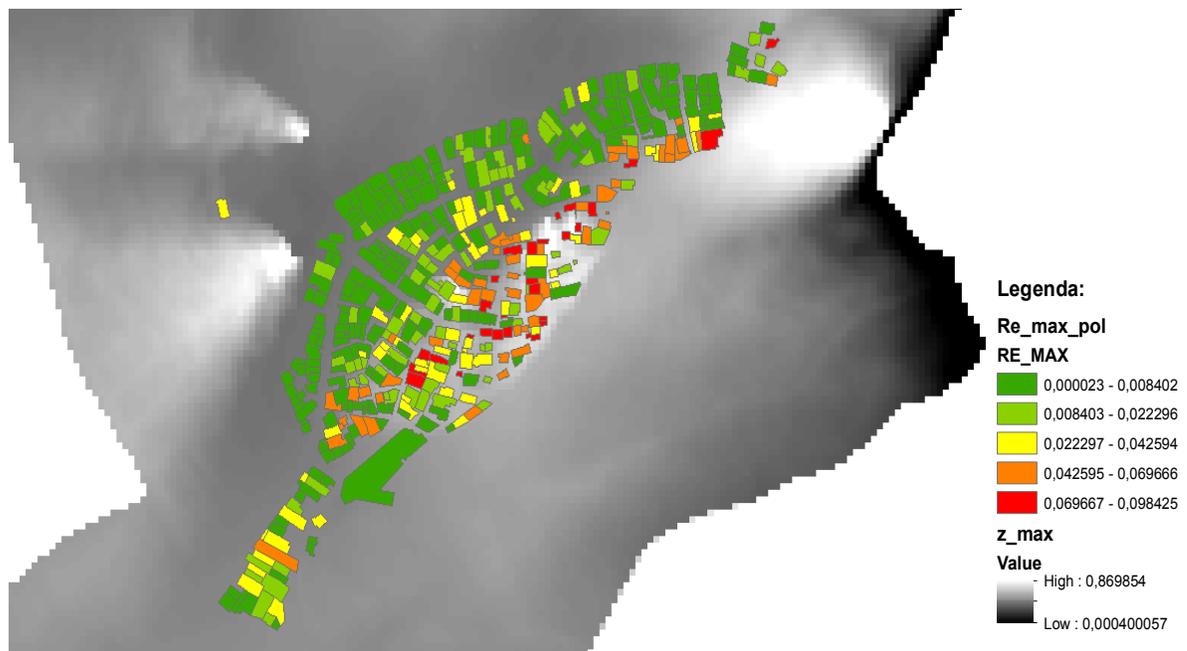
Onde:

FR – Fator de risco

PF – ameaça, representada pelo valor da probabilidade de falha;

V – Vulnerabilidade quantificada;

Esse mapa de risco estrutural, mostrado na Figura 4.21, a seguir fomentou diversas análises sobre gerenciamento de risco na área, ações de mitigação do risco e possíveis tomadas de decisões, tais como: investimento em melhorias estruturais das residências, identificação de estruturas que deverão ser retiradas da área, identificação de áreas que devem passar por obras de contenção, estimativa de custos de apólices de seguro residenciais, estimativas de custo de fundos direcionados para ações de emergência para ocorrência de eventos adversos, dentre outras.



**Figura 4.21–Mapa de Risco estrutural máxima para as Estruturas.**

Pode-se concluir com a aplicação da metodologia que para o efetivo gerenciamento do risco, deve-se considerar tanto a análise da ameaça, com estudos relacionados aos eventos adversos, quanto a análise quantitativa da vulnerabilidade para gerar mapas mais precisos e ações mais eficientes de mitigação do risco.

A metodologia proposta por esse trabalho foi satisfatória, pois propiciou, além da análise quantitativa da vulnerabilidade eficaz, um estudo do risco para a área de aplicação, mostrando-se como uma importante ferramenta na tomada de decisões sobre esse tema.

## 5. VALIDAÇÃO DA METODOLOGIA

A validação é um processo essencial para definir se uma metodologia desenvolvida está adequada aos objetivos a que se destina, a fim de se obter resultados confiáveis que possam ser satisfatoriamente interpretados. Além disso, pode ser considerada um dos principais instrumentos para garantia da qualidade dos resultados gerados pelo método e indica os seus melhores caminhos de aperfeiçoamento.

Nesse sentido foi realizada uma comparação entre a metodologia proposta nesse trabalho e a metodologia apresentada por Kang *et al.* (2015). Os levantamentos foram feitos com base nos dados disponibilizados, fotografias aéreas, curvas de nível e fotografias das estruturas. O primeiro caso analisado foi o apresentado pela Figura 5.1:

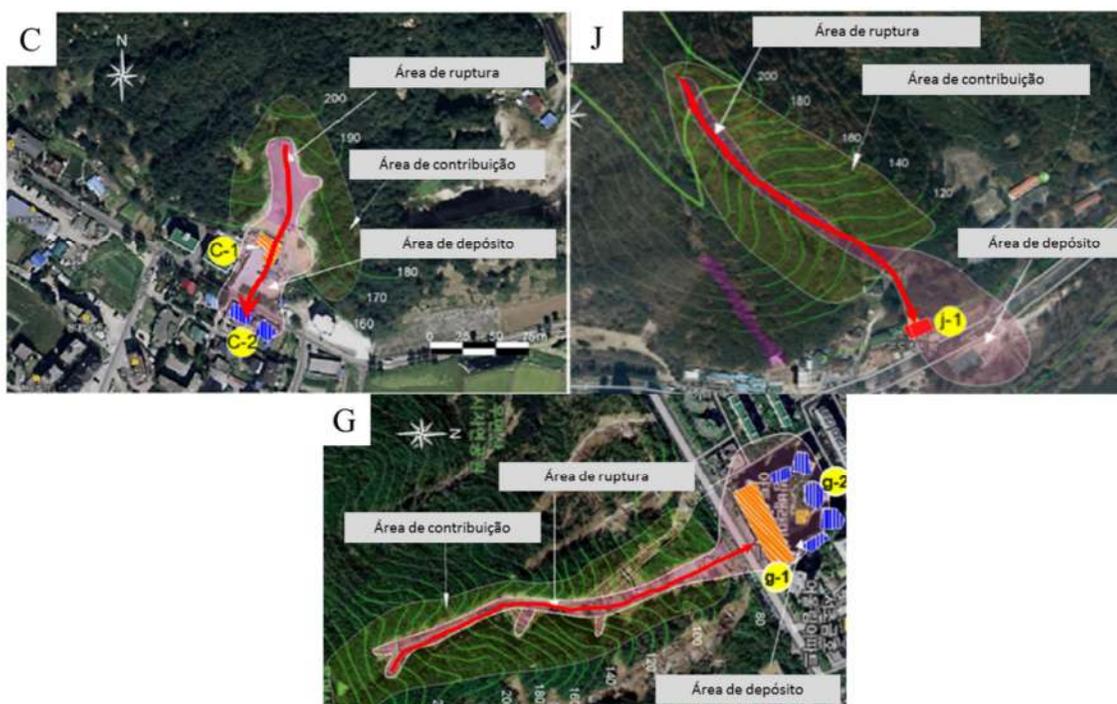


Figura 5.1–Deslizamento analisados apresentados por Kang *et al.* (2015) - Modificado.

A partir da análise desses eventos sob a ótica da metodologia desenvolvida nesse trabalho foi possível determinar os valores de  $H$ , altura do deslizamento, e de  $d$ , distância entre ponto de ruptura da massa deslizante e centro de gravidade das estruturas impactadas por ela. Essas variáveis são as variáveis que, pela sua relação, determinam o gradiente modificado  $Z$ .

A partir da análise da ameaça e das fotografias das edificações impactadas disponibilizadas por Kang *et al.* (2015), apresentadas pela Figura 5.2, por meio da observação das imagens foi possível a determinação dos parâmetros de resistência dessas edificações.

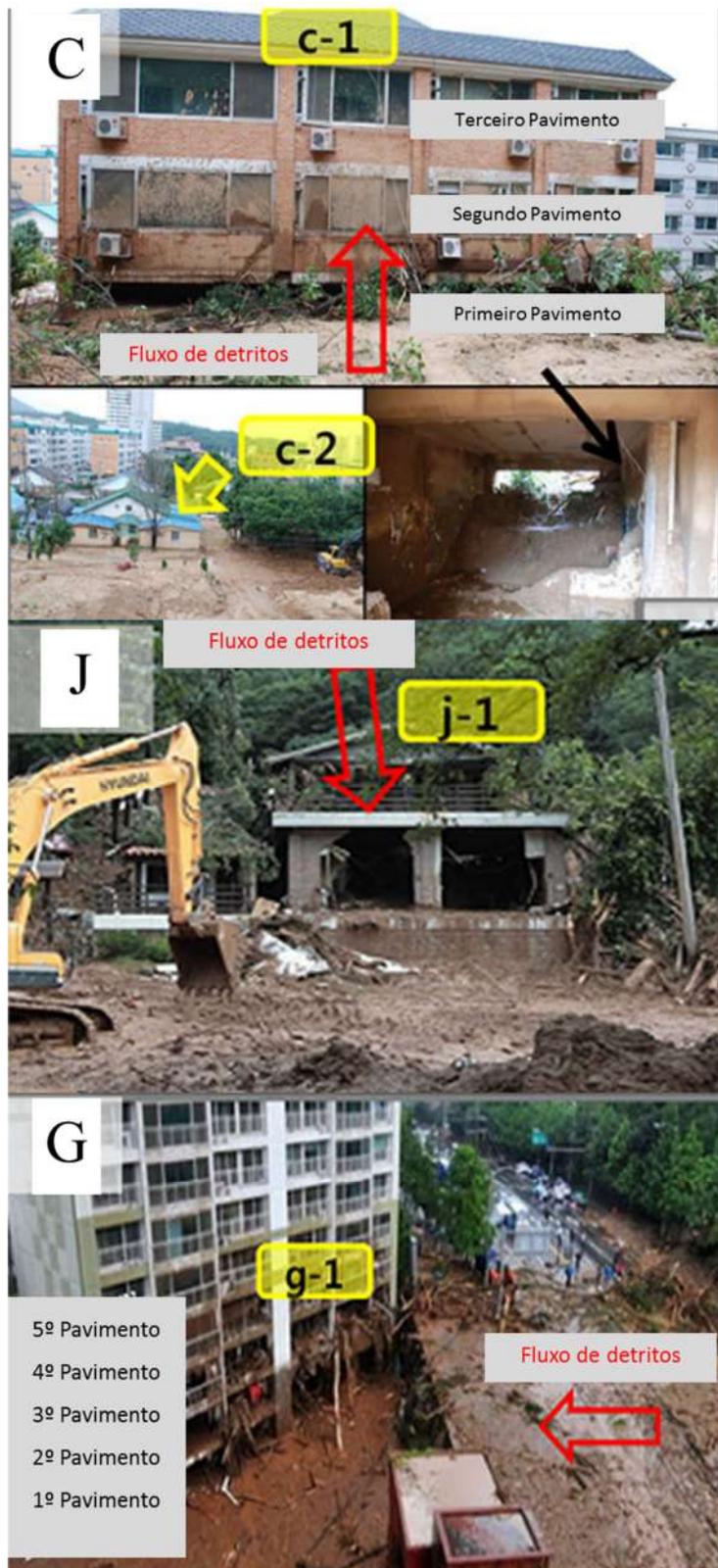


Figura 5.2 – Deslizamento analisados apresentados por Kang *et al.* (2015) – Modificado.

Os dados obtidos a partir dessas análises são apresentados pela tabela Tabela 5.1 a seguir. Com a obtenção dos dados de entrada da metodologia de quantificação da vulnerabilidade proposta por essa tese.

**Tabela 5.1 – Dados analisados e quantificação da vulnerabilidade para as estruturas apresentadas por Kang *et al.* (2015).**

<b>Deslizamento</b>	<b>C</b>		<b>J</b>	<b>G</b>
<b>H(m)</b>	30		140	120
<b>Edificação</b>	C-1	C-2	J-1	G-1
<b>d (m)</b>	57	90	230	175
<b>Z (H/d)</b>	0,53	0,33	0,52	0,8
<b>Resistência (R)</b>	0,90	0,70	0,60	1,40
<b>T (Z/R)</b>	0,60	0,49	0,87	0,60
<b>Vulnerabilidade</b>	0,60	0,40	0,80	0,60

Foi possível a comparação dos métodos e a verificação da semelhança de resultados entre eles, cumprindo assim o objetivo de validação da metodologia.

## 6. CONCLUSÕES

A seguir são apresentadas as conclusões gerais sobre o desenvolvimento da metodologia proposta neste trabalho e os resultados apresentados:

- Após revisão bibliográfica do tema, percebeu-se que há uma escassez de estudos em vulnerabilidade física associada a eventos de deslizamento de encostas e uma tendência de estudo para as características e análises dos eventos adversos e seus deflagradores. Como por exemplo, o trabalho de Nocentini *et al.* (2015) que propõe um método de estimativa de velocidades de fluxo de detritos, considerando as zonas de avanço, transporte e depósito da massa deslizante. Kang, H.; Kim, Y. (2015) apresentam curvas de vulnerabilidade física ligada aos efeitos da pressão de impacto da massa deslizante, da velocidade e da profundidade de detritos, em uma análise de um evento que ocorreu na Coreia. E ainda, Armento M. C *et al.* (2008), Casagli, N. *et al.* (2002), De Vita *et al.* (2006), Fiorillo F. *et al.* (1999), Hungr O. (1995), Hungr O. (2002), O'Brien J. S. (1985), Morelli S. *et al.* (2010), Revelino P. *et al.* (2004).
- Foi realizada a atualização do inventário de deslizamentos que ocorreram em Nova Friburgo, quanto à forma, tamanho e a localização. Cabe salientar a importância da identificação desses elementos pela ferramenta computacional *Google Earth* e seu georreferenciamento pelas ferramentas SIG;
- A ferramenta *Google Street View*, disponibilizada pelo programa *Google Earth*, é uma ferramenta prática, rápida e muito simples para avaliar-se os parâmetros de resistência das estruturas que estão ameaçadas por um evento adverso, ou as estruturas que foram impactadas, utilizando em conjunto o “regulador de datas”, o qual proporciona o retorno das imagens no tempo e a visualização do dano sofrido pela estrutura.
- A velocidade como parâmetro a ser usado para representar a intensidade da ameaça na teoria é satisfatória porém, em termos práticos, ela é um parâmetro de difícil obtenção e precisão, sendo necessários metodologias robustas e/ou programas computacionais de simulação numérica para obtê-la.
- Parâmetros simplificados, ligados à geometria, se mostraram eficazes para retratar a intensidade da ameaça, como é o caso do gradiente modificado, que se utiliza da relação entre a diferença de cota do ponto de desprendimento da massa deslizante (ponto crítico) e a cota do centroide da residência em questão, e a distância desse mesmo ponto crítico até o centroide da residência, considerando as irregularidades do terreno. Essas variáveis são fáceis de se obter e se mostraram bastante práticas para a aplicação da metodologia;

- Encontrou-se uma função simples que descreve bem o comportamento da variável vulnerabilidade para os casos de deslizamentos de terra que ocorreram no município de Nova Friburgo, em janeiro de 2011;
- A metodologia de quantificação da vulnerabilidade se mostrou satisfatória como ferramenta de zoneamento de vulnerabilidade, identificando estruturas sensíveis e auxiliando na tomada de decisões de gerenciamento de risco para um caso aplicado na cordilheira central da Colômbia, na cidade de Medellín.
- A aplicação da metodologia se mostrou satisfatória como uma ferramenta de zoneamento de vulnerabilidade e pode ser útil na identificação de áreas sensíveis, para nortear as medidas e ações de prevenção de desastres naturais ligados a deslizamentos de terra;
- O desenvolvimento da metodologia foi capaz de gerar mapas de vulnerabilidade física para áreas de encostas urbanizadas, retratando a vulnerabilidade estrutural de cada residência na área de estudo, possibilitando ações mais efetivas de tomada de decisões;
- Ao aliar o zoneamento de vulnerabilidade aos mapas de probabilidade de ocorrência de deslizamentos, foi possível a obtenção de mapas de fator de risco para a região de estudo, possibilitando ações de gerenciamento de risco mais eficazes;
- A equação após ser justificada físico-matematicamente pode ser considerada uma equação de aplicação universal, podendo ser utilizada de forma generalizada para quantificar a vulnerabilidade física das estruturas expostas a eventos adversos de deslizamentos de terra, com a ressalva de que o coeficiente  $\delta$  deve ser ajustado de acordo com as condições de interação entre a massa deslizante e a estrutura, adaptando-se a realidade local de análise. Sendo essa a equação universal de quantificação da vulnerabilidade estrutural para eventos de deslizamentos de encostas proposta por esse trabalho:

$$V = \left[ 1 + \left( \frac{T}{0,55} \right)^{-\delta} \right]^{-1} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

- Sugere-se a realização de um trabalho semelhante que considere a vulnerabilidade de pessoas nos eventos ocorridos no Brasil para a validação da correlação estabelecida por Li *et al.* (2010), apresentados anteriormente.
- Sugere-se a análise da resistência estrutural utilizando elementos padronizados e a comparação com a os parâmetros de resistência definidos por Li *et al.* (2010), adotados nesta pesquisa. Como por exemplo, a realização de um estudo similar ao de Zeng *et al.* (2015) que apresenta uma abordagem do colapso de pilares e vigas em função dos esforços gerados por

impactos de fluxos de detritos, considerando o tamanho dos blocos que compõe a massa deslizando e a velocidade do fluxo.

- Sugere-se também o estudo de uma relação entre a velocidade do fluxo de detritos e a vulnerabilidade quantificada pela metodologia proposta considerando-se a influência do coeficiente de fluidez.
- Azevedo (2015) propõe uma aplicação do autômato celular para definir a trajetória das ocorrências de deslizamentos de terra. O modelo proposto pelo autor concentra-se na verificação das células, entre as próximas a um determinado pixel, que contém um escorregamento e se as condições dessas células fazem com que o deslizamento se propague. Após essa verificação, os elementos da grade armazenam a trajetória de células com deslizamentos propagados e geram a trajetória dos deslizamentos, considerando fatores como: altimetria, curvatura das vertentes, declividade, além da presença de escorregamento. Sugere-se então a comparação entre a trajetória gerada pelo autômato celular e a sombra de intensidades dada pelo gradiente modificado da metodologia proposta nesse trabalho.
- A observação da mudança do comportamento da vulnerabilidade quantificada, para valores de  $T$  entre 0 e 1, em função da variação do coeficiente  $\delta$  suscita a sua investigação. Sugere-se, como estudo futuro, o aprofundamento para esses casos, variando a resistência da estrutura pois como visto a partir de análises prévias existe um valor limite de  $T$ , onde a resistência da estrutura exerce uma maior influência na quantificação da vulnerabilidade.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (2009) NBR ISO 31000: Gestão de riscos – Princípio e diretrizes, Rio de Janeiro, 24p.

ALHEIROS, M. M.(1998) Riscos de Escorregamentos na Região Metropolitana do Recife. Tese de Doutorado – Universidade Federal da Bahia. Instituto de Geociências, Curso de Pós Graduação em Geologia, 135p.

ANDERSON S.A., SITAR N. (1995). Analysis of rainfall-induced debris flows. *Journal of Geotechnical Engineering*, 121: 544-552.

ARMENTO M. C., GENEVOIS R., TECCA P. R. (2008). Comparison of Numerical Models of Two Debris Flow in Cortina d’Ampezzo area, Dolomites, Itália. *Landslides* 5:143-150.

AUGUSTO FILHO, O.; CERRI, L. E. S.; AMENOMORI, C. J. (1990) Riscos Geológicos: Aspectos Conceituais. In: Simpósio Latino-Americano Sobre Risco Geológico Urbano, I, São Paulo, 1990. São Paulo: ABGE, p.334-341.

AUGUSTO FILHO, O. (1992) Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: Conferência Brasileira Sobre Estabilidade De Encostas, 1, 1992, Rio de Janeiro. ABMS/ABGE, 1992,p. 721-733.

AUGUSTO FILHO, O. VIRGILI, J. C. (1998) Estabilidade de Taludes. In: OLIVEIRA, A. M. dos S.; BRITO S. B. A. de (Ed.) *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, Cap. 15, p. 244-269.

AVELAR, A., S., COELHO, N. A., LACERDA, W. A., BECKER, L. B. & MENDONÇA, M. B. (2011). Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil [online]. The Second World Landslide Forum, IPL, Roma, Itália, Anais do The Second World Landslide Forum, 2011. p. 1-5.

AZEVEDO, G. F. (2015). Sistemas de Análise Quantitativa de Risco por Escorregamentos Rasos Deflagrados por Chuvas em Regiões Tropicais. Tese de Doutorado – Universidade de Brasília, UnB, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, 254p.

BADILLO, E. J. (1985), General volumetric constitutive equation for geomaterials. Special Volume on Constitutive laws of soils. XI Internacional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, San Francisco, CA, USA. Japanese Society of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, pp. 131-135.

BADILLO, E. J. (2010), Theoretical Geoscience. *Sociedad Mexicana de Ingenieria Geotécnica*, Mexico, pp. 116. ISBN 978-607-95506-2-2.

BANDEIRA, A. P. N; (2003) Mapa de risco de erosão e escorregamento das encostas ocupações desordenadas no Município de Camaragibe – PE. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Engenharia Civil, 209p.

BELL, R.; GLADE, T. (2004). Quantitative risk analysis for landslides? Examples from Búdudalur, NW-Iceland. *Natural Hazards and Earth System Science*, v. 4, n. 1, p. 117-131.

BRASIL. (1983) Departamento Nacional de Produção Mineral. Projecto RADAM. Levantamento de Recursos Naturais. Rio de Janeiro, Folhas Sf.23/24 Rio De Janeiro/Vitória, V. 32.

BISPO, P.C., ALMEIDA, C.M., VALERIANO, M.M., MEDEIROS, J.S. & CREPANI, E. (2009). Avaliação da suscetibilidade aos movimentos de massa na região de São Sebastião-SP com o uso de técnicas de geoprocessamento. XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, INPE, Natal, Brasil, 1: 3583-3590.

BORTER, P. (1999). Risiko analys ebeig ravitativen Naturgefahren. Bezugsquelle: Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Dokumentation.

- CANUTI, P. AND CASAGLI, N. (1996) Considerazioni sulla valutazione del rischio di frana, estratto da "Fenomeni franosi e centri abitati", Atti del Convegno di Bologna del 27 Maggio 1994, CNR – GNDCI – Regione Emilia Romagna, 57 pp., 1996.
- CARDONA, O.D. (2001). Estimación holística do risco sísmico utilizando sistemas dinámicos complexos (Em Espanhol). Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, Departamento de Ingeniería Del Terreny Cartográfica I Geofísica, Barcelona.
- CARLSON, J.L. (1996) - Environmental economics, survey. In: BISIO, A. & BOOTS, S. (ed) - The Wiley encyclopedia of energy and the environment. vol. 1, John Wiley & Sons, Inc. N.Y. p. 680-697.
- CASAGLI N, DAPPORTO S, IBSEN ML, TOFANI V, VANNOCCI P (2006) Analysis of the landslide triggering mechanism during the storm of 20th-21th November 2000, em Northern Tuscany. Landslides 3:13–21
- CASTRO, A. L. C. (1999) Manual de Planejamento em Defesa Civil. Brasília: Ministério da Integração Nacional, Secretaria de Defesa Civil.
- CASTRO, A. L. C. (2003) Manual de desastres: desastres naturais. Brasília (DF): Ministério da Integração Nacional, 182p.
- CERRI, L. E.S.; AMARAL, C. P. (1998) Riscos Geológicos. In: BRITO, S. N. A., OLIVEIRA, A.M.S. (Ed). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998. 303-310p
- CRUDEN D. M., VARNES D. J. (1996). Landslide types and processes. In: Landslide investigation and mitigation (1996). National Academy Press, Washington, pp 36–75
- DE VITA S, SANSIVERO F, ORSI G, MAROTTA E (2006) Cyclical slope instability and volcanotectonism in resurgent calderas: the Ischia island (Italy) case study. Eng. Geol. 86:148–165
- DOUGLAS, J. (2007) Physical vulnerability modelling in natural hazard risk assessment. Natural Hazards and Earth System Science, v. 7, n. 2, p. 283-288.
- DRM-RJ (1982) Geological Map of Nova Friburgo, Dept. Recursos Minerais; 1:50.000; Niterói (RJ)
- EM-DAT – Emergency Events Database. The OFDA/CRED International Disaster Database. Disponível em: <<http://www.em-dat.net/>>. Acesso em 17 de setembro de 2011.
- FELL, R. (1994). Landslide risk assessment and acceptable risk. Canadian Geotechnical Journal, vol 31, No 2: 261-272.
- FELL, R., Ho, K.K.S., LACASSE, S., LEROI, E., (2005). A framework for landslide risk assessment and management. In: Hungr, O., Fell, R., Couture, R., Eberhardt, E. (Eds.), Landslide risk management, Proceedings of the International Conference on Landslide Risk Management, Vancouver, 31 Maio – 3 Junho 2005. Taylor & Francis, London, pp. 3–25.
- FERNANDES, N. F. & AMARAL, C. P. (1996). Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. Em: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. (org) Geomorfologia e Meio Ambiente. Bertrand, Rio de Janeiro. P. 123 – 194.
- FERNÁNDEZ, V. C. B. (2009) Geo-information for measuring vulnerability to earthquakes: a fitness for use approach. ITC – International Institute for geo-information Science and Earth Observation, Enschede, the Netherlands, ITC Dissertation Number 158. 191p.
- FINLAY, P., (1996). The risk assessment of slopes. Tese de pós doutorado (PhD), Escola de Engenharia Civil, Universidade de New South Wales, Sydney, Australia.
- FIORILLO F, GUADAGNO F, AQUINO S, DE BLASIO A (1999) The December 1999 Cervinaralandslides: further debris flow in the pyroclastic deposits of Campania (Southern Italy). Bull Eng Geol Environ 60(2001):171–184

- FREIRE, E. S. M. (1965), Movimentos Coletivos de Solos e Rochas e sua Moderna Sistemática. Revista Construção, Rio de Janeiro, V.8, n.95.
- FUCHS, S.; HEISS, K.; HÜBL, J. (2007). Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Science*, v. 7, n. 5, p. 495-506, 2007.
- GABOR, T., GRIFFITH, T., (1980). The assessment of community vulnerability to acute hazardous materials incidents. *Journal of Hazardous Materials*, v. 3, n. 4, p. 323-333.
- GARCÍA, H.A.G. (2004). Avaliação da susceptibilidade aos movimentos de massa usando Sistemas de Informação Geográfica e Redes Neurais Artificiais. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 140 p.
- GLADE, T., (2003). Vulnerability assessment in landslide risk analysis. *Erde*, v. 134, n. 2, p. 123-146.
- GUERRA, A. J. T.; LOPES, P. B. M.; SANTOS FILHO, R. D. (2007) Características geográficas e geomorfológicas da APA de Petrópolis, RJ. *Revista Brasileira De Geomorfologia*, Porto Alegre, Ano 8, N. 1, P. 77-86.
- GRAY, D. H. & LEISER, A. J. (1982). Role vegetation in stability and protection of slopes. In: *Biotechnical slope protection and erosion control*. New York: Van Nortrand Reinhold. P.37-65.
- GUIDICINI, G. e NIEBLE, C. M. (1976), Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. São Paulo: Edgard Blücher.
- GUIDICINI, G. E NIEBLE, C. M. (1984). Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. São Paulo: 2ª ed. Edgard Blücher,. 194p.
- HUNGR O (1995) A model for the run out analysis of rapid flow slides, debris flows, and avalanches. *Can Geotech J* 32:610–623
- HUNGR O. (2002). Analytical models for slides and flows. In *Proceeding International Symposium on Landslide Risk Mitigation and protection of Cultural and Natural Heritage*, Kyoto, 21–25 Janeiro (2002), pp. 559–586.
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO S/A – IPT. 1991. Ocupação de Encostas. Publicação IPT nº 1831, 216p.
- ISSMGE. (2004). Sociedade Internacional de Mecanica de Solos e Engenharia, Glossary of Risk Assessment Terms. [http://www.engmath.dal.ca/tc32/2004Glossary\\_Draft1.pdf](http://www.engmath.dal.ca/tc32/2004Glossary_Draft1.pdf)
- ISSMGE TC32. (2004) Technical Committee on Risk Assessment and Management Glossary of Risk Assessment Terms. Version 1. 2004.
- ISSMGE JTC-1. (2008) Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. *Engineering Geology* 103. p.85–98, 2008.
- JAISWAL, P., VAN WESTEN, C. J., & JETTEN, V. (2011). Quantitative estimation of landslide risk from rapid debris slides on natural slopes in the Nilgiri hills, India. *Nat Hazards Earth Syst Sci*, Núm. 11(6), 1723-1743.
- JÓNASSON, K.; SIGURDSSON, S.; ARNALDS, T. (1999). Estimation of avalanche risk, Icelandic Meteorological Office, Reykjavik, Islândia. VÍ-R99001-UR01.
- KATES, R. W. (1980), *Climate and Society: Lessons from Recent Events*. *Weater*, v.35, N.1, Jan, pp.17-25.
- KANG, H. & KIM, Y. (2015). The physical vulnerability of different types of building structure to debris flow events. *Nat. Hazards*, 10/15/2015.Publicaçãoon line. Acesso em 21/03/2014.
- LACERDA, W.A. (2004) The behavior of colluvial slopes in a tropical environment, *Proc. 9th Int. Symp. on Landslides*, Rio de Janeiro,v.2, pp. 1315-1342.

- LARI, S.; FRATTINI, P.; CROSTA, G. B. (2012) Local scale multiple quantitative risk assessment and uncertainty evaluation in a densely urbanised area (Brescia, Italy). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 12, n. 11, p. 3387-3406.
- LEVILLAIN, J. P. (1987), Les risques hydrauliques: inondations, érosions, affouillements. *Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, N. 150-151, un./Aou./Sept./Oct., pp.158-168.
- LI, Z., NADIM, F., HUANG, H., UZIELLI, M. & LACASSE, S. (2010). Quantitative vulnerability estimation for scenario-based landslide hazards. *Landslides*, 7(1): 125-134.
- LOPES, E. S. (2006). Modelagem espacial dinâmica em Sistema de Informação Geográfica – uma aplicação ao estudo de movimentos de massa em uma região da Serra do Mar paulista. Tese de Doutorado em Geociências e Meio Ambiente. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da UNESP (IGCE/UNESP), Rio Claro, 314p.
- MARCELINO, E. V. (2008). Desastres Naturais e Geotecnologias: Conceitos Básicos. Caderno Didático nº 1. INPE/CRS, Santa Maria.
- MICHAEL-LEIBA, M., BAYNES, F., SCOTT, G., AND GRANGER, K. (2003). Regional landslide risk to the Cairns community, *Nat. Hazards*, N° 30,233–249, 2003.
- MITCHELL, J.K. (1989), “Hazards research”, in Gaile, G.L. and Willmott, C.J. (Eds), *Geography in America*, Merrill, Columbus, OH, pp.410-24.
- MORELLI S., MONROI V. H. G., GIGLI G., FALORNI G., ROCHA E. A., CASAGLI N., (2010) The Tancitaro debris avalanche: characterization, propagation and modeling. *J Volcanol Geotherm Res*193(12):93–105
- NOCENTINI, M., TOFANI, V., GIGLI G., FIDOLINI F., CASAGLI, N., (2015) Modeling debris flow in a volcanic terrain for hazard mapping: the case study of Ischia Island (Italy). *Landslides* (2015) 12:831-846.
- NOGUEIRA, F.R. (2002). Gerenciamento de riscos ambientais associados a escorregamentos: contribuição às políticas públicas para áreas de ocupação subnormal. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista – Unesp, Rio Claro, 253p.
- O'BRIEN J. S. & JULIEN P. Y (1985). Physical processes of hyperconcentrated sediment flows. In Utah Water Research Laboratory (eds) (1985) *Proceeding of the ASCE Specialty Conf. on the Delineation of Landslides, Floods, and Debris Flow Hazards in Utah*, Series UWRL/g-85/03, pp. 260–279.
- PARRA-PICHARDO, Y., (2004). Análise de vulnerabilidade a deslizamentos no Distrito de Orosi, Provincia de Cartago (Em Español), Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- REIS E., ZÉZERE J.L., VIEIRA G.T. & RODRIGUES M.L. (2003). Integração de dados espaciais em SIG para avaliação da susceptibilidade à ocorrência de deslizamentos. *Finisterra*, 38(76): 3-34.
- REVELLINO P., HUNGR O., GUADAGNO F. M., EVANS S. G. (2004) Velocity and runout simulation of destructive debris flows and debris avalanches in pyroclastic deposits, Campaniaregion, Italy. *Environ Geol* 45:295–311
- ROMANG, H. (2004). *Wirksamkeit und Kosten von WildbachSchutzmassnahmen*, Verlag des GeographischenInstituts der Universität Bern, Bern, 2004.
- SIGA INGENIERÍA Y CONSULTORÍA S.A., Medellín, 2015.
- SILVEIRA, C.S. & RAMOS, J.A.S. (2007). Análise espacial com SIG de parâmetros ambientais e comportamento hidrológico (chuva-vazão) de uma bacia de drenagem montanhosa na serra dos órgãos: bacia do Paquequer, município de Teresópolis, RJ. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 8(1): 23-34.
- SUSMAN P., O'KEEFE P., WISNER B. (1983). *Global disasters: a radical interpretation*, em Hewitt, K. (Ed.), *Interpretations of Calamity*, Allen & Unwin, Boston, MA, pp.264-83.

- TIGA, J. F. (2013). Análise Espacial e Estatística dos Movimentos de Massa Deflagrados pelas Chuvas dos dias 11 e 12 de Janeiro de 2011 na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-220/13, departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99p.
- TIMMERMAN, P.(1981) Vulnerability resilience and collapse of society. A Review of Models and Possible Climatic Applications. Toronto, Canada. Institute for Environmental Studies, University of Toronto, 1981.
- TOMINAGA, L. K; SANTORO J; AMARAL R. Desastres Naturais Conhecer para Prevenir. São Paulo : Instituto Geológico, 2009. – 196p.
- USGS. The landslide handbook – A guide to understanding landslides. Highland, L.M., and Bobrowsky, P. (versão em português). (2008) Reston, Virginia, U.S. Geological Survey Circular. GFDRR/World Bank. 1325, 129p.
- UZIELLI, *et al.*, M., NADIM, F., LACASSE, S., KAYNIA, A. M. (2008). A Conceptual Framework for Quantitative Estimation of Physical Vulnerability to Landslides. *Engineering Geology* 102 (2008) 251–256.
- VARGAS, M. (1966). Estabilização de taludes em encostas de gnaisses decompostas. Anais do 3º Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Belo Horizonte, 1966.
- VARNES D. J.:(1978). Slope movement type and processes. *Landslides: analysis and control*. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington DC. P. 11-33.
- VARNES, D. J.(1984) Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. UNESCO, Paris, 1984.
- WILCHES-CHAUX, G. (1989). Desastres, ecologismos y formación profesional. SENA, Popayan, Colombia. 78
- WOLLE, C. M. (1980). Taludes Naturais: mecanismos de instabilização e critérios de segurança. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1980. 245p.
- WOLLE, C.M. (1988). Análise dos escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encostas. 394f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da USP, São Paulo.
- ZENG, C., CUI, P., SU, Z., LEI, Y. & CHEN, R. (2015). Failure modes of reinforced concrete columns of buildings under debris flow impact. *Landslides*, 12(3): 561–571.
- ZUQUETTE, L.V. (1993). Importância do mapeamento geotécnico no uso e ocupação do meio físico: fundamento e guia para elaboração. 2v. Tese (Livre-docência em Geotecnia) – Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, São Carlos. 368p.
- ZUQUETTE, L.V; PEJÓN, O.; GANDOLFI, N.; PARAGUASSU, A.B., (1995). Considerações básicas sobre a elaboração de cartas de zoneamentos de probabilidade ou possibilidade de ocorrer eventos perigosos e de riscos associados. *Geociências*, São Paulo, Vol. 14, Nº 2, p. 9-39.