



Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Programa Interunidades

unesp 

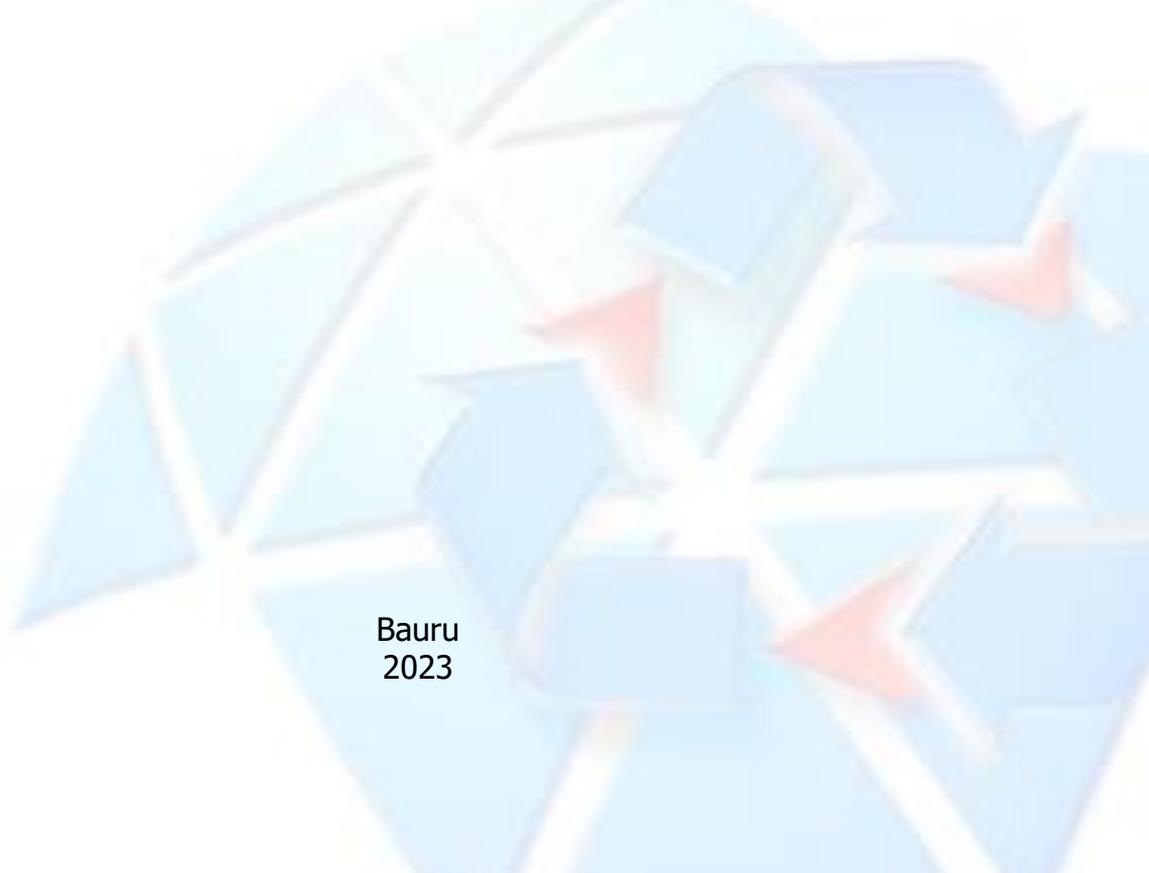
Mestrado

Engenharia Civil e Ambiental

MONYK DOS SANTOS SANDES

**MAPEAMENTO DE RISCO DE MOVIMENTOS DE MASSA EM
CORREDORES RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE CASO NA BR-116
ENTRE OS MUNICÍPIOS DE JACAREÍ E QUELUZ (SP)**

Bauru
2023



MONYK DOS SANTOS SANDES

**MAPEAMENTO DE RISCO DE MOVIMENTOS DE MASSA EM
CORREDORES RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE CASO NA BR-116
ENTRE OS MUNICÍPIOS DE JACAREÍ E QUELUZ (SP)**

Dissertação apresentada como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Área de Concentração Geotecnia.

Orientadora: Prof^a Dra. Anna Silvia
Palcheco Peixoto



Bauru
2023

Sandes, Monyk dos Santos.

Mapeamento de risco de movimentos de massa em corredores rodoviários: estudo de caso na BR-116 entre os municípios de Jacareí e Queluz (SP) / Monyk dos Santos Sandes, 2023

137f. : il.

Orientadora: Anna Silvia Palcheco Peixoto

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista (Unesp). Faculdade de Engenharia, Bauru, 2023

1. Desastres. 2. Mapeamento de risco. 3. Movimentos de massa. 4. Rodovia. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE MONYK DOS SANTOS SANDES, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 31 dias do mês de março do ano de 2023, às 14:15 horas, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de MONYK DOS SANTOS SANDES, intitulada **MAPEAMENTO DE RISCO DE MOVIMENTOS DE MASSA EM CORREDORES RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE CASO NA BR-116**. A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Profa. Dra. ANNA SÍLVIA PALCHECO PEIXOTO (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) FEB / UNESP Bauru SP, Prof. Dr. GUSTAVO GARCIA MANZATO (Participação Virtual) do(a) Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil e Ambiental / FEBUNESP Bauru, Profª Drª VIVIAN SILVEIRA DOS SANTOS BARDINI (Participação Virtual) do(a) Departamento de Transportes / Unicamp. Após a exposição pela mestranda e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: Aprovada. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.


Profa. Dra. ANNA SÍLVIA PALCHECO PEIXOTO

PROPOSTA DE ALTERAÇÃO DO TÍTULO

A COMISSÃO EXAMINADORA PROPÕE A ALTERAÇÃO DO TÍTULO DO TRABALHO DA ALUNA: **MONYK DOS SANTOS SANDES**

DE: "MAPEAMENTO DE RISCO DE MOVIMENTOS DE MASSA EM CORREDORES RODOVIÁRIOS: ESTUDO DE CASO NA BR-116"

PARA:

Mapeamento de Risco de Movimentos de
Massa em Corredores Rodoviários: Estudo
de caso na BR-116 entre os municípios
de Jacareí e Aveluz (SP)

Bauru, 31 de março de 2023.



Prof. Dra. Anna Silvia Palcheco Peixoto
Orientador(a)

Dedicatória

Aos amigos e familiares, pelo incentivo e pelo apoio constantes.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente à Deus, por tornar possível essa realização em minha vida. Aos meus pais, Ismael Sandes e Sueli Sandes, pelo amor que sempre demonstraram, pelo investimento em minha educação e pelos incentivos ao meu crescimento pessoal e profissional.

À minha família por todo apoio e cuidado.

Ao meu noivo, Marcelo, pelo companheirismo em todas as horas.

Agradeço à minha orientadora, Prof^a Dra. Anna Sílvia Palcheco Peixoto, pela amizade e pelo compartilhamento dos seus sábios conhecimentos. Obrigada pelas conversas e ajuda na conclusão dessa jornada.

Aos professores do departamento pelos grandes ensinamentos repassados.

À minha colega de moradia, Tamara, pela parceria e companhia.

Aos colegas de trabalho, pelos aprendizados e colaborações.

Ao pessoal do Laboratório de Geoprocessamento e afins, pelas discussões construtivas e momentos de descontração.

Ao PPGCA, à UNESP pela oportunidade, e à CAPES pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Não podemos eliminar os desastres, mas podemos mitigar
o risco. Podemos reduzir os danos e salvar mais vidas.

Ban Ki-moon

Resumo

Os movimentos de massa são fenômenos relacionados a desastres, sendo desencadeados por uma série de fatores, tal como o crescimento desordenado das áreas urbanas em locais com presença de maciços rochosos com superfície íngreme, a implantação de obras civis, caso das rodovias, e as condições climáticas, que no Brasil favorecem e agravam as ocorrências de deslizamentos e escorregamentos de terra. A pesquisa, em consonância com os ODS 11 e ODS 13 da ONU, propõe apresentar um método para mapeamento de áreas favoráveis à instabilização de taludes, constituindo uma base de dados armazenados em SIG, e através da análise estatística, elaborar mapas de suscetibilidade, perigo e risco para identificação das futuras áreas propícias aos processos de movimentação de massa. Os dados coletados são de eventos de movimentos de massa pretéritos, dados de características geológicas, geomorfológicas, pedologia, de uso e ocupação, proximidade da via, declividade, orientação das vertentes e formas do terreno, dados socioeconômicos e dados de eventos meteorológicos. A área de estudo, compreende a Rodovia Presidente Dutra BR-116 no trecho entre as cidades de Jacareí e Queluz, abrangendo uma parte do Vale do Paraíba, dentro do Estado de São Paulo. Com a produção do mapa de suscetibilidade, conforme a metodologia do Valor Informativo (VI) e o mapa de vulnerabilidade pelos dados socioeconômicos, foram construídas matrizes quadráticas envolvendo suscetibilidade e chuva para obtenção do mapa de perigo; e vulnerabilidade social e perigo para obtenção do mapa de risco. Espera-se contribuir para a identificação das necessidades de manutenções e sistemas de alerta, para a garantia da integridade do corredor rodoviário, a segurança do tráfego e da população adjacente, bem como fornecer uma ferramenta para o planejamento urbano. Este conhecimento é crucial para prever e prevenir processos geohidrológicos e desenvolver melhores estratégias de alerta para mitigar riscos e reduzir prejuízo socioeconômico.

Palavras-Chave: Desastres; Mapeamento de Risco; Movimentos de Massa; Rodovia.

Abstract

Mass movements are phenomena related to disasters, being triggered by a series of factors, such as the disorderly growth of urban areas in places with the presence of rocky massifs with steep surfaces, the implementation of civil works, as in the case of highways, and the conditions climate, which in Brazil favor and aggravate the occurrence of landslides and sliding. The research, in line with the UN SDG 11 and SDG 13, proposes to present a methodology for mapping areas favorable to slope instability, constituting a database stored in GIS, and through statistical analysis, preparing maps of susceptibility, hazard and risk to identify future areas conducive to mass movement processes. The data collected are from past mass movement events, geological and geomorphological characteristics, soils, land use data, road proximity, slope, slope curvature and aspect, socioeconomic data and meteorological event data. The study area comprises the Presidente Dutra BR-116 Highway in the stretch between the cities of Jacareí and Queluz, covering a part of Vale do Paraíba, within the State of São Paulo. With the production of the susceptibility map, according to the Informative Value (VI) methodology and the vulnerability map based on socioeconomic data, square matrix involving susceptibility and rainfall were constructed to obtain the hazard map; and social vulnerability and hazard to obtain the risk map. It is expected to contribute to the identification of maintenance needs and warning systems, to guarantee the integrity of the road corridor, the safety of traffic and the adjacent population, as well as providing a tool for urban planning. This knowledge is crucial for forecasting and preventing geohydrological processes and in developing better warning strategies to mitigate risks and to reduce socio-economic damage.

Key words: Disasters; Risk Mapping; Mass Movements; Roads.

Índice de Figuras

Figura 1 - Localização da Rodovia Presidente Dutra, BR 116.....	6
Figura 2- Expansão da Área Urbanizada em 1975, 1995 e 2015. USGS, 2017	8
Figura 3 - Os Dez Principais Países por População Total Afetados por Desastres entre 2000 e 2019 em Comparação com os Dez Principais Países mais Afetados por 100.000 Habitantes	10
Figura 4- Número de Vítimas dos Grandes Deslizamentos Ocorridos no Brasil entre 1948 e 2011	11
Figura 5- Distribuição Temporal dos Desastres Vinculados aos Movimentos de Massa (Ano 2013).....	12
Figura 6- Exemplo de Queda de Blocos	18
Figura 7- Exemplo de Rolamento de Blocos	19
Figura 8- Exemplo de Tombamento	19
Figura 9- Exemplo de Desplacamento.....	20
Figura 10- Exemplo de Escoamento Rastejo.....	21
Figura 11- Exemplo de Corrida de Massa	21
Figura 12- Escorregamentos Planares (translacionais).....	23
Figura 13- Escorregamentos Circulares (rotacionais)	24
Figura 14- Escorregamento em Cunha	25
Figura 15 - Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno	35
Figura 16- Fluxograma Metodologias para Mapeamento da Suscetibilidade	42
Figura 17- Esquematização da Análise Estatística Bivariada para Escorregamento em SIG	46
Figura 18- Esquematização da Análise Estatística Multivariada para Escorregamentos em SIG.....	47
Figura 19- Esboço da Partição Aleatória dos Dados	49
Figura 20- Exemplo Gráfico de uma Curva ROC	50
Figura 21- Matriz Quadrada de Perigo para a Combinação de Suscetibilidade e Limiares Pluviométricas	52
Figura 22- Matriz Quadrada Socionatural de Combinação entre Suscetibilidade e Vulnerabilidade	52
Figura 23- Matriz Quadrada de Risco de Combinação entre Socionatural e Chuva.....	53

Figura 24 - Fluxograma de Elaboração do Mapa de Risco	55
Figura 25- Caracterização da Área de Estudo	56
Figura 26 - Interface Online do Banco de Dados de Desastres Naturais do Centro de Meteorologia de Bauru	57
Figura 27 - Representação das Formas de Terreno	59
Figura 28- Espacialização dos Pluviômetros Conforme a Geomorfologia das Regiões A e B	61
Figura 29- Matriz Quadrada de Perigo de Combinação entre Suscetibilidade e Chuva	63
Figura 30- Matriz Quadrada de Risco de Combinação entre Perigo e Vulnerabilidade	66
Figura 31 - Inventário de Desastres de Movimentos de Massa.....	67
Figura 32 - Análise da Quantidade de Desastres ao Longo dos Anos.....	68
Figura 33 - Caracterização Geológica	69
Figura 34- Suscetibilidade Geológica.....	70
Figura 35 - Caracterização Geomorfológica	71
Figura 36- Suscetibilidade Geomorfologia.....	73
Figura 37- Caracterização Pedológica	73
Figura 38- Suscetibilidade Pedológica	74
Figura 39 – Caracterização Uso e Ocupação do solo	75
Figura 40- Suscetibilidade Uso e Ocupação do Solo	76
Figura 41- Suscetibilidade Proximidade da Via.....	77
Figura 42- Caracterização Orientação das Vertentes	78
Figura 43- Suscetibilidade Orientação das Vertentes.....	78
Figura 44- Caracterização Declividade	79
Figura 45- Suscetibilidade Declividade.....	80
Figura 46- Caracterização Formas de Terreno	81
Figura 47- Suscetibilidade Forma de Terreno	81
Figura 48- Curvas dos Fatores pela AUC.....	87
Figura 49- Curva de Sucesso	88
Figura 50- Curva de Predição.....	88
Figura 51- Mapa de Suscetibilidade Modelo 3.....	89
Figura 52- Mapa de Suscetibilidade Modelo 1.....	90
Figura 53- Mapa de Suscetibilidade Modelo 2.....	90
Figura 54- Análise dos Pluviômetros Conforme Geomorfologia e Dados de Desastres das Regiões A e B.....	90

Figura 55- Mapa de Perigo (Suscetibilidade e Chuva Diária).....	96
Figura 56- Mapa de Perigo (Suscetibilidade e Chuva de 3 Dias).....	96
Figura 57- Mapa de Perigo (Suscetibilidade e Chuva de 7 Dias).....	97
Figura 58- Renda Per Capita	98
Figura 59- Densidade Demográfica.....	98
Figura 60- Porcentagem da População Abaixo dos 5 anos de Idade.....	99
Figura 61- Porcentagem da População Acima dos 60 Anos de Idade.....	99
Figura 62- Mapa de Vulnerabilidade.....	100
Figura 63- Mapa de Risco (Perigo e Vulnerabilidade - Chuva Diária).....	101
Figura 64- Mapa de Risco (Perigo e Vulnerabilidade - Chuva de 3 Dias).....	101
Figura 65- Mapa de Risco (Perigo e Vulnerabilidade –Chuva de 7 Dias)	102

Índice de Tabelas

Tabela 1- Dados Demográficos Municípios nos Anos de 1970, 1991 e 2010. IBGE, 2018.	7
Tabela 2- Sistema de Classificação de Movimentos de Massa de Freire (1965)	15
Tabela 3- Classificação de Movimentos de Massa conforme Varnes (1978)	16
Tabela 4- Classificação Movimentos de Massa segundo Augusto Filho (1992)	17
Tabela 5- Classificação dos Movimentos de Massa adotada pela ABNT NBR 11682:2009	18
Tabela 6 - Fatores Condicionantes com Maiores Influências nos Movimentos de Massa..	30
Tabela 7- Definições de Perigo (Hazard)	37
Tabela 8- Definições de Risco (Risk).....	37
Tabela 9- Definições de Suscetibilidade	38
Tabela 10- Definições de Vulnerabilidade	38
Tabela 11- Classificação de Proximidade da Via.....	58
Tabela 12- Informações dos Pluviômetros Espacializados	62
Tabela 13- Classes das Porcentagens de Idade.....	64
Tabela 14- Distribuição da Idade para Classificação na Vulnerabilidade.....	65
Tabela 15 - Legenda das Classes Geológicas.....	69
Tabela 16- Caracterização Geológica.....	70
Tabela 17 - Legenda das Classes Geomorfológicas	71
Tabela 18- Caracterização Geomorfológica	72
Tabela 19- Caracterização Pedológica	74
Tabela 20- Caracterização Uso e Ocupação	76
Tabela 21- Caracterização Proximidade da Via	77
Tabela 22- Caracterização Orientação das Vertentes	79
Tabela 23- Caracterização Declividade	80
Tabela 24- Caracterização Formas de Terreno.....	82
Tabela 25- Valor Informativo da Geologia	83
Tabela 26- Valor Informativo da Geomorfologia.....	83
Tabela 27- Valor Informativo da Pedologia	84
Tabela 28- Valor Informativo do Uso e Ocupação.....	84
Tabela 29- Valor Informativo de Proximidade da Via.....	85
Tabela 30- Valor Informativo de Orientação das Vertentes.....	85

Tabela 31- Valor Informativo da Declividade.....	85
Tabela 32- Valor Informativo das Formas de Terreno.....	86
Tabela 33- Valor Informativo por Hierarquia dos Fatores.....	86
Tabela 34- Fatores dos Diferentes Modelos de VI e suas Respectivas AUC.....	87
Tabela 35- Quantidade de Chuvas em 20 Anos para a Região A.....	91
Tabela 36- Quantidade de Chuvas em 20 Anos para a Região B.....	92
Tabela 37- Análise da Frequência de Chuvas Considerando o Volume de Precipitação pelo dia da Ocorrência, das Regiões A e B.....	94
Tabela 38- Análise da Frequência de Chuvas Considerando o Volume de Precipitação de 3 Dias das Regiões A e B.....	94
Tabela 39- Análise da Frequência de Chuvas Considerando o Volume de Precipitação de 7 Dias das Regiões A e B.....	95

Sumário

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVOS	4
1.1.1 <i>Objetivo Geral</i>	4
1.1.2 <i>Objetivos Específicos</i>	4
1.2 JUSTIFICATIVA.....	5
1.3 ÁREA DE ESTUDO – BREVE DESCRIÇÃO	5
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	8
CAPÍTULO 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1 DESASTRES.....	9
2.1.1 <i>Histórico de ocorrências</i>	10
2.1.1.1 Eventos extremos	12
2.1.1.2 Gestão ambiental e evolução da legislação.....	13
2.2 MOVIMENTOS DE MASSA.....	15
2.2.1 <i>Classificações dos Movimentos de Massa</i>	15
2.2.1.1 Quedas e rolamentos de blocos.....	18
2.2.1.2 Tombamentos	19
2.2.1.3 Desplacamento	20
2.2.1.4 Expansão lateral e escoamento	20
Rastejo e corrida	21
2.2.1.5 Escorregamentos	23
Escorregamento planar.....	23
Escorregamento circular	24
Escorregamento em cunha	24
2.3 PROBLEMAS GEOLÓGICOS-GEOTÉCNICOS EM RODOVIAS.....	25
2.3.1 <i>Relação entre água no solo e chuva com os movimentos de massa</i>	29
2.4 CHUVA COMO AGENTE DESENCADEADOR	29
2.5 FATORES CONDICIONANTES DOS MOVIMENTOS DE MASSA.....	30
2.5.1 <i>Geologia</i>	31
2.5.2 <i>Geomorfologia</i>	31
2.5.3 <i>Pedologia</i>	32
2.5.4 <i>Uso e ocupação do solo</i>	33
2.5.5 <i>Distância até a rodovia</i>	33
2.5.6 <i>Orientação das vertentes</i>	34
2.5.7 <i>Declividade</i>	34
2.5.8 <i>Formas do terreno</i>	34

2.6	RISCO DE DESASTRES	35
2.6.1	<i>Terminologias para Conceitos Universais</i>	36
2.7	MAPEAMENTO GEOTÉCNICO E GEOAMBIENTAL.....	39
2.7.1	<i>Aplicação de SIG</i>	41
2.8	METODOLOGIAS PARA MAPEAMENTO DE MOVIMENTOS DE MASSA	42
2.8.1	<i>Suscetibilidade Ambiental</i>	42
2.8.1.1	Métodos qualitativos	43
	Análise Geomorfológica	43
	Método Heurístico	43
2.8.1.2	Métodos quantitativos	44
	Métodos determinísticos	44
	Métodos estatísticos	45
2.8.2	<i>Mapa de Suscetibilidade pelo Valor Informativo (VI)</i>	48
2.8.2.1	Partição da amostra.....	48
2.8.2.2	Análise de sensibilidade e curva ROC.....	49
2.8.2.3	Curvas de sucesso e predição	51
2.8.2.4	Classificação de suscetibilidade	51
2.8.3	<i>Mapa de perigo e de risco</i>	52
2.8.4	<i>Vulnerabilidade Social</i>	53
CAPÍTULO 3 MATERIAIS E MÉTODOS		55
3.1	ÁREA DE ESTUDO E LEVANTAMENTO DE DADOS PRETÉRITOS.....	56
3.2	DADOS DO MEIO FÍSICO.....	57
3.3	MAPA DE SUSCETIBILIDADE	59
3.4	DADOS DE CHUVA	61
3.5	MAPAS DE PERIGO	63
3.6	DADOS SOCIOECONÔMICOS E MAPA DE VULNERABILIDADE	64
3.7	MAPAS DE RISCO	65
CAPÍTULO 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		67
4.1	INVENTÁRIO DE DESASTRES DE MOVIMENTOS DE MASSA.....	67
4.2	ANÁLISE PRELIMINAR DA SUSCETIBILIDADE AMBIENTAL	68
4.2.1	<i>Geologia</i>	69
4.2.2	<i>Geomorfologia</i>	71
4.2.3	<i>Pedologia</i>	73
4.2.4	<i>Uso e Ocupação do Solo</i>	74
4.2.5	<i>Proximidade da via</i>	77
4.2.6	<i>Orientação das vertentes</i>	78
4.2.7	<i>Declividade</i>	79
4.2.8	<i>Formas de terreno</i>	81

4.3	MAPA DE SUSCETIBILIDADE PELO VALOR INFORMATIVO	82
4.4	DADOS HISTÓRICOS DE CHUVA	90
4.5	MAPAS DE PERIGO	96
4.6	DADOS SOCIOECONÔMICOS E VULNERABILIDADE SOCIAL	97
4.7	MAPAS DE RISCO	100
CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES DO TRABALHO		103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		106

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

As ocorrências de desastres e os registros identificados vêm aumentando nas últimas décadas. Os motivos são complexos, devido principalmente a uma combinação de fatores: o crescimento populacional e conseqüentemente ao uso e ocupação do solo desordenado; a segregação socioespacial, condições que relegam as populações de baixa renda à áreas de habitação de alto risco e à desigualdade de renda; acumulação de capital em áreas perigosas como a implantação de megas projetos de engenharia; e as mudanças globais, que alteram os processos naturais do meio ambiente (WINCHESTER E SZALACHMAN, 2009).

Países situados em zona tropical, como o Brasil, são particularmente sensíveis a desastres, especificamente a região Sudeste e o Estado de São Paulo, principalmente entre outubro e março, devido às condições de alta umidade, em função da intensificação das mudanças climáticas com o aumento de eventos severos, tais como chuvas intensas e prolongadas (TOMINAGA et al., 2009).

Frente a essa observação, se iniciou, na década de 1990, uma estratégia Internacional das Nações Unidas para a Redução de Risco de Desastres (UNISDR) com o intuito de construir comunidades mais resilientes, que resultou a declaração de Hyogo. Em complemento, no ano de 2015, em Paris, desenvolveu-se o Relatório especial do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), relativo aos impactos do aquecimento global de 1,5°C, e, recentemente sendo desenvolvido o 6º relatório, analisando os impactos das mudanças climáticas, a vulnerabilidade e adaptação das sociedades humanas (IPCC, 2021).

Focalizou-se a adoção da agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, gerando um documento listando 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS).

Destacam-se aqui as metas do 13° ODS: "Reforçar a resiliência e a adaptabilidade aos riscos e desastres naturais relacionados com o clima em todos os países" e do 11° ODS "Cidades e comunidades mais sustentáveis", especialmente por envolver a questão de segurança às pessoas e no controle de catástrofes ambientais, como os deslizamentos (ONU, 2021).

Registra-se, mundialmente, desastres naturais e emergências complexas que tiveram um grande impacto na saúde humana, tal como os deslizamentos, inundações, tempestades, ondas de calor e secas. No Brasil, houve cerca de 250 registros de desastres no período de 1900 a 2021 (EM-DAT, 2021). Sendo 132 registros entre os anos de 1900 até 2000, compreendendo um período de 100 anos e 118 registros nos últimos 21 anos.

Após as catástrofes ocorridas no sudeste do país nos verões de 2009 e 2010 envolvendo escorregamentos de encosta, inundações e alagamentos, com centenas de vítimas, houve uma pressão da sociedade civil e acabou culminando na Lei 12.608/2012 que institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, integra o desenvolvimento urbano, meio ambiente, mudanças climáticas, gestão de recursos hídricos, geologia, infraestrutura, educação, ciência e tecnologia e às demais políticas setoriais, tendo em vista a promoção do desenvolvimento sustentável. A diretriz, no Art. 4°, inciso V, estabelece o planejamento com base em pesquisas e estudos sobre áreas de risco e incidência de desastres no território nacional. O Art. 5°, tem como objetivos, nos incisos I e VII, respectivamente, reduzir os riscos de desastres e promover a identificação e avaliação das ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades a desastres, de modo a evitar ou reduzir sua ocorrência (BRASIL, 2012).

Embora os projetos de engenharia sejam componentes do desenvolvimento socioeconômico do país, esses empreendimentos devem estar alinhados com as atividades de avaliação de riscos e impactos ambientais, que requerem acompanhamento dos fenômenos adversos que podem ocorrer, que demandam avaliação de aspectos técnicos, econômicos, sociais, políticos e ambientais. (CARVALHO, 1991).

A implantação de empreendimentos, no caso das rodovias, compõe o modal de transporte mais utilizado em todo o planeta, cumprindo um papel importante como infraestrutura no desenvolvimento econômico e social de todas as nações, possibilitando o transporte e a distribuição de produtos agrícolas, pecuários e industriais, criação de polos industriais e comerciais, bem como o deslocamento e a mobilidade de pessoas, provendo acesso a bens e serviços (RIDENTE JR, 2008).

Além disso, devido à sua grande extensão, as rodovias geralmente atravessam ambientes diversos, formados por diferentes formações geológicas, estruturas geomorfológicas, tipos de solos, ambientes sociais e aspectos econômicos distintos, bem como rios e bacias hidrográficas, induzindo a modificações das suas condições locais, sejam socioeconômicas, culturais e/ou ambientais. Exemplos disso são as alterações dos processos de dinâmica superficial (processos erosivos, escorregamentos e quedas de barreiras), e das condições sociais e econômicas exercidas pelas comunidades, como a relocação da população, formação de núcleos urbanos de baixa renda nas proximidades da faixa de domínio, entre outros (RIDENTE JR, 2008).

A rodovia Presidente Dutra BR 116, no trecho dentro da área de estudo, é uma região relevante para estudos de suscetibilidade de deslizamentos e quedas de barreiras, pois une condições ambientais propícias aos processos de movimentação de massas nos taludes que a circunda e a extensa área urbana formada por cidades e vilarejos que foram se desenvolvendo às margens da via (ANDRADE et al., 2019).

Vários eventos de magnitude foram registrados na Rodovia Presidente Dutra (BR-116), uma cadeia montanhosa com declives acentuados, com condições favoráveis para a ocorrência de escorregamentos. Assim, diversos estudos se concentraram em avaliar as causas e mecanismos de indução de movimentos de massa nas encostas, visando identificar onde eles podem ocorrer, geralmente com base em um conjunto de características ambientais (VARNES et al., 1984; CARRARA et al., 2019; GUZZETTI et al., 2006; CHUNG E FABBRI, 2003).

A elaboração de mapas e cartas é de grande importância na gestão ambiental de rodovias, por serem documentos que inter-relacionam diversas informações do meio físico, permitindo a avaliação dos processos físicos envolvidos, tendo em vista a prevenção, monitoramento e correção dos fenômenos adversos que podem ocorrer nesse empreendimento de grande extensão longitudinal (RIDENTE JR, 2008).

As análises dessa pesquisa compreendem a avaliação da suscetibilidade ambiental, bem como da vulnerabilidade social, para entendimento local dos fenômenos e dos agentes desencadeadores dos movimentos de massa. Com o auxílio de ferramentas SIG (Sistemas de Informações Geográficas), é possível realizar a distribuição espacial de eventos passados (pretéritos) e inserir mapas do meio físico georreferenciados para análise das variáveis correlacionadas, ao longo da área de estudo.

O principal objetivo é desenvolver um método para elaboração dos mapas de suscetibilidade, vulnerabilidade, perigo e risco, dessa forma, mapear e avaliar o potencial da área para futuros eventos, mas com a frequência ou tempo não especificados, além de identificar os fatores que mais influenciaram no desencadeamento de movimentos de massa.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo do estudo é contribuir para o entendimento dos condicionantes do meio físico desencadeadores de movimentos de massa nos taludes em rodovias. Sistematizar e desenvolver uma metodologia para análise e mapeamento de potencial de instabilização de movimentos de massa, tendo como objetivo final a identificação das regiões com riscos dentro da área de estudo, para a segurança rodoviária em termos técnicos, sociais, ambientais e econômicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Coletar os dados de desastres e validação de informações sobre o histórico da área e dos eventos ocorridos relacionados aos movimentos de massa;
- Realizar o mapeamento da suscetibilidade dos desastres relacionando com os fatores do meio físico (geologia, geomorfologia, pedologia, uso e ocupação, proximidade da via, orientação das vertentes, declividade e formas do terreno) individualmente, classificando os dados de desastres em faixas normalizadas de suscetibilidade, e o mapa de suscetibilidade com os fatores integrados através da análise estatística de Valor Informativo;
- Realizar a coleta dos dados pluviométricos conforme os pluviômetros instalados e disponíveis nos portais dos departamentos responsáveis e classificação da influência dos volumes de chuvas;
- Realizar o mapeamento do perigo correlacionando a suscetibilidade com as limiares pluviométricas por meio de matriz quadrática;

- Realizar o mapeamento da vulnerabilidade, conforme os dados censitários do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística);
- Realizar o mapeamento do risco, correlacionando o mapa de perigo com a vulnerabilidade, por meio de matriz quadrática.

1.2 JUSTIFICATIVA

Observa-se ao longo do tempo, especialmente nos períodos com chuvas de alta intensidade, a ocorrência de movimentos de massa em rodovias e do território que a circundam.

O presente estudo se justifica pela relevância frente às mudanças climáticas e à ocorrência mais frequente de eventos severos (ODS 13), especialmente por envolver a questão de segurança às pessoas e no controle de catástrofes ambientais, como os deslizamentos. Além disso, o estudo e monitoramento de taludes e encostas relacionam-se com obras civis, por exemplo, as rodovias, e também contribui para o ODS 11, mais especificamente o item 11.2 que trata de acesso a sistemas de transporte seguros, acessíveis e sustentáveis. Dessa forma, envolve uma situação social bastante grave no Brasil, com relação às ocupações irregulares em áreas de encostas e ao desenvolvimento dos perímetros urbanos em áreas lindeiras às rodovias.

Uma das ações internacionais de destaque estabelecida pela ONU, após a Década Internacional de Redução dos Desastres Naturais (1990-1999), o *International Strategy for Disaster Reduction – ISDR*, tem por finalidade o desenvolvimento de estratégias de redução dos riscos de desastres no mundo, focando, principalmente a redução das vulnerabilidades das comunidades como forma de reduzir o risco de desastres (UNISDR, 2019).

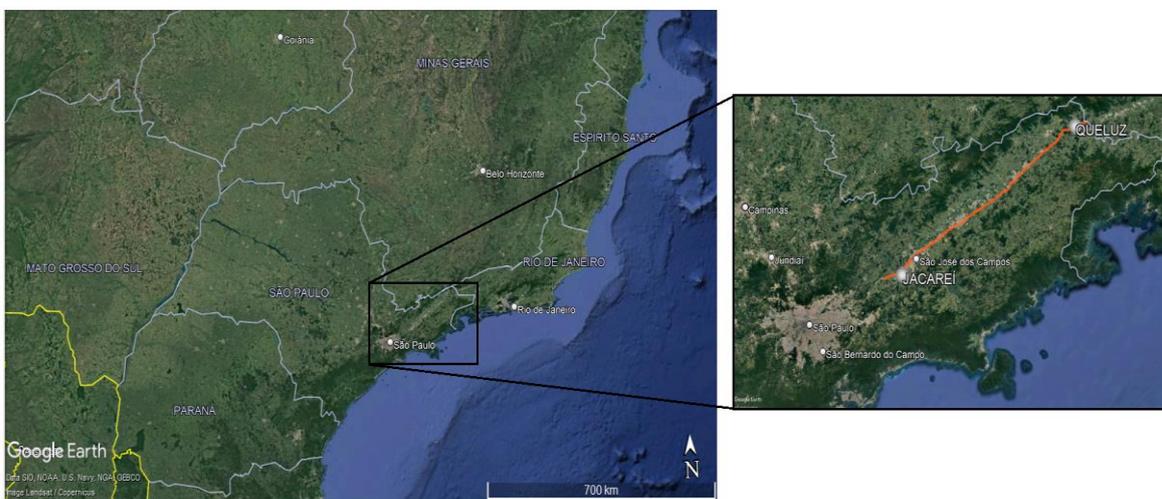
Embora a implantação de uma rodovia seja componente do desenvolvimento socioeconômico do país, esse empreendimento deve estar alinhado com as atividades de avaliação de riscos e impactos ambientais.

1.3 ÁREA DE ESTUDO – BREVE DESCRIÇÃO

A Rodovia Presidente Dutra, comumente conhecida como Via Dutra, é uma rodovia federal que atravessa a parte leste do estado de São Paulo e a região sudoeste do estado do Rio de Janeiro, é parte da rota da BR-116, iniciando-se no Trevo das Margaridas, no acesso à Avenida Brasil, no Rio de Janeiro e terminando na Ponte Presidente Dutra, no acesso à Marginal Tietê, em São Paulo (PPI, 2022). A Via Dutra possui uma extensão total de 402 quilômetros, perpassa 14 dos 39 municípios que compõem a atual Região Metropolitana Vale do Paraíba e Litoral Norte (RMVPLN).

Atualmente, a Via Dutra é gerenciada, por concessão, pelo Grupo CCR. A empresa é responsável pelo monitoramento e manutenção das ocorrências, incluindo o acompanhamento das condições dos taludes que margeiam a via. É uma rodovia sinuosa, localizada em uma área montanhosa, condição que a torna vulnerável aos movimentos de massas. A Figura 1 apresenta a localização da Rodovia Presidente Dutra – BR 116 no trecho do km 0 ao km 169 compreendendo a área de estudo da pesquisa, entre os municípios de Jacareí e Queluz (SP).

Figura 1 - Localização da Rodovia Presidente Dutra, BR 116



Fonte: Google Earth (2022)

Os dados de tráfego estimam um volume diário médio (VDM) de 250.000 veículos/dia, que pode aumentar em 4 vezes nos finais de semana e feriados, conforme informações da Nova Dutra, referentes a 2010 (DER, 2010).

A implantação da rodovia Presidente Dutra no ano de 1951 deu início a uma nova fase da urbanização do Vale do Paraíba e do Litoral Norte do estado de São Paulo.

Propiciou o processo de industrialização no país como forma de atingir o crescimento econômico e se consolidou por meio dos Planos Nacionais de Desenvolvimento da década de 1970 (ANDRADE et al, 2019). Entre as décadas de 1970 a 2010, se percebe modificações dos aspectos demográficos nos municípios do eixo da rodovia, uma vez que com o crescimento demográfico, ocorreu a expansão das áreas urbanas dos municípios no entorno da rodovia, com destaque para Caçapava, Jacareí, São José dos Campos e Taubaté, conforme Tabela 1.

Tabela 1- Dados Demográficos Municípios nos Anos de 1970, 1991 e 2010. IBGE, 2018

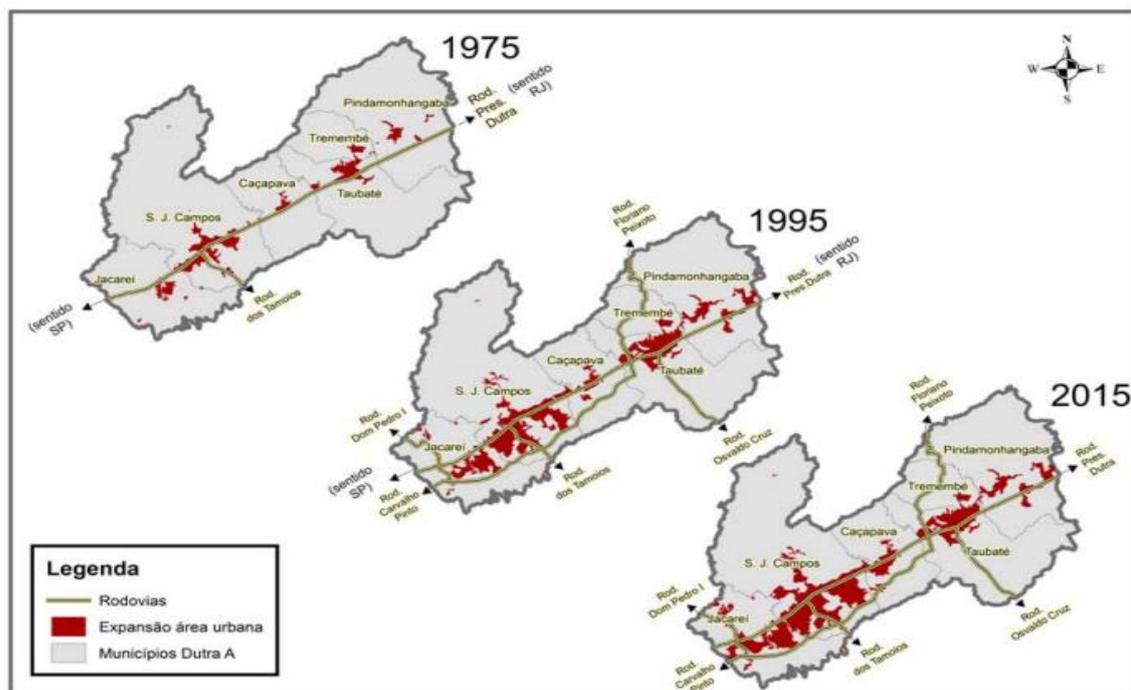
Município	Urbana (1970)	Rural (1970)	Urbana (1991)	Rural (1991)	Urbana (2010)	Rural (2010)	(%) Cresc. Pop. Urbana 1970-2010
Caçapava	24.634	6.078	58.316	7.742	72.517	12.235	194,38
Jacareí	48.529	12.687	157.026	6.843	208.297	2.917	329,22
S. J. dos Campos	132.467	15.865	425.515	16.855	617.106	12.815	365,86
Taubaté	99.969	10.616	197.801	9.164	272.673	6.013	172,76

Fonte: Adaptado de Andrade et al. (2019)

Em 1970, o município de São José dos Campos possuía um total de 132.467 habitantes, após quarenta anos, atingiu o número de 617.106 habitantes vivendo em área urbana, o que significou um aumento de cerca de 366%. Do mesmo modo, Jacareí apresentou um crescimento na ordem de 329%, registrava uma população urbana de 48.529 habitantes em 1970 e 208.297 em 2010. Em seguida, os municípios de Caçapava e Taubaté, com crescimento da população urbana em torno de 194% e 172%, respectivamente.

A Figura 2 permite visualizar as transformações espaciais da área e a ocupação a partir da Rodovia Presidente Dutra. Na apresentação da espacialização desses dados, constata-se a consolidação de uma área urbanizada e conurbana, entre os anos de 1995 e 2015, formada pelos municípios de Jacareí, São José dos Campos e Caçapava.

Figura 2- Expansão da Área Urbanizada em 1975, 1995 e 2015. USGS, 2017



Fonte: Andrade et al. (2019)

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O estudo está estruturado em cinco capítulos. No primeiro capítulo apresenta-se a contextualização do tema, os objetivos, pesquisa na literatura especializada referente à caracterização da área de estudo e sobre metodologias e técnicas utilizadas para mapeamento de risco no desenvolvimento do trabalho.

No segundo capítulo apresenta-se uma revisão da bibliografia sobre os principais conceitos e características relacionados aos fatores condicionantes (geologia, geomorfologia, uso e ocupação, etc). Pesquisa de fontes de informações para criação da base de dados espacial; tratamento das bases pré-existentes e elaboração de mapas.

No terceiro capítulo, fez-se uma descrição das características locais, destacando a área de estudo, os dados coletados, os materiais e métodos a serem empregados, fluxograma e cronograma.

O capítulo 4 apresenta os resultados parciais e discussões, com a apresentação e análise dos mapas elaborados. No capítulo 5 se tem as conclusões e considerações.

Por último, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no trabalho.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta fase de revisão bibliográfica, foram analisadas publicações nacionais e internacionais realizadas na área, para aquisição de informações de interesse a serem utilizadas na pesquisa.

A revisão bibliográfica está voltada à conceituação de termos bastante abordados no decorrer do trabalho, também à análise dos métodos de mapeamento, com referência ao potencial de ocorrência de processos de instabilização de vertentes, ao tratamento dos dados coletados e dos agentes/condicionantes, e de toda a dinâmica dos processos envolvendo movimentos de massa.

Na sequência das atividades, foram levantadas publicações anteriores tratando da utilização de SIG e aplicação da cartografia digital para desenvolver técnicas de cruzamento e ponderação de atributos e um estudo das metodologias vigentes para gerar os mapas finais objetivados.

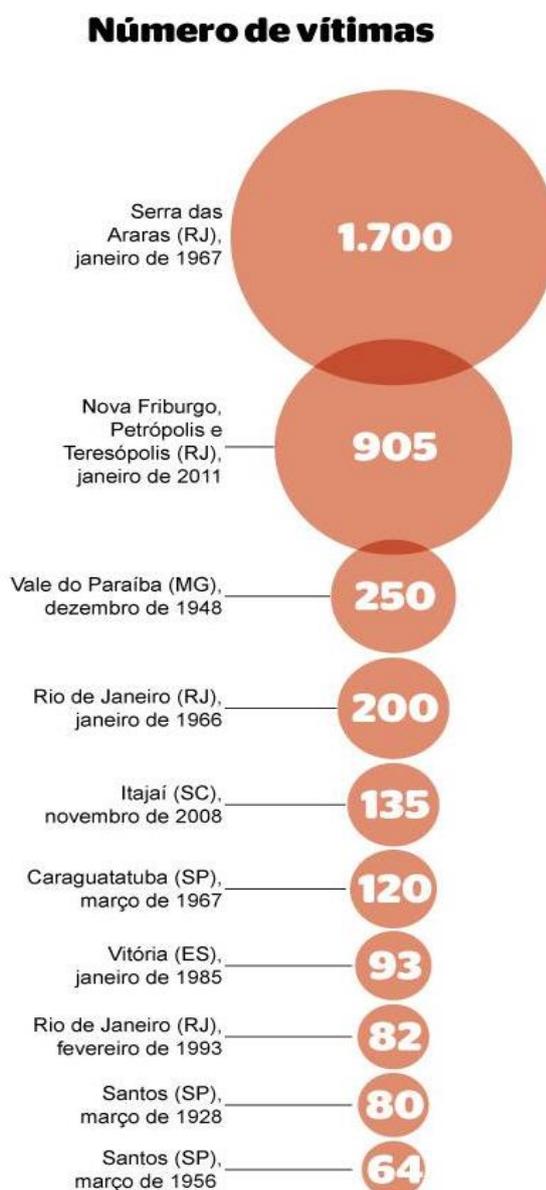
2.1 Desastres

A UNDRR (2017), *United Nations Office for Disaster Risk Reduction*, define como desastres a interação entre os impactos de eventos de fenômenos naturais de grande magnitude e um sistema social, afetando elementos expostos na área de influência. Menciona-se que, conceitualmente, o movimento de massa se manifesta como um desastre quando afeta um sistema social, causando danos e prejuízos que excedam a capacidade dos afetados em conviver com o impacto (CENAD, 2013).

A lista dos 10 principais países por número absoluto de pessoas afetadas por desastres é dominada pela Ásia (7 países), com apenas dois das Américas (EUA e Brasil), e um da África (Etiópia). Quando os dados são padronizados para fornecer o número de pessoas afetadas por 100.000 habitantes em média ao longo dos anos, a lista é bastante diferente, com apenas as Filipinas presentes em ambos (CRED, 2020).

No Brasil, dos grandes movimentos de massa ocorridos, especialmente do tipo deslizamentos, destacam-se os presentes na Figura 4, entre os anos de 1948 e 2011, hierarquizados de acordo com o número de vítimas fatais.

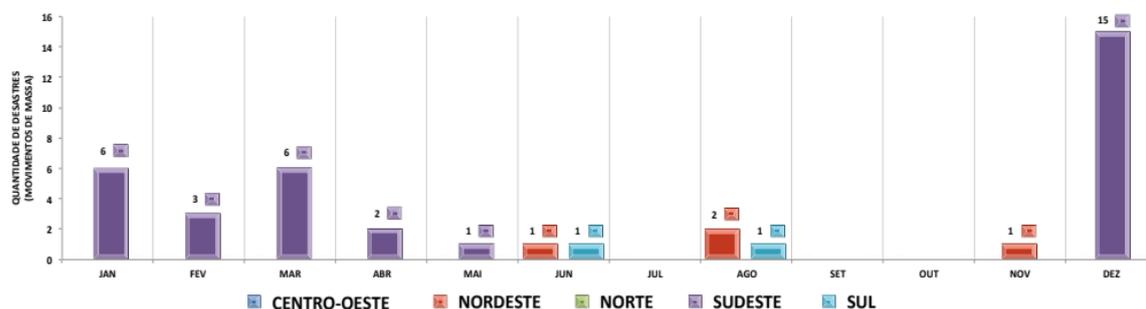
Figura 4- Número de Vítimas dos Grandes Deslizamentos Ocorridos no Brasil entre 1948 e 2011



Fonte: Alfano (2017)

Conforme CENAD (2013), Centro Nacional de Gerenciamento de Risco e Desastres, constata-se, pertinente à localização geográfica dos eventos ocorridos em 2013, que 84,62% situaram-se na região Sudeste. Em se tratando da distribuição temporal, estão vinculados aos meses de dezembro, janeiro e fevereiro, sendo variável anualmente, nos períodos de verão tropical (Figura 5).

Figura 5- Distribuição Temporal dos Desastres Vinculados aos Movimentos de Massa (Ano 2013)



Fonte: CENAD (2013)

A região sudeste do Brasil apresenta destaque no cenário nacional e mundial em questões de riscos geológicos devido, principalmente, ao elevado número de ocorrências de deslizamentos em encostas urbanas e ao número expressivo de municípios com áreas de risco a deslizamentos. Nesta situação, encontram-se alguns municípios localizados em regiões com elevada suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos, particularmente aqueles municípios com áreas urbanas situadas nas encostas da Serra da Mantiqueira e Serra do Mar, conforme constatado atualmente pelo número significativo de ocorrências de deslizamentos registradas pelo Instituto Geológico do Estado de São Paulo, no âmbito do Plano Preventivo de Defesa Civil – PPDC (BROLLO; TOMINAGA, 2012).

2.1.1.1 Eventos extremos

Em 1967, cerca de 1.700 pessoas nas comunidades no entorno da Serra das Araras morreram atingidas por uma forte chuva na região, sendo considerada com período de retorno de 350 anos, sendo registrado em três horas cerca de 275 mm de água. A Via Dutra estava sendo duplicada naquele ano. Ao lado dela, ao pé da serra, foi montado um alojamento da Empresa Metropolitana de Terraplanagem onde moravam 300 pessoas.

Eram os operários que trabalhavam na estrada com suas famílias. Só ali foram quase 150 soterrados. A estimativa de pesquisadores é que quase 1.400 corpos ainda estejam enterrados do topo ao sopé da Serra das Araras (MARTINS, 2022).

A tragédia socioambiental na Região Serrana do Rio, em 2011, foi o maior desastre natural da história do país. Mais de 900 pessoas morreram após deslizamentos causados por fortes chuvas em Nova Friburgo, Teresópolis e Petrópolis. O desastre aconteceu em apenas um dia, a chuva foi de 140 mm em 24 horas (MARTINS, 2022). Após a publicação do Estatuto da Cidade houve alterações significativas como a inclusão da Lei 12.836/2013 que se refere aos estímulos e incentivos ao uso de tecnologias que reduzam a utilização de recursos naturais e conseqüentemente minimizem os impactos ao meio ambiente e da Lei 12.608/2012, promulgada pouco mais de 1 ano após a tragédia que vitimou quase 1.000 pessoas na serra fluminense, em decorrência de deslizamentos de encosta vinculados à ocupação irregular do território. (ARANTES, 2018). Esse desastre também contribuiu para a criação do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (Cemaden) em 2011.

No verão de 2022, a região de Petrópolis foi afetada novamente por desastres relacionados aos movimentos de massa. Os fenômenos meteorológicos que sempre aconteceram, estão mais intensos e muitas vezes até mais frequentes também (NOBRE, 2020).

Fazendo uma comparação com 2011, o pluviômetro com o índice mais alto registrou quase 282 milímetros em oito horas. Em 2022, do Alto da Serra registrou 221 milímetros em quatro horas. Além disso, a intensidade da chuva e a velocidade com que ela atinge o solo foi muito maior. A maior intensidade registrada em Nova Friburgo em 2011 foi de 88 milímetros por hora, a de Petrópolis, em 2022, no posto do Alto da Serra, chegou a quase 200 milímetros por hora (MARTINS, 2022).

2.1.1.2 *Gestão ambiental e evolução da legislação*

Sánchez (2006) define Sistema de Gestão Ambiental (SMA) como o conjunto de operações técnicas e atividades gerenciais que visam garantir que o empreendimento atenda aos padrões legais, minimize seus impactos ambientais e mantenha um bom relacionamento com a comunidade. Define impacto ambiental como a alteração da

qualidade ambiental que resulta da modificação de processos naturais ou sociais provocada por ação humana.

Até meados da década de 1980 não havia, no Brasil, considerações de ordem ambiental quando da tomada de decisões sobre a implantação e construção de novas rodovias. Foi com a aprovação da Política Nacional do Meio Ambiente e a criação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Lei Federal 6.938/81), cujas diretrizes orientaram uma série de regulamentações legais e normativas, que se iniciou a tomada das primeiras medidas de cunho ambiental na implantação de novos empreendimentos (RIDENTE Jr., 2008).

Em 1996, foram aprovadas pela ISO (*International Organization for Standardization*) as principais normas relacionadas a um modelo de Gestão Ambiental nos órgãos rodoviários, fez-se indispensável, não apenas para gerir as obras e serviços, mas também toda a estrutura administrativa destas instituições.

Neste mesmo ano, o antigo Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER (atual Departamento Nacional de Infraestrutura Terrestre – DNIT), com o propósito de apresentar diretrizes e procedimentos ambientais a serem seguidos durante as obras, publicou o Corpo Normativo Ambiental para Empreendimentos Rodoviários (ROCHA, 2006). Posteriormente, a Resolução Conama 237/97, que regulamenta o sistema de licenciamento ambiental e considera conceitos de gestão ambiental, pressionou os órgãos rodoviários a construção de novas rodovias está sujeita ao licenciamento ambiental, mas também certos tipos de obras de conservação e manutenção.

O impacto ambiental no meio físico tem início quando a rodovia é implantada em área onde não existe a ação do homem, ou seja, a primeira intervenção é o desmatamento da faixa de obra e de seus acessos, que gera a exposição do solo, escavações, cortes e aterros, desvio das drenagens naturais, impermeabilização, construção de obras de arte, túneis, etc. Os maiores impactos decorrentes de um empreendimento rodoviário ocorrem durante a sua implantação, porém, os impactos decorrentes da operação tendem a permanecer por um período maior, tornando-se muitas vezes mais significativos (RIDENTE JR., 2008).

Entretanto, a busca do equilíbrio é constante e a estabilização destes processos poderá ser obtida por meio de ações planejadas e concretas que possibilitem a elaboração de projetos adequados, implantação de medidas de prevenção, realização de manutenção e

monitoramento das áreas, como os instrumentos de um Sistema de Gestão Ambiental (SGA), que proporcionarão a minimização de impactos ambientais.

2.2 Movimentos de Massa

Existem diferentes tipos de movimentos de massa que se distinguem pela velocidade e mecanismo do movimento, bem como pelo material, tipo de deformação resultante, pela geometria e pelo conteúdo de água no solo ou rocha. As causas primárias são de ordem natural e humana (USGS, 2008). Diante da variedade de elementos considerados pelas classificações, não há um consenso no meio acadêmico.

2.2.1 Classificações dos Movimentos de Massa

As classificações dos movimentos de massa são, de forma geral, complexas, pois há uma grande variedade de materiais e processos envolvidos. Ao longo dos anos, algumas classificações foram propostas segundo diversos autores, por exemplo, Sharpe (1938), Freire (1965), Guidicini e Nieble (1984), Hutchinson (1988), Vargas (1977), Varnes (1978), Augusto Filho (1992) e Cruden e Varnes (1996).

Guidicini e Nieble (1984), propõem uma classificação modificada de Freire (1965) sugere que os movimentos sejam classificados em 3 tipos fundamentais, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2- Sistema de Classificação de Movimentos de Massa de Freire (1965)

Nomenclatura	Características
Escoamento	Deformação ou movimento contínuo com ou sem superfície definida. Dependendo do movimento, são classificados como <ul style="list-style-type: none"> • Rastejo: escoamento plástico • Corrida: escoamento fluido-viscoso
Escorregamento	Deslocamento finito ao longo de superfície bem definida Dependendo da forma, são definidos como <ul style="list-style-type: none"> • Rotacional • Translacional
Subsidência	Deslocamento finito ou deformação contínua de direção essencialmente vertical Podem ser subdivididos em <ul style="list-style-type: none"> • Subsidiência propriamente dita • Recalque • Desabamentos/quedas

Fonte: Freire (1965)

A partir desses três tipos e sete subtipos fundamentais, diferenciam-se 32 classes principais. Essas classes passam, então, a ser caracterizadas de acordo com parâmetros físico-mecânico-causais:

- a) Natureza de superfície de movimento;
- b) Inclinação do talude;
- c) Características qualitativas do movimento;
- d) Tipo de movimento;
- e) Velocidade e duração;
- f) Termos de passagem de um tipo de movimento para outro;
- g) Causas intrínsecas e extrínsecas, estas últimas divididas em indiretas e diretas, estas subdivididas em preparatórias e imediatas;
- h) Ainda contido no item causas, o modo de ação das mesmas;
- i) Natureza física de ação significativas das causas;
- j) Efeitos sobre as condições de equilíbrio;
- k) Processos corretivos dos movimentos de massas.

A classificação de Varnes (1978) tornou-se referência, sendo considerada oficial pela Associação Internacional de Geologia de Engenharia (IAEG). Esta classificação abrange os movimentos que envolvem materiais rochosos, refere-se somente aos movimentos mais rápidos (MASSAD et al., 1997). Além disso, classifica alguns movimentos como complexos (combinações de dois ou mais tipos), (Tabela 3).

Tabela 3- Classificação de Movimentos de Massa conforme Varnes (1978)

Tipo de movimento	Solos de engenharia	
	Grosso	Fino
Quedas	Detritos	Terra
Tombamento	Detritos	Terra
Escorregamento	Rotacional	Solo
	Translacional	
Espalhamento	Detritos	Solo
Corridas	Detritos	Lama
Complexo	Combinação de dois ou mais tipos de movimento	

Fonte: Varnes (1978)

Cada autor atribuiu maior importância a um determinado parâmetro, seja a velocidade e mecanismo do movimento, características dos materiais envolvidos, modo de deformação, geometria do movimento, quantidade de água envolvida, etc. Entretanto, nota-se que alguns tipos genéricos de movimentos de massa estão presentes na maior parte das classificações, sendo estes, o rastejamento (*creep*), as corridas (*flows*), os escorregamentos (*slides*) e as quedas de blocos (*rockfalls*), conforme proposto por Augusto Filho (1992), apresentado na Tabela 4.

Tabela 4- Classificação Movimentos de Massa segundo Augusto Filho (1992)

Tipo de movimento	Características, material e geometria		
Rastejo ou fluência	<ul style="list-style-type: none"> • Múltiplos planos de deslocamento • Baixas velocidades (cm/ano) • Constantes, sazonais ou intermitentes • Solo, depósito, rocha alterada • Geometria indefinida 		
Escorregamento	<ul style="list-style-type: none"> • Poucos planos de deslocamento • Velocidades médias (km/h) à altas (m/s) 	Planares	Solos pouco espessos, com plano de fraqueza
	<ul style="list-style-type: none"> • Pequenos a grandes volumes de materiais 	Circulares	Solos espessos homogêneos
	<ul style="list-style-type: none"> • Geometria variável 	Em cunha	Solos com dois planos de fraqueza
Queda	<ul style="list-style-type: none"> • Sem plano de deslocamento • Queda livre ou plano inclinado • Velocidades muito altas (m/s) • Material predominantemente rochoso • Pequenos e médios volumes • Geometria variável 		
Corrida	<ul style="list-style-type: none"> • Muitas superfícies de deslocamento • Comportamento viscoso • Velocidades médias a altas • Grandes volumes de material • Extenso raio de alcance 		

Fonte: Augusto Filho (1992)

Para fins de regulamentação, a ABNT NBR 11682:2009 padronizou a nomenclatura utilizada no Brasil, utilizando a classificação de Augusto Filho (1992), de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5- Classificação dos Movimentos de Massa adotada pela ABNT NBR 11682:2009

Terminologia	Definição
Queda ou rolamento	Desprendimento de fragmentos do terreno, de qualquer tamanho, que caem de certa altura, em queda livre ou com qualquer outra trajetória e tipo de movimento
Tombamento	Movimento de massa em forma de báscula com eixo na base
Escorregamento	Movimento de massa por deslocamento sobre uma ou mais superfícies
Escoamento	Movimento de massa com propriedades de fluído, lento ou rápido

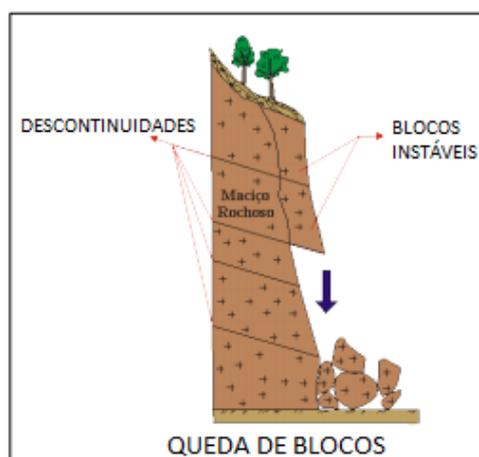
Fonte: ABNT (2009)

Na classificao proposta por Cruden & Varnes (1996), os tipos de deslizamentos englobam: quedas, rolamento, tombamentos, expansões laterais (espalhamento) escoamentos e escorregamentos, a serem exemplificados a seguir.

2.2.1.1 Quedas e rolamentos de blocos

A queda (*Fall*) ocorre por ação da gravidade em elementos rochosos diversos e de volumes variáveis, a partir de descolamento da encosta num movimento de queda livre em encostas muito íngremes. Este processo apresenta altas velocidades, podendo atingir grandes distâncias. Os processos de quedas possuem um forte condicionante litológico e estrutural, e sua deflagração pode estar intimamente associada a processos erosivos (AUGUSTO FILHO, 1994), (Figura 6).

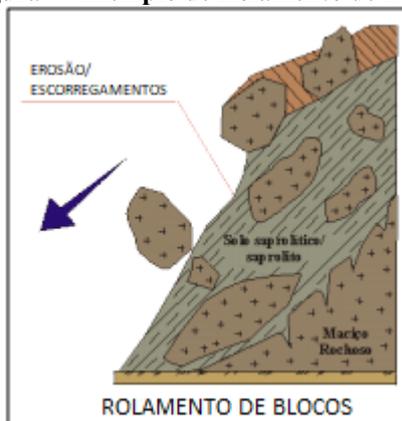
Figura 6- Exemplo de Queda de Blocos



Fonte: Adaptado de Infanti Jr. & Fornasari Filho (1998)

O rolamento também é causado pela ação da gravidade, porém em planos inclinados, sua origem ocorre na maioria das vezes pela perda de apoio causado pelo descalçamento do bloco (Figura 7).

Figura 7- Exemplo de Rolamento de Blocos

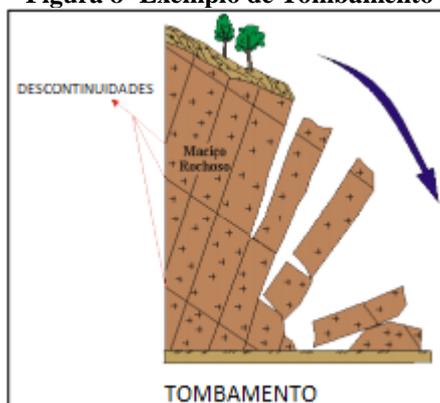


Fonte: Adaptado de Infanti Jr. & Fornasari Filho (1998)

2.2.1.2 Tombamentos

Os tombamentos podem ser definidos como um tipo de movimento de massa causado pela rotação de um bloco de solo ou rocha em torno de um ponto ou abaixo do centro de gravidade da massa desprendida. Este processo está condicionado pela ação da água ou do gelo em planos de fraqueza existentes no maciço rochoso. Podem conduzir a movimentos tipo quedas ou escorregamentos dependendo da geometria da massa movimentada, da geometria da superfície de separação e da orientação e extensão das discontinuidades existentes. Sua velocidade pode variar de extremamente lenta para rápida (CRUDEN & VARNES, 1996), (Figura 8).

Figura 8- Exemplo de Tombamento



Fonte: Adaptado de Infanti Jr. & Fornasari Filho (1998)

2.2.1.3 *Desplacamento*

O deslocamento é um movimento ocasionado pelo desprendimento de fragmentos ou placas de rochas, ao longo da superfície de estruturas geológicas (xistosidade, acamamento, fraturamento), devido principalmente às variações térmicas ou à alívios de tensão (INFANTI & FORNASARI FILHO, 1998). Esse processo é desenvolvido geralmente devido à presença de descontinuidades inclinadas, associado a encostas íngremes (MONTGOMERY, 1992), (Figura 9).

Figura 9- Exemplo de Desplacamento



Fonte: Adaptado de Montgomery (1992)

2.2.1.4 *Expansão lateral e escoamento*

Expansões laterais (espalhamento) são movimentos caracterizados pelas expansões de um solo coesivo ou de uma massa de rocha combinado com uma subsidência de massa fraturada numa camada de material subjacente de pouca resistência (CRUDEN & VARNES, 1996). A superfície de ruptura não se apresenta como uma superfície de intenso cisalhamento. Resultam da liquefação ou escoamento dos materiais. Varnes (1978) distinguiu expansão lateral típica de rocha, como liquefação dos materiais de camadas subjacentes.

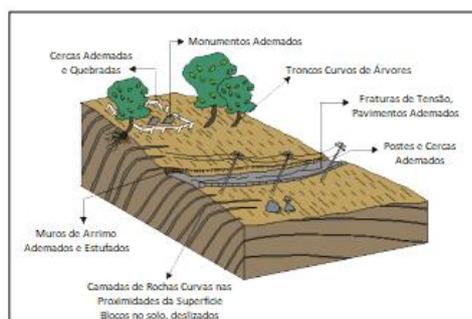
Escoamentos são representados por deformações ou movimentos contínuos, com superfície definida ou não. São classificados como Rastejo (movimento lento) e Corrida (movimento rápido) (CRUDEN & VARNES, 1996).

Rastejo e corrida

O rastejo é um movimento descendente, lento e contínuo da massa de solo de um talude, caracterizando uma deformação plástica, sem geometria e superfície de ruptura definidas, com velocidades pequenas, de alguns milímetros por ano, que se acelera por ocasiões das chuvas e se desacelera em épocas de seca. Ocorrem geralmente em horizontes superficiais de solo e de transição solo/rocha, como também em rochas alteradas e fraturadas. A ocorrência de rastejo pode ser identificada através da observação de indícios indiretos, tais como: encurvamento de árvores, postes e cercas, fraturamento da superfície do solo e de pavimentos, além do "embarrigamento" de muros de arrimo (INFANTI & FORNASARI FILHO, 1998; MASSAD et al., 1997).

O processo em questão pode causar danos econômicos significativos, principalmente afetando obras próximas a encostas, ou seja, interferindo em fundações, linhas de transmissão, dutos, pontes, viadutos, entre outras. Os rastejos são bons indicadores da ocorrência eminente de escorregamentos (INFANTI & FORNASARI FILHO, 1998), (Figura 10).

Figura 10- Exemplo de Escoamento Rastejo



Fonte: Adaptado de Infanti Jr. & Fornasari Filho (1998)

Figura 11- Exemplo de Corrida de Massa



Fonte: Adaptado de Infanti Jr. & Fornasari Filho (1998)

Corridas (*flows*) são movimentos gravitacionais na forma de escoamento rápido, envolvendo grandes volumes de materiais (Figura 11). Caracterizados pelas dinâmicas da mecânica dos sólidos e dos fluidos, são de caráter essencialmente hidrodinâmico, ocasionados pela perda de atrito interno, em virtude da perda de estrutura, em presença de excesso de água. São fenômenos menos comuns que os escorregamentos, porém podem provocar danos superiores pelo volume de material envolvido e pelo extenso raio de alcance que possuem, chegando até alguns quilômetros (INFANTI & FORNASARI FILHO, 1998).

De acordo com a origem do material escoado, a corrida pode ser classificada em:

- Primária: correspondente às corridas de massa envolvendo somente os materiais provenientes das encostas;
- Secundária: corridas de massa nas drenagens principais, formadas pela remobilização de detritos acumulados no leito de um rio e por barramentos naturais, envolvendo ainda o material de escorregamentos das encostas e grandes volumes de água em áreas de deficiência de drenagem.

De acordo com o tipo de material escoado podem ser classificados como:

- Corrida de terra (*earth flow*): fluxo de solo com baixa quantidade de água, apresentando baixa velocidade relativa;
- Corrida de lama (*mud flow*): fluxo de solo com alto teor de água, apresentando média velocidade relativa e com alto poder destrutivo;
- Corrida de detritos (*debris flow*): material predominantemente grosseiro, constituído por blocos de rocha de vários tamanhos, apresentando um maior poder destrutivo.

A corrida ou fluxo de detritos, são movimentos de massa que se desenvolvem em período de tempo muito curtos (segundos a minutos) e com velocidades elevadas (5 a 20 m/s) e grandes distâncias, mesmo em baixas declividades (5° a 10°). Ocorrem, geralmente, após longos períodos de chuva, com incidência pluviométrica intensa. A massa de solo mistura-se com água em abundância e é encaminhada para as vertentes, arrastando árvores e remobilizando material pedregosos que encontram pelo caminho. Fenômenos desse tipo ocorreram em 1967, na Serra das Araras, Rio de Janeiro, e em Caraguatatuba; e em Timbé do Sul, Santa Catarina (MASSAD et al, 1997).

2.2.1.5 *Escorregamentos*

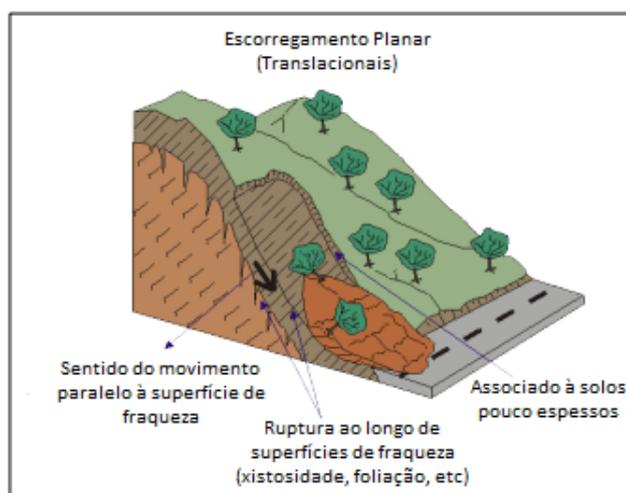
Os escorregamentos (*slides*), dentre os movimentos de massa, são os mais frequentes na região sudeste do Brasil. Tominaga (2009) os define como movimentos rápidos, de porções de terrenos (solos e rochas), com volumes definidos, deslocando-se sob a ação da gravidade, e para fora do talude ou da vertente. No momento que a força gravitacional vence o atrito interno das partículas, responsável pela estabilidade, a massa de solo movimenta-se. Ocorrem preferencialmente em superfícies de rupturas bem definida ou em finas zonas da massa submetidas a intensas tensões de cisalhamento. Frequentemente, os primeiros sinais deste movimento são a presença de fissuras.

De acordo com a metodologia de Augusto Filho (1992) e Tominaga (2009), levando em consideração a geometria e a natureza dos materiais instabilizados, os escorregamentos podem ser subdivididos em três tipos: planares (translacionais), ou circulares (rotacionais), e em cunha.

Escorregamento planar

Escorregamentos planares (translacionais) são processos muito frequentes nas encostas brasileiras, envolvendo solos superficiais, frequentemente até o contato com a rocha subjacente, alterada ou não (ABGE, 1998) (Figura 12).

Figura 12- Escorregamentos Planares (translacionais)

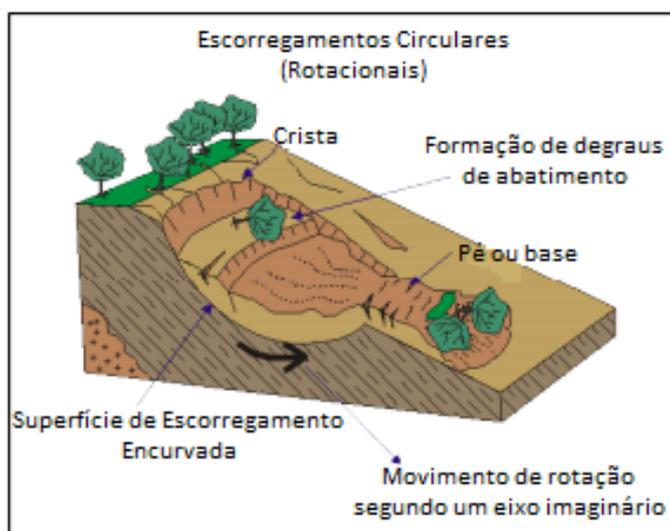


Fonte: Modificado de Infanti Jr. & Fornasari Filho (1998)

Escorregamento circular

Escorregamentos circulares (rotacionais) são movimentos rápidos de duração curta e que apresentam superfície de deslizamento curvas e côncavas em materiais homogêneos. Possuem raio de alcance menor que os escorregamentos planares, possuindo extensão relativamente limitada. Ocorrem em geral em taludes mais íngremes, em aterros, rochas sedimentares ou cristalinas intensamente fraturadas. Durante o deslizamento pode-se notar a forma arredondada do local movimentado e o desnível de abatimento formado acima da massa deslizada (ABGE, 1998) (Figura 13).

Figura 13- Escorregamentos Circulares (rotacionais)

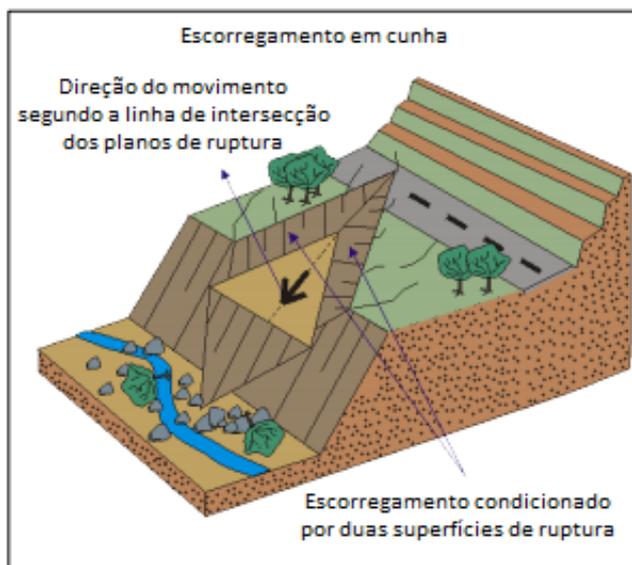


Fonte: Modificado de Infanti Jr. & Fornasari Filho (1998)

Escorregamento em cunha

Escorregamento em Cunha: Movimento ao longo de um eixo formado pela intersecção de estruturas planares em maciços rochosos ou solo residual jovem, que desloca o material na forma de um prisma. São comuns em taludes de corte em encostas que sofreram algum tipo de desconfinamento, natural ou antrópico (ABGE, 1998), (Figura 14).

Figura 14- Escorregamento em Cunha



Fonte: Modificado de Infanti Jr. & Fornasari Filho (1998)

Diversas são as causas que podem levar aos escorregamentos, como a alteração da geometria do talude, através do descalçamento do seu pé, por cortes ou escavações; aumento da inclinação, colocação de sobrecargas no topo das encostas; infiltração de águas de chuvas, que podem elevar as pressões neutras (reduzindo, portanto, a resistência do solo), ou provocar um “amolecimento” do solo (diminuição dos parâmetros de resistência, principalmente da coesão aparente); desmatamento e poluição ambiental, que levam à destruição da vegetação, que tem um papel importante na estabilização das encostas, pela absorção de parte das águas de chuva, porque facilita o escoamento dessas águas, e ainda pelo reforço que suas raízes imprimem à resistência ao cisalhamento dos solos que a suportam (MASSAD et al., 1997).

2.3 Problemas geológicos-geotécnicos em rodovias

Para fins rodoviários, os tipos de processos (por exemplo, a erosão e desagregação superficial) descritos pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1991), apresentam um diagnóstico dos principais problemas em taludes de corte e aterro encontrados no Estado de São Paulo, considerando suas principais unidades geológico-geotécnicas. Este diagnóstico foi realizado para o Departamento de Estradas de Rodagens – DER paulista.

A erosão, tanto em encostas naturais como taludes de corte e aterro, é um processo de perda da estrutura do solo e sua remoção, sobretudo pelas águas de escoamento superficial, de pode se dar por escoamento laminar, escoando na superfície do terreno como um todo, sem formar canais definidos, ou por escoamento concentrado, caracterizando-se por iniciar em pequenos sulcos, evoluindo para ravinas, voçorocas, com dimensões variadas dependentes das diferentes condições de concentração de água e das características do solo local (IPT, 1991).

A cobertura vegetal tem grande influência na fase inicial, capaz de interceptar e amortecer o impacto da chuva, reduzir o volume de água que chega à superfície e alterar o tamanho das gotas de água, modificando sua energia cinética e potencial. Além da vegetação, tal processo está intimamente ligado à energia cinética da chuva e à resistência do solo em sofrer a desagregação e sua capacidade de infiltração de água (IPT, 1991).

A desagregação superficial é considerada um fenômeno de instabilidade superficial e apresenta, de maneira semelhante à erosão, características de destruição da estrutura do material e sua posterior remoção. É comum sua ocorrência em regiões tropicais e resulta de uma ação cíclica de umedecimento e secagem dos solos saprolíticos micáceos ou caulíníticos. O resultado disto é o empastilhamento da superfície exposta, assim denominado por desagregar o material (solo ou rocha sedimentar branda) em pequenos grânulos (ou pastilhas) de tamanho centimétrico, provocando o permanente assoreamento do sistema de drenagem superficial. Para que tal fenômeno não ocorra, o impedimento da ciclicidade através de proteção superficial com tela e gunita ou o confinamento do talude com camada de solo compactado se faz necessário (IPT, 1991).

A realização de cortes em uma encosta provoca alteração no estado de tensões atuantes no maciço, que tende a gerar uma instabilização na região a montante do talude. As tensões de tração que venham a ocorrer, poderão provocar o aparecimento de trincas no talude, que durante a ocorrência de chuvas podem ser preenchidas por água, fato ao qual estão associados muitos escorregamentos. Associada a alteração do estado de tensões, as modificações na geometria dos taludes alteram as condições de drenagem e cobertura vegetal, que podem facilitar a infiltração de água e a consequente saturação do maciço, reduzindo a resistência dos materiais envolvidos, assim como a ocorrência de diversos processos erosivos (IPT, 1991).

As principais instabilizações observadas em aterros estão associadas a problemas no corpo de aterro propriamente dito, e ocorrem devido a sua má compactação ou devido à

inexistência desta, ao uso de materiais inadequados, a geometria do talude (incompatibilidade da inclinação com a resistência do material), assim como a deficiência ou inexistência dos sistemas e equipamentos de drenagem. Observam-se também, com alguma frequência, que a prática de se executarem apenas nos últimos dois ou três metros aterros (camadas superficiais), bem compactados é extremamente danosa, sendo responsáveis por incontáveis rupturas nestes aterros, além de outros problemas como recalques excessivos, como erosão superficial e interna (“*piping*”) (IPT, 1991).

As causas mais comuns para os recalques em aterros são baixa capacidade de suporte da fundação, compactação inadequada, deficiências do sistema de drenagem e rompimento de bueiros ou galerias, como medida preventiva e/ou corretiva se dá a recomposição do aterro. Outro problema está associado à limpeza do terreno no preparo da fundação, antes do lançamento do material a ser compactado. Caso não se remova a vegetação, a sua decomposição cria um meio poroso que pode ser um caminho preferencial de percolação e gerar deformações elevadas, causando recalques no aterro, sérios problemas de erosão interna (“*piping*”) e condicionando problemas de estabilidade (IPT, 1991).

Durante um período de chuva intensa, a obstrução de um bueiro, ou galeria, traz na maioria dos casos, consequências danosas como recalques ou ruptura parcial ou total do aterro. A obstrução de bueiros, e galerias pode ocorrer de várias maneiras, estando geralmente associadas a materiais carregados pelas enxurradas (pedaços de árvores, troncos galhos), produtos da erosão ou de escorregamentos a montante. A implantação de sistemas de proteção junto às entradas de bueiros, remoção de vegetação de maior porte junto ao seu acesso e manutenção sistemática são maneiras de prevenir e/ou corrigir tais mecanismos (IPT, 1991).

Além dos problemas dos taludes rodoviários, propriamente ditos, tem-se a instalação das comunidades que circundam a rodovia. A concentração da população nas cidades trouxe consigo os problemas de acesso e aquisição da propriedade, e uma distribuição desigual de ganhos monetários o que gerou uma malha urbana caracterizada pela desigualdade social, e a marginalização dos mais pobres que acabam por ocupar as áreas geoambientais desfavoráveis (CARMO, 2014).

A falta de políticas públicas efetivas, aliada a forma como o solo urbano foi apropriado pela classe dominante nas cidades, exacerbou a divisão social. Assim, temos o surgimento de um urbanismo de risco, com construções raramente estáveis, que podem deslizar ou inundar com chuva, a drenagem e o esgoto podem se misturar nas baixadas,

ameaçando a saúde e vidas, um exemplo a se destacar, são os loteamentos irregulares instalados na região administrativa de São José dos Campos (FREITAS et al., 2020).

Uma informação importante é a baixa porcentagem da população nessas comunidades que não são abastecidos pela rede geral de água. Esta informação é relevante no sentido da clandestinidade da rede de água e sua contribuição como fator indutor de escorregamento (KÖNIG, KUX e MENDES 2019; MENDES, et. al. 2018; MENDES, et.al., 2017). Como fator indutor clandestino, esta rede possivelmente poderia apresentar vazamentos de água e conseqüentemente o aumento da umidade do solo. Além disso, a falta de esgotamento sanitário por rede geral remete a utilização de fossa rudimentar e esta contribui para o excesso de infiltração no solo, o qual pode promover a desestabilização do solo caso venha ser implantada de uma forma inadequada (FREITAS et al., 2020).

Em termos gerais, as principais condicionantes naturais responsáveis pela ocorrência dos deslizamentos nas encostas são: alta declividade (geralmente maiores que 30°) associada com sua morfologia (geometria côncava e/ou retilínea), presença de solo na condição não saturada e alta pluviosidade (acumulado e/ou intensidade horária de chuva). Adicionalmente, as ações humanas, tais como a execução de taludes de corte com altura/inclinação excessiva, aterro lançado com lixo e entulho, sobrecargas nos terrenos devido à construção de moradias com vários pavimentos, lançamentos de águas servidas, vazamentos de tubulações, aumenta significativamente as condições de instabilidade das encostas no ambiente urbano (MENDES et al., 2017, MENDES et al., 2018, KÖNIG et al., 2019).

Para Carvalho et al., (2015), a principal causa do processo de instabilização das encostas é a infiltração de água das chuvas nos terrenos. Sendo esse o tipo de processo de instabilização predominante, nota-se que o monitoramento contínuo das variáveis associadas ao processo de infiltração e retenção de água no solo (chuva e teor de umidade do solo) é imprescindível para o melhor entendimento da função de cada variável no processo de instabilização das encostas urbanas e taludes rodoviários (MENDES et al., 2020).

2.3.1 Relação entre água no solo e chuva com os movimentos de massa

A capacidade do solo em reter água e o fenômeno de sucção são conhecimentos fundamentais para entendimento da relação chuva x deslizamentos. A ocorrência de movimentos de massa está frequentemente associada aos períodos de maiores índices pluviométricos, devido ao comportamento hidromecânico dos solos, à composição química-mineralógica e às características estruturais que possuem (CARVALHO et al, 2015).

No caso da retenção de água que ocorre devido à natureza física, nos minerais mais granulares, como o quartzo, ocorre o efeito de capilaridade que dependerá da distribuição granulométrica, da porosidade e da distribuição dos poros no solo. Já nos minerais menores, como os argilominerais, a retenção de água ocorre devido à natureza química caracterizando a sucção (CARVALHO et al, 2015).

Para solos não saturados, a atração entre as partículas, gerada pela tensão superficial da água e a superfície das partículas, forma uma membrana contrátil, devida à tensão capilar que aumenta as tensões efetivas no contato entre as partículas. Com a perda de umidade e redução do grau de saturação, ocorre a ampliação de forças atrativas responsáveis pela coesão (CARVALHO et al., 2015).

2.4 Chuva como agente desencadeador

Entre os parâmetros ambientais monitorados verificou-se que a chuva (intensidade e acumulado) exerce papel fundamental na deflagração dos deslizamentos em encostas urbanas (MENDES et al., 2018). Os limiares pluviométricos são estabelecidos de modo quantitativo e entendidos como as condições limites que quando atingidas ou superadas irão provavelmente causar um escorregamento (GUZZETI, et al., 2006).

Os dados de chuva, na maioria das vezes, são coletados por pluviômetros. Entretanto, as estações pluviométricas nem sempre possuem uma rede ampla abrangendo todo o território de estudo (PICIULLO et al., 2017). Para obter as limiares pluviométricas, o método mais direto é estabelecer uma duração padrão e posteriormente contabilizar com a precipitação acumulada (CALVELLO et al., 2015).

2.5 Fatores condicionantes dos movimentos de massa

Dentre os fatores com potencial para desencadear movimentos de massa, destacam-se a geologia (tipos de rochas), geomorfologia (formas do relevo), pedologia (estudo dos solos), uso e ocupação do solo (cobertura vegetal e modificações antrópicas), distância até a rodovia, orientação das vertentes, declividade e formas do terreno. A chuva, apesar de ser um fator condicionante, para o estudo, se enquadrará como um agente desencadeador.

Cada fator pode ser de maior ou menor intensidade no desencadeamento de movimentos de massa, a Tabela 6 apresenta os três fatores condicionantes que mais contribuíram nos processos nas análises de suscetibilidade, não necessariamente abrangendo áreas adjacentes à rodovias, de acordo com os diferentes autores.

Tabela 6 - Fatores Condicionantes com Maiores Influências nos Movimentos de Massa

Autor e ano	Área Estudada	1°	2°	3°
Dou <i>et al.</i> (2015)	Japão	Declividade	Orientação	Rede de densidade de drenagem
Aditian; Kubota; Shinohara (2018)	Indonésia	Proximidade à estrada	Geologia	Declividade
Bragagnolo <i>et al</i> (2019)	Porto Alegre, Brasil	Declividade	TWI	Uso do solo
Bispo <i>et al</i> (2020)	Litoral norte de Maceió, Brasil	Declividade	Formas de terreno	Geomorfologia
Dias <i>et al</i> (2021)	Caraguatatuba, Brasil	Litologia	Elevação	Declividade
Rosa <i>et al</i> (2021)	Nova Lima, Brasil	Geomorfologia	Declividade	Pedologia
Hader (2021)	Cubatão, Brasil	Geomorfologia	TWI	Orientação

Os fatores não agem isoladamente, mas sim combinados, todos são avaliados em conjunto. A escolha de quais parâmetros e a quantidade ideal para atingir resultados eficientes, dependem da metodologia utilizada e qualidade do inventário, não necessariamente usando mais fatores condicionantes gera melhora no mapa de suscetibilidade (DIAS *et al.*, 2021).

Nos próximos subitens são explanados os fatores condicionantes pautados para o desenvolvimento do estudo.

2.5.1 Geologia

O território brasileiro foi palco de múltiplos processos geológicos que deram origem a uma grande variedade de rochas, cuja distribuição geográfica é complexa e determinante na história da ocupação e desenvolvimento do país. Conforme o tipo de obra e características geotécnicas, condicionadas pela geologia local, os grandes empreendimentos, por exemplo, as extensas obras viárias, ao ligarem locais preestabelecidos pela demanda de transporte, atravessam obrigatoriamente diversas unidades com diferentes comportamentos geotécnicos, quanto a categorias de escavação, estabilidade de taludes, materiais de empréstimo e construção, qualidade dos maciços rochosos e assim por diante (BARTORELLI, HARALYI, 1998).

Existem evidências entre a geologia do território brasileiro e problemas geotécnicos, como, os escorregamentos em encostas íngremes dos terrenos pré-cambrianos (Suítes Graníticas e Complexo Embu). Os cenozóicos (depósitos e sedimentos) recobrem uma vasta região no Sudeste do Brasil, em terrenos de maior ocupação urbana e industrial do país, os taludes podem ser estáveis e de fácil escavação, sendo as argilas variegadas frequentemente muito rijas, as areias são geralmente friáveis e quando saturadas, muito instáveis (BARTORELLI, HARALYI, 1998).

Em relação aos escorregamentos, as classes geológicas são associadas às propriedades geomecânicas e propriedades hidráulicas com também nas características da cobertura do solo.

2.5.2 Geomorfologia

A Geomorfologia é a ciência que estuda a formação e dinâmica do relevo. O relevo é um elemento do meio físico que tem sua importância para o homem, principalmente no que se refere ao processo de ocupação, uma vez que o relevo é o suporte físico/terreno apropriado e transformado pelo homem, de acordo com suas necessidades. Alguns dos principais fatores que dão um caráter urbano ao espaço, são a dinâmica dos fluxos e o ritmo do trabalho e da vida cotidiana, que causam certa invisibilidade ao relevo e seus processos, e infelizmente, acaba sendo considerada após a ocorrência de desastres,

principalmente quando há perdas de vidas humanas (BENAVIDES E MACHADO, 2014; JORGE, 2011).

A dinâmica dos processos geomorfológicos, embora visível durante catástrofes urbanas, como movimentos de massa, enchentes, acúmulo de material em ruas e residências e outros, ainda está invisível aos olhos da população que percebe a chuva, a ineficácia do saneamento e infraestrutura urbana, mas não percebe a dinâmica do relevo e seus processos (SOUZA, 2010).

2.5.3 Pedologia

Quanto ao parâmetro solos, Mendes (1982) considera que as características físicas do solo, especialmente, a textura, a estrutura e a permeabilidade, exercem maior influência sobre a quantidade e qualidade do material a ser erodido e para o desencadeamento de mecanismos de movimentos gravitacionais. Estas características podem ser conhecidas através dos tipos de solo.

No que diz respeito à profundidade do solo, são consideradas características que interferem na capacidade de infiltração, percolação e condutividade hidráulica do solo, em alguns casos pela baixa evolução pedogenética. Os solos podem ser classificados em rasos, pouco profundos, profundos e muito profundos, de acordo com os atributos presentes. Portanto, quanto menor a espessura do solo, maior o grau de potencialidade a deslizamentos atribuído. Essa característica propicia avaliação dos possíveis riscos de saturação do solo, o que pode induzir a uma diminuição ou ruptura das forças de tensão, desencadeando movimentos gravitacionais (IBGE, 2019).

Quanto à textura do solo, que diz respeito à proporção granulométrica entre areia, silte e argila. Essa propriedade do solo influencia a agregação, a coesão, a consistência, a porosidade do solo e as interações eletroquímicas entre os colóides do solo, a solução e os solutos. Solos de textura média ou orgânica são classificados como menos suscetíveis. Portanto, conforme a textura do solo, associada ou não à presença de cascalhos, diferente será seu comportamento e sua suscetibilidade a deslizamentos. Isso porque a textura afeta a infiltração, a percolação, a condutividade hidráulica saturada e não saturada, o potencial matricial (atração da água pela matriz do solo), a estabilidade de agregados, o grau de floculação e o grau de dispersão da argila (IBGE, 2015).

Como solos que apresentam resistência à erosão, os latossolos com textura argilosa tendo sido considerados por Mendes (1982), assim, por exemplo, solos mais argilosos apresentam maior microporosidade e porosidade total, maior potencial matricial e menor condutividade hidráulica, favorecendo a saturação. Nesse caso, quanto maior for a declividade, maior será o aumento do peso específico, o que reduz a coesão, gera sobrecarga e promove a ruptura, desencadeando deslizamentos.

2.5.4 Uso e ocupação do solo

Tendo o relevo como um terreno a ser ocupado, é importante analisar essa ocupação no espaço urbano. As mudanças econômicas e tecnológicas afetam as construções, e a manutenção do uso do solo na cidade, que por sua vez, influencia os processos geomorfológicos. À medida que o caráter socioeconômico de uma cidade se altera, há uma resposta geomorfológica para a qual a política urbana deve ser alterada (JORGE, 2011).

Nesse sentido, interessa-se estudar o relevo, buscando mostrar as consequências da dinâmica do relevo com a sociedade e, conseqüentemente, da ocupação e modificação no espaço socialmente produzido em ambiente urbano, considerando a interação dos agentes ambientais e sociais. O agravamento é mais perceptível, uma vez que ocupações diversas são realizadas em áreas, que por suas características naturais, não deveriam ser ocupadas, ou deveriam ser ocupadas respeitando certos limites e após intervenções humanas adequadas (SOUZA, 2010).

2.5.5 Distância até a rodovia

O critério de proximidade do desastre até a rodovia é mensurado através de *buffers* de distâncias, quando mais distante se localiza o evento menor é sua influência. Benavides e Machado (2014) definiram o *buffer* mais próximo de 5 metros de distância com classificação de suscetibilidade muito alta, ou seja, de maior interferência, assim, seguindo as faixas de distribuição de 10 metros, 25 metros, 50 metros e 100 metros, sendo essa última a de classe muito baixa.

2.5.6 Orientação das vertentes

A orientação, também chamada de direção, corresponde a posição do talude que contribui para a identificação da incidência de luz solar no terreno, as características da cobertura vegetal, associada ao intemperismo de acordo com as variações climáticas. Esse aspecto pode ser obtido a partir de mapas topográficos, gerados a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) ou curvas de níveis. As divisões são concordantes com os padrões de orientação espacial: Norte (N), Nordeste (NE), Leste (E ou L), Sudeste (SE), Sul (S), Sudoeste (SO), Oeste (O ou W) e Noroeste (NO) (CATANI et al., 2013; VAN WESTEN et al., 2008).

2.5.7 Declividade

A declividade se refere à inclinação do relevo em relação ao horizonte, podendo ter unidade de medida em graus (variando de 0° a 90°), embora seja mais comumente expressa em porcentagem (variando de zero ao infinito) (VALERIANO, 2008).

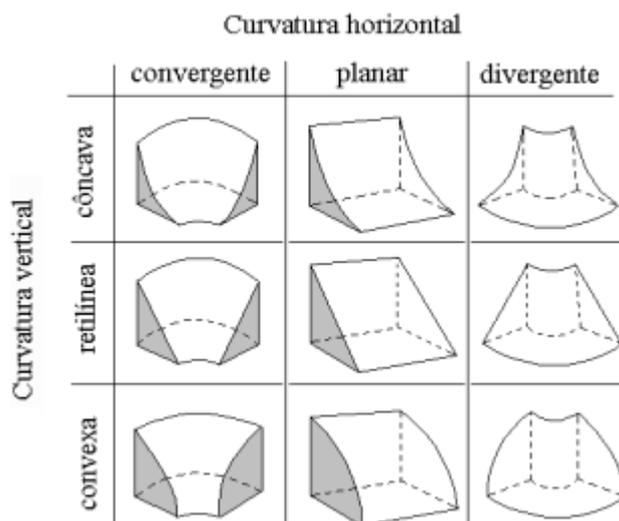
A distribuição das declividades locais de uma área sempre se concentra em valores baixos e uma raridade relativa de declividades altas. Os locais de declividade alta são normalmente áreas pequenas e dissociadas de sua vizinhança, enquanto que áreas de declividades baixas tendem a formar grandes manchas, mais coesas, no terreno (VALERIANO, 2008).

Diversos procedimentos de análise incluem as faixas de declividade, com a classificação da EMBRAPA (1999), que seguirão os respectivos valores: de 0 a 3%, de 3% a 8%, de 8% a 20%, de 20% a 45%, de 45% a 75% e acima de 75% (CREPANI et al., 2001).

2.5.8 Formas do terreno

As classes de curvaturas horizontais (convergente, planar ou divergente) e curvaturas verticais (côncavo, retilíneo ou convexo), podem ser combinadas para fornecer indicação da forma do terreno (Figura 15).

Figura 15 - Combinação das curvaturas para caracterização das formas de terreno



Fonte: Adaptado de Valeriano (2008)

As classes de forma de terreno podem ser reagrupadas em função de sua similaridade frente a esses aspectos. Os casos extremos de combinações de curvatura do terreno são representados pela forma côncavo-convergente (máxima concentração e acúmulo do escoamento) e pela forma convexa-divergente (máxima dispersão do escoamento), (VALERIANO, 2008).

2.6 Risco de Desastres

Os processos geológicos fazem parte da dinâmica natural do planeta. Entretanto, muitos processos passaram a ocorrer com mais frequência, acelerados e potencializados com a intensificação das atividades humanas. Os movimentos de massa são processos gravitacionais de evolução do relevo condicionados pela ação da água que podem, dependendo das condições, culminar em desastres com grandes prejuízos humanos (mortes) e econômicos (perdas e danos) (CERRI, 1993).

As situações de risco geológico podem ser representadas em risco atual e risco potencial. O risco atual corresponde ao risco instalado (ou efetivo) em áreas já ocupadas, enquanto o risco potencial expressa a suscetibilidade à ocorrência em áreas ainda desocupadas, objetivando a expansão da ocupação sem novas instalações em situação de risco (CERRI, 1993).

Nos anos 90, a ONU declarou como a Década Internacional de Redução de Risco de Desastres Naturais, propondo, por meio do UNDRO (*United Nations Disaster Relief Organization*), um modelo de abordagem estruturado em cinco etapas: identificação dos riscos, análise de risco, medidas preventivas de acidentes, planejamento para situações de emergência e informações públicas e treinamento.

No Brasil, especificamente o Estado de São Paulo, as atividades do Plano Preventivo de Defesa Civil (PPDC), para deslizamentos em encostas, iniciou-se após os acidentes em larga escala e com graves consequências que ocorreram no verão de 1987/1988. O objetivo principal do PPDC é evitar a ocorrência de mortes por meio da remoção preventiva das populações que ocupam áreas de risco, antes que os deslizamentos atinjam suas moradias. Para tal, essa ação do PPDC se baseia na previsão meteorológica, no monitoramento dos limiares críticos de chuva em cada município (chuva acumulada de 72 horas), e nas vistorias de campo para verificação de evidências de movimentação dos terrenos (trincas, degraus de abatimento, etc.) (MENDES et al. 2020).

Com o tempo, o conceito de risco passou a analisar e caracterizar os processos geológicos, sejam exclusivamente naturais, resultantes da ação humana ou mistos.

2.6.1 Terminologias para Conceitos Universais

As conceituações e as padronizações são fundamentais para a elaboração e determinação de metodologias de avaliação de risco. Esses conceitos vêm sendo motivos de discussões com grande diversidade de terminologias. Apresenta-se a seguir uma síntese dos diferentes conceitos relacionados a perigos e riscos geoambientais, em consoante com diversos autores e associações da classe.

Corteletti (2017) apresentou nas Tabelas 7, 8, 9 e 10 as evoluções das diferentes definições adotadas para perigo (*hazard*), risco (*risk*), suscetibilidade e vulnerabilidade. Em uma análise se percebe ao longo do tempo a inclusão dos aspectos sociais, considerando perda de vidas, ferimentos ou outros impactos à saúde, danos à propriedade, perturbações sociais e econômicas ou degradação ambiental.

Tabela 7- Definições de Perigo (Hazard)

Autor e Ano	Definição de Perigo
Varnes et al. (1984)	A probabilidade de ocorrência de um processo potencialmente danoso numa determinada área e num certo período de tempo.
Zuquette (1993)	Evento perigoso: representa um perigo (latente) 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.
Fell (1994)	Refere-se ao potencial de ocorrência de um escorregamento de terra que cause danos em uma área; tal dano poderia incluir perdas de vida ou lesões, danos a propriedades, perturbação social e econômica ou degradação do meio ambiente.
Einstein (1997)	Trabalha com a incerteza de um perigo, com a sua previsibilidade limitada. É a probabilidade de que um perigo particular ocorra em um determinado período.
IUGS-LWG (1997) <i>International Union of Geological Sciences</i>	Uma condição com potencial para causar consequências indesejáveis. Ameaças de escorregamento devem ser descritas por zonas e magnitudes.
AGS (2007) Australian Geomechanics Society	Uma condição com o potencial de causar uma consequência indesejável. Na descrição de deslizamento de terra, o <i>hazard</i> deve incluir o local, o volume (ou área), a classificação e a velocidade dos deslizamentos e a probabilidade da sua ocorrência ao longo de um determinado período de tempo.
USGS (2008) United States Geological Survey	<i>Hazard</i> para escorregamento de terra: refere-se ao potencial de ocorrência de um escorregamento de terra que cause danos dentro de uma área. Tais como: perdas de vidas ou lesões, danos à propriedade, perturbação social e econômica, ou degradação do meio ambiente.
UNDRR (2017) United Nations Office for Disaster Risk Reduction	Um processo, fenômeno ou atividade humana que pode causar perda de vidas, ferimentos ou outros impactos à saúde, danos à propriedade, perturbações sociais e econômicas ou degradação ambiental.

Fonte: Adaptado de Corteletti (2017)

Tabela 8- Definições de Risco (Risk)

Autor e Ano	Definição de Risco
Varnes et al. (1984)	O número esperado de vidas perdidas, pessoas feridas, danos à propriedade e interrupção de atividade econômica, devido a um fenômeno particular para uma dada área e período de referência.
Zuquette (1993)	É a probabilidade de que ocorram perdas (econômicas, sociais e ambientais), além de um valor ser considerado normal ou aceitável para um lugar específico, durante um período de tempo determinado. É considerado o resultado da relação entre um <i>hazard</i> e vulnerabilidade dos elementos expostos (seres humanos, residências, entre outros).
ABGE (1995) Associação Brasileira de Geologia e Engenharia	Processo, situação ou evento no meio geológico de origem natural, induzidos ou mistos, que pode gerar um dano econômico ou social para as comunidades, cuja previsão, prevenção ou correção irão empregar critérios geológicos.
AGS (2007) Australian Geomechanics Society	Uma medida da probabilidade e gravidade de um efeito adverso à saúde e ao ambiente. O risco é frequentemente estimado pelo produto da probabilidade e consequências. No entanto, uma forma mais geral de interpretação do risco implica uma comparação da probabilidade e as consequências de uma forma não-produto.

Tabela 8 - Definições de Risco (*Risk*) (Continuação)

USGS (2008) <i>United States Geological Survey</i>	Risco de escorregamento: a probabilidade de consequências prejudiciais (o número esperado de vias perdidas, pessoas feridas, extensão de danos à propriedade ou a sistemas ecológico, ou interrupção das atividades econômicas) dentro de uma área sujeita a escorregamentos. O risco pode ser de abrangência individual ou coletiva, resultante da interação entre a ameaça e a vulnerabilidade individual ou coletiva.
UNDRR (2017) <i>United Nations Office for Disaster Risk Reduction</i>	A perda potencial de vida, afetados ou bens destruídos ou danificados que podem ocorrer em um sistema, sociedade ou comunidade em um período específico, determinados probabilisticamente em função do perigo, exposição, vulnerabilidade e capacidade.

Fonte: Adaptado de Corteletti (2017)

Tabela 9- Definições de Suscetibilidade

Autor e Ano	Definição de Suscetibilidade
Zuquette (1993)	Possibilidade de que um escorregamento ocorra em uma área, com base nas condições do terreno local. A suscetibilidade não considera, de forma explícita, a probabilidade de ocorrência que também dependa da recorrência de fatores de disparo, tais como as precipitações ou sismos.
Soeters e Van Westen (1995)	Propensão de uma determinada área de ser afetada por um (certo tipo) de deslizamento de terra, baseado, unicamente, em condições do terreno, não apresentando a probabilidade de ocorrência dos fenômenos.
Fell (1994)	Ao escorregamento, referindo-se à possibilidade de que o escorregamento ocorra em uma área com base nas condições do terreno local. A suscetibilidade não considera, de forma explícita, a probabilidade de ocorrência, que também depende de recorrência de fatores de disparo, tais como as precipitações ou sismos.
Zêzere (2005)	Como a probabilidade espacial de ocorrência de um determinado fenômeno numa dada área, tendo em conta os fatores condicionantes existentes no terreno, independentemente do seu período de recorrência, ou seja, a suscetibilidade reflete uma probabilidade espacial, mas não temporal.
USGS (2008) <i>States Geological Survey</i>	As condições determinadas por fatores ou processos físicos, sociais, econômicos e ambientais que aumentam a suscetibilidade de um indivíduo, uma comunidade, ativos ou sistemas aos impactos de perigos.

Fonte: Adaptado de Corteletti (2017)

Tabela 10- Definições de Vulnerabilidade

Autor e Ano	Definição de Vulnerabilidade
Varnes (1984)	Grau de perda de potencial (dano) de um dado elemento ou conjunto de elemento, resultante da ocorrência de fenômeno de catástrofe (desastres naturais) de uma determinada magnitude. Ela é expressa numa escala de 0 (ausência de danos) até 1 (perda total).
Zuquette (1993)	Característica intrínseca de um sujeito, sistema ou elemento que estão expostos a um evento perigoso (<i>hazard</i>), correspondendo à predisposição destes em serem afetados ou suscetíveis a perdas. É expressa em uma escala que varia de 0 (sem perdas) a 1 (perdas totais).
IUGS-WGL (1997) <i>International Union of Geological Sciences</i>	Potencial de perda para um dado elemento ou grupo de elementos dentro da área afetada por um escorregamento.

Tabela 10 - Definições de Vulnerabilidade (Continuação)

AGS (2007) <i>Australian Geomechanics Society concordando com JTC32 (2004)</i>	Grau de perda para um determinado elemento ou conjunto de elementos dentro da área afetada pelo escorregamento. Ela é expressa numa escala de 0 (sem perda) a 1 (perda total). Para uma propriedade, a perda será o valor do dano em relação ao valor da propriedade; para pessoas, será a probabilidade que uma determinada vida (elemento em risco) será perdida, quando afetadas pelo deslizamento.
USGS (2008) <i>United States Geological Survey</i>	Ao escorregamento, refere-se a extensão das perdas potenciais para um dado elemento, ou conjunto de elementos, dentro de uma área afetada pela ameaça, expressa na escala de 0 (sem perdas) a 1 (perda total); vulnerabilidade é formada por condições físicas, sociais, econômicas e ambientais.
UNDRR (2017) <i>United Nations Office for Disaster Risk Reduction</i>	As condições determinadas por fatores ou processos físicos, sociais, econômicos e ambientais que aumentam a suscetibilidade de um indivíduo, uma comunidade, bens ou sistemas aos impactos dos perigos.

Fonte: Adaptado de Corteletti (2017)

2.7 Mapeamento geotécnico e geoambiental

Os mapeamentos geotécnico e geoambiental permitem uma avaliação das relações espaciais entre os aspectos da Geotecnia, dos diferentes tipos de usos e obras, no sentido de avaliar adequabilidades em função das características geotécnicas favoráveis, sendo também útil na previsão de problemas ambientais. Permitem embasar os prognósticos de eventos naturais na previsão de riscos, na avaliação de zonas de recargas (naturais e artificiais) e suas vulnerabilidades, na melhoria dos aspectos de resiliências das zonas urbanas e na elaboração de planos diretores como base técnica fundamental, e que suportará as orientações legais. Durante a realização dos mapeamentos é necessária a criação de um banco de dados e o uso de Sistema de Informação Geográfico (SIG) para diversas operações, desde o gerenciamento dos dados até a aplicação de modelos (ZUQUETTE, 2015).

O desenvolvimento crescente da população mundial e de seu poder transformador, proporcionado pela evolução tecnológica, coloca o homem como importante agente de modificações ambientais. A ocupação de áreas com maiores restrições geológicas/geotécnicas e ambientais têm gerado não só inúmeras degradações, mas também aceleração de processos potencialmente perigosos, como movimentos de massa, erosões, etc. Além disso, a migração do campo para as cidades, contribui para a alocação de pessoa, de baixa renda, em zonas consideradas de ocupação irregular, gerando risco tanto para a população local, como para o ambiente, que inicialmente estava em condições naturais e é atingido pelas modificações antrópicas.

Neste contexto, o estudo e mapeamento das potencialidades e restrições ao uso e ocupação da superfície terrestre, tornam-se imprescindíveis. A construção de grandes obras, como as rodovias, evidencia a necessidade crescente de informações geológicas e geotécnicas, quer para subsidiar a execução dos projetos e das obras, quer para minimizar riscos decorrentes de ocupações inadequadas.

Com relação às formas de apresentação do mapeamento, Zuquette e Nakazawa (1998) afirmam que os mapas são utilizados para efetuar apenas o registro de informações não interpretadas do meio físico, enquanto que as cartas apresentam interpretações das informações contidas no mapa, com o objetivo de uma aplicação específica.

Verifica-se a demanda por informações geológico-geotécnicas para a implantação de obras civis, o planejamento de atividades antrópicas de maneira generalizada e, mais recentemente, para os estudos ambientais, em razão da necessidade de conhecer e representar o ambiente em que se vive e se desenvolve. Os programas de SIG e de banco de dados acrescentaram agilidade e capacidade de armazenamento da informação, que pode, continuamente, ser atualizada. (ZUQUETTE E GANDOLFI, 2004).

Em paralelo com o desenvolvimento do mapeamento geotécnico, desenvolveu-se fortemente a partir dos anos 1970, a consciência ambiental e, com ela, a percepção da importância das informações geológicas para a melhor compreensão dos processos ambientais.

Diversos eventos e acontecimentos evidenciaram essa preocupação com as questões ambientais, como a promulgação da NEPA (*National Environment Protection Act*), em 1970, nos Estados Unidos, e a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente, em Estocolmo, em 1972. Em continuidade foi criada pela IUGS (*International Union of Geological Science*), em 1990, a COGEOENVIRONMENT (*Comissionon Geoscience for Environmental Planning*), com o objetivo de promover o uso das informações geológicas nos estudos ambientais. Importante contribuição dada para a proposição de conceito de geoindicadores, capazes de permitir a medição de variações no ambiente geológico, causadas por atividades antrópicas (ITC,1996).

A cartografia digital é uma realidade presente no mapeamento geotécnico e geoambiental. Reflete os avanços que ocorreram nas últimas duas décadas no desenvolvimento de ferramentas de geoprocessamento e SIG. Possibilita integralizar, tratar e armazenar dados, além de representar as informações em conjunto de diversas formas (gráfica, tabelas, mapas, textos, imagens e outros). Além disso, propicia a facilidade de

realizar cruzamento de planos de informação contidos nos mapas, de maneira a gerar produtos derivados, como as cartas para finalidades específicas, a atualização rápida e progressiva dos dados ao longo do tempo, acelerando a realização de análises das informações, com aplicativos, tais como: análises estatísticas, geração de MDE (Modelo Digital de Elevação), classificação de imagens, análise espacial (matriz, sobreposição), análise de decisões (teoria fuzzy, árvore lógica, AHP), avaliação de previsões, análise de risco, criação de cenários, entre outros (ZUQUETTE, 2015).

2.7.1 Aplicação de SIG

O Sistema de Informações Geográficas (SIG) é uma das técnicas (também considerado uma ciência de informação espacial) mais completas e amplas do Geoprocessamento, pois permite trabalhar de maneira integrada abordagens de várias áreas do conhecimento para o adequado e automatizado armazenamento, tratamento e manipulação de grande quantidade de informações espaciais (CATANI et al., 2013).

O SIG constitui importante técnica para os estudos ambientais por proporcionar rápida e constante integração e atualização de dados espaciais e alfanuméricos que permitem a análise de fenômenos em diferentes escalas. As características do SIG permitem compreender a distribuição espacial e o porquê da ocorrência de determinado evento em determinado lugar, assim como simular situações e planejar o ambiente para tomada de decisões, entre outras possibilidades (CATANI et al., 2013).

Atualmente, a problemática ambiental tem sido abordada de maneira mais coerente com os acontecimentos e os envolvidos nos mesmos, considerando esses problemas não mais como simplesmente ambientais, mas sim como socioambientais, aonde o social e o natural são concebidos no mesmo processo, uma vez que a transformação do ambiente se dá devido às complexas interações sociedade-natureza.

Com isso, é essencial considerar as interações e a dinâmica entre os aspectos ambientais, sociais e econômicos através da espacialização das informações que permitem a análise de fenômenos diversos que têm gerado inquietações na sociedade, sendo eles mudanças climáticas e riscos ambientais, englobando riscos naturais e riscos naturais intensificados pela ação antrópica. Essa espacialização têm ganhado significativas contribuições das geotecnologias, especialmente do SIG a partir da representação das informações e estabelecimento de relações sistêmicas de maneira automatizada, rápida e dinâmica (BENAVIDES SILVA E MACHADO, 2014).

2.8 METODOLOGIAS PARA MAPEAMENTO DE MOVIMENTOS DE MASSA

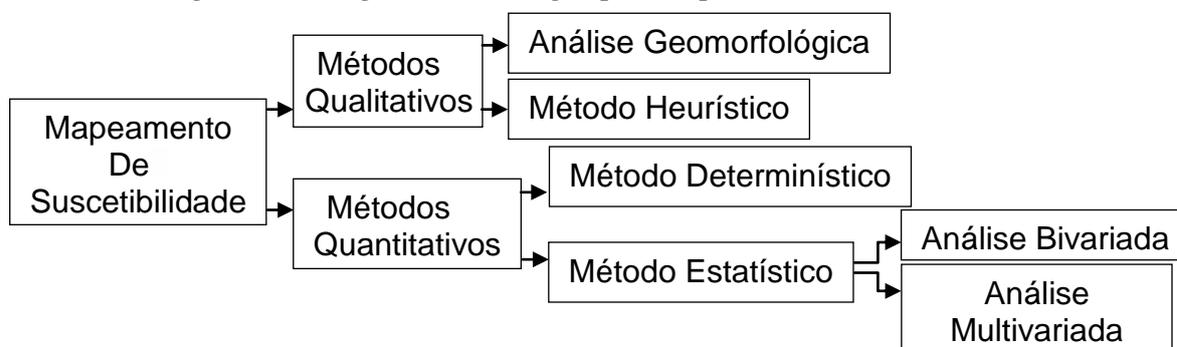
A avaliação de risco busca obter classificações da probabilidade de determinada área desencadear processos de movimentos de massa, tendo como base as evidências espaciais dos eventos passados, conforme o levantamento de dados das ocorrências já registradas, sem estimar um período e os possíveis danos. Essa metodologia requer análise de diferentes condicionantes. Foram implementados diferentes modelos para mapeamento da suscetibilidade ambiental, do perigo, da vulnerabilidade social e do risco, conforme apresentado a seguir.

2.8.1 Suscetibilidade Ambiental

Diversas técnicas de concepção de mapas de suscetibilidade a escorregamentos usando métodos estatísticos e sistema de informações geográficas (SIG) foram aplicadas nos últimos anos (por exemplo, Piedade et al. 2011; Bortoloti et al. 2015; Bourenane et al. 2015; Gariano et al. 2015; Sangchini et al. 2016; Zhang et al. 2016; Juliev et al. 2019). Eles compararam a distribuição espacial dos deslizamentos de terra com fatores morfológicos e geológicos.

A Figura 16 apresenta uma das classificações mais completas para avaliação de suscetibilidade a movimentos de massa, consolidadas por Soeters & van Western (1996) e Alleotii & Chowdhury (1999), dividem-se em métodos qualitativos e quantitativos.

Figura 16- Fluxograma Metodologias para Mapeamento da Suscetibilidade



Fonte: Adaptado de Soeters e van Westen, 1996 e Aleotti e Chowdhury (1999)

Os próximos itens apresentam as metodologias com mais detalhes.

2.8.1.1 Métodos qualitativos

A metodologia qualitativa é derivada de análises que estão diretamente relacionadas pela interpretação e julgamento de um especialista, que define quais são as condicionantes mais significativas dos processos, utilizando os atributos do meio físico, análises de campo e a fotointerpretação. A subjetividade é um fator limitante desse método, pois a qualidade final do produto vai depender da experiência técnica do profissional encarregado (ALLEOTI; CHOWDHURY, 1999; SOETERS; VAN WESTEN, 1996). Esse tipo de abordagem pode ser classificado em Análise Geomorfológica e o Método Heurístico.

Análise Geomorfológica

A análise geomorfológica é executada diretamente em campo, com a realização do zoneamento de suscetibilidade (SOETERS; VAN WESTEN, 1996). A vantagem desta está na capacidade de aplicação em qualquer escala e rápida avaliação da suscetibilidade. Entretanto, restringe a avaliação crítica dos resultados e a comparação dos mapas produzidos por diferentes especialistas, sem definição clara dos procedimentos e regras adotadas na definição de zonas instáveis (ALLEOTI; CHOWDHURY, 1999).

Método Heurístico

Esse método consiste na combinação subjetiva com uma abordagem indireta, em que o mapa de suscetibilidade é obtido com base no conhecimento de quem irá executar a análise. Baseado na identificação, hierarquização e ponderação das causas e fatores de instabilidade que promovem o desencadeamento dos processos, os fatores condicionantes são selecionados pelo pesquisador, que irá atribuir diferentes pesos às classes dos parâmetros para indicar sua importância. Consecutivamente, o modelo de suscetibilidade pode ser elaborado com apoio de um software SIG. O problema dessa abordagem consiste justamente na ponderação exata de pesos para vários parâmetros (ALLEOTI; CHOWDHURY, 1999; SOETERS; VAN WESTEN, 1996).

Soeters & van Westen (1996) esquematizam a produção de um mapa de suscetibilidade nas seguintes etapas: (1) seleção dos fatores condicionantes; (2) subdivisão das classes para cada fator condicionantes; (3) ordenamento das classes pela atribuição de

valores de ponderação; (4) atribuição de pesos para cada mapa de condicionantes; (5) cruzamento dos mapas de fatores condicionantes; (6) obtenção do mapa final de suscetibilidade em diferentes níveis.

Na tentativa de reduzir a subjetividade e auxiliar na diminuição das incertezas durante a atribuição de pesos aos fatores na aplicação desse método, um artifício envolve a técnica AHP (*Analytical Hierarchy Process*), que é um processo analítico para tomada de decisão (KAYASTHA et al., 2013).

2.8.1.2 Métodos quantitativos

Os métodos quantitativos foram desenvolvidos com o objetivo de diminuir a subjetividade das metodologias anteriores, buscando melhorar a representatividade do fenômeno investigado. Podem basear-se nos métodos estatísticos, que tem como base as evidências dos eventos passados para a predição de eventos futuros, como também os métodos determinísticos que dependem de cálculos de estabilidade de talude e modelos hidrológicos (GUZZETTI et al., 1999; COROMINAS et al., 2014).

Métodos determinísticos

São métodos que envolvem modelagens matemáticas suportadas pela quantificação de propriedades físicas intrínsecas ao processo estudado, ou seja, dependem da relação entre forças resistentes e cisalhantes, associando características de mecânica dos solos, parâmetros de resistência da área investigada, dados geométricos do terreno, envolvendo a estabilidade de taludes e modelos hidrológicos (ALLEOTI; CHOWDHURY, 1999; SOETERS; VAN WESTEN, 1996). As escalas mais apropriadas a esse tipo de análise são as de 1:10.000 a 1:2.000, bem detalhadas, uma vez que as análises são feitas por cada talude. A principal desvantagem dos modelos determinísticos, o que torna esses métodos viáveis para estudar áreas específicas, é a necessidade de muitos dados de taludes individuais, requerendo trabalhos intensivos de campo (ALLEOTI; CHOWDHURY, 1999; GUZZETTI et al., 1999; SOETERS; VAN WESTEN, 1996; COROMINAS et al., 2014).

Métodos estatísticos

Os métodos estatísticos são modelos aplicados que estabelecem correlações em função de ocorrências pretéritas e os parâmetros causadores de instabilidade (GUZZETI et al, 1999). Os pesos atribuídos às variáveis são calculados por expressões matemáticas, associando a quantidade de movimentos de massa em determinada unidade de terreno, com as características de suas condicionantes, sendo de suma importância a obtenção de bancos de dados representativos. Ou seja, os fatores que desencadearam movimentos de massa no passado, são determinados estatisticamente, e fornecem maior ou menor probabilidade aos eventos futuros ocorrerem aplicados à áreas que atualmente não sofreram instabilizações (ALLEOTI; CHOWDHURY, 1999; FELL et al, 2008).

Aplicam-se nesses estudos análises bivariadas e multivariadas.

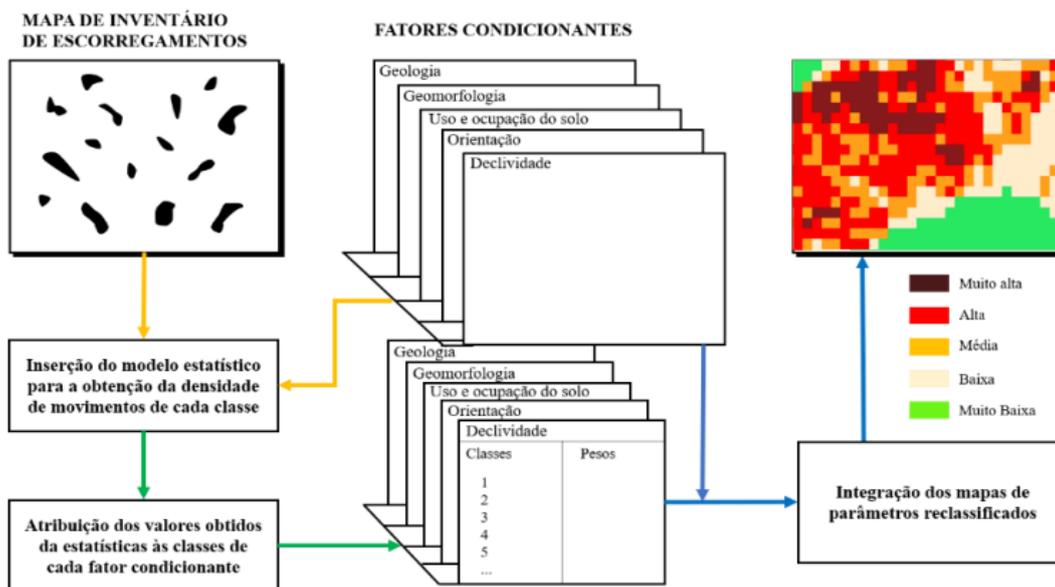
Estatística bivariada

As ponderações na estatística bivariada são alcançadas pela sobreposição dos fatores condicionantes (ex: litologia, declividade, etc.) e o mapa de inventário, para obter a densidade de escorregamentos para cada classe (ex: classes de declividade, tipo litológico, etc) por meio da aplicação do modelo estatístico (ALLEOTI; CHOWDHURY, 1999).

Alleoti & Chowdhury (1999) expõem, resumidamente, as etapas necessárias para o desenvolvimento dessa metodologia: (1) seleção e mapeamento dos parâmetros condicionantes ao processo; (2) subdivisão de cada parâmetro em um número de relevantes classes; (3) elaboração do mapa de inventário; (4) sobreposição dos diferentes mapas de parâmetros ao mapa de inventário; (5) cálculo da densidade de escorregamentos em cada classe, de cada parâmetro, a fim de se determinar os pesos de ponderação; e (6) cruzamento dos mapas de parâmetros com posterior cálculo das classes de suscetibilidade.

A Figura 17 apresenta as etapas para construção do mapa de suscetibilidade com análise bivariada, utilizando ferramenta SIG.

Figura 17- Esquemática da Análise Estatística Bivariada para Escorregamento em SIG



Fonte: Alleoty e Chowdhury, 1999; Soeters e van Westen (1996)

A principal vantagem dessa metodologia é evidenciar os fatores condicionantes que mais contribuíram para as instabilizações (VAN WESTEN et al., 2003). Entretanto, as desvantagens apontadas por Thiery et al. (2007) são concentradas na limitação dos fatores condicionantes atribuídos para a análise, nem sempre eles são independentes entre si, e também se assume que os escorregamentos no passado ocorrem sob as mesmas condições no futuro, o que nem sempre pode acontecer.

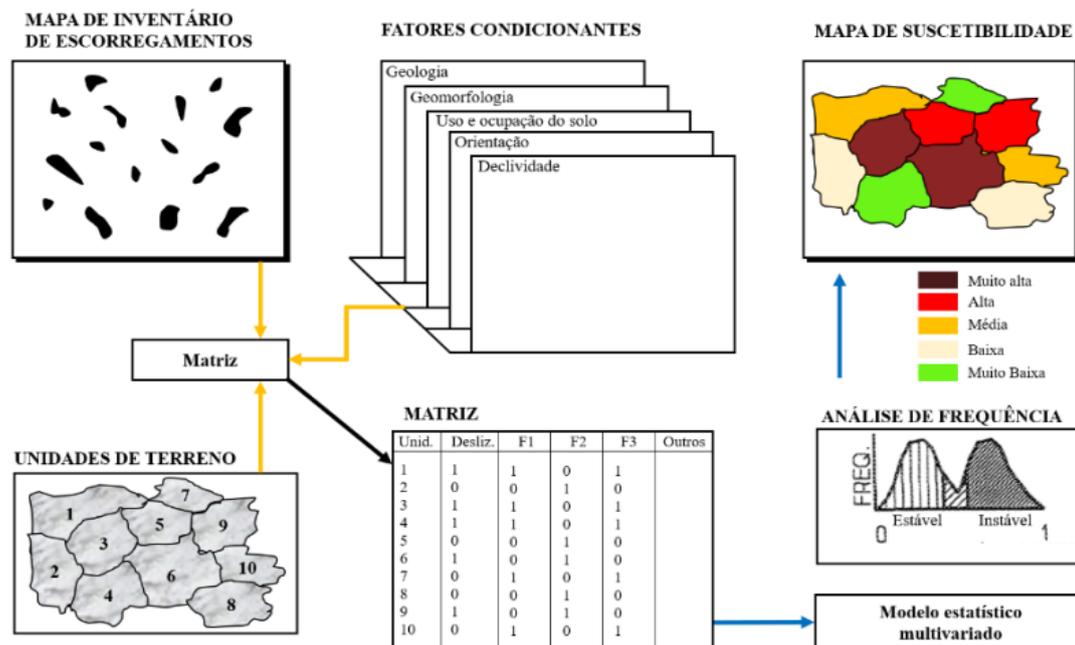
Diversos artifícios estatísticos têm sido empregados no cálculo desses valores de ponderação, com destaque para o método de Suscetibilidade de Escorregamento, o método do Valor Informativo (VI) e o método de modelagem dos Pesos de Evidência (SÜZEN; DOYURAN, 2004).

Estatística multivariada

Os modelos multivariados levam em consideração a interação entre os fatores condicionantes ao processo, baseia-se na inter-relação entre estes e a incidência de escorregamentos sobre tais, visando identificar qual exerceu maior influência (SÜZEN; DOYURAN, 2004).

A Figura 18 apresenta as etapas para construção do mapa de suscetibilidade com análise multivariada, utilizando ferramenta SIG.

Figura 18- Esquematisação da Análise Estatística Multivariada para Escorregamentos em SIG



Fonte: Alleoty e Chowdhury, 1999; Soeters e van Westen (1996)

Para a aplicação da estatística multivariada, Soeters e van Westen (1996) sequenciaram alguns passos para alcançar a suscetibilidade: (1) seleção e mapeamento dos fatores condicionantes ao processo e elaboração do mapa de inventário da área de estudo; (2) triagem de amostras afetadas (instáveis) e não afetadas (estáveis) pelo fenômeno investigado através das ocorrências cadastradas no inventário; (3) sobreposição dos mapas de parâmetros definidos na etapa 1 com as amostras colhidas na etapa 2; (4) elaboração de uma relação de presença/ausência para cada classe, de todos os parâmetros, tomando-se por base a amostragem binária estável/instável; (5) aplicação de um modelo estatístico multivariado; (6) reclassificação das unidades do terreno com base nos resultados definidos na etapa anterior, com conseqüente categorização das classes de suscetibilidades.

Geralmente, essa abordagem oferece resultados com maior acurácia e mais realísticos (SOETERS; VAN WESTEN, 1996). Dentre essa metodologia, são encontrados na literatura os modelos mais aplicados de Análise Discriminante, Regressão Linear, Regressão Logística, Redes Neurais Artificiais e *Machine Learning*.

2.8.2 Mapa de Suscetibilidade pelo Valor Informativo (VI)

Métodos estatísticos são comumente usados em estudos de deslizamento de terra (Guzzetti et al. 1999; Zhou et al. 2002; Saha et al. 2005; Piedade et al. 2011; Capitani et al. 2013; Gariano et al. 2015; Zhang et al. 2016), embora no Brasil a aplicação de métodos estatísticos ainda seja incipiente (Reichenbach et al. 2018). Alguns estudos no território brasileiro podem ser encontrados na literatura, como Barella et al. (2019), que comparou vários métodos estatísticos para avaliação da suscetibilidade a deslizamentos rasos no estado de Minas Gerais, incluindo valor informativo, e Lima et al. (2020) também aplicou valor informativo para o fluxo de detritos em estudos no estado do Rio de Janeiro. Alguns exemplos em todo o mundo que aplicaram o método de valor informativo para estudos de suscetibilidade a deslizamentos são Zêzere (1997), Pereira (2009), e Piedade et al. (2011) em Portugal, Cascini et al. (2015) na Itália, Zhang et al. (2016) na China, El-Fengour et al. (2020) em Marrocos e Hodasová e Bednarik (2021) na Eslováquia.

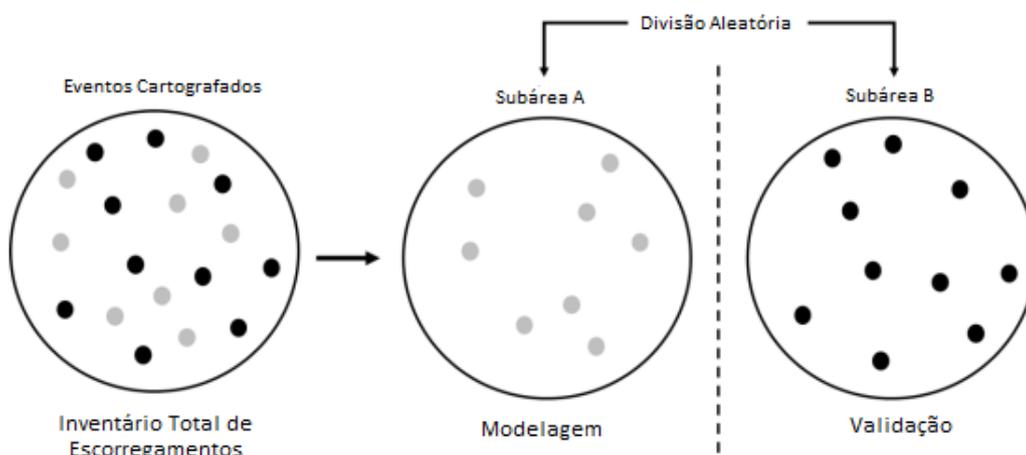
A técnica de Valor Informativo (ou método do índice estatístico – Yan 1988; Yin e Yan 1988), se enquadra na análise estatística bivariada, utilizada para criar mapas de suscetibilidade de deslizamentos (SÜZEN; DOYURAN, 2004). Na análise estatística bivariada, o peso das classes usadas para categorizar cada fator condicionante é determinado da densidade de deslizamento em cada classe individual (ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999). Na prática, essa técnica compara a densidade de deslizamentos existentes em cada classe, de cada fator de predisposição, com a densidade média da área investigada. Assim se sustenta normalização logarítmica da razão entre a probabilidade condicionada de se encontrar algum movimento numa determinada classe, de algum parâmetro preditivo, e a probabilidade de que algum evento aconteça na área de estudo (PEREIRA, 2009). A estimativa do Valor Informativo final é alcançada pela soma algébrica dos valores que se sobrepõem. As unidades de terreno mapeadas correspondem à própria segmentação dos pixels nas bases cartográficas da área de estudo (ZÊZERE, 2002).

2.8.2.1 Partição da amostra

A capacidade dos mapas pode ser estabelecida pelas amostras de escorregamentos nos procedimentos de mapeamento. Para isso, é necessário particionar o inventário de

forma que parte dos eventos seja utilizada na modelagem e a outra parte na validação dos resultados, essa divisão pode ser de forma temporal, espacial ou aleatória (GUZZETI et al., 2006). A partição aleatória é a mais utilizada, em função de sua facilidade operacional e consistência teórica. O inventário é fragmentado espacialmente, a divisão é aleatória e não regional, uma distribuição irregular tende a cobrir toda a área de estudo, é comum designar 2/3 da amostra para compor um conjunto de treino e reservar 1/3 para estruturar o conjunto de validação (BARELLA, 2016). A Figura 19 esboça um esquema de partição aleatória dos dados.

Figura 19- Esboço da Partição Aleatória dos Dados



Fonte: Adaptado de Pereira (2009)

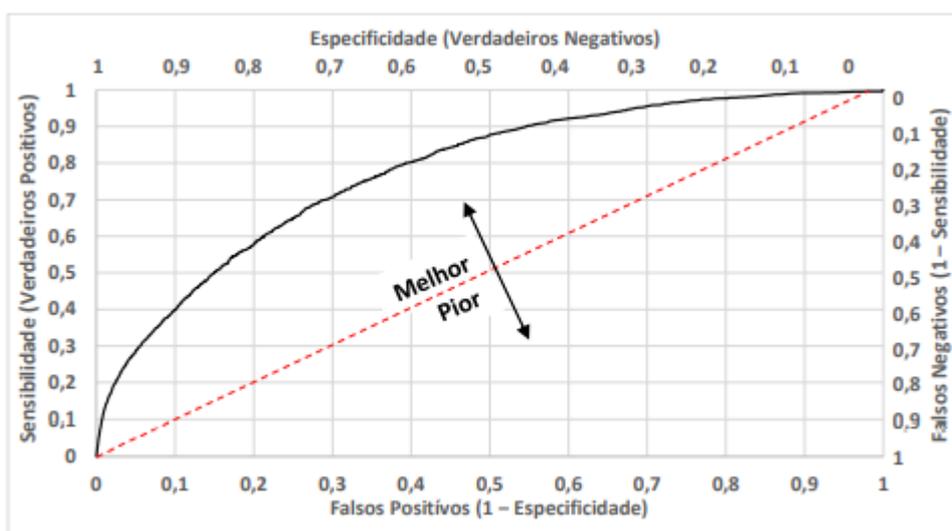
Definido como os dados serão divididos e desenvolvido o processo de elaboração do modelo, é necessária a análise da viabilidade dos resultados. Nas últimas décadas, diversos métodos têm sido propostos para subsidiar a avaliação da qualidade global dos modelos de suscetibilidade, com destaque para as Curvas ROC, Curvas de Sucesso e Predição.

2.8.2.2 Análise de sensibilidade e curva ROC

Diante da resposta do modelo perante a adição e a subtração de variáveis, uma das premissas para a quantificação da importância dos diferentes fatores condicionados empregado é a análise de sensibilidade, por meio da curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Quanto mais elevados os valores, maior é a acuidade (ZÊZERE et al.,

2005; PIEDADE et al., 2010). A implementação consiste em uma construção gráfica que ilustra o desempenho do modelo, na qual os eixos reportam, além do Índice de Sensibilidade, a Taxa de Especificidade. Cada par de coordenadas indica a habilidade do modelo em discriminar corretamente as áreas estáveis e instáveis, o que se reflete na forma da curva (BEGUERÍA, 2006). A Figura 20 exemplifica o gráfico de uma curva ROC, o tracejado em vermelho indica o valor de 0,5, sendo desconsideradas todas as linhas abaixo desse.

Figura 20- Exemplo Gráfico de uma Curva ROC



Fonte: Adaptado de Beguería (2006)

A Área Abaixo da Curva é um artifício utilizado na identificação da envergadura individual dos fatores de predisposição e para avaliação do desempenho, validação dos resultados e acurácia do modelo. O modelo mais eficiente vai ser o que reportar a melhor relação entre sensibilidade/especificidade, ou seja, maximizar a quantidade de verdadeiros positivos (escorregamentos) à custa da menor incidência de falsos positivos possíveis (provável erro), o que resulta na inclinação da curva e na área gráfica envolvida (PIEADADE et al., 2010).

De acordo com Guzzeti (2006), os resultados de validação para o mapa de suscetibilidade é definido como excelente acima de 0,90, considerado muito satisfatório entre 0,80 e 0,90, e aceitável até 0,75.

2.8.2.3 *Curvas de sucesso e predição*

As curvas de sucesso e predição seguem a abordagem similar a curva ROC, são consideradas na validação e qualidade do modelo estatístico de suscetibilidade. Resultam da integração de porcentagens acumuladas dispostas em ordem decrescente entre os níveis de suscetibilidade do modelo e os sítios instáveis pelo inventário de utilizado. Ou seja, constituem gráficos, salientando no eixo das abcissas, a área de estudo classificada em ordem decrescente de suscetibilidade e, no eixo das ordenadas, a distribuição cumulativa da área deslizada (BEGUERÍA, 2006).

A principal diferença entre elas (Curva de Sucesso e de Predição) está na partilha do inventário. Para a taxa de Sucesso se utiliza a parcela do inventário empregada na modelagem. Assim, o resultado é relativo ao melhor ajuste entre o modelo e os escorregamentos mapeados. Para a taxa de Predição se utiliza a amostra de teste, responsável pela capacidade preditiva da modelagem (BARELLA, 2016).

A validação é essencial, pois permite estabelecer o grau de confiança dos resultados, levando em consideração a acurácia e poder preditivo. Nessa abordagem, Guzzeti et al. (2006), propõem uma escala arbitrária em função dos procedimentos de validação adotados, modelos que apresentam uma Área Abaixo da Curva (AAC ou AUC) mais elevada e conseqüentemente um índice superior (0,9 a 1) são classificados como excelentes, na medida que essa relação caminha para em torno de 0,8 é considerada muito satisfatória, e quando próxima de 0,75 é aceitável.

2.8.2.4 *Classificação de suscetibilidade*

A etapa de classificação da suscetibilidade pode-se afrontar com um conjunto muito grande de índices, cuja magnitude depende do método estatístico aplicado e da quantidade de variáveis utilizadas. Para mensurar e interpretar as heterogeneidade dos atributos, estes são agrupados em classes (PEREIRA, 2009). Pode-se encontrar trabalhos que apresentam desde uma simples distinção entre unidades estáveis e instáveis, até outros mais amplos, que podem envolver até 7 classes rotuladas. Em meio às metodologias adotadas para a seleção das classes, destaca-se a interpretação gráfica da curva de predição (ZÊZERE et al, 2005).

2.8.3 Mapa de perigo e de risco

Segoni et al. (2018) propõem um método, agrupando mapas de suscetibilidade com as limiares pluviométricos em uma matriz quadrada (Figura 21) para determinação de um mapa de perigo. No modelo abaixo, S corresponde às classes de suscetibilidade, R são as limiares de chuva e H é o nível de perigo, derivado da combinação de ambas as classes.

Figura 21- Matriz Quadrada de Perigo para a Combinação de Suscetibilidade e Limiares Pluviométricas

	S1	S2	S3
R1	H0	H1	H2
R2	H1	H2	H3
R3	H2	H3	H4

Legenda: S1: Baixa suscetibilidade, S2: Média suscetibilidade, S3: Alta suscetibilidade; R1: Chuva baixa, R2: Chuva média, R3: Chuva alta; H0: Perigo nulo, H1: Baixo perigo, H2: Médio perigo, H3: Alto perigo, H4: Altíssimo perigo.

Fonte: Segoni et al. (2018)

Hader et al (2022) fez uma adaptação ao proposto por Segoni et al (2018) baseado na terminologia “socionatural” (UNDRR, 2017). Enquanto a suscetibilidade representa a propensão espacial das áreas em que os deslizamentos são esperados, o elemento exposto foi traduzido em escores de vulnerabilidade. Como resultado, os mapas foram submetidos a um ambiente SIG para cruzar cada pixel das classes de suscetibilidade (S) e vulnerabilidade (V) pelo esquema matricial (Figura 22), para então obter os valores de SN correspondentes.

Figura 22- Matriz Quadrada Socionatural de Combinação entre Suscetibilidade e Vulnerabilidade

	S1	S2	S3	S4	S5
V1	SN1	SN1	SN2	SN2	SN3
V2	SN1	SN2	SN2	SN3	SN3
V3	SN2	SN2	SN3	SN3	SN4
V4	SN2	SN3	SN3	SN4	SN4
V5	SN3	SN3	SN4	SN4	SN5

Fonte: Hader et al (2020)

Por exemplo, em locais com zoneamento de suscetibilidade “S2” onde existe um setor censitário com vulnerabilidade correspondente a “V3”, o nível de perigo obtido será

“H3”, fazendo assim as interpretações de perigo. Seguindo essa lógica, o mapa final pode ser reclassificado em classes de 1 a 5, onde 1 corresponde a um socionatural “muito baixo” e 5 a “muito alto” (HADER et al., 2020).

Ainda de acordo com Hader et al. (2020), para elaboração do mapa de risco a matriz foi composta pela vulnerabilidade social além da suscetibilidade do local e a chuva. A Figura 23 mostra o esquema da matriz de risco, onde SN representa as classes do critério socioambiental, composto pela vulnerabilidade e pela suscetibilidade e R as classes da chuva.

Figura 23- Matriz Quadrada de Risco de Combinação entre Socionatural e Chuva

	SN1	SN2	SN3	SN4	SN5
R1	H1	H1	H2	H2	H3
R2	H1	H2	H2	H3	H3
R3	H2	H2	H3	H3	H4
R4	H2	H3	H3	H4	H4
R5	H3	H3	H4	H4	H5

Fonte: Hader et al (2020)

O risco é a relação entre a possibilidade de ocorrência de um fenômeno e a proporção dos danos causados pelo fenômeno em uma sociedade, podendo ser calculado pela Equação 1 (CRED, 2020).

$$Risco = Perigo_{(amea\c{c}a)} * Vulnerabilidade \quad (1)$$

2.8.4 Vulnerabilidade Social

Para a análise da vulnerabilidade social, foram considerados os indicadores propostos por Marcelino et al. (2005), os quais são o índice de pobreza, a densidade demográfica e a idade.

O índice de pobreza é expresso pelo desvio da renda per capita em relação à linha de pobreza, está sendo avaliada em US\$ 1,90 / dia, com valores referentes ao ano de 2010. Este fator indica a capacidade de superar perdas após um evento desastroso. A densidade demográfica foi calculada pela somatória de pessoas residentes em uma unidade espacial dividida pela área em km da unidade espacial correspondente, quanto maior ela for, mais

difícil será o processo de evacuar a região. A idade é estimada pela porcentagem da população idosa, acima dos 60 anos e a porcentagem da população de crianças, abaixo dos 5 anos de idade, pois se julga essas faixas etárias com capacidade de mobilização limitada (PELLEGRINA, 2011).

A integração dos fatores se dá pela somatória dos indicadores (Equação 2).

$$V_{social} = F_{DD} + F_{IP} + F_{DI} \quad (2)$$

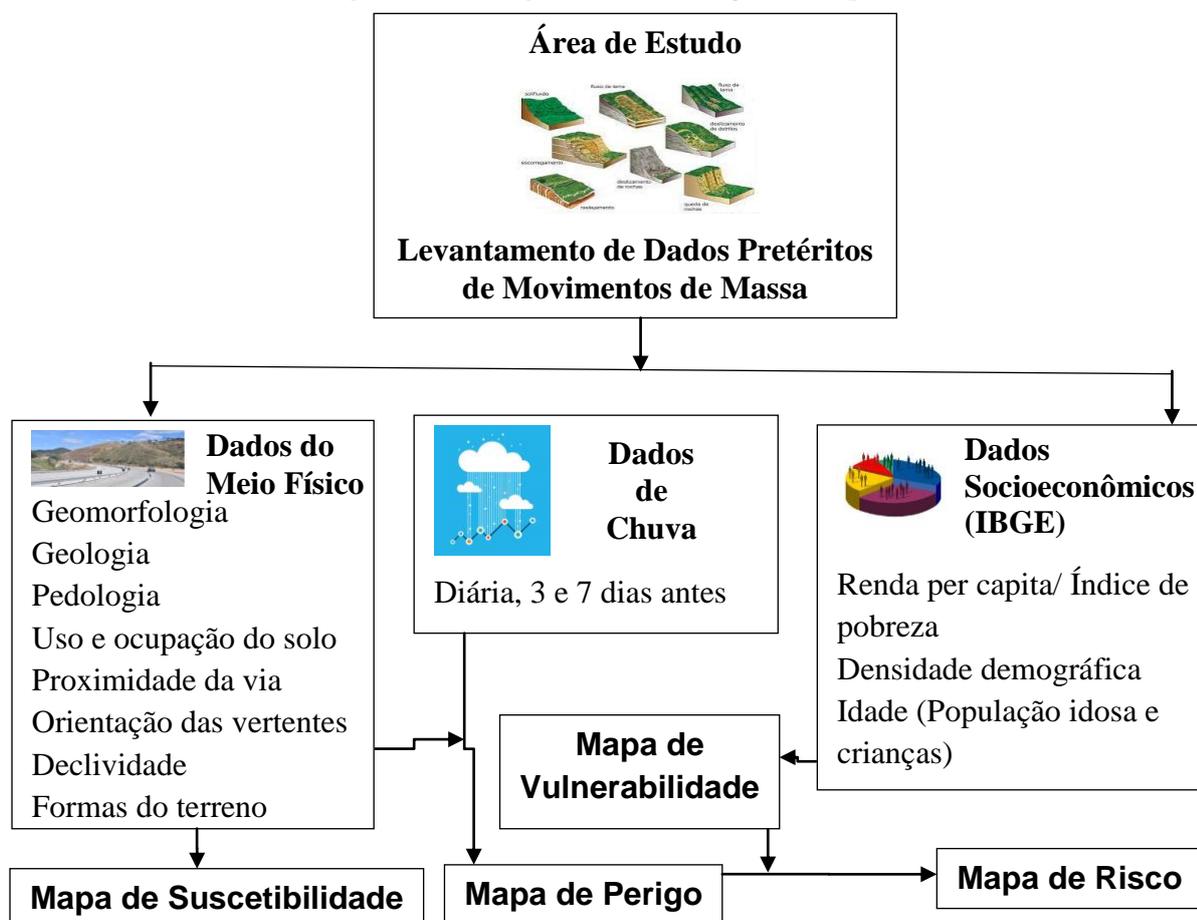
Onde: F_{DD} é o fator densidade demográfica; F_{IP} é o fator índice de pobreza; F_{DI} é o fator distribuição de idade.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

O fluxograma apresentado na Figura 24 está esquematizando a relação dos dados obtidos com o desenvolvimento dos respectivos mapas de suscetibilidade, vulnerabilidade, perigo e risco.

Figura 24 - Fluxograma de Elaboração do Mapa de Risco



Fonte: Autora (2023)

Figura 26 - Interface Online do Banco de Dados de Desastres Naturais do Centro de Meteorologia de Bauru

Fonte: IPMet-UNESP (2022)

Além dessa fonte de dados, se utilizou fotos georreferenciadas registradas por usuário da rodovia Presidente Dutra, no ano de 2016, com a identificação visual de cicatrizes de movimentos de massa de eventos pretéritos.

3.2 Dados do Meio Físico

As bases cartográficas para atender as análises de geologia e geomorfologia, consistem na carta geomorfologia na escala 1:1.000.000 (IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1981) e na carta geológica na escala 1:500.000 (IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1981). Ambas foram concebidas inicialmente em folhas de papel (formato físico) e posteriormente foram digitalizadas. Para o estudo, estas foram obtidas em formato .pdf e inseridas no *software* QGIS (versão 3.10), devidamente georreferenciadas. A etapa subsequente foi recortar essas bases limitando na área de estudo previamente definida.

Na pedologia, a classificação adotada foi a do IBGE, o mapa foi obtido em formato *Shapefile* no próprio site do instituto. Para o uso e ocupação do solo se utilizou os materiais da ESRI (*Environmental Systems Research Institute*, 2021), sendo imagens do satélite Sentinel-2 com resolução espacial de 10 m (UTM-WGS84) e também, imagens do Google Earth (2000-2022), para vetorização do uso e ocupação do solo. A imagem do satélite foi obtida do ano de 2022, e nas imagens do Earth, se utilizou o regulador de datas para

amostras históricas, pois poderia haver alteração do uso do solo no decorrer do tempo, sendo considerada a atividade que predominou no período de ocorrência do desastre. As divisões das classes de uso foram as mesmas atribuídas pela ESRI: água, vegetação densa, agricultura, solo exposto e área urbana, sendo essa subdividida em residencial, comercial e industrial.

A análise das distâncias dos eventos até a rodovia foi realizada por *buffers*. Através dos registros fotográficos em campo, se observou a distância máxima, possível de ser vista, de 100 metros, das ocorrências dos desastres até a rodovia. Portanto, foram mensurados os respectivos pesos, considerando esse valor como limite. Ou seja, os movimentos de massa ocorridos superiores a 100 metros não foram atribuídos na classificação. Entre 0 e 100 metros, foram divididos os *buffers* conforme a Tabela 11, sendo os mesmos valores também utilizados por BENAVIDES E MACHADO (2014). Quanto mais próximo da via, maior o peso de classificação do desastre para esse fator.

Tabela 11- Classificação de Proximidade da Via

Distância dos Buffers	Pesos Atribuídos
Até 5 metros	1,0-0,8
De 5 a 10 metros	0,8-0,6
De 10 a 25 metros	0,6-0,4
De 25 a 50 metros	0,4-0,2
De 50 a 100 metros	0,2-0,0
Acima de 100 metros	0,0

Fonte: Autora (2023)

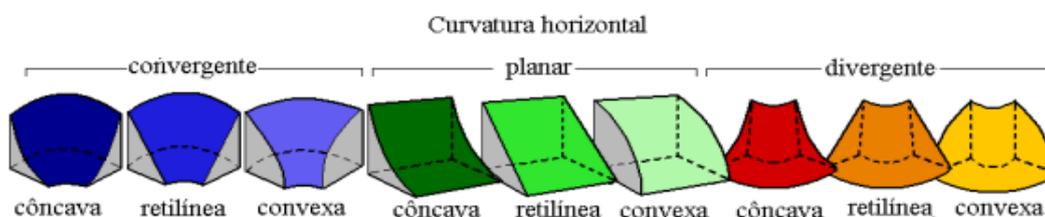
A declividade, orientação das vertentes e formas do terreno foram obtidas no Banco de Dados Topodata/SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) disponível no site do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). Foram necessárias 3 (três) cenas: 22S45_SN, 22S465_SN, 23S465_SN. Os dados estão em estrutura raster, com coordenadas em graus decimais e datum WGS84, na escala 1:250.000.

Estes materiais permitiram os procedimentos de espacialização das informações e de elaboração de mapas em ambiente SIG, utilizando o *software* QGIS (versão 3.10) e o tratamento de dados em planilha eletrônica.

Para a classificação da declividade, se utilizou as faixas de 0 a 3%, de 3% a 8%, de 8% a 20%, de 20% a 45%, de 45% a 75% e acima de 75%, conforme a EMBRAPA (1999). Na orientação da vertentes, seguiu as divisões concordantes com os padrões de orientação espacial: Norte (N), Nordeste (NE), Leste (E ou L), Sudeste (SE), Sul (S), Sudoeste (SO),

Oeste (O ou W) e Noroeste (NO). Quanto às formas do terreno, as classes foram agrupadas conforme a Figura 27.

Figura 27 - Representação das Formas de Terreno



Fonte: Valeriano (2008)

Para realizar um estudo detalhado das características físicas do meio, como a geologia, a geomorfologia, o uso e cobertura da terra, a proximidade da via, orientação das vertentes, declividade e formas do terreno, foram classificados os dados de movimentos de massa em função da frequência de desastres que ocorreram em cada classe. A ponderação foi normalizada aplicando a Equação 3.

$$X_n = \frac{(X - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})} \quad (3)$$

Onde, X_n é o valor normalizado; X é o valor a ser normalizado; X_{\min} é o valor mais baixo de todos os mesmos; X_{\max} é o valor mais alto de todos os mesmos.

Considerando a análise foram atribuídos pesos para cada variável, divididas em 5 classes: muito baixa (0 a 0,2), baixa (0,2 a 0,4), média (0,4 a 0,6), alta (0,6 a 0,8) e muito alta (0,8 a 1,0).

Dessa forma, foi possível elaborar a suscetibilidade preliminar para cada fator individualmente, classificando apenas os respectivos pontos de desastres e pesos. Estes são apresentados no capítulo de resultados (item 4.2).

3.3 Mapa de Suscetibilidade

A técnica de Valor Informativo (VI) foi utilizada para aplicação nas análises e elaboração do mapa de suscetibilidade, essa escolha se baseou na quantidade de fatores

condicionantes atribuídos para análise e nos dados obtidos, sendo concebível para um inventário de desastres.

Para gerar o mapa de suscetibilidade, primeiramente, todos os mapas do meio físico (geologia, geomorfologia, pedologia, o uso e cobertura da terra, proximidade da via, orientação das vertentes, declividade e formas do terreno) foram ajustados em formato raster, em que cada unidade de terreno (pixel) da variável corresponde à uma região geográfica e representa a característica dessa região.

Na sequência, foi realizada a contagem dos números de pixels em cada categoria de divisão das classes dos fatores condicionantes. Os dados de desastres foram divididos, com uma partição aleatória, em amostra de treino (70%) e teste (30%). Por meio de planilha eletrônica, foram inseridos os dados de contagem e o número de ocorrências em cada uma das classes. O VI foi obtido pela Equação 4.

$$VI_i = \ln \left[\frac{\frac{S_i}{N_i}}{\frac{S}{N}} \right] \quad (4)$$

Onde: VI é o Valor Informativo da variável (i) (classe do parâmetro); S_i é o número de unidades de terreno da variável (i) com escorregamentos; N_i é o número de unidades de terreno da variável (i); S é o número total de unidades de terreno com escorregamentos e N é o número de unidades de terreno da área de estudo.

Posteriormente é construída a curva ROC e realizada a análise de sensibilidade para determinação da área abaixo da curva (AUC), conforme a Equação 5. Assumindo que a curva é composta por pequenos segmentos de retas, se calcula a área situada entre o traço da curva e o eixo das abcissas. Apresenta como extremos os valores 0 e 1 (BAGUERÍA, 2006).

$$AUC = \sum_{i=1}^n \left[(L_i - L_{i+1}) * \frac{(A_i + B_{i+1})}{2} \right] \quad (5)$$

Onde: $(L_i - L_{i+1})$ é a amplitude da classe disposta no eixo das abcissas (altura do trapézio), A_i e B_{i+1} são os valores da ordenada (bases do trapézio) que fazem referência, respectivamente, à L_i e L_{i+1} . Ou seja, L_i é a altura do trapézio em cada segmento de reta, A_i está relacionada ao comprimento da menor base e B_i à da maior base do trapézio.

Para a avaliação dos resultados e acurácia do modelo foram desenvolvidas as curvas de sucesso e predição, incorporadas ao Valor Informativo, similares à curva ROC, porém a taxa de sucesso é relativa ao ajuste do modelo (amostra de treino) e a taxa de predição está relacionada à validação do modelo (amostra de teste).

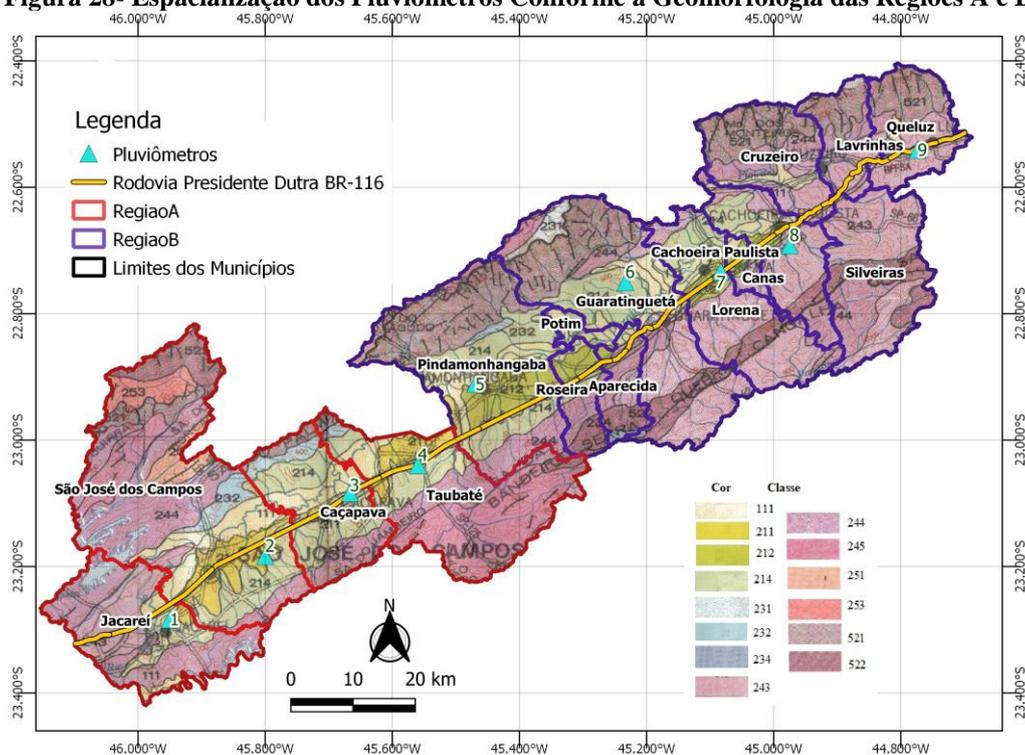
A estimativa do Valor Informativo final de cada unidade de terreno é alcançada pela soma algébrica dos valores que se sobrepõe para todos os fatores utilizados na construção do modelo. Por fim, é apresentado o mapa de suscetibilidade vinculado ao valor informativo final, classificado em suscetibilidade muito alta a muito baixa.

3.4 Dados de Chuva

Os dados de intensidade de chuvas foram obtidos através do portal da ANA (Agência Nacional de Água), DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica), por meio de pluviômetros instalados dentro da área de estudo.

Os pluviômetros utilizados foram aqueles que continham a relação de chuvas dos anos 2000 a 2020, conforme as cidades da área de estudo. Assim, para uma melhor análise, a área de estudo foi dividida nas regiões A e B, conforme a Figura 28.

Figura 28- Espacialização dos Pluviômetros Conforme a Geomorfologia das Regiões A e B



Fonte: Autora (2023)

Os pluviômetros espacializados são detalhados na tabela 12.

Tabela 12- Informações dos Pluviômetros Espacializados

Região	Número	Município	Código	Nome da Estação	Latitude (GMS)	Longitude (GMS)	Ano Final	Responsável
A	1	Jacareí	E2-031	Jacareí	23°17'00"	45°57'00"	2019	DAAE
	2	São José dos Campos	E2-099	Pararangaba	23°11'00"	45°48'00"	2021	DAAE
	3	Caçapava	E2-048	Cerâmica Quirino	23°05'00"	45°40'00"	2021	DAAE
	4	Taubaté	2345062	Taubaté	23°02'22"	45°33'35"	2021	ANA
B	5	Pindamonhangaba	2245048	Pindamonhangaba	22°54'40"	45°28'10"	2020	ANA
	6	Guaratinguetá	D2-076	Capituvá	22°45'00"	45°14'00"	2021	DAAE
	7	Lorena	D2-035	Lorena	22°44'00"	45°05'00"	2021	DAAE
	8	Cachoeira Paulista	2244010	Fazenda Santa Clara	22°41'31"	44°58'30"	2021	ANA
	9	Queluz	2244001	Queluz	22°32'26"	44°46'25"	2021	ANA

Fonte: Autora (2023)

Posteriormente, a escolha do pluviômetro mais representativo para cada região se deu analisando conjuntamente os dados dos desastres, a geomorfologia e as quantidades de chuvas.

Fundamentada em Hader et al. (2020), as análises da probabilidade de um intervalo de chuva desencadear movimentos de massa, foram baseadas na chuva antecedente ao evento, nos períodos de 24 horas (diária), 3 dias e 7 dias. Para o presente trabalho considerou-se o período compreendido de 3 dias, onde somou-se a precipitação dos dias 1, 2 e 3, e para o acumulado de 7 dias, foram acrescentados os volumes dos dias consecutivos até o sétimo dia. Foram considerados apenas os movimentos de massa do banco de dados do IPMet e Defesa Civil, pois estes tem as informações das datas das ocorrências, e os dados históricos de chuva que contemplam o período das instabilizações.

Empregou-se a fórmula de Sturges (Equação 6) para obter os intervalos de chuvas acertados na extensão dos dados.

$$K \cong 1 + 3,33 \log N \quad (6)$$

Onde: N é o número de desastres.

Posteriormente, os intervalos de precipitação obtidos serão aproveitados para a análise da probabilidade da chuva ocorrer (Equação 7) e a probabilidade de a mesma desencadear um desastre (Equação 8).

$$P_o = \frac{N_c}{T_c} * 100 \quad (7)$$

Onde: P_o é a probabilidade de ocorrência de chuva, N_c é o número de chuvas e T_c é o total de dias com chuva.

$$P_D = \frac{N_D}{N_c} * 100 \quad (8)$$

Onde: P_D é a probabilidade da chuva desencadear desastres, N_D é o Número de desastres.

3.5 Mapas de Perigo

A partir dos dados de chuvas e com os fatores do meio físico que produziram a suscetibilidade, será elaborado o mapa de perigo, por meio da readaptação da matriz de perigo, desenvolvida por Segoni et al. (2018) e ajustada por Hader et al. (2022), com a combinação das classes de suscetibilidade e das taxas de precipitação, conforme a Figura 29.

Figura 29- Matriz Quadrada de Perigo de Combinação entre Suscetibilidade e Chuva

	S1	S2	S3	S4	S5
T1	H1	H1	H2	H2	H3
T2	H1	H2	H2	H3	H3
T3	H2	H2	H3	H3	H4
T4	H2	H3	H3	H4	H4
T5	H3	H3	H4	H4	H5

Legenda: S1: Muito baixa suscetibilidade, S2: Baixa suscetibilidade, S3: Média suscetibilidade, S4: Alta suscetibilidade, S5: Muito alta suscetibilidade; T1: Chuva muito baixa, T2: Chuva baixa, T3: Chuva média, T4: Chuva alta, T5: Chuva muito alta; H1: Perigo muito baixo, H2: Perigo baixo, H3: Perigo médio, H4: Perigo alto, H5: Perigo muito alto.

Fonte: Adaptado de Hader et al. (2022)

Por exemplo, em locais com zoneamento de perigo “H1” onde existe um setor censitário com vulnerabilidade correspondente a “V3”, o nível de risco obtido será “R2”, fazendo assim as interpretações de risco.

3.6 Dados Socioeconômicos e Mapa de Vulnerabilidade

Por se tratar de uma área de estudo abrangendo uma rodovia com intercepções em diferentes municípios, com uma região urbana de população exposta, os parâmetros de dados sociais e demográficos são complementares para predição da vulnerabilidade. Esses indicadores foram levantados por setores censitários definidos pelo censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), do ano de 2010.

Condizentes com os setores censitários, para cada cidade foram obtidos os dados de renda per capita, densidade populacional e idade (população idosa e de crianças). Esses dados foram trabalhados e gerados os mapas presentes no item 4.5, no capítulo de resultados parciais.

A distribuição da idade foi estimada pela porcentagem de pessoas das faixas etárias com capacidade de mobilização limitada (COROMINAS et al., 2014).

A classificação de idade foi dividida em dois grupos, aqueles abaixo dos 5 anos e os acima dos 60 anos de idade, foram calculadas as respectivas porcentagens e categorizadas conforme os setores censitários. Os processos classificatórios das porcentagens foram realizados pela técnica de intervalo de igual contagem entre o valor mínimo e máximo. A Tabela 13 mostra as divisões das classes das porcentagens dos dois grupos.

Tabela 13- Classes das Porcentagens de Idade

População abaixo dos 5 anos	População acima dos 60 anos
De 0% a 4%,	De 0% a 5%,
De 4% a 6%	De 5% a 7%
De 6% a 7%	De 7% a 8%
De 7% a 8%	De 8% a 10%
De 8% a 9%	De 10% a 12%
De 9% a 11%	De 12% a 15%
De 11% a 36%	De 15% a 19%
-	Acima de 19%.

Fonte: Autora (2023)

A idade de 60 anos foi adotada de acordo com IBGE e a expectativa de vida no Brasil.

Quanto à elaboração do mapa de vulnerabilidade, a classificação da idade foi distribuída conforme a Tabela 14, baseada em Eidsvig et al. (2014).

Tabela 14- Distribuição da Idade para Classificação na Vulnerabilidade

Classe: Descrição
1: <= 20% da unidade espacial onde as pessoas têm menos de 5 ou mais de 60 anos de idade
2: 20% - 30% da unidade espacial onde as pessoas têm menos de 5 ou mais de 60 anos de idade
3: 30% - 40% da unidade espacial onde as pessoas têm menos de 5 ou mais de 60 anos de idade
4: 40% - 50% da unidade espacial onde as pessoas têm menos de 5 ou mais de 60 anos de idade
5: >50% da unidade espacial onde as pessoas têm menos de 5 ou mais de 60 anos de idade

Nota: 1- muito baixa, 2- baixa, 3- média, 4- alta, 5- muito alta

Fonte: Eidsvig et al. (2014)

A densidade demográfica foi calculada da relação entre a quantidade de pessoas residentes no setor e a área do mesmo. A renda per capita/índice de pobreza foi baseada na linha de pobreza, avaliada em US\$ 1,90 / dia, o cálculo foi feito para o ano de 2010, a fim de corresponder ao último censo realizado.

Para o mapa de vulnerabilidade, os valores dos dados socioeconômicos atribuídos para cada setor foram associados conforme a Equação 2 proposta por Marcelino et al (2005). A avaliação da vulnerabilidade envolveu os 3 parâmetros com o objetivo de estimar a resiliência de um grupo ou comunidade.

3.7 Mapas de Risco

Para elaboração do mapa de risco a matriz foi composta pela vulnerabilidade social e perigo (cruzamento da suscetibilidade e chuva). A Figura 30 mostra o esquema da matriz de risco, onde R representa as classes de risco.

Figura 30- Matriz Quadrada de Risco de Combinação entre Perigo e Vulnerabilidade

	H1	H2	H3	H4	H5
V1	R1	R1	R2	R2	R3
V2	R1	R2	R2	R3	R3
V3	R2	R2	R3	R3	R4
V4	R2	R3	R3	R4	R4
V5	R3	R3	R4	R4	R5

Legenda H1: Perigo muito baixo, H2: Perigo baixo, H3: Perigo médio, H4: Perigo alto, H5: Perigo muito alto; V1: Vulnerabilidade muito baixa, V2: Vulnerabilidade baixa V3: Vulnerabilidade média, V4: Vulnerabilidade alta, V5: Vulnerabilidade muito alta; R1: Risco muito baixo, R2: Risco baixo, R3: Risco médio, R4: Risco alto, R5: Risco muito alto.

Fonte: Adaptado de Hader et al. (2020)

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Inventário de Desastres de Movimentos de Massa

A Figura 31 contém os dados coletados de movimentos de massa correspondentes a todo período de análise e área de estudo.

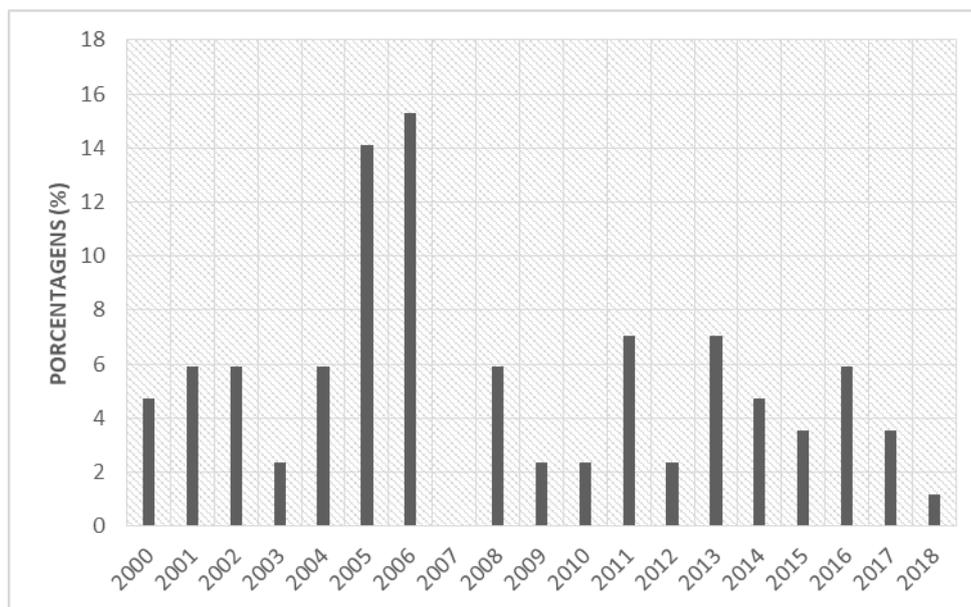
Figura 31 - Inventário de Desastres de Movimentos de Massa



Fonte: Autora (2023)

A Figura 32 retrata as porcentagens dos desastres ao longo do tempo, entre os anos de 2000 a 2018. Observa-se que o ano de 2006 expressa a maior porcentagem (15,5%), seguido de 2005 (14,3%), ou seja, 2 anos consecutivos que representam aproximadamente 30% do total de movimentos de massa. O ano de 2007 não apresentou registros, os anos restantes (de 2000 a 2004 e 2008 a 2018) ficaram abaixo da porcentagem de 8%.

Figura 32 - Análise da Quantidade de Desastres ao Longo dos Anos



Fonte: Autora (2023)

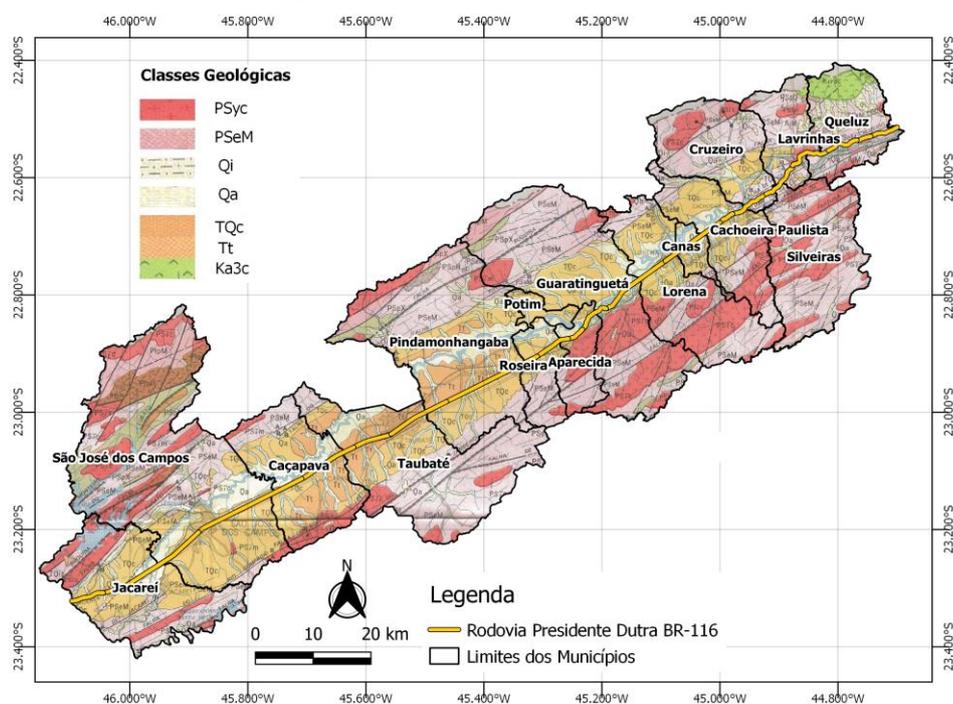
4.2 Análise Preliminar da Suscetibilidade Ambiental

Dentre os métodos aplicados, utilizou-se a análise de ponderação dos pesos pela frequência dos eventos, seguindo a Equação 3, classificando a suscetibilidade em muito alta (1,0-0,8), alta (0,8-0,6), média (0,6-0,4), baixa (0,4-0,2) e muito baixa (0,2-0,0). Esse procedimento foi realizado a partir do mapeamento de variáveis para classificação da suscetibilidade, apresentadas nos itens seguintes. Averiguaram-se os fatores do meio físico (geologia, geomorfologia, uso e ocupação do solo, proximidade da via, orientação das vertentes, declividade e formas do terreno) individualmente como análise preliminar. Para um estudo mais detalhado dos fatores correlacionados e a elaboração do mapa de suscetibilidade final, será utilizado o método de Valor Informativo, com resultados apresentados no item 4.3.

4.2.1 Geologia

A caracterização geológica é representada pela Figura 33.

Figura 33 - Caracterização Geológica



Fonte: Autora (2023)

A Tabela 15 define as classes geológicas e a descrição das mesmas, referentes à carta do IPT (1981).

Tabela 15 - Legenda das Classes Geológicas

Cor	Classes	Definições	Descrição
	PSyc	Suítes Graníticas Facies Cantareira	Granulação fina a média, contatos parcialmente concordantes
	PSeM	Complexo Embu (migmatitos)	Migmatitos heterogêneo de estruturas variadas e migmatitos homogêneos, com ocorrência subordinada de corpos metabásicos
	Qi	Sedimentos Continentais Indiferenciados	Depósitos de natureza areno-argilosa e de caráter variado associados a encostas
	Qa	Sedimentos Aluvionares	Aluviões em geral, incluindo areias inconsolidadas de granulação variável, argilas e cascalheiras fluviais.
	TQc	Depósitos Fluviais (arenitos)	Formação Caçapava. Depósitos fluviais incluindo arenitos com lentes subordinadas de folhelos.
	Tt	Depósitos Lacustrinos	Formação Tremembé. Depósitos lacustrinos incluindo folhelhos e argilitos pirobetuminosos com intercalações subordinadas de arenitos
	Ka3c	Corpo Alcalino	Corpo alcalino de Passa Quatro.

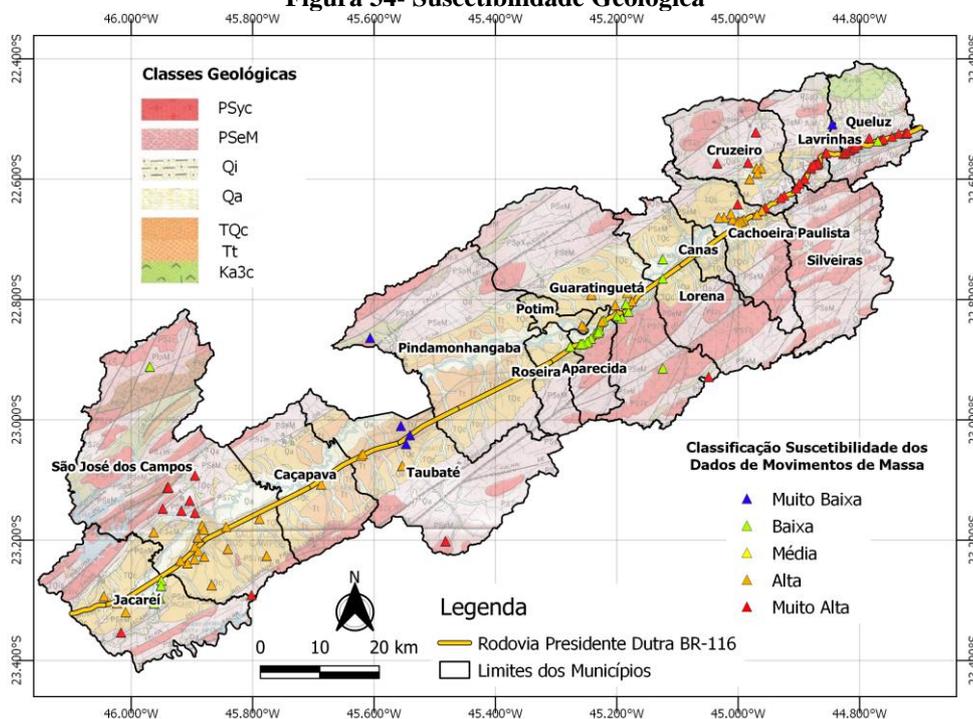
A Tabela 16 apresenta a caracterização geológica, o número de ocorrências em cada classe e a normalização desses valores, conforme a Equação 3. A Figura 34 apresenta a classificação de suscetibilidade dos dados de movimentos de massa pela análise preliminar, conforme a geologia.

Tabela 16- Caracterização Geológica

Caracterização Geológica		Número de Ocorrências	Ocorrências/ Total	Faixa Normalizada	Faixa Atribuída
PSyc	Suítes Graníticas Facies Cantareira	19	0,128	0,317	0,2-0,4
PSeM	Complexo Embu (migmatitos)	60	0,403	1,000	0,8-1,0
Qi	Sedimentos Continentais Indiferenciados	2	0,013	0,033	0,0-0,2
Qa	Sedimentos Aluvionares	17	0,114	0,283	0,2-0,4
TQc	Depósitos Fluviais (arenitos)	48	0,322	0,800	0,6-0,8
Tt	Depósitos Lacustrinos	3	0,020	0,050	0,0-0,2
Ka3c	Corpo Alcalino	0	0,000	0,000	0,0-0,2
Total		149	1,000		

Fonte: Autora (2023)

Figura 34- Suscetibilidade Geológica



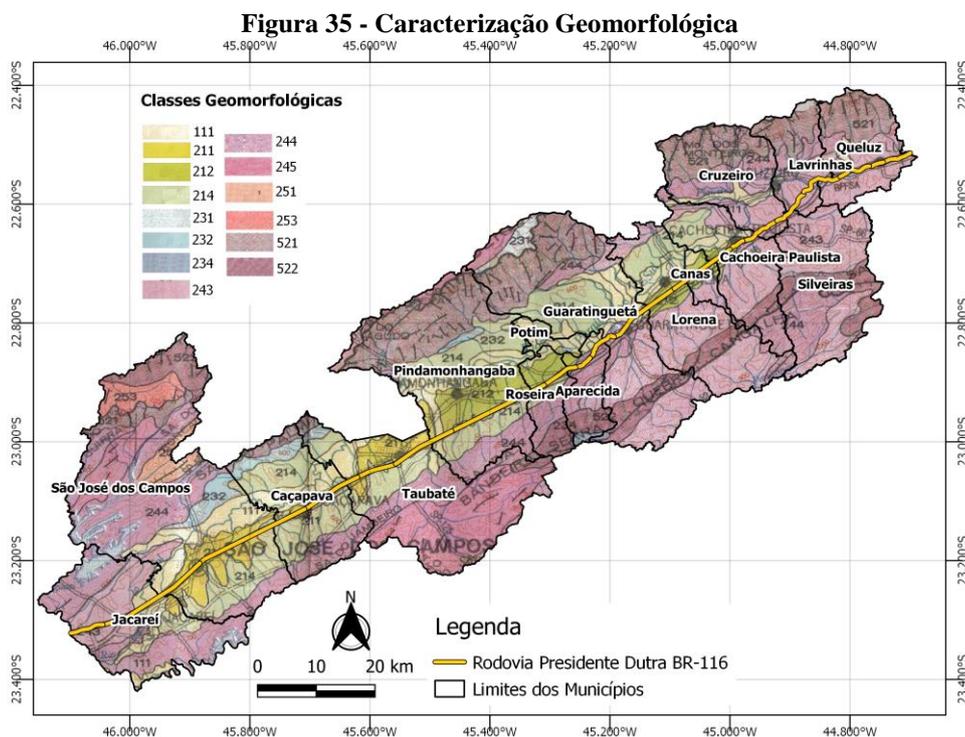
Fonte: Autora (2023)

Analisando as ocorrências de desastres, levando em consideração a caracterização geológica, verifica-se que a maioria dos desastres ocorreram em Complexo Embu (migmatitos), 60 eventos de um total de 149, que correspondem a 40,3 %. Os Depósitos

Fluviais contam com 32,2%, também classificado com suscetibilidade muito alta. Esses valores foram normalizados aplicando a Equação 3. Este procedimento foi repetido para as demais caracterizações.

4.2.2 Geomorfologia

A caracterização geomorfológica é representada pela Figura 35.



A Tabela 17 define as classes geomorfológicas e a descrição das mesmas, referentes à carta do IPT (1981).

Tabela 17 - Legenda das Classes Geomorfológicas

Cor	Classe	Geomorfologia	Descrição
	111	Planícies aluviais	Terrenos baixos e mais ou menos planos, junto às margens dos rios
	211	Tabuleiros	Interflúvio extensos e aplainados com perfis retilíneos de alta declividade, vales abertos. Drenagem de baixa densidade
	212	Colinas amplas	Vertentes com perfis retilíneos a convexos, topos extensos e aplainados. Drenagem de baixa densidade
	214	Colinas pequenas com espigões locais	Interflúvio sem orientação, topos aplainados arredondados, vales fechados. Drenagem de baixa a média densidade

Tabela 17 - Legenda das Classes Geomorfológicas (continuação)

	231	Morrotes baixos	Relevo ondulado, amplitudes menores que 50 metros, topos arredondados. Drenagem de alta densidade
	232	Morrotes alongados paralelos	Topos arredondados, vertentes com perfis retilíneos a convexos e presença local de serras. Drenagem de alta densidade
	234	Morrotes alongados e espigões	Interflúvios sem orientação preferencial, topos angulosos a achatados. Drenagem de média a alta densidade
	243	Mar de morros	Topos arredondados. Drenagem de alta densidade, vales abertos a fechados.
	244	Morros paralelos	Topos arredondados, vertentes com perfis retilíneos a convexos, planícies aluvionares interiores restritas. Drenagem de alta densidade
	245	Morros com serras restritas	Topos arredondados, perfis retilíneos, por vezes abruptos. Drenagem de alta densidade
	251	Serras alongadas	Topos angulosos, vertentes com perfis retilíneos. Drenagem de alta densidade
	253	Montanhas com vales profundos	Topos angulosos a arredondados, perfis retilíneos a convexos. Drenagem de alta densidade
	521	Escarpas festonadas	Topos angulosos. Drenagem de alta densidade. Declividades acima de 30%
	522	Escarpas com espigões digitados	Espigões lineares subparalelos, topos angulosos. Drenagem de alta densidade. Declividades acima de 30%

A Tabela 18 apresenta a caracterização geomorfológica, o número de ocorrências em cada classe e a normalização desses valores, conforme a Equação 3.

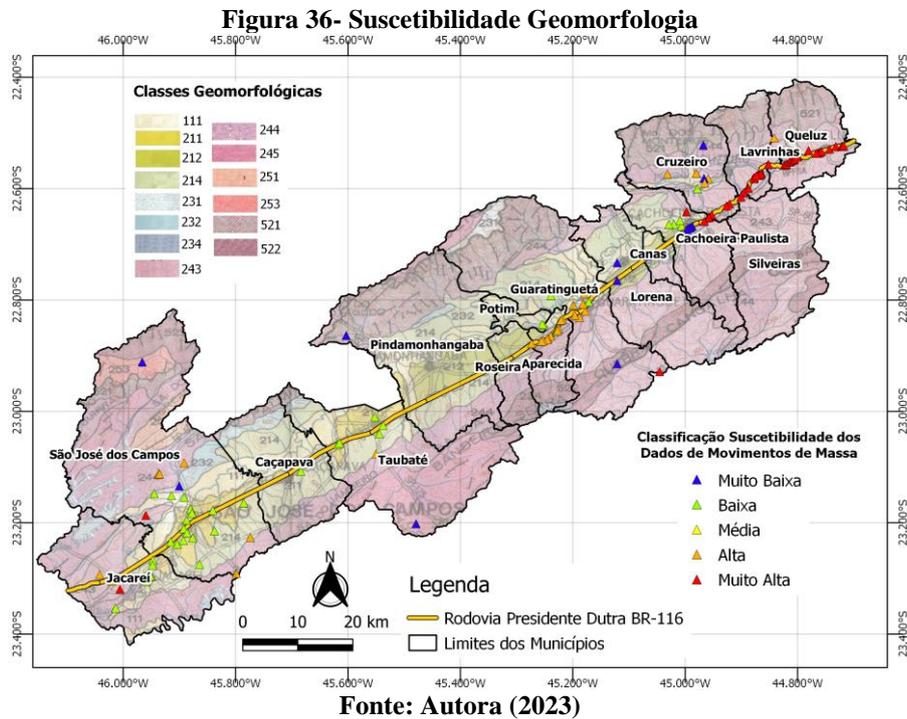
Tabela 18- Caracterização Geomorfológica

Caracterização Geomorfológica	Número de Ocorrências	Ocorrências/ Total	Faixa Normalizada	Faixa Atribuída
111 planícies aluviais	14	0,094	0,275	0,2-0,4
211 tabuleiros (relevo colinoso)	13	0,087	0,255	0,2-0,4
212 colinas amplas	9	0,060	0,176	0,0-0,2
214 colinas pequenas com espigões	16	0,107	0,314	0,2-0,4
231 morrotes baixos	0	0,000	0,000	0,0-0,2
232 morrotes alongados paralelos	1	0,007	0,020	0,0-0,2
234 morrotes alongados e espigões	0	0,000	0,000	0,0-0,2
243 mar de morros	51	0,342	1,000	0,8-1,0
244 morros paralelos	39	0,262	0,765	0,6-0,8
245 morros com serras restritas	1	0,007	0,020	0,0-0,2
251 serras alongadas	0	0,000	0,000	0,0-0,2
253 montanhas com vales profundos	1	0,007	0,020	0,0-0,2
521 escarpas festonadas	2	0,013	0,039	0,0-0,2
522 escarpas com espigões digitados	2	0,013	0,039	0,0-0,2
Total	149	1,000		

Fonte: Autora (2023)

Considerando a caracterização geomorfológica, a classe de mar de morros corresponde a 34,2% do total, seguido de morros paralelos, com 26,2%. Ambos se enquadram na suscetibilidade muito alta. A Figura 36 apresenta a classificação de

suscetibilidade dos dados de movimentos de massa pela análise preliminar, conforme a geomorfologia.



4.2.3 Pedologia

A Figura 37 expressa a composição da pedologia, e a Figura 38 a classificação da suscetibilidade pedológica.

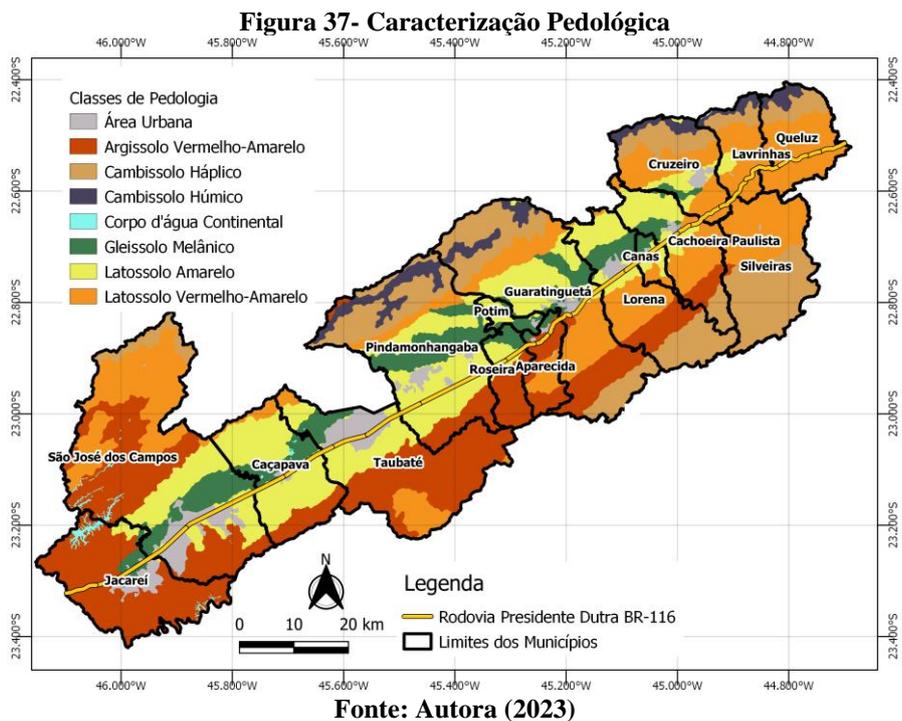
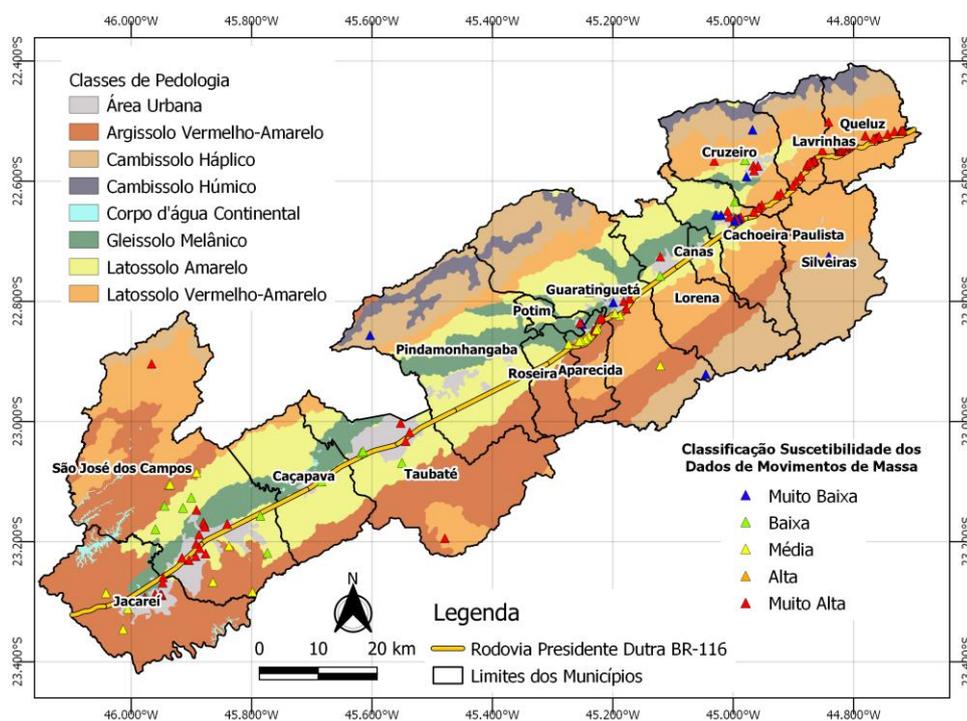


Figura 38- Suscetibilidade Pedológica



Fonte: Autora (2023)

O Latossolo Vermelho-Amarelo (34,9%) foi o que mais contribuiu para os movimentos de massa na análise da pedologia, sendo classificado com suscetibilidade muito alta, assim também a área urbana, com 30,2% do total das ocorrências (Tabela 19).

Tabela 19- Caracterização Pedológica

Caracterização Pedológica	Número de Ocorrências	Ocorrências/ Total	Faixa Normalizada	Faixa Atribuída
Área Urbana	45	0,302	0,865	0,8-1,0
Argilossolo Vermelho Amarelo	23	0,154	0,442	0,4-0,6
Cambissolo Háptico	4	0,027	0,077	0,0-0,2
Cambissolo Húmico	0	0,000	0,000	0,0-0,2
Corpo d'água Continental	0	0,000	0,000	0,0-0,2
Gleissolo Melânico	10	0,067	0,192	0,0-0,2
Latossolo Amarelo	15	0,101	0,288	0,2-0,4
Latossolo Vermelho Amarelo	52	0,349	1,000	0,8-1,0
Total	149	1,000		

Fonte: Autora (2023)

4.2.4 Uso e Ocupação do Solo

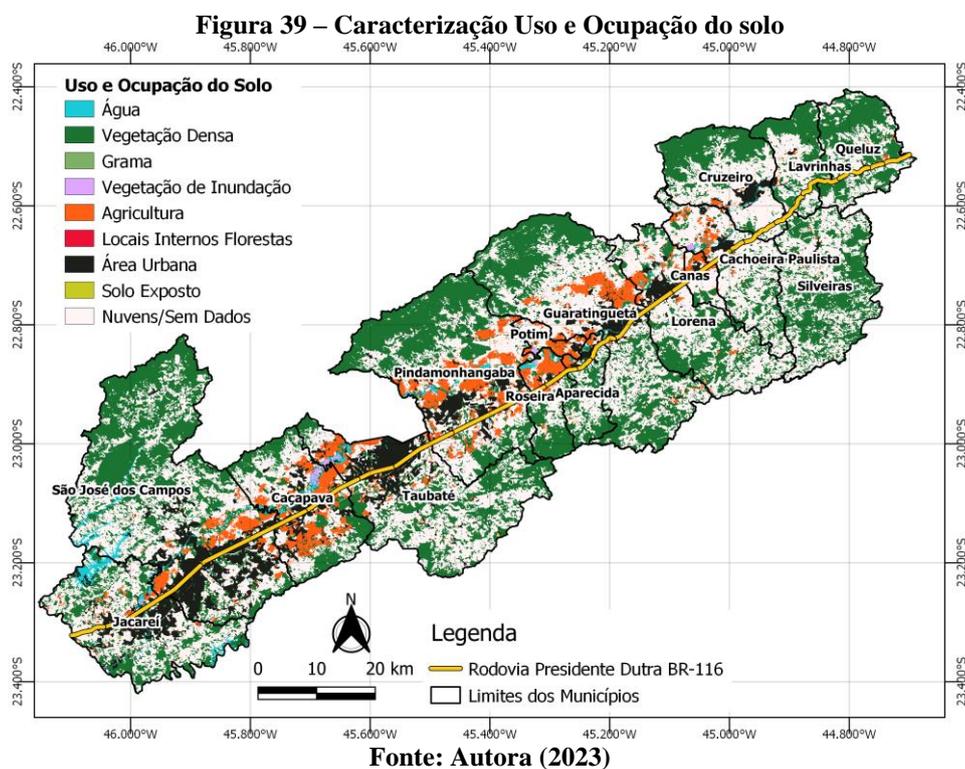
O mapa do uso do solo global disponibilizado pela ESRI (*Environmental Systems Research Institute*) e a vetorização das classes de uso e cobertura da terra, a partir da

imagem do Google Earth, relacionando a data do evento com a linha do tempo, permitiram as seguintes classificações: água, vegetação densa, agricultura, solo exposto/alteração da cobertura vegetal, área urbana residencial, área urbana comercial e área urbana industrial.

A região de água abrange o Rio Paraíba do Sul e lagoas isoladas, em sua maioria, os eventos caracterizados nessa classe, ocorreram contíguos ao corpo hídrico. As áreas de cobertura vegetal densa compõem mata, ou qualquer aglomeração significativa de vegetação alta com aproximadamente 15 metros ou mais, que também protege o solo da água da chuva, contribuindo para a infiltração de forma mais lenta. A vegetação local original era de floresta tropical, denominada “Mata Atlântica”.

Na agricultura, são culturas plantadas pelo homem, gramíneas e cereais plantados ou pousios (reposo de terras cultiváveis) em terrenos estruturados. As áreas urbanas são de atividade antrópica, possuem solos mais compactados, com grandes superfícies impermeáveis homogêneas e alteração das características iniciais do maciço. O solo exposto, com alteração da cobertura vegetal, áreas degradadas, verificado em diversos acessos, que ligam a rodovia à algum local de circulação coletiva. A rodovia presente possui alto fluxo de veículos e pessoas, o que contribui para os processos de modificações locais. A representação em branco representa locais sem informações de cobertura do solo.

A Figura 39 apresenta o uso e ocupação do solo na área de estudo.

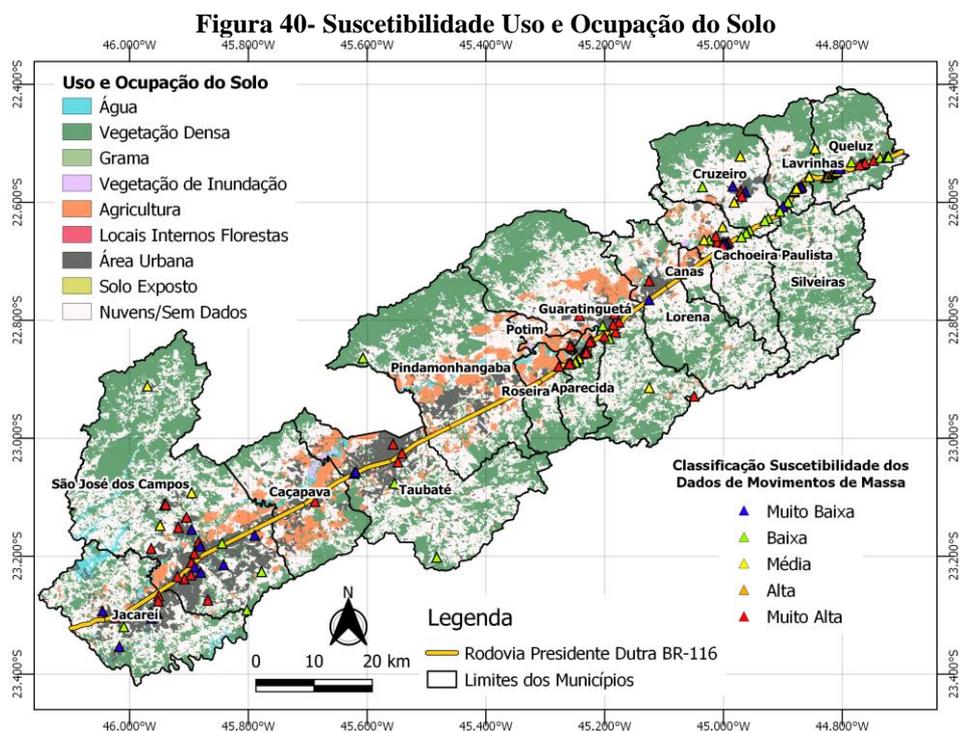


A Tabela 20 apresenta a caracterização do uso e ocupação, o número de ocorrências em cada classe e a normalização desses valores, conforme a Equação 3. A Figura 40 apresenta a classificação de suscetibilidade conforme o uso e ocupação do solo.

Tabela 20- Caracterização Uso e Ocupação

Caracterização Uso e Cobertura		Número de Ocorrências	Ocorrências/ Total	Faixa Normalizada	Faixa Atribuída
Área Urbana	Água	9	0,060	0,071	0,0-0,2
	Vegetação Densa	29	0,195	0,429	0,4-0,6
	Agricultura	7	0,047	0,036	0,0-0,2
	Solo exposto	26	0,174	0,375	0,2-0,4
	Residencial	61	0,409	1,000	0,8-1,0
	Comercial	5	0,034	0,000	0,0-0,2
	Industrial	12	0,081	0,125	0,0-0,2
	Total	149	1,000		

Fonte: Autora (2023)

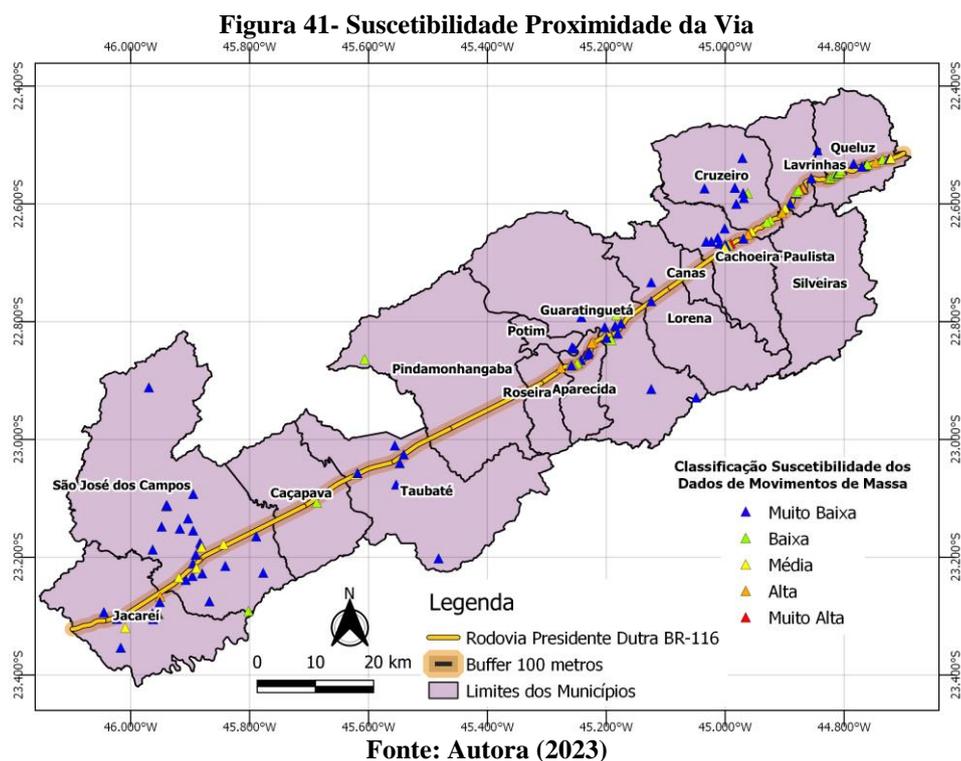


Fonte: Autora (2023)

Em relação ao uso e ocupação, a área urbana corresponde a 52,3% do total de desastres, subdividida em residencial (40,9), comercial (3,4%) e industrial (8,1%), evidenciando a influência das edificações antrópicas. A vegetação densa confere 29 ocorrências de movimentos de massa (19,5%), classificada como suscetibilidade média, e as regiões com solo exposto contabilizam 17,4%.

4.2.5 Proximidade da via

Diferentemente da faixa normalizada nas análises anteriores, para caracterizar a proximidade da via, foram atribuídas faixas, considerando os buffers de classificação. 6,7% dos eventos ocorreram em menos de 5 metros de proximidade da rodovia, os quais foram atribuídos com suscetibilidade muito alta. 45,6% ocorreram em distância superior a 100 metros, classificados com suscetibilidade muito baixa (Figura 41).



A Tabela 21 apresenta a caracterização da proximidade da via, o número de ocorrências em cada classe e a normalização desses valores, conforme a Equação 3.

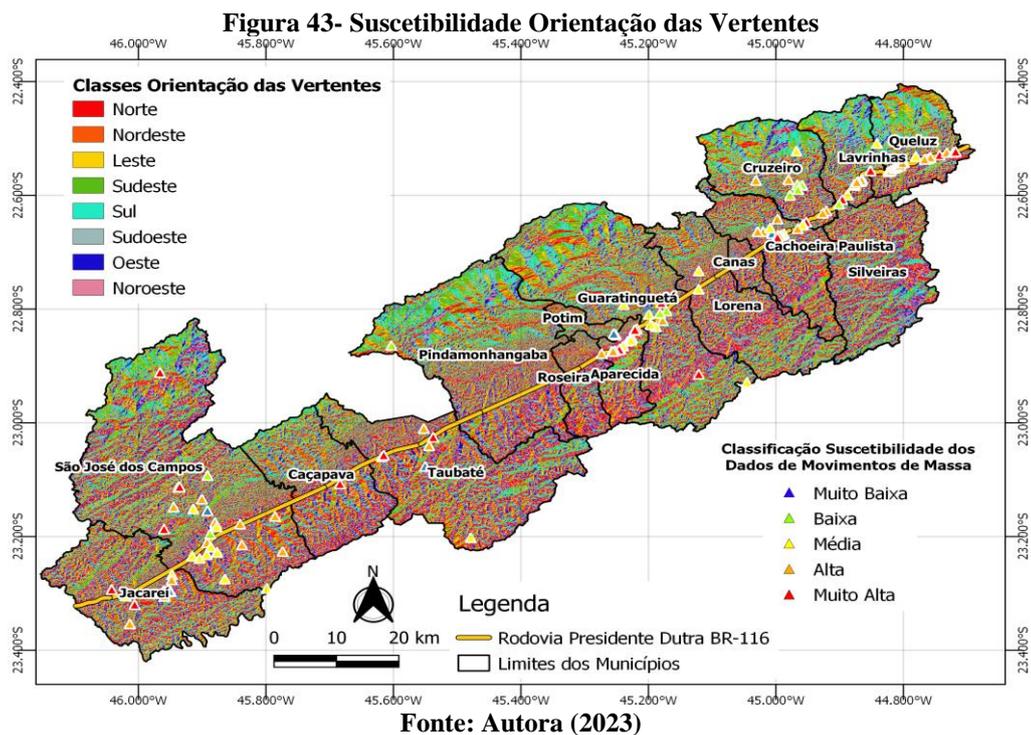
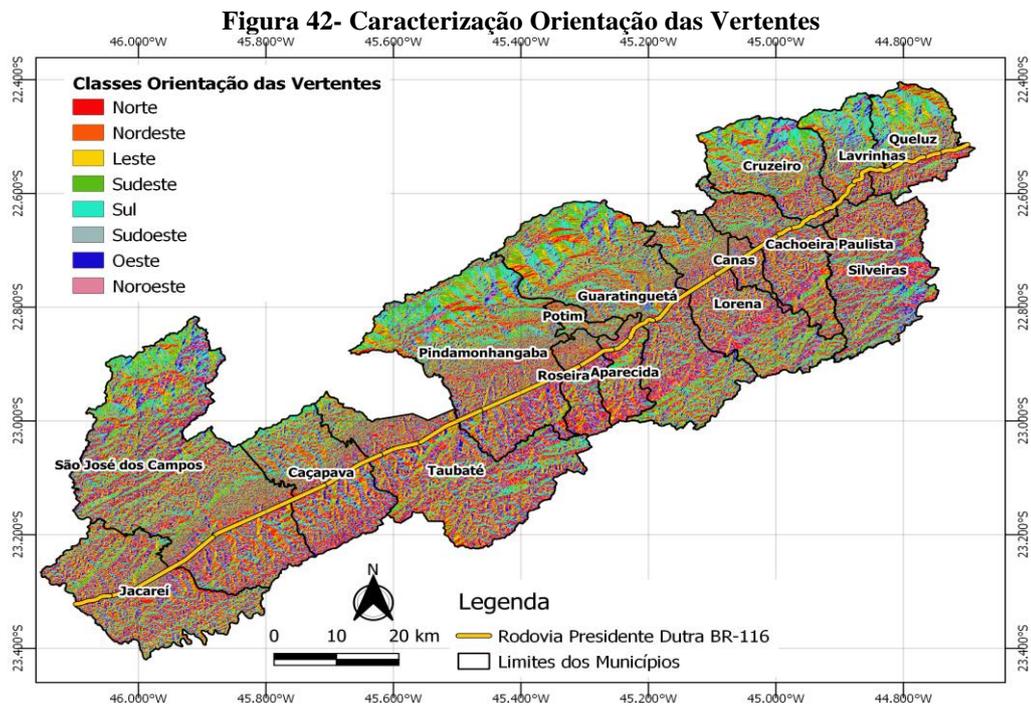
Tabela 21- Caracterização Proximidade da Via

Caracterização Proximidade da Via	Número de Ocorrências	Ocorrências/ Total	Faixa atribuída
Até 5 metros	10	0,067	1,0-0,8
De 5 a 10 metros	9	0,060	0,8-0,6
De 10 a 25 metros	17	0,114	0,6-0,4
De 25 a 50 metros	23	0,154	0,4-0,2
De 50 a 100 metros	22	0,148	0,2-0,0
Acima de 100 metros	68	0,456	0,0
Total	149	1,000	

Fonte: Autora (2023)

4.2.6 Orientação das vertentes

A orientação das vertentes foi classificada conforme os pontos cardeais (Norte, Sul, Leste e Oeste) e colaterais (Nordeste, Sudeste, Sudoeste e Noroeste), como mostra a Figura 42. A Figura 43 apresenta a classificação de suscetibilidade para esse fator condicionante.



Quanto as classes de orientação das vertentes, 17,4% dos eventos ocorreram na direção Noroeste, seguido do Norte, Sudeste e Sul, ambas com 14,1%, cada uma com um número de 21 ocorrências.

A Tabela 22 apresenta a caracterização da orientação das vertentes, o número de ocorrências em cada classe e a normalização desses valores, conforme a Equação 3.

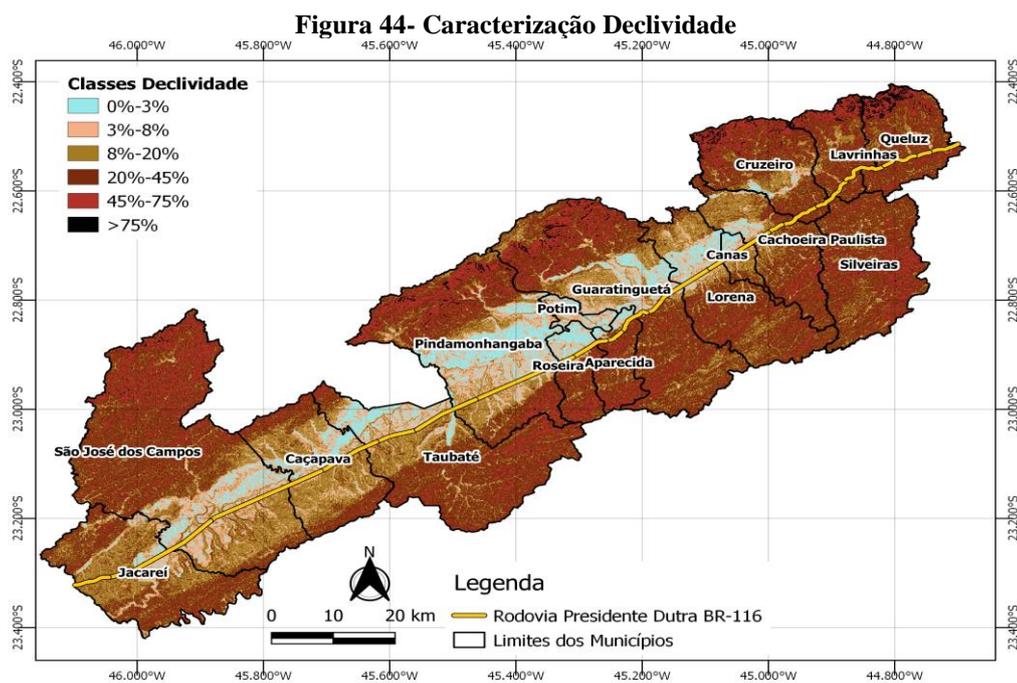
Tabela 22- Caracterização Orientação das Vertentes

Caracterização Orientação das Vertentes	Número de Ocorrências	Ocorrências/ Total	Faixa Normalizada	Faixa Atribuída
Norte	21	0,141	0,706	0,6-0,8
Nordeste	19	0,128	0,588	0,4-0,6
Leste	13	0,087	0,235	0,2-0,4
Sudeste	21	0,141	0,706	0,6-0,8
Sul	21	0,141	0,706	0,6-0,8
Sudoeste	9	0,060	0,000	0,0-0,2
Oeste	19	0,128	0,588	0,4-0,6
Noroeste	26	0,174	1,000	0,8-1,0
Total	149	1,000		

Fonte: Autora (2023)

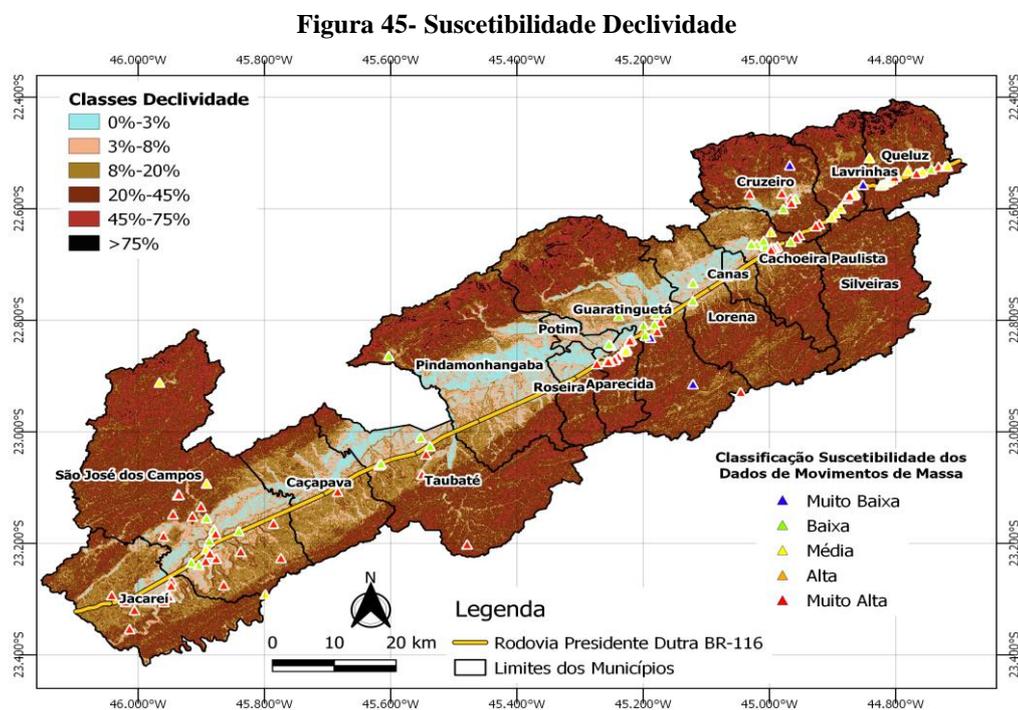
4.2.7 Declividade

A declividade foi classificada de 0% a 3%, de 3% a 8%, de 8% a 20%, de 20% a 45%, de 45% a 75%, e acima de 75%, conforme a Figura 44.



Fonte: Autora (2023)

A Figura 45 apresenta a classificação de suscetibilidade dos dados de movimentos de massa pela análise preliminar, conforme a declividade.



Fonte: Autora (2023)

A declividade de 8% a 20% foi a que mais numerou as ocorrências, com 45,6% do total. Em 23,5% dos eventos foram caracterizados na declividade de 20% a 45%. Acima dos 75% de declividade não foram identificados registros de movimentos de massa.

A Tabela 23 apresenta a caracterização da declividade, o número de ocorrências em cada classe e a normalização desses valores, conforme a Equação 3.

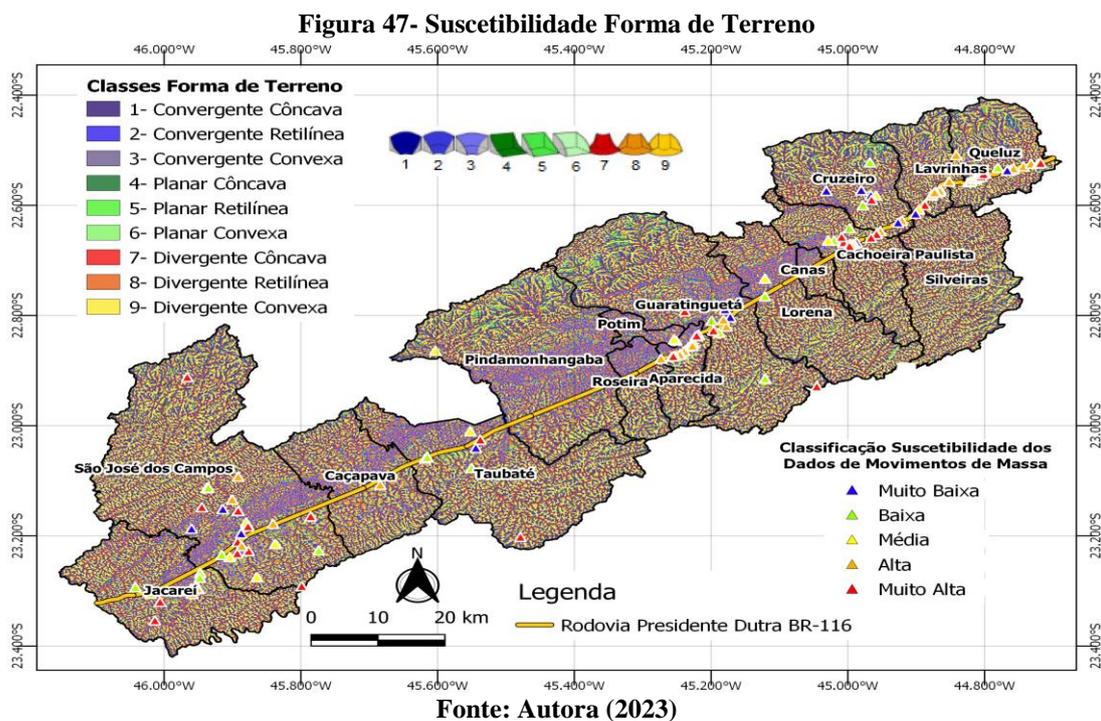
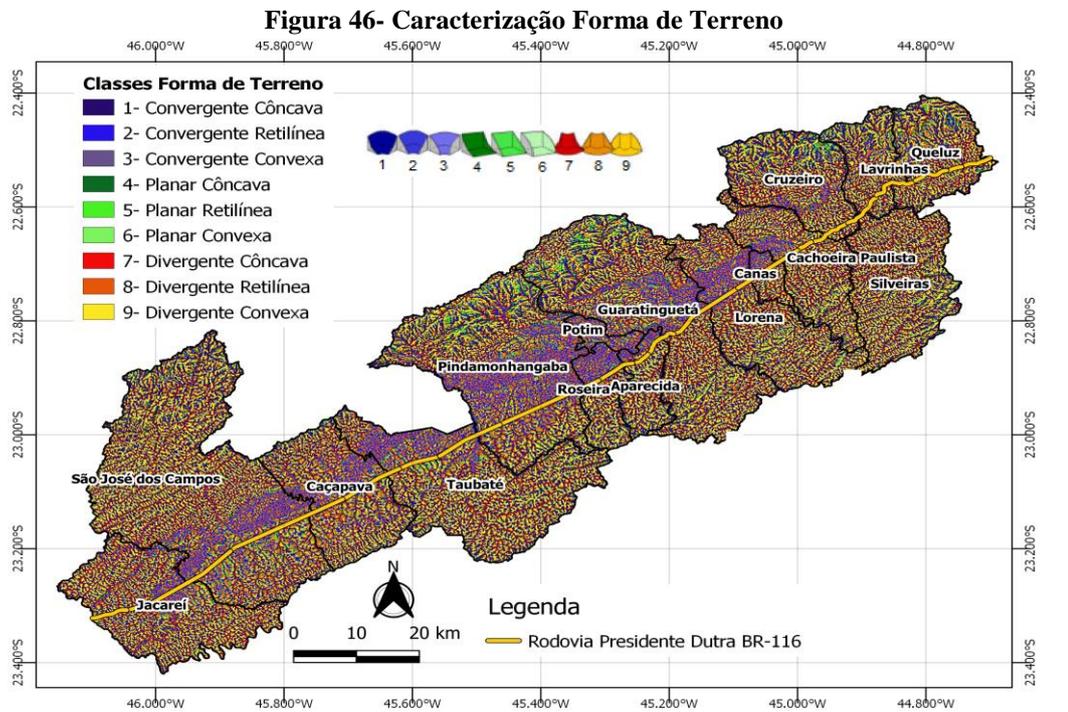
Tabela 23- Caracterização Declividade

Caracterização Declividade	Número de Ocorrências	Ocorrências/ Total	Faixa Normalizada	Faixa Atribuída
De 0% a 3%	17	0,114	0,250	0,2-0,4
De 3% a 8%	26	0,174	0,382	0,2-0,4
De 8% a 20%	68	0,456	1,000	0,8-1,0
De 20% a 45%	35	0,235	0,515	0,4-0,6
De 45% a 75%	3	0,020	0,044	0,0-0,2
Acima de 75%	0	0,000	0,000	0,0-0,2
Total	149	1,000		

Fonte: Autora (2023)

4.2.8 Formas de terreno

A Figura 46 apresenta as formas de terreno na área de estudo e a Figura 47 retrata a classificação da suscetibilidade desse fator.



A Tabela 24 apresenta a caracterização das formas de terreno, o número de ocorrências em cada classe e a normalização desses valores, conforme a Equação 3. A forma de terreno Convergente Côncava, contabilizou 24,8% do total de eventos, a classe Planar Côncava apresenta 17,4% e a Divergente Côncava, 16,1%. Observa-se a característica de concavidade predominante.

Tabela 24- Caracterização Formas de Terreno

Caracterização Formas de Terreno	Número de Ocorrências	Ocorrências/ Total	Faixa Normalizada	Faixa Atribuída
1 Convergente Côncava	37	0,248	1,000	0,8-1,0
2 Convergente Retilínea	13	0,087	0,273	0,2-0,4
3 Convergente Convexa	5	0,034	0,030	0,0-0,2
4 Planar Côncava	26	0,174	0,667	0,6-0,8
5 Planar Retilínea	6	0,040	0,061	0,0-0,2
6 Planar Convexa	4	0,027	0,000	0,0-0,2
7 Divergente Côncava	24	0,161	0,606	0,6-0,8
8 Divergente Retilínea	20	0,134	0,485	0,4-0,6
9 Divergente Convexa	14	0,094	0,303	0,2-0,4
Total	149	1,000		

Fonte: Autora (2023)

4.3 Mapa de Suscetibilidade pelo Valor Informativo

Os valores resultantes da metodologia de Valor Informativo (VI), no geral, apresentaram resultados distintos na correlação entre os pontos de movimentos de massa e suas respectivas áreas de ocorrência, entre os 8 fatores condicionantes analisados. Os resultados para cada fator são apresentados da Tabela 25 à Tabela 32, e utilizou-se a Equação 4.

Em termos geológicos, a região apresenta 13 classes litológicas descritas na Tabela 15 e apresentadas na Figura 33. Os resultados para o Valor Informativo (Tabela 25) mostraram maior propensão de escorregamentos para a classe de sedimentos continentais indiferenciados (Qi), sendo classificada como a mais suscetível, possivelmente por essa abranger uma cobertura em núcleos urbanos com maior extensão e adjacentes à rodovia. As classes de depósitos fluviais (TQc) e sedimentos aluvionares (Qa) apresentaram valores positivos para o VI, os restantes apresentaram valores negativos, próximos de -0,8.

Tabela 25- Valor Informativo da Geologia

Fator	Classes	Pixels	Nº Esc.	VI
Geologia	PSyc	7899209	13	-0,013
	PSeM	25734380	39	-0,095
	Qi	556878	2	0,768
	Qa	6476321	12	0,106
	TQc	12055395	36	0,583
	Tt	2789941	2	-0,844
	Ka3c	625041	0	-0,845
	Rios	1617463	0	-0,846
	PIpM	824094	0	-0,847
	PSyM	1576264	0	-0,848
	PIpH	878644	0	-0,849
	PSpX	1214421	0	-0,850
	PSpF	146106	0	-0,851

Fonte: Autora (2023)

Para o fator condicionante geomorfologia, dividida em 13 classes incidentes no terreno, os tabuleiros apresentaram a maior suscetibilidade, com VI superior a 1, sendo uma pequena área apresentando essa unidade de relevo, entretanto, presente paralelo à região urbana similar à comentada na geologia. Em seguida, as colinas amplas, os morrotes baixos e alongados, e os morros paralelos também apresentaram valores positivos para VI. As classes restantes apresentaram valores negativos variando de 0 a aproximadamente -2, com destaque para as escarpas festonadas, o menor valor de VI (-1,980), conforme Tabela 26.

Tabela 26- Valor Informativo da Geomorfologia

Fator	Classes	Pixels	Nº Esc.	VI	
Geomorfologia	111	Planícies aluviais	5962350	6	-0,505
	211	Tabuleiros	2026970	10	1,085
	212	Colinas amplas	2338945	7	0,585
	214	Colinas pequenas com espigões locais	7866092	12	-0,089
	231	Morrotes baixos	417347	1	0,363
	232	Morrotes alongados paralelos	939945	1	-0,449
	234	Morrotes alongados e espigões	11484406	36	0,631
	244	Morros paralelos	13324396	24	0,077
	245	Morros com serras restritas	4035298	1	-1,906
	251	Serras alongadas	675645	1	-0,119
	253	Montanhas com vales profundos	660889	1	-0,097
	521	Escarpas festonadas	8684718	2	-1,980
	522	Escarpas com espigões digitados	3951628	2	-1,192

Fonte: Autora (2023)

Na pedologia, a área urbana apresentou maior VI (1,946), quanto as categorizações dos solos, o argissolo vermelho-amarelo com VI de 0,367 ficou superior, o latossolo vermelho amarelo embora apresentando o maior número de escorregamentos dentro da classe, tem o VI de -1,712 (Tabela 27).

Tabela 27- Valor Informativo da Pedologia

Fator	Classes	Pixels	Nº Esc.	VI
Pedologia	Área Urbana	2694944	45	1,946
	Argissolo Vermelho-Amarelo	15822783	23	0,367
	Cambissolo Háptico	9265688	4	-0,204
	Cambissolo Húmico	1844426	0	-0,495
	Corpo d'água Continental	332233	0	-0,668
	Gleissolo Melânico	5141712	10	-1,710
	Latossolo Amarelo	12258225	15	-1,711
	Latossolo Vermelho-Amarelo	15092707	52	-1,712

Fonte: Autora (2023)

As estatísticas de VI para o uso e ocupação apresentam o solo exposto com mais suscetível a movimentos de massa, com VI de 5,7, embora apresente uma área bem pequena, evidenciando a agressividade dessa caracterização. Em comparação, a vegetação densa apresentou um VI de -0,712, o menor entre as classes que apresentaram a ocorrência de pelo menos um movimento de massa (Tabela 28).

Tabela 28- Valor Informativo do Uso e Ocupação

Fator	Classes	Pixels	Nº Esc.	VI
Uso e cobertura	Água	905482	6	1,378
	Vegetação Densa	24386753	20	-0,712
	Vegetação de Inundação	120129	0	-0,713
	Agricultura	4088739	5	-0,312
	Urbano	5666197	55	1,760
	Solo Exposto	36057	18	5,700
	Nuvem	4	0	-0,714
	Sem Dados	27046152	0	-0,715

Fonte: Autora (2023)

Os 5 metros mais próximos da faixa de rolamento da via apresentaram o maior VI (5,361), os intervalos de 6 metros a 10 metros e de 10 metros a 25 metros compreenderam

VI superior a 5 (5,025 e 5,089, respectivamente). Acima de 100 metros o Valor Informativo é negativo (-1), conforme Tabela 29.

Tabela 29- Valor Informativo de Proximidade da Via

Fator	Classes	Pixels	Nº Esc.	VI
Proximidade da via	até 5 metros	19670	7	5,361
	6-10 metros	19670	5	5,025
	10-25 metros	59010	16	5,089
	25-50 metros	98350	17	4,639
	50-100 metros	196700	21	4,157
	acima de 100 metros	61856113	38	-1,000

Fonte: Autora (2023)

Quanto à orientação das vertentes, a classe que mais contribuiu para os processos de movimentos de massa foi a direção Noroeste. Entretanto, todas as classes ficaram próximas do valor 0 para VI (Tabela 30).

Tabela 30- Valor Informativo de Orientação das Vertentes

Fator	Classes	Pixels	Nº Esc.	VI
Orientação das vertentes	Norte	904034	13	-0,018
	Nordeste	891563	13	-0,004
	Leste	862634	10	-0,233
	Sudeste	934466	14	0,023
	Sul	939088	17	0,213
	Sudoeste	868816	7	-0,597
	Oeste	840438	13	0,055
	Noroeste	865051	17	0,295

Fonte: Autora (2023)

As declividades mais suscetíveis estão na faixa de 8% a 20%, áreas que estão situadas próximas da rodovia. O intervalo de 0% a 3%, embora paralelo à classe anterior apresentou valor de VI negativo (-0,563), conforme Tabela 31.

Tabela 31- Valor Informativo da Declividade

Fator	Classes	Pixels	Nº Esc.	VI
Declividade	0-3%	479695	4	-0,563
	3-8%	957098	20	0,356
	8-20%	1794347	51	0,664
	20-45%	2990224	26	-0,521
	45-75%	816125	3	-1,382
	acima de 75%	68601	0	-1,383

Fonte: Autora (2023)

A classe que mais contribuiu para a ocorrência de movimentos de massa no que diz respeito às formas de terreno, foi a planar côncava (VI=0,728). A forma divergente convexa foi a que apresentou menor Valor Informativo (VI=-0,805), conforme Tabela 32.

Tabela 32- Valor Informativo das Formas de Terreno

Fator	Classes	Pixels	Nº Esc.	VI
Formas de terreno	1 Convergente Côncava	1916520	29	0,033
	2 Convergente Retilínea	652656	11	0,141
	3 Convergente Convexa	303629	3	-0,393
	4 Planar Côncava	560946	17	0,728
	5 Planar Retilínea	287415	4	-0,050
	6 Planar Convexa	276008	3	-0,298
	7 Divergente Côncava	708939	14	0,300
	8 Divergente Retilínea	718690	12	0,132
	9 Divergente Convexa	1681287	11	-0,805

Fonte: Autora (2023)

Por meio da análise de sensibilidade e o índice de Área Abaixo da Curva (AUC) incorporadas à estatística do Valor Informativo, foi identificada a relevância de cada fator de predisposição, bem como hierarquizada.

Constata-se com os resultados obtidos e a somatória de todos fatores para a produção do modelo, que o uso e ocupação e proximidade da via foram os com maiores importâncias no estudo da suscetibilidade (AUC=0,892 e AUC=0,815, respectivamente), evidenciando a influência das interferências antrópicas. A pedologia (AUC= 0,742), geomorfologia (AUC=0,692), declividade (AUC=0,668), geologia (AUC=0,632), formas do terreno (AUC=0,614) e orientação das vertentes (AUC=0,562) são fatores relacionados ao meio físico da região (Tabela 33).

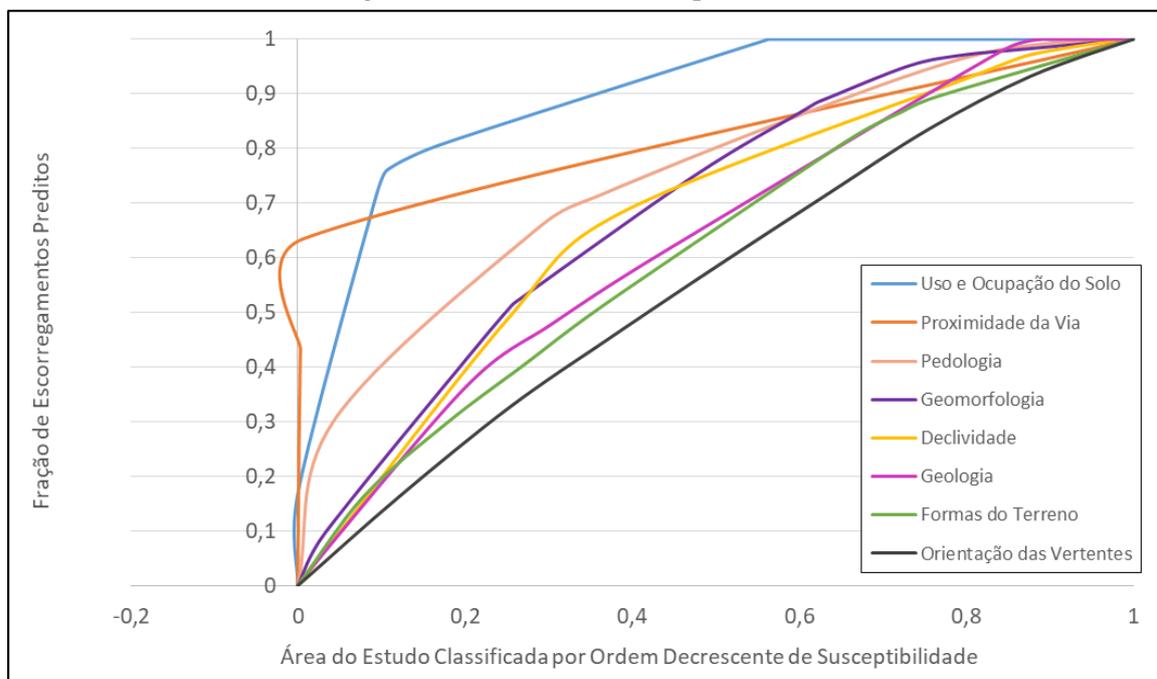
Tabela 33- Valor Informativo por Hierarquia dos Fatores

Hierarquia dos Fatores	AUC
Uso e ocupação do solo	0,892
Proximidade da via	0,815
Pedologia	0,742
Geomorfologia	0,692
Declividade	0,668
Geologia	0,632
Formas do terreno	0,614
Orientação das vertentes	0,562

Fonte: Autora (2023)

O gráfico da Figura 48 possibilita observar o desempenho dos parâmetros individualmente através das curvas de cada um deles. Quanto mais próximo o AUC de 1, maior é a influência desse parâmetro na suscetibilidade.

Figura 48- Curvas dos Fatores pela AUC



Fonte: Autora (2023)

Do inventário total de movimentos de massa, realizou-se uma partição aleatória para o grupo de treino e o grupo de teste. O treino corresponde a 70% dos dados, desenvolvido para elaboração e performance do modelo, o grupo de teste é associado aos 30% dos dados para medir a capacidade preditiva do modelo (BARELLA, 2016).

Foram gerados 3 modelos para avaliar o desempenho do inventário. A Tabela 34 apresenta os resultados das taxas de sucesso e predição para cada modelo de VI e os respectivos fatores.

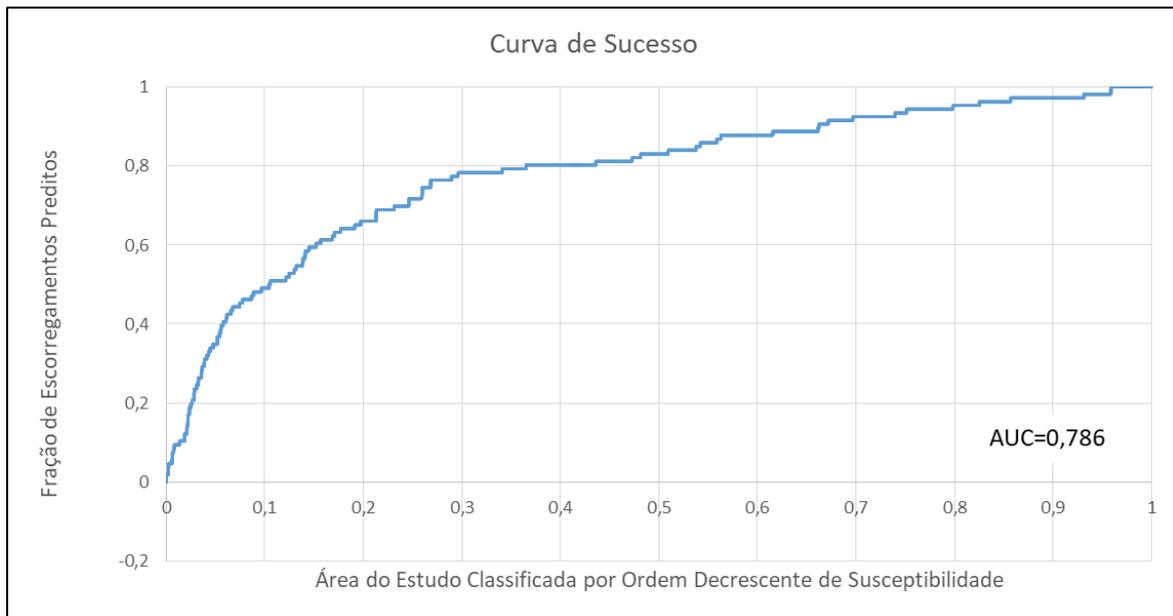
Tabela 34- Fatores dos Diferentes Modelos de VI e suas Respectivas AUC

Modelo	Fatores	Nº de Variáveis	AUC (Sucesso)	AUC (Predição)
1	Uso e ocupação do solo, proximidade da via e pedologia	3	0,788	0,800
2	Uso e ocupação do solo, proximidade da via, pedologia, geomorfologia, declividade e geologia	6	0,786	0,781
3	Uso e ocupação do solo, proximidade da via, pedologia, geomorfologia, declividade, geologia, formas do terreno e orientação das vertentes	8	0,786	0,803

Fonte: Autora (2023)

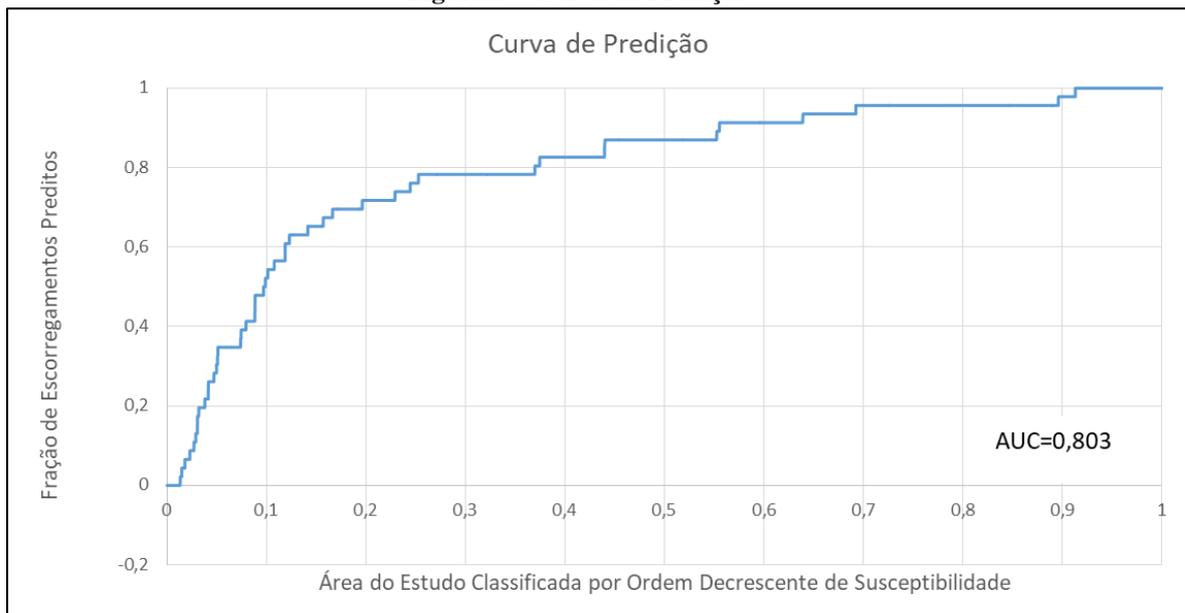
A validação dos modelos preditivos se dá por meio das curvas de sucesso e predição. O Modelo 3 foi o que melhor se ajustou aos dados, elaborado com os 8 parâmetros, abrangendo taxa de sucesso de 78,6% e taxa de predição de 80,3%, Figura 49 e Figura 50, respectivamente.

Figura 49- Curva de Sucesso



Fonte: Autora (2023)

Figura 50- Curva de Predição



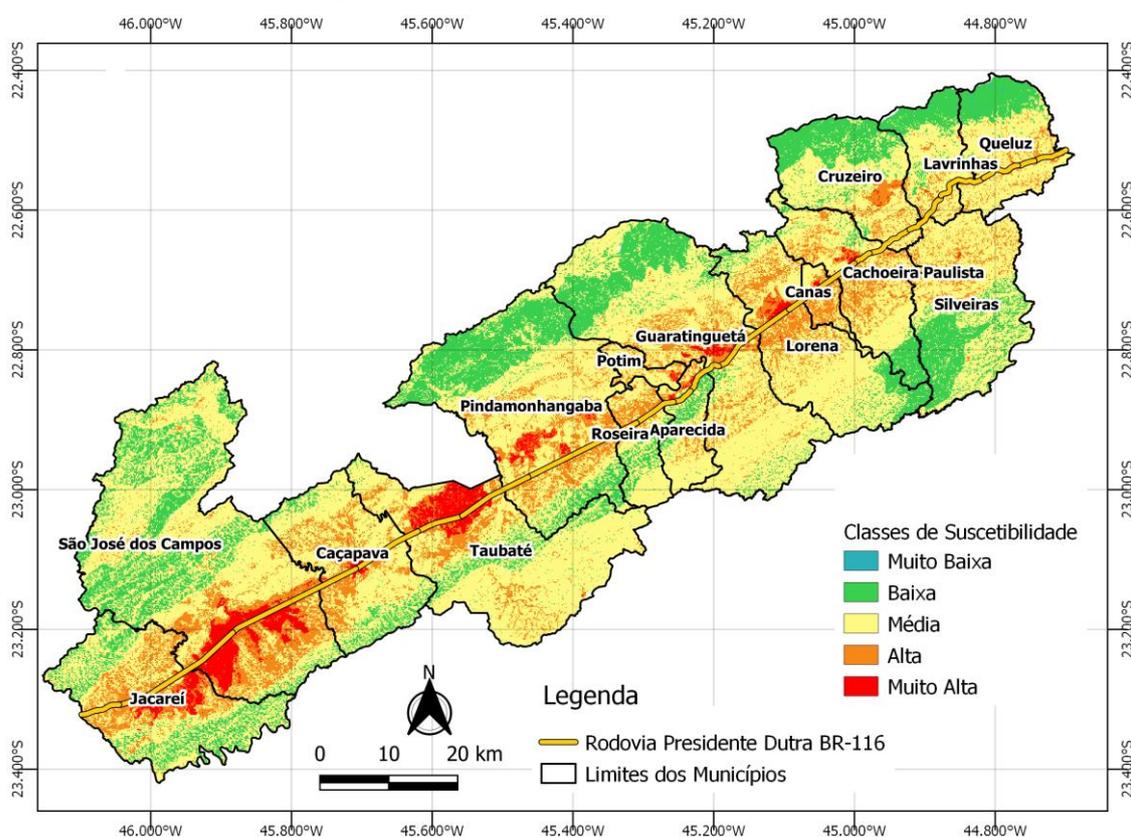
Fonte: Autora (2023)

O modelo desenvolvido apresentou resultados de acurácia (AUC) na curva de predição, entre 0,80 e 0,90, considerado muito satisfatório por Guzzeti (2006).

Em razão de o modelo apresentado produzir um amplo conjunto de níveis de suscetibilidade, esta foi categorizada em 5 classes de abordagem, cada uma com seu respectivo potencial em desenvolver o evento analisado.

O modelo 3 apresentou como classe muito alta de suscetibilidade aproximadamente 3% da área de estudo, para a classe de alta suscetibilidade, em torno de 16%, a média suscetibilidade foi abrangida 61% da área de estudo, e para a classificação baixa, 20% (Figura 51).

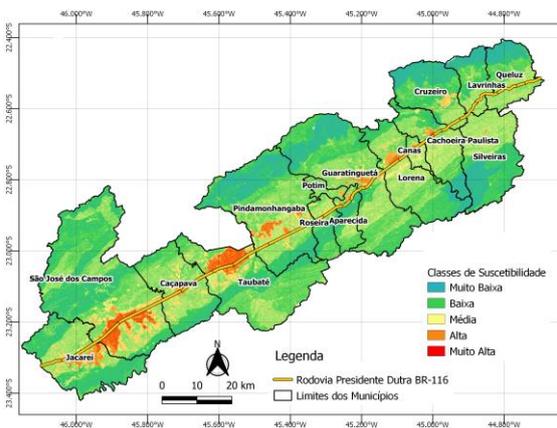
Figura 51- Mapa de Suscetibilidade Modelo 3



Fonte: Autora (2023)

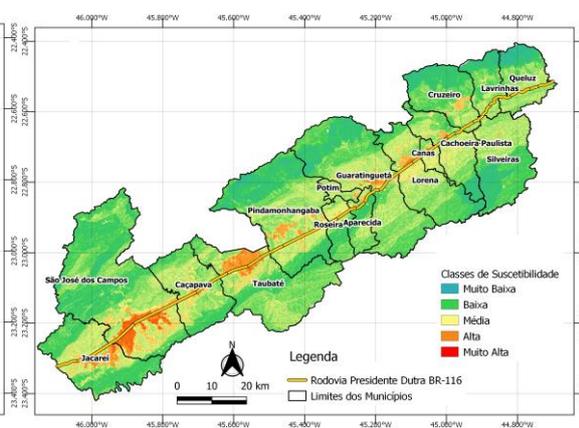
As Figuras 52 e 53 ilustram os Mapas de suscetibilidade para o Modelo 1 e Modelo 2, respectivamente.

Figura 52- Mapa de Suscetibilidade Modelo 1



Fonte: Autora (2023)

Figura 53- Mapa de Suscetibilidade Modelo 2

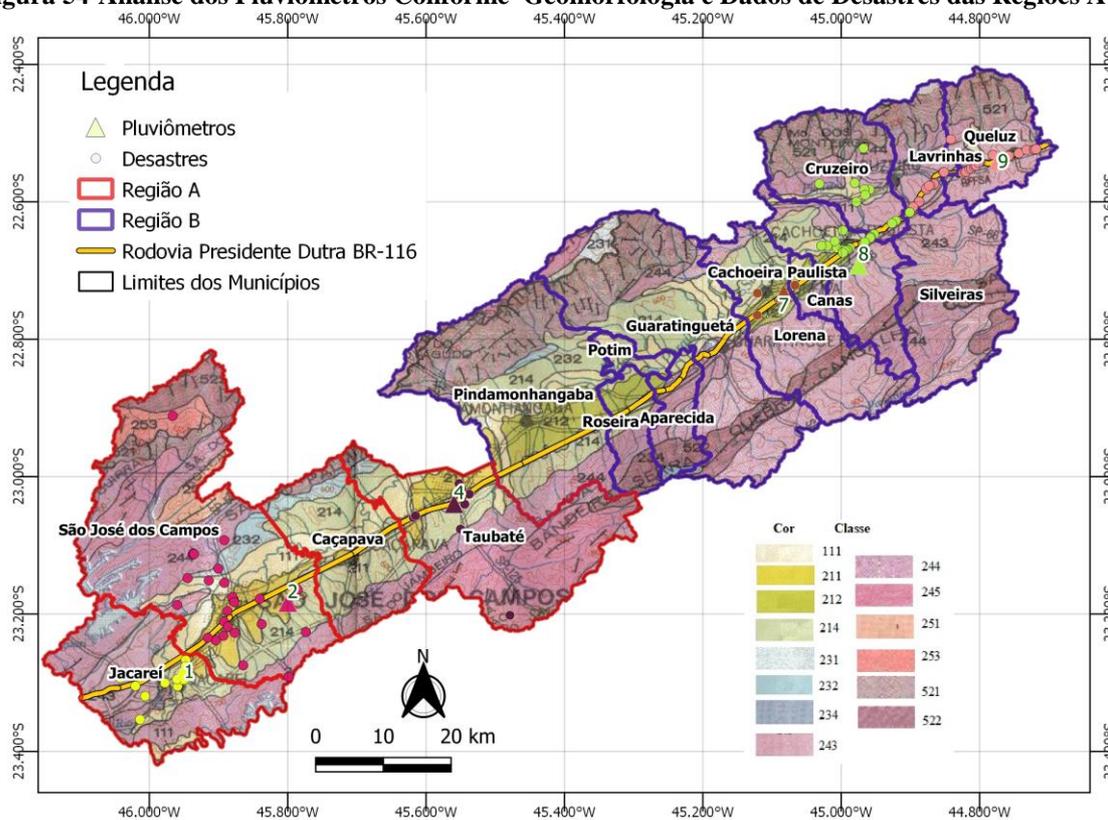


Fonte: Autora (2023)

4.4 Dados Históricos de Chuva

Com o estudo dos dados pluviométricos preliminarmente da região como um todo, os valores ficaram destoantes, pois engloba várias cidades e geomorfologias distintas. Assim, para uma melhor análise, a área de estudo foi dividida nas regiões A e B, conforme a Figura 54.

Figura 54-Análise dos Pluviômetros Conforme Geomorfologia e Dados de Desastres das Regiões A e B



Fonte: Autora (2023)

Para mensurar o número de chuvas ocorridas em 20 anos, se levou em consideração a influência da geomorfologia e do pluviômetro, além dos dados de desastres situados em cada município. Para a Região A, utilizou-se a média das quantidades de chuvas de São José dos Campos, Taubaté e Jacareí, estas estão com números semelhantes na contagem das chuvas, ambas apresentam geomorfologia similares (111- planícies aluviais 211-tabuleiros e vales abertos) nas ocorrências dos eventos e a maior concentração de desastres, assim descartando os dados da cidade de Caçapava que apresenta apenas um desastre.

A Tabela 35 apresenta a quantidade de chuvas em 20 anos para a Região A.

Tabela 35- Quantidade de Chuvas em 20 Anos para a Região A

Volume Diário (mm)		REGIÃO A			
Mínima	Máxima	São José dos Campos (2)	Taubaté (4)	Jacareí (1)	Quantidade de Chuvas em 20 anos
0,0	75,1				
Intervalo Sturges					
0,0	10,7	1646	1453	1528	1542
13,1	21,5	464	437	398	433
26,2	32,2	205	196	178	193
39,3	42,9	99	93	87	93
52,4	53,6	41	69	48	53
65,5	64,4	31	30	24	28
78,6	75,1	7	11	18	12
Acumulado 3 dias (mm)		REGIÃO A			
Mínima	Máxima	São José dos Campos (2)	Taubaté (4)	Jacareí (1)	Quantidade de Chuvas em 20 anos
0,0	116,8				
Intervalo Sturges					
0,0	16,7	2568	2287	2354	2403
16,7	33,4	967	907	827	900
33,4	50,1	404	408	351	388
50,1	66,7	222	196	223	214
66,7	83,4	99	95	112	102
83,4	100,1	23	47	40	37
100,1	116,8	21	23	19	21

Tabela 35- Quantidade de Chuvas em 20 Anos para a Região A (continuação)

Acumulado 7 dias (mm)		REGIÃO A			
Mínima	Máxima	São José dos Campos (2)	Taubaté (4)	Jacareí (1)	Quantidade de Chuvas em 20 anos
0,0	154,9				
Intervalo Sturges					
0,0	22,1	2849	2473	2718	2680
22,1	44,3	1474	1431	1192	1366
44,3	66,4	739	757	681	726
66,4	88,5	433	393	458	428
88,5	110,6	210	183	200	198
110,6	132,8	96	102	106	101
132,8	154,9	42	61	25	43

Fonte: Autora (2023)

Na Região B, a caracterização 243 (mar de morros) e 244 (morros paralelos) apresentam as melhores representações, pois incidem o maior número de desastres (59%) e os pluviômetros estão instalados nos locais condizentes com a geomorfologia analisada, dessa forma, utilizou-se a média da quantidade de chuvas das cidades de Cachoeira Paulista, Cruzeiro, Lorena, Canas e Queluz, as quais exprimem as características predominantes, embora Aparecida e Guaratinguetá apresentem uma quantidade de desastres consideráveis (36%), o pluviômetro instalado para estas cidades está posicionado longe das ocorrências e em outra classificação geomorfológica (214- colinas pequenas com espigões locais), retratando divergência com o anteriormente analisado, já Pindamonhangaba tem apenas um desastre registrado no local, não sendo relevante. A Tabela 36 apresenta a quantidade de chuvas em 20 anos para a Região B.

Tabela 36- Quantidade de Chuvas em 20 Anos para a Região B

Volume Diário (mm)		REGIÃO B			Quantidade de Chuvas em 20 anos
Mínima	Máxima	Cachoeira Paulista e Cruzeiro (8)	Lorena e Canas (7)	Queluz e Lavrinhas (9)	
0,0	104,8				
Intervalo Sturges					
0,0	15,0	1569	1724	1669	1654
15,0	29,9	365	355	374	365
29,9	44,9	153	132	166	150
44,9	59,9	48	45	50	48
59,9	74,9	18	18	25	20
74,9	89,8	7	4	6	6
89,8	104,8	4	3	7	5

Tabela 36- Quantidade de Chuvas em 20 Anos para a Região B (continuação)

Acumulado 3 dias (mm)		REGIÃO B			
Mínima	Máxima	Cachoeira Paulista e Cruzeiroiro (8)	Lorena e Canas (7)	Queluz e Lavrinhas (9)	Quantidade de Chuvas em 20 anos
0,0	209,2				
Intervalo Sturges					
0,0	29,9	3068	3117	2964	3050
29,9	59,8	729	667	743	713
59,8	89,7	160	152	186	166
89,7	119,5	49	30	61	47
119,5	149,4	9	8	17	11
149,4	179,3	3	6	3	4
179,3	209,2	1	0	5	2

Acumulado 7 dias (mm)		REGIÃO B			
Mínima	Máxima	Cachoeira Paulista e Cruzeiroiro (8)	Lorena e Canas (7)	Queluz e Lavrinhas (9)	Quantidade de Chuvas em 20 anos
0,0	354,2				
Intervalo Sturges					
0,0	50,6	4381	4414	4156	4317
50,6	101,2	1058	1005	996	1020
101,2	151,8	208	160	231	200
151,8	202,4	33	20	61	38
202,4	253,0	12	10	20	14
253,0	303,6	3	5	7	5
303,6	354,2	2	4	1	2

Fonte: Autora (2023)

O valor de K (Eq. 6) resultou em aproximadamente 7, estes são os intervalos adotados para a divisão de Sturges. Verificaram-se os valores máximos e mínimos de chuva para cada período, que foram divididos pelo resultado de K, assim, definindo a amplitude dos intervalos. Por exemplo, para o volume diário da região A, o valor mínimo é zero e o máximo é 75,1 mm, este dividido por 7, corresponde a faixas de 10,7mm. As Tabelas 37, 38 e 39, apresentam os respectivos intervalos e o número de desastres que enquadram em cada um deles, além da quantidade de chuvas em 20 anos, a probabilidade de a chuva ocorrer (Eq. 7) e a classificação da chuva, esta realizada de acordo com as porcentagens da probabilidade, ou seja, de 0% a 20% classificação “T1” muito baixa e de 80% a 100% sendo “T5” muito alta, por exemplo.

Tabela 37- Análise da Frequência de Chuvas Considerando o Volume de Precipitação pelo dia da Ocorrência, das Regiões A e B

Volume Diário (mm)		REGIÃO A					Classificação Da Chuva
Mínima	Máxima	Número de Desastres (Nd)	Quantidade de Chuvas em 20 anos (Nc)	Probabilidade (Po) da Chuva Ocorrer (%)	Probabilidade (Pd) da Chuva desencadear desastre (%)		
0,0	75,1					Intervalo Sturges	
0,0	10,7	24	1542	65,5	1,6	T1	
10,7	21,5	4	433	18,4	0,9	T1	
21,5	32,2	6	193	8,2	3,1	T1	
32,2	42,9	6	93	4,0	6,5	T1	
42,9	53,6	2	53	2,3	3,8	T1	
53,6	64,4	1	28	1,2	3,6	T1	
64,4	75,1	1	12	0,5	8,3	T1	
Volume Diário (mm)		REGIÃO B					Classificação Da Chuva
Mínima	Máxima	Número de Desastres (Nd)	Quantidade de Chuvas em 20 anos (Nc)	Probabilidade (Po) da Chuva Ocorrer (%)	Probabilidade (Pd) da Chuva desencadear desastre (%)		
0,0	104,8					Intervalo Sturges	
0,0	15,0	30	1654	73,6	1,8	T1	
15,0	29,9	4	365	16,2	1,1	T1	
29,9	44,9	3	150	6,7	2,0	T1	
44,9	59,9	1	48	2,1	2,1	T1	
59,9	74,9	1	20	0,9	5,0	T1	
74,9	89,8	0	6	0,3	0,0	T1	
89,8	104,8	2	5	0,2	40,0	T3	

Fonte: Autora (2023)

Tabela 38- Análise da Frequência de Chuvas Considerando o Volume de Precipitação de 3 Dias das Regiões A e B

Volume Acumulado 3 dias (mm)		REGIÃO A					Classificação Da Chuva
Mínima	Máxima	Número de Desastres (Nd)	Quantidade de Chuvas em 20 anos (Nc)	Probabilidade (Po) da Chuva Ocorrer (%)	Probabilidade (Pd) da Chuva desencadear desastre (%)		
0,0	116,8					Intervalo Sturges	
0,0	16,7	12	2403	59,1	0,5	T1	
16,7	33,4	3	900	22,1	0,3	T1	
33,4	50,1	12	388	9,5	3,1	T1	
50,1	66,7	8	214	5,3	3,7	T1	
66,7	83,4	6	102	2,5	5,9	T1	
83,4	100,1	2	37	0,9	5,4	T1	
100,1	116,8	1	21	0,5	4,8	T1	

Tabela 38- Análise da Frequência de Chuvas Considerando o Volume de Precipitação de 3 Dias das Regiões A e B (continuação)

Volume Acumulado 3 dias (mm)		REGIÃO B				
Mínima	Máxima	Número de Desastres (Nd)	Quantidade de Chuvas em 20 anos (Nc)	Probabilidade (Po) da Chuva Ocorrer (%)	Probabilidade (Pd) da Chuva desencadear desastre (%)	Classificação Da Chuva
0,0	209,2					
Intervalo Sturges						
0,0	29,9	13	3050	76,4	0,4	T1
29,9	59,8	15	713	17,9	2,1	T1
59,8	89,7	9	166	4,2	5,4	T1
89,7	119,5	1	47	1,2	2,1	T1
119,5	149,4	0	11	0,3	0,0	T1
149,4	179,3	1	4	0,1	25,0	T2
179,3	209,2	2	2	0,1	100,0	T5

Fonte: Autora (2023)

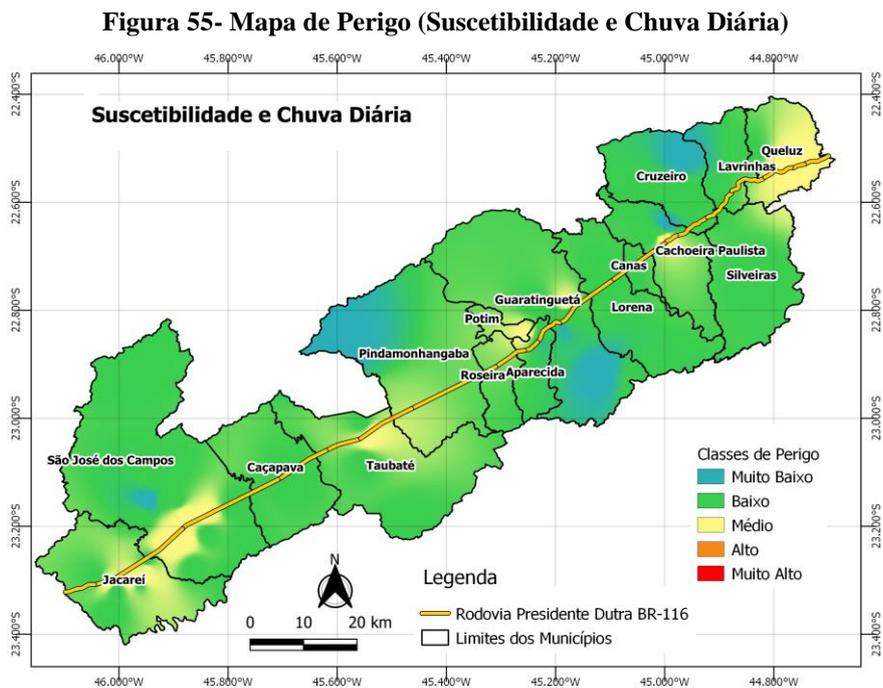
Tabela 39- Análise da Frequência de Chuvas Considerando o Volume de Precipitação de 7 Dias das Regiões A e B

Volume Acumulado 7 dias (mm)		REGIÃO A				
Mínima	Máxima	Número de Desastres (Nd)	Quantidade de Chuvas em 20 anos (Nc)	Probabilidade (Po) da Chuva Ocorrer (%)	Probabilidade (Pd) da Chuva desencadear desastre (%)	Classificação Da Chuva
0,0	154,9					
Intervalo Sturges						
0,0	22,1	4	2680	48,4	0,1	T1
22,1	44,3	6	1366	24,7	0,4	T1
44,3	66,4	11	726	13,1	1,5	T1
66,4	88,5	12	428	7,7	2,8	T1
88,5	110,6	5	198	3,6	2,5	T1
110,6	132,8	4	101	1,8	4,0	T1
132,8	154,9	2	43	0,8	4,7	T1
Volume Acumulado 7 dias (mm)		REGIÃO B				
Mínima	Máxima	Número de Desastres (Nd)	Quantidade de Chuvas em 20 anos (Nc)	Probabilidade (Po) da Chuva Ocorrer (%)	Probabilidade (Pd) da Chuva desencadear desastre (%)	Classificação Da Chuva
0,0	354,2					
Intervalo Sturges						
0,0	50,6	13	4317	77,1	0,3	T1
50,6	101,2	12	1020	18,2	1,2	T1
101,2	151,8	8	200	3,6	4,0	T1
151,8	202,4	0	38	0,7	0,0	T1
202,4	253,0	4	14	0,3	28,6	T2
253,0	303,6	2	5	0,1	40,0	T3
303,6	354,2	2	2	0,0	100,0	T5

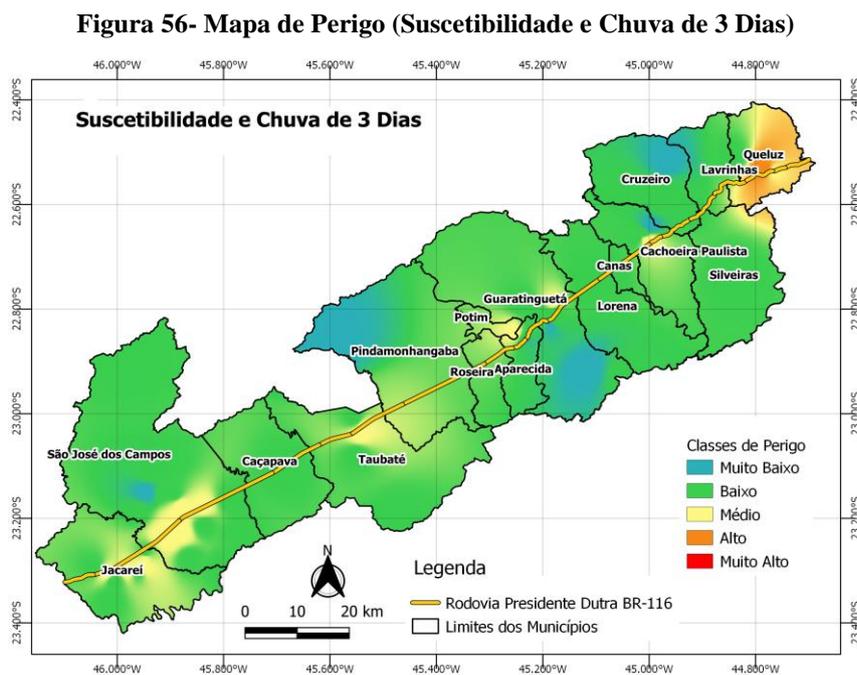
Fonte: Autora (2023)

4.5 Mapas de Perigo

Os Mapas de perigo foram desenvolvidos utilizando a matriz quadrada que consiste no cruzamento da suscetibilidade e dos dados de chuva (sendo a chuva diária, de 3 dias e de 7 dias), Figuras 55, 56 e 57, respectivamente.

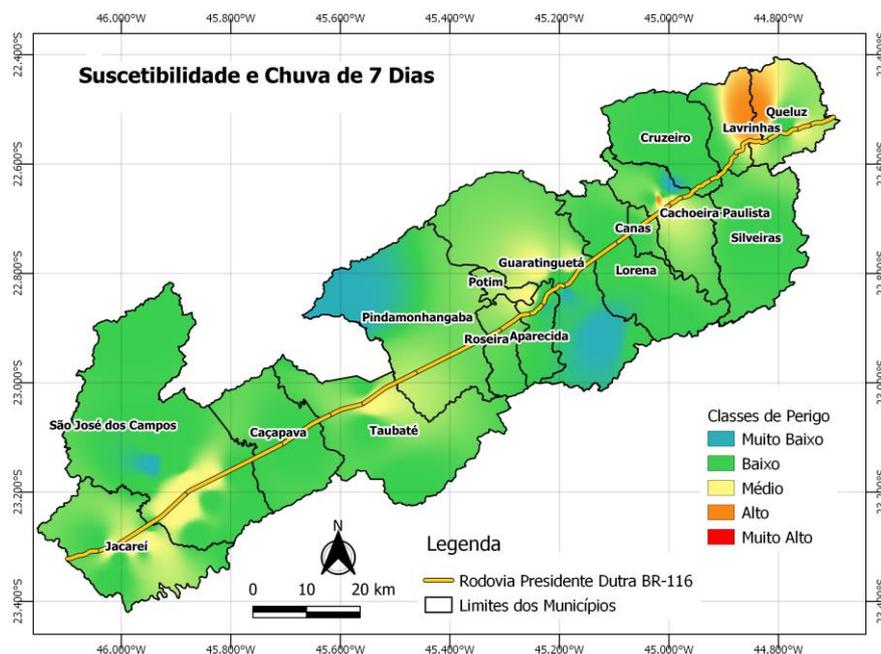


Fonte: Autora (2023)



Fonte: Autora (2023)

Figura 57- Mapa de Perigo (Susceptibilidade e Chuva de 7 Dias)



Fonte: Autora (2023)

A região A (Jacareí, São José dos Campos, Caçapava e Taubaté) permaneceu inalterada nas 3 análises de perigo desenvolvidas. A região B, para a composição do perigo, apresentou classe alta na região da cidade de Queluz para a chuva de 3 dias (Figura 56), e incluiu uma parte de Lavrinhas para a chuva de 7 dias (Figura 57).

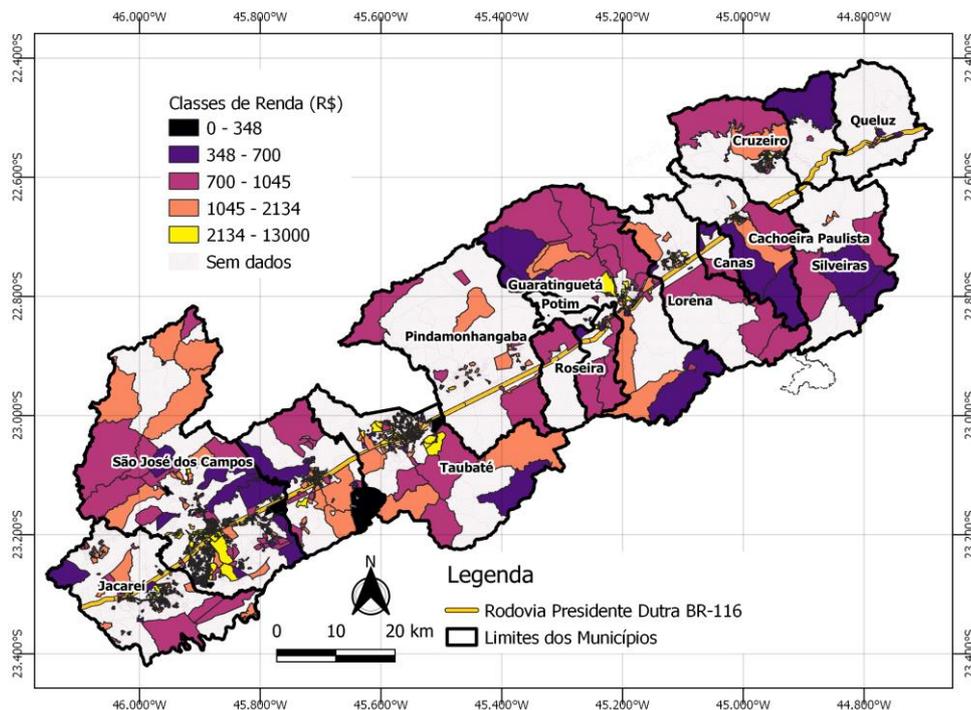
4.6 Dados Socioeconômicos e Vulnerabilidade Social

Para determinar a vulnerabilidade social, foram utilizados os indicadores de renda per capita, densidade demográfica e distribuição de idade (população idosa e de crianças). A divisão se deu pelos setores censitários (menor unidade territorial para operações de pesquisa do IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística).

A área de estudo abrange 4.376 setores, destes, 3.200 não apresentaram dados para operações censitárias, por tratar de áreas que não correspondem às residências.

Na classificação da renda per capita considerou-se 5 faixas para a análise, sendo a primeira faixa estabelecida como linha de pobreza (abaixo de R\$348,00), a segunda faixa, aproximadamente o dobro desse valor (R\$700,00), a terceira e demais faixas, divididas conforme apresentado na Figura 58. No Brasil, em escala global, a linha de pobreza é avaliada em US\$ 1,90 / dia, o cálculo foi feito para o ano de 2010, a fim de corresponder ao último censo realizado.

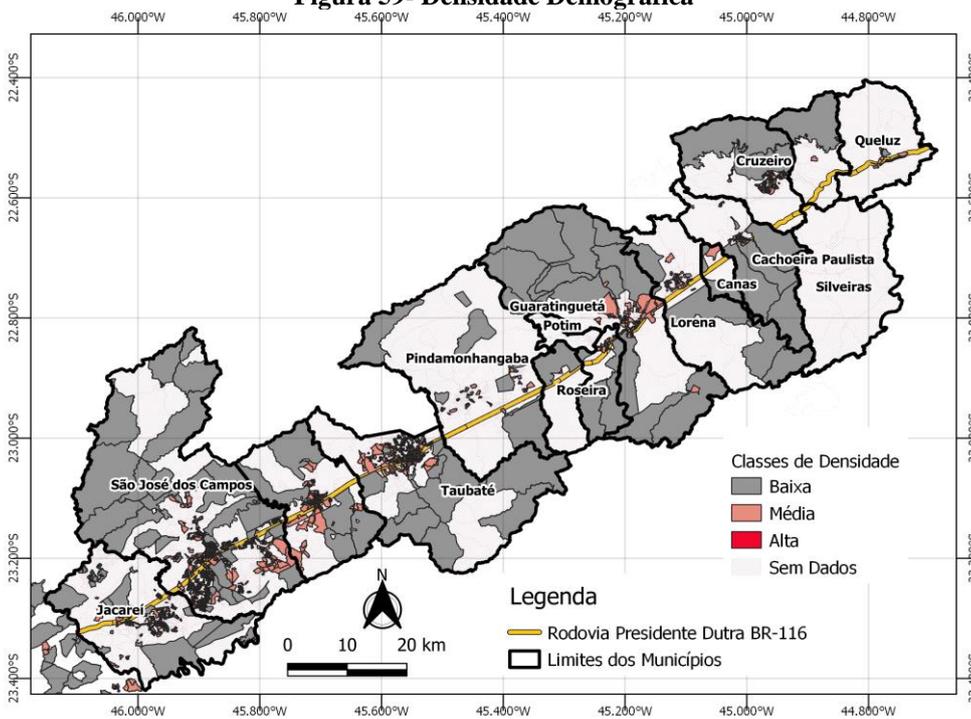
Figura 58- Renda Per Capita



Fonte: Autora (2023)

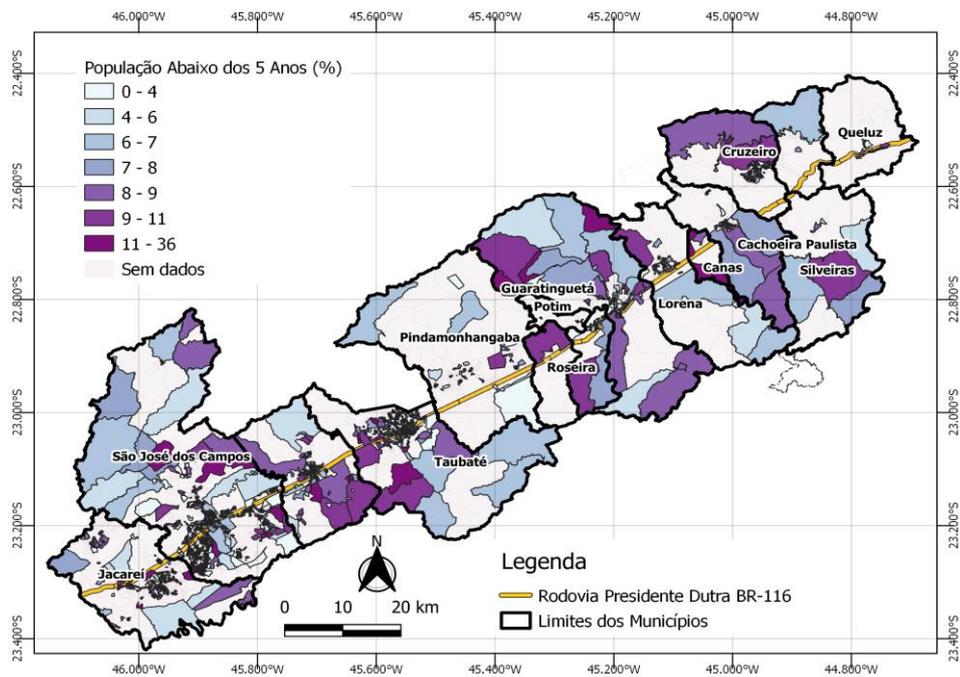
A densidade populacional foi calculada da relação entre a quantidade de pessoas residentes no setor e a área do mesmo (Figura 59). Observa-se que a alta densidade populacional localiza-se nos setores mais próximos à rodovia.

Figura 59- Densidade Demográfica



Fonte: Autora (2023)

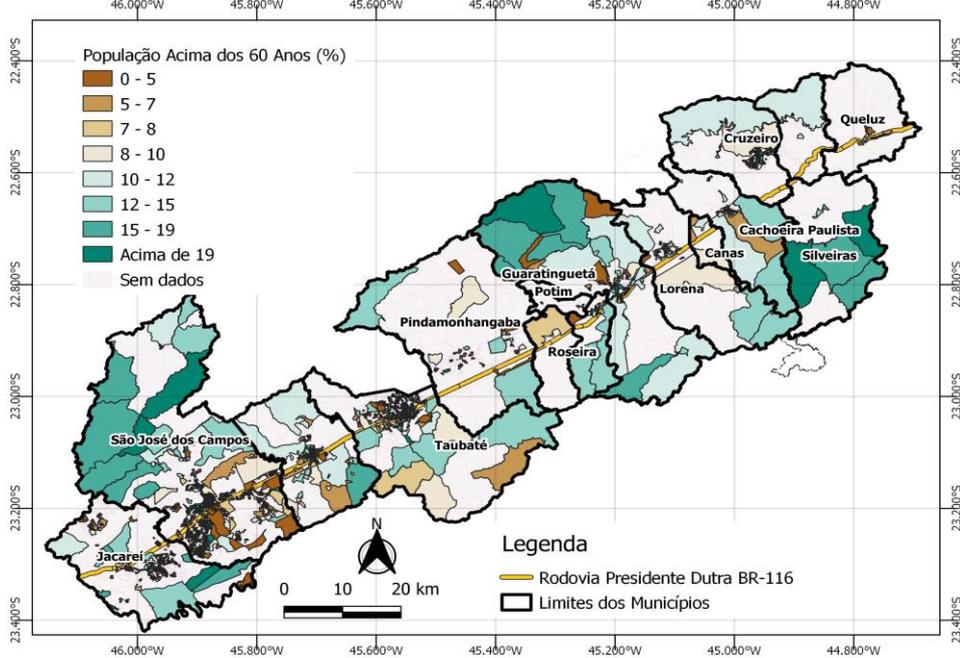
Figura 60- Porcentagem da População Abaixo dos 5 anos de Idade



Fonte: Autora (2023)

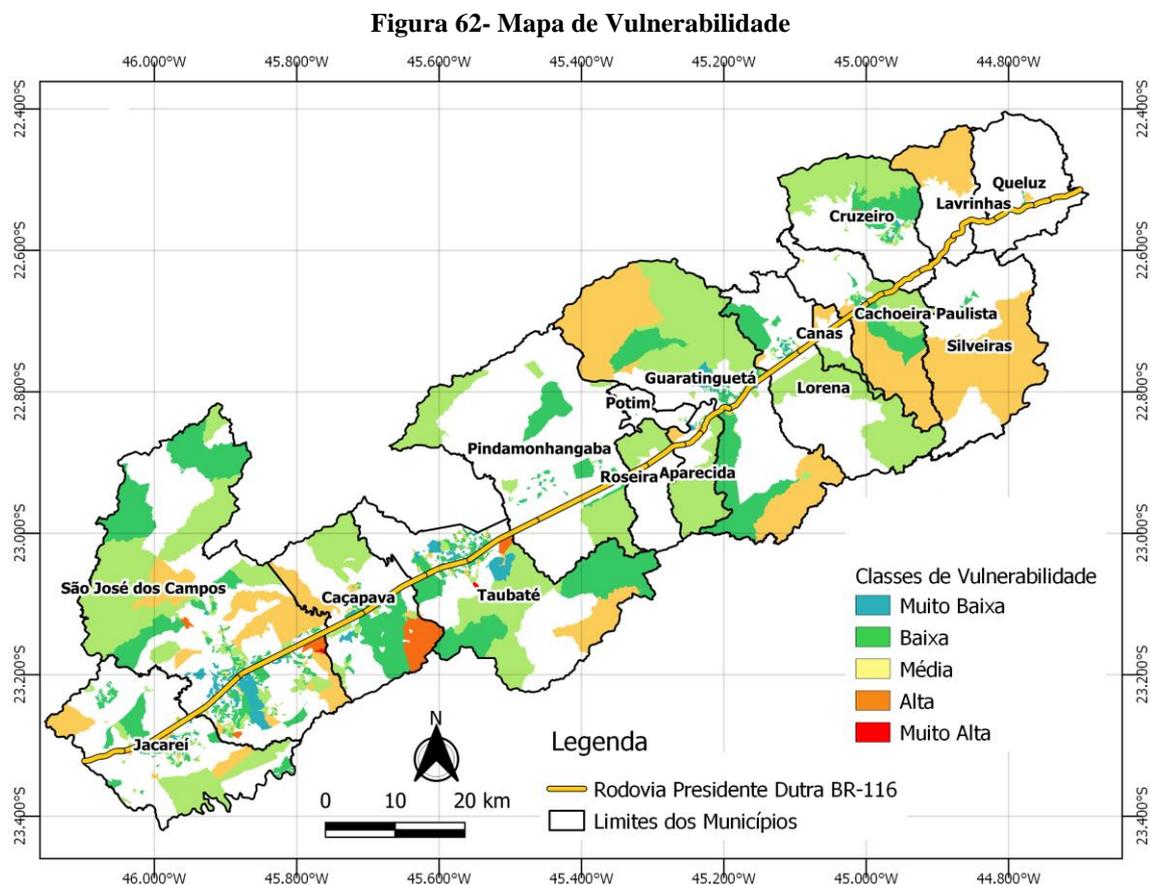
Quanto a idade, foram somados os números e definidas as porcentagens da população abaixo dos 5 anos de idade e acima dos 60 anos de idade, conforme cada setor, estes considerados como grupo mais vulnerável, e divididas as respectivas classes conforme a Figura 60 e Figura 61.

Figura 61- Porcentagem da População Acima dos 60 Anos de Idade



Fonte: Autora (2023)

O Mapa de Vulnerabilidade (Figura 62) foi desenvolvido conforme a Eq. 2 que consiste na somatória dos fatores densidade demográfica, renda per capita e idade da população abaixo dos 5 anos e acima dos 60 anos de idade.

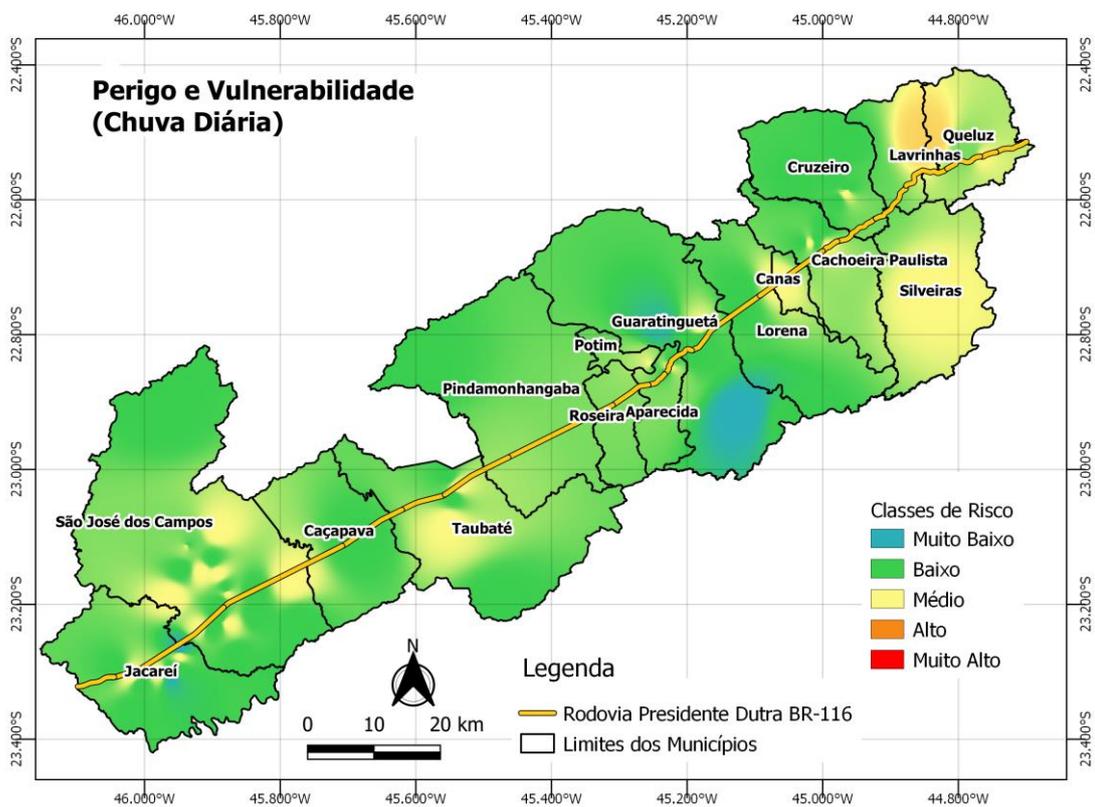


Através da análise do mapa de vulnerabilidade, se verifica as classes alta e muito alta em regiões das cidades de São José dos Campos, Caçapava e Taubaté, da mesma forma, nesses municípios encontra-se, em maioria, a classe de muito baixa vulnerabilidade, retratando o contraste social.

4.7 Mapas de Risco

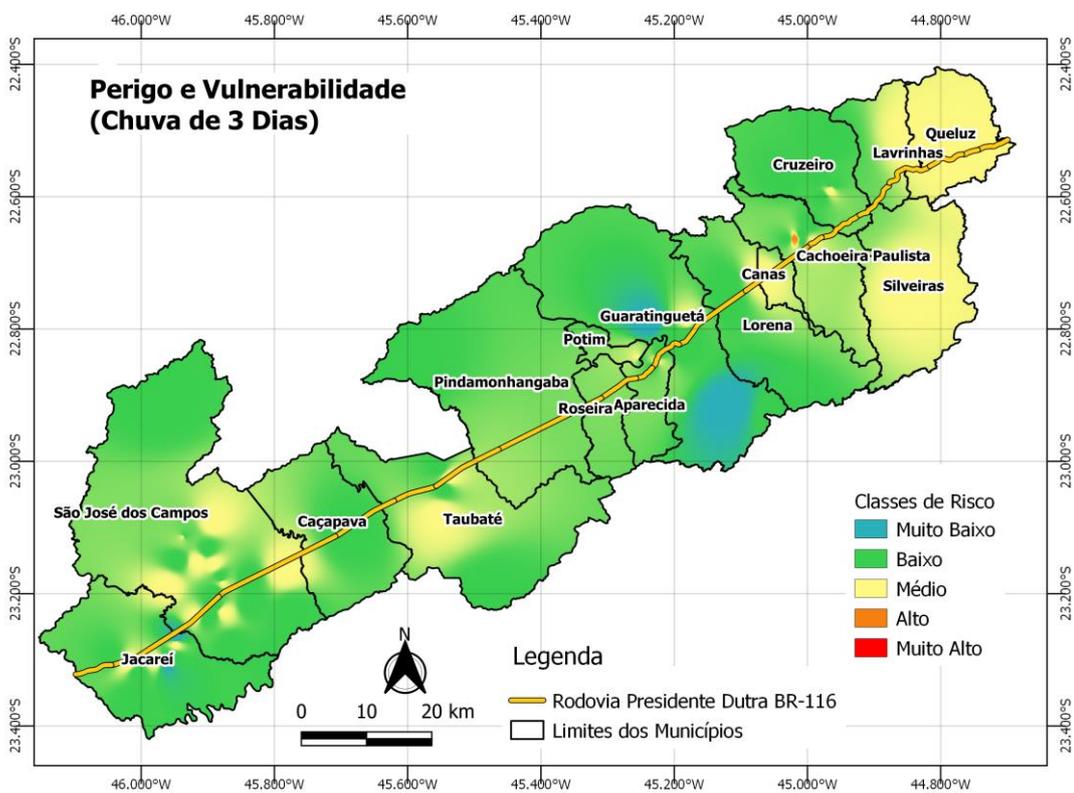
Os Mapas de risco foram gerados do cruzamento dos Mapas de Perigo e a vulnerabilidade, também referentes à chuva diária, de 3 dias e de 7 dias, Figuras 63, 64 e 65, respectivamente.

Figura 63- Mapa de Risco (Perigo e Vulnerabilidade - Chuva Diária)



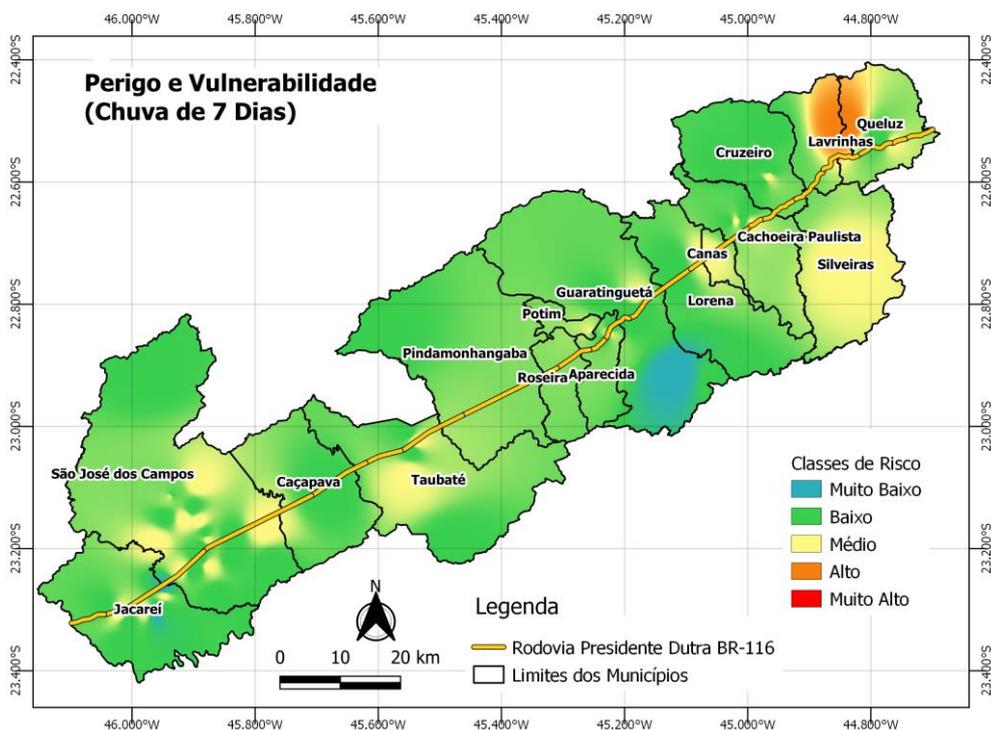
Fonte: Autora (2023)

Figura 64- Mapa de Risco (Perigo e Vulnerabilidade - Chuva de 3 Dias)



Fonte: Autora (2023)

Figura 65- Mapa de Risco (Perigo e Vulnerabilidade –Chuva de 7 Dias)



Fonte: Autora (2023)

Como a região A (Jacareí, São José dos Campos, Caçapava e Taubaté) permaneceu inalterada nas 3 análises de perigo desenvolvidas, consequentemente não houve modificações nas avaliações de risco, pois as condições de chuvas foram classificadas em “T1” para esta região em todas as divisões de Sturges. Em ambos os mapas de risco, a maior parte da área apresentou classe baixa, e alguns espaços com média e muito baixa.

Na análise de risco, a vulnerabilidade incidu principalmente nas áreas que estão adjacentes a rodovia, onde houve o desenvolvimento urbano, e alguns pontos espaçados, que formam vilarejos (por exemplo, as regiões de São José dos Campos e Silveiras, que tiveram classe média de risco), para a chuva de 7 dias (Figura 65), as regiões de Queluz e Lavrinhas também apresentaram classe alta de risco.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES DO TRABALHO

O trecho da rodovia Presidente Dutra (BR-116) dentro da área de estudo apresenta, predominantemente, ausência e baixo vigor de vegetação nas bordas da via, coincidindo com as áreas urbanizadas dos municípios situados em seu entorno, e também verifica-se variações do relevo, condizentes com as formações montanhosas e alterações antrópicas.

O reordenamento territorial e implantação de projetos, movido pelas aspirações do desenvolvimento, levou o ser humano a utilizar-se do espaço físico, alterando suas condições originais e provocando efeitos diversos sobre o meio ambiente. Estes efeitos, embora muitas vezes benéficos do ponto de vista social ou econômico, podem incorrer em impactos ambientais. A vegetação original era de floresta tropical, denominada “Mata Atlântica”, entretanto a ocupação humana e a necessidade de áreas disponíveis para plantio e pecuária reduziram substancialmente a vegetação. Assim, áreas com declividades, que a princípio eram ocupadas por florestas primárias, tornaram-se instável após a remoção da vegetação natural.

De uma forma geral, através da análise do inventário dos dados de desastres coletados, se verifica que boa parte dos pontos de movimentos de massa mapeados estão localizados em áreas que sofrem ou já sofreram influência antrópica, ou em zonas fortemente escarpadas. No caso da Rodovia Dutra, se acredita que a declividade em associação ao uso e ocupação do solo são os principais fatores predisponentes envolvidos na geração dos processos analisados, que combinados com os demais condicionantes, tendem a aumentar a suscetibilidade à ocorrência destes eventos.

A utilização de ferramentas de Geoprocessamento torna-se cada vez mais importante no desenvolvimento de diferentes pesquisas voltadas para áreas de risco, especialmente por facilitar e agilizar o processo de elaboração de mapas distintos, agrupando uma gama de informações e possibilitando uma análise mais detalhada dos agentes atuantes no processo. Além do mais, a disponibilidade gratuita de imagens como as provenientes do Topodata (SRTM), ESRI e do Google Earth, e softwares de SIG livres, viabilizam a inserção de instrumentos de geotecnologia no gerenciamento de risco, principalmente pelos órgãos responsáveis, em diferentes esferas governamentais. Lembrando que os resultados eficazes obtidos pelo SIG são alcançados apenas com a pesquisa e coleta de dados confiáveis, por parte do usuário, em projeções e escalas compatíveis, de maneira que não haja distorção das informações e não comprometa a veracidade das análises.

A análise preliminar da suscetibilidade através da classificação dos desastres associados com os mapas do meio físico permitiu identificar quais classes, dentro de cada fator condicionante, que mostraram ter significativa relevância. Por exemplo, na geologia, verifica-se que 40,3% dos eventos ocorreram em Complexo Embu (migmatitos), se enquadrando na suscetibilidade muito alta. Para a geomorfologia, a classe de mar de morros correspondeu a 34,2% do total (suscetibilidade muito alta), seguida de morros paralelos, com 26,2%, (suscetibilidade alta). Na pedologia, o latossolo vermelho amarelo que compõe 34,9% das ocorrências, classificado com suscetibilidade muito alta.

O procedimento de Valor Informativo mostrou-se eficiente, permitiu combinar variáveis e elaborar o mapa síntese para a análise da suscetibilidade. Com os resultados foi possível identificar os fatores condicionantes que mais contribuíram para os processos de movimentos de massa, dentre os elencados para a análise, o uso do solo foi o que apresentou maior valor ($AUC=0,892$), e o que menos significativo é o aspecto ($AUC=0,562$). Na área de estudo, as classes de alta suscetibilidade do cenário 3 (abrangendo a união de todos os fatores) incidiram nas áreas urbanas próximas à rodovia BR-116.

Percebe-se que a chuva acumulada de 3 dias e de 7 dias, para as regiões B, obtiveram a probabilidade de 100% de desencadear um desastre quando a precipitação se enquadra no último intervalo de sturges (ou seja, o de maior volume), tendo classificação “T5” muito alta, contribuindo para a análise de perigo (relação dos dados de chuva com a suscetibilidade), assim também verificando que a classe “T1” (chuva muito baixa) não

causou modificações para as áreas da Região A, pois as 3 caracterizações (chuva diária, de 3 dias e de 7 dias) ficaram na mesma classificação.

Incluindo a vulnerabilidade para gerar o Mapa de Risco, se observa que embora a cidade de Caçapava apresentasse uma classe muito alta em determinado ponto, não houve relevância para a análise como um todo. Entretanto, com classe de perigo alto, as cidades de São José dos Campos, Silveiras e Lavrinhas foram as mais consequentes, principalmente esta última para a chuva de 7 dias.

As cidades de Lavrinhas e Queluz apresentaram as classes altas nos mapas de perigo e de risco finais. Em comparação com os fatores condicionantes e com as formações geomorfológicas, nota-se que estão localizadas na classe geológica Ka3c (corpo alcalino), sendo a única região a apresentar esse tipo de geologia dentro da área de estudo, na análise geomorfológica abrange a classe 521 (escarpas festonadas), e quanto ao tipo de solo, incide sobre Cambissolos Háplicos e Húmicos, sendo estes e a geomorfologia coincidentes na localização do mapa, também com poucas extensões dentro da área de estudo, porém muito relevante. Ainda analisando as cidades de Lavrinhas e Queluz, embora a densidade demográfica apresente classe alta, o uso do solo predominante é a vegetação densa com alguns pontos de área urbana, ou seja, há a concentração de pessoas em pequenas áreas.

Os estudos de análise de suscetibilidade ambiental e risco são primordiais para planejar e gerir o ambiente de forma adequada com as características e limitações que ele apresenta, podem ser considerados um suporte para o diagnóstico ambiental, pois, trazem informações relevantes sobre o cenário, considerando suas possíveis fragilidades, permitindo assim, a busca por intervenções necessárias. Devido à possibilidade de aplicação desse método em outras regiões, sugere-se a proposta para trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. São Paulo, 1998.

ADITIAN, A.; KUBOTA, T.; SHINOHARA, Y. *Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia. Geomorphology*, v. 318, p. 101–111, 2018.

ALCÁNTARA-AYALA, I. et al. *Landslide disaster risk awareness in Mexico: community access to mapping at local scale. Landslides*, v. 15, n. 8, p. 1691–1704, ago. 2018.

ALEOTTI, P.; CHOWDHURY, R. *Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 58, n. 1, p. 21–44, ago. 1999.

ALFANO, B. Reportagem: Maior tragédia natural da história do país completa 50 anos. 2017. Disponível em: <<https://extra.globo.com/noticias/rio/maior-tragedia-natural-da-historia-do-pais-com-1700-mortos-no-rio-completa-50-anos-21649727.html>>. (Acesso em: fev/2022).

ANDRADE, D. J. De; SOUZA, A. A. M. De; GOMES, C. Análise temporal da expansão urbana nos municípios do vale do paraíba paulista. 2019. Mercator, Fortaleza, v. 18, e18005, 2019. ISSN:1984-2201. <https://doi.org/10.4215/rm2019.e18005>.

ARANTES, M. R. L. A Legislação Ambiental Brasileira Do Império Ao Terceiro Milênio: Premissas Técnicas. *Revista Caminhos de Geografia*. Uberlândia - MG v. 19, n. 66 Junho/2018 p. 325–344. ISSN 1678-6343DOI: <http://dx.doi.org/10.14393/RCG196623>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 11682/2009 – Estabilidade de Talude.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: Conferência Brasileira Sobre Estabilidade De Encostas, 1. Rio de Janeiro: 1992.

BARELLA, C. F. Abordagens estatísticas aplicadas ao mapeamento de susceptibilidade a movimentos de massa: análise de diferentes técnicas no contexto do Quadrilátero Ferrífero. Tese (Doutorado)—Ouro Preto (MG): Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), 2016.

BARELLA, C.F.; SOBREIRA, F.G.; ZÊZERE, J.L. *A comparative analysis of statistical landslide susceptibility mapping in the southeast region of minas Gerais state, Brazil*. Bull Eng Geol Environ 78(5):3205–3221, 2019.

BARTORELLI A.; HARALYI N. Geologia do Brasil. In: Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998.

BEGUERÍA, S. *Validation and evaluation of predictive models in assessment and risk managment. Natural Hazards*, 37 (3): 315-329, 2006.

BENAVIDES SILVA V. C.; MACHADO P. S. SIG na análise ambiental: susceptibilidade erosiva da bacia hidrográfica do córrego mutuca, Nova Lima – Minas Gerais. Revista geografia.UFPE. V.31, n°2, 2014. Minas Gerais.

BISPO, C. DE O. et al. Suscetibilidade induzida a escorregamentos, via aplicação do método AHP. Diversitas Journal, v. 5, n. 1, p. 298–314, 2020.

BORTOLOTI, F.D.; JUNIOR, R.M.C.; ARAÚJO, L.C.; DE MORAIS, M.G.B. *Preliminary landslide susceptibility zonation using gis-based fuzzy logic in vitória, Brazil*. Environ Earth Sci 74:2125–2141, 2015.

BOURENANE, H.; BOUHADAD, Y.; GUETTOUCHE, M.S.; BRAHAM, M. *Gis-based landslide susceptibility zonation using bivariate statistical and expert approaches in the city of constantine (Northeast Algeria)*. Bull Eng Geol Environ 74:337–355, 2015.

BRAGAGNOLO, L. et al. Mapeamento da susceptibilidade a deslizamentos com Redes Neurais Artificiais a partir do módulo gratuito e de código aberto. Landslide. 2019.

BRASIL, Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm Acesso em: fev/2022.

BROLLO, M.J., TOMINAGA, L.K. Desastres naturais e riscos geológicos no estado de São Paulo: cenário de referência – 2012. São Paulo: Coordenadoria Estadual de Defesa Civil, 2012.

CALVELLO, M. et al. *The Rio de Janeiro early warning system for rainfall-induced landslides: Analysis of performance for the years 2010–2013. International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 12, p. 3–15, jun. 2015.

CAPITANI, M.; RIBOLINI, A.; FEDERICI, P.R. *Influence of deep-seated gravitational slope deformations on landslide distributions: a statistical approach. Geomorphology* 201:127–134, 2013.

CARMO, Luis Roberto. Urbanização e Desastres: Desafio para a segurança Humana no Brasil. Segurança Humana no contexto dos Desastres. São Carlos, Ed. Rima, 2014.

CARVALHO, J.C. de. BARBOSA, M.C. MENDONÇA, R.M.G. FARIAS, W. M. CARDOSO, F. B. da F. Propriedades químicas, mineralógicas e estruturais de solos naturais e compactados. In: CAMAPUM de Carvalho, J. et al. Solos não saturados no contexto geotécnico. 2015. 759p. São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, 2015.

CARVALHO, P. A. S. (Coord.) Manual de Geotecnia – Taludes de Rodovias. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) – Departamento de Estradas e Rodagem (DER) 1991. 388p.

CASCINI, L.; CIURLEO, M.; DI NOCERA, S.; GULLÀ, G. *A new-old approach for shallow landslide analysis and susceptibility zoning in fine-grained weathered soils of southern Italy. Geomorphology* 241:371–381, 2015.

CEMADEN- Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. São José dos Campos, 2017.

CENAD - Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres. Anuário Brasileiro de Desastres Naturais. Brasília: CENAD, 2013. 80 p.

CERRI, L. E. S. Carta geotécnica: contribuições para uma concepção voltada às necessidades brasileiras. In: CBGE/ IX COBREAE. Salvador: 1990.

CERRI, L. E. S. Riscos geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para a prevenção de acidentes. Rio Claro. 1993. 197p. Tese (Doutorado) – IGCE- Unesp.

COROMINAS, J. et al. *Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 24 nov. 2014.

CORTELETTI, R. C. Metodologia para análise de riscos geológico-geotécnicos em ferrovias: Estrada de Ferro Carajás. Ouro Preto (MG): Editora UFOP, 2017.

CRED; UNDRR. *Human Cost of Disasters 2000 - 2019 Report*. Brussels: *United Nations Office for Disaster Risk Reduction*, 2020. Disponível em: <<https://www.undrr.org/media/48008/download>>. Acesso em: abril/2022.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S.; HERNANDEZ FILHO, P.; FLORENZANO, T. G.; DUARTE, V.; BARBOSA, C. C. F. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao Zoneamento EcológicoEconômico e ao ordenamento territorial. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2001 (INPE-8454-RPQ/722). 103 p.

CRUDEN; VARNES “*Landslide Types and Processes.In Landslides Investigation and Mitigation*”. Cap 2. (Eds) – Turner, A.K Schuster, R.L. *National Academy Press, Special Report 247*. Washington. 1996.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM – DER/SP. Estatística de Tráfego. Volume Diário Médio por Rodovia. 2010. Disponível em: <<http://200.144.30.103/vdm/>>. Acesso em: mar/2022.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS DE RODAGEM - DER/SP. Manual do Sistema de Gestão Ambiental. SGA DER/SP, 2007.

DIAS, H. C. et al. *Statistical-based shallow landslide susceptibility assessment for a tropical environment: a case study in the southeastern Brazilian coast. Natural Hazard*, v.108, p. 205-223, 2021.

DOU, J. et al. *An integrated artificial neural network model for the landslide susceptibility assessment of Osado Island, Japan. Natural Hazards*, v. 78, n. 3, p. 1749–1776, 2015.

EIDSVIG, U. M. K. et al. *Assessment of socioeconomic vulnerability to landslides using an indicator-based approach: methodology and case studies. Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 73, n. 2, p. 307–324, maio 2014.

EI-FENGOUR, A.; BATEIRA, C.; MOTAKI, H.E.; GARCÍA, H. *Landslide susceptibility assessment based on information value model in amzaz watershed in northern morocco. Physis Terrae* 2:3–19, 2020.

EMBRAPA. Manual de classificação dos solos. Brasília, CNPS, 1999.

EM-DAT: The OFDA/CRED *International Disaster Database*, Disponível em:<www.em-dat.net>. Acesso em: abril/2021.

ESRI - *Environmental Systems Research Institute. Global Land Cover Map from Sentinel-2 Satellite*. 2021. Disponível em: <https://www.esri.com/en-us/home>.

FELL, R. et al. *Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. Engineering Geology*, v. 102, n. 3–4, p. 85–98, dez. 2008.

FREITAS, David Rico; VALERIO FILHO Mario; MENDES, Rodolfo. Loteamentos irregulares em área de risco a escorregamentos no município de São José dos Campos-SP: um estudo dos loteamentos Águas de Canindú I e II e Chácaras Havaí. *Revista Univap*, São José dos Campos-SP, V.22, n. 41. dez. 2016. 31-44p.

GARIANO, S.L.; BRUNETTI, M.T.; IOVINE, G.; MELILLO, M.; PERUCCACCI, S.; TERRANOVA, O.; VENNARI, C.; GUZZETTI, F. *Calibration and validation of rainfall thresholds for shallow landslide forecasting in Sicily, southern Italy. Geomorphology* 228:653–665, 2015.

GERSCOVICH, D. M.S. “Estabilidade de Taludes”/ Denise M.S. Gerscovich.—2.ed.— São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. v. Edgard Blücher, n. 2, p. 194, 1984.

GUZZETTI, F. et al. *Landslide hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. Geomorphology*, v. 31, n. 1–4, p. 181–216, dez. 1999.

GUZZETTI, F. *Landslide hazard and risk assessment. Ph.D. Thesis—Bonn, Germany: Mathematisch-naturwissenschaftlichen Fakultät, Universität Bonn*, 2006.

GUZZETTI, F. et al. *Estimating the quality of landslide susceptibility models. Geomorphology*, v. 81, n. 1–2, p. 166–184, nov. 2006.

HADER, P. R. P. et al. (2020) *Hazard Assessment of Landslides Disasters in the City of Cubatão, State of São Paulo, Brazil. INCREaSE*, p. 1–15, 2020.

HADER, P.R.P. Metodologia para avaliação de perigo de movimentos de massa considerando fatores socionaturais. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru, 2021.

HADER, P.R.P.; REIS, F.A.G.V.; PEIXOTO, A.S.P. *Landslide risk assessment considering socionatural factors: methodology and application to Cubatão municipality, São Paulo, Brazil. Natural Hazards* 110 (2), 1273-1304, 2022.

HODASOVÁ, K.; BEDNARIK, M. *Effect of using various weighting methods in a process of landslide susceptibility assessment. Nat Hazards* 105(1):481–499, 2021.

HUTCHINSON, J. N. *Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. v. Bonnard, C.H. (Ed.), Landslides. Proceedings 5th International Conference on Landslides*, n. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 3–35, 1988.

IAEG - . *Engineering geological maps: a guide to their preparation. Paris:Unesco Press. 79p.*, 1976.

IBGE. Dados demográficos 1970, 1991 e 2010 – Estado de São Paulo, 2018. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/saude/9662-censo-demografico-2010.html?=&t=downloads>>. Acesso em: jun/2020.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (2015) MANUAL técnico de Pedologia. 3. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2015. 428 p. Acompanha 1 CD-ROM. (Manuais técnicos em geociências, n. 4). Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=295017>. Acesso em: dezembro, 2022.

IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (2019). Suscetibilidade a deslizamentos do Brasil: primeira aproximação / IBGE, Coordenação de Recursos Naturais e Estudos Ambientais. - Rio de Janeiro : IBGE, 2019.

INFANTI JR., N.; FORNASARI FILHO, N. Processos da Dinâmica Superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Eds) Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998.

IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*). *An special report on climate change*. 2021. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>. Acesso em: dez/2021.

IPMet – Instituto de Pesquisas Meteorológicas: Banco de Dados de Desastres Naturais. Disponível em: <http://www.ipmet.unesp.br/index2.php?abre=ipmet_html/defesacivil/index.php>. Acesso em: dez/2021.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, São Paulo – SP, “Manual de Geotecnia. Taludes de Rodovias – Orientação Para diagnóstico e Soluções Para os seus Problemas”, 1991 DER SP.

ITC - INTERNATIONAL INSTITUTE FOR AEROESPATIAL SURVEY EARTH SCIENCE. *Tools for Assessing Rapid Environmental Changes. The 1995 geoinicator checklist. Netherlands: INTERNATIONAL INSTITUTE FOR AEROESPATIAL SURVEY EARTH SCIENCE pub. N46, 1996.*

JORGE, Maria do Carmo Oliveira. Geomorfologia Urbana: Conceitos, Metodologias e Teorias. In: GUERRA, Antônio José Teixeira. (Org.). Geomorfologia Urbana. Bertrand Brasil. Rio de Janeiro, 2011.

JULIEV, M.; MERGILI, M.; MONDAL, I.; NURTAEV, B.; PULATOV, A.; HÜBL, J. *Comparative analysis of statistical methods for landslide susceptibility mapping in the Bostanlik district, Uzbekistan*. Sci Total Environ 653:801–814, 2019.

KAYASTHA, P., DHITAL, M. R. & DE SMEDT, F. *Application of the analytical hierarchy process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, West Nepal*. Computers & Geosciences, 52: 398-408, 2013.

KÖNIG, Téhrrie; KUX, Hermann J. H.; MENDES, Rodolfo Mendes. Shalstab mathematical model and WorldView-2 satellite images to identification of landslide-susceptible areas. Natural Hazards (Dordrecht. online), v. 98, p. 1-23, 2019.

LIMA, I.F.; FERNANDES, N.F.; JUNIOR, E.D.A.V. Análise morfométrica em bacias afetadas por fluxos de detritos na região serrana do rio de janeiro. Revista Brasileira de Geomorfologia 21:399–419, 2020.

MANCONI, A.; CASU, F.; ARDIZZONE, F.; BONANO, M.; CARDINALI, M.; DE LUCA, C.; GUEGUEN, E.; MARCHESINI, I.; PARISE, M.; VENNARI, C.; LANARI R.; GUZZETTI, F. BRIEF *Communication: Rapid mapping of landslide events: the 3 December 2013 Montescaglioso landslide, Italy*. Natural Hazards and Earth System Science, v. 14, n. 7, p. 1835-1841, 2014.

MANUAL DE GEOTECNIA: TALUDES DE RODOVIAS: ORIENTAÇÃO PARA DIAGNÓSTICO E SOLUÇÕES DE SEUS PROBLEMAS. / Pedro Alexandre Sawaya de Carvalho (coordenador). – São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1991. – (Publicação IPT; n.1843).

MARCELINO, E.V.; NUNES, L. H., KOBAYAMA, M. (2005). Mapeamento de Risco de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina. Caminhos de Geografia.

MARTINS, M. S. Reportagem: Chuvas intensas em Petrópolis. UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) 2022. Disponível em:

<<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-02/petropolis-teve-ontem-chuvas-mais-intensas-que-em-2011-diz-professor>>. Acesso em: fev/ 2022.

MASSAD, F.; CRUZ, P.T.; KANJI, M. A.; ARAUJO FILHO, H. A. de. *Comparison between estimated and measured debris flow discharges and volume of sediments*. In: PAN-AMERICAN SYMPOSIUM ON LANDSLIDES, 2. E CONGRESSO BRASILEIRO DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS (COBRAE), 2., 1997, Rio de Janeiro. Anais... Rio de Janeiro, 1997. V.1, p. 213-222.

MENDES, Rodolfo M; DE ANDRADE, Márcio Roberto M.; TOMASELLA, JAVIER ; DE MORAES, MÁRCIO AUGUSTO E. ; SCOFIELD, GRAZIELA B. *Understanding shallow landslides in Campos do Jordão municipality/SP; Brazil: disentangling the anthropic effects from natural causes in the disaster of 2000*. NATURAL HAZARDS AND EARTH SYSTEM SCIENCES, v. 18, p. 15-30, 2018.

MENDES, Rodolfo Moreda; DE ANDRADE, Marcio Roberto Magalhães; GRAMINHA, Celso Aluísio; PRIETO, Carla Corrêa; DE ÁVILA, Frederico Fernandes ; CAMARINHA, Pedro Ivo Mioni. *Stability Analysis on Urban Slopes: Case Study of an Anthropogenic Induced Landslide in São José dos Campos, Brazil. Geotechnical and Geological Engineering*, v. 36, p. 599-610, 2017.

MENDES, R. M.; FILHO, M. V.; SANTORO, J.; FARIA, D.G.M.; PORTELA, V.D.A. *Proposição de Limiares críticos ambientais para o uso em Sistema de Alertas de Deslizamentos*. Revista do Departamento de Geografia, v. 40, p. 61-77. Universidade de São Paulo. DOI: 10.11606 /rdg.v40i0.165390, 2020.

MENDES, W. *Relação entre os Graus de Limitações do Uso do Solo por Suscetibilidade à Erosão e às Unidades de Mapeamento de Solo*. Revista Brasileira de Geografia, v. 44, n.3, 1982. p.445-76, 1982.

MONTGOMERY, C.W. *Environmental Geology*. Wm. C. Brown Publishers, 1992.

NOBRE, C. A. *Monitoramento de enchentes*. 2020. Disponível em: <<https://g1.globo.com/fantastico/noticia/2022/02/20/monitoramento-das-enchentes-na-regiao-serrana-do-rio-comecou-com-ajuda-de-d-pedro-ii.ghtml>>. Acesso em: fev/2022.

ONU. United Nations Sustainable Development. *17 Goals to Transform Our World. The Sustainable Development Goals*. Disponível em: <https://sdgs.un.org/goals>. Acesso em julho/2021.

PELLEGRINA, G. J. Proposta de um procedimento metodológico para o estudo de problemas geoambientais com base em banco de dados de eventos atmosféricos severos. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, UNESP, 2011.

PEREIRA, S.S Perigosidade a movimentos de vertente na Região Norte de Portugal. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, Universidade de Porto, Porto, PT, 370 p, 2009.

PICIULLO, L. et al. *Definition and performance of a threshold-based regional early warning model for rainfall-induced landslides*. *Landslides*, v. 14, n. 3, p. 995–1008, jun. 2017.

PIEIDADE, A., ZÊZERE, J.L., GARCIA, R.A.C. & OLIVEIRA, S.C. Avaliação e validação de modelos de suscetibilidade a deslizamentos em áreas homogêneas na região a Norte de Lisboa. 16º Congresso da APDR – Regiões de Charneira, Canais de Fronteira e Nós, Universidade da Madeira, Funchal, PT: 1305-1319, 2010.

PIEIDADE, A., ZÊZERE, J.L., GARCIA, R.A.C. & OLIVEIRA, S.C. Modelos de susceptibilidade a deslizamentos superficiais translacionais na Região a Norte de Lisboa. *Finisterra* 46:9–26, 2011.

PPI- Portal Programa de Parcerias e Investimentos. Disponível em: <https://portal.ppi.gov.br/rodovia-br-116-rj-sp-trecho-rio-de-janeiro-a-sao-paulo>. Acesso em: jan/2022.

REICHNBACH, P.; ROSSI, M.; MALAMUD, B.D.; MIHIR, M.; GUZZETTI, F. *A review of statistically-based landslide susceptibility models*. *Earth Sci Rev* 180:60–91, 2018.

RIDENTE JR. Análise da utilização de cartas geotécnicas em diferentes escalas para a gestão ambiental de rodovia em operação. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico. UNESP. Rio Claro. 2008.

ROCHA, V. J. Gestão ambiental no setor rodoviário brasileiro: o caso da pavimentação da BR-163 no Estado do Pará. 2006. 115p. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Humanidades – Departamento de Geografia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

ROSA, L. M. et al. *Landslide susceptibility mapping using the statistical method of Information Value: A study case in Ribeirão dos Macacos basin, Minas Gerais, Brazil*. GEOSCIENCES • An. Acad. Bras. Ciênc. 93 (1) 2021 <https://doi.org/10.1590/0001-3765202120180897>.

SAHA, A.K.; GUPTA, R.P.; SARKAR, I.; ARORA, M.K.; CSAPLOVICS, E. *An approach for GIS-based statistical land slide susceptibility zonation—with a case study in the Himalayas*. Landslides 2(1):61–69, 2005.

SÁNCHEZ, L. E. Avaliação de impacto ambiental: conceitos e métodos. São Paulo. 2006. Oficina de textos. 495p.

SANGCHINI, E.K.; EMAMI, S.N.; TAHMASEBPOUR, N.; POURGHASEMI, H.R.; NAGHIBI, S.A.; ARAMI, S.A.; PRADHAN, B. *Assessment and comparison of combined bivariate and ahp models with logistic regression for land slide susceptibility mapping in the chaharmahal-e-bakhtiari province, Iran*. Arab J Geosci. <https://doi.org/10.1007/s12517-015-2258-9>, 2016.

SEGONI, S. et al. *Combination of rainfall thresholds and susceptibility maps for dynamic landslide hazard assessment at regional scale*. Frontiers in Earth Science, v. 6, 2018.

SHARPE, C. F. S. *Landslides and Related Phenomena: A Study of Mass Movement of Soil and Rock*. n. Columbia University Press, New York, 1938.

SOETERS, R.; VAN WESTEN, C. J. *Slope instability Recognition, analisys and zonation. Landlides: Investigation and Mitigation*. 1996.

SOETERS, R.; VAN WESTEN, C. J.; SIJMONS, K. *Digital geomorphological landslide hazard mapping of the Alpage area, Italy*. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 247. v. 2, n. 1, p. 129–177, 1996.

SOUZA, Carla Juscélia de Oliveira. Dinâmica do Relevo no Estudo Geográfico Urbano: Discussão Teórica e Prática. VI Seminário Latino Americano de Geografia Física, II Seminário Ibero Americano de Geografia Física. Universidade de Coimbra, Maio de 2010.

SÜZEN, M. L.; DOYURAN, V. *A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate*. *Environmental Geology*, v. 45, n. 5, p. 665–679, 1 mar. 2004.

THIERY, Y. et al. *Landslide susceptibility assessment by bivariate methods at large scales: Application to a complex mountainous environment*. *Geomorphology*, v. 92, n. 1–2, p. 38– 59, nov. 2007.

TOMINAGA, L. K. et al. (EDS.). *Desastres naturais: conhecer para prevenir*. 1a. ed ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

UNDRR (*United Nations Office for Disaster Risk Reduction*). *Terminology of Disaster Risk Reduction, 2017*. Disponível em: <<https://www.unisdr.org/we/inform/terminology>> Acesso em: maio/2021.

UNISDR (*United Nations International Strategy for Disaster Reduction*). *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*; United Nations: New York, NY, USA, 2019.

USGS. Catálogo de imagens orbitais. Imagens Landsat 1975, 1995 e 2015. 2017. Disponível em: <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: Jun/2020.

USGS. U. S. *Geological Survey. The landslide handbook - a guide to understanding landslides*. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey Circular 1325, 2008, 129 p.

VALERIANO, M. M. - TOPODATA: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2008 (INPE-15318-RPQ/818). 75 p.

VARNES, D.J. *Landslide hazard zonation: a review of principles and practice*. *Commission on landslides of the IAEG UNESCO N. 1984*. Hazards No. 3 WORLD ROAD CONGRESS, 20., Montreal, 1955. The Environment. Paris: PIARC, 1995.

VARNES, D. J. *Slope Movement Types and Processes*. In: TRB SPECIAL REPORT 176, LANDSLIDES: ANALYSIS AND CONTROL. United States: 1978.

WINCHESTER, L. AND SZALACHMAN, R.: *The urban poor's vulnerability to the impacts of climate change in Latin America and the Caribbean. A policy agenda*. Proceedings of Fifth Urban Research Symposium, Marseille, 2009.

YAN, T.Z. *Recent advances of quantitative prognoses of landslide in China*. Landslides. In: Proceedings of the fifth international symposium on landslides, Lausanne 2:1263–1268, 1988.

YIN, K.L.; YAN, T.Z. *Statistical prediction model for slope instability of metamorphosed rocks*. In: Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides, vol 2, pp 1269–1272, 1988.

ZÊZERE, J.L. *Movimentos de vertente e perigosidade geomorfológica na região a norte de Lisboa*. PhD thesis, Lisboa: Universidade de Lisboa, 1977.

ZÊZERE, J.L. *Landslide susceptibility assessment considering landslide typology. A case study in the area north of Lisbon (Portugal)*. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2: 73-82, 2002.

ZÊZERE, J.L., GARCIA, E.A.C., OLIVEIRA, S.C. & REIS, E. *Análise sensitiva na avaliação da susceptibilidade e deslizamentos na região a norte de Lisboa*. X Colóquio Ibérico de Geografia, APG, Évora, PT. 2005. Disponível em: http://www.apgeo.pt/files/docs/CD_X_Coloquio_Iberico_Geografia/pdfs/075.pdf

ZÊZERE, J.L., GARCIA, E.A.C., OLIVEIRA, S.C. & REIS, E. *Landslide risk analysis in the area North of Lisbon (Portugal): evaluation of direct and indirect costs resulting from a motorway disruption by slope movements*. 2007. Landslides 4(2):123–136

ZHANG, G.; CAI, Y.; ZHENG, Z.; ZHEN, J.; LIU, Y.; HUANG, K. *Integration of the statistical index method and the analytic hierarchy process technique for the assessment of landslide susceptibility in Huizhou, China*. Catena 142:233–244, 2016.

ZHOU, C.H.; LEE, C.F.; LI, J.; XU, Z.W.. *On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong*. *Geomorphology* 43(3–4):197–207, 2002.

ZUQUETTE, L. V. Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras. 1987. 673 p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, 1987.

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. *Cartografia Geotécnica*. São Paulo, Oficina de Textos, 2004. ISBN 85-86238-38-4.

ZUQUETTE, L. V. *Geotecnia Ambiental*. 2015. 399 p. Elsevier Editora. 1 ed. Rio de Janeiro, 2015.

ZUQUETTE, L.V.; NAKAZAWA, V.A. *Cartas de geologia de engenharia*. In: OLIVEIRA, A.M.S. & BRITO, S.N.A. (Eds.), *Geologia de Engenharia*. São Paulo: ABGE, 1998.