

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

**Mapeamento das susceptibilidades a inundações e movimentos
de massa usando SIG no município de Itajubá, MG**

Marina Batista de Carvalho

Itajubá, agosto de 2018.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS**

Marina Batista de Carvalho

**Mapeamento das susceptibilidades a inundações e movimentos
de massa usando SIG no município de Itajubá, MG**

**Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Meio
Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Itajubá
como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em
Ciências em Meio Ambiente e Recursos Hídricos.**

Área de Concentração: Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Orientadora: Dra. Nívea Adriana Dias Pons

**Agosto de 2018
Itajubá**

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por todas as bênçãos em minha vida e por todas as oportunidades ao longo do meu caminho.

À minha família, a minha mãe Vera e ao meu pai Rômulo, por me darem todo o suporte ao longo da minha formação e, acima de tudo, por serem grandes exemplos de seres humanos, nos quais vou sempre me espelhar.

Aos meus amigos e colegas pela amizade, apoio e por todos os momentos vividos nesta caminhada.

À minha orientadora, Nívea, por toda disponibilidade e conhecimento compartilhado.

À UNIFEI e aos meus professores por todo aprendizado e amadurecimento ao longo desses anos de graduação e mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos que possibilitou a realização desta pesquisa.

O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis.

José de Alencar

RESUMO

As inundações e os movimentos de massa são responsáveis por diversos prejuízos econômicos, sociais e ambientais. Uma das ferramentas para prevenir estes danos são as cartas de suscetibilidade produzidas com o auxílio das geotecnologias. Deste modo, o objetivo deste trabalho foi analisar as suscetibilidades a inundações e movimentos de massa no município de Itajubá (MG), por meio de cartas de suscetibilidade, avaliando-se quais fatores mais interferem nesses processos. Para isto, na determinação da suscetibilidade a inundações, primeiramente, procedeu-se ao cálculo de parâmetros/índices morfométricos para cada sub-bacia que compõe a bacia na qual Itajubá está inserida, em seguida, aplicou-se o modelo HAND (*Height Above Nearest Drainage*) para toda a bacia e, por fim, cruzaram-se os resultados destas duas etapas, obtendo-se a suscetibilidade final à inundações. Com relação aos movimentos de massa, as áreas suscetíveis foram determinadas aplicando-se o processo hierárquico analítico (do inglês, AHP). O mapa final de suscetibilidade a inundações apresentou 71,42% da área com suscetibilidade baixa, 16,70% suscetibilidade média e 11,88% suscetibilidade alta. As áreas com altas suscetibilidades ocorrem em função, principalmente, da planície de inundações do Rio Sapucaí, resultante do modelo HAND e da baixa relação de relevo, ou seja, relevos mais planos, resultante do cálculo dos índices morfométricos. O mapa final de suscetibilidade a movimentos de massa apresentou 47,02% da área com suscetibilidade baixa, 43,22% suscetibilidade média e 9,76% suscetibilidade alta. A suscetibilidade, predominantemente, baixa e média justifica-se, principalmente, pelo fato de que nas partes onde a declividade e a classe de solo contribuem de forma mais significativa para os processos de movimentos de massa, o solo é, na maior parte, coberto por vegetação de dossel fechado. Sugeriu-se a análise futura da suscetibilidade a inundações, pelo cálculo de índices morfométricos, utilizando-se sub-bacias com áreas menores. Notou-se a necessidade de se avaliar um número maior de seções transversais dos rios, para se representar melhor a área de estudo no modelo HAND. Com relação aos movimentos de massa, observou-se as limitações ocasionadas pelas escalas dos dados de entrada. Contudo, ressalta-se a importância da elaboração de cartas de suscetibilidade para o planejamento urbano, controle da expansão urbana e avaliação de cenários potenciais de risco, podendo impor medidas de restrição de ocupação de determinadas áreas suscetíveis ou o desenvolvimento de ações voltadas à redução de riscos em áreas já ocupadas.

Palavras-chave: Inundações; Movimentos de massa; Índices morfométricos; Modelo HAND; Processo hierárquico analítico.

ABSTRACT

Floods and mass movements are responsible for several economic, social and environmental damages. One of the tools to prevent this damage are the susceptibility charts produced with the aid of geotechnologies. In this way, the objective of this work was to analyze the floods and mass movements susceptibilities in the city of Itajubá (MG), by means of charts of susceptibility, evaluating which factors most interfere in these processes. In order to determine the flood susceptibility, first, the calculation of morphometric parameters/indexes was performed for each sub basin that composes the basin in which Itajubá is inserted, then the HAND model (Height Above Nearest Drainage) was applied to the entire basin and, finally, the results of these two stages were crossed, obtaining the final flood susceptibility. The areas susceptible to mass movements were determined by applying the hierarchical analytical process (AHP). The final flood susceptibility map had 71.42% of the area with low susceptibility, 16.70% medium susceptibility and 11.88% high susceptibility. The areas with high susceptibilities are mainly due to the floodplain of the Sapucaí river, resulting from the HAND model, and the low relief ratio, that is flat reliefs, resulting from the calculation of the morphometric indexes. The final mass movements susceptibility map had 47.02% of the area with low susceptibility, 43.22% medium susceptibility and 9.76% high susceptibility. The predominantly low and medium susceptibility is mainly because in the areas where declivity, elevation and soil class contribute most significantly to mass movement processes, the soil is predominantly covered by dense vegetation. A future analysis of flood susceptibility was suggested using morphometric indicators, using sub-basins with the smaller areas. It is necessary to evaluate a greater number of cross sections of the rivers, to represent better the study area in the HAND model. About mass movements, we observed the limitations caused by the scales of the input data. However, it is important to note the importance of the development of sustainability charts for urban planning, control of urban expansion and evaluation of potential risk scenarios, which may impose actions restricting the occupation of certain susceptible areas or the development of actions aimed at reducing risks in areas already occupied.

Keywords: Flood; Mass movements; Morphometric indexes; HAND model; Analytical hierarchical process

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema com a estrutura institucional do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil .	11
Figura 2: Elevação do nível de um rio provocada pelas chuvas, do nível normal até a ocorrência de uma inundação	12
Figura 3: Etapas do modelo HAND	17
Figura 4: Definição de classes pelo modelo HAND	17
Figura 5: Esquema dos principais movimentos de massa.....	19
Figura 6: Esquema das causas e agentes dos movimentos de massa	22
Figura 7: Esquema das metodologias de mapeamento a suscetibilidade a deslizamento mais utilizadas	26
Figura 8: Funções <i>fuzzy</i>	29
Figura 9: Principais etapas da metodologia da pesquisa.....	30
Figura 10: Mapa de localização do município de Itajubá	32
Figura 11: Divisão por trecho da bacia hidrográfica do Rio Sapucaí	33
Figura 12: Registros fotográficos de inundações em Itajubá.....	36
Figura 13: Mancha de Inundação para TR = 10 anos (Cota de inundação = 845,27m)	38
Figura 14: Deslizamento no bairro Vila Isabel, nov. 2017	39
Figura 15: Esquema da etapa de cálculo dos índices morfométricos	41
Figura 16: Esquema com a hierarquia de drenagem pelo método de Strahler.....	43
Figura 17: Classes de fatiamento adotadas no âmbito da aplicação do modelo HAND em planícies e terraços	45
Figura 18: Localização da seção do Rio Sapucaí onde foi realizado o levantamento topobatimétrico	46
Figura 19: Levantamento topobatimétrico de uma seção do Rio Sapucaí.....	46
Figura 20: Esquema com as etapas da metodologia para determinação das áreas suscetíveis a movimentos de massa	48
Figura 21: Mapa com a delimitação das sub-bacias	52
Figura 22: Mapa de suscetibilidade a inundação pelo cálculo dos índices morfométricos	55
Figura 23: Mapa de suscetibilidade a inundação pela aplicação do Modelo HAND	56
Figura 24: Mapa final de suscetibilidade a inundação.....	57
Figura 25: Destaque para a sub-bacia 2	58
Figura 26: Destaque para a sub-bacia 4	58

Figura 27: Destaque para a sub-bacia 8	59
Figura 28: Destaque para a sub-bacia 10	59
Figura 29: Sobreposição da classe de suscetibilidade alta à imagem de satélite do município de Itajubá.....	61
Figura 30: Sobreposição da mancha de inundação gerada por Silva (2006) ao mapa final de suscetibilidade à inundação.....	62
Figura 31: Mapa de declividade.....	63
Figura 32: Mapa de solos	64
Figura 33: Mapa de distâncias dos rios principais	64
Figura 34: Mapa de distâncias das estradas	65
Figura 35: Mapa de cobertura do solo	65
Figura 36: Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa	70
Figura 37: Movimentos de massa inseridos na classe de suscetibilidade baixa	72
Figura 38: Movimentos de massa inseridos na classe de suscetibilidade média	73
Figura 39: Movimentos de massa inseridos na classe de suscetibilidade alta	74
Figura 40: Ponto 1 – Classe de suscetibilidade baixa	76
Figura 41: Ponto 2 – Classe de suscetibilidade baixa	76
Figura 42: Ponto 3 – Classe de suscetibilidade média.....	77
Figura 43: Aviso sobre o escorregamento na rua Clemente Teodoro da Silva, bairro Vila Isabel....	78
Figura 44: Detalhe para a parte de baixo do escorregamento na rua Clemente Teodoro da Silva, bairro Vila Isabel.....	78
Figura 45: Escorregamento na rua Clemente Teodoro da Silva, bairro Vila Isabel	79
Figura 46: Ponto 4 – Classe de suscetibilidade média	79
Figura 47: Ponto 5 – Classe de suscetibilidade média	80
Figura 48: Destaque para os movimentos de massa do ponto 5	81
Figura 49: Ponto 6 – Classe de suscetibilidade alta	82
Figura 50: Destaque para os movimentos de massa do ponto 6	82
Figura 51: Ponto 7 – Classe de suscetibilidade alta	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação e Codificação Brasileira de Desastres.....	6
Tabela 2: Descrição das prioridades estabelecidas pelos três marcos mundiais de referência para Redução de Risco de Desastres.....	9
Tabela 3: Classificação dos movimentos de massa segundo o sistema de Magalhães Freire	20
Tabela 4: Escala de importância entre dois parâmetros no AHP	27
Tabela 5: Índices de Consistência Aleatória (RI)	28
Tabela 6: Relato histórico de cheias em Itajubá	33
Tabela 7: Cotas e vazões de inundações para o período de 1874 a 2002, Estação-base COPASA...	36
Tabela 8: Deslizamentos divulgados em imprensa local	39
Tabela 9: Banco de dados espaciais	40
Tabela 10: Valores inseridos no modelo HAND para a determinação das classes de suscetibilidade a inundação	47
Tabela 11: Valores para reclassificação do mapa gerado a partir do cálculo dos índices morfométricos	47
Tabela 12: Valores para reclassificação do mapa gerado pelo modelo HAND.....	47
Tabela 13: Matriz de correlação entre as duas classificações de suscetibilidade obtidas segundo os índices morfométricos e o modelo HAND	48
Tabela 14: Valores para reclassificação do mapa final.....	48
Tabela 15: Classificação de declividade segundo EMBRAPA	49
Tabela 16: Distâncias com relação aos rios e estradas.....	49
Tabela 17: Dados resultantes dos cálculos dos índices morfométricos	53
Tabela 18: Área das classes de suscetibilidade a inundação pelo cálculo dos índices morfométricos	55
Tabela 19: Área das classes de suscetibilidade a inundação pelo modelo HAND	56
Tabela 20: Área das classes no mapa final de suscetibilidade a inundação.....	57
Tabela 21: Áreas referentes a sobreposição da mancha de inundação de Silva (2006) à classe alta do mapa final de suscetibilidade à inundação	62
Tabela 22: Porcentagem das classes dos fatores predisponentes de deslizamento	66
Tabela 23: Matriz de comparação par a par das classes dos fatores predisponentes a movimentos de massa.....	68

Tabela 24: Matriz de comparação par a par dos fatores predisponentes a movimentos de massa	69
Tabela 25: Área das classes de suscetibilidade a deslizamento	70
Tabela 26: Área dos movimentos de massa por classe de suscetibilidade.....	75

ABREVIACÕES

AHP - *Analytic Hierarchy Process*

APP – Área de Preservação Permanente

CEDEC - Coordenadoria Estadual de Defesa Civil

CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais

CENAD - Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres

CEPED - Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil

COBRADE - Classificação e Codificação Brasileira de Desastres

CODAR – Classificação de Desastres, Riscos e Ameaças

COPASA - Companhia de Saneamento de Minas Gerais

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

CRED - *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*

DIRDN - Década Internacional para Redução dos Desastres Naturais

DN – *Digital Number*

EM-DAT - *Emergency Events Database*

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

ESRI - *Environmental Systems Research Institute*

FUNCAP – Fundo Nacional para Calamidades Públicas, Proteção e Defesa Civil

GADE – Grupo de Apoio a Desastres

HAND – *Height Above Nearest Drainage*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

L1TP - *Level 1 Standard Terrain Correction Product*

MCDM - *Multiple Criteria Decision Making*

MDCA - *Multiple Criteria Decision Aid*

MDE - Modelo Digital de Elevação

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISDR - *International Strategy for Disaster Reduction*

OLI - *Operational Land Imager*

OMS - Organização Mundial da Saúde

ONU - Organização das Nações Unidas

PNGRRDN - Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais

PNPDEC - Política Nacional de Proteção e Defesa Civil

S2ID – Sistema Integrado de Informações sobre Desastres

SEDEC - Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil

SIG - Sistema de Informações Geográficas

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

TOA - *Top of Atmosphere*

UNISDR - *United Nations Office for Disaster Risk Reduction*

UTM - Universal Transversa de Mercator

USGS - *United States Geological Survey*

WLC - *Weighted Linear Combination*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	4
2.1. Objetivo Geral	4
2.2. Objetivos Específicos	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. Desastres naturais	5
3.2. Marcos na gestão de desastres.....	8
3.3. Legislação e estrutura institucional no Brasil para a gestão de desastres	9
3.4. Inundações.....	12
3.4.1. Processos analisados	12
3.4.2. Agentes predisponentes.....	13
3.4.3. Metodologia para zoneamento de suscetibilidades	14
3.4.3.1. Índices morfométricos.....	14
3.4.3.2. Modelo HAND.....	17
3.5. Movimentos de massa	18
3.5.1. Processos analisados	18
3.5.2. Agentes predisponentes.....	21
3.5.3. Metodologia para zoneamento de suscetibilidades	24
3.5.3.1. Processo Hierárquico Analítico	26
4. METODOLOGIA.....	30
4.1. Etapas da metodologia.....	30
4.2. Caracterização da área de estudo.....	31
4.2.1. Inundações em Itajubá	33
4.2.2. Movimentos de massa em Itajubá.....	38

4.3.	Elaboração do banco de dados espaciais	39
4.4.	Mapeamento de suscetibilidades a inundações	40
4.4.1.	Cálculo dos índices morfométricos	41
4.4.2.	Aplicação do modelo HAND	45
4.5.	Mapeamento de suscetibilidades a movimentos de massa – Processo Hierárquico Analítico (AHP).....	48
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	52
5.1.	Mapeamento de suscetibilidades a inundações	52
5.2.	Mapeamento de suscetibilidades a movimentos de massa.....	63
6.	CONCLUSÃO.....	84
	REFERÊNCIAS.....	86
	ANEXOS	94

1. INTRODUÇÃO

Todos os anos, em diversas partes do mundo, são registrados inúmeros casos de inundações e movimentos de massa. Estes eventos são responsáveis por diversos impactos ambientais, prejuízos financeiros, pessoas desalojadas e, não raro, vítimas fatais. Estes fenômenos, que têm ocorrências naturais, têm seus efeitos negativos potencializados em função da ação humana, decorrente do uso e ocupação do solo sem o devido planejamento. Características naturais intrínsecas como pedologia, geologia, relevo, entre outros, também são fatores que influenciam na frequência e magnitude destes eventos. As inundações e deslizamentos estão intimamente ligados, uma vez que ambos estão relacionados com precipitação, escoamento e saturação do solo por água, de modo que a ocorrência de um pode favorecer a ocorrência do outro e vice-versa, sendo comum a ocorrência de ambos os fenômenos em episódios de chuvas intensas.

No Brasil, a contar de meados do século XX - quando se intensificaram os estudos relacionados a estes fenômenos - os eventos de movimentos de massa com piores consequências financeiras, sociais e ambientais que se tem registro são: de Santos-SP (1956), de Caraguatatuba-SP (1967), da cidade do Rio de Janeiro-RJ (1966 e 1967) e Tubarão-SC (1974) (BIGARELLA, 2003). E, mais recentemente, os ocorridos no Vale do Itajaí em Santa Catarina (2008), na região serrana do Rio de Janeiro (2011) e no litoral paranaense (2011) foram classificados como de elevadas proporções.

Dentre os principais episódios de inundação registrados no Brasil destacam-se: o de Santa Catarina (1855), Porto Alegre-RS (1941), Caraguatatuba-SC (1967), Minas Gerais e Espírito Santo (1979), o do Vale do Itajaí-SC (1983-84), de Santa Catarina (2008), de diversos estados das regiões Norte e Nordeste (2009), Alagoas e Pernambuco (2010) e região serrana do Rio de Janeiro (2011).

O município de Itajubá tem inúmeros casos de cheias de grande magnitude ao longo de sua história. Segundo levantamento realizado por Barbosa, Oliveira, G. e Oliveira, T. (2015), a primeira cheia que se tem registro no município data de 1874 e a mais recente, de 2009, somando, neste período, um total de 12 eventos de cheias de grande magnitude. Ainda, segundo os autores, uma cheia é considerada de grande magnitude, quando a altura do nível d'água em relação à cota altimétrica de referência é igual ou superior a 6 metros (em relação ao nível de vazante).

De acordo com o Banco de Dados Internacional de Desastres (EM-DAT) (2016), entre 1997 e 2016, em todo o mundo, as inundações e os movimentos de massa foram responsáveis por cerca de 2 milhões de atingidos, aproximadamente 160 mil vítimas fatais e prejuízos financeiros superiores a 500 bilhões de dólares, sendo as inundações as maiores responsáveis por estes valores.

Segundo o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED, 2012), entre 1991 e 2010, as inundações corresponderam a 29,56% do total de 96.220.876 de afetados por desastres naturais no Brasil, enquanto que os movimentos de massa foram responsáveis por apenas 2,08% deste total. Das 2475 mortes registradas, neste mesmo período, 43,19% foram atribuídas às inundações, representando o desastre natural com maior número de mortes no país, enquanto os movimentos de massa foram responsáveis por 20,40% do total de mortes.

De acordo com o Plano de Emergência Pluviométrica 2012/2013 da CEDEC (2013), no período chuvoso de 2011 a 2012 houve um aumento de 27% no número de municípios mineiros atingidos pelos desastres provocados pelas chuvas em relação à média histórica dos últimos 10 anos, que foi de 215 municípios no período.

Ainda, segundo o Plano de Emergência Pluviométrica, os danos humanos, materiais, ambientais e prejuízos econômicos e sociais dos municípios atingidos pelas chuvas no período de 2007 a 2012, somaram um prejuízo total de R\$ 1.632.192.728,85. Somente em janeiro de 2012, 186 municípios foram atingidos por desastres ocasionados pelas chuvas.

A lei 12.608/2012, Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC), define um de seus objetivos no artigo 5º (BRASIL, 2012): “VII - promover a identificação e avaliação das ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades a desastres, de modo a evitar ou reduzir sua ocorrência”. E, também, o Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais (PNGRRDN) prevê a elaboração de cartas de suscetibilidade (BRASIL, 2013).

Neste contexto, o geoprocessamento é uma importante ferramenta no auxílio a determinação de áreas suscetíveis a inundações e movimentos de massa. Dentre as geotecnologias que compõem o geoprocessamento está o Sistema de Informações Geográficas (SIG), que engloba um conjunto de dados, *softwares*, *hardwares*, metodologias e recursos humanos, que são responsáveis por operar os programas, manipular os equipamentos e dados e definir metodologias adequadas (FARINA, 2006).

Desta forma, os SIG representam uma importante ferramenta de apoio à decisão, através da integração de dados para análise, provenientes de diferentes fontes e, também, por reunirem um extenso conjunto de aplicativos para coletar, armazenar, recuperar, transformar e representar dados espaciais e dados estatísticos ou textuais a eles relacionados. Os métodos convencionais de análise tornam essa integração bastante difícil e não raro a inviabilizam, em função do tempo necessário para efetuar-la (FARINA, 2006).

Diante do exposto, a proposta do trabalho é mapear áreas suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa e a inundações no município de Itajubá, por meio do uso de ferramentas de geoprocessamento, produzindo um material que sirva de subsídio para outros estudos e ações que visem minimizar os impactos negativos decorrentes desses fenômenos.

2. OBETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Analisar as suscetibilidades a inundações e movimentos de massa no município de Itajubá (MG), por meio de cartas de suscetibilidade, avaliando-se quais fatores mais interferem nesses processos.

2.2. Objetivos Específicos

- Levantar dados sobre gestão e legislação relacionadas a desastres naturais;
- Estudar os fatores predisponentes para a ocorrência de inundações e movimentos de massa;
- Mapear áreas suscetíveis a inundações no município de Itajubá por meio do cálculo de parâmetros/índices morfométricos para cada sub-bacia que compõe a bacia na qual Itajubá está inserida;
- Mapear áreas suscetíveis a inundações no município de Itajubá por meio da aplicação do modelo HAND para toda a bacia;
- Mapear áreas suscetíveis à movimentos de massa no município de Itajubá, por meio da aplicação do processo hierárquico analítico (AHP);
- Identificar os fatores que mais contribuem para a suscetibilidade a inundações e movimentos de massa no município de Itajubá.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão bibliográfica é dividida em cinco partes principais. Nas três primeiras, é realizada uma contextualização com relação à temática de desastres naturais, apresentando algumas definições sobre o assunto, os principais marcos mundiais na gestão de desastres e a legislação e estrutura organizacional no Brasil para gestão de desastres. Em seguida, dois itens são dedicados a abordar os processos que são objeto deste estudo: inundações e movimentos de massa, bem como os fatores predisponentes para ocorrência destes eventos e a metodologia utilizada nesta pesquisa para mapear áreas suscetíveis a estes processos.

3.1. Desastres naturais

Diversas são as definições existentes para conceituar a palavra desastre. De acordo com a Política Nacional de Defesa Civil (SEDEC, 2007, p. 8), desastre é o “resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema vulnerável, causando danos humanos, materiais e ambientais e consequentes prejuízos econômicos e sociais”. Sua intensidade varia de acordo com a magnitude do evento e a vulnerabilidade do meio e é medida em função dos danos e prejuízos causados.

O Escritório das Nações Unidas para Redução do Risco de Desastres (UNISDR, 2017a) apresenta a definição de desastre como:

“uma séria interrupção do funcionamento de uma comunidade ou uma sociedade, em qualquer escala, devido a eventos perigosos que interagem com condições de exposição, vulnerabilidade e capacidade, levando a uma ou mais das seguintes: perdas e impactos humanos, materiais, econômicos e ambientais”.

Segundo o EM-DAT (2017) do Centro para Pesquisa sobre Epidemiologia de Desastres (CRED) e da Organização Mundial da Saúde (OMS), um evento pode ser registrado como um desastre quando atender a, pelo menos, um dos seguintes critérios: 10 ou mais mortes de pessoas, 100 ou mais pessoas afetadas/feridas/sem teto, declaração do país de um estado de emergência e/ou recurso de assistência internacional.

A Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE) (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2012), que substituiu a Classificação de Desastres, Riscos e Ameaças (CODAR), da Política Nacional de Defesa Civil, até então utilizada, foi desenvolvida a partir da classificação empregada pelo EM-DAT, com o propósito de adequar a classificação

brasileira às normas internacionais. Esta classificação divide os desastres em duas grandes categorias - natural e tecnológico - estruturadas em grupo, subgrupo, tipo e subtipo, aos quais são atribuídos um código e simbologia específicos. Na Tabela 1, é apresentada a COBRADE até o nível de subgrupo (MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2012).

Tabela 1: Classificação e Codificação Brasileira de Desastres

	Grupo	Subgrupo
Naturais	1 - Geológico	1 - Terremoto; 2 – Emissão vulcânica; 3 – Movimento de massa; 4 - Erosão
	2 - Hidrológico	1 – Inundações; 2 – Enxurradas; 3 – Alagamentos
	3 - Meteorológico	1 - Sistemas de grande escala/escala regional; 2 – Tempestades; 3 – Temperaturas extremas
	4 - Climatológico	1 – Seca
	5 - Biológico	1 – Epidemias; 2 - Infestações/pragas
Tecnológicos	1 - Desastres relacionados a substâncias radioativas	1 - Desastres siderais com riscos radioativos; 2 - Desastres com substâncias e equipamentos radioativos de uso em pesquisas, indústrias e usinas nucleares; 3 - Desastres relacionados com riscos de intensa poluição ambiental provocada por resíduos radioativos
	2 - Desastres relacionados a produtos perigosos	1 - Desastres em plantas e distritos industriais, parques e armazenamentos com extravasamento de produtos perigosos; 2 - Desastres relacionados à contaminação da água; 3 - Desastres relacionados a conflitos bélicos; 4 - Desastres relacionados a transporte de produtos perigosos
	3 - Desastres relacionados a incêndios urbanos	1 - Incêndios urbanos
	4 - Desastres relacionados a obras civis	1 - Colapso de edificações; 2 - Rompimento/colapso de barragens;
	5 - Desastres relacionados a transporte de passageiros e cargas não perigosas	1 - Transporte rodoviário; 2 - Transporte ferroviário; 3 - Transporte aéreo; 4- Transporte marítimo; 5 - Transporte aquaviário

Fonte: Adaptado de Ministério da Integração Nacional (2012)

Embora a maioria dos desastres naturais seja decorrente de eventos climáticos extremos, a forma como se dá a ocupação do território interfere diretamente na evolução destes processos. O mau uso do solo, com desmatamento, ocupação irregular de encostas e demais Áreas de Preservação Permanente (APP), aumentam a vulnerabilidade do sistema e, conseqüentemente, os impactos negativos (sociais, ambientais e econômicos) quando deflagram estes eventos. As APP estabelecidas na lei 12.651 (BRASIL, 2012) tem, dentre outras, a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a estabilidade geológica, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas. São áreas ecologicamente sensíveis e, por esta razão, precisam ser protegidas de usos inadequados. Somado a isso, Skansi et al. (2013) observaram forte tendência

de aumento de eventos mais intensos de precipitação, os quais tendem a agravar, ainda mais, os casos de enchentes, inundações e escorregamentos de encostas.

Deste modo, a gestão de desastres é uma questão de cunho socioeconômico e ambiental, que deve compreender a adoção de políticas públicas que considerem, desde a preparação das comunidades para o enfrentamento de eventos naturais extremos, até medidas de gestão territorial e urbana.

No âmbito da gestão de desastres, é importante definir, ainda, alguns conceitos, para a compreensão do tema. São estes: suscetibilidade, ameaça, vulnerabilidade, perigo, risco e resiliência.

Entende-se por suscetibilidade, a predisposição ou propensão ao desenvolvimento de um fenômeno ou processo em uma área em função de suas características, independente da previsão de quando poderá ocorrer o evento e, tampouco, do grau de certeza atribuível a essa possibilidade (FELL et al., 2008).

Ameaça é o fenômeno ou processo cuja dinâmica pode gerar consequências negativas em relação aos elementos expostos (pessoas, edificações, infraestrutura, bens materiais, serviços, recursos naturais) (FELL et al., 2008).

Já a vulnerabilidade se refere ao grau (0 a 1) de perdas e danos associados aos elementos expostos, quanto maior o grau, maior a vulnerabilidade (JULIÃO et al., 2009).

O termo perigo, também denominado periculosidade ou perigosidade, representa uma condição com potencial para causar perdas e danos num dado período de tempo (JULIÃO et al., 2009).

Risco corresponde à medida da ameaça e de suas eventuais consequências (financeiras, bens, vidas) num dado intervalo de tempo (JULIÃO et al., 2009).

Por fim, destaca-se o termo resiliência, cada vez mais utilizado nos estudos sobre desastres, como a capacidade de uma comunidade exposta ao risco e ao perigo de recuperar-se dos efeitos de um desastre natural (UNISDR, 2017a).

3.2. Marcos na gestão de desastres

Em 1989, em uma Assembleia Geral, a Organização das Nações Unidas (ONU) aprovou a Resolução 44/236 (ONU, 1989), que designou a década de 90 como a Década Internacional para Redução dos Desastres Naturais (DIRDN) e, para tanto, foram definidas como metas: reduzir as consequências dos eventos danosos, organizar corpo técnico-científico, estimular atividades científicas, difundir informações técnicas e tomar medidas de avaliação, prevenção e diminuição dos efeitos dos desastres naturais.

No ano de 1994, ocorreu a 1ª Conferência Mundial sobre Prevenção de Desastres Naturais, que emitiu a "Estratégia e Plano de Ação de Yokohama para um Mundo mais Seguro" (ONU, 1994), que representa o primeiro plano para a criação de uma política de redução de desastres com orientações sociais comunitárias.

Após o fim da DIRDN, em 1999, foi criada, pelas Nações Unidas, a Estratégia Internacional de Redução de Desastres (ISDR, do inglês). O UNISDR é o secretariado permanente da Estratégia Internacional em Genebra e mandatado pela Assembleia Geral da ONU, com a missão de construir a capacidade de resiliência e promover a redução do risco de desastres (UNISDR, 2017b).

Em 2005, ocorreu em Kobe, Japão, a Conferência Mundial sobre Redução de Desastres, a qual teve como resultado o Marco de Ação de Hyogo, adotado por 168 países integrantes das Nações Unidas, com o objetivo de aumentar a resiliência das comunidades e reduzir o risco de desastres (UNISDR, 2005).

E, em 2015, foi realizada em Sendai, no Japão, a 3ª Conferência Mundial sobre a Redução do Risco de Desastres, a partir da qual foi adotado o Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030. Neste documento se reafirma a necessidade de construir a resiliência das nações e comunidades frente aos desastres e o compromisso de reduzir os desastres (ONU, 2015).

A Tabela 2 sintetiza as prioridades dos três marcos mundiais supracitados (SOARES, 2017).

Tabela 2: Descrição das prioridades estabelecidas pelos três marcos mundiais de referência para Redução de Risco de Desastres

Marco	Ano	Prioridades
Estratégia e Plano de Ação de Yokohama	1994	<ul style="list-style-type: none"> • Recomenda ações que visem a redução de desastre a nível comunitário, nacional, regional e internacional; • Ações referenciadas no desenvolvimento e uma cultura mundial de prevenção de desastres; • Envolve cooperação regional, estratégias conjuntas e compartilhamento de informações e tecnologias entre países expostos a riscos semelhantes; • Envolve a cooperação internacional.
Marco de Ação de Hyogo	2005	<p>Estabelece cinco áreas prioritárias para tomadas de decisão dos países:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fazer com que a redução dos riscos de desastres seja uma prioridade; • Conhecer os riscos locais e tomar medidas, com o investimento em capacidades científicas e técnicas; • Desenvolver maior compreensão e conscientização sobre redução de risco de desastres; • Reduzir o risco; • Estar preparado para atuar, com a prática periódica dos planos de contingência e com os fundos de emergência direcionados a atividades de preparação, resposta e recuperação.
Marco de Sendai	2015	<p>Estabelece quatro prioridades de ação:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Compreensão do risco de desastres; • Fortalecimento da governança do risco de desastres para gerenciar o risco de desastres; • Investimento na redução do risco de desastres para resiliência; • Melhoria na preparação para desastres a fim de providenciar uma resposta eficaz e de reconstruir melhor em recuperação, reabilitação e reconstrução.

Fonte: Adaptado de Soares (2017)

3.3. Legislação e estrutura institucional no Brasil para a gestão de desastres

De acordo com a Constituição Federal (BRASIL, 1988), compete a União legislar sobre defesa civil e promover a defesa contra calamidades públicas. Cabe aos bombeiros, vinculados aos governos estaduais, executar as atividades de defesa civil. Na esfera municipal, atua o planejamento urbano, por meio do controle da ocupação de áreas urbanas de risco.

Em 2012, com a aprovação da lei 12.608 (BRASIL, 2012), foram incorporadas, mais fortemente, ações de prevenção. Nesta lei, também foram definidas as responsabilidades dos entes federados. Segundo esta lei, cabe a União, entre outras atividades, coordenar o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil, expedir normas, instituir e manter o cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos e instituir o Plano Nacional de Proteção e Defesa Civil. Aos estados cabe coordenar as ações do Sistema, em articulação com a União e os municípios. E, aos municípios, compete incorporar as ações de Proteção e Defesa Civil no planejamento municipal, como, por exemplo, por meio da fiscalização e controle da ocupação de áreas de risco.

A lei 12.608, que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil, também dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil, composto por órgãos de Proteção e Defesa Civil da União, dos estados, Distrito Federal e dos municípios. Na Figura 1, é apresentado o esquema com a composição do Sistema (GANEM, 2014).

O Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil está vinculado ao Ministério da Integração Nacional. É composto por representantes da União, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios e tem por objetivo propor normas e expedir procedimentos para implantação e monitoramento da Política Nacional de Defesa Civil.

A Secretaria Nacional de Proteção e Defesa Civil é o órgão coordenador do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil e inclui, entre suas funções, ações de prevenção e redução de desastres, implementação de órgãos de defesa civil, articulação com os Estados, o Distrito Federal e os Municípios, entre outras funções. A Secretaria é composta pelos: Departamento de Articulação e Gestão, relacionado à gestão de seus recursos financeiros e humanos; Departamento de Minimização de Desastres, que assume funções de prevenção de desastres, planejamento de ações e articulação e fortalecimento institucional do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil; e o Departamento de Reabilitação, que assume as ações coordenadas com entes federados atingidos por desastres. A Secretaria também mantém o Sistema Integrado de Informações sobre Desastres, quem mantém o banco de dados sobre ocorrências de desastres.

Pode-se citar, entre os órgãos setoriais de proteção e defesa civil que promovem diversas ações vinculadas a este tema: o Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação; o Ministério do Meio Ambiente; o Ministério das Cidades; o Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento; o Ministério da Educação; o Ministério da Saúde; a Caixa Econômica Federal; o Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social; e o Banco do Brasil (GANEM, 2014).

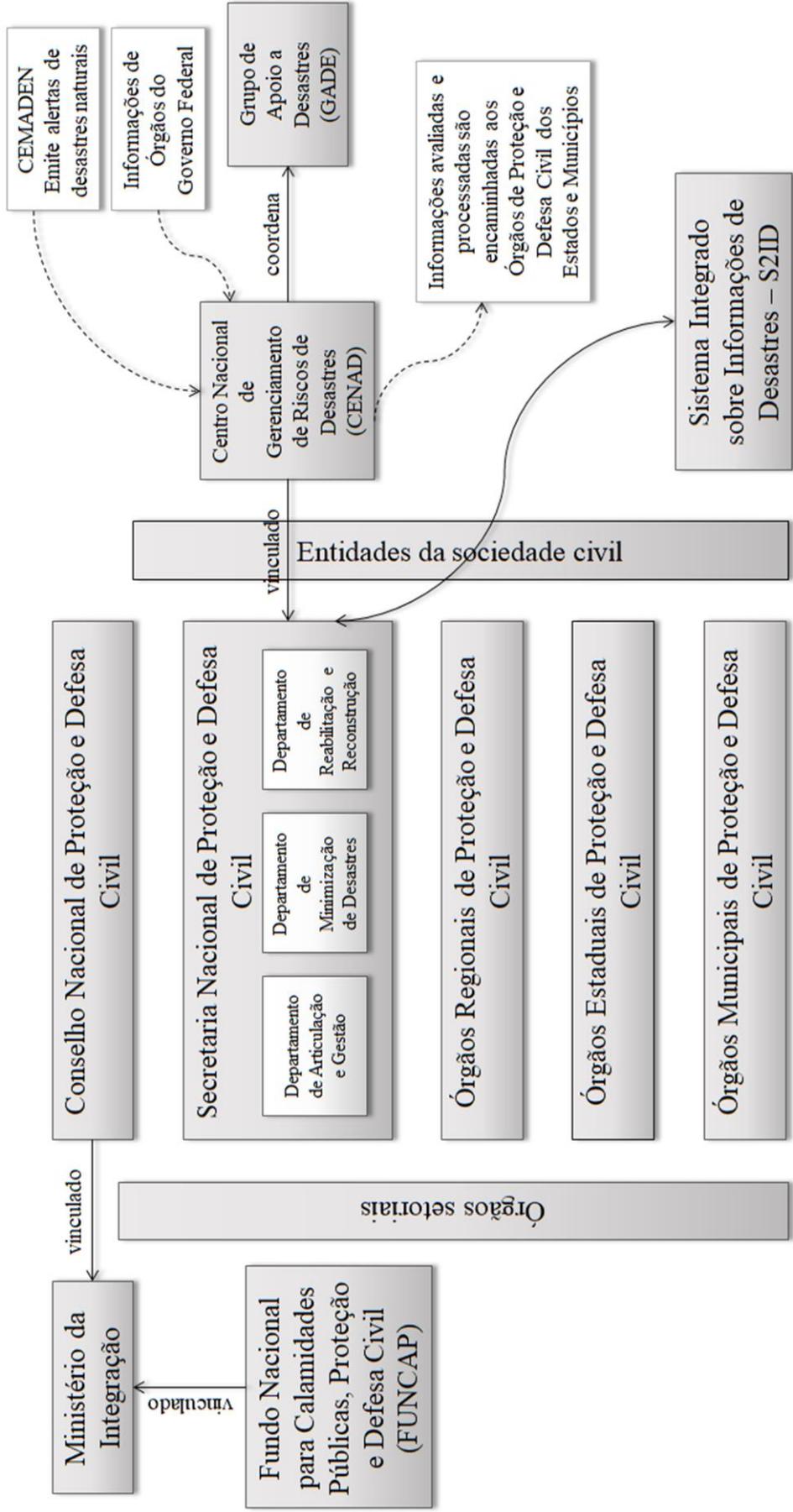


Figura 1: Esquema com a estrutura institucional do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil

Fonte: Adaptado de Ganem (2014)

3.4. Inundações

3.4.1. Processos analisados

Segundo Goerl e Kobiyama (2005), existem, no Brasil, diversos termos referentes ao processo das inundações, como: cheia, enchente, enxurrada, alagamentos, inundações ribeirinhas, inundações urbanas, entre outros. Muitos destes termos são empregados de forma incorreta devido traduções equivocadas de vocábulos provenientes de línguas estrangeiras. Na sequência, são definidos alguns conceitos referentes ao fenômeno das inundações.

Quando as águas do rio se elevam até a altura das margens, porém sem haver transbordamento, caracteriza-se a enchente. A partir do momento em que as águas transbordam, ocorre uma inundação (KOBİYAMA; GOERL, 2011). Na Figura 2, são ilustrados estes dois fenômenos.

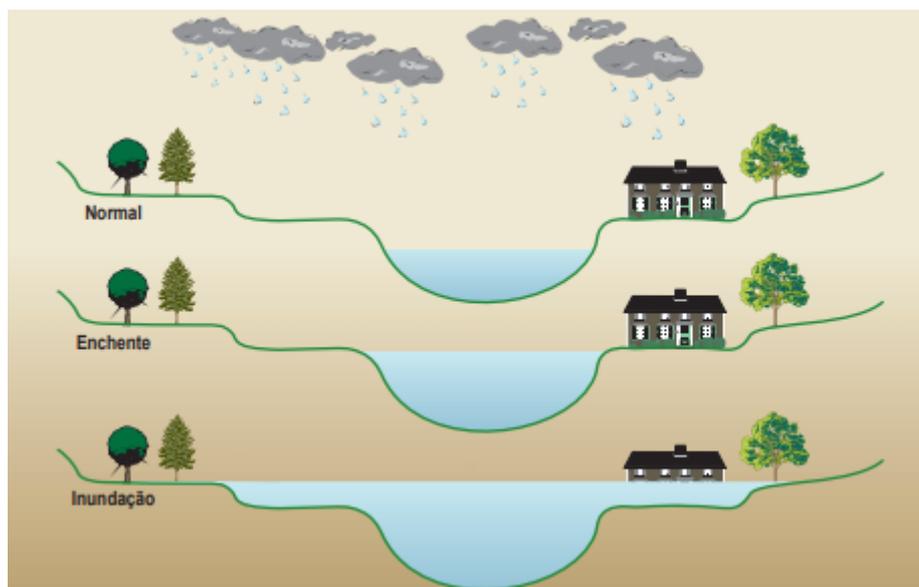


Figura 2: Elevação do nível de um rio provocada pelas chuvas, do nível normal até a ocorrência de uma inundação

Fonte: Goerl e Kobiyama (2005)

Os principais tipos de inundações em áreas urbanas, que podem ocorrer isoladamente ou combinados, são (TUCCI; BERTONI, 2003): (i) devido a urbanização - são as enchentes produzidas pela impermeabilização do solo e aumento da capacidade de escoamento da drenagem através de condutos e canais, o que aumenta o escoamento superficial, reduz o tempo de resposta da bacia e reduz a capacidade de recarga dos aquíferos, produzindo variações intensas no nível dos cursos d'água; (ii) devido a ocupação das áreas ribeirinhas - que são as enchentes naturais que ocorrem em rios de médio e grande porte. O rio extravasa do seu leito

menor, ocupando a várzea (leito maior). A inundação ocorre quando o leito maior está ocupado por habitações humanas e (iii) devido a problemas localizados - obstruções ao escoamento e projetos inadequados.

Além das enchentes e inundações, podem ocorrer também eventos de alagamentos, que são os acúmulos de água momentâneos em uma área, porém sem a ocorrência de extravasamento do rio, devido à dificuldade de escoamento, que pode ser determinada pela topografia da área (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009) ou pelo mau funcionamento do sistema de drenagem (CASTRO, 2003).

3.4.2. Agentes predisponentes

De acordo com Cooke e Doornkamp (1990), os fatores que se inter-relacionam e são responsáveis pela ocorrência de eventos de inundação podem ser divididos em transitórios, permanentes e mistos. Os transitórios estão relacionados à ocorrência de chuvas, taxas de evapotranspiração e grau de saturação do solo. Os fatores permanentes têm a ver com as características morfométricas da bacia de drenagem e a geologia. Os fatores mistos referem-se ao tipo de uso e ocupação do solo.

Amaral e Ribeiro (2009) afirmaram que os processos de inundação são analisados segundo condicionantes naturais e antrópicos. Dentre os naturais, destacam-se: a formas do relevo; as características da rede de drenagem da bacia hidrográfica; a intensidade, a quantidade, a distribuição e a frequência das chuvas; as características do solo e o teor de umidade; e a presença ou a ausência da cobertura vegetal. Já os condicionantes antrópicos são: o uso e a ocupação irregular nas planícies e margens de cursos d'água; a disposição irregular de lixo nas proximidades dos cursos d'água; as alterações nas características da bacia hidrográfica e dos cursos d'água; e o intenso processo de erosão dos solos e de assoreamento dos cursos d'água.

Souza (1998) destacou, ainda, fatores condicionantes de inundações e enchentes em regiões costeiras, que podem ser de origem natural ou antrópica. Os condicionantes naturais são divididos em: climático-meteorológicos (magnitude e frequência de chuvas associadas a frentes frias, fenômenos climáticos como *El Niño* e *La Niña* etc.), geológico-geomorfológicos (substrato geológico, morfometria da bacia de drenagem, geomorfologia fluvial, solo e cobertura vegetal), flúvio-hidrológicos (hidráulica fluvial, correntes geradas por marés em áreas estuarinas e lagunares etc.) e oceanográficos (influência das marés e da dinâmica de circulação

costeira junto à desembocadura fluvial ou lagunar). Já os condicionantes antrópicos são resultado de intervenções humanas diretas ou indiretas nas bacias de drenagem, e podem ser agrupados em: uso e ocupação de áreas marginais aos canais de drenagem (águas doces e mixohalinas), modificações na rede de drenagem (aterros, construção de estruturas lineares e barragens, implantação de medidas estruturais para minimizar enchentes, disposição de resíduos sólidos e líquidos em locais inadequados ou nos próprios canais etc.) e modificações nos processos sedimentares naturais e no balanço sedimentar do sistema costeiro.

As inundações e enchentes são fenômenos naturais que ocorrem com uma periodicidade de tempo nos cursos d'água, em geral devido à precipitação intensa de longa e curta duração. Contudo, as intervenções humanas - responsáveis por desmatamentos, erosão, assoreamento de rios, ocupação desordenada das margens dos cursos d'água e impermeabilização do solo - intensificaram esses processos (ALCÁNTARA-AYALA, 2002; AMARAL; RIBEIRO, 2009).

3.4.3. Metodologia para zoneamento de suscetibilidades

A temática de mapeamento de áreas suscetíveis a inundação é bastante complexa e, de modo geral, envolve duas abordagens básicas: uma associada às engenharias, envolve conceitos de hidrologia e hidráulica, com elaboração de modelos chuva-vazão, que tem o objetivo de simular o comportamento dos escoamentos por meio de análise unidimensional (canal) ou em duas dimensões (acrescentando-se a planície de inundação, com emprego de métodos de elementos finitos ou de diferenças finitas), regionalização de vazões, entre outras formas; e a outra abordagem envolve análises descritivo-qualitativas dos diversos fatores de um determinado ambiente, como o tipo de solo, o relevo e a cobertura vegetal (IPT; CPRM, 2014).

3.4.3.1. Índices morfométricos

Diversos autores têm encontrado fortes correlações entre os parâmetros morfométricos de bacias de drenagem e as suas características hidrológicas e, conseqüentemente, a sua suscetibilidade em desenvolver inundações (SOUZA, 2005). Lindner, Gomig e Kobiyama (2007) observam que os índices morfométricos são importantes fatores no estudo de eventos hidrometeorológicos, como enchentes e estiagens. Segundo Machado (2010), as análises morfométricas, que são constituídas por um grande número de parâmetros, permite caracterizar o ambiente de uma bacia hidrográfica, sua predisposição à ocorrência de alguns eventos e sua incompatibilidade com certas atividades. De acordo com Faria, Zacchi e Ferreira (2009), análise morfométrica é o estudo da fisiografia e da dinâmica hidrológica da bacia hidrográfica que permite o conhecimento da dinâmica fluvial, bem como das relações existentes entre essa

dinâmica e os diversos componentes do meio físico e biótico de uma bacia. Os índices morfométricos podem ser divididos em três grupos: os que indicam características geométricas, os que indicam características da rede de drenagem e os que expressam características do relevo (CAMPANHARO, 2010).

Souza (2005) destacou diversos estudos (HORTON, 1945; MORISAWA, 1962; PATTON, 1988) que mostram a relação entre características geométricas e geomorfológicas de bacias hidrográficas (como área, forma da bacia, hipsometria da bacia, comprimento e declividade do canal principal, densidade de drenagem, forma da bacia, características geológicas tais como tipo de rocha e estrutura, circularidade da bacia, taxa de relevo) com suas características hidrológicas (como tempos de duração dos picos de cheias, descarga máxima de uma inundação, descarga e o escoamento superficial, tempo total de duração das inundações/enchentes e o tempo de elevação das águas, infiltração e deflúvio das águas das chuvas).

Dentre os principais parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas utilizados em estudos para análise de suas características hidrológicas, pode-se destacar: a área de contribuição, a relação de relevo, a densidade de drenagem, o índice de circularidade e o índice de sinuosidade (ALVES; CASTRO, 2003; OLIVEIRA; GUASSELLI; SALDANHA, 2010; ÁVILA; ALMEIDA NETO; FELIPPE, 2017).

A área de contribuição (A_c) é a própria área da sub-bacia. Associa-se ao volume de água que atinge o rio principal. Quanto maior A_c , maior tende a ser a suscetibilidade. Esse valor de área é elevado a 0,9, de modo a representar o fator de redução de chuva (IPT; CPRM, 2014), de forma semelhante a simplificação utilizada no Método Racional, representando o percentual da precipitação que não atinge o rio, sendo influenciado pela cobertura vegetal, classe de solos, declividade e tempo de retorno.

A relação de relevo (R_r) é a relação entre a amplitude (Δa) e o comprimento do rio principal da sub-bacia (L) (SCHUMM, 1956) (Equação 1).

$$R_r = \frac{\Delta a}{L} \quad (1)$$

Este índice indica a velocidade de escoamento. Quanto maior a R_r , mais rápido tende a ser o fluxo, reduzindo o acúmulo de água na sub-bacia.

A densidade de drenagem (Dd) é a relação entre o comprimento da drenagem (C) com a área da sub-bacia (A) (HORTON, 1945) (Equação 2).

$$Dd = \frac{C}{A} \quad (2)$$

Quanto maior a Dd , menor é a infiltração de água no solo e maior tende a ser a velocidade com que a água atinge o rio. O comprimento de drenagem corresponde ao comprimento total dos cursos d'água, sejam eles efêmeros ou perenes.

O índice de circularidade (Ic) é a relação entre a área da sub-bacia (A) e a de um círculo de mesmo perímetro (A_{circ}) (MÜLLER, 1953) (Equação 3).

$$Ic = \frac{A}{A_{circ}} \quad (3)$$

Considerando o perímetro da sub-bacia igual a P e a fórmula para o cálculo do perímetro de um círculo como $P = 2\pi r$, tem-se que o raio do círculo é $r = \frac{P}{2\pi}$, deste modo (Equação 4):

$$Ic = \frac{A}{A_{circ}} = \frac{A}{\pi r^2} = \frac{A}{\pi \left(\frac{P}{2\pi}\right)^2} = \frac{A}{\frac{P^2}{4\pi}} = \frac{4A\pi}{P^2} \quad (4)$$

Assim, para $Ic=0,51$ o nível de escoamento é considerado moderado, não contribuindo na concentração de águas que possibilitem cheias rápidas. Valores maiores que 0,51 indicam que a bacia tende a ser mais circular, favorecendo os processos de inundação (cheias rápidas). Já valores de índice de circularidade inferiores a 0,51 sugerem que a bacia tende a ser mais alongada favorecendo o processo de escoamento (MÜLLER, 1953; SCHUMM, 1956).

O índice de sinuosidade (Is) é a relação entre o comprimento do canal principal (L) com a distância vetorial entre os extremos do canal (dv) (SCHUMM, 1963) (Equação 5).

$$Is = \frac{L}{dv} \quad (5)$$

Valores de índice de sinuosidade próximos a 1,0 apontam que o canal tende a ser retilíneo. Já os valores superiores a 2,0 indicam canais mais tortuosos e os valores intermediários sugerem formas transicionais, regulares e irregulares. Quanto maior o Is , menor tende a ser a velocidade de escoamento e chegada da água no rio.

3.4.3.2. Modelo HAND

O modelo HAND, sigla para *Height Above Nearest Drainage* (altura acima da drenagem mais próxima), foi desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e mede a diferença altimétrica entre qualquer ponto da grade do MDE e o respectivo ponto de escoamento na drenagem mais próxima (NOBRE et al., 2011). Ou seja, os *pixels* da drenagem assumem valor igual a zero e os demais *pixels*, o valor da diferença entre a altitude do ponto e a altitude da drenagem mais próxima (Figura 3). Após a geração do modelo, é possível definir faixas de elevação acima do nível da drenagem, para as quais serão atribuídas as classes de suscetibilidade (Figura 4).

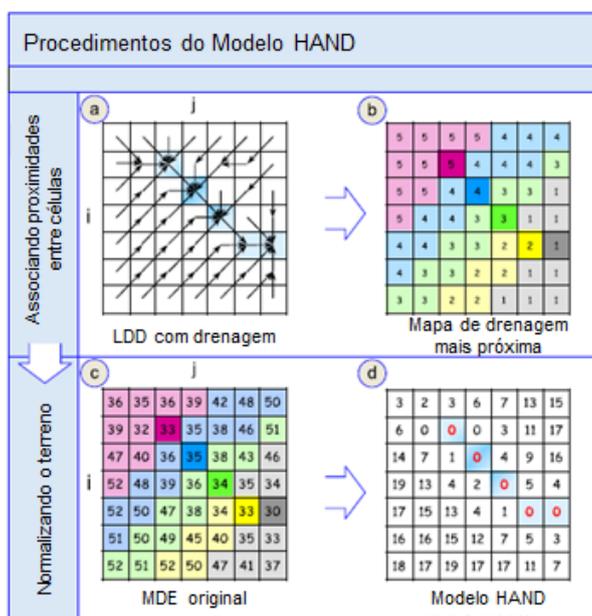


Figura 3: Etapas do modelo HAND

Fonte: Adaptado de Nobre et al. (2011)

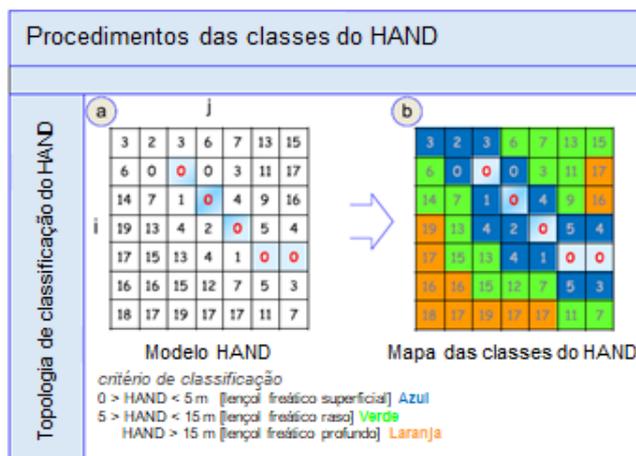


Figura 4: Definição de classes pelo modelo HAND

Fonte: Adaptado de Nobre et al. (2011)

Momo (2014) avaliou a aplicação do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis a inundação no município de Blumenau e os parâmetros estatísticos apontaram para um bom desempenho do modelo. Goerl, Michel e Kobiyama (2017) testaram a aplicabilidade do modelo para o mapeamento de áreas suscetíveis a inundação no município de Igrejinha-RS e observaram que os resultados demonstraram bom ajuste espacial com as amostras de campo. Mengue et al. (2016) utilizaram o modelo HAND para o mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai e também obtiveram resultado satisfatórios. Silva et al. (2013) compararam as classes do HAND no mapeamento de áreas suscetíveis a inundação da bacia do Rio Paraíba do Sul com áreas inundáveis para diferentes tempos de retorno obtidos por meio do modelo HEC-HMS. O modelo também alcançou visibilidade internacional sendo utilizado nos Estados Unidos para delimitar o terreno sujeito à inundação de toda a extensão territorial do país. E na Holanda objetivando-se compreender a área de maior perigo de inundação e o perfil social da população inserida nesta área (MILANESI; QUADROS; LAHM, 2017).

3.5. Movimentos de massa

3.5.1. Processos analisados

Em função da extrema diversidade de enfoques dado aos movimentos de massa - devido aos diferentes interesses dos profissionais que se dedicam ao estudo deste tema - da complexidade dos processos envolvidos e da multiplicidade de ambientes de ocorrência, o tema movimentos de massa apresenta uma grande dificuldade de análise e síntese, que reflete na inexistência de um sistema classificador razoavelmente divulgado e aceito (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

Nesta revisão bibliográfica será apresentado o Sistema de Classificação de Magalhães Freire, que é descrito por Guidicini e Nieble (1983). Os movimentos coletivos de solo e de rocha são classificados em três tipos: a) escoamentos; b) escorregamentos e c) subsidências.

a) Escoamentos: correspondem a um movimento contínuo, com ou sem superfície definida de movimentação e estão classificados em dois tipos, segundo as características do movimento: corrida (escoamento fluido-viscoso) e rastejo (escoamento plástico);

b) Escorregamentos: correspondem a um movimento finito, ao longo de uma superfície definida de deslocamento e, também, classifica-se em dois tipos, segundo haja predomínio de rotação (escorregamentos rotacionais) ou de translação (escorregamentos translacionais).

c) **Subsídências:** correspondem a um deslocamento finito, ou deformação contínua, de direção vertical, subdividem-se em três classes: subsidências propriamente ditas (em que o movimento consiste essencialmente em uma deformação contínua), recalques (em que, verifica-se uma deformação do solo, devido a expulsão de um fluido e rearranjo das partículas) e, os desabamentos (deslocamento finito vertical e rápido).

A partir destes três tipos e 7 subtipos, diferenciam-se 32 classes principais, caracterizadas na Tabela 3.

Na Figura 5, são apresentados esquemas dos principais tipos de movimentos de massa.

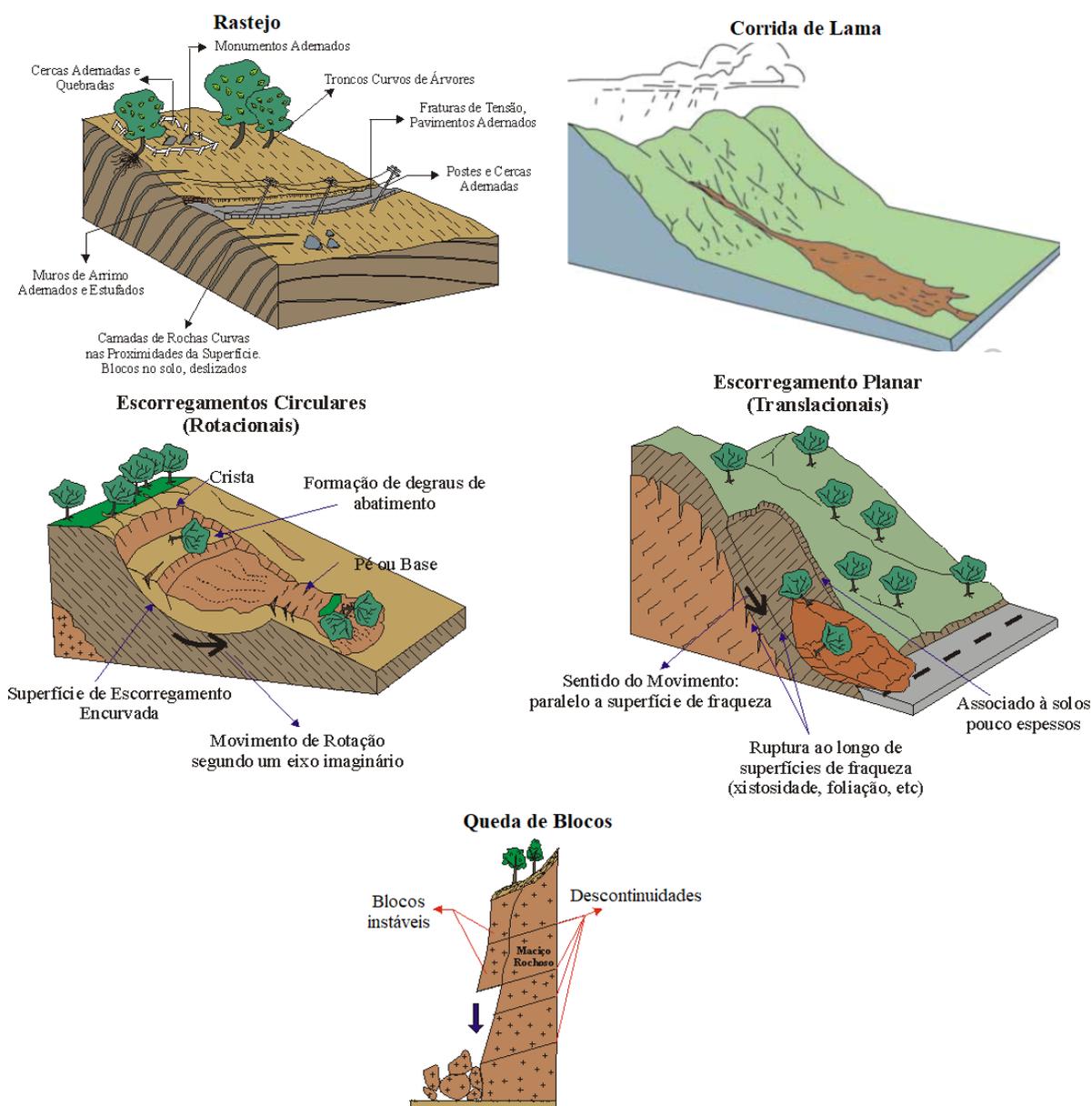


Figura 5: Esquema dos principais movimentos de massa

Fonte: Adaptado de Unesp (s.d.)

Tabela 3: Classificação dos movimentos de massa segundo o sistema de Magalhães Freire

Classes principais		Movimento			
Tipo	Subtipo	Natureza da superfície de escorregamento	Velocidade e duração		
		Tipo			
1. Escorregamentos	1.1. Rastejo	1.1.1. Rastejo de solo	Superfícies múltiplas de neoformação, tanto do conjunto, quanto nos movimentos individuais. Tendências das primeiras a se aprofundarem	Translação predominantemente horizontal (no conjunto). Deformações plásticas irregulares em todas as direções e sentidos (movimentos de detalhes)	Longa duração, velocidade baixa e mesmo imperceptível (3 a 5 cm/ano), aumentando com teor de água e inclinação. Movimentos locais ocasionalmente rápidos
		1.1.2. Rastejo de detritos de talus			
		1.1.3. Rastejo de rocha			
		1.1.4. Solifluxão			
		1.1.5. Rastejo de detritos			
		1.1.6. Galerias			
	1.2. Corridas	1.2.1. Corrida de terra	Superfície pré-existente sobre a qual se dá o movimento, de conjunto de material alóctone. Tendência de aprofundamento e erosão da superfície de escorregamento	Translação com inclinação de pequena a grande, sobre o plano horizontal	Curta duração, velocidade de alta a muito alta, podendo ser praticamente instantânea
		1.2.2. Corrida de areia ou silte			
		1.2.3. Corrida de lama			
		1.2.3.1. Tipo de região árida, semiárida ou alpina			
2. Escorregamentos	2.1. Escorregamentos rotacionais	1.2.3.2. Tipo vulcânico	Superfície de escorregamento cilindro-circular de neoformação	Rotação e translação	Curta duração, velocidade de alta a muito alta (de 0 a 30 cm/h). Podendo ser quase instantâneo. Em alguns casos, após o desaparecimento, a velocidade passa à de queda livre
		1.2.3.3. Refluimento de pântano			
		1.2.4. Avalanche de detritos			
		2.1.1. Escorregamento de taludes			
	2.2. Escorregamentos translacionais	2.1.2. Escorregamentos de base	Superfície de escorregamento plana, podendo ser de neoformação ou preexistente. No segundo caso, o escorregamento diz-se condicionado	Translação predominantemente horizontal, a simples queda vertical (translação vertical)	Curta duração, velocidade de alta a muito alta (de 0 a 30 cm/h). Podendo ser quase instantâneo. Em alguns casos, após o desaparecimento, a velocidade passa à de queda livre
		2.1.3. Rótura rotacional de solo de fundação			
		2.2.1. Escorregamento translacional de rocha			
		2.2.1.1. Sem controle estrutural			
		2.2.1.2. Com controle estrutural			
		2.2.2. Escorregamento translacional de solo			
3.1. Subsídências	3.1. Subsídências	2.2.3. Escorregamento translacional de solo e de rocha	Superfície de deslizamento de atitude vertical, múltiplas variáveis, em geral de neoformação	Deformação plástica ou elástica vertical e, às vezes, translação vertical	Curta duração, geralmente (3.1.4, 3.1.5, 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3). Longa nos outros cinco casos. Velocidade, em geral, pequena, às vezes grande
		2.2.4. Escorregamento translacional retrogressivo			
		2.2.5. Queda de rocha			
		2.2.6. Queda de detritos			
		3.1.1. Por carreamento de grãos			
		3.1.2. Por dissolução de camadas inferiores e cavernas			
3.2. Recalques	3.2. Recalques	3.1.3. Por deformação de estratos inferiores inclusive por deformação tectônica e deformação por acúmulo de sedimentos	Superfície de deslizamento de atitude vertical, múltiplas variáveis, em geral de neoformação	Deformação plástica ou elástica vertical e, às vezes, translação vertical	Curta duração, geralmente (3.1.4, 3.1.5, 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3). Longa nos outros cinco casos. Velocidade, em geral, pequena, às vezes grande
		3.1.4. Por rotura de estratos inferiores			
		3.1.5. Por retirada de suporte lateral			
3.3. Desabamentos	3.3. Desabamentos	3.2.1. Por consolidação	Superfície de deslizamento de atitude vertical, múltiplas variáveis, em geral de neoformação	Deformação plástica ou elástica vertical e, às vezes, translação vertical	Curta duração, geralmente (3.1.4, 3.1.5, 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3). Longa nos outros cinco casos. Velocidade, em geral, pequena, às vezes grande
		3.2.2. Por compactação			
		3.3.1. Por rotura de camada			
3. Subsídências	3.3. Subsídências	3.3.2. Por subscavação	Superfície de deslizamento de atitude vertical, múltiplas variáveis, em geral de neoformação	Deformação plástica ou elástica vertical e, às vezes, translação vertical	Curta duração, geralmente (3.1.4, 3.1.5, 3.3.1, 3.3.2, 3.3.3). Longa nos outros cinco casos. Velocidade, em geral, pequena, às vezes grande
		3.3.3. Por retirada de suporte lateral			

Fonte: Adaptado de Guidicini e Nieble (1983)

Para fins de mapeamento de suscetibilidades, serão considerados apenas os escoamentos e escorregamentos.

3.5.2. Agentes predisponentes

Acerca dos movimentos de massa, Guidicini e Nieble (1983) conceituaram os termos agente e causa. Sendo a causa o modo de atuação de um agente, podendo este se expressar por meio de uma ou mais causas. A água, por exemplo, é um agente que pode interferir na instabilidade de um talude de diversas formas: na solifluxão, a causa será o encharcamento do solo, provocado por degelo; ao passo que, na liquefação, a causa é o aumento da pressão neutra.

Os agentes podem ser divididos em dois grupos: agentes predisponentes e efetivos. Os agentes predisponentes correspondem ao conjunto de condições geológicas e ambientais, ou seja, características intrínsecas, função apenas de condições naturais. Já os agentes efetivos, são aqueles diretamente responsáveis pelo desencadeamento do movimento de massa, podem atuar de maneira mais ou menos direta e, em função disso, são subdivididos em preparatórios e imediatos (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

As causas, por sua vez, podem ser divididas, dependendo de sua posição com relação ao talude em: internas, externas e intermediárias. As causas internas geram uma diminuição na resistência interna do material, sem que ocorra mudança nas condições geométricas. As causas externas provocam aumento da tensão de cisalhamento, sem que haja diminuição da resistência do material. E as causas intermediárias, resultam de efeitos causados por agentes externos no interior do talude (GUIDICINI; NIEBLE, 1983). A Figura 6 esquematiza os conceitos relativos a agentes e causas de movimentos de massa.

A seleção dos agentes predisponentes deve levar em conta a natureza da área de estudo e a disponibilidade de dados, mas em estudos envolvendo SIG, cinco critérios também devem ser considerados (YALCIN, 2008), o fator deve ser: (i) operacional, ter um certo grau de afinidade com o deslizamento de terra; (ii) completo, estar razoavelmente representado em toda área de estudo; (iii) não uniforme, variável espacialmente; (iv) mensurável, pode ser expresso por escala nominal, ordinal, de intervalo, razão e (v) não redundante, seu efeito não deve levar em conta as consequências duplas no resultado final. Pedologia, declividade, cobertura do solo e distância de rios e estradas são frequentemente usados para o mapeamento de suscetibilidade por muitos pesquisadores (AYALEW et al., 2005; AYALEW; YAMAGISHI, 2005; YALCIN, 2008; YALCIN et al., 2011). Embora os estudos de suscetibilidade avaliem os agentes predisponentes, que são função apenas de condições naturais, diversos estudos incluem os fatores artificiais (como estradas) na análise de suscetibilidade (AYALEW et al., 2005).

A declividade está diretamente relacionada aos deslizamentos. Yalcin et al. (2011) acreditam que encostas leves apresentam uma baixa frequência para deslizamentos devido a pequenas tensões de cisalhamento comumente relacionadas a baixos declives. Segundo Fernandes e Amaral (1996), em locais com declividade acima de 30° o risco de deslizamento é mais frequente do que em locais com declividade acima de 60°, já que nos locais com declividade maior, a camada de solo é menos espessa, sendo constituída na sua maior parte por rocha, porém ainda sendo passível de deslizamento principalmente com precipitação elevada.

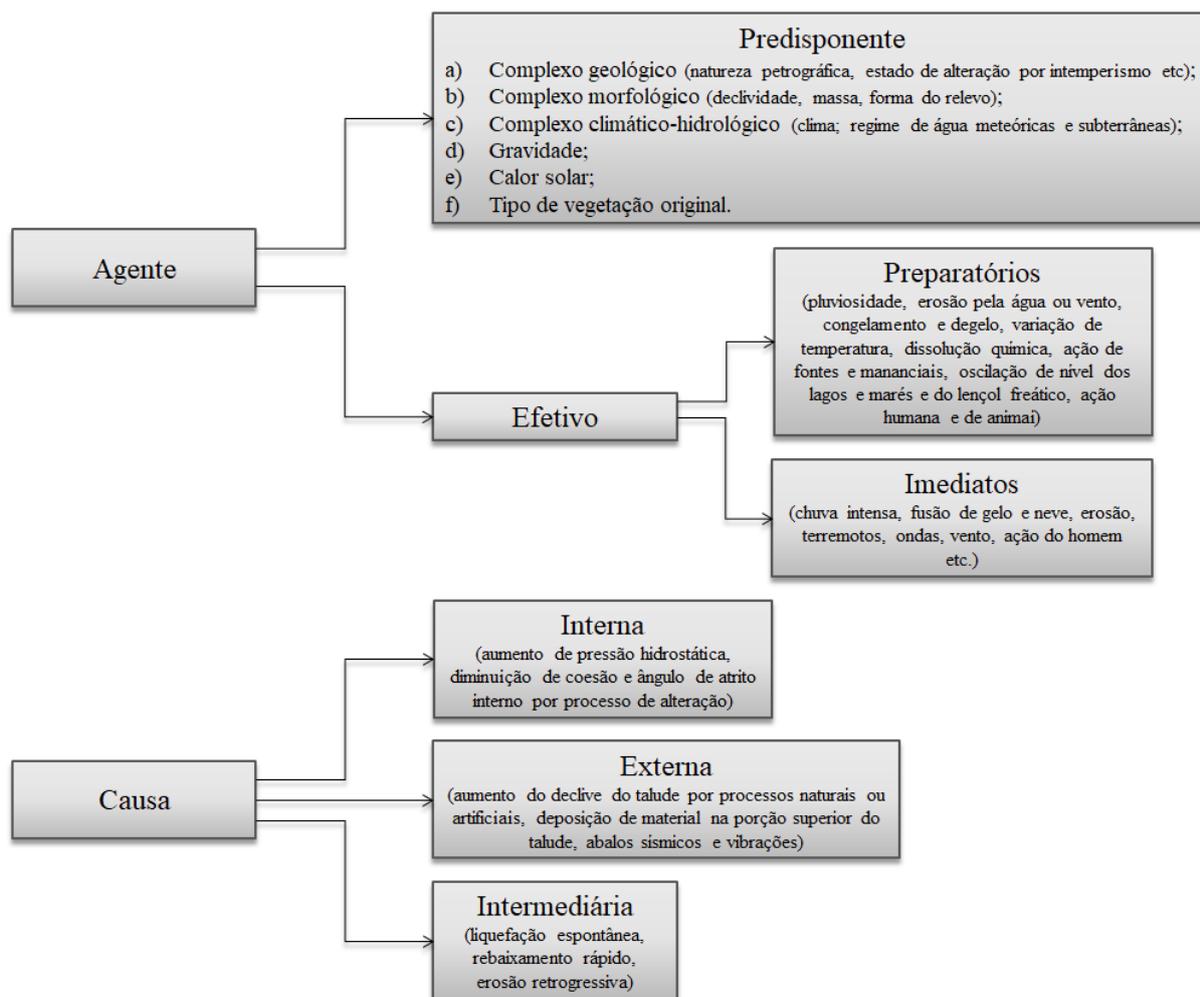


Figura 6: Esquema das causas e agentes dos movimentos de massa

Fonte: Adaptado de Guidicini e Nieble (1983)

A distância de estradas interfere na carga na ponta do declive, que pode ser reduzida por cortes de estradas. Uma seção de estrada pode comportar-se como uma parede, uma fonte de rede, uma rede de escoamento ou um corredor para o fluxo de água e, dependendo de sua localização, pode contribuir para causar deslizamentos de terra (AYALEW; YAMAGISHI, 2005; YALCIN, 2008).

A distância de rios afeta o grau de saturação do solo, que é um dos fatores que controlam a estabilidade das encostas. Os rios podem afetar negativamente a estabilidade pela erosão das encostas ou pela saturação da parte inferior do material (YALCIN et al., 2011).

Pedologia é um importante fator nos estudos de deslizamentos, pois as propriedades físicas e químicas do solo influenciam diretamente na infiltração e saturação do solo por água, desencadeando os processos de movimentos de massa. A textura do solo corresponde à proporção relativa das frações granulométricas existentes em um solo (areia, silte e argila). Solos mais arenosos (teor de areia superior a 70%) apresentam baixa capacidade de retenção de água e alta taxa de infiltração, enquanto que, solos mais argilosos (teores de argila superiores a 35%) possuem baixa permeabilidade e alta capacidade de retenção de água (EMBRAPA, 2003).

A estrutura do solo é resultado da agregação das partículas primárias do solo (areia, silte e argila) com outros componentes minerais e orgânicos (calcário, sais, matéria orgânica, entre outros). A agregação origina unidades estruturais compostas, chamadas de macro e microagregados do solo. O agrupamento desses agregados, organizados numa forma geométrica definida, constitui a estrutura do solo. A estrutura pode ser classificada quanto à forma, tamanho e grau de desenvolvimento. A forma, resultado da intensidade das forças de coesão entre as partículas minerais e orgânicas, bem como da ação física e química dos macro e microorganismos vegetais e animais. As cargas positivas e negativas da superfície das partículas promovem atração e repulsão entre elas e determinam a intensidade com que se unem. A qualidade e a quantidade dessas cargas variam de acordo com os tipos de minerais presentes no solo (tipo da argila, por exemplo - se de atividade baixa ou alta, óxidos de ferro e alumínio, sais), pH, entre outras características pedológicas. Quanto à forma, a estrutura pode ser dividida em laminar, prismática (prismática e angular), em blocos (angular e subangular) ou granular. Com relação ao tamanho, a estrutura é classificada em muito pequena, pequena, média, grande e muito grande. E o grau de desenvolvimento reflete a condição de coesão dentro e entre os agregados, isto é, a força com que as partículas minerais e orgânicas estão unidas, e pode ser dividida em: sem estrutura (grãos simples ou maciça), quando não há forças positivas e negativas entre as partículas do solo e com estrutura (fraco, moderado ou forte), reflete a estabilidade do agregado, quanto mais forte, maior a força de união entre os agregados. Quanto mais forte o grau de desenvolvimento do agregado, melhor é a infiltração e maior a resistência a erosão do solo (CAPECHE, 2008).

Outra propriedade física do solo importante é a profundidade. A profundidade divide-se em profundidade efetiva e profundidade do solo. A profundidade efetiva refere-se à profundidade máxima que as raízes penetram livremente no corpo do solo, em razoável número

e sem impedimentos e apresenta-se dividida em cinco categorias: muito rasa (<25 cm); rasa (25 a 50 cm); moderadamente profunda (50 a 100 cm); profunda (100 a 200 cm); e muito profunda (>200 cm). Os fatores limitantes à penetração radicular podem ser de ordem química e física. Algumas limitações de ordem física podem ser a presença de fragipã, duripã, horizonte plúntico, contato lítico, dentre outros. Entre os fatores de ordem química, pode-se citar: toxicidade de alumínio, salinidade e alcalinidade elevadas, dentre outros. Já a profundidade do solo tem seu limite inferior definido pelos limites da ação das forças biológicas e climáticas, relaciona-se com os processos pedogenéticos. Está distribuída em quatro categorias: rasa (<50 cm); pouco profunda (50 a 100 cm); profunda (100 a 200 cm) e muito profunda (>200 cm) (LEPSCH et al., 2015). Solos mais rasos saturam-se por água mais rapidamente que solos mais profundos, sob condições ambientais semelhantes e, portanto, são mais suscetíveis aos movimentos de massa.

Outra importante propriedade é a porosidade, constituída pelos espaços porosos do solo ocupada por água e ar e divide-se em macro e microporosidade. Os macroporos são resultado da disposição dos agregados, da ação da mesofauna e raízes e da expansão e contração da massa do solo e estão relacionados às trocas gasosas de oxigênio e gás carbônico e ao fluxo de água por gravidade. Os microporos encontram-se intra-agregados e estão relacionados com a retenção de água devido à adesão molecular. Quanto maior a proporção de micro em relação aos macroporos de um solo, menor é a infiltração e maior é a adsorção de água (EMBRAPA, 2003).

Com relação a cobertura do solo, a vegetação exerce papel importante na estabilidade de encostas. O conjunto das copas das árvores promove: (i) a interceptação dos raios solares, dos ventos e da chuva, evitando variações bruscas na umidade e temperatura do solo, favorecendo a estabilidade da encosta; (ii) a retenção substancial da água da chuva, que é eliminada na forma de vapor e (iii) eliminação, na forma de vapor, da água excedente do metabolismo vegetal, por meio da evapotranspiração. Os detritos vegetais, que se acumulam no terreno da floresta, atuam de três formas: (i) imobilizando parte da água, através de sua alta capacidade de retenção; (ii) promovendo o escoamento hipodérmico e (iii) freando o escoamento superficial. E, ainda, o sistema radicular promove: (i) estruturação do solo, promovendo um aumento da resistência ao cisalhamento e (ii) aumento do escoamento hipodérmico e diminuição da infiltração efetiva (GUIDICINI; NIEBLE, 1983).

3.5.3. Metodologia para zoneamento de suscetibilidades

Em geral, o mapeamento de suscetibilidade a movimento de massa tem o objetivo de indicar áreas potencialmente instáveis, em função de características naturais intrínsecas como

parâmetros geológicos e geomorfológicos. Como esta análise demanda o uso de grande quantidade de dados, o uso do SIG se mostrou bastante promissor (AYALEW et al., 2005).

Uma variedade de métodos está disponível na literatura para a preparação de mapas de suscetibilidade a movimentos de massa. O mapeamento pode ser qualitativo ou quantitativo. Os métodos qualitativos são subjetivos, representam os níveis de suscetibilidade em expressões descritivas e dependem da opinião de especialistas. Os principais métodos qualitativos utilizam inventários de deslizamentos para relacionar características geológicas e geomorfológicas à ocorrência de deslizamento. Algumas abordagens qualitativas, contudo, incorporam o conceito de classificação e ponderação evoluindo para métodos semi-qualitativos, como é o caso do Processo Hierárquico Analítico (AHP, do inglês) (YALCIN, 2008). Os métodos quantitativos são baseados em expressões numéricas que relacionam os fatores predisponentes e os deslizamentos de terra. Podem ser determinísticos ou estatísticos. Os primeiros baseiam-se na estabilidade de encostas, expressos em termos de fator de segurança. E as abordagens estatísticas, que podem ser multivariadas ou bivariadas, analisam a ligação histórica entre os fatores predisponentes de deslizamento e sua distribuição (YALCIN et al., 2011). Algumas revisões dos métodos desenvolvidos nas últimas décadas podem ser encontradas em Mantovani, Soeters e van Westen (1996), Aleotti e Chowdhury (1999) e Guzzetti et al. (1999). A Figura 7 apresenta os principais métodos utilizados no mapeamento de suscetibilidades a deslizamento.

Yalcin (2008) realizou um estudo no qual compara o processo de hierarquia analítica, o índice estatístico (W_i) e o fator de ponderação (W_f) no mapeamento de suscetibilidades a deslizamento e concluiu que o método AHP deu uma imagem mais realista da distribuição real da suscetibilidade a escorregamentos. Ayalew et al. (2005) compararam os resultados do mapeamento de suscetibilidades utilizando os métodos AHP e regressão logística e observaram que o mapa AHP foi melhor para capturar a realidade do solo.

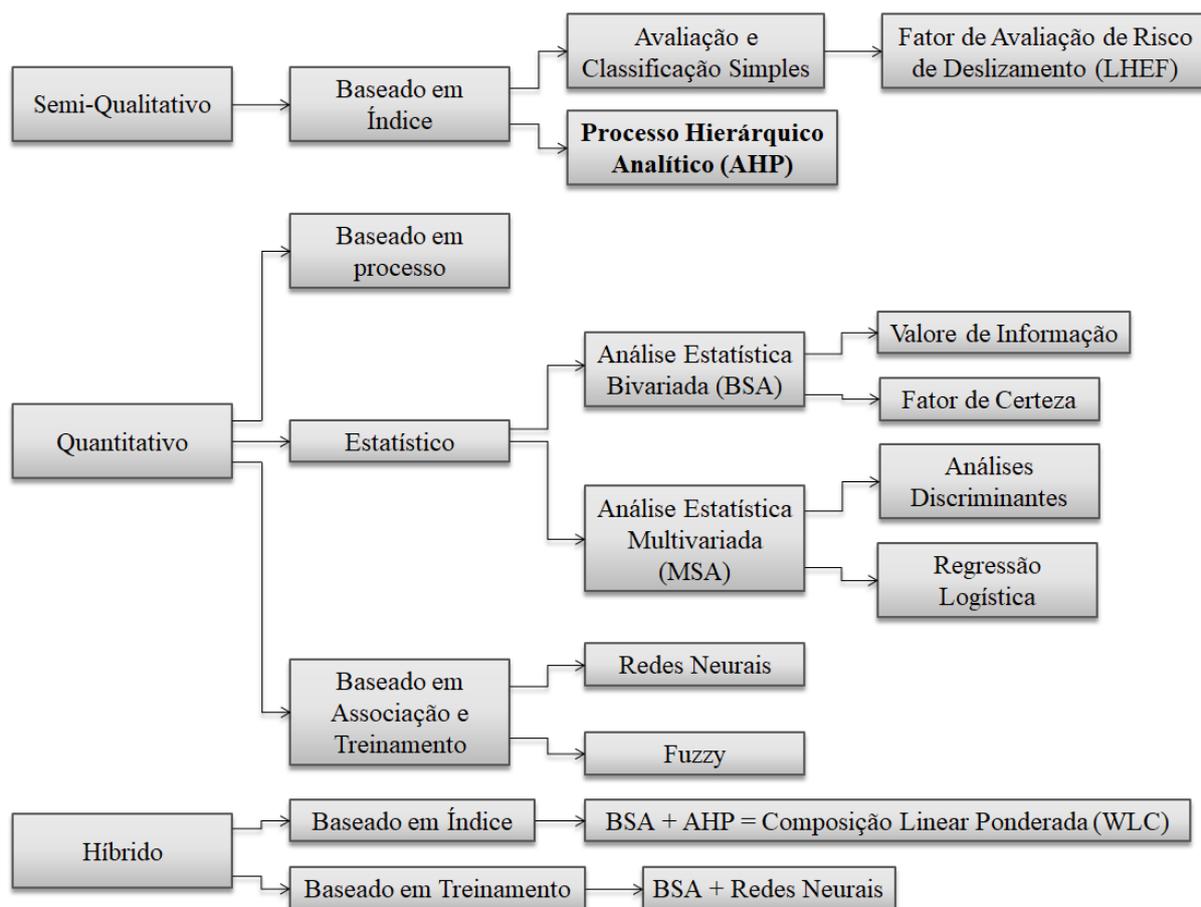


Figura 7: Esquema das metodologias de mapeamento a suscetibilidade a deslizamento mais utilizadas

Fonte: Adaptado de Ayalew et al. (2005)

3.5.3.1. Processo Hierárquico Analítico

O método AHP foi apresentado pela primeira vez pelo matemático Thomas L. Saaty em 1977 (GODOI, 2014). E, posteriormente, em 1980, denominado de *Analytic Hierarchy Process* (AHP) (SAATY, 1980 *apud* GODOI, 2014).

O AHP é classificado como método de Auxílio à Decisão por Múltiplos Critérios (em inglês *Multiple Criteria Decision Aid* (MDCA)). Também é referenciado como um método *Multiple Criteria Decision Making* (MCDM). Segundo Salomon (2004), estes métodos são aplicados em situações em que se necessita da análise de múltiplos critérios ou múltiplos atributos.

O modelo AHP é uma técnica para tomada de decisão, que consiste na lógica de comparação par a par – *pairwise comparison* – na qual diferentes fatores que influenciam na tomada de decisão são organizados hierarquicamente e comparados entre si, e um valor de importância relativa é atribuído ao relacionamento entre estes fatores, de acordo com uma

escala pré-definida que expressa a intensidade com que um fator predomina sobre outro em relação à tomada de decisão (SILVA; NUNES, 2009).

Nunes Junior e Chamon (2006) destacam que o AHP ajuda o tomador de decisão a ter uma visão melhor do problema, mas não elimina a necessidade do apoio de especialistas fornecendo informações para complementar o cenário a ser analisado pelo tomador de decisão.

Saaty (1990) propõe, no método AHP, a utilização de uma matriz de comparação par a par $A = [a_{ij}]n \times n$, para a definição dos pesos dos fatores, em que n é o número de fatores que influenciam na tomada de decisão. Essa matriz é recíproca, ou seja, cada valor de importância (a_{ij}), resultante da comparação entre dois fatores, equivale a $a_{ij} = a_{ji}^{-1}$, quando $i \neq j$, e a diagonal da matriz, quando $i = j$ (comparação de um fator com ele mesmo), equivale a $a_{ij} = 1$.

A comparação entre dois fatores é realizada utilizando-se a escala de importância relativa entre duas alternativas, que varia de 1 a 9, conforme a Tabela 4.

Tabela 4: Escala de importância entre dois parâmetros no AHP

Escala	Grau de importância	Comentário
1	Igual importância	Os dois critérios contribuem igualmente para o objetivo.
3	Importância moderada	A experiência e o julgamento favorecem um critério levemente sobre outro.
5	Forte importância	A experiência e o julgamento favorecem um critério fortemente em relação a outro.
7	Importância muito forte	Um critério é fortemente favorecido em relação a outro e pode ser demonstrado na prática.
9	Importância extrema	Um critério é favorecido em relação a outro com o mais alto grau de certeza.
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura condições de compromisso (<i>compromise</i>) entre duas definições. É necessário acordo.

Fonte: Saaty (1980 *apud* GOMEDE; BARROS, 2012)

Para se obterem os pesos de cada fator, primeiramente, somam-se os valores de cada coluna de A , e divide-se cada a_{ij} pelo somatório de sua coluna, obtendo-se a matriz normalizada. Da matriz resultante, soma-se cada linha e divide-se a soma pelo número de critérios avaliados no sistema, chegando-se a matriz coluna dos pesos (w).

Para avaliar se a matriz de julgamentos é consistente, procede-se ao cálculo do Grau de Consistência, conforme a Equação 6.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

Onde:

CI: Índice de Consistência, dado pela Equação 7;

RI: Índice de Consistência Aleatória, valores fixos usados como referência e calculados em laboratório, apresentados na Tabela 5, em função do número de critérios (n).

$$CI = \frac{\lambda_{\text{máx}} - n}{n - 1} \quad (7)$$

Onde:

$\lambda_{\text{máx}}$: máximo autovalor, dado por $\lambda_{\text{máx}} = \frac{1}{n} \left(\frac{w'_1}{w_1} + \frac{w'_2}{w_2} + \dots + \frac{w'_n}{w_n} \right)$ sendo, $w' = A \times w$;

n: número de critérios.

Tabela 5: Índices de Consistência Aleatória (RI)

n	RI	n	RI
1	0,00	6	1,24
2	0,00	7	1,32
3	0,58	8	1,41
4	0,90	9	1,45
5	1,12	10	1,49

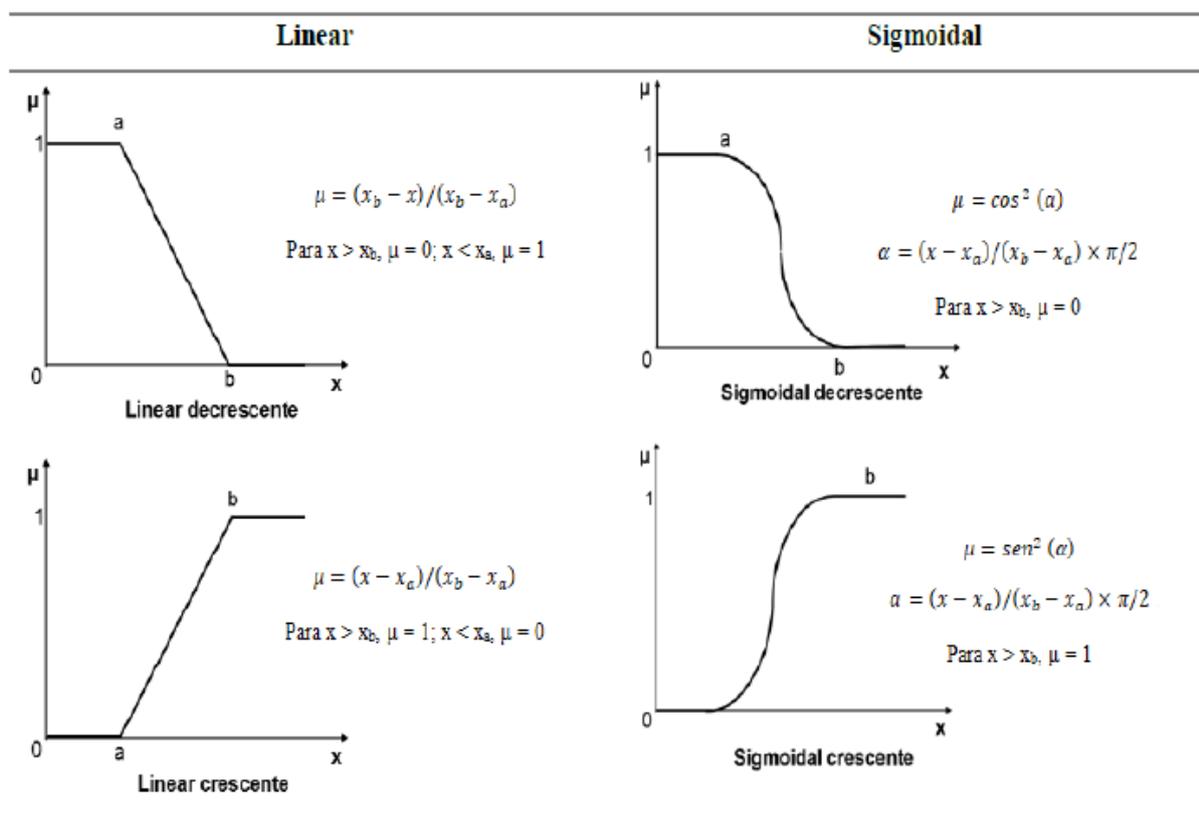
Fonte: Saaty (1987)

A matriz será considerada consistente se a razão for menor que 10% (LIMA, 2007).

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0,1 \sim 10\%$$

Ao fim do processo, os critérios são agregados por meio de uma combinação linear ponderada, conhecida no inglês como *Weighted Linear Combination* (WLC), em que os critérios são combinados aos pesos a eles atribuídos, obtendo-se um resultado ponderado no processo decisório (MALCZEWSKI; RINNER, 2015).

Para a normalização do mapa final é comumente utilizado o método *fuzzy*, que converte os valores de uma escala para outra escala, por exemplo, de 0 a 1, por meio de uma função *fuzzy*. A escolha desta função depende da natureza do critério (LIMA, 2007). Na Figura 8, são apresentadas as funções *fuzzy* utilizadas para esta normalização.

Figura 8: Funções *fuzzy*

Fonte: Maltauro (2018)

4. METODOLOGIA

4.1. Etapas da metodologia

Neste item é apresentada uma visão geral da metodologia da pesquisa representada pelo esquema da Figura 9, no qual são destacados os principais passos para a determinação da suscetibilidade a inundação e deslizamento.

A etapa para determinação da suscetibilidade a inundação se subdivide em duas partes. Na primeira, determina-se a suscetibilidade por meio do cálculo de índices morfométricos para cada sub-bacia da bacia na qual o município de Itajubá está inserido. Na segunda parte, a suscetibilidade é determinada pela aplicação do modelo HAND. E, por fim, as classificações de suscetibilidade a inundação obtidas nestas duas etapas são cruzadas, resultando no mapa final de suscetibilidade a inundação.

A suscetibilidade a movimentos de massa foi determinada com base no Processo Hierárquico Analítico (AHP), no qual são calculados pesos – por meio de uma matriz de comparação par a par – de fatores predisponentes a deslizamento com base na hierarquia entre eles e posterior soma desses fatores multiplicados por seus respectivos pesos.

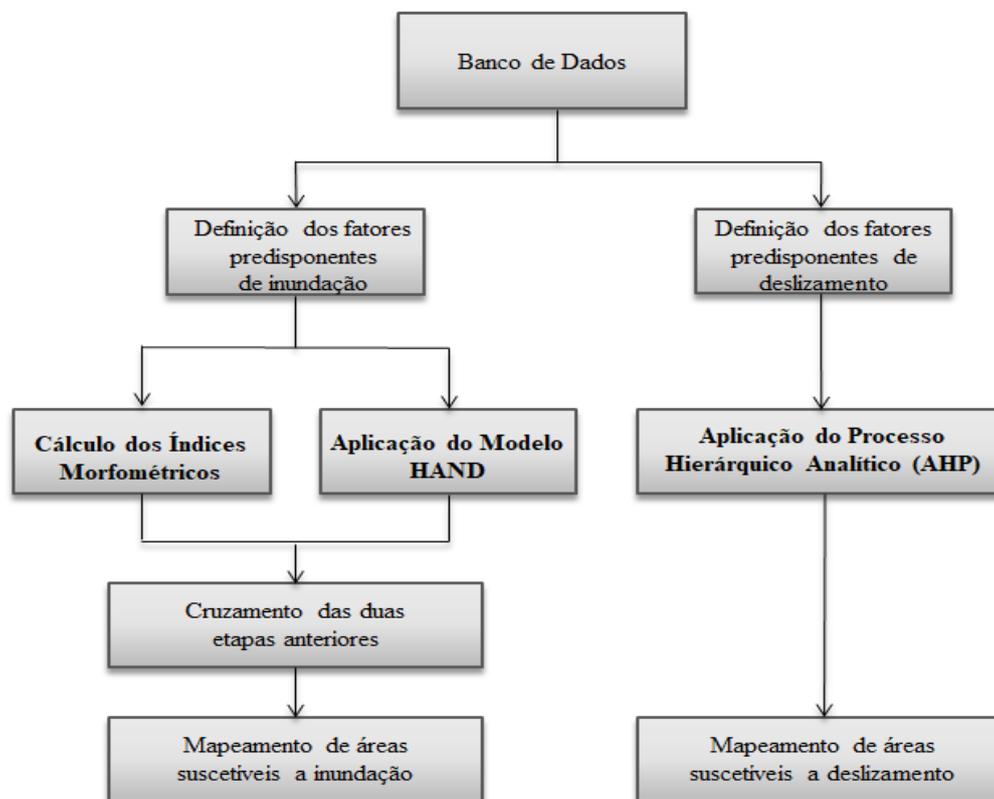


Figura 9: Principais etapas da metodologia da pesquisa

Finalmente, após definir as áreas suscetíveis a inundação e deslizamento, é realizada uma verificação dos mapas. As suscetibilidades a deslizamentos serão verificadas por meio da análise do mapeamento dos movimentos de massa, através de polígonos, observados em imagens de satélite pelo *software* Google Earth Pro (2018) e, também, com visitas a campo. E as suscetibilidades a inundação serão avaliadas, principalmente, por meio dos trabalhos desenvolvidos por Pinheiro (2005) e Silva (2006).

4.2. Caracterização da área de estudo

O município de Itajubá localiza-se na região sul do estado de Minas Geral, sob as coordenadas de latitude 22° 30' 30" S e longitude 45°27'20" W. Limita-se, ao norte, pelos municípios de São José do Alegre e Maria da Fé; ao sul, Wenceslau Brás e Piranguçu; a oeste, Piranguinho e a leste com Delfim Moreira (Figura 10).

O município tem altitude máxima de 1.915 m, localizada na pedra de Santa Rita e altitude mínima de 845 m, na cota do Rio Sapucaí (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAJUBÁ, 2016). Apresenta uma área total de 294,835 km². O relevo é predominantemente montanhoso. A precipitação média é de 1.409,5 mm ao ano. O clima é do tipo subtropical úmido (Cwa) de inverno seco (com temperaturas inferiores a 18°C) e verão quente (com temperaturas superiores a 22°C) (PEEL et al., 2007).

O solo é formado predominante por Argissolo Vermelho Amarelo, Argissolo Vermelho, Cambissolo e Gleissolo (MALTAURO, 2018). Os Cambissolos são solos jovens, que ainda apresentam características do material de origem (rocha) e em ambientes de relevos mais declivosos, os Cambissolos mais rasos apresentam alta suscetibilidade aos processos erosivos. Os Argissolos tendem a ser mais suscetíveis aos processos erosivos devido à relação textural, que implica em diferenças de infiltração dos horizontes superficiais e subsuperficiais. Os Gleissolos ocorrem em ambientes com constante ou periódico excesso d'água, comumente próximos a cursos d'água (EMBRAPA, 2013).

Quanto a geologia, o município de Itajubá é formado pelas seguintes unidades geológicas: Depósito aluvial (formado por sedimentos clásticos inconsolidados), Grupo Andrelândia, Subgrupo Carrancas, Formação São Vicente (metagrauvaca, (muscovita)-biotita paragnaisse bandado, com intercalações de quartzito, muscovita-quartzo xisto, localmente migmatítico), Suíte Bragança Paulista (tonalitos e granodioritos foliados), Complexo Mantiqueira (ortognaises bandados tipo TTG, com intercalações de anfíbolito e metaultramáfica),

Complexo Varginha-Guaxupe, litofácies granulítica-basal (piroxênio granulito intermediário a básico), Complexo Varginha-Guaxupé, litofácies ortognaisse migmatítico (ortognaisse migmatítico com metaultramáfica e granitóides associados; piroxênio granulito eventualmente) e Complexo Varginha-Guaxupé, litofácies paragnaisse migmatítico (paragnaisse, biotita xisto, migmatito, quartzito, metamarga, ortogranulito).

A vegetação é formada, principalmente, por Floresta Ombrófila Densa e Floresta Ombrófila Mista (IBGE, 2004). O município está inserido na bacia hidrográfica do Rio Sapucaí, no trecho do Alto Sapucaí (Figura 11). Os principais rios que cortam o município são o Rio Sapucaí, Rio Lourenço Velho, Ribeirões Anhumas, José Pereira, Piranguçu e Água Preta (PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAJUBÁ, 2016).

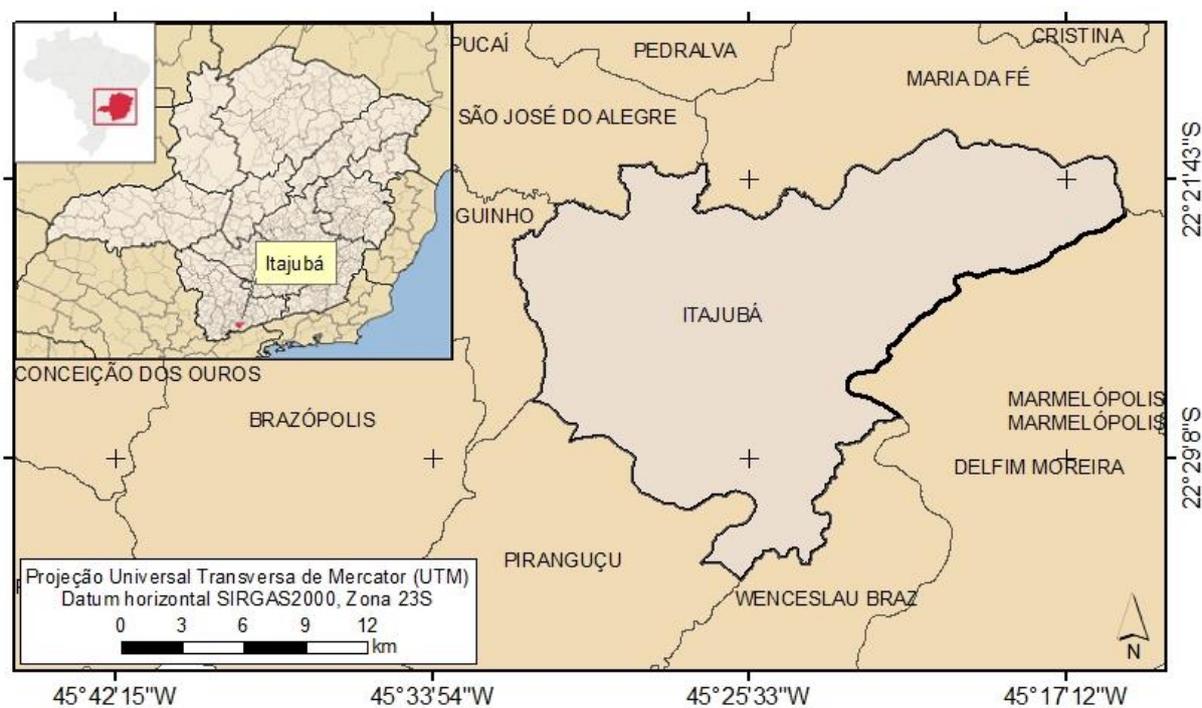


Figura 10: Mapa de localização do município de Itajubá

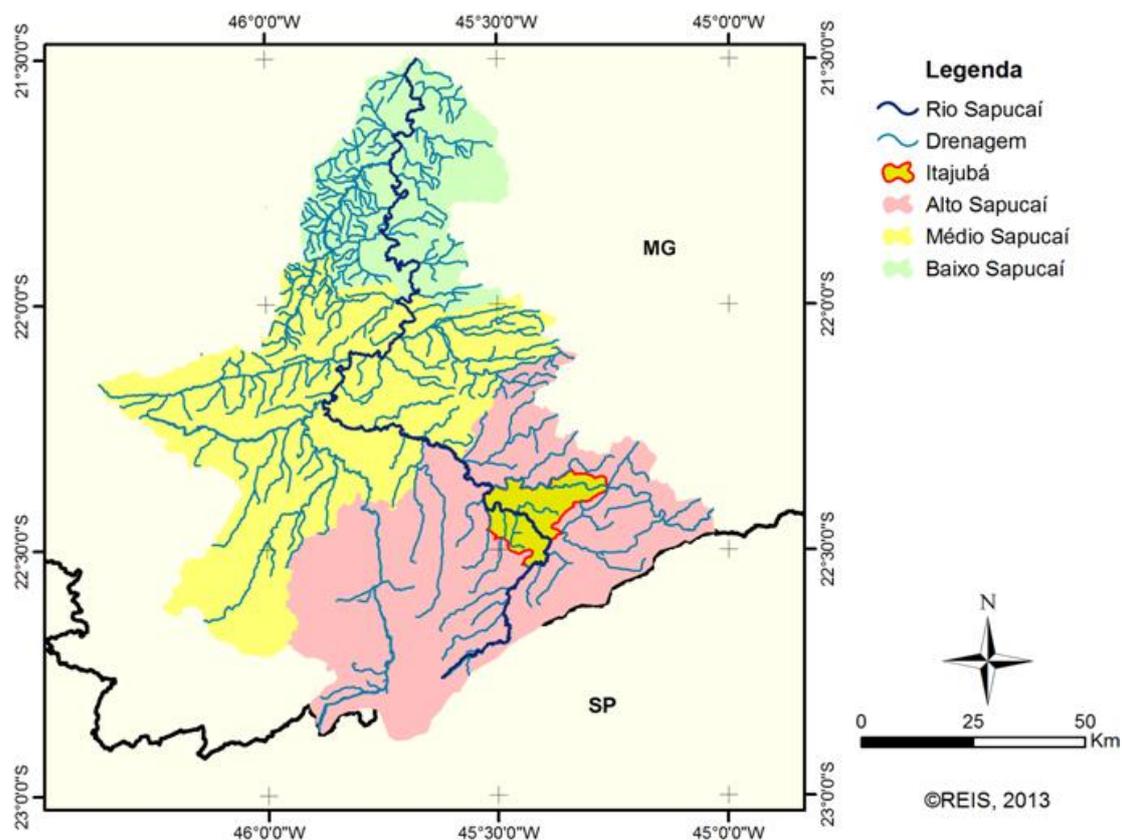


Figura 11: Divisão por trecho da bacia hidrográfica do Rio Sapucaí

Fonte: Reis (2013)

4.2.1. Inundações em Itajubá

Moraes (2003 *apud* PINHEIRO, 2005) realizou um levantamento de eventos de cheia em Itajubá desde sua fundação, com base em entrevistas com moradores e recortes em jornal (Tabela 6). Foram contabilizados ao todo 74 eventos de cheia.

Tabela 6: Relato histórico de cheias em Itajubá

Mês	Ano	Porte	Mês	Ano	Porte
Novembro	1821	-	Janeiro	1946	-
Dezembro	1872	-	Março	1947	-
Março	1874	Grande	Março	1948	-
Março	1875	-	Janeiro	1949	Grande
Fevereiro	1877	-	Fevereiro	1950	-
Fevereiro	1879	-	Janeiro	1951	-
Janeiro	1881	Grande	Março	1952	-
Janeiro	1882	-	Fevereiro	1956	Média
Janeiro	1883	-	Janeiro	1957	Grande
Fevereiro	1884	-	Fevereiro	1958	-
Janeiro	1885	-	Janeiro	1959	-
Janeiro	1891	-	Março	1961	-
Novembro	1895	-	Março	1962	-

Mês	Ano	Porte	Mês	Ano	Porte
-	1905	Grande	Janeiro	1963	-
-	1906	-	Fevereiro	1964	-
Outubro	1918	-	Janeiro	1965	-
Fevereiro	1919	-	Março	1966	-
-	1922	-	Janeiro	1967	-
-	1924	Localizada	Outubro	1978	-
-	1926	Localizada	Janeiro	1979	-
-	1929	Grande	Janeiro	1980	-
Dezembro	1930	-	Janeiro	1981	Grande
Fevereiro	1931	-	Março	1982	-
Janeiro	1932	-	Fevereiro	1983	-
Dezembro	1933	-	Janeiro	1984	-
Dezembro	1934	-	Março	1985	-
Fevereiro	1935	-	Março	1986	-
Março	1936	-	Janeiro	1987	Grande
Dezembro	1937	-	Março	1988	-
Dezembro	1938	-	Janeiro	1989	-
Janeiro	1939	-	Janeiro	1991	Grande
Fevereiro	1940	-	Dezembro	1994	-
Dezembro	1941	-	Fevereiro	1995	-
Março	1942	-	Março	1996	-
Fevereiro	1943	-	Março	1998	-
Março	1944	-	Março	1999	-
Fevereiro	1945	Grande	Janeiro	2000	Grande

Fonte: Adaptado de Moraes (2003 *apud* PINHEIRO, 2005)

Segundo Moraes (2003 *apud* PINHEIRO, 2005), em 1974 ocorreu a maior cheia de Itajubá, que atingiu o largo dos Passos, atual Praça Theodomiro Santiago, centro da área urbana, seguida da cheia de 1945, com base em relatos da população e registros fotográficos. A mais recente de grande magnitude ocorreu no ano de 2000, quando a precipitação acumulada atingiu valores máximos de 350 mm sobre a bacia entre os dias 2 e 4 de janeiro, concentrados nas cabeceiras do Rio Sapucaí, Lourenço Velho, Santo Antônio e, também, em toda a área de contribuição do Rio Verde. O nível do Rio Sapucaí ultrapassou a marca dos 8 metros, havendo uma cheia generalizada em toda a cidade. Pinheiro (2005) também apresentou os registros fotográficos de algumas inundações (Figuras 12a-i).



(a) 26 fev. 1919, Praça Getúlio Vargas e ao fundo Escola Estadual Cel. Carneiro Junior.



(b) 1929, Rua Xavier Lisboa, próximo ao antigo Posto Brasita.



(c) fev. 1935, Av. Cel. Carneiro Junior, próximo à Praça Wenceslau Brás.



(d) 4 fev. 1940, Praça Getúlio Vargas, próximo à Escola Cel. Carneiro Junior.



(e) 4 fev. 1945, Praça Wenceslau Brás.



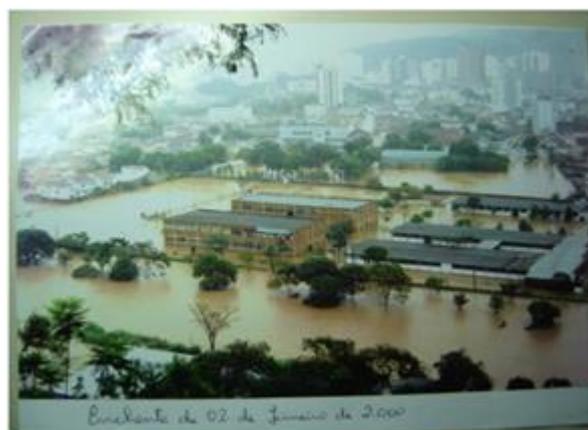
(f) 17 jan. 1957, Av. Cel. Carneiro Junior.



(g) 21 jan. 1979, Praça Wenceslau Brás, esquina com a Avenida Cel. Carneiro Junior.



(h) 16 jan. 1991, Ponte P4 (vista a montante), prédio branco, à esquerda da foto, é esquina com a Rua Francisca Rocha Faria.



(i) 2 jan. 2000, Av. Dr. Antônio Braga Filho, marginal direita FEPI.

Figura 12: Registros fotográficos de inundações em Itajubá

Fonte: Pinheiro (2005)

Pinheiro (2005), com base em séries históricas de cotas em estações fluviométricas da região, estimou as vazões máximas anuais, com suas respectivas profundidades na seção (H), cotas altimétricas, probabilidade de ocorrência anual (com base em uma distribuição de Gumbel) e os tempos de retorno, para o período de 1874 a 2003 para o município de Itajubá (Tabela 7). Os dados são referentes à estação fluviométrica da COPASA, para onde os dados de outras estações foram transpostos.

Tabela 7: Cotas e vazões de inundações para o período de 1874 a 2002, Estação-base COPASA

Ano	H (m)	Cota (m)	Vazão (m ³ /s)	Prob (%)	TR (anos)	Ano	H (m)	Cota (m)	Vazão (m ³ /s)	Prob (%)	TR (anos)
1874	9,6	848,1	973,3	0,0	141790,1	1963	3,6	842,2	69,2	58,1	1,7
1919	7,2	845,8	291,8	4,7	21,1	1964	3,4	842,0	61,8	61,7	1,6
1929	8,6	847,2	635,7	0,1	1780,8	1965	4,2	842,7	83,9	51,3	2,0
1930	5,6	844,2	134,8	31,1	3,2	1966	4,2	842,8	86,1	50,3	2,0
1931	5,0	843,6	108,2	40,8	2,4	1967	3,2	841,8	56,2	64,3	1,6
1932	3,8	842,4	74,7	55,5	1,8	1968	2,7	841,3	40,4	71,7	1,4
1933	2,7	841,3	40,7	71,6	1,4	1969	2,1	840,7	22,5	79,7	1,3
1934	4,3	842,9	88,6	49,2	2,0	1974	4,0	842,6	79,5	53,3	1,9
1935	7,1	845,7	283,5	5,3	19,0	1975	4,1	842,7	82,3	52,0	1,9
1936	4,4	843,0	90,6	48,3	2,1	1976	3,8	842,4	74,1	55,8	1,8
1937	4,4	842,9	89,4	48,8	2,0	1977	5,5	844,1	128,8	33,1	3,0
1938	3,9	842,5	75,8	55,0	1,8	1978	3,9	842,5	77,0	54,4	1,8
1939	4,2	842,8	85,3	50,7	2,0	1979	7,4	846,0	327,3	3,0	33,1
1940	7,2	845,8	291,8	4,7	21,1	1980	4,5	843,1	93,6	47,0	2,1
1941	3,6	842,2	68,9	58,3	1,7	1981	5,2	843,8	116,1	37,8	2,6
1942	3,7	842,3	72,1	56,7	1,8	1982	4,7	843,3	99,4	44,5	2,2
1943	3,6	842,2	68,6	58,4	1,7	1983	5,6	844,1	131,2	32,3	3,1
1944	2,8	841,4	44,2	70,0	1,4	1984	2,9	841,5	48,0	68,2	1,5
1945	8,5	847,1	601,3	0,1	1139,4	1985	5,4	844,0	122,9	35,2	2,8
1946	2,9	841,4	45,2	69,5	1,4	1986	4,8	843,3	100,9	43,8	2,3
1947	4,6	843,1	95,1	46,3	2,2	1987	3,8	842,4	74,1	55,8	1,8
1948	4,2	842,7	83,9	51,3	2,0	1988	4,7	843,3	99,7	44,4	2,3
1949	4,9	843,5	104,3	42,4	2,4	1989	4,1	842,7	83,7	51,4	1,9
1950	3,9	842,4	75,6	55,1	1,8	1990	4,1	842,7	83,7	51,4	1,9

Ano	H (m)	Cota (m)	Vazão (m ³ /s)	Prob (%)	TR (anos)	Ano	H (m)	Cota (m)	Vazão (m ³ /s)	Prob (%)	TR (anos)
1951	3,7	842,3	70,1	57,7	1,7	1991	7,4	846,0	327,3	3,0	33,1
1952	3,5	842,1	64,8	60,2	1,7	1992	4,6	843,2	96,5	45,7	2,2
1953	2,8	841,4	42,3	70,9	1,4	1993	5,0	843,6	108,9	40,6	2,5
1954	4,7	843,2	97,9	45,1	2,2	1994	5,0	843,5	107,2	41,2	2,4
1955	3,6	842,2	67,5	58,9	1,7	1995	4,9	843,5	105,6	41,9	2,4
1956	4,7	843,3	99,7	44,4	2,3	1996	5,3	843,9	119,2	36,6	2,7
1957	8,4	847,0	586,0	0,1	934,7	1997	5,1	843,6	110,6	39,9	2,5
1958	4,7	843,3	99,4	44,5	2,2	1998	3,9	842,5	77,0	54,5	1,8
1959	4,2	842,7	83,9	51,3	2,0	1999	5,1	843,7	111,3	39,6	2,5
1960	4,6	843,1	95,1	46,3	2,2	2000	8,3	846,9	550,3	0,2	588,9
1961	4,8	843,4	102,4	43,2	2,3	2001	3,8	842,4	73,9	55,9	1,8
1962	4,9	843,5	105,6	41,9	2,4	2002	4,5	843,1	94,5	46,6	2,1

Fonte: Pinheiro (2005)

A partir dos dados estimados e da curva-chave construída por Pinheiro (2005), Silva (2006) elaborou manchas de inundação para os tempos de retorno de 1, 10, 100, 500, 1000 e 1500 anos, para o município de Itajubá. Na Figura 13, é apresentada a mancha de inundação para o perímetro urbano para o tempo de retorno de 10 anos, com a respectiva cota de inundação referente a estação-base COPASA. Quanto menor o tempo de retorno, maior a suscetibilidade da área definida pela mancha de inundação. Tempo de retorno igual a 1 ano subestima a área suscetível a inundação, enquanto que tempo de retorno de 100 anos ou mais superestima esta área. De modo que se optou por analisar o mapa de suscetibilidade a inundação resultante da presente pesquisa comparando-se com a mancha de inundação para tempo de retorno de 10 anos elaborada por Silva (2006).



Figura 14: Deslizamento no bairro Vila Isabel, nov. 2017

Fonte: G1 Sul de Minas (2017)

Tabela 8: Deslizamentos divulgados em imprensa local

Local	Data	Características	Fonte
Bairro São Vicente	11 mar. 2016	Deslizamento de terra Choveu em um dia 63% do esperado para o mês de março	G1 Sul de Minas
Bairro Santa Rosa Bairro N Sra de Fátima	27 jan. 2016	Bairro Santa Rosa - uma pedra rolou de um barranco Bairro N Sra de Fátima - foram retirados 70 caminhões de terra Choveu 52 mm (22% do volume esperado para o mês de janeiro)	G1 Sul de Minas
Entre Itajubá e São José do Alegre	16 jan. 2016	Deslizamento de terra	G1 Sul de Minas
Bairro N Sra de Fátima	14 jan. 2016	Deslizamento de terra	G1 Sul de Minas
Rodovia Itajubá-Piranguçu	16 dez. 2015	Deslizamento de terra	G1 Sul de Minas
Bairro Avenida	06 set. 2015	Um barranco desmoronou	G1 Sul de Minas

4.3. Elaboração do banco de dados espaciais

Para esta pesquisa foi utilizada uma imagem do satélite Landsat 8, sensor OLI, de 5 de setembro de 2017, na órbita-ponto 218/076, que apresenta resolução espacial de 30 metros e já é ortorretificada e tratada radiometricamente a nível L1TP (*Level 1 Standard Terrain Correction*

Product). Esta imagem foi adquirida gratuitamente na plataforma Earth Explorer do USGS (*United States Geological Survey*).

Também foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE), com resolução espacial de 30 metros, obtido através do projeto TOPODATA do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais-INPE (VALERIANO; ROSSETTI, 2011) e elaborado a partir dos dados SRTM disponibilizados pelo USGS.

O mapa de solo, na escala de 1:25.000, foi elaborado por Maltauro (2018).

Utilizou-se também o limite municipal de Itajubá, disponibilizado pelo IBGE. Com relação as estradas, foram consideradas, além das estradas asfaltadas, as estradas de terra e as ruas do município. Os vetores correspondentes as estradas da cidade de Itajubá foram obtidos através da plataforma *OpenStreetMaps*. Quanto aos rios, optou-se por traça-los manualmente no *Google Earth* e converter o arquivo .kmz para *shapefile* no QGIS 2.18.18 (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2016), pois todos os arquivos pesquisados não eram tão precisos e completos.

Todos os dados utilizados na pesquisa foram reprojatados para o Sistema de Coordenadas Planas UTM, *datum* horizontal SIRGAS2000, zona 23S. Os dados utilizados na pesquisa são descritos na Tabela 9.

Tabela 9: Banco de dados espaciais

Banco de dados	Fonte	Data	Modelo de Dado Espacial	Resolução Espacial	Escala
Imagem Landsat 8 (OLI)	US GeologicalSurvey	2017	Raster	30 m	-
Modelo Digital de Elevação	Valeriano e Rossetti	2011	Raster	30 m	-
Mapa de solo	Maltauro	2018	Vetor	-	1:25.000
Limite Municipal	IBGE	2016	Vetor	-	-
Estradas	OpenStreetMap	2016	Vetor	-	-

4.4. Mapeamento de suscetibilidades a inundações

Para a determinação das áreas suscetíveis a inundação, primeiramente foram calculados os índices morfométricos para cada sub-bacia que compõe a bacia na qual o município de Itajubá está inserido, na sequência aplicou-se o modelo HAND e, finalmente, cruzou-se o resultado destas duas etapas, gerando-se o mapa final de suscetibilidade a inundação.

4.4.1. Cálculo dos índices morfométricos

Para esta etapa, utilizou-se o Modelo Digital de Elevação (MDE), que permitiu a delimitação das sub-bacias, a extração de parâmetros físicos e o cálculo dos índices morfométricos, conforme esquematizado na Figura 15.

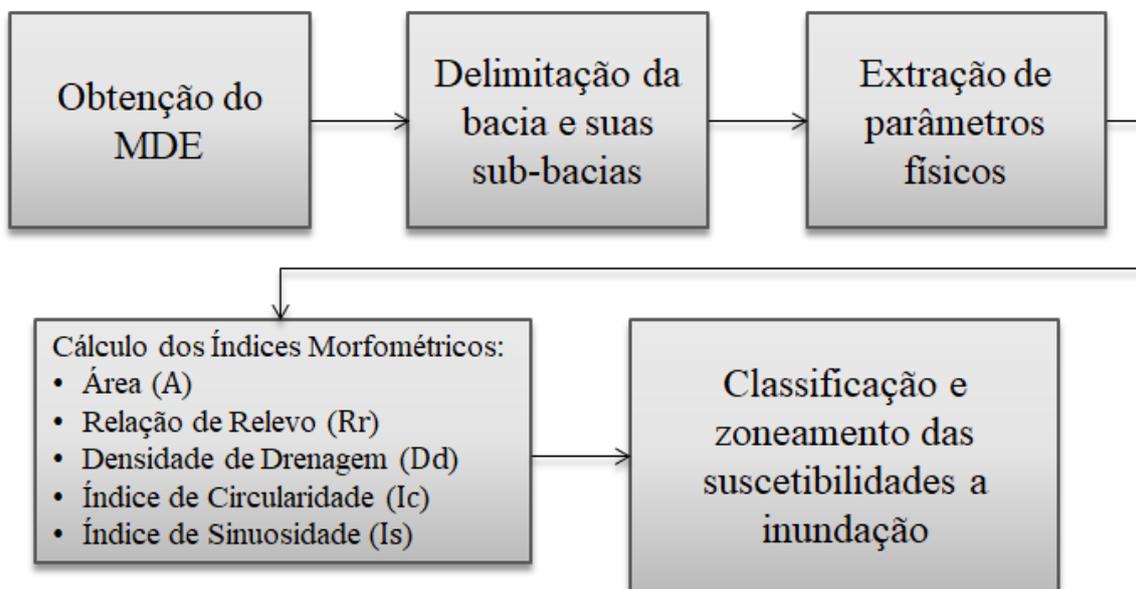


Figura 15: Esquema da etapa de cálculo dos índices morfométricos

Para a etapa de determinação da suscetibilidade a inundação por meio do cálculo de índices morfométricos, utilizou-se o *software* ArcGIS 10.2 (ESRI, 2013).

Primeiramente, executou-se, a partir do MDE, a ferramenta *Fill*, para a correção de sumidouros. Em seguida, foram determinadas as direções de fluxo, pela ferramenta *Flow Direction* e, então, calculou-se o fluxo acumulado pela ferramenta *Flow Accumulation*. O fluxo acumulado calcula a quantidade de células cujas direções de fluxo convergem acumuladamente para uma determinada célula.

As células com alto fluxo acumulado podem ser usadas para identificar os canais de drenagem. As células com fluxo acumulado igual a 0 podem ser usadas para identificar cristas. Os resultados de fluxo acumulado podem ser usados para extrair a drenagem, aplicando-se um valor de limiar para selecionar células com um alto fluxo acumulado, por meio de uma operação condicional, utilizando-se a ferramenta *Con*, conforme a Equação 8:

$$\text{Drenagem} = \text{Con}(\text{FluxoAcumulado} > \text{limiar}, 1) \quad (8)$$

Esta equação significa que, se a célula do *raster* de fluxo acumulado apresentar valor maior que o limiar, então a célula assume valor igual a 1, caso contrário, será retornado um valor *NoData*. Ou seja, é criado um *raster* onde o valor 1 representa a drenagem em um plano de fundo *NoData*.

A ferramenta para extração da drenagem está disponível em *Raster Calculator*. Foram testados diversos valores de limiar para determinar qual apresenta melhor resultado para delimitar a drenagem. Os valores testados foram: 50; 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1500; 2000 e 2500. Foram analisados, para cada valor, o comprimento de drenagem total, a ordem dos canais e os erros observados visualmente no *raster*. Notou-se que, para valores de limiar inferiores a 500, o *raster* apresentou muitos erros. Para valores entre 500 e 1000, os erros observados visualmente foram menores, a ordem dos canais foi a mesma (7) e o comprimento de drenagem total diminuiu pouco com o aumento do valor do limiar. Para valores superiores a 1000, os erros foram menores, mas a diminuição do comprimento de drenagem foi mais significativa e a ordem dos canais caiu para 6 a partir do limiar de 2000. Deste modo, optou-se por utilizar um limiar de 500 para a extração da drenagem, pois para este valor o comprimento de drenagem total foi alto e os erros foram menores.

Em *Raster Calculator*, gerou-se um novo arquivo de fluxo acumulado, no qual foram mantidos apenas os pixels de valor superior a 500. Na sequência, este arquivo *raster* foi convertido em vetor, utilizando-se o comando *Stream to Feature*.

A partir disto, é possível delimitar a bacia na qual o município de Itajubá está inserido e suas respectivas sub-bacias. Tanto a bacia, quanto suas sub-bacias foram delimitadas por meio da definição manual dos pontos do exutório. O exutório foi definido com a criação de um *Shapefile* de ponto que foi editado, clicando-se (no arquivo de direção de fluxo) sobre as coordenadas correspondentes ao ponto para o qual converge todo o escoamento superficial gerado no interior da bacia. Após se definir o ponto do exutório, foi gerada a bacia por meio da ferramenta *Watershed* e, posteriormente, convertida para vetor. Existem diversas possibilidades de escolha de bacias a serem delimitadas, conforme mais ou menos a jusante se define o ponto do exutório. Escolheu-se a bacia de menor área possível e que englobasse todo o município de Itajubá, para tornar mais viável as etapas posteriores. Os principais rios inseridos nesta bacia foram o Rio Sapucaí (um trecho) e o Rio Lourenço Velho, em sua totalidade.

O mesmo raciocínio foi utilizado para a delimitação das sub-bacias, porém, considerou-se, também, a ordem dos canais, definida anteriormente pela ferramenta *Stream Order*, pelo

método de Strahler (1952). Este método inicia com a identificação dos rios de primeira ordem, que são aqueles que não recebem nenhum afluente. A confluência de dois rios de primeira ordem forma um de segunda ordem. E quando dois rios de ordens hierárquicas diferentes se juntam, prevalece a maior ordem (Figura 16).

Na identificação do rio principal, de forma manual, adotou-se o método de Horton (1945). Por este método, deve-se caminhar de jusante para montante e, a partir das confluências, seguir o caminho de maior ordem. Quando houver confluência de mesma ordem, deve-se observar: (a) a bacia hidrográfica escolhida apresenta forte controle estrutural; (b) a bacia hidrográfica não apresenta forte controle estrutural. Para a situação descrita em (a), escolhe-se o caminho que apresenta a bacia com maior área. Se os dados de área forem parecidos, escolhe-se a sub-bacia de maior extensão. Se ainda assim permanecer indefinido, o critério da maior altitude será escolhido. Para a situação descrita em (b), os critérios de desempate são o de menor ângulo, seguidos dos critérios de maior área drenada, maior extensão e maior altitude. Por último, considera-se o critério da toponímia, que pode trazer o nome do rio principal.

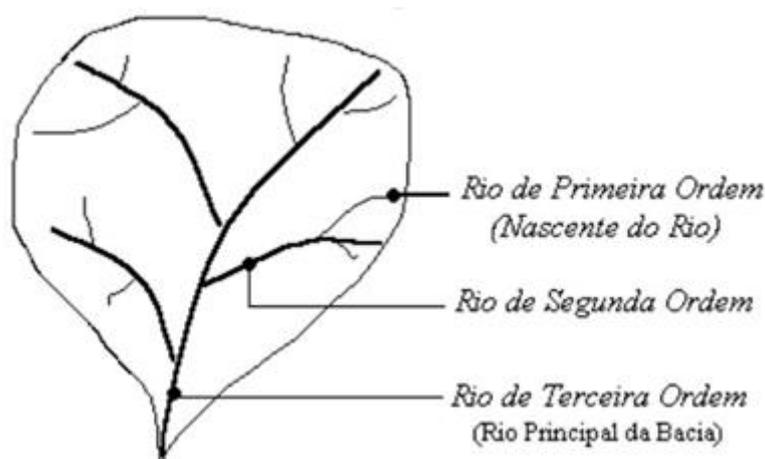


Figura 16: Esquema com a hierarquia de drenagem pelo método de Strahler

Fonte: Bertoni e Lombardi (1999)

Para a delimitação das sub-bacias, considerando-se uma bacia de ordem n , inicia-se a partir das sub-bacias de ordem $n-1$ e das confluências de jusante para montante. Todas as sub-bacias, com exceção das de primeira ordem, devem conter o rio principal ou estar ligada a ele. IPT e CPRM (2014) recomendam que se adote a delimitação de sub-bacias para $n-2$, mas, se os resultados indicarem sub-bacias muito grandes, os exutórios são revistos.

Concluída a etapa de delimitação das sub-bacias, prossegue-se para o cálculo dos índices morfométricos para cada uma das sub-bacias. Foram avaliados cinco parâmetros ou índices

morfométricos, são eles: área de contribuição (Ac), relação de relevo (Rr), densidade de drenagem (Dd), índice de circularidade (Ic) e índice de sinuosidade (Is). O cálculo destes índices seguiu os procedimentos e equações apresentados no item 3.4.3.1.

Os valores dos cinco índices de cada sub-bacia foram normalizados em uma escala de 1 (menor suscetibilidade) a 5 (maior suscetibilidade), para se avaliar a influência de cada sub-bacia (BAJABAA; MASOUD; AL- AMARI, 2013).

Para os parâmetros e índices que apresentam relação diretamente proporcional ao fenômeno da inundação (Área de contribuição, Densidade de drenagem, Índice de circularidade e Índice de sinuosidade) utilizou-se a Equação 9. Já para o que apresenta relação inversa ao fenômeno (Relação de relevo), aplicou-se a Equação 10.

$$GS = \frac{4(X-X_{\min})}{(X_{\max}-X_{\min})} + 1 \quad (9)$$

$$GS = \frac{4(X-X_{\max})}{(X_{\min}-X_{\max})} + 1 \quad (10)$$

Onde:

GS: Grau de Suscetibilidade;

X: Valor do parâmetro/índice morfométrico a ser avaliado para cada sub-bacia; e

Xmin e Xmax: Valores mínimo e máximo dos parâmetros/índices morfométricos entre todas as sub-bacias, respectivamente.

Por fim, os parâmetros e índices normalizados são somados para cada sub-bacia e novamente normalizados, numa escala de 1 a 3 (1 = baixa suscetibilidade; 2 = média suscetibilidade; e 3 = alta suscetibilidade). Para isto, utilizou-se a Equação 11:

$$GSf = \frac{2(Y-Y_{\min})}{(Y_{\max}-Y_{\min})} + 1 \quad (11)$$

Onde:

GSf: Grau de Suscetibilidade final;

Y: Valor da soma dos parâmetros/índices em cada sub-bacia; e

Ymax e Ymin: Valores mínimo e máximo da soma dos parâmetros/índices de todas as sub-bacias, respectivamente.

Por meio da ferramenta *Merge*, os polígonos das sub-bacias foram unidos em um único arquivo. Em seguida, em uma planilha eletrônica, procedeu-se ao cálculo dos cinco parâmetros/índices para todas as sub-bacias e do grau de suscetibilidade final. No ArcGIS 10.2 (ESRI, 2013), adicionou-se a planilha com os cálculos e utilizou-se a ferramenta *Join* para unir

a planilha, com os valores de GSf, à tabela de atributos do arquivo criado anteriormente, com a união das sub-bacias. Então, foi possível, acessando-se as propriedades do *layer* das sub-bacias, selecionar a coluna dos índices para ser representada no mapa e apresentá-los em 3 classes, baixa ($1 \leq GSf < 1,67$), média ($1,67 \leq GSf < 2,33$) e alta suscetibilidade ($2,33 \leq GSf < 3,0$). O mapa final foi recortado para o limite do município de Itajubá, concluindo-se, assim, a primeira etapa para determinação da suscetibilidade a inundação.

4.4.2. Aplicação do modelo HAND

Para esta etapa utilizou-se o *plugin* TerraHidro do *software* TerraView 4.2.2 (INPE, 2013). Inicialmente, criou-se um banco de dados do tipo PostgreSQL e *encoding* SQL_ASCII. Em seguida, importou-se o MDE com as correções de depressões gerado na etapa anterior (criando-se vista e tema) e o limite da bacia (com tema vinculado à vista do MDE) e recortou-se o MDE para a área da bacia. Então, extraíram-se os fluxos locais, calculou-se a área de contribuição e determinou-se a rede de drenagem para um limiar de 500 e, finalmente, gerou-se o HAND.

Para a definição dos valores das faixas de elevação acima da drenagem, para as quais são atribuídas as classes de suscetibilidade (Figura 17), utilizou-se os valores da seção transversal do Rio Sapucaí obtidos no levantamento topobatimétrico realizado por PINHERO (2005). Esta seção está a montante do perímetro urbano e localiza-se próxima a estação de captação da COPASA, no bairro Santa Rosa, sob as coordenadas de latitude $22^{\circ}26'46''S$ e longitude $45^{\circ}25'26''O$, *datum* WGS84 (Figura 18). Optou-se por utilizar uma seção do Rio Sapucaí pois ele atravessa a área urbana no município, onde o número de atingidos e os prejuízos são mais significativos quando há o transbordamento deste rio.



Figura 17: Classes de fatiamento adotadas no âmbito da aplicação do modelo HAND em planícies e terraços

Fonte: IPT e CPRM (2014)



Figura 18: Localização da seção do Rio Sapucaí onde foi realizado o levantamento topobatimétrico

Fonte: Google Earth (2016)

Os valores obtidos no levantamento topobatimétrico realizado por Pinheiro (2005) são observados na Figura 19.

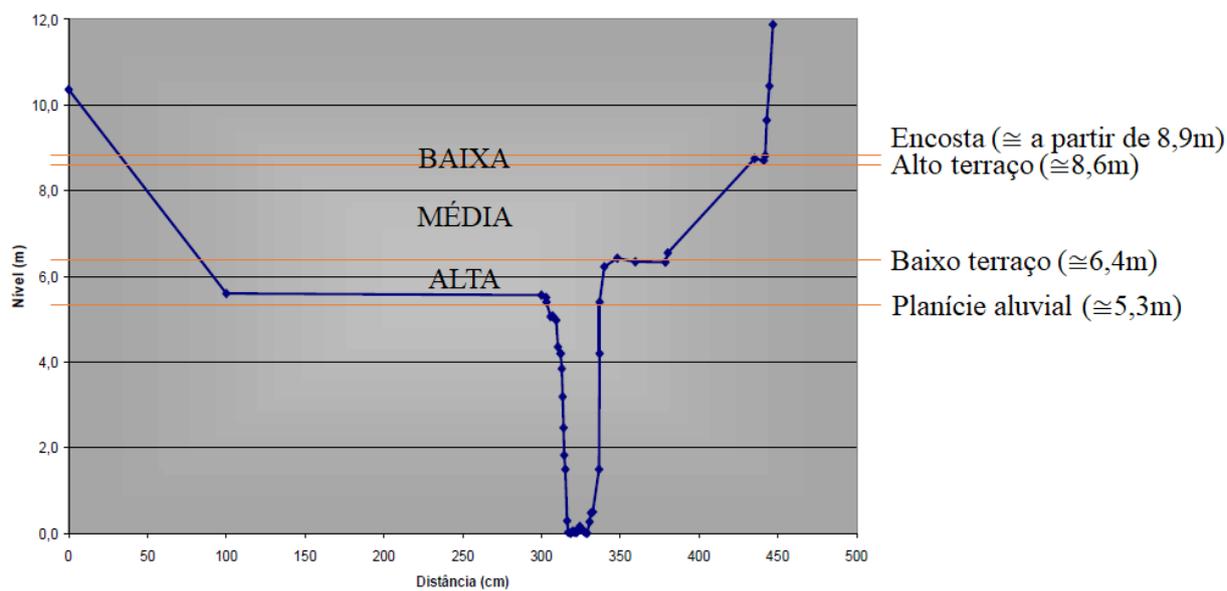


Figura 19: Levantamento topobatimétrico de uma seção do Rio Sapucaí

Fonte: Adaptado de Pinheiro (2005)

Estes valores foram normalizados com relação à margem do rio, conforme os valores apresentados na Tabela 10.

Tabela 10: Valores inseridos no modelo HAND para a determinação das classes de suscetibilidade a inundação

Trecho do perfil	Valores antigos (m)	Valores normalizados (m)
Planície aluvial	5,3	0
Baixo terraço	6,4	1,1
Alto terraço	8,6	3,3
Encosta	8,9	3,6

De posse desses valores, retornou-se ao TerraHidro e, na opção de editar legenda, definiram-se 3 classes e os valores máximos e mínimos de cada uma delas, gerando-se as faixas de suscetibilidade para o modelo HAND. Em seguida, o tema do HAND foi salvo em arquivo *GeoTiff*.

Finalmente, realizou-se a integração dos resultados obtidos nas etapas 1 (parâmetros/índices morfométricos calculados para cada sub-bacia) e 2 (modelo HAND), conforme proposto por IPT e CPRM (2014). Para isto, foram adicionados, no *software* ArcGIS 10.2 (ESRI, 2013), os arquivos gerados nas duas etapas. Primeiramente, o arquivo resultante do cálculo dos índices morfométricos foi convertido para *raster*. Em seguida, recortou-o o HAND para o limite de Itajubá. Por meio da ferramenta *Reclassify*, os dois arquivos foram reclassificados, ambos para 3 classes, conforme apresentado nas Tabelas 11 e 12, respectivamente.

Tabela 11: Valores para reclassificação do mapa gerado a partir do cálculo dos índices morfométricos

Reclassificação	
Valores antigos	Novos valores
1 - 1,67	1
1,67 - 2,33	2
2,33 - 3	3

Tabela 12: Valores para reclassificação do mapa gerado pelo modelo HAND

Reclassificação	
Valores antigos	Novos valores
1 - 89	3
90 - 253	2
254	1

Deste modo, foi possível realizar a soma dos dois mapas, por meio da ferramenta *Raster Calculator*, conforme a matriz apresentada na Tabela 13.

Tabela 13: Matriz de correlação entre as duas classificações de suscetibilidade obtidas segundo os índices morfométricos e o modelo HAND

Índices Morfométricos \ Modelo HAND	Modelo HAND		
	Alta - 3	Média - 2	Baixa - 1
Alta - 3	Alta - 6	Alta - 5	Média - 4
Média - 2	Alta - 5	Média - 4	Baixa - 3
Baixa - 1	Média - 4	Baixa - 3	Baixa - 2

Finalmente, o arquivo gerado nesta etapa foi reclassificado de acordo com a Tabela 14.

Tabela 14: Valores para reclassificação do mapa final

Reclassificação – Mapa final	
Valores antigos	Novos valores
2 - 3	1
4	2
5 - 6	3

4.5. Mapeamento de suscetibilidades a movimentos de massa – Processo Hierárquico Analítico (AHP)

As áreas suscetíveis a movimentos de massa foram definidas por meio do Processo Hierárquico Analítico (AHP), conforme exposto no esquema da Figura 20.

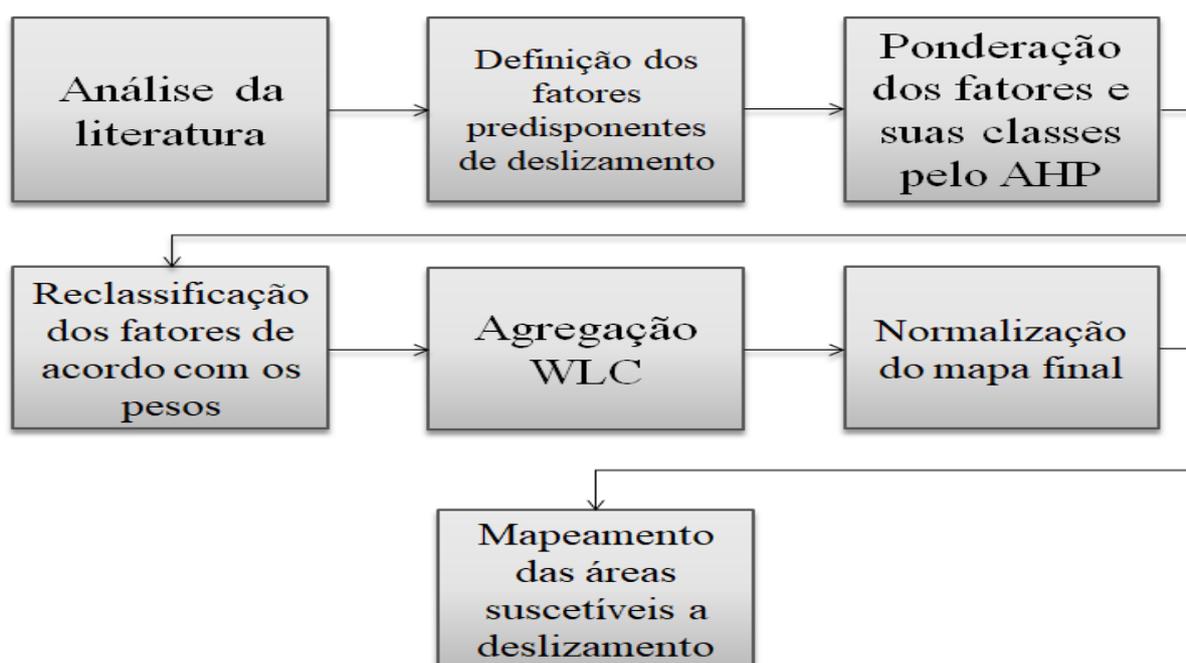


Figura 20: Esquema com as etapas da metodologia para determinação das áreas suscetíveis a movimentos de massa

Para o mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa, inicialmente pesquisou-se na literatura os principais fatores predisponentes ao processo de deslizamento. Os fatores selecionados, com base nas referências apresentadas no item 3.5.2, foram: declividade, cobertura do solo, pedologia, distância de rios e distância de estradas. Em seguida, foi gerado o mapa de cada fator para o município de Itajubá.

O mapa de declividade, em porcentagem, foi gerado diretamente do MDE pela ferramenta *Slope*, no ArcGis 10.2 (ESRI, 2013) e, posteriormente, classificado segundo as classes de declividade definidas pela EMBRAPA (1999), conforme Tabela 15.

Tabela 15: Classificação de declividade segundo EMBRAPA

Declividade (%)	Classe de relevo
0-3	Plano
3-8	Suavemente ondulado
8-20	Ondulado
20-45	Fortemente ondulado
45-75	Montanhoso
>75	Escarpado

Fonte: EMBRAPA (1999)

Para os rios e estradas, foram gerados *buffers* para os respectivos vetores, para o mapeamento das distâncias com relação aos mesmos, de acordo com os valores da Tabela 16.

Tabela 16: Distâncias com relação aos rios e estradas.

Distância dos rios (m)	Distância das estradas (m)
0-25	0-25
25-50	25-50
50-75	50-75
75-100	75-100
100-150	100-125
150-200	>125
200-250	
>250	

Fonte: Yalcin et al. (2011)

Para o mapa de solos, utilizou-se o mapa elaborado por Maltauro (2018). E, por fim, para o mapa de cobertura do solo, realizou-se a classificação da imagem do Landsat-8/OLI para o ano de 2017. Para a classificação, utilizou-se o *plugin SCP*, do *software QGIS 2.18.18* (QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2016), que inclui a etapa de pré-processamento, na qual os valores de número digital (DN) de cada *pixel* são convertidos para valores de reflectância de topo de atmosfera (TOA), para a correção do espalhamento atmosférico (SANCHES et al., 2011), segundo a Equação 12 (USGS, 2017).

$$\rho_{\lambda} = \frac{M_{\rho} \cdot Q_{cal} + A_{\rho}}{\sin(\theta_{SE})} \quad (12)$$

Onde:

ρ_{λ} : Reflectância planetária de topo da atmosfera [sem unidade]

M_{ρ} : Fator multiplicativo de re-escala específico de cada banda encontrado no metadado da imagem (REFLECTANCE_MULT_BAND_x)

A_{ρ} : Fator aditivo de re-escala específico de cada banda encontrado no metadado da imagem (REFLECTANCE_ADD_BAND_x)

Q_{cal} : Valor do pixel calibrado quantificado [número digital]

θ_{SE} : Ângulo de elevação do sol [graus]

Em seguida, realizou-se a composição colorida falsa cor 5(R)6(G)4(B) para o Landsat-8/OLI, recomendada para dar ênfase a terra/água (ESRI, 2013), para, então, proceder à classificação supervisionada da imagem pelo algoritmo máxima verossimilhança. A imagem foi classificada segundo as seguintes coberturas do solo: água, área construída, pastagem, vegetação de dossel fechado e solo exposto. Após a classificação, realizou-se uma correção manual dos polígonos classificados incorretamente.

A partir disto, as classes de cada fator foram comparadas em uma matriz par a par, gerando-se um peso para cada classe, a fim de hierarquizar a predisposição de uma classe à ocorrência de deslizamento com relação as outras classes, sendo que pesos maiores indicam maior predisposição da classe à ocorrência de deslizamento. Feito isto, foi possível reclassificar as classes dos fatores com base nos pesos. O mesmo procedimento de comparação em uma matriz par a par, para o cálculo dos pesos, foi realizado com os fatores.

Após atribuídos os pesos, os fatores são agregados de acordo com a técnica *Weighted Linear Combination* (WLC), utilizando-se a ferramenta *Weighted Sum*, no ArcGis 10.2 (ESRI, 2013). Esta ferramenta permite a sobreposição de cada *raster* multiplicado por seu respectivo peso, gerando a soma ponderada de cada *pixel* na imagem final. Esta soma foi normalizada em uma escala de 0 a 1, por meio de uma função *fuzzy linear*, utilizando-se a ferramenta *Fuzzy Membership* no *software* ArcGis (ESRI, 2013). Sendo os valores próximos a 0, considerados como áreas pouco suscetíveis a deslizamento e valores próximos de 1, áreas mais suscetíveis a deslizamento, resultando no mapa final de suscetibilidade a deslizamento.

Por fim, no *software* Google Earth Pro (2018), foram delimitados os polígonos dos movimentos de massa no município de Itajubá, para análise e validação do mapa final de suscetibilidade a movimentos de massa.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste tópico serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nesta pesquisa. No primeiro subitem serão analisados os resultados referentes ao mapeamento das suscetibilidades a inundações. E no segundo subitem serão tratados os resultados relativos ao mapeamento das suscetibilidades a movimentos de massa.

5.1. Mapeamento de suscetibilidades a inundações

Após seguir o método de Strahler (1952) e Horton (1945) para delimitação das sub-bacias e identificação do rio principal, respectivamente, obteve-se a configuração apresentada na Figura 21.

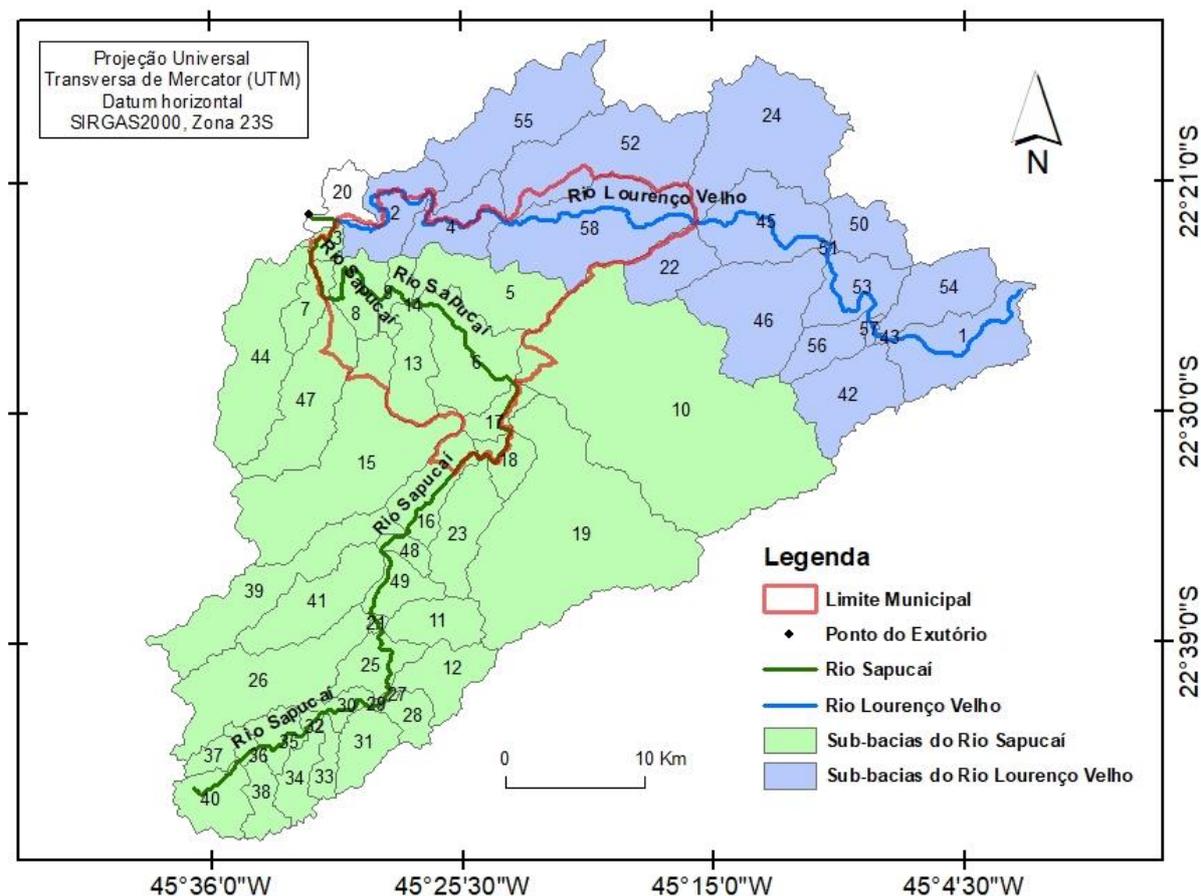


Figura 21: Mapa com a delimitação das sub-bacias

No ponto do exutório, o rio apresenta ordem 6. Os dois principais rios desta bacia são o Sapucaí, de ordem 5, que atravessa o município, e o Lourenço Velho, também de ordem 5, na parte norte do município. O rio Lourenço Velho é um afluente do Sapucaí, contudo, optou-se por delimitar as sub-bacias, até terceira ordem, para estes dois rios de forma independente.

Bacias de ordem 3 atendem a orientação da metodologia de tentativa de sub-bacias de ordem n-2 e geram um número viável de sub-bacias com área não muito grande para se trabalhar.

Foram delimitadas ao todo 58 sub-bacias, 39 ligadas ao Rio Sapucaí e 18 ligadas ao Rio Lourenço Velho e 1 pertencente à bacia principal. Algumas sub-bacias apresentaram ordem superior a três, pois para sub-bacias de ordem inferior, o rio principal não estaria contido ou ligado as mesmas.

Da primeira etapa, na qual calcularam-se os índices morfométricos, foram obtidos os dados apresentados na Tabela 17.

Tabela 17: Dados resultantes dos cálculos dos índices morfométricos

Bacia	Parâmetro/Índice					Parâmetro/Índice Normalizado (Escala de 1 a 5) (s. u.)					Grau de susceptibilidade final (Escala de 1 a 3) (s. u.)
	Ac (km ^{1,86})	Rr (s. u.)	Dd (km ⁻¹)	Ic (s. u.)	Is (s. u.)	Ac	Rr	Dd	Ic	Is	
1	8,01	0,0778	1,06	0,4232	1,2418	1,92	4,32	1,64	2,55	1,99	2,04
2	5,34	0,0417	1,06	0,3886	1,6914	1,61	4,82	1,63	2,29	3,83	2,46
3	1,22	0,0605	1,13	0,5771	1,3072	1,13	4,56	1,80	3,73	2,26	2,29
4	4,70	0,0485	0,95	0,3879	1,7379	1,54	4,73	1,38	2,28	4,02	2,41
5	6,86	0,0566	0,93	0,3930	1,4217	1,79	4,61	1,33	2,32	2,73	2,12
6	7,39	0,0879	0,88	0,4963	1,0906	1,85	4,18	1,22	3,11	1,37	1,87
7	2,69	0,0288	1,02	0,3897	1,1571	1,30	5,00	1,54	2,30	1,64	1,88
8	3,41	0,0435	1,03	0,5556	1,9758	1,39	4,80	1,56	3,56	5,00	2,98
9	1,87	0,0703	0,99	0,3857	1,4019	1,21	4,42	1,47	2,27	2,64	1,94
10	34,56	0,0390	0,98	0,4753	1,2825	5,00	4,86	1,44	2,95	2,15	3,00
11	3,86	0,0896	0,93	0,5924	1,1084	1,44	4,15	1,34	3,84	1,44	1,99
12	4,28	0,0548	1,01	0,4386	1,1680	1,49	4,64	1,53	2,67	1,68	1,94
13	4,47	0,0656	0,94	0,4897	1,4199	1,51	4,49	1,36	3,06	2,72	2,21
14	0,08	0,0641	2,36	0,5454	1,0201	1,00	4,51	4,61	3,49	1,08	2,58
15	16,09	0,0415	0,96	0,2737	1,2659	2,86	4,82	1,41	1,41	2,09	2,08
16	4,54	0,0847	0,95	0,5317	1,1165	1,52	4,22	1,37	3,38	1,47	1,93
17	2,13	0,1148	0,90	0,4567	1,5269	1,24	3,80	1,27	2,81	3,16	2,00
18	2,52	0,1594	0,99	0,5982	1,1245	1,28	3,18	1,47	3,89	1,51	1,77
19	23,40	0,0417	0,95	0,4290	1,6440	3,70	4,82	1,38	2,60	3,64	2,94
20	2,69	0,0404	1,20	0,4162	1,1321	1,30	4,84	1,95	2,50	1,54	1,97
21	0,37	0,1888	1,27	0,7059	1,2019	1,03	2,77	2,11	4,71	1,82	2,05
22	4,34	0,1125	0,80	0,6369	1,0332	1,49	3,84	1,05	4,18	1,13	1,86
23	5,23	0,0845	1,09	0,4816	1,2171	1,60	4,23	1,69	3,00	1,89	2,03
24	12,89	0,0697	0,98	0,4258	1,0996	2,49	4,43	1,45	2,57	1,40	2,02
25	3,44	0,0784	1,02	0,4641	1,5872	1,39	4,31	1,53	2,87	3,41	2,30
26	10,42	0,0386	0,93	0,3190	1,1792	2,20	4,86	1,33	1,76	1,73	1,91

Bacia	Parâmetro/Índice					Parâmetro/Índice Normalizado (Escala de 1 a 5) (s. u.)					Grau de susceptibilidade final (Escala de 1 a 3) (s. u.)
	Ac (km ^{1,86})	Rr (s. u.)	Dd (km ⁻¹)	Ic (s. u.)	Is (s. u.)	Ac	Rr	Dd	Ic	Is	
27	0,24	0,1073	1,44	0,6220	1,1246	1,02	3,91	2,49	4,07	1,51	2,18
28	2,05	0,0889	1,00	0,5675	1,2827	1,23	4,17	1,49	3,65	2,16	2,10
29	0,15	0,1433	1,48	0,7438	1,0012	1,01	3,41	2,58	5,00	1,00	2,18
30	1,47	0,0461	1,19	0,4108	1,1926	1,16	4,76	1,92	2,46	1,79	1,96
31	3,42	0,0668	1,04	0,6228	1,2187	1,39	4,47	1,58	4,08	1,89	2,28
32	0,53	0,0839	1,25	0,5607	1,0233	1,05	4,23	2,06	3,60	1,09	1,95
33	1,72	0,0521	1,06	0,3669	1,2871	1,19	4,68	1,63	2,12	2,17	1,89
34	2,70	0,0456	1,07	0,3586	1,2411	1,30	4,77	1,65	2,06	1,98	1,88
35	2,42	0,0523	1,09	0,5065	1,2271	1,27	4,67	1,71	3,19	1,93	2,12
36	0,91	0,1284	1,12	0,4728	1,0077	1,10	3,62	1,78	2,93	1,03	1,56
37	1,43	0,0608	0,96	0,5481	1,0362	1,16	4,55	1,41	3,51	1,14	1,88
38	2,49	0,0417	1,12	0,3689	1,2833	1,28	4,82	1,77	2,14	2,16	1,98
39	8,89	0,0386	1,12	0,2197	1,2183	2,02	4,86	1,76	1,00	1,89	1,82
40	4,02	0,0458	1,07	0,5400	1,2395	1,46	4,76	1,65	3,44	1,98	2,25
41	6,46	0,0543	0,86	0,4402	1,1737	1,74	4,65	1,17	2,68	1,71	1,92
42	6,52	0,1055	0,91	0,4858	1,1265	1,75	3,93	1,29	3,03	1,51	1,82
43	0,15	0,0889	2,54	0,5181	1,2084	1,01	4,16	5,00	3,28	1,85	2,73
44	9,88	0,0508	0,96	0,3616	1,2887	2,14	4,69	1,41	2,08	2,18	2,06
45	7,65	0,0627	0,89	0,6531	1,2257	1,88	4,53	1,24	4,31	1,92	2,39
46	9,90	0,0646	0,85	0,5382	1,1562	2,14	4,50	1,15	3,43	1,64	2,14
47	8,34	0,0608	1,06	0,4074	1,2046	1,96	4,56	1,62	2,43	1,84	2,03
48	1,30	0,3164	0,98	0,5681	1,0521	1,14	1,00	1,45	3,66	1,21	1,08
49	2,84	0,1468	0,95	0,5041	1,1763	1,32	3,36	1,38	3,17	1,72	1,68
50	3,86	0,0962	0,93	0,4924	1,2099	1,44	4,06	1,34	3,08	1,86	1,88
51	0,24	0,2855	1,23	0,6283	1,1724	1,02	1,43	2,03	4,12	1,70	1,52
52	11,53	0,0439	0,97	0,4040	1,3844	2,33	4,79	1,42	2,41	2,57	2,30
53	4,94	0,0661	0,96	0,5339	1,7220	1,56	4,48	1,41	3,40	3,96	2,62
54	5,71	0,0599	0,89	0,5281	1,1852	1,65	4,57	1,25	3,35	1,76	2,08
55	10,23	0,0417	0,94	0,3094	1,1459	2,18	4,82	1,36	1,69	1,59	1,85
56	3,06	0,0999	0,88	0,5014	1,0587	1,35	4,01	1,22	3,15	1,24	1,69
57	0,41	0,1799	0,78	0,3514	1,0460	1,04	2,90	1,00	2,01	1,18	1,00
58	11,72	0,0634	0,94	0,4784	1,1089	2,35	4,52	1,35	2,97	1,44	2,09

O mapa de susceptibilidade a inundação resultante desta etapa é apresentado na Figura 22 e as respectivas áreas de cada classe são indicadas na Tabela 18.

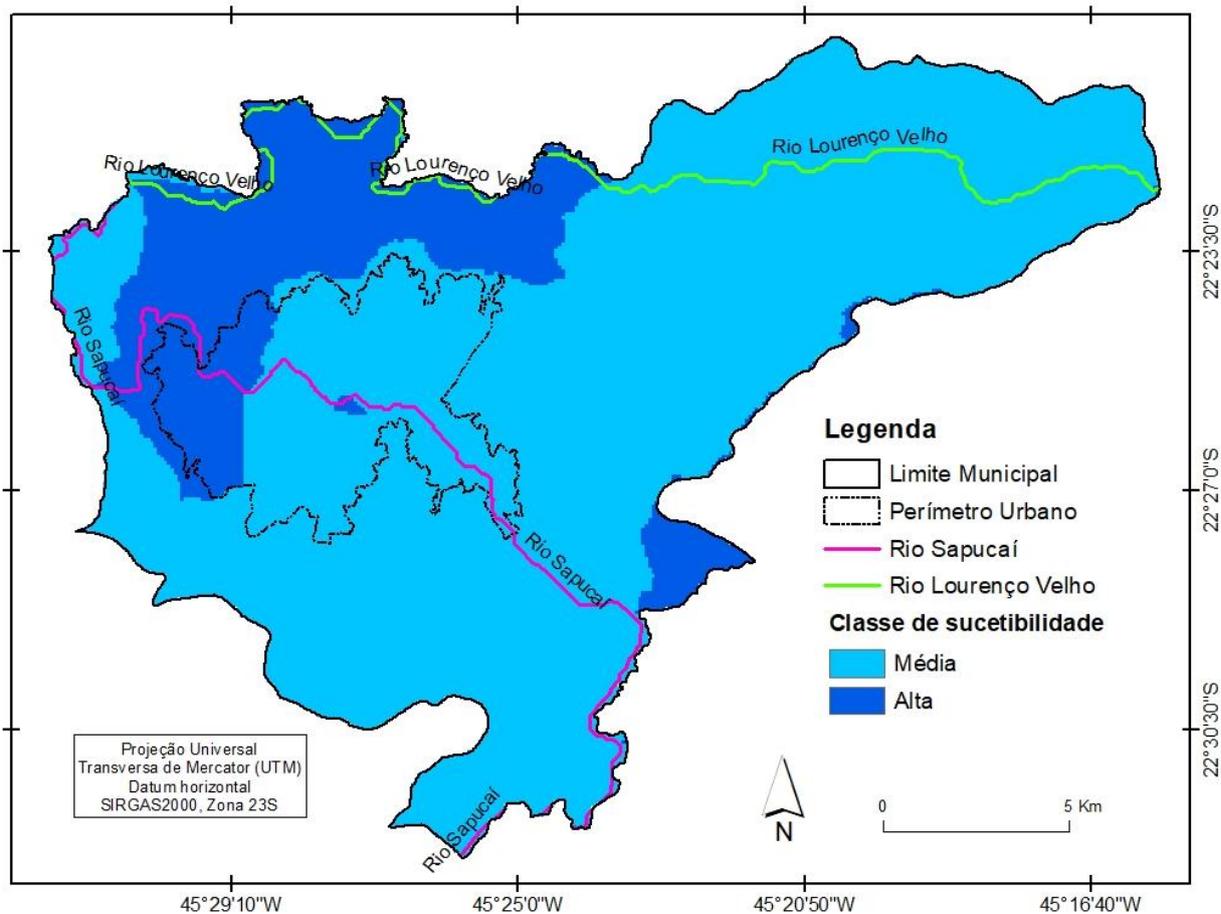


Figura 22: Mapa de suscetibilidade a inunda o pelo cálculo dos índices morfométricos

Tabela 18:  rea das classes de suscetibilidade a inunda o pelo cálculo dos índices morfométricos

Classe	�rea (km ²)	Porcentagem do total (%)
Média	237,22	80,52
Alta	57,39	19,48
Total	294,61	100

Com rela o a Tabela 17, pode-se observar que 4 sub-bacias apresentaram suscetibilidade baixa ($1 \leq GSf < 0,67$), 46 suscetibilidade média ($0,67 \leq GSf < 2,33$) e 8 suscetibilidade alta ($2,33 \leq GSf < 3,0$). Das bacias com suscetibilidade alta notou-se que, em geral, este alto valor   em fun o, principalmente, de baixos valores de R_r , ou seja, relevos mais planos, fluxos lentos e acúmulo de água na sub-bacia. Contudo, pelo mapa e pela Tabela 18, pode-se observar que apenas uma pequena área com suscetibilidade alta (19,48%) está inserida no município de Itajubá, cuja maior área apresenta suscetibilidade média (80,52%). Nenhuma sub-bacia com suscetibilidade baixa foi observada dentro dos limites do município, com base nos índices morfométricos. Cabe ressaltar ainda que o enquadramento de uma sub-bacia na classe de

suscetibilidade alta, não significa que toda a área da sub-bacia está suscetível a inundação, mas sim, os trechos mais planos próximos aos cursos d'água.

Da segunda etapa, de determinação da suscetibilidade a inundação pelo modelo HAND, resultou o mapa da Figura 23. As áreas de cada classe de suscetibilidade estão presentes na Tabela 19. Pode-se observar que as maiores áreas com alta suscetibilidade a inundação são na planície de inundação do Rio Sapucaí e representam 10,80% da área total do município. E, ao contrário do observado na primeira etapa, apenas uma pequena área apresenta suscetibilidade média (3,26%). A maior parcela do município (85,94%) apresenta suscetibilidade baixa.

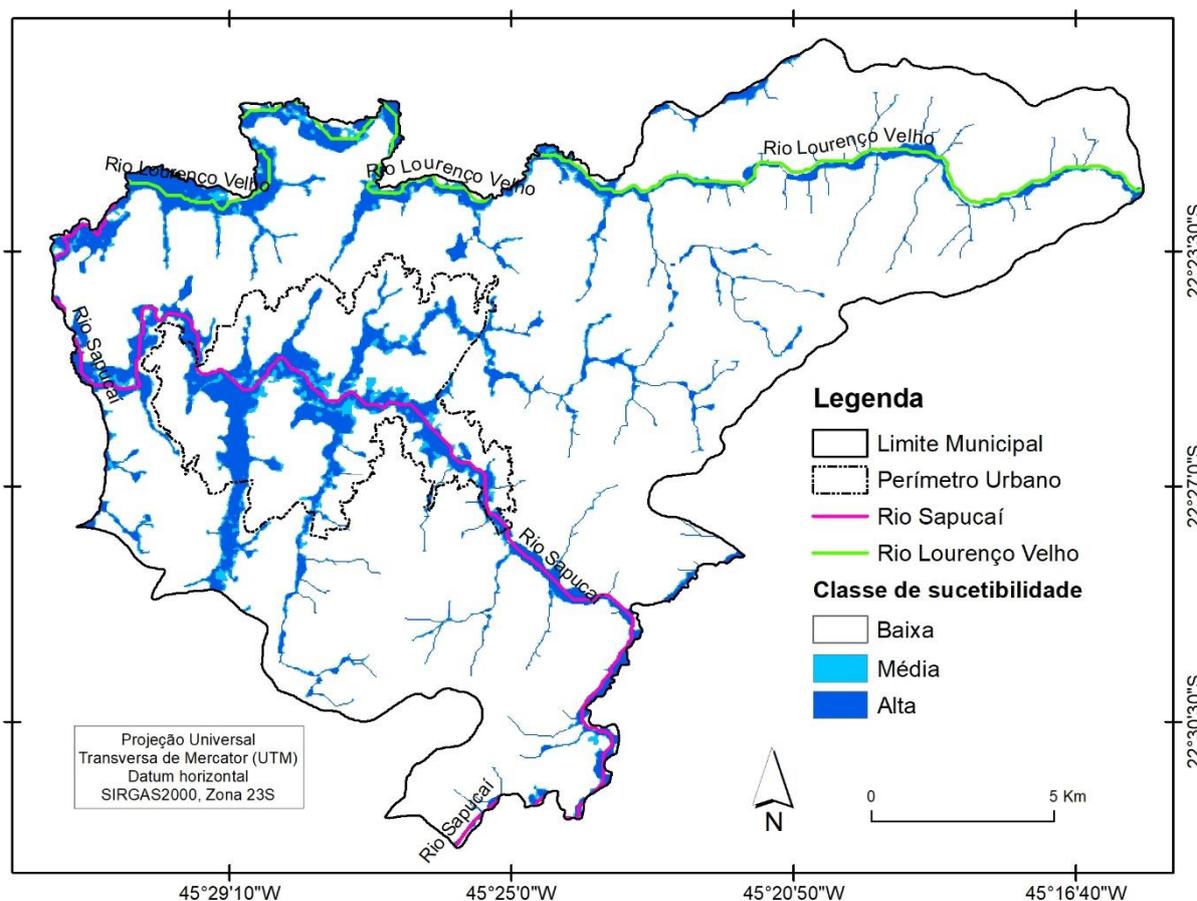


Figura 23: Mapa de suscetibilidade a inundação pela aplicação do Modelo HAND

Tabela 19: Área das classes de suscetibilidade a inundação pelo modelo HAND

Classe	Área (km ²)	Porcentagem do total (%)
Baixa	253,19	85,94
Média	9,61	3,26
Alta	31,81	10,80
Total	294,61	100

Após o cruzamento dos mapas resultantes das duas etapas anteriores, obteve-se o mapa final de suscetibilidade a inundações observado na Figura 24 e as respectivas áreas das classes de suscetibilidade, na Tabela 20.

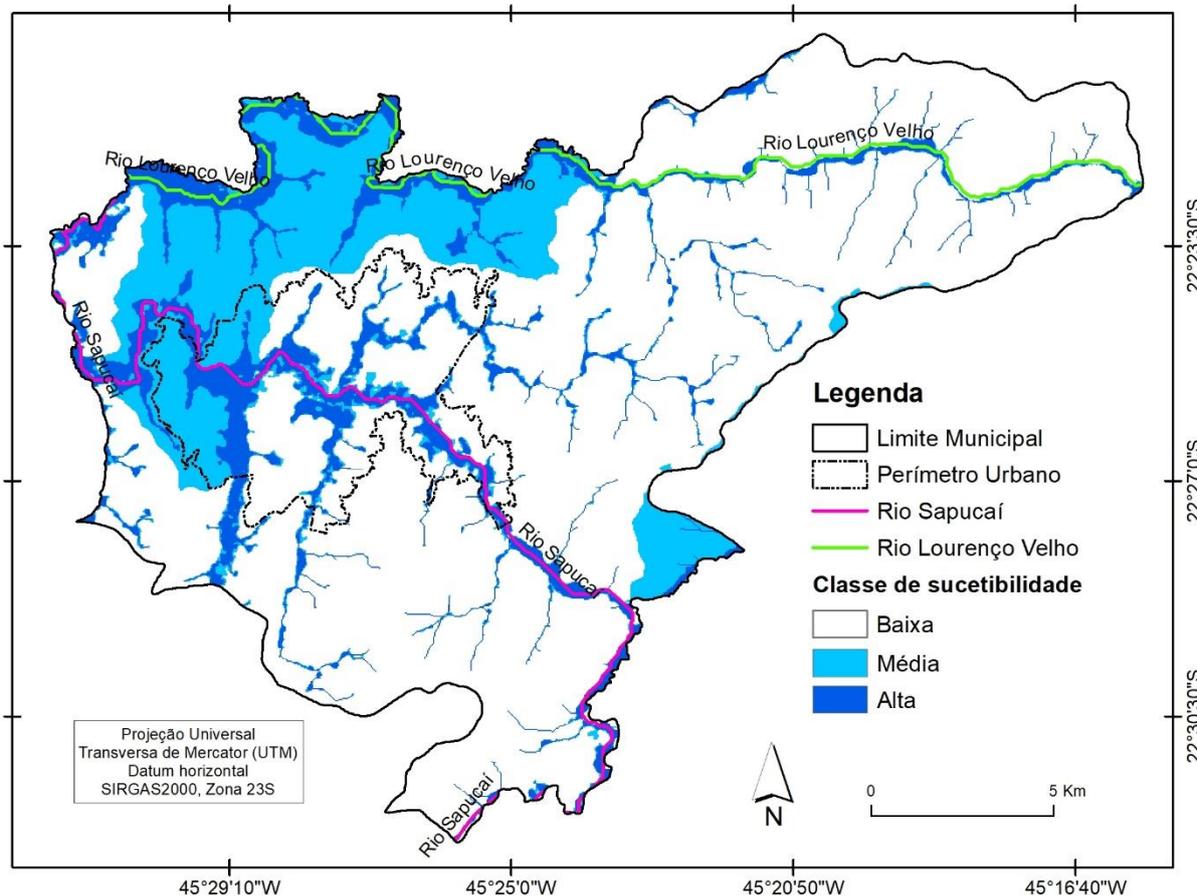


Figura 24: Mapa final de suscetibilidade a inundações

Tabela 20: Área das classes no mapa final de suscetibilidade a inundações

Classe	Área (km ²)	Porcentagem do total (%)
Baixa	210,39	71,42
Média	49,20	16,70
Alta	35,01	11,88
Total	294,60	100

É possível notar que a classificação ficou bastante semelhante à obtida pelo modelo HAND, com um pequeno acréscimo das áreas de média suscetibilidade na porção noroeste do município e, também, na porção sudeste, devido a influência dos valores dos índices morfométricos calculados para as sub-bacias 2, 4, 8 e 10 (Figura 21). As sub-bacias mencionadas são destacadas nas Figuras 25 a 28 para facilitar as análises.

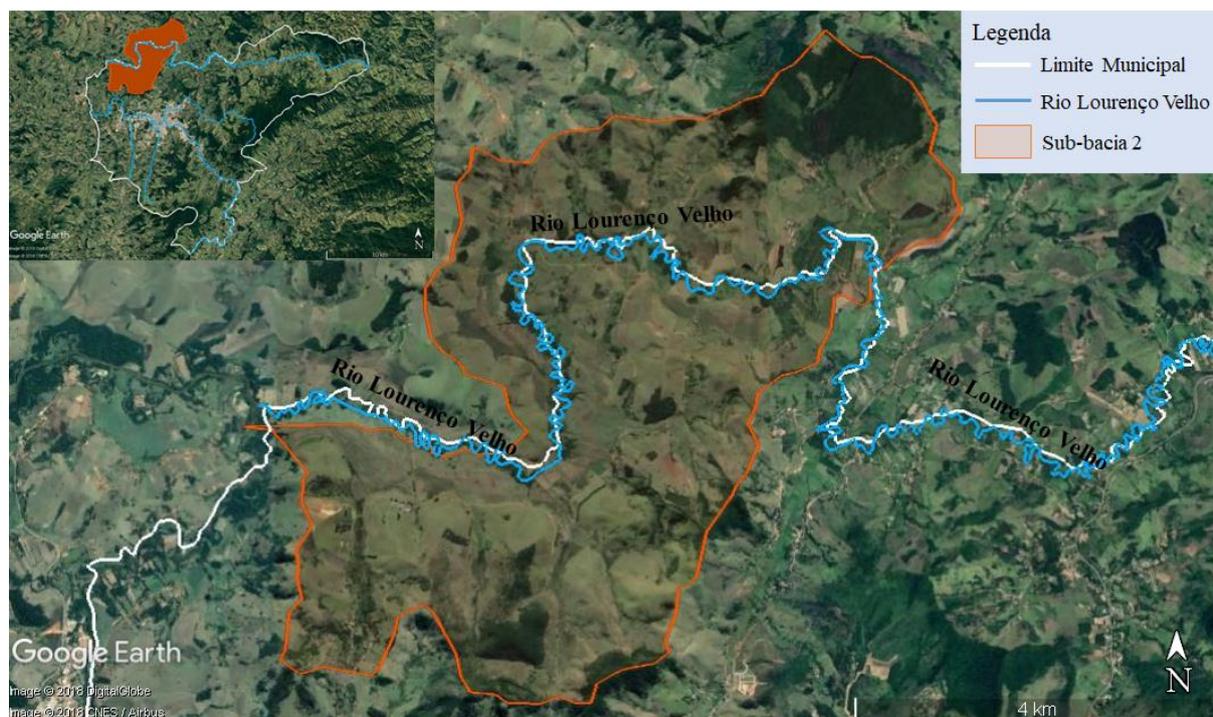


Figura 25: Destaque para a sub-bacia 2

Fonte: Google Earth (2016)



Figura 26: Destaque para a sub-bacia 4

Fonte: Google Earth (2016)

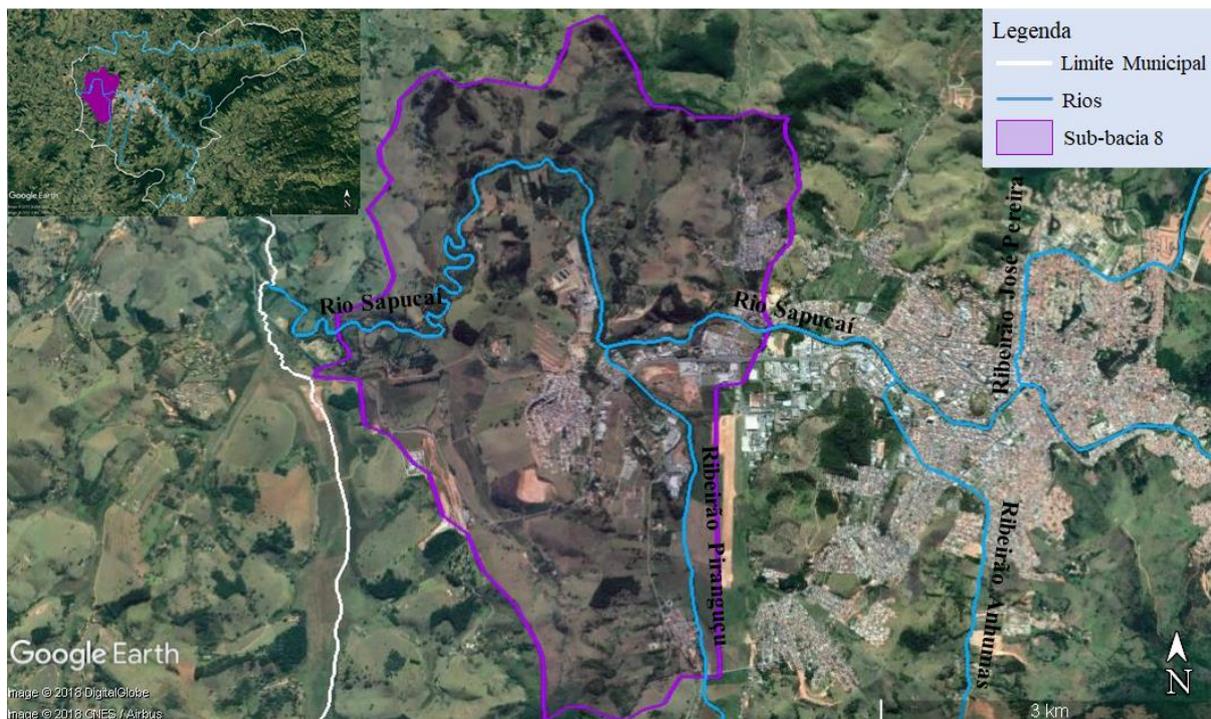


Figura 27: Destaque para a sub-bacia 8

Fonte: Google Earth (2016)

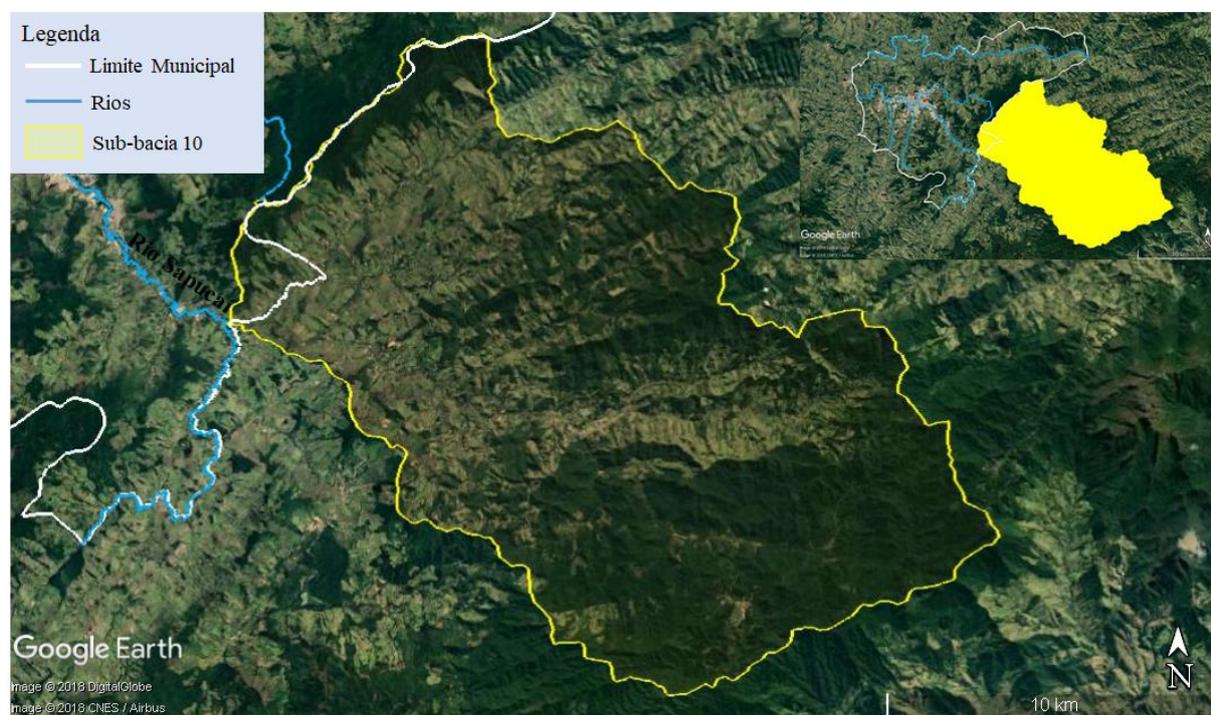


Figura 28: Destaque para a sub-bacia 10

Fonte: Google Earth (2016)

Com relação as sub-bacias 2 e 4, o elevado grau final de suscetibilidade a inundação decorre do baixo valor de relação de relevo e do alto valor de índice de sinuosidade não normalizados. A relação de relevo baixa, indica relevo mais plano e, conseqüentemente, mais suscetível ao acúmulo de água. Já o índice de sinuosidade alto, indica um rio mais sinuoso e, conseqüentemente, com menor velocidade de escoamento e chegada de água no rio.

Com relação a sub-bacia 8, o elevado grau final de suscetibilidade a inundação decorre do baixo valor de relação de relevo e do alto valor de índice de sinuosidade não normalizados assim como as sub-bacias 2 e 4 e, também, devido ao alto valor de índice de circularidade antes da normalização ($I_C = 0,56$), o índice de circularidade superior a 0,51 indica uma bacia mais circular, favorecendo os processos de inundação.

Quanto a sub-bacia 10, o elevado grau final de suscetibilidade a inundação é devido a elevada área de contribuição e baixa relação de relevo antes da normalização. A relação de relevo baixa, como mencionado anteriormente, indica um relevo mais plano e maior tendência de acumulo de água. Já a elevada área de contribuição indica se tratar de uma bacia grande e, conseqüentemente, um grande volume de água que chega nos rios, favorecendo as inundações. Esta sub-bacia era passível de ser subdividida em mais sub-bacias menores, o que, possivelmente, alteraria os valores dos parâmetros morfométricos, especialmente a área de contribuição, o que acarretaria em uma alteração no grau final de suscetibilidade a inundação, o que poderia até resultar em uma mudança da classificação de suscetibilidade da sub-bacia a inundação, contudo, como uma das exigências da metodologia era que as sub-bacias contivessem o rio principal ou estivessem ligadas a ele, optou-se por não desmembrar esta sub-bacia, mesmo apresentando área relativamente maior.

A classe alta de suscetibilidade a inundação do mapa final foi sobreposta a imagem de satélite do município de Itajubá, com destaque para o perímetro urbano (Figura 29). Pode-se observar que grande parte das áreas construídas está na planície de inundação do Rio Sapucaí e apresentam alta suscetibilidade a inundação, indicando a vulnerabilidade do município a estes eventos.

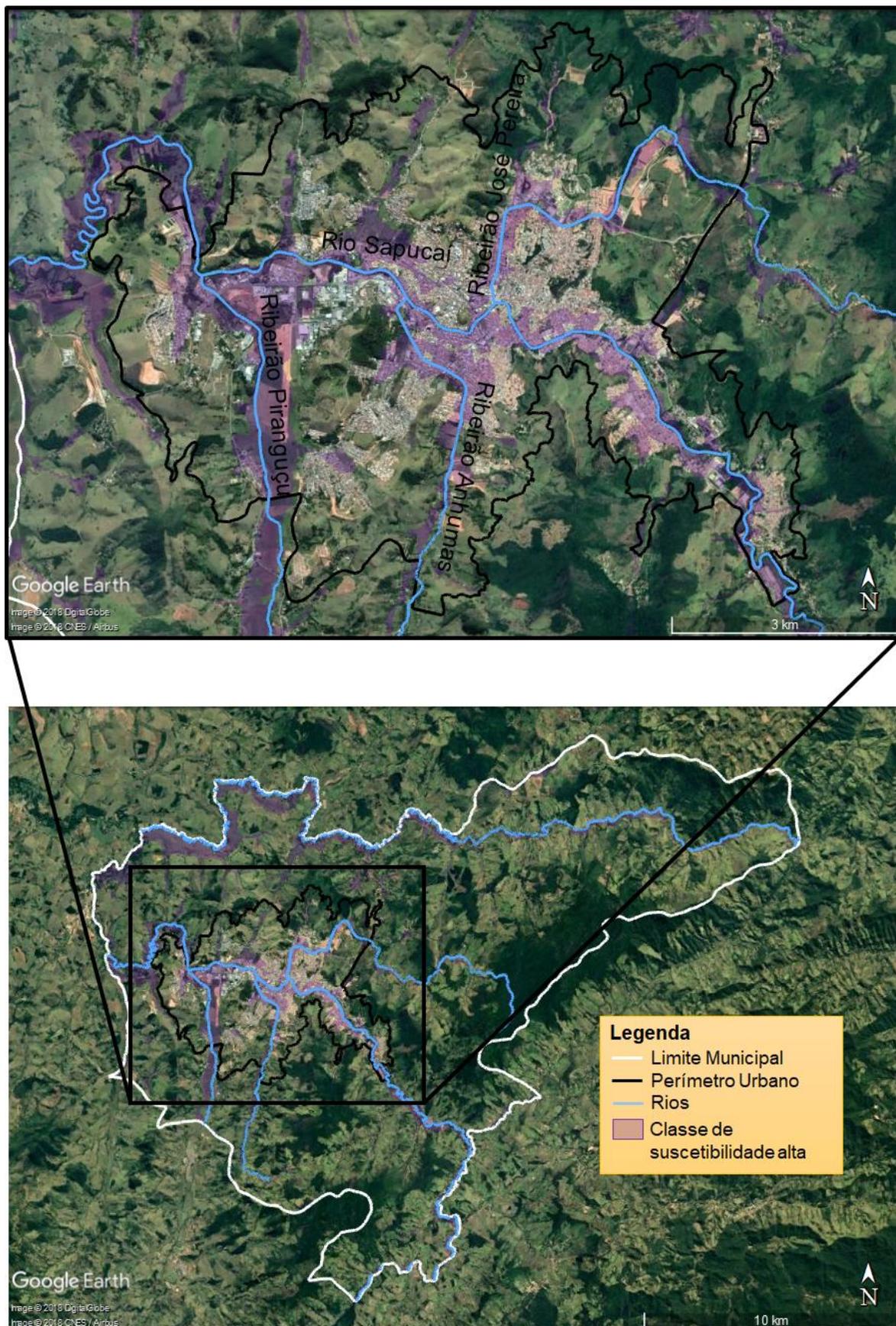


Figura 29: Sobreposição da classe de suscetibilidade alta à imagem de satélite do município de Itajubá

Fonte: Google Earth (2016)

Em seguida, sobrepôs-se a mancha de inundação gerada por Silva (2006) para o perímetro urbano do município de Itajubá, para o tempo de retorno de 10 anos, apresentada anteriormente na Figura 13, ao mapa final de suscetibilidade a inundação para analisar a correspondência entre os mapas (Figura 30), avaliando-se qual a área da mancha de inundação é interceptada pela classe alta de suscetibilidade a inundação. As áreas da mancha de inundação, bem como da interseção com a classe de suscetibilidade alta são apresentadas na Tabela 21.

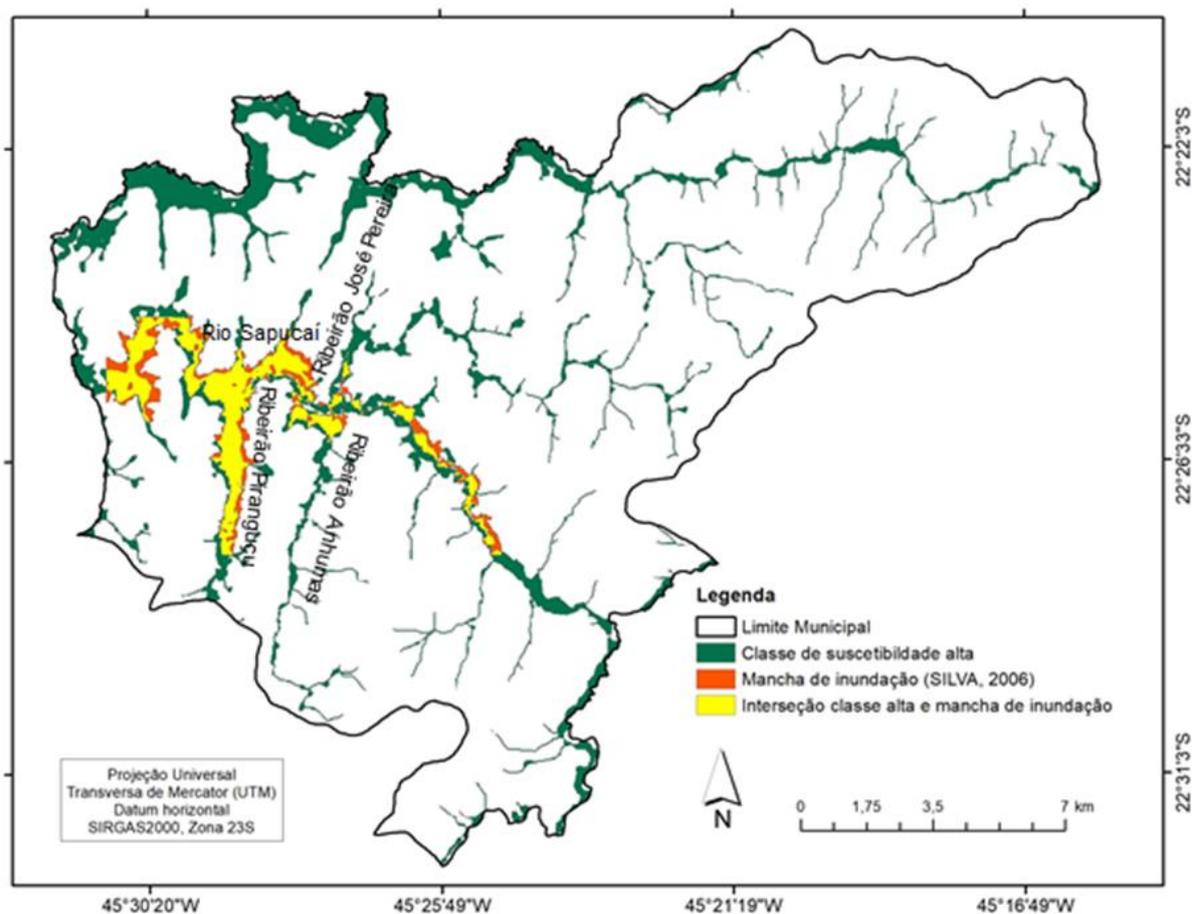


Figura 30: Sobreposição da mancha de inundação gerada por Silva (2006) ao mapa final de suscetibilidade à inundação

Tabela 21: Áreas referentes a sobreposição da mancha de inundação de Silva (2006) à classe alta do mapa final de suscetibilidade à inundação

	Área (km ²)	Porcentagem com relação a mancha de inundação (%)
Mancha de inundação	10,34	100
Interseção classe alta e mancha de inundação	7,3	70,60

Analisando-se o perímetro urbano de Itajubá e a Tabela 21, pode-se observar uma boa correlação entre a mancha de inundação gerada por Silva (2006) e a classe de suscetibilidade a inundação alta resultante do mapeamento desta pesquisa, sendo que 70,6% da mancha de inundação atinge as mesmas áreas que a classe de suscetibilidade alta. Nos trechos dos Ribeirões José Pereira e Anhumas notou-se que a metodologia proposta no presente trabalho estimou uma área suscetível à inundação maior, provavelmente em função de o mapa ter sido gerado com base nos valores da seção transversal do Rio Sapucaí, que apresenta dimensões maiores que os demais rios citados.

5.2. Mapeamento de suscetibilidades a movimentos de massa

No mapeamento de suscetibilidades a movimentos de massa, primeiramente, foram gerados os mapas dos fatores predisponentes: declividade, solo, distância de rios, distância de estradas e cobertura do solo. Os mapas resultantes desta etapa são apresentados nas Figuras 31 a 35. O mapa de cobertura do solo também é apresentado, em Anexo, ampliado.

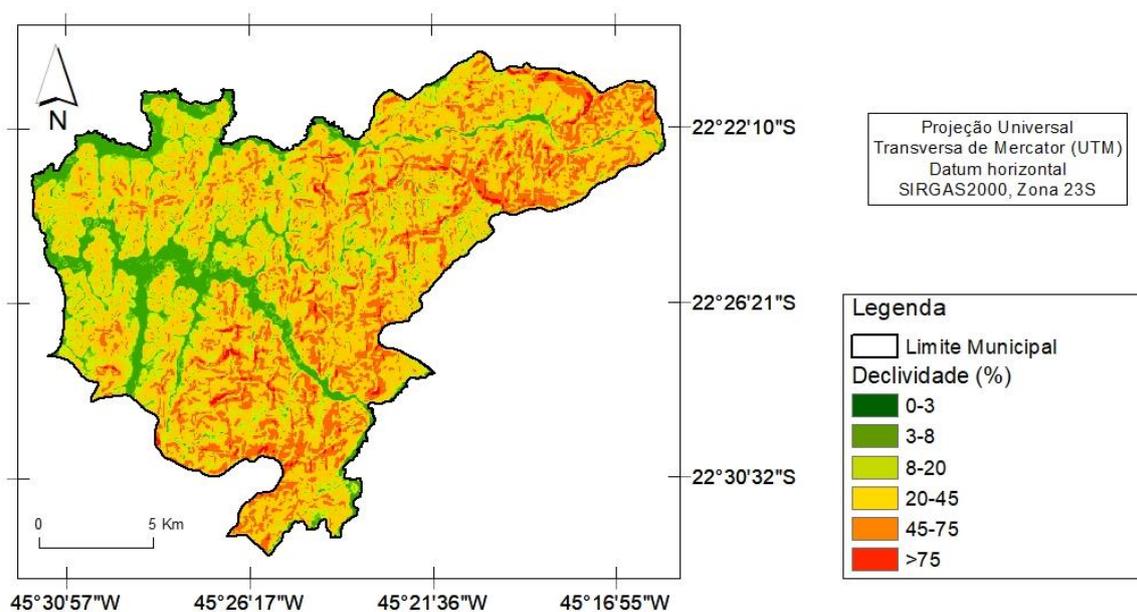


Figura 31: Mapa de declividade

Fonte: do autor

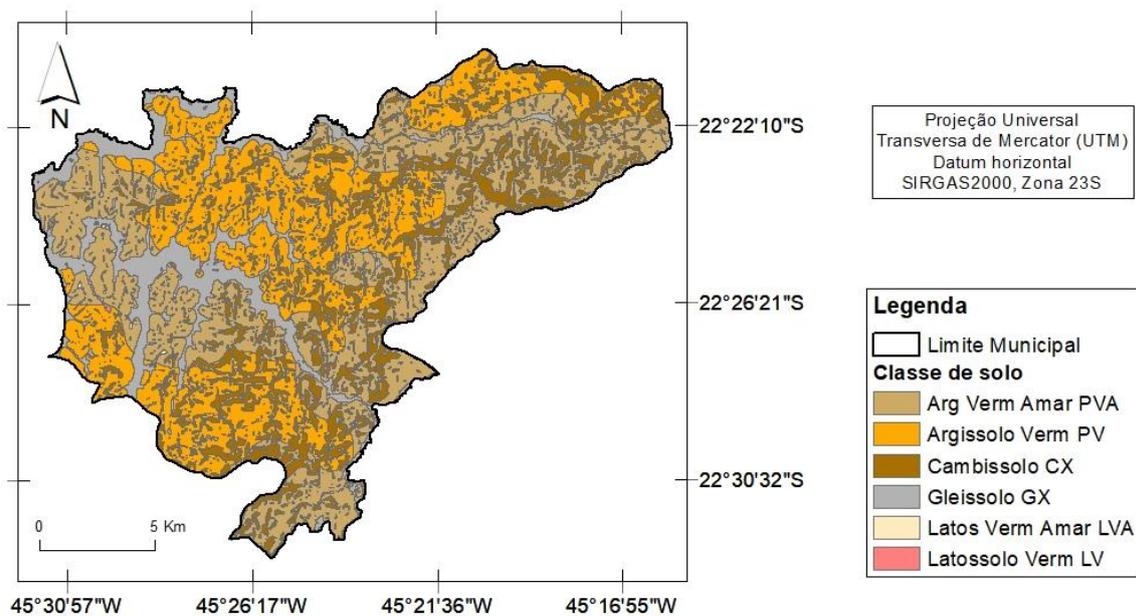


Figura 32: Mapa de solos

Fonte: Maltauro (2018)

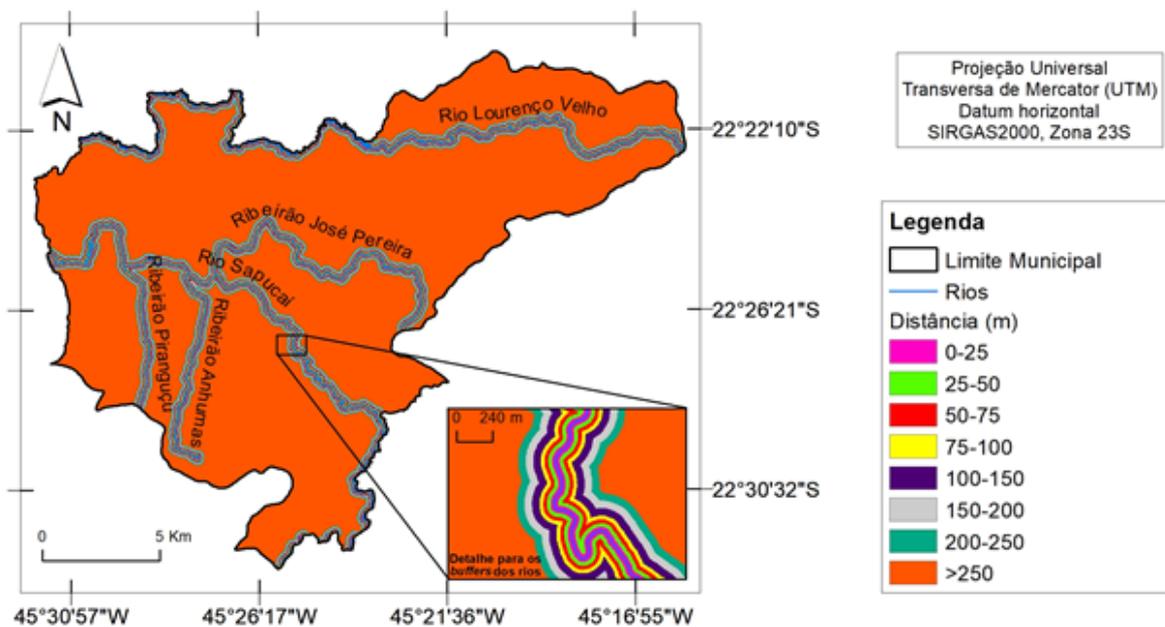


Figura 33: Mapa de distâncias dos rios principais

Fonte: do autor

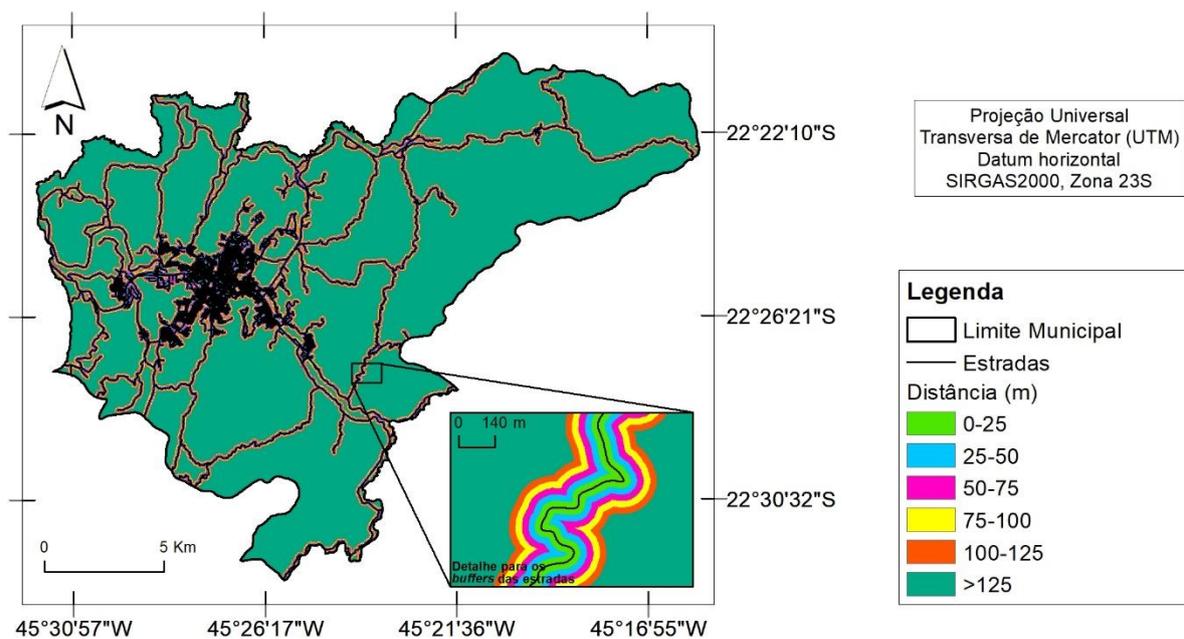


Figura 34: Mapa de distâncias das estradas

Fonte: do autor

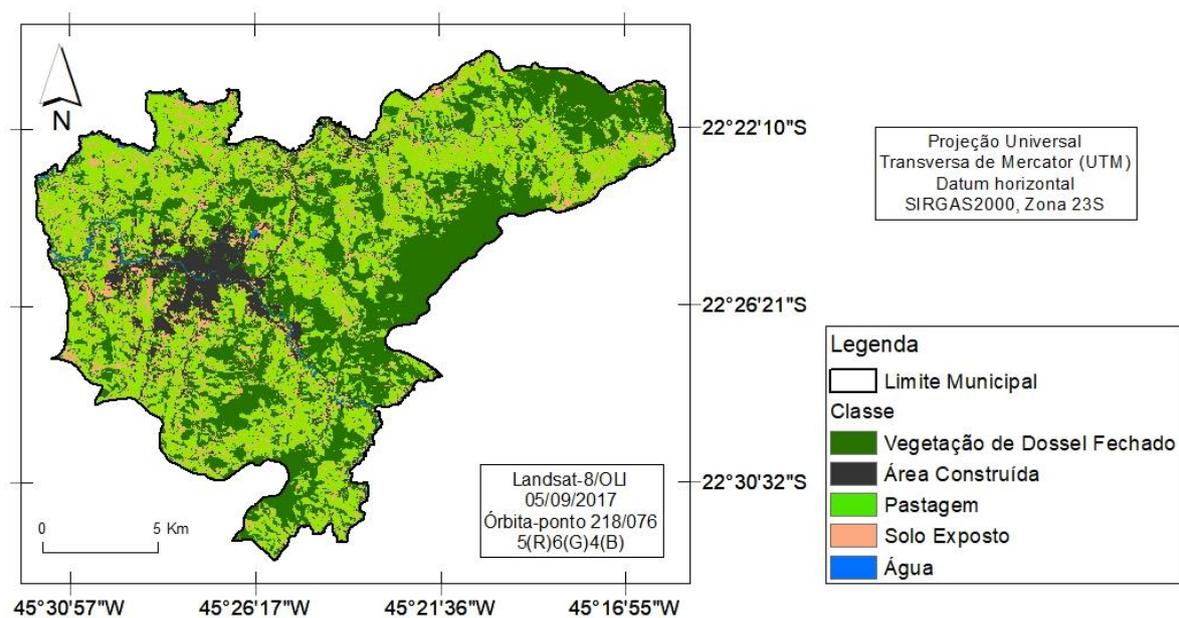


Figura 35: Mapa de cobertura do solo

Fonte: do autor

As porcentagens com relação a área das classes de cada fator são apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22: Porcentagem das classes dos fatores predisponentes de deslizamento

Parâmetro	Classes	% da área total
Solo	Argissolo Vermelho Amarelo PVA	33,85
	Argissolo Vermelho PV	33,63
	Cambissolo CX	19,29
	Gleissolo GX	11,77
	Latossolo Vermelho Amarelo LVA	0,77
	Latossolo Vermelho LV	0,69
Declividade (°)	0-3	9,02
	3-8	5,07
	8-20	18,37
	20-45	48,36
	45-75	17,89
	>75	1,29
Cobertura do solo	Área Construída	6,79
	Água	0,75
	Pastagem	43,05
	Vegetação de Dossel Fechado	38,08
	Solo Exposto	11,33
Distância do rio (m)	0-25	1,99
	25-50	1,84
	50-75	1,69
	75-100	1,61
	100-150	3,09
	150-200	2,98
	200-250	2,91
	>250	83,89
Distância de estrada (m)	0-25	8,06
	25-50	5,23
	50-75	4,47
	75-100	4,06
	100-125	3,77
	>125	74,41

Em seguida, as classes de cada fator foram comparadas em uma matriz par a par e um valor de importância relativa foi atribuído ao relacionamento entre estas classes, com base na escala de Saaty (1980 *apud* GOMEDE; BARROS, 2012), que expressa a intensidade com que uma classe predomina sobre a outra em relação à predisposição de ocorrência de movimentos de massa.

Com relação ao fator solo, considerou-se que a classe Cambissolo apresenta maior predisposição a ocorrência de movimentos de massa, pois são solos pouco desenvolvidos, que

ainda apresentam características do material de origem (rocha), com estrutura pouco desenvolvida. Geralmente, são pouco profundos, e tem baixa permeabilidade. Em ambientes mais declivosos, Cambissolos mais rasos apresentam alta suscetibilidade a processo erosivos (EMBRAPA, 2013). Esta classe de solo está presente em 19,29% da área de Itajubá, principalmente em sua porção leste.

Na sequência de suscetibilidade, vêm os Argissolos, pois apresentam o horizonte B textural de acumulação de argila, o que implica em diferenças de infiltração dos horizontes superficiais e subsuperficiais, favorecendo os processos de movimentos de massa (EMBRAPA, 2013)

Os Gleissolos desenvolvem-se em sedimentos recentes nas proximidades dos cursos d'água e em materiais colúvio-aluviais sujeitos a condições de hidromorfia ou em áreas de relevo plano de terraços fluviais. Em função do relevo, em geral, não estão associados a movimentos de massa.

Os Latossolos apresentam intensa intemperização e presença de argilas com predominância de óxidos. Possuem boa permeabilidade por serem solos bem estruturados e muito porosos. Estão associados a relevos planos e suave ondulados. Por estas razões, apresentam baixa suscetibilidade a movimentos de massa (EMBRAPA, 2013).

Com relação a declividade, Fernandes e Amaral (1996) afirmam que em locais com declividade acima de 30° o risco de deslizamento é mais frequente do que em locais com declividade acima de 60°, já que nos locais com declividade maior a camada de solo é menos espessa, sendo constituída na sua maior parte por rocha. Deste modo, as classes de 20°-45° e de 45°-75° foram consideradas as mais suscetíveis, diminuindo a suscetibilidade para as extremidades, onde o solo é mais plano ou mais declivoso, porém constituído, principalmente, por rocha. As declividades de 20° a 75° somam 66,75% da área de Itajubá e localizam-se, predominantemente, na porção leste do município.

Com relação a cobertura do solo, considerou-se que nas áreas com vegetação de dossel fechado, a suscetibilidade a movimentos de massa é a mais baixa devido a proteção oferecida pela vegetação, em função, principalmente, da interceptação da chuva pelas copas das árvores e estruturação do solo pelas raízes, aumentando sua resistência. Nas regiões com água ou área construída a suscetibilidade é baixa. Nas regiões de pastagem, a suscetibilidade é maior, seguidas pelas áreas de solo exposto. As classes de pastagem e vegetação de dossel fechado

ocupam a maior parte do município: 43,05% e 38,08% respectivamente. As áreas de pastagem encontram-se espalhadas por todo o município enquanto que as áreas com vegetação de dossel fechado predominam nas regiões leste e nordeste do município.

Quanto as distâncias com relação aos rios e estradas, a suscetibilidade diminui com o aumento das distâncias.

Após realizar esta avaliação e comparar as classes dos fatores par a par, obteve-se os valores apresentados na Tabela 23.

Tabela 23: Matriz de comparação par a par das classes dos fatores predisponentes a movimentos de massa

Classes de cada fator									
Solo	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	w (Pesos)		
(1) Argissolo Vermelho Amarelo PVA	1	1	1/3	2	3	3	0,178		
(2) Argissolo Vermelho PV	1	1	1/3	2	3	3	0,178		
(3) Cambissolo CX	3	3	1	4	5	5	0,412		
(4) Gleissolo GX	1/2	1/2	1/4	1	2	2	0,106		
(5) Latossolo Vermelho Amarelo LVA	1/3	1/3	1/5	1/2	1	1	0,063		
(6) Latossolo Vermelho LV	1/3	1/3	1/5	1/2	1	1	0,063		
<i>Razão de Consistência = 0,0112</i>									
Declividade (°)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	w (Pesos)		
(1) 0-3	1	1/3	1/5	1/7	1/7	1/5	0,033		
(2) 3-8	3	1	1/3	1/5	1/5	1/3	0,063		
(3) 8-20	5	3	1	1/3	1/3	1	0,135		
(4) 20-45	7	5	3	1	1	3	0,318		
(5) 45-75	7	5	3	1	1	3	0,318		
(6) >75	5	3	1	1/3	1/3	1	0,135		
<i>Razão de Consistência = 0,02567</i>									
Cobertura do solo	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	w (Pesos)			
(1) Área Construída	1	1	1/5	2	1/8	0,069			
(2) Água	1	1	1/5	2	1/8	0,069			
(3) Pastagem	5	5	1	6	1/4	0,256			
(4) Vegetação de Dossel Fechado	1/2	1/2	1/6	1	1/9	0,043			
(5) Solo Exposto	8	8	4	9	1	0,564			
<i>Razão de Consistência = 0,035051</i>									
Distância do rio (m)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	w (Pesos)
(1) 0-25	1	4	5	6	7	7	8	9	0,420
(2) 25-50	1/4	1	2	3	4	4	5	6	0,187
(3) 50-75	1/5	1/2	1	2	3	3	4	5	0,131
(4) 75-100	1/6	1/3	1/2	1	2	2	3	4	0,088
(5) 100-150	1/7	1/4	1/3	1/2	1	1	2	3	0,056
(6) 150-200	1/7	1/4	1/3	1/2	1	1	2	3	0,056
(7) 200-250	1/8	1/5	1/5	1/3	1/2	1/2	1	2	0,036
(8) >250	1/9	1/6	1/6	1/4	1/3	1/3	1/2	1	0,025

Razão de Consistência = 0,029317

Distância de estrada (m)	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	w (Pesos)
(1) 0-25	1	4	5	6	7	9	0,487
(2) 25-50	1/4	1	2	3	4	6	0,199
(3) 50-75	1/5	1/2	1	2	3	5	0,134
(4) 75-100	1/6	1/3	1/2	1	2	4	0,089
(5) 100-125	1/7	1/4	1/3	1/2	1	3	0,060
(6) >125	1/9	1/5	1/5	1/4	1/3	1	0,031

Razão de Consistência = 0,046114

Os mapas dos fatores foram, então, reclassificados com base nos pesos das classes calculados na matriz de comparação par a par.

Em seguida, o mesmo procedimento de comparação par a par foi realizado com os fatores predisponentes de deslizamento. A declividade e a cobertura do solo foram consideradas os fatores mais importantes na determinação da suscetibilidade a movimentos de massa. O primeiro, em função do município de Itajubá apresentar um relevo montanhoso e o segundo devido a vegetação exercer papel fundamental na proteção e aumento da resistência do solo. Na sequência, considerou-se o fator distância de estradas, pois analisando-se as imagens de satélite, observou-se que muitos movimentos de massa estão associados a cortes para a abertura de estradas. Em seguida, considerou-se o fator solo. As características físicas e químicas do solo interferem diretamente na infiltração e saturação do solo por água, contudo não há uma variação espacial de classes de solo muito significativa em Itajubá. E, por último, foi considerado o fator distância de rios.

Os valores de importância relativa entre os fatores, bem como seus respectivos pesos e a razão de consistência da matriz de comparação são apresentados na Tabela 24.

Tabela 24: Matriz de comparação par a par dos fatores predisponentes a movimentos de massa

Fator	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	w (Pesos)
(1) Solo	1	1/4	1/4	3	1/3	0,085
(2) Declividade	4	1	1/4	7	2	0,253
(3) Cobertura do solo	4	4	1	7	2	0,425
(5) Distância do rio	1/3	1/7	1/7	1	1/6	0,038
(6) Distância de estrada	3	1/2	1/2	6	1	0,199

Razão de Consistência = 0,06901

Após calcular os pesos, os fatores são agregados utilizando-se a ferramenta *Weighted Sum*, no ArcGis 10.2 (ESRI, 2013). Esta soma é normalizada na escala de 0 a 1, utilizando-se uma função *fuzzy* linear, por meio da ferramenta *Fuzzy Membership* e o mapa final de

suscetibilidade a deslizamento é dividido em 3 classes (Figura 36). As áreas de cada classe são apresentadas na Tabela 25.

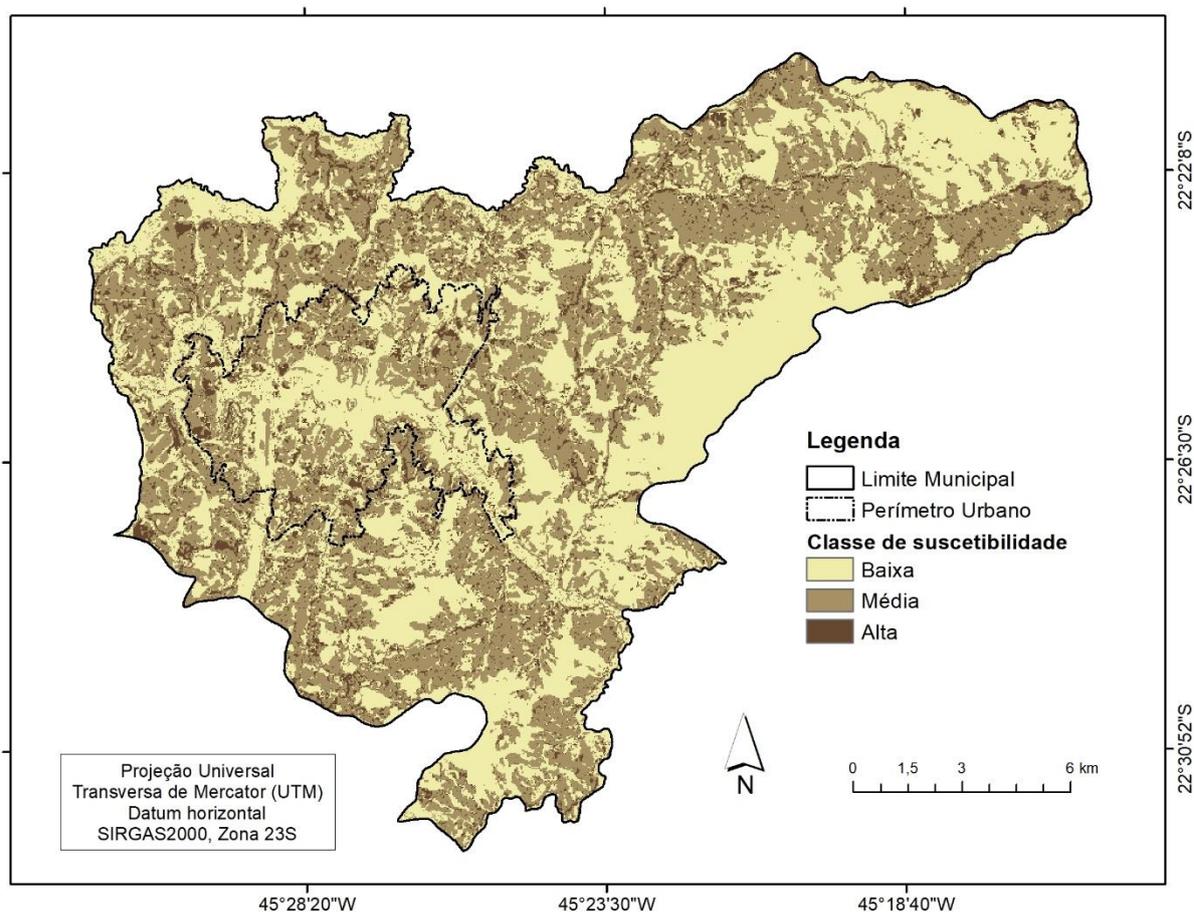


Figura 36: Mapa de suscetibilidade a movimentos de massa

Tabela 25: Área das classes de suscetibilidade a deslizamento

Classe	Área (km ²)	Porcentagem do total (%)
Baixa	137,85	47,02
Média	126,71	43,22
Alta	28,60	9,76
Total	293,16	100

Analisando-se a Figura 36 e a Tabela 25, pode-se observar que a classe de suscetibilidade alta ocupa uma porcentagem da área total do município inferior a 10%, representando um valor muito baixo. Este resultado se justifica principalmente pelo fato de que na porção leste do município onde a declividade (entre 20°-75°) e o tipo de solo (Cambissolo) contribuem de

forma mais significativa para os processos de movimentos de massa, o solo é, predominantemente, coberto por vegetação de dossel fechado e, também, em função de a área de influência dos rios e estradas ser relativamente pequena.

Após a delimitação dos polígonos dos movimentos de massa observou-se que estes são relativamente pequenos e representam aproximadamente 0,014% da área total do município. Para avaliar a relação da ocorrência dos movimentos de massa com as classes de suscetibilidade, realizou-se a interseção de cada classe com os polígonos mapeados, destacando-se alguns polígonos específicos para uma análise mais detalhada (Figuras 37 a 39). As áreas dos movimentos de massa inseridos em cada uma das três classes são apresentadas na Tabela 26.

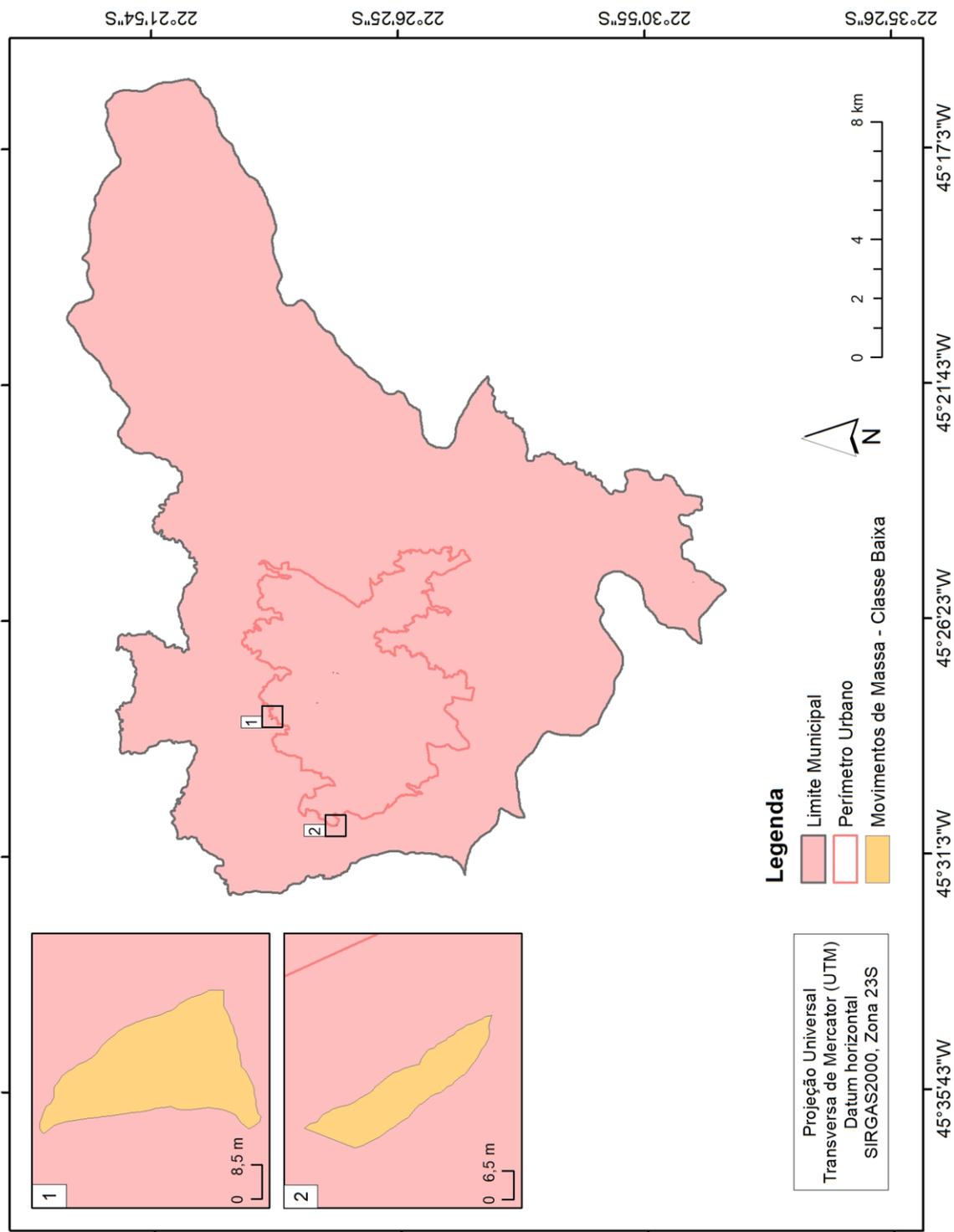


Figura 37: Movimentos de massa inseridos na classe de suscetibilidade baixa

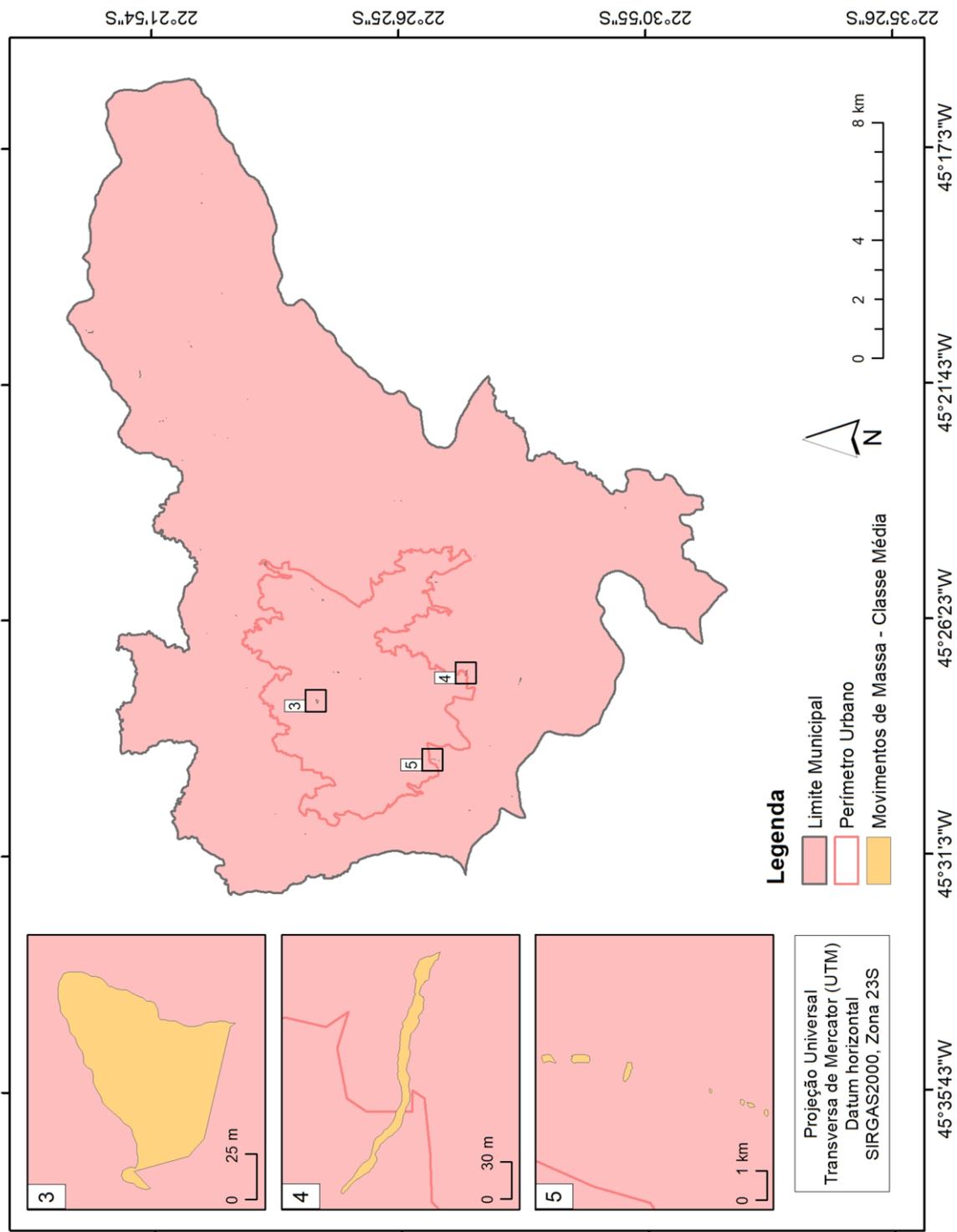


Figura 38: Movimentos de massa inseridos na classe de suscetibilidade média

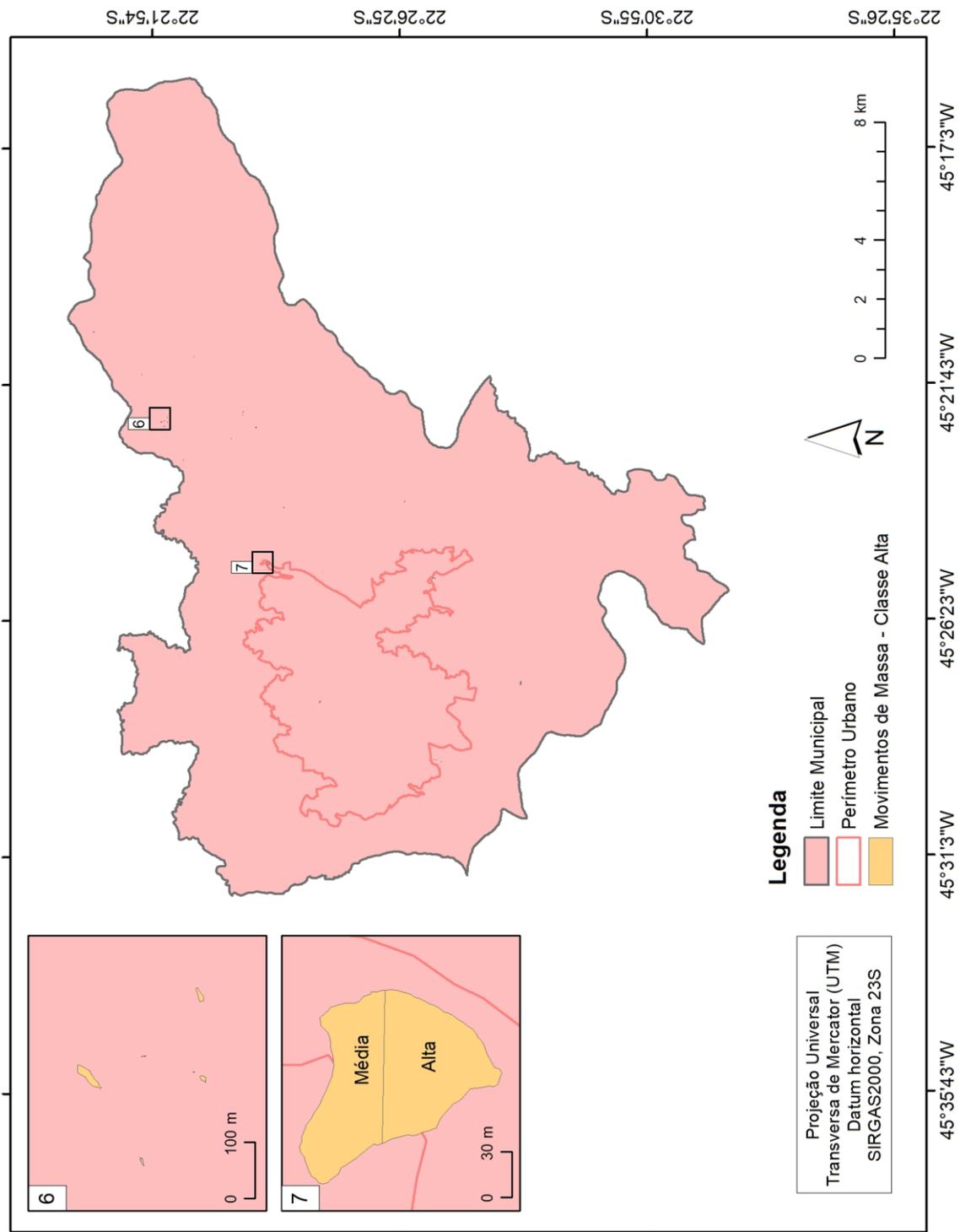


Figura 39: Movimentos de massa inseridos na classe de suscetibilidade alta

Tabela 26: Área dos movimentos de massa por classe de suscetibilidade

Classe	Área do movimento de massa (m ²)	Porcentagem (%)
Baixa	2.785	6,91
Média	26.800	66,44
Alta	10.750	26,65
Total	40.335	100

Analisando-se as Tabelas 25 e 26, pode-se observar que apesar de a classe de suscetibilidade baixa ocupar quase metade de toda a área do município, apenas 6,71% dos movimentos de massa estão inseridos nesta classe. A classe média, que corresponde a 43,22% da área do município, contém a maior parte dos movimentos de massa (66,44%). E a classe de suscetibilidade alta, mesmo ocupando menos de 10% de toda a área do município, apresenta uma parte significativa dos movimentos de massa, quase 27%. Indicando uma boa coerência no mapa final de suscetibilidade a movimentos de massa.

Os pontos 1 a 7 destacados anteriormente nas Figuras 37 a 39 serão analisados mais detalhadamente a seguir (Figuras 40 a 51).

Observando a Figura 40, podemos notar que para apenas três dos cinco fatores (declividade, solo e distância de rios) o movimento de massa está inserido em classes que influenciam de forma mais decisiva na suscetibilidade da área, contudo solo e distância de rios são os fatores que apresentam os menores pesos o que acarretou no enquadramento da área na classe de suscetibilidade baixa. Analisando-se o fator cobertura do solo, observamos que o movimento de massa está inserido, predominantemente, na classe vegetação de dossel fechado, porém ao observar a imagem de satélite notamos tratar-se de uma área de pastagem com um pouco de solo exposto, indicando um erro na classificação em função, provavelmente, do sombreamento gerado na imagem devido a posição do sol e também pela resolução da imagem que não permite uma definição tão precisa entre as classes, já que esta área está entre dois trechos de vegetação fechada e considerando-se as pequenas dimensões dos movimentos de massa no município. Levando em conta que o fator cobertura de solo apresenta um elevado peso, a mudança da classe vegetação de dossel fechado para pastagem poderia ocasionar o enquadramento da área na classe de suscetibilidade média, o que poderia justificar a ocorrência de movimento de massa nesta região.

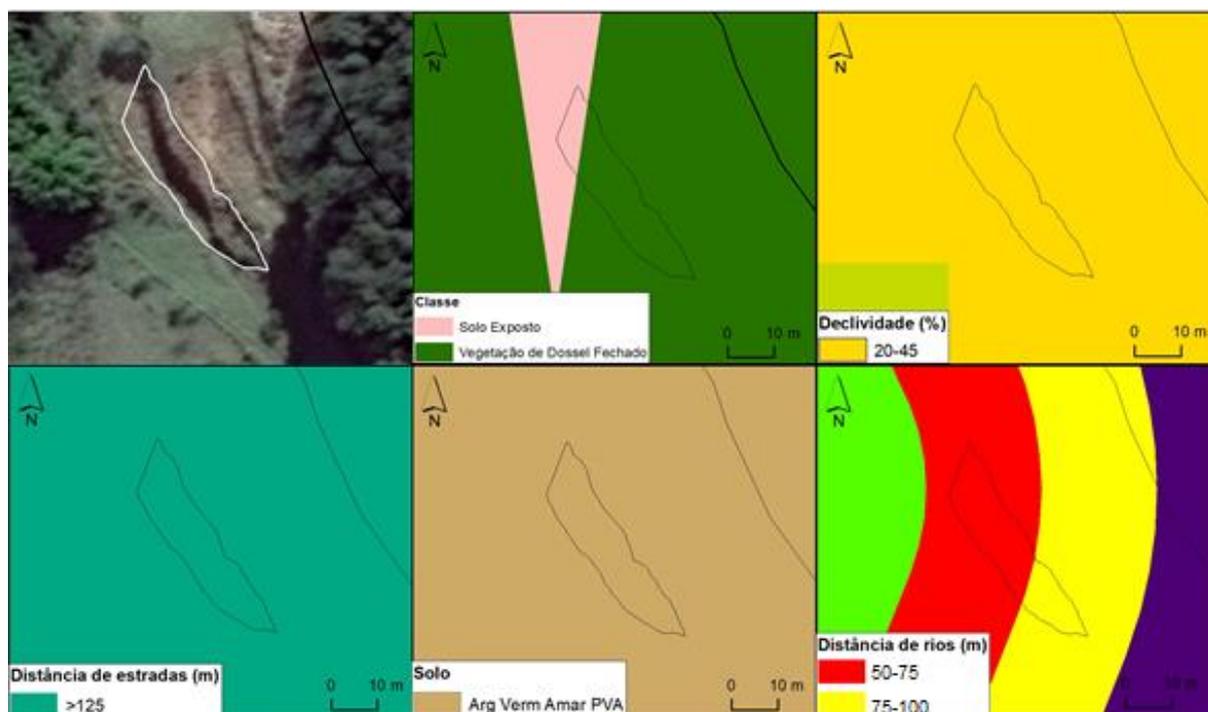


Figura 40: Ponto 1 – Classe de suscetibilidade baixa

Analisando-se o ponto 2 (Figura 41), nota-se que os únicos fatores que influenciaram de forma mais significativa na suscetibilidade da área foram declividade e solo. Considerando-se ainda que o peso do fator solo é mais baixo, isto resultou no enquadramento da área na classe de suscetibilidade baixa.

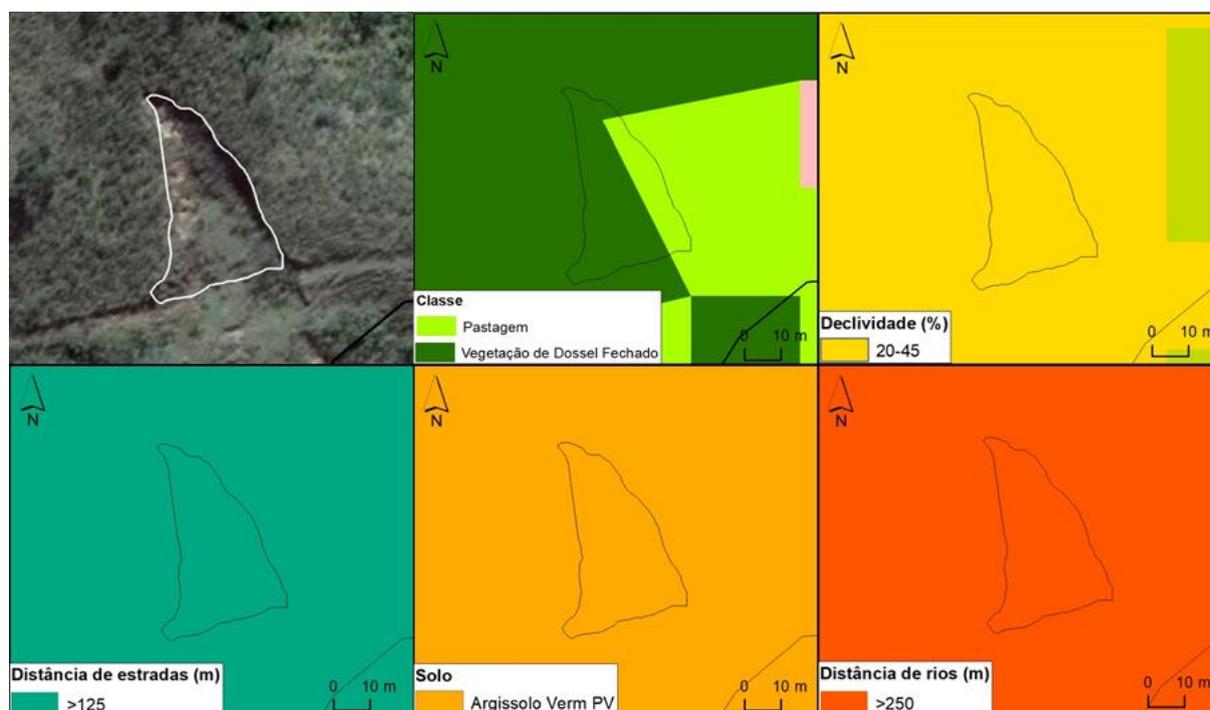


Figura 41: Ponto 2 – Classe de suscetibilidade baixa

O ponto 3 (Figura 42), localizado no bairro Vila Isabel, apresentado anteriormente na descrição da área de estudo, representa o caso de maior gravidade, atualmente, no município. Observando a Figura 43, notamos que apenas o fator distância de rios não influencia de maneira importante na suscetibilidade da região. Para os demais fatores, todas as classes em que o movimento de massa está inserido representam uma ameaça para a área. Trata-se de uma área de pastagem, sob declividade superior a 30°, próximo de uma rua e é composto por Argissolo. Soma-se a isto o fato de que foi realizado um corte no talude de forma incorreta, tornando-o ainda mais instável e nenhum método de contenção e redução de risco de escorregamento foi realizado.

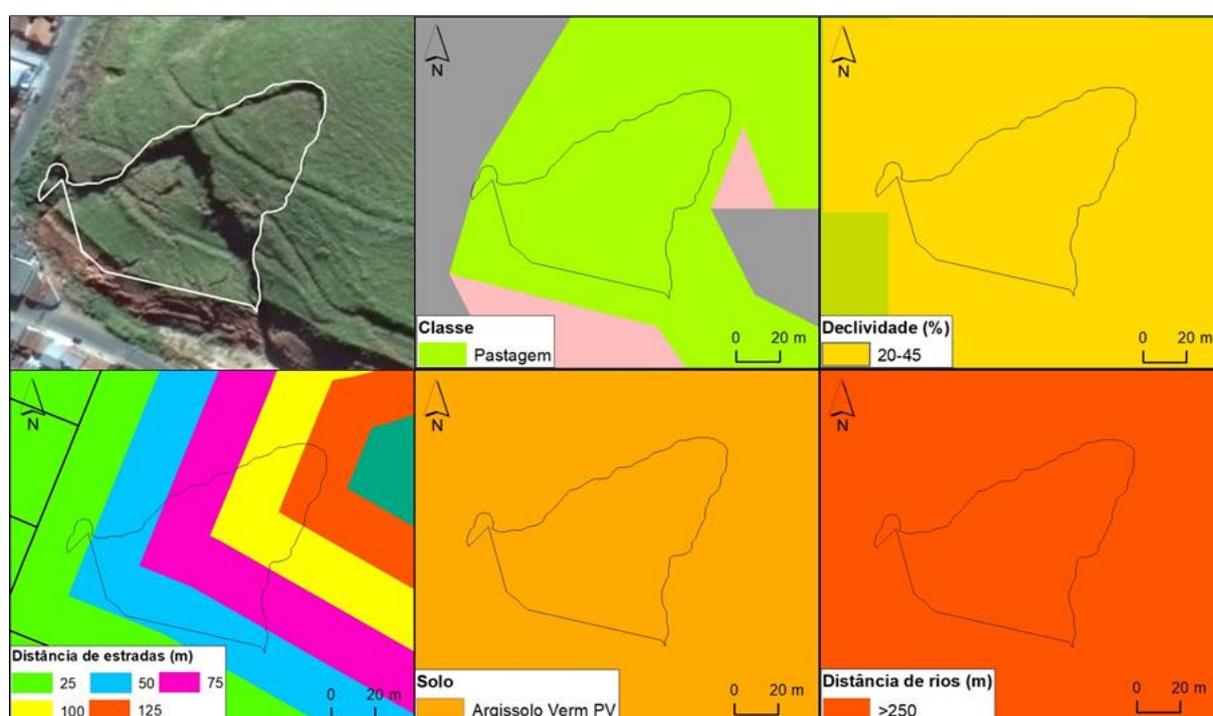


Figura 42: Ponto 3 – Classe de suscetibilidade média

Em campo, observou-se, ainda, que o corte do talude deixou expostos a rocha e o horizonte C pouco intemperizado e não estruturado (Figuras 43, 44 e 45), facilmente lavado pela chuva, ocasionando perda de solo por erosão, tornando o talude ainda mais instável.

Notou-se, também, que o escorregamento está bem próximo de diversas residências, evidenciando a vulnerabilidade da área e a necessidade de realização de alguma medida de contenção do talude ou minimização dos efeitos destrutivos do escorregamento.



Figura 43: Aviso sobre o escorregamento na rua Clemente Teodoro da Silva, bairro Vila Isabel



Figura 44: Detalhe para a parte de baixo do escorregamento na rua Clemente Teodoro da Silva, bairro Vila Isabel



Figura 45: Escorregamento na rua Clemente Teodoro da Silva, bairro Vila Isabel

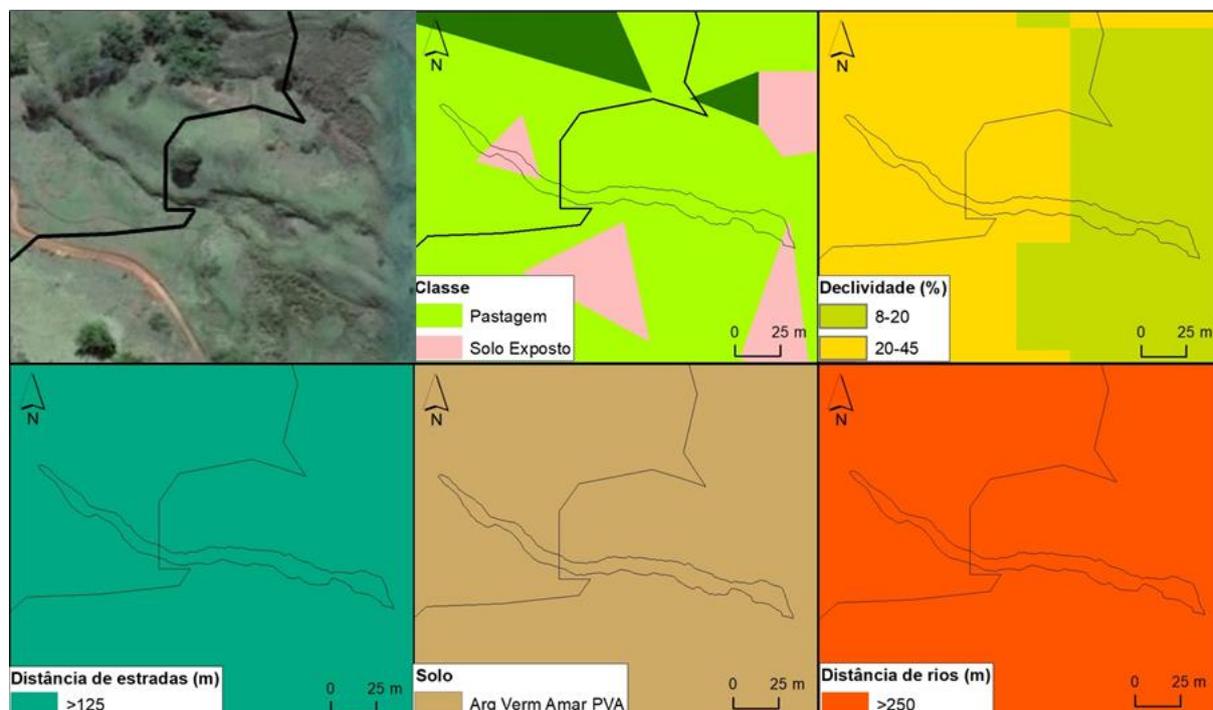


Figura 46: Ponto 4 – Classe de suscetibilidade média

O ponto 4 (Figura 46) trata de um processo de rastejo. Nesta área, os fatores que mais influenciam na suscetibilidade do terreno são cobertura do solo (pastagem), declividade (predominantemente acima de 30°) e tipo de solo (Argissolo).

Com relação ao ponto 5 (Figura 47), todos os fatores influenciam na suscetibilidade da área. Os movimentos de massa localizam-se próximos do Ribeirão Piranguçu, declividade entre 20°-45° e o solo é da classe Argissolo. Quanto a cobertura do solo, pode-se, mais uma vez, observar que a resolução da imagem comprometeu a qualidade da classificação, quando levamos em conta movimentos de massa de pequenas proporções. O trecho da estrada classificado como “área construída” abrangeu uma área um pouco maior que a real e os movimentos de massa que na realidade estão no limite da classe pastagem com a área construída, acabaram incluídos na classe área construída.

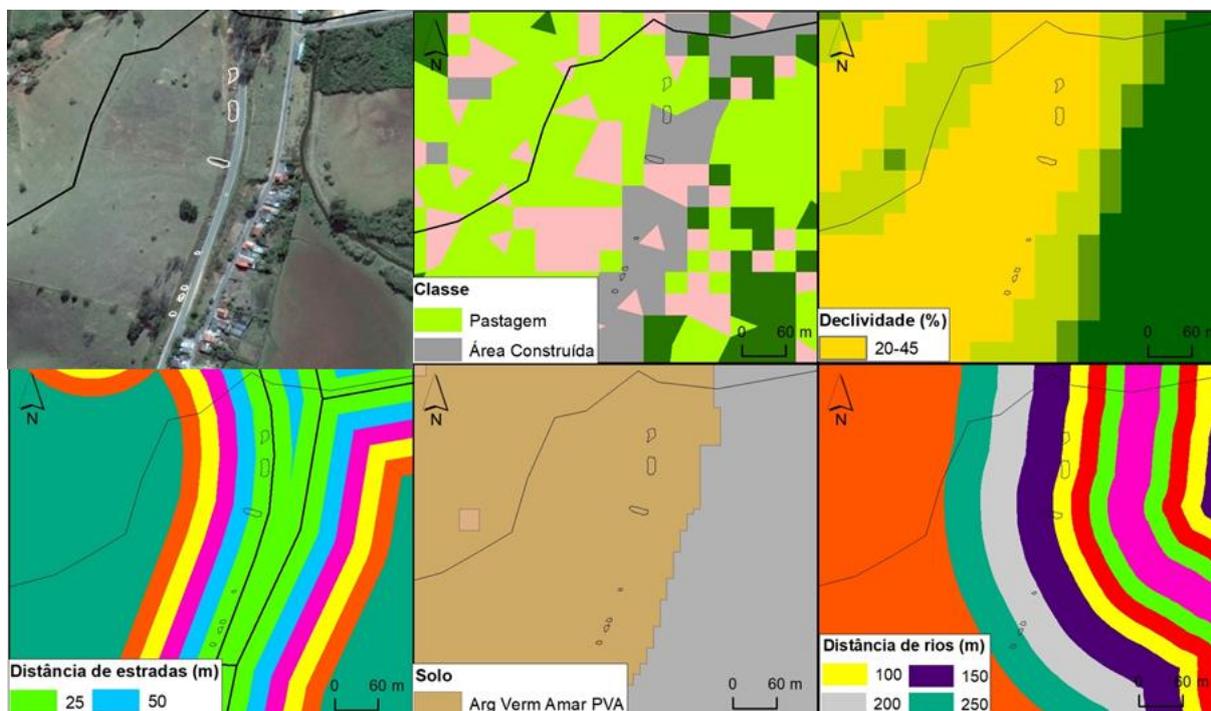


Figura 47: Ponto 5 – Classe de suscetibilidade média

Contudo, neste caso, o fator que mais influencia na ocorrência dos movimentos de massa é a proximidade da estrada, conforme apresentado na Figura 48. O corte realizado no talude para a construção da estrada, altera a geometria do mesmo, aumentando a tensão de cisalhamento sobre a massa de solo, que se torna mais suscetível a movimentos.



Figura 48: Destaque para os movimentos de massa do ponto 5

A região do ponto 6 (Figura 49) apresenta processos de rastejo, escorregamento e também processos erosivos e são influenciados principalmente pela cobertura do solo, tipo de solo e declividade, com exceção do rastejo na parte superior da imagem que se encontra em uma declividade mais suave.

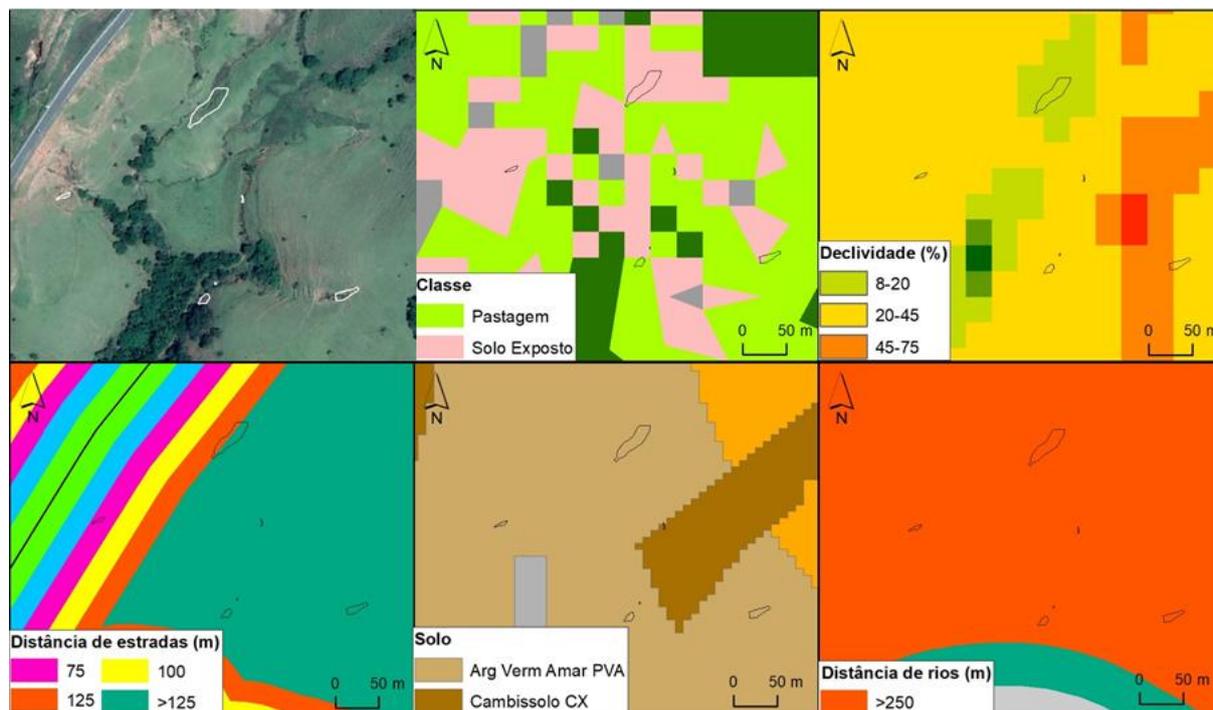


Figura 49: Ponto 6 – Classe de suscetibilidade alta



Figura 50: Destaque para os movimentos de massa do ponto 6

Com relação ao ponto 7 (Figura 51), apenas o fator distância de rios não teve influência significativa na suscetibilidade da região, considerando-se ainda que este fator é o de menor peso, isto resultou numa suscetibilidade alta nesta área.

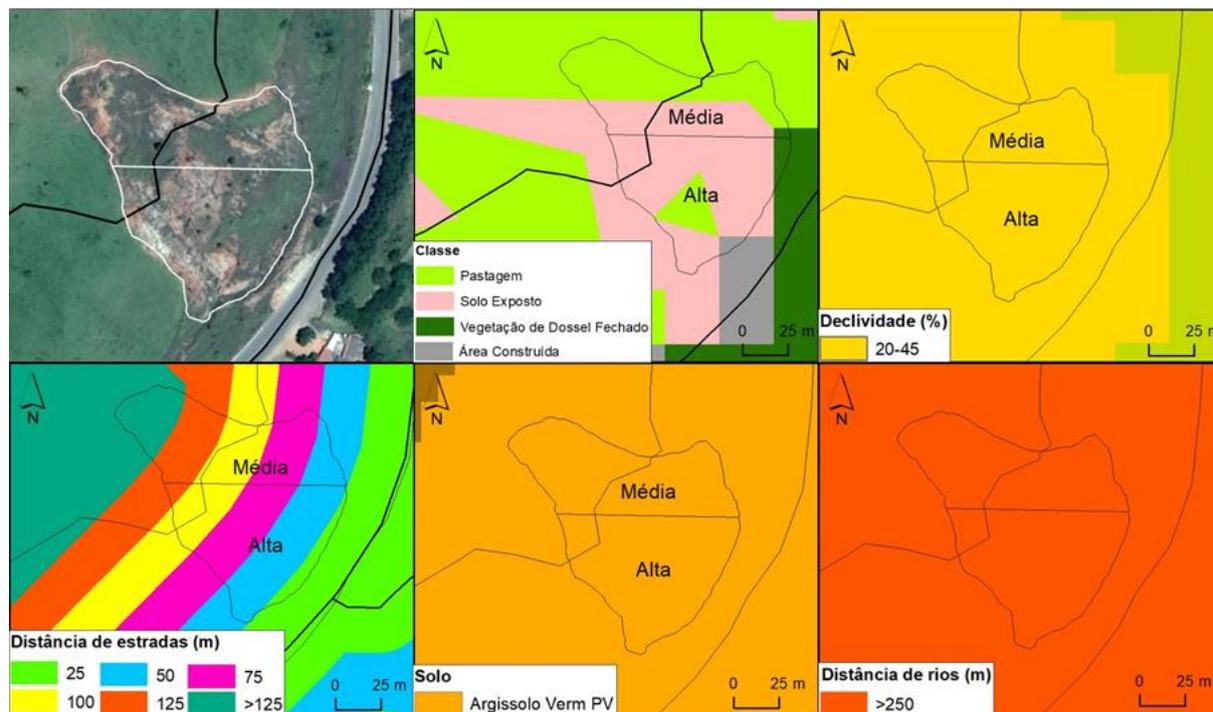


Figura 51: Ponto 7 – Classe de suscetibilidade alta

Também foram observados, por meio de imagens de satélite, bastantes processos erosivos ao longo de todo o município e são apresentados em Anexo. Em campo, outros escorregamentos e também processos erosivos foram analisados mais detalhadamente. Os registros fotográficos encontram-se em Anexo.

6. CONCLUSÃO

Como conclusão, primeiramente com relação ao mapeamento das suscetibilidades a inundações, pode-se observar que as classes mais altas de suscetibilidade estão associadas, principalmente, com a planície de alagamento do Rio Sapucaí e a sub-bacias mais planas.

Analisando-se os índices morfométricos, observou-se que o elevado valor de alguns índices, que levou determinadas bacias a serem classificadas como de alta suscetibilidade, pode ser decorrente da maior área da sub-bacia devido a necessidade de se atender ao critério da metodologia de que toda sub-bacia deve conter ou estar ligada ao rio principal e também pelo fato de que um número muito grande de sub-bacias demandaria muito tempo para a realização desta etapa. Este fato também pode implicar que uma sub-bacia maior apresente mais de um padrão morfológico o que também pode resultar em alterações no cálculo dos índices. Deste modo, para análises futuras, sugere-se que se avaliem os resultados ao se dividir as sub-bacias em sub-bacias menores.

Observou-se uma boa correlação entre a mancha de inundação gerada por Silva (2006) para o tempo de retorno de 10 anos e a classe de suscetibilidade a inundação alta resultante da presente pesquisa, embora o trabalho de Silva (2006) tenha abrangido uma área bem menor. Ressalta-se a necessidade de se avaliarem mais seções transversais inclusive dos afluentes do Rio Sapucaí, como os Ribeirões José Pereira, Anhumas e Piranguçu, a fim de se inserir no modelo HAND valores que sejam mais representativos da região.

Ainda assim, conforme destacado, também, por Pinheiro (2005) e Silva (2006), pode-se observar a extrema vulnerabilidade do município a inundações, pois, segundo os mesmos autores, o Rio Sapucaí após percorrer o trecho íngreme das encostas da Serra da Mantiqueira passa a percorrer um estirão inserido em uma planície aluvionar, que apresenta uma topografia favorável às ocupações pelas atividades antrópicas, com seus terrenos planos, conforme foi observado também no presente estudo.

Com relação ao mapeamento das suscetibilidades a movimentos de massa, pode-se observar que o município apresenta menos de 10% de sua área com suscetibilidade alta. O restante do município divide-se quase igualmente entre a suscetibilidade média e baixa. Isto se justifica pelo fato de que nas áreas em que a declividade e a classe de solo são mais determinantes para a ocorrência dos movimentos de massa, o solo é, predominantemente,

coberto por vegetação de dossel fechado o que reforça a necessidade da conservação da vegetação em áreas mais suscetíveis e do seu importante papel na interceptação da chuva e no aumento da resistência do solo ao cisalhamento pelas raízes.

Pode-se observar também que apesar de a classe de suscetibilidade baixa ocupar quase metade de toda a área do município, apenas 6,71% dos movimentos de massa estão inseridos nesta classe. Enquanto a classe de suscetibilidade alta, mesmo ocupando menos de 10% de toda a área do município, apresentou uma parte significativa dos movimentos de massa, quase 27%. Indicando uma boa coerência no mapa final de suscetibilidade a movimentos de massa.

Sobre o mapeamento das áreas suscetíveis aos movimentos de massa, pode-se notar ainda as limitações ocasionadas pela escala dos dados de entrada, considerando que os movimentos de massa mapeados são de pequenas proporções.

Ressalta-se, ainda, que a incorporação de ações de proteção e defesa civil no planejamento municipal, o mapeamento de áreas de risco de desastres e a promoção da fiscalização das áreas de risco de desastre e vedar novas ocupações nessas áreas estão previstos na Lei 12.608 (BRASIL, 2012) dentre as competências do Município.

Em suma, o conhecimento de áreas suscetíveis a processos cuja dinâmica pode ocasionar desastres naturais é de extrema importância, pois contribui para o planejamento do uso e ocupação do solo, controle da expansão urbana e avaliação de cenários potenciais de risco, podendo impor medidas de restrição de ocupação de determinadas áreas suscetíveis ou o desenvolvimento de ações voltadas à redução de riscos em áreas já ocupadas.

REFERÊNCIAS

ALCÁNTARA-AYALA, I. Geomorphology, natural hazard, vulnerability and prevention of disasters in developing countries. **Geomorphology**, n. 47, p. 107-124, 2002.

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.

ALVES, J. M. P.; CASTRO, P. T. A. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio do Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 140-155, 2003.

AMARAL, R.; RIBEIRO, R. R. Inundação e Enchentes. In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. 2. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. cap. 3. p. 39-52.

ÁVILA, B. T.; ALMEIDA NETO, J. O.; FELIPPE, M. F. Suscetibilidade morfométrica a inundações nas bacias hidrográficas tributárias do rio do Peixe, Zona da Mata de Minas Gerais. **Revista FORMAÇÃO (ONLINE)**, v. 1, n. 24, p. 153-181, jan./abr. 2017.

AYALEW, L.; YAMAGISHI, H. The application of GIS-based logistic regression for landslide susceptibility mapping in the Kakuda-Yahiko Mountains, Central Japan. **Geomorphology**, v. 65, n. 1, p. 15-31, 2005.

AYALEW, L; YAMAGISHI, H; MARUI, H; KANNO, T. Landslides in Sado Island of Japan: Part II. GIS-based susceptibility mapping with comparisons of results from two methods and verifications. **Engineering Geology**, v. 81, n. 4, p. 432-445, nov. 2005.

BAJABAA, S.; MASOUD, M.; AL-AMRI, N. Flash flood hazard mapping based on quantitative hydrology, geomorphology and GIS techniques (case study of Wadi Al Lith, Saudi Arabia). **Arabian Journal of Geosciences**, v. 7, n. 6, p. 2469-2481, 2013. doi: 10.1007/s12517-013-0941-2.

BARBOSA, A. A.; OLIVEIRA, G. M.; OLIVEIRA, J. T. Histórico de Enchentes em Itajubá/MG. **Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade**, Curitiba, v. 9, n. 4, p. 125-140, jul./dez. 2015.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 4. ed. São Paulo: Ícone, 1999.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2003.

BRASIL. Constituição da República Federativa do Brasil de 1988. Brasília, DF, 1988. 514 p.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nos 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro

de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 11 abr. 2012.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 28 maio 2012.

BRASIL. Governo Federal. **Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais – PNGRRDN**, [S.l.], 2013. Disponível em: <<http://www.planejamento.gov.br/apresentacoes/apresentacoes-2012>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

CAMPANHARO, W. A. **Diagnostico físico da bacia do rio Santa Maria do Doce-ES**. 2010. 78 f. Monografia (Graduação Engenheiro Floresta) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES, 2010.

CAPECHE, C. L. **Noções sobre tipos de estrutura do solo e sua importância para o manejo conservacionista**. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solo, dez. 2008.

CASTRO, A. L. C. **Manual de desastres**. Brasília, 2003.

CEDEC – COORDENADORIA ESTADUAL DE DEFESA CIVIL DE MINAS GERAIS. **Plano de Emergência Pluviométrica 2012/2013**. Belo Horizonte, 2013.

CEPED - CENTRO DE ESTUDOS E PESQUISAS EM ENGENHARIA E DEFESA CIVIL. **Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2010: volume Brasil**. Florianópolis: CEPED – UFSC, 2012.

COOKE, R. U.; DOORNKAMP, J. C. **Geomorphology in environmental management**. Oxford: Clarendon Press, 1990. 410 p.

EM-DAT – THE INTERNACIONAL DISASTER DATABASE. 2016. Disponível em: <<http://www.emdat.be/database>>. Acesso em: 15 maio 2016.

EM-DAT – THE INTERNACIONAL DISASTER DATABASE. 2017. Disponível em: <http://www.emdat.be/Glossary#letter_d>. Acesso em: 11 jun. 2017.

EMBRAPA. CENTRO NACIONAL DE PESQUISA DE SOLOS. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa; 1999. 412 p.

EMBRAPA. **Cultivo de Algodão Irrigado**. 2003. Disponível em: <https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemasdeproducao1f6_1galceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column-1&p_p_col_count=1&p_r_p_-76293187_sistemaProducaoId=7717&p_r_p_-996514994_topicoId=1305>. Acesso em: 18 jun. 2018.

EMBRAPA. **ÁRVORE DO CONHECIMENTO Solos Tropicais**. 2013. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/solostropicais.html>. Acesso em: 10 abr. 2018.

ESRI - ENVIRONMENTAL SYSTEMS RESEARCH INSTITUTE. ArcGis. Versão 10.2. 2013.

FARIA, M. M.; ZACCHI, R. C.; FERREIRA, E. S. Caracterização morfométrica e biológica da bacia hidrográfica do córrego Serafim, sub-bacia do rio Paraibuna, Juiz de Fora, MG. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 13., 2009, Viçosa, MG. **Anais...** Viçosa: Editora da Universidade Federal de Viçosa, 2009.

FARINA, F. C. Abordagem sobre as técnicas de geoprocessamento aplicadas ao planejamento e gestão urbana. **Cadernos Ebape.br**, Rio de Janeiro, v. 4, n. 4, dez. 2006.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engineering Geology**, v. 102, p. 83-111, 2008.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico geomorfológica. In GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.) **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996, p. 123- 194.

G1 SUL DE MINAS. Defesa Civil notifica moradores do bairro Vila Isabel por risco de desmoronamento em Itajubá. 2017. Disponível em: <<https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/defesa-civil-notifica-moradores-do-bairro-vila-isabel-por-risco-de-desmoronamento-em-itajuba.ghtml>>. Acesso em: 20 jun. 2018.

GANEM, R. S. **Estrutura institucional da união para a gestão de desastres naturais**, Câmara dos Deputados, Consultoria Legislativa, Brasília, 2014.

GODOI, W. C. Método de construção das matrizes de julgamento paritários no AHP – método do julgamento holístico. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, PR, v. 10, n. 03: p.474- 493, 2014.

GOERL, R. F.; KOBİYAMA, M. Considerações sobre as inundações no Brasil. In: XVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2005, João Pessoa. **Anais...** 2005.

GOERL, R. F.; MICHEL, G. P.; KOBİYAMA, M. Mapeamento de áreas susceptíveis a inundação com o modelo HAND e análise do seu desempenho em diferentes resoluções espaciais. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 69, n. 1, p. 61-69, jan./fev. 2017.

GOMEDE, E.; BARROS, R. M. Utilizando o Método Analytic Hierarchy Process (AHP) para Priorização de Serviços de TI: Um Estudo de Caso.. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS DE INFORMAÇÃO, 8., 2012, São Paulo. **Anais...** São Paulo: USP, 2012. p. 408-419.

GOOGLE EARTH. Images CNES / Airbus. 2016.

GOOGLE LLC. *Software* Google Earth Pro. 2018.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 194 p.

GUZZETTI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. 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, 1999.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Mapa de biomas e de vegetação**. 2004. Disponível em: <<https://ww2.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/21052004biomas.shtm>>. Acesso em: abr. 2016.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Limite de municípios de Minas Gerais**. 2016. Disponível em: <https://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: mar. 2017.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. *Software TerraHidro*. 2013.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO; CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação – 1:25.000 – nota técnica explicativa**. São Paulo, 2014. 42 p.

JORNAL EPTV. Defesa Civil notifica moradores do bairro Vila Isabel por risco de desmoronamento em Itajubá. Itajubá, 23 nov. 2017. Disponível em: <https://g1.globo.com/mg/sul-de-minas/noticia/defesa-civil-notifica-moradores-do-bairro-vila-isabel-por-risco-de-desmoronamento-em-itajuba.ghtml?utm_source=facebook&utm_medium=share-bar-smart&utm_campaign=share-bar>. Acesso em: 18 jun. 2018.

JULIÃO, R. P. (Coord.); NERY, F.; RIBEIRO, J. L.; BRANCO, M. C.; ZÊRERE, J. L. **Guia metodológico para a produção de cartografia municipal de risco e para a criação de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) de base municipal**. Lisboa: Autoridade Nacional de Protecção Civil; Direcção-Geral do Ordenamento do Território e Desenvolvimento Urbano; Instituto Geográfico Português, 2009. Disponível em: <<http://www.dgotdu.pt/detail.aspx?channelID=85E8AD30-00F8-417E-9F12-EBFAFE6A5B4&contentId=3B54E44B-603C-4445-8C8A-ECC879127CEE>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F. Identificação dos riscos. **Emergência**, Novo Hamburgo, Ed. 25, p. 48-52, mar./abr. 2011.

LEPSCH, I. F.; ESPINDOLA, C. R.; VISCHI FILHO, O. J.; HERNANI, L. C.; SIQUEIRA, D. S. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. Viçosa, MG. 2015. 170 p.

LIMA, J. P. **Modelo de decisão para a priorização de vias candidatas às atividades de manutenção e reabilitação de pavimentos**. 2007. 234 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)-Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

LINDNER, E. A.; GOMIG, K.; KOBIYAMA, M. Sensoriamento remoto aplicado à caracterização morfométrica e classificação do uso do solo na Bacia Rio do Peixe / SC. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 13. (SBSR)., 2007,

Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2007. p. 3405-3412. CD-ROM, On-line. ISBN 978-85-17-00031-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2006/11.15.18.13.46>>.

MACHADO, P. J. de O. Características morfométricas da BHCSF. In: MACHADO, P. J. de O. (Org.). **Diagnóstico Físico-Ambiental da Bacia Hidrográfica do Córrego São Pedro**. Ubá: Editora Geographica, 2010. p. 54-55.

MALCZEWSKI, J.; RINNER, C. **Multicriteria decision analysis in geographic information science**. New York, NY: Springer, 2015.

MALTAURO, R. F. **Aplicação conjunta de modelo de projeção urbana e mapeamento de áreas aptas à urbanização sustentável no município de Itajubá (MG)**. 2018. 128 f. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos)-Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

MANTOVANI, F.; SOETERS, R.; VAN WESTEN, C. J. Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. **Geomorphology**, v. 15, n. 3-4, p. 213-225, abr. 1996.

MENGUE, V. P.; SCOTTÁ, F. C.; SILVA, T. S.; FARINA, F. Utilização do Modelo HAND para mapeamento das áreas mais suscetíveis à inundação no Rio Uruguai. **Pesquisa em Geociências**, Porto Alegre, v. 43, n. 1, p. 41-53, jan./abr. 2016.

MILANESI, J.; QUADROS, E. L. L.; LAHN, R. A. Utilização do modelo HAND no reconhecimento dos terrenos sujeitos a inundação – Porto Alegre/RS. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v. 69, n. 7, p. 675-686, abr. 2017.

MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL. **Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (Cobrade)**. [S.l.], 2012. Disponível em: <http://www.integracao.gov.br/documents/3958478/0/Anexo+V++Cobrade_com+simbologia.pdf/d7d8bb0b-07f3-4572-a6ca-738daa95feb0>. Acesso em: 9 jul. 2017.

MOMO, M. R. **Avaliação da aplicação do modelo HAND no mapeamento de áreas suscetíveis a inundação no município de Blumenau**. 2014. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)-Fundação Universidade Regional de Blumenau, Blumenau, 2014.

MORISAWA, M. E. Quantitative Geomorphology of Some Watersheds in the Appalachian Plateau. **Geological Society of America Bulletin**, v. 73, n. 9, p. 1025-1045, set. 1962. doi:10.1130/0016-7606(1962)73[1025:QGOSWI]2.0.CO;2.

MÜLLER, V. C. **A quantitative geomorphology study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain Area, Virginia and Tennessee**. New York: Department of Geology, Columbia University, 1953. 51 p.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; HODNETT, M.; RENNÓ, C. D.; RODRIGUES, G.; SILVEIRA, A.; WATERLOO, M.; SALESKA, S. Height above the Nearest Drainage, a hydrologically relevant new terrain model. **Journal Hydrology**. v. 404, n. 1-2, p.13-29, 2011. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.051.

NUNES JUNIOR, L. F.; CHAMON, M. A. Método AHP: pesquisa-ação na pequena empresa. In: SIMPEP, 13., 2006, Bauru, SP. **Anais...** Bauru: Simpep, 2006. p. 1-12.

OLIVEIRA, G. G. de.; GUASSELLI, L. A.; SALDANHA, D. L. Influência de variáveis morfológicas e da distribuição das chuvas na previsão de enchentes em São Sebastião do Caí, RS. **Revista de Geografia**, Recife, v. especial VIII SINAGEO, n. 3, p.140-155, set. 2010.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Resolução nº 44/236, de 22 de dezembro de 1989, **General Assembly**, 22 dez. 1989.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Yokohama Strategy and Plan of Action for a Safer World: guidelines for natural disaster prevention, preparedness and mitigation**. 1994. Disponível em: <https://www.unisdr.org/files/8241_doc6841contenido1.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2017.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030**. Disponível em: <http://www.preventionweb.net/files/43291_sendaiframeworkfordrren.pdf>. Acesso em: 22 jul. 2017.

OpenStreetMap Project Database. **Estradas**: OpenStreetMap 2017.

PATTON, P. C. Drainage Basin Morphometry and Floods. In: BAKER V. R.; KOCHER, R. C.; PATTON, P. C. (Eds.). **Flood Geomorphology**. New Jersey: John Wiley & Sons, 1988. p. 51-64.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrol. Earth system science*. n. 11, p. 1633-1644, 2007. doi:10.5194/hess-11-1633-2007.

PINHEIRO, M. V. **Avaliação técnica e histórica das enchentes em Itajubá – MG**. 2005. 119 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia)-Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

PREFEITURA MUNICIPAL DE ITAJUBÁ. Aspectos Físicos e Geográficos. Disponível em: <http://www.itajuba.mg.gov.br/cidade/fis_geo.php>. Acesso em: abr. 2016.

QGIS DEVELOPMENT TEAM. **QGIS User Guide**. 2016.

REIS, J. B. C. **Monitoramento e alerta de inundação no município de Itajubá (MG) através de modelos matemáticos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente e Recursos Hídricos)-Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2013.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process-what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n 3-5, p. 161-176, 1987. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8).

SAATY, T. L. How to make a decision: the analytic hierarchy process. **European Journal of Operational Research**, v. 48, p. 9-26, 1990.

SALOMON, V. A. P. **Desempenho da modelagem do auxílio à decisão por múltiplos critérios na análise do planejamento e controle da produção**. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção)-Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

SANCHES, I. D.; ANDRADE, R. G.; QUARTAROLI, C. F.; RODRIGUES, C. A. G. Análise comparativa de três métodos de correção atmosférica de imagens Landsat 5 – TM para obtenção

de reflectância de superfície e NDVI. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15., 2011, Curitiba. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011. p. 7564-7571.

SCHUMM, S. A. Evolution of drainage systems and slopes in badlands of Perth Amboy. **Geological Society of America Bulletin**, v. 67, n. 5, p. 597-646, 1956.

SCHUMM, S. A. Sinuosity of alluvial rivers on the great plains. **Geological Society of America Bulletin**, v. 74, n. 9, p. 1089-1100, 1963.

SEDEC – SECRETARIA NACIONAL DE PROTEÇÃO E DEFESA CIVIL. **Política Nacional de Defesa Civil**. Brasília, 2007.

SILVA, C. A. da; NUNES, F. P. Mapeamento de vulnerabilidade ambiental utilizando o método AHP: uma análise integrada para suporte à decisão no município de Pacoti/CE. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. **Anais...** Natal, 2009. p. 5435-5442.

SILVA, A. P. M. **Elaboração de manchas de inundação para o município de Itajubá, utilizando SIG**. 2006. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia)-Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2006.

SILVA, W.F.; MOLLERI, G. S. F.; PINTO, M. B. P.; ARAÚJO JUNIOR, G. J. L. D. Análise do modelo HAND para a indicação de áreas suscetíveis a eventos críticos de cheias. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16., 2013, São José dos Campos. **Anais...** São José dos Campos: Inpe, 2013. p. 7001-7008.

SKANSI, M. M.; BRUNET, M; SIGRÓ, J.; AGUILAR, E.; GROENING, J. A. A.; BENTANCUR, O. J.; GEIER, Y. R. C.; AMAYA, R. L. C.; JÁCOME, H.; RAMOS, A. M.; ROJAS, C. O.; PASTEM, A. M.; MITRO, S. S.; JIMÉNEZ, C. V.; MARTÍNEZ, R.; ALEXANDER, L. V.; JONES, P. D. Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. **Global Planetary Change**, v. 100, p. 295–307, 2013. doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.004>.

SOARES, M. R. **Metacontingências na Cidade de Campinas, SP: Adesão à Campanha da ONU de cidades resilientes**. 2017. 146 f. Dissertação (Pós-Graduação em Ciências do Comportamento) – Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

SOUZA, C. R. G. Flooding in the São Sebastião region, northern coast of São Paulo state, Brazil. In: ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS, 1998, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1998. v. 70, n. 2, p. 353-366.

SOUZA, C. R. G. Suscetibilidade morfométrica de bacias de drenagem ao desenvolvimento de inundações em áreas costeiras. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, ano 6, n. 1, p. 45-61, 2005.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, p. 111-1141, 1952. doi: 10.1130/0016-7606.

TOMINAGA, L. K; SANTORO, J; AMARAL, R. (Orgs.). **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. Instituto Geológico, Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo, 2009. 196 p.

TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (Orgs.). **Inundações Urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2003. 156 p.

UNESP. **Imagens de movimentos de massa**. Disponível em: <<http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09.html#1>>. Acesso em: 15 maio 2018.

UNISDR – THE UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION. **Hyogo Framework for Action 2005-2015: Building the Resilience of Nations and Communities to Disasters** Genebra: UNISDR, 2005.

UNISDR – THE UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION. **UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction**. 2017a. Disponível em: <<http://www.preventionweb.net/english/professional/terminology/>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

UNISDR – THE UNITED NATIONS INTERNATIONAL STRATEGY FOR DISASTER REDUCTION. **What is the International Strategy?**. 2017b. Disponível em: <<https://www.unisdr.org/who-we-are/international-strategy-for-disaster-reduction>>. Acesso em: 17 jul. 2017.

U.S. Geological Survey Database. Landsat Imagery. United States: USGS Earth Explorer, 2017.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography**, Sevenoaks, v. 32, p. 300-309, 2011.

YALCIN, A. GIS-based landslide susceptibility mapping using analytical hierarchy process and bivariate statistics in Ardesen (Turkey): Comparisons of results and confirmations. **Catena**, Amsterdam, v. 72, n. 1, p. 1-12, jan. 2008.

YALCIN, A.; REIS, S.; AYDINOGLU, A. C.; YOMRALIOGLU, T. A GIS-based comparative study of frequency ratio, analytical hierarchy process, bivariate statistics and logistics regression methods for landslide susceptibility mapping in Trabzon, NE Turkey. **Catena**, Amsterdam, v. 85, n. 3, p. 274-287, jun. 2011.

ANEXOS

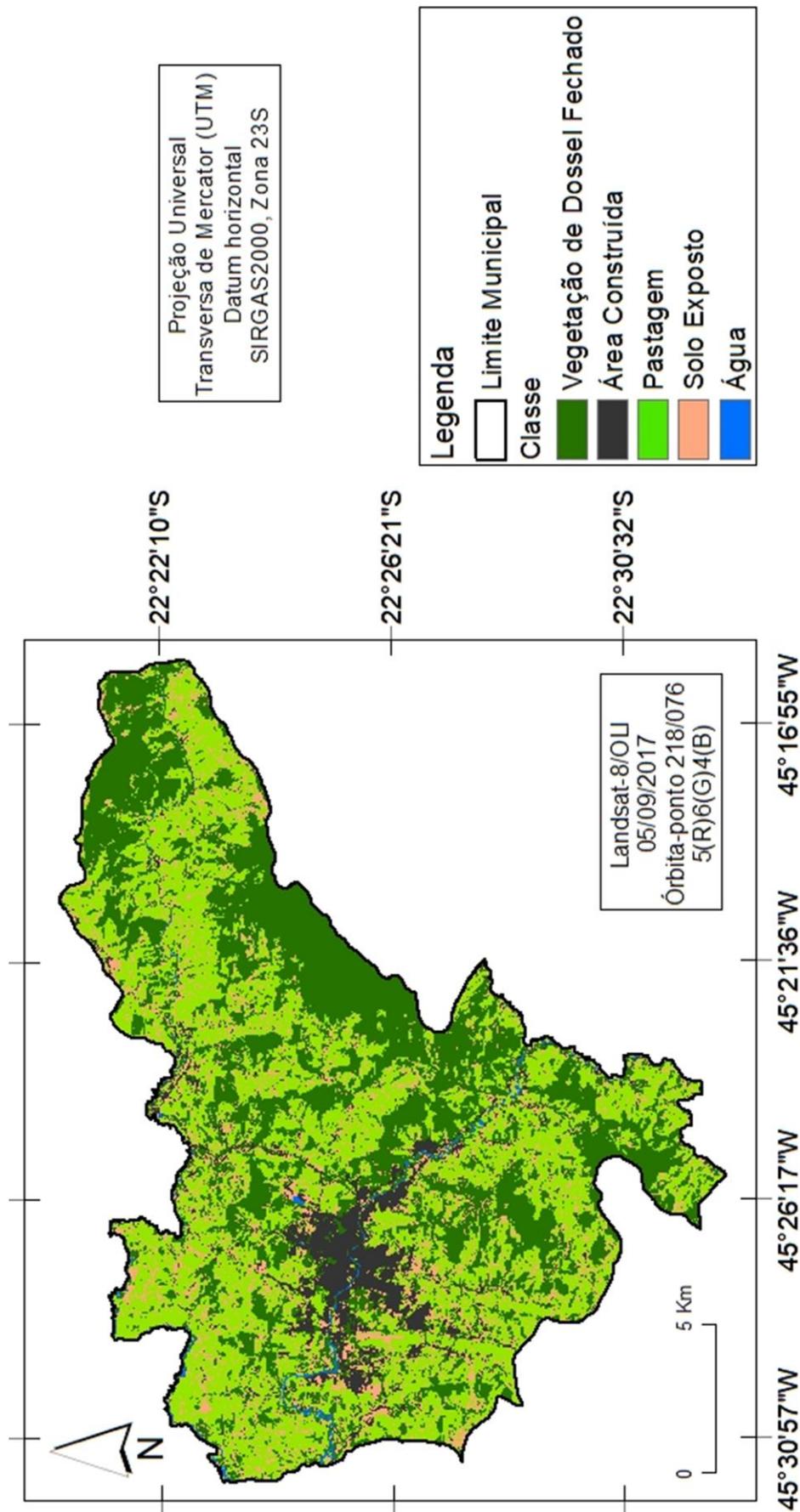


Figura A1: Mapa de cobertura do solo

Fonte: do autor



Figura A2: Processos erosivos

Fonte: Google Earth (2016)



Figura A3: Processos erosivos

Fonte: Google Earth (2016)

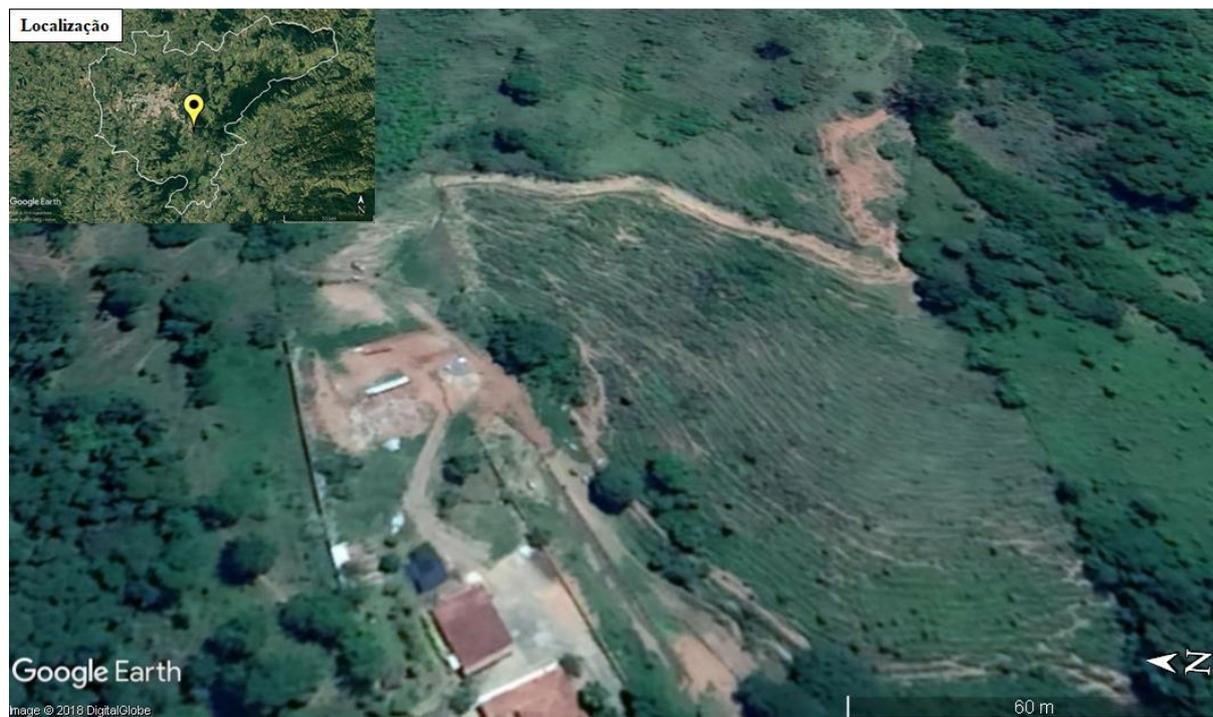


Figura A4: Processos erosivos

Fonte: Google Earth (2016)



Figura A5: Escorregamento na rua São Judas Tadeu, próximo ao Hotel Coroados



Figura A6: Processo erosivo em um lote na rua Vereador João Prudêncio, bairro Pinheirinho

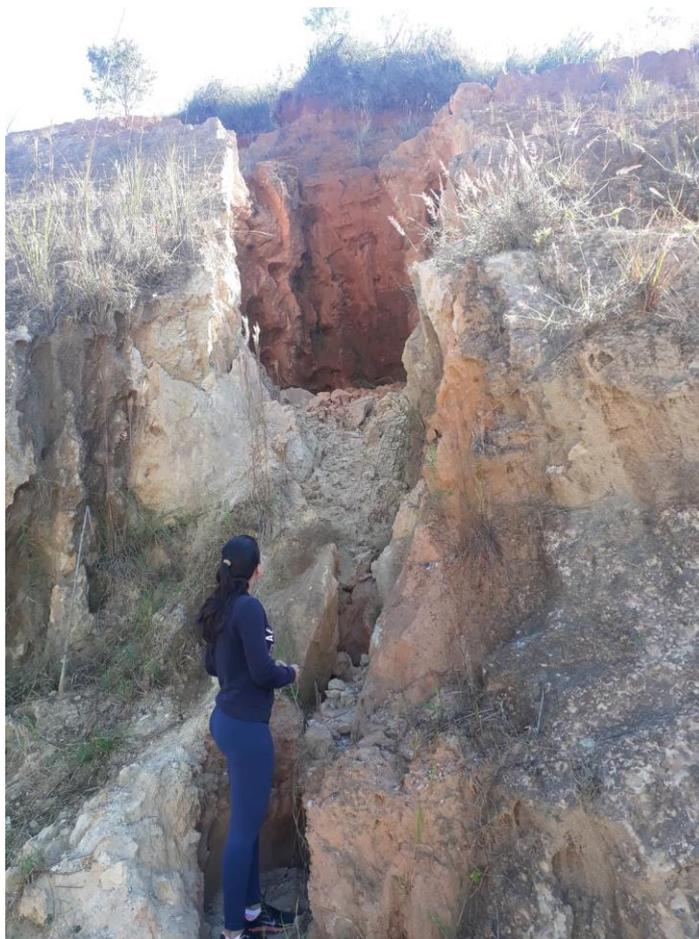


Figura A7: Processo erosivo na Estr. Lourenço Velho que liga a Av. BPS a Rod. Itajubá-Maria da Fé



Figura A8: Escorregamento no trecho da BR 459 na saída de Itajubá, sentido Delfim Moreira



Figura A9: Escorregamento na BR 459, próximo a Cabelauto