

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS**

Ana Luiza Helfer

**MODELO BASEADO EM SIG PARA AVALIAÇÃO DA
SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS NA REGIÃO
METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE**

Porto Alegre

2014

ANA LUIZA HELFER

**MODELO BASEADO EM SIG PARA AVALIAÇÃO DA
SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS NA REGIÃO
METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE**

Trabalho de Diplomação apresentado ao Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Engenheira Ambiental.

Orientadora: Tatiana Silva da Silva
Coorientador: Fernando Mainardi Fan

Porto Alegre

2014

ANA LUIZA HELFER

**MODELO BASEADO EM SIG PARA AVALIAÇÃO DA
SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS NA REGIÃO
METROPOLITANA DE PORTO ALEGRE**

Porto Alegre, 12 de dezembro de 2014

Profa. Tatiana Silva da Silva
Doutora pela FURG
Orientadora

Eng. Ambiental Fernando Mainardi Fan
Mestre pela UFRGS
Coorientador

BANCA EXAMINADORA

Prof. Alfonso Risso (UFRGS)
Mestre pela UFRGS

Profa. Flávia Cristiane Farina (UFRGS)
Doutora pela UFRGS

Gean Paulo Michel (UFRGS)
Mestre pela UFSC

João Pedro Demore (Octopus/Seaquarium)
Mestre pela UFRGS

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, Francisco Helfer e Ilci Maria Helfer, pelo amor que sempre demonstraram, pelo investimento em minha educação e pelos incentivos diretos e indiretos ao meu crescimento pessoal e profissional.

Agradeço à minha orientadora, Profa. Tatiana Silva da Silva, pelo incentivo, amizade e pelo compartilhamento dos seus sábios conhecimentos. Obrigada pelas horas de conversas, trabalho e ajudada conclusão dessa jornada.

A geógrafa Isabel Rekowsky, amiga e colega de trabalho, pelos ensinamentos repassados sobre os Sistemas de Informações Geográficas e Sensoriamento Remoto.

Agradeço também ao meu coorientador Fernando Mainardi Fan e ao pessoal do Laboratório LABMODEL/UFRGS pelas discussões construtivas e momentos de descontração.

Ao pessoal da Ecoplan Engenharia, pelas palavras incentivadoras e pela dispensa do meu estágio quando precisei terminar o trabalho.

Aos professores da graduação em Engenharia Ambiental da UFRGS, pelos grandes ensinamentos repassados.

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

Ban Ki-moon

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi desenvolver um modelo, utilizando Sistemas de Informações Geográficas, para mapear áreas suscetíveis a deslizamentos na Região Metropolitana de Porto Alegre – RS. A análise espacial da suscetibilidade a deslizamentos se configura como um problema de análise multicritério, uma vez que são vários os fatores relacionados a sua ocorrência. Os fatores utilizados foram: declividade, profundidade do solo, drenagem do solo, umidade do solo, cobertura vegetal, áreas de mesma declividade e áreas de mesma direção de escoamento. Foram restringidos do modelo, os corpos d'água e as áreas com declividades menores que 20 graus, pelo fato de não haver registros na literatura sobre deslizamentos ocorridos nessas condições. Os fatores foram padronizados por meio da aplicação da lógica *fuzzy* de forma que os valores dos fatores se tornassem comparáveis entre si. A atribuição de pesos aos fatores foi realizada através do Processo Analítico Hierárquico, definindo-se a importância de cada um na predisposição do terreno a deslizamentos. Por fim, os fatores foram agregados por meio de Combinação Linear Ponderada resultando no mapa de suscetibilidade da Região Metropolitana de Porto Alegre. Todos os procedimentos foram realizados utilizando-se o Sistema de Suporte à Decisão *Decision Wizard* presente no *software* Idrisi Taiga. Os resultados indicam que as áreas mais suscetíveis a deslizamentos situam-se, principalmente, nas encostas das regiões geomorfológicas Planalto Norte rio-grandense e Planalto Sul rio-grandense, compreendendo os municípios de Rolante, Taquara, Santo Antônio da Patrulha, São Jerônimo, Gravataí, Sapiranga, Novo Hamburgo e Montenegro. Assim, constata-se que os Sistemas de Informações Geográficas são úteis no mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos, pois tornam ágil e menos subjetivo o julgamento dos fatores e o seu processo de avaliação. Além disso, os resultados, depois de validados, podem auxiliar as políticas públicas de planejamento urbano dos municípios e ao mesmo tempo indicar os locais para avaliação de risco, de modo a prevenir acidentes e perdas humanas e econômicas.

Palavras-chave: Deslizamentos, Mapeamento de suscetibilidade, Sistema de Informações Geográficas, Análise multicritério.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: Movimentos de massa do tipo queda de rocha (Fonte: USGS, 2004). | 30 |
| Figura 2.2: Movimentos de massa do tipo tombamento (Fonte: USGS, 2008). | 30 |
| Figura 2.3: Movimentos de massa do tipo deslizamento rotacional (Fonte: USGS, 2004). | 31 |
| Figura 2.4: Movimentos de massa do tipo deslizamento translacional (Fonte: USGS, 2004). | 32 |
| Figura 2.5: Movimentos de massa do tipo expansão lateral (Fonte: adaptado de USGS, 2008). | 32 |
| Figura 2.6: Movimentos de massa do tipo corrida (Fonte: USGS, 2004). | 33 |
| Figura 2.7: Movimentos de massa do tipo rastejo (Fonte: adaptado de USGS, 2008)..... | 34 |
| Figura 3.1: Mapa de localização da Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor). | 51 |
| Figura 3.2: Mapa hipsométrico do relevo da Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor). | 54 |
| Figura 3.3: Normais Climatológicas da precipitação para o município de Porto Alegre (Fonte: INMET, 2014). | 58 |
| Figura 3.4: Normais Climatológicas da umidade para o município de Porto Alegre (Fonte: INMET, 2014). | 58 |
| Figura 4.1: Estimativa da direção de fluxo a partir do MDT (Fonte: adaptado de ESRI ArcMap, 2012)..... | 63 |
| Figura 4.2: Funções de pertinência <i>fuzzy</i> adotadas (Fonte: adaptado de EASTMAN, 2009). . | 69 |
| Figura 4.3: Escala de importância relativa entre os fatores (Fonte: adaptado de EASTMAN, 2009). | 71 |
| Figura 4.4: Ilustração do processo de agregação dos fatores através do método da combinação linear ponderada (Fonte: elaborado pelo autor)..... | 74 |
| Figura 5.1: Mapa de declividade da Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor). | 76 |
| Figura 5.2: Mapa da direção de escoamento da Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor). | 79 |
| Figura 5.3: Mapa de profundidade do solo da Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor). | 80 |
| Figura 5.4: Mapa de drenagem dos solos da Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor). | 82 |
| Figura 5.5: Mapa de umidade do solo da Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor). | 83 |
| Figura 5.6: Mapa da vegetação na Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor). | 84 |
| Figura 5.7: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor)..... | 85 |

| | |
|--|----|
| Figura 5.8: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos no município de Rolante (Fonte: elaborado pelo autor)..... | 89 |
| Figura 5.9: Áreas de alta (laranja) e muito alta (vermelho) suscetibilidade a deslizamentos nas áreas de expansão urbana do município de Rolante (Fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2013). | 90 |
| Figura 5.10: Áreas de muito alta suscetibilidade a deslizamentos no interior do município de Rolante (Fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2013)..... | 91 |
| Figura 5.11: Áreas de alta (laranja) e muito alta (vermelho) suscetibilidade a deslizamentos no interior do município de Rolante (Fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2013)..... | 91 |
| Figura 5.12: Áreas de média (amarelo), alta (laranja) e muito alta (vermelho) suscetibilidade a deslizamentos no interior do município de Rolante (Fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2013). | 92 |
| Figura 5.13: Exemplos de erros obtidos através do modelo (Fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2013). | 93 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|---|----|
| Quadro 2.1: Classificação de movimento de massa proposta por Varnes (1978). | 27 |
| Quadro 2.2: Classificação de movimento de massa proposta por Hutchinson (1988). | 27 |
| Quadro 2.3: Classificação de movimento de massa proposta por Augusto Filho (1992). | 28 |
| Quadro 2.4: Principais causas e fatores relacionados à ocorrência de movimentos de massa. 34 | |
| Quadro 2.5: Fatores relacionados a ocorrência dos movimentos de massa e sua aplicabilidade segundo diferentes escalas de análise (P = Pouco Aplicável, M = Moderadamente Aplicável, A = Altamente Aplicável). | 36 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 3.1: Área e população dos municípios da RMPA..... | 52 |
| Tabela 4.1: Valores atribuídos às classes dos fatores drenagem e profundidade do solo. | 68 |
| Tabela 4.2: Funções de pertinência <i>fuzzy</i> e pontos de inflexão utilizados na padronização dos fatores. | 69 |
| Tabela 4.3: Matriz de comparação pareada entre os fatores selecionados. | 72 |
| Tabela 4.4: Índice de aleatoriedade (RI) conforme o número de fatores (n)..... | 73 |
| Tabela 5.1: Distribuição da declividade nos municípios da RMPA..... | 77 |
| Tabela 5.2: Distribuição das classes de suscetibilidade a deslizamentos na RMPA..... | 86 |
| Tabela 5.3: Distribuição das classes de suscetibilidade a deslizamentos por município da RMPA. | 86 |

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AHP - *AnalyticHierarchyProcess*

ASTER – *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer*

CPRM - Serviço Geológico do Brasil

FURG – Universidade de Rio Grande

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

MDT – Modelo Digital de Terreno

NDVI - *NormalizedDifferenceVegetation Index*

ONU – Organização das Nações Unidas

OWA - *OrderedWeightedAverage*

PNPDEC – Política Nacional de Proteção e Defesa Civil

RMPA – Região Metropolitana de Porto Alegre

SIG – Sistema de Informações Geográficas

SR – Sensoriamento Remoto

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UNESCO - Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultural

WLC - *Weighted Linear Combination*

WP/WLI - *Working Party on World Landslide Inventory*

SUMÁRIO

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 23 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 25 |
| 2.1 | MOVIMENTOS DE MASSA | 25 |
| 2.1.1 | Classificação dos movimentos de massa | 26 |
| 2.1.2 | Fatores relacionados à ocorrência dos movimentos de massa..... | 34 |
| 2.2 | PREVENÇÃO E GERENCIAMENTO DE MOVIMENTOS DE MASSA | 41 |
| 2.2.1 | Mapas de Inventário | 41 |
| 2.2.2 | Mapas de Suscetibilidade | 42 |
| 2.2.3 | Mapas de Perigo | 43 |
| 2.2.4 | Mapas de Risco..... | 43 |
| 2.3 | SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG) E ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA..... | 44 |
| 2.3.1 | Dados de Entrada..... | 44 |
| 2.3.2 | Sistema de Suporte à Decisão em SIG | 46 |
| 3 | CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO | 51 |
| 3.1 | LOCALIZAÇÃO | 51 |
| 3.2 | GEOMORFOLOGIA..... | 53 |
| 3.3 | PEDOLOGIA..... | 55 |
| 3.4 | HIDROGRAFIA | 56 |
| 3.5 | CLIMA..... | 57 |
| 4 | METODOLOGIA..... | 59 |
| 4.1 | DEFINIÇÃO DOS FATORES E RESTRIÇÕES..... | 59 |
| 4.1.1 | Fatores | 59 |
| 4.1.2 | Restrições | 66 |
| 4.2 | PADRONIZAÇÃO DOS FATORES | 67 |
| 4.3 | PONDERAÇÃO DOS FATORES | 71 |
| 4.4 | AGREGAÇÃO DOS FATORES E RESTRIÇÕES | 74 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | RESULTADOS E DISCUSSÕES..... | 75 |
| 5.1 | CONTEXTO AMBIENTAL DA RMPA SEGUNDO OS CRITÉRIOS ADOTADOS DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS | 75 |
| 5.1.1 | Declividade | 75 |
| 5.1.2 | Direção de Fluxo | 78 |
| 5.1.3 | Profundidade dos solos | 79 |
| 5.1.4 | Drenagem dos solos | 81 |
| 5.1.5 | Umidade do Solo..... | 82 |
| 5.1.6 | Vegetação..... | 84 |
| 5.2 | O MODELO BASEADO EM SIG DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS | 85 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 95 |
| 7 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 99 |

1 INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa são fenômenos naturais caracterizados pelo desprendimento e transporte de solo, rocha e detritos vertente abaixo, por efeito da força gravitacional (CRUDEN, 1991). Embora façam parte da dinâmica superficial do planeta, os movimentos de massa quando ocorrem em áreas ocupadas, constituem um perigo com sérias consequências econômicas e sociais.

No Brasil, as ocorrências dos movimentos de massa em áreas ocupadas vêm se tornando cada vez mais frequentes e estão entre os desastres naturais que mais causam vítimas fatais no país. Como exemplo, destaca-se o evento ocorrido em janeiro de 2011 na região serrana do Rio de Janeiro que deixou 22.604 desalojados, 8.795 desabrigados, 918 vítimas fatais e aproximadamente 500 desaparecidos, conforme informações da Defesa Civil. Além disso, segundo estimativas do Banco Mundial, ocasionou um prejuízo de aproximadamente 4,8 bilhões de reais. Este desastre figura como um dos dez piores, causados por movimentos de massa, já ocorridos no mundo, segundo a Organização das Nações Unidas.

A região sul do Brasil também vem sofrendo com os efeitos das chuvas intensas e prolongadas que assolam a região. Nesse sentido, podem-se destacar os eventos ocorridos em novembro de 2008, na região do vale do Itajaí, litoral norte de Santa Catarina. Na ocasião mais de 1,5 milhões de pessoas foram atingidos pelas enchentes e movimentos de massa registrados principalmente em Blumenau, Ilhota e Gaspar. Ao todo, 135 pessoas morreram em 16 municípios.

A falta de planejamento urbano, a ocupação desordenada de encostas e a degradação ambiental associados aos elevados índices pluviométricos registrados no Brasil, têm elevado o número de pessoas atingidas por movimentos de massa e os prejuízos econômicos provocados por eles. Nesse sentido, em 2012, o Governo Federal estabeleceu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC estabelecida pela Lei Federal nº12.608/2012 (BRASIL, 2012) da qual se destacam os incisos XI, XII e XIII do artigo 6º, do qual compete à União:

XI - incentivar a instalação de centros universitários de ensino e pesquisa sobre desastres e de núcleos multidisciplinares de ensino permanente e a distância, destinados à pesquisa, extensão e capacitação de recursos humanos, com vistas no gerenciamento e na execução de atividades de proteção e defesa civil;

XII - fomentar a pesquisa sobre os eventos deflagradores de desastres; e

XIII - apoiar a comunidade docente no desenvolvimento de material didático-pedagógico relacionado ao desenvolvimento da cultura de prevenção de desastres.

O mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa é uma medida preventiva e essencial para gestão do uso e ocupação territorial uma vez que conhecendo esses locais pode-se evitar a ocupação e por consequência evitar a criação de novas situações de risco. Além disso, segundo Fell et al. (2008), o mapeamento da suscetibilidade permite orientar a execução de mapeamentos de risco em maior detalhe para os locais onde eles realmente são necessários. Por fim, Kobiyama et al. (2006) ressaltam que a prevenção de desastres é menos onerosa quando comparada com a recuperação, sendo que cada R\$ 1,00 investido em prevenção corresponde, em média, a cerca de R\$ 25,00 a R\$ 30,00 em obras de reconstrução pós-desastre.

Exposto isto, este trabalho tem como objetivo principal o desenvolvimento de um modelo para mapeamento de áreas suscetíveis a movimentos de massa do tipo deslizamento, nos 32 municípios da Região Metropolitana de Porto Alegre. A região concentra a maior parte da população e infraestruturas do Estado do Rio Grande do Sul e, assim, a definição dos locais mais críticos pode vir a auxiliar as políticas públicas de planejamento territorial dos municípios e, conseqüentemente, aumentar a segurança da população civil.

Como objetivos específicos deste trabalho, citam-se:

- Identificar as condições em que ocorrem os deslizamentos, suas forçantes, gatilhos e diferentes classificações;
- Buscar referências sobre o estado-da-arte no que se refere a modelos de suscetibilidade a deslizamentos em SIG;
- Criar novas formas de incluir indicadores de vizinhança, através do uso de operadores de contexto, no processo de modelagem em SIG;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Na literatura são encontradas diversas definições para o termo movimento de massa. Atualmente a definição mais aceita é a proposta por Cruden (1991), que define movimento de massa como um termo geral para designar todos aqueles movimentos ao longo de uma encosta de uma massa de rocha, solo ou detritos por efeito da força gravitacional.

O termo deslizamento tem sido comumente utilizado como sinônimo de movimento de massa apesar de ser um tipo particular destes movimentos. Essas duas terminologias geralmente são confundidas devido à tradução do termo *landslide* do inglês para o português. Segundo Cruden (1991) a palavra inglesa *landslide* muitas vezes é traduzida erroneamente como sendo simplesmente um *slide of land*, ou seja, um deslizamento de terra, cuja tradução correta seria simplesmente *slide* conforme a classificação de Varnes (1978) apresentada posteriormente.

Os principais esforços de homogeneização da terminologia internacional utilizada nos estudos sobre movimentos de massa foram desenvolvidos por um grupo de trabalho da UNESCO denominado *Working Party on World Landslide Inventory* (WP/WLI) que envolveu três instituições internacionais: Associação Internacional de Engenharia Geológica (IAEG), Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas e Sociedade Internacional de Mecânica de Solos e Engenharia de Fundações. A definição de *landslide* adotada pela WP/WLI é muito simples e concisa, sendo a mesma proposta por Cruden (1991).

No Brasil, a CPRM (Serviço Geológico do Brasil) e o IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo) utilizam o termo deslizamento, de forma geral, para se referir a qualquer processo de movimentação e transporte de massas de solo e/ou rocha (SILVA e MACEDO, 2007; SAMPAIO et al., 2013). A adoção deste termo tem por objetivo facilitar a comunicação entre a sociedade, a mídia em geral e os diferentes órgãos técnicos envolvidos na análise de desastres naturais (BRITO, 2014). Já a Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE) estabelecida pela Defesa Civil com o intuito de adequar a classificação brasileira à classificação utilizada pela ONU, define deslizamento como um tipo específico de movimento de massa. O presente trabalho utiliza o termo deslizamento da mesma forma que a Defesa Civil.

2.1.1 Classificação dos movimentos de massa

Existem, atualmente, diversas propostas de classificação dos movimentos de massa. Segundo Fernandes et al. (2001), isso ocorre devido à complexidade dos fenômenos, juntamente com as rápidas transformações que ocorrem nas cicatrizes e transformação antrópica. Outro problema da distinção e classificação precisa entre os tipos de movimentos é o fato de que muitas vezes ocorrem combinações de dois ou mais processos (DIAS e HERRMANN, 2002). Por fim, Guidicini e Nieble (1984) mencionam que a maioria das classificações são influenciadas pelo ambiente para o qual o autor as elaborou, restringindo-as regionalmente, fato que cria a necessidade de elaboração de novas classificações para outras regiões.

Assim sendo, há classificações baseadas essencialmente no critério de presença ou ausência de uma superfície de ruptura preexistente, há classificações que correlacionam o tipo e a velocidade de movimentação com a natureza do material envolvido, há classificações que associam aos fatores descritos anteriormente, os fatores geomorfológicos e climáticos, e finalmente, há sistemas classificatórios baseados essencialmente em características físico-mecânicas do fenômeno (GUIDICINI E NIEBLE, 1984).

Dentre os autores que propuseram classificações de movimento de massa destacam-se: Sharpe (1938), Terzaghi (1925; 1950), Varnes (1958; 1978), Hutchinson (1968; 1988), Selby (1993), Cruden e Varnes (1996). Entre as classificações brasileiras, destacam-se as de Freire (1965), Guidicini e Nieble (1984), IPT (1991) e Augusto Filho (1992).

Atualmente as classificações dos movimentos de massa propostas por Varnes (1978) e Hutchinson (1988) são os sistemas mais amplamente aceitos na comunidade científica internacional. Varnes (1978) utiliza como critério principal na sua classificação o tipo de movimento e em segundo lugar o tipo de material conforme pode ser observado no Quadro 2.1. Já Hutchinson (1988) utiliza a morfologia do movimento como critério principal, e como critérios secundários utiliza o tipo de movimento, tipo de material e a amplitude do movimento conforme se verifica no Quadro 2.2.

Quadro 2.1: Classificação de movimento de massa proposta por Varnes (1978).

| Tipo de movimento | Tipo de material | | |
|--------------------------------|--|----------------------------|----------------------------------|
| | Rocha | Solos de engenharia | |
| | | Predomínio de grosseiros | Predomínio de finos |
| Queda (<i>fall</i>) | Queda de blocos | Queda de detritos | Queda de solos |
| Tombamento (<i>tope</i>) | Tombamento de blocos | Tombamento de detritos | Tombamento de solos |
| Deslizamento (<i>slide</i>) | Rotacional | Deslizamento de blocos | Deslizamento de detritos |
| | Translacional | | |
| Espalhamento (<i>spread</i>) | Espalhamento de blocos | Espalhamento de detritos | Espalhamento de solos |
| Corrida/fluxo (<i>flow</i>) | Corrida/ fluxo de blocos | Corrida/ fluxo de detritos | Corrida/ fluxo de solo (ou lama) |
| | (Rastejo profundo) | (Rastejo de solos) | |
| Complexo | Combinação de dois ou mais tipos de movimentos | | |

Fonte: Varnes (1978).

Quadro 2.2: Classificação de movimento de massa proposta por Hutchinson (1988).

| Tipo de movimentos fundamentais | Subtipos |
|--|--|
| Recuo | 1 - Movimentos associados a escavações feitas pelo homem |
| | 2 - Movimentos associados a vales naturalmente erodidos |
| Rastejo | 1 - Superficial, predominante sazonal, no manto de alteração |
| | 2 - Profundo e contínuo |
| | 3 - Pré-ruptura e progressivo |
| | 4 - Pós-ruptura |
| Deformações em cristas e encostas de montanhas | 1 - Em uma única face |
| | 2 - Nas duas faces |
| | 3 - Associado a rompimentos múltiplos |
| Deslizamentos | 1 - Ruptura confinada |
| | 2 - Rotacional |
| | 3 - Compostos |
| | 4 - Translacional |
| Movimentos de detritos em forma de fluxo | 1 - Fluxo de lama, não-periglacial |
| | 2 - Fluxo de lama, gelifluxão de argilas |
| | 3 - Fluxo |
| | 4 - Fluxo de detritos, rápidos e muito rápidos, com alta umidade |
| | 5 - Sturzstroms, fluxos extremamente rápidos de detritos secos |
| Tombamentos | 1 - Por discontinuidades pré-existent |
| | 2 - Pela ruptura por aumento de tensão |
| Quedas | 1 - Primárias |
| | 2 - Secundárias |

| Tipo de movimentos fundamentais | Subtipos |
|--|---|
| Movimentos complexos em encostas | 1 - Arqueamento e abaulamento de vale |
| | 2 - Em blocos |
| | 3 - Falésias de argila abandonadas |
| | 4 - Deslizamentos transformados em fluxo de detritos ou de lama |
| | 5 - Causados por erosão interna |
| | 6 - Deslizamentos multi-diferenciados |
| | 7 - Deslizamentos multi-estratificados |

Fonte: Hutchinson (1988) apud Dikauet al. (1996).

É interessante observar que, tanto a classificação proposta por Varnes (1978) quanto a de Hutchinson (1988) apresentam a classe de movimentos complexos, reconhecendo assim a dificuldade em se estabelecer limites rígidos entre um tipo de movimento e outro (BRITO, 2014). Esse problema foi relatado por Dikauet al. (1996), onde os autores comentam que, em muitos casos, ocorre a manifestação de várias classes num mesmo movimento.

No Brasil, destacam-se as classificações elaboradas por Guidicini e Nieble (1984) e pelo IPT (1991), a qual foi detalhada posteriormente por Augusto Filho (1992). A classificação de Augusto Filho (1992) é a mais utilizada na área acadêmica e é utilizada atualmente pelo IPT e pela CPRM nos trabalhos referentes a movimentos de massa por ser a mais adequada aos casos brasileiros. Ela tem como critério principal o tipo de movimento, e como critérios secundários as principais características do material e da encosta.

Quadro 2.3: Classificação de movimento de massa proposta por Augusto Filho (1992).

| Processos | Características do movimento/ material/ geometria |
|---|---|
| Rastejo ou fluência | Vários planos de deslocamento (internos) |
| | Velocidades de muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade |
| | Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes |
| | Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada |
| | Geometria indefinida |
| Deslizamentos | Poucos planos de deslocamento (externos) |
| | Velocidades de médias (km/h) a altas (m/s) |
| | Pequenos a grandes volumes de material |
| | Geometria e materiais variáveis: |
| | Planares - solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza |
| | Circulares - solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas |
| Em cunha - solos e rochas com dois planos de fraqueza | |
| Quedas | Sem planos de deslocamento |
| | Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado |

Modelo baseado em SIG para avaliação da suscetibilidade a deslizamentos na Região Metropolitana de Porto Alegre

| Processos | Características do movimento/ material/ geometria |
|-----------|--|
| | Velocidades muito altas (vários m/s) |
| | Material rochoso |
| | Pequenos a médios volumes |
| | Geometria variável: lascas, placas, blocos etc. |
| | Rolamento de matacão |
| | Tombamento |
| Corridas | Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação) |
| | Movimento semelhante ao de um líquido viscoso |
| | Desenvolvimento ao longo das drenagens |
| | Velocidades de médias (m/h) a altas (m/s) |
| | Mobilização de solo, rocha, detritos e água |
| | Grandes volumes de material |
| | Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas |

Fonte: Augusto Filho (1992).

Em face da multiplicidade de classificações existentes referentes aos movimentos de massa, decorrente do enfoque de diferentes profissionais atuantes na área e da complexidade dos processos envolvidos, optou-se por utilizar neste trabalho a classificação de Cruden e Varnes (1996), atualização da classificação de Varnes (1978), na qual foram acrescentados critérios secundários tais como a velocidade do movimento e atividade do movimento, sendo a mesma classificação adotada pela *Working Party on World Landslide Inventory* (WP/WLI) e pela *International Association for Engineering Geology and the Environment* (IAEG) devido a sua clareza, simplicidade e facilidade de aplicação.

A seguir, é realizada breve descrição sobre os tipos de movimentos de massa propostos por Cruden e Varnes (1996) utilizando como base dois trabalhos do Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS, 2004; 2008) que também adota essa classificação.

2.1.1.1 Queda (*fall*)

Queda é um movimento que se inicia com o desprendimento de um bloco de solo ou rocha da face de um talude com pouca ou nenhuma deformação cisalhante (CRUDEN e VARNES, 1996). A separação ocorre ao longo de discontinuidades, tais como fraturas, articulações e planos de rupturas, e o movimento ocorre por queda livre, salto ou rolamento. As quedas são fortemente influenciadas pela gravidade, desgaste mecânico, e pela presença de água intersticial.

As quedas podem ser desencadeadas a partir da erosão regressiva do talude por processos naturais tais como rios, ribeirões ou condições climáticas diferenciadas (como o ciclo de congelamento e degelo); atividades humanas como escavações para construção de estradas e/ou manutenção dessas; terremotos ou outras vibrações intensas.

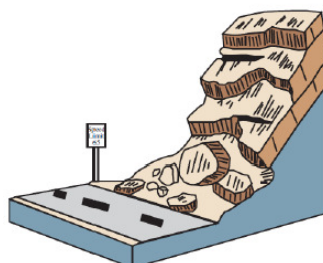


Figura 2.1: Movimentos de massa do tipo queda de rocha(Fonte: USGS, 2004).

2.1.1.2 Tombamento (*tople*)

Tombamento é identificado por uma rotação frontal de uma massa de solo ou rocha para fora do talude, em torno de um ponto na base, ou eixo, abaixo do centro de gravidade da massa deslocada. O tombamento pode ser devido ao empuxo de material situado acima da massa rompida ou por empuxo hidrostático. A velocidade varia de extremamente rápida a extremamente lenta. O tombamento pode ser por flexão ou por dobra, dependendo da geometria e da resistência dos materiais envolvidos (CRUDEN e VARNES, 1996).

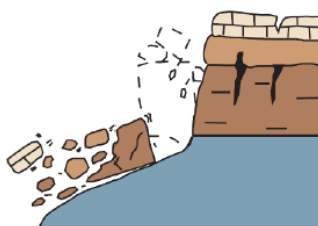


Figura 2.2: Movimentos de massa do tipo tombamento(Fonte: USGS, 2008).

2.1.1.3 Deslizamentos (*slide*)

Denomina-se de deslizamento (ou escorregamento) o movimento de uma massa de solo ou rocha, que ocorre predominantemente em superfícies de rupturas ou em superfícies relativamente finas de concentração de deformações cisalhantes. O material rompido pode deslizar além da superfície de ruptura cobrindo a superfície original do terreno (CRUDEN e VARNES, 1996). Os deslizamentos podem ser divididos em dois tipos: os movimentos rotacionais e os movimentos translacionais.

Nos deslizamentos rotacionais, a superfície de ruptura é curvada no sentido superior e o movimento de queda é ao menos rotatório em torno de um eixo. O topo de material pode mover-se quase que verticalmente para baixo, enquanto a parte superior de material pode inclinar-se para trás em direção ao talude. Esse formato de movimento ocorre, frequentemente, em material homogêneo com declividades que variam entre 20 e 40 graus.

Chuva intensa e (ou) contínua ou rápido degelo podem levar à saturação dos taludes e aumentar os níveis de água no interior do solo; o escoamento rápido de rios após enchentes, o aumento de água subterrânea devido ao enchimento de represas ou o aumento no nível de ribeirões, lagos e rios, que causam erosão na base dos taludes podendo causar deslizamentos. Esses tipos de deslizamentos também podem ser induzidos por terremotos.

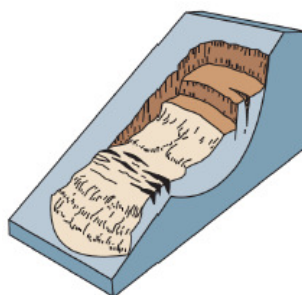


Figura 2.3: Movimentos de massa do tipo deslizamento rotacional (Fonte: USGS, 2004).

Nos deslizamentos translacionais, a massa de material move-se para fora ou para baixo e para fora, ao longo de uma superfície relativamente plana, com pequeno movimento rotacional ou inclinação para trás. Esse tipo de deslizamento pode progredir por distâncias consideráveis, se a superfície da ruptura estiver suficientemente inclinada, ao contrário dos deslizamentos rotacionais, que tendem a restaurar o equilíbrio do deslizamento. O material no deslizamento pode variar de solo solto e não adensado até grandes placas de rochas, ou ambos. Deslizamentos translacionais comumente ocorrem ao longo de discontinuidades geológicas tais como falhas, junções, superfícies, estratificações, ou o ponto de contato entre rocha e solo.

Chuva intensa, aumento do nível de encharcamento do solo pelas chuvas, degelo, inundações, aumento do nível de água devido a irrigações, vazamentos de tubulações ou distúrbios relacionados à ação do homem podem desencadear esse tipo de movimento de massa. Terremotos ou tremores de terra também podem provocar esse fenômeno. É um dos tipos mais comuns de deslizamentos encontrados pelo globo, em todos os tipos de ambientes e em todas as condições.

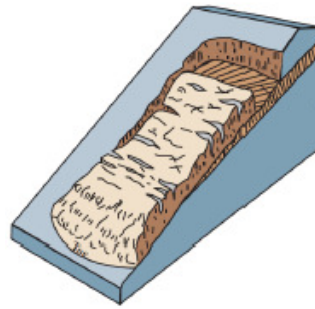


Figura 2.4: Movimentos de massa do tipo deslizamento translacional(Fonte: USGS, 2004).

2.1.1.4 Espalhamento (*spread*)

Espalhamento é a extensão lateral de uma massa de solo ou rocha combinada com um movimento geral de subsidência, dentro de um material inferior mais mole (CRUDEN e VARNES, 1996).

Entre os mecanismos que desestabilizam a camada menos rígida inclui-se:

- Liquefação da camada inferior mais fraca devido à agitação por terremoto;
- Sobrecarga do solo, acima do terreno instável, por causas naturais ou por atividade antropogênica;
- Saturação de uma camada subterrânea mais mole devido a precipitações, degelos e (ou) alterações nos níveis de água do solo;
- Liquefação de camada inferior constituída de argila marinha instável após um distúrbio erosivo na base de uma margem ou talude;
- Deformação plástica de material instável e profundo (por exemplo, sal).

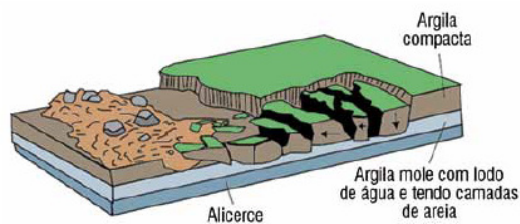


Figura 2.5: Movimentos de massa do tipo expansão lateral(Fonte: adaptado de USGS, 2008).

2.1.1.5 Corrida (*flow*)

Corrida ou fluxo é o movimento espacial contínuo de detritos, solo e rochas, no qual as superfícies de cisalhamento, normalmente, têm vida curta, espaço reduzido entre si e não são preservadas (CRUDEN e VARNES, 1996). Esse material, misturado com grandes volumes de água, forma uma massa semifluida, com comportamento semelhante ao de um fluido não newtoniano (WP/WLI, 1993).

É uma forma rápida de movimento de massa, em que solo solto e rochas, e por vezes, material orgânico, se misturam à água e formam lama que escoam talude abaixo. O fluxo de detritos é, informalmente e inapropriadamente, chamado de escorregamento de lama devido à grande quantidade de partículas finas que podem estar ali presentes. Ocasionalmente, quando um deslizamento rotacional ou translacional ganha velocidade, e a massa interna perde a coesão ou ganha água, esse fenômeno pode mudar para um fluxo de detritos. O fluxo de detritos pode causar mortes, pois é extremamente rápido e passível de ocorrer sem qualquer tipo de alerta.

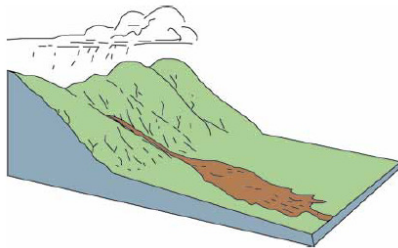


Figura 2.6: Movimentos de massa do tipo corrida (Fonte: USGS, 2004).

2.1.1.6 Rastejos (*creep*)

Ainda segundo Cruden e Varnes (1996), existe um movimento em particular que ocorre por todos os lugares do planeta: os rastejos (*creep*). Rastejo é o nome informal dado ao fluxo lento de terra e consiste de um movimento vagaroso, imperceptível e contínuo, para baixo do solo que forma o talude. Esse tipo de deslocamento é causado por tensão de cisalhamento interna suficiente para causar deformação, mas insuficiente para causar rupturas.

Geralmente, existem três tipos de rastejo: (1) sazonal, no qual o movimento ocorre no interior e no fundo do solo afetado por alterações sazonais, em sua mistura e temperatura; (2) contínuo, no qual a tensão de cisalhamento contínua excede a resistência do material; e (3) progressivo, no qual os taludes atingem o ponto de ruptura gerando outros tipos de movimentação do terreno.

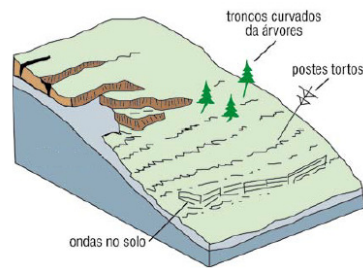


Figura 2.7: Movimentos de massa do tipo rastejo (Fonte: adaptado de USGS, 2008).

2.1.1.7 Complexos

São movimentos que envolvem a combinação de um ou mais dos principais tipos de movimentos de massa descritos anteriormente, sendo inclusive mais comuns que os individuais. Podem ocorrer em várias porções de massa movimentada ou em movimento, ou ainda durante os vários estágios do desenvolvimento da movimentação (AHRENDT, 2005).

A adoção de sistemas classificatórios, além de facilitar o intercâmbio de ideias entre os diferentes profissionais, constitui-se no primeiro passo para a prevenção desses fenômenos (BRITO, 2014). Nesse sentido, Augusto Filho e Virgili (2004) comentam que, a partir da classificação dos diferentes processos, é possível relacionar um determinado tipo de movimento a um conjunto de características, como por exemplo, a profundidade, o tipo de material instabilizado e seu poder destrutivo. Essas características contribuem para um melhor entendimento dos mecanismos condicionantes dos movimentos de massa.

2.1.2 Fatores relacionados à ocorrência dos movimentos de massa

A compreensão dos principais fatores relacionados à ocorrência dos movimentos de massa é de fundamental importância para o mapeamento de locais sujeitos a novos movimentos e para a adoção de medidas corretivas adequadas. Cruden e Varnes (1996) apresentam, de forma simplificada e clara, as possíveis causas da ocorrência de movimentos de massa, sendo elas divididas em quatro grupos: geológicas, morfológicas, físicas e humanas.

Quadro 2.4: Principais causas e fatores relacionados à ocorrência de movimentos de massa.

| Causas | Fatores |
|------------|---|
| Geológicas | Materiais fracos, sensíveis e/ou intemperizados |
| | Materiais cisalhados, fissurados ou fraturados |
| | Orientação desfavorável de descontinuidades (acamadamento, xistosidades) |
| | Orientação desfavorável de descontinuidades estruturais (falhas, contatos, inconformidades) |
| | Contrastes na permeabilidade |
| | Contrastes na espessura (material denso, rígido sobre materiais plásticos) |

Modelo baseado em SIG para avaliação da suscetibilidade a deslizamentos na Região Metropolitana de Porto Alegre

| Causas | Fatores |
|---------------------|--|
| Morfológicas | Tectonismo ou vulcanismo |
| | Erosão |
| | Deposição de materiais no topo ou na base da encosta |
| | Remoção da vegetação |
| Físicas | Chuvas intensas e excepcionalmente prolongadas |
| | Rebaixamentos rápidos (enchentes e marés) |
| | Terremotos |
| | Erupções vulcânicas |
| | Descongelamento repentino |
| | Intemperismo por congelamento e descongelamento |
| | Intemperismo por expansão e retração |
| Humanas | Escavações da encosta ou da sua base |
| | Sobrecarga no topo da encosta ou na crista |
| | Rebaixamento (reservatórios) |
| | Desmatamento |
| | Irrigação |
| | Mineração |
| | Vibração artificial |
| | Vazamentos de água |

Fonte: adaptado de Cruden e Varnes (1996).

Já, para Augusto Filho e Virgili (2004), os principais fatores relacionados à ocorrência dos movimentos de massa na dinâmica ambiental são:

- Características climáticas, principalmente o regime pluviométrico;
- Características e distribuição dos materiais que compõe o substrato rochoso das encostas. Exemplos: solos, rochas, depósitos e estruturas geológicas, tais como, xistosidade, fratura, etc;
- Características geomorfológicas, principalmente inclinação, amplitude e forma do perfil das encostas;
- Regime das águas de superfície e subsuperfície;
- Características de uso e ocupação, na qual se incluem cobertura vegetal e intervenções antrópicas nas encostas.

Van Westen et al.(2008 apud BRITO, 2014), apresentam uma síntese dos fatores mais utilizados em avaliações de suscetibilidade a movimentos de massa e o grau de aplicação de cada um em função da escalada análise. A lista compreende 29 fatores relevantes, agrupados nos seguintes temas: geomorfometria, geologia, solos, hidrologia, geomorfologia e uso do solo.

Quadro 2.5: Fatores relacionados a ocorrência dos movimentos de massa e sua aplicabilidade segundo diferentes escalas de análise (P = Pouco Aplicável, M = Moderadamente Aplicável, A = Altamente Aplicável).

| Grupo | Tipo de informação | Escala da análise | | | |
|----------------|------------------------------|-------------------|-------|--------|---------|
| | | Pequena | Média | Grande | Detalhe |
| Geomorfometria | Declividade | P | A | A | A |
| | Orientação da encosta | A | A | A | A |
| | Forma da encosta | M | A | A | A |
| | Direção do fluxo | P | M | A | A |
| | Acúmulo de fluxo | P | M | A | A |
| | Razão de relevo relativo | A | M | P | P |
| | Densidade de drenagens | A | M | P | P |
| Geologia | Tipo de rocha | A | A | A | A |
| | Grau de alteração | P | M | A | A |
| | Descontinuidades | P | M | A | A |
| | Aspectos estruturais | A | A | A | A |
| | Distância de falhas | A | A | A | A |
| Solos | Tipo de solos | M | A | A | A |
| | Profundidade dos solos | P | M | A | A |
| | Propriedades geotécnicas | P | M | A | A |
| | Propriedades hidrológicas | P | M | A | A |
| Hidrologia | Lençol freático | P | P | M | A |
| | Umidade do solo | P | P | M | A |
| | Componentes hidrológicos | M | A | A | A |
| | Distância de drenagens | A | A | A | P |
| Geomorfologia | Unidades fisiográficas | A | M | P | P |
| | Unidades de terreno | A | M | M | P |
| | Unidades geomorfológicas | A | A | M | P |
| | Subunidades geomorfológicas | A | A | A | P |
| Uso do solo | Mapa de uso do solo | A | A | A | A |
| | Mudanças no uso do solo | M | A | A | A |
| | Características da vegetação | P | M | A | A |
| | Distância de estradas | M | A | A | A |
| | Edifícios | M | A | A | A |

Fonte: Van Westen et al. (2008 apud Brito, 2014).

Segundo Crosta e Fratiini (2003 apud Entralgo, 2013) os fatores relacionados à ocorrência e distribuição dos movimentos de massa podem ser divididos em duas categorias: as variáveis quase-estáticas ou condicionantes e as variáveis dinâmicas ou deflagrantes. As variáveis quase-estáticas, tais como as propriedades dos solos e a geomorfologia definem a distribuição espacial dos movimentos de massa, enquanto que as variáveis dinâmicas, tais como a atividade antrópica e os processos naturais, principalmente a precipitação e os sismos controlam os fatores deflagrantes e definem o padrão temporal dos movimentos de massa.

A seguir é realizada uma breve análise dos principais fatores condicionantes e deflagrantes dos movimentos de massa, visando fornecer uma visão geral dos processos que atuam de forma mais direta nos movimentos de massa.

2.1.2.1 Fatores Geológicos

O substrato rochoso é um dos fatores condicionantes mais importantes na determinação da suscetibilidade a movimentos de massa (CLERICI et al., 2010 apud Brito, 2014). Conforme Guidicini e Nieble (1984) os maciços rochosos apresentam descontinuidades estruturais como falhas, fraturas, juntas, planos de estratificação, xistosidade e diaclases onde são encontrados os mais baixos valores de coesão. Em casos extremos, a coesão pode chegar a zero e a resistência ao cisalhamento dependerá exclusivamente do ângulo de atrito. Nessas condições o movimento de massa pode ocorrer assim que o ângulo de inclinação do plano de apoio superar o ângulo de atrito.

Além disso, a existência de descontinuidades estruturais condiciona o surgimento de caminhos preferenciais para a percolação de água e desempenham um papel importante na intemperização das rochas, através da formação de planos de fraqueza, contribuindo, conseqüentemente, para a redução dos parâmetros de resistência (KAMP et al., 2008; VAHIDNIA et al., 2009; KOULI et al., 2010 apud BRITO, 2014).

Além das descontinuidades é importante observar a litologia, pois cada rocha comporta-se de maneira distinta frente aos fenômenos de instabilidade (IAEG, 1981). Logo, segundo Brito (2014), a identificação do substrato rochoso torna-se imprescindível em avaliações de suscetibilidade a movimentos de massa, uma vez que cada litotipo apresenta diferentes graus de coesão, resistência e permeabilidade, o que influencia o tipo de drenagem, a textura e a resistência da rocha aos processos intempéricos, do mesmo modo que influencia o tipo de solo a ser gerado e, portanto, suas características geotécnicas.

2.1.2.2 Fatores Geomorfológicos

Os fatores geomorfológicos mais utilizados na avaliação da suscetibilidade são: declividade, forma da encosta (tanto em perfil quanto em planta), direção e acúmulo de fluxos (escoamento), orientação das encostas (aspecto), comprimento da encosta, (as) simetria dos vales e elevação (FERNANDES e AMARAL, 1996 apud FERNANDES et al., 2001).

Dentre todos esses parâmetros, a declividade vem sendo utilizada como o principal, ou mesmo o único parâmetro de caráter topográfico incorporado aos estudos de previsão e definição de áreas instáveis gerando, com frequência, distorções na análise dos deslizamentos (Fernandes et al., 2001). Segundo Vanacôr (2006) a tensão cisalhante no solo ou em outro material inconsolidado aumenta com o aumento da declividade da encosta o que associado a outros fatores pode levar a ocorrência de movimentos de massa.

A curvatura da encosta no perfil e no plano também influencia fortemente o desenvolvimento de movimentos de massa, uma vez que condiciona o fluxo de água e de materiais sólidos ao longo da mesma (FERNANDES e AMARAL, 2003). Em encostas convexas e divergentes, a água é dispersada e a poro-pressão (pressão exercida pela água nos poros do solo considerando o fluxo subsuperficial) é menor, enquanto que em encostas côncavas e convergentes, a água tende a se concentrar, tornando-as mais propícias a apresentarem poro-pressões elevadas e, desta forma, menores resistências (SIDLE et al., 1985 apud BRITO, 2014).

A direção de fluxo e o acúmulo de fluxos podem ser igualmente importantes na análise da suscetibilidade, pois representam a área de contribuição do escoamento da água das porções mais altas do terreno para pontos mais baixos dentro de uma área. O acúmulo de fluxo possui grande importância para a estabilização/instabilização das encostas, uma vez que tem uma relação direta com o escoamento de águas superficiais e subsuperficiais consequente saturação dos solos (MONTGOMERY et al., 1998; DIETRICH et al., 1995 apud BRITO, 2014).

2.1.2.3 Fatores Pedológicos

Uma série de propriedades dos solos está associada à ocorrência de movimentos de massa, tais como o seu peso específico, porosidade, índice de vazios, mineralogia, granulometria, permeabilidade, compressibilidade, textura, coesão, ângulo de atrito, espessura, condutividade hidráulica, histórico de tensões, entre outros (AUGUSTO FILHO e VIRGILI, 2004). Dentre os principais fatores destacam-se a condutividade hidráulica e a espessura do solo.

A condutividade hidráulica do solo, em termos específicos de movimento de massa, assume importância tanto na recarga da água superficial (velocidade da infiltração) quanto na geração de descontinuidades hidráulicas no interior do perfil de alteração, as quais poderão atuar

localmente como camadas de impedimento ao fluxo vertical favorecendo, conseqüentemente, a elevação das poro-pressões (FERNANDES et al., 2001) possibilitando a ocorrência de movimento de massa.

Outro fator que favorece a instabilização das encostas é a presença de solos pouco espessos sobre rochas maciças impermeáveis, gerando uma importante descontinuidade mecânica e hidrológica ao longo do contato solo e rocha. Ao longo desse contato, condições críticas de poro-pressão podem ser alcançadas durante eventos pluviométricos de alta intensidade, favorecendo a geração de deslizamentos translacionais (FERNANDES e AMARAL, 2003).

2.1.2.4 Fatores Climáticos

Os fatores climatológicos tais como precipitação e umidade, são talvez os fatores que mais influenciam a ocorrência de movimentos de massa. Muitos eventos de deslizamentos estão associados a episódios de elevada pluviosidade de duração compreendida entre algumas horas até alguns dias (GUIDICINI e NIEBLE, 1984).

Segundo Tatizana et al (1987) e Delmonaco et al (1995) as ações das precipitações nas encostas são as seguintes:

- Alteração dos parâmetros de resistência dos materiais: diminuição da coesão aparente, eliminação das tensões capilares, dissolução da cimentação;
- Aumento da sollicitação externa: aumento do peso específico dos materiais que formam a encosta;
- Avanço da frente de saturação no maciço, provocando a elevação da poro-pressão nos solos, subpressões nas descontinuidades rochosas e forças de percolação;
- Alteração do perfil da encosta por erosão de materiais.

A velocidade de avanço da água infiltrada pelas chuvas é tanto menor quanto mais seco for o solo. À medida que o grau de saturação aumenta, maior é essa velocidade. Com o início das chuvas, a camada superior do solo absorve água, saturando-a e aumentando a velocidade do avanço da água. Com isso inicia-se o avanço da frente de saturação no solo. Este avanço depende do grau de saturação inicial do solo, assim como, de seu índice de vazios e da intensidade e duração da chuva. Quando cessa a chuva, a água infiltrada se redistribui no subsolo aumentando o seu teor de umidade inicial. Se ocorrer uma nova chuva, o avanço da frente de saturação será mais rápido, sendo as conseqüências piores. Quando a frente de saturação atinge uma determinada profundidade, ocorre então uma diminuição da resistência ao

cisalhamento da região acima desta frente devido ao aumento da poro-pressão e diminuição da tensão efetiva, o que pode resultar na ruptura da encosta (Campos, 1984 apud Castro, 2006).

2.1.2.5 Fatores Antrópicos

Entre as principais interferências antrópicas indutoras dos movimentos de massa destacam-se: execução deficiente de aterros e cortes; remoção da cobertura vegetal; lançamento e concentração de águas pluviais e/ou servidas; disposição de resíduos sólidos urbanos nas encostas; escavações na base da encosta; obstrução da drenagem natural ou artificial pelo lançamento de lixo ou entulhos; sobrecarga das áreas edificadas; vibrações artificiais; atividades de mineração e cultivo de espécies impróprias (DIAS e HERRMANN, 2002; USGS, 2004).

Dentre essas ações, a execução deficiente de aterros e cortes talvez seja uma das mais críticas à estabilidade das encostas no Brasil devido às ocupações irregulares das encostas e ao crescimento desordenado das cidades. Segundo Farah (2003 apud BRITO, 2014) a execução de cortes e aterros com geometrias impróprias acentua a declividade da encosta natural e pode ainda, quando realizada sem o devido cuidado técnico, desconfinar porções de solo ou rocha com falhamentos. Além disso, o material dos cortes é lançado, na maioria das vezes, a jusante, sem nenhum tipo de compactação, o que agrava as condições de instabilidade.

2.1.2.6 Cobertura Vegetal

A cobertura vegetal apresenta tanto efeito positivo, quanto negativo na estabilidade de encostas. Conforme Michel (2013) o efeito da vegetação nos movimentos de massa se dá através da coesão das raízes, sobrecarga gerada pelo peso, tensão cisalhante transmitida ao solo pela vegetação devido à incidência do vento, interceptação da chuva, mudanças nas taxas de evapotranspiração e alterações nas taxas de infiltração da água no solo.

Conforme Greenway (1989), a influência positiva da vegetação aos movimentos de massa ocorre por: (1) interceptação e redistribuição da água da chuva pelos galhos e folhas, impedindo o impacto direto das gotas na superfície do terreno e retardando a infiltração de água no solo; (2) acréscimo de resistência do solo, devido ao reforço mecânico proporcionado pelas raízes das árvores, principalmente as pivotantes e profundas; (3) retirada da umidade do solo pelas plantas através da absorção e evapotranspiração, o que reduz a poro-pressão e

incrementa asucção matricial; e (4) proteção do solo da ação direta da chuva, do vento e do sol, reduzindoas variações bruscas de umidade e temperatura.

Os efeitos desfavoráveis podem ser descritos como: efeito alavanca, que é a força cisalhante transferida pelos troncos das árvores ao terreno, quando suas copas são atingidas por fortes ventos; efeito cunha, originado pela pressão lateral causada pelas raízes ao penetrar em fendas, fissuras e canais de solo ou rocha; e a sobrecarga vertical causada pelo peso das árvores, principalmente em encostas com alta declividade (VARNES e IAEG, 1984 apudVANACÔR, 2006).

Por fim, conformeBerenice Rodrigues (2002), os efeitos positivos da vegetação na estabilidade das encostas não são, muitas vezes, suficientemente significativos para compensar os fatores negativos relacionados ao controle dos movimentos de massa, principalmente quando as demais características (comolitologia, declividade, solo, entre outros) são favoráveis à ocorrência desses processos.

2.2 PREVENÇÃO E GERENCIAMENTO DE MOVIMENTOS DE MASSA

Segundo USGS (2008) os três tipos de análises espaciais mais úteis para a prevenção e gerenciamento de movimentos de massa são: (1) mapas de inventários de movimentos de massa, (2) mapas de suscetibilidade a movimentos de massa, e (3) mapas de risco a movimentos de massa. De maneira similar ao que ocorre com o termo movimento de massa e suas classificações, existe uma falta de homogeneização conceitual referente às definições desses termos. Essa lacuna possibilita diferentes interpretações, dificultando, em alguns casos, a compreensão dos estudos. Exposto isso, a seguir é realizada uma breve descrição das definições encontradas na literatura para os três termos em questão.

2.2.1 Mapas de Inventário

Um mapa de inventário de movimentos de massa consiste em uma espacialização dos eventos já ocorridos em uma determinada área. Ele contém a localização espacial desses eventos e pode incluir informações como o tipo do movimento, distância de deslocamento, volume deslocado, estado de atividade e data de ocorrência (SOETERS e VAN WESTEN, 1996; FELL et al., 2008). Este mapa normalmente é construído com informações obtidas em campo, com dados de ocorrência histórica de acidentes e desastres, com fotografias aéreas e com

imagens de satélite (PARISE, 2001; MANTOVANI et al., 1996 apud BRITO, 2014). Cabe ressaltar que inventários realizados a partir de imagens de satélites e fotografias aéreas apresentam a dificuldade de identificação das áreas de ruptura, transporte e disposição do material deslocado.

Segundo Fernandes e Amaral (2003), a documentação e o registro dos processos ocorridos no passado e no presente visam à previsão de deslizamentos no futuro, bem como servem de base para a modelagem física dos processos, facilitando o avanço do conhecimento sobre os mecanismos dos movimentos.

O nível de detalhe desses mapas varia entre inventários de reconhecimento simples, que apenas delinham grandes áreas onde os deslizamentos parecem ter ocorrido, a inventários complexos, que retratam e classificam cada um dos deslizamentos e mostram as escarpas, as zonas de empobrecimento do solo e de acúmulo, os deslizamentos ativos e inativos, a idade geológica, a taxa de movimento, e (ou) outros dados relevantes sobre a profundidade e natureza dos materiais envolvidos no deslizamento (USGS, 2008).

2.2.2 Mapas de Suscetibilidade

Um mapa de suscetibilidade ao deslizamento vai além de um mapa de inventário e descreve as áreas que têm potencial de sofrerem deslizamentos no futuro, sem analisar a frequência (probabilidade anual) de sua ocorrência. Estas áreas podem ser determinadas a partir da correlação de diversos fatores (descritos no item 2.1.2) que contribuem para os deslizamentos (USGS, 2008; FELL et al., 2008).

Os mapas de suscetibilidade ao deslizamento podem ser considerados derivados de mapas de inventário, porque um inventário é essencial para a preparação de um mapa de suscetibilidade. Por exemplo, a sobreposição de um mapa geológico a um mapa de inventário, que mostre deslizamentos existentes, pode identificar unidades geológicas específicas propensas ao deslizamento. Esta informação pode, então, ser extrapolada para prever outras áreas potenciais de deslizamento (USGS, 2008), considerando que os processos dessas áreas estão sendo deflagrados pelos mesmos fatores.

Segundo Brito (2014) a avaliação da suscetibilidade é essencial para o planejamento territorial, pois permite ponderar as vantagens e desvantagens da ocupação de diferentes áreas e identificar o tipo de ocupação mais apropriado às condições de cada uma, e por isso, ela geralmente é determinada em estágios preliminares do planejamento do uso do solo. Além disso, de acordo com Fell et al. (2008), permite reduzir custos pela limitação do mapeamento de risco apenas aos locais indicados como prioritários.

2.2.3 Mapas de Perigo

O perigo corresponde à probabilidade de ocorrência de um fenômeno natural potencialmente danoso dentro de um período de tempo específico e em uma área determinada (Varnes, 1984). Os mapas de perigo consideram os resultados do mapeamento de suscetibilidade de deslizamentos e estabelecem uma frequência determinada (por exemplo, probabilidade anual) para os deslizamentos potenciais (Fell et al., 2008).

A descrição de um perigo de deslizamento deve incluir o local, o volume (ou área), a classificação e a velocidade dos movimentos de massa em potencial ou qualquer material desprendido resultante, além da probabilidade de sua ocorrência dentro de um período de tempo determinado (Fell et al., 2008).

2.2.4 Mapas de Risco

Conforme Cerri (2004 apud MARTINS, 2013), risco corresponde à probabilidade de ocorrer um acidente associado a um determinado perigo ou ameaça, que possa resultar em consequências danosas às pessoas ou a bens, em função da vulnerabilidade do meio exposto ao perigo.

Segundo Fell et al. (2008) o risco é frequentemente estimado pelo produto da probabilidade de ocorrência de um fenômeno de uma dada magnitude, multiplicado por suas consequências. Dessa forma, o mapeamento de áreas de risco a movimento de massa deve considerar a extensão da inclinação sujeita ao fracasso e a provável extensão máxima do movimento do solo podendo prever os danos potenciais a pessoas (probabilidade anual de perdas de vida), a propriedades (valor anual de perda de propriedades) e ao meio ambiente (valor anual de perda) (USGS, 2008; Fell et al., 2008).

Assim sendo, o mapeamento de áreas de risco fornece subsídios para a identificação das áreas críticas para a realização de intervenções, para o monitoramento das áreas sujeitas a movimentos de massa e para o estabelecimento de ações conjuntas entre a comunidade e o poder público (DI GREGORIO et al., 2012 apud BRITO, 2014). A análise de risco também pode contribuir com as ações de caráter logístico no enfrentamento de situações emergenciais, na evacuação da população frente a um desastre eminente, nas operações de resgate e na restauração das áreas afetadas (MARCELINO et al., 2006 apud BRITO, 2014).

2.3 SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA (SIG) E ANÁLISE DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA

O uso dos Sistemas de Informação Geográfica (SIGs) para o planejamento ambiental vem se mostrando cada vez mais uma ferramenta poderosa e eficiente nas diversas áreas do conhecimento. Segundo ARONOFF (1989) e BULL (1994), os SIGs são sistemas automatizados usados para armazenar, analisar e manipular dados geográficos, ou seja, dados que representam objetos e fenômenos em que a localização geográfica é uma característica inerente à informação e indispensável para as análises.

Os Sistemas de Informações Geográficas são compostos basicamente por quatro elementos principais: equipamentos, aplicativos, banco de dados e recursos humanos. Os equipamentos (*hardware*) são os computadores que são utilizados tanto para a vetorização, como para a estruturação do banco de dados. Os aplicativos (*software*) devem conter algumas funcionalidades como a entrada de dados, capacidade de armazenamento, geração de análises espaciais, e saída de arquivos, sendo ideal uma boa interface entre o sistema e o usuário. O banco de dados, além do pessoal especializado.

2.3.1 Dados de Entrada

Os dados para alimentação de um Sistema de Informações Geográficas podem ser obtidos, empregando-se diferentes tecnologias como digitalização de mapas, aerofotogrametria, sensoriamento remoto, levantamento de campo, entre outras (RODRIGUES M., 1990). Essas diversas tecnologias podem gerar três tipos diferentes de dados: dados temáticos, dados cadastrais e imagens.

Os dados temáticos descrevem a distribuição espacial de uma grandeza geográfica, expressa de forma qualitativa, como os mapas de solos e a aptidão agrícola de uma região. Estes dados são inseridos no sistema por digitalização ou, de forma mais automatizada, a partir de classificação de imagens. Os dados cadastrais consistem em informações ou atributos dos seus respectivos elementos gráficos. Os dados cadastrais e os elementos gráficos geralmente estão associados por um identificador comum ou geo-código. Por fim, as imagens, constituídas por imagens de satélites, fotografias aéreas ou qualquer imagem digitalizada por meio de *scanners*, representam formas de captura indireta de informação espacial.

Em um Sistema de Informações Geográficas a representação espacial dos dados pode se dar de duas formas distintas: raster (matricial) e vetor (vetorial). Na representação matricial, o espaço é dividido em células, que podem ser chamadas de pixels enquanto que no formato vetorial o espaço é representado por pontos, linhas e polígonos. As imagens e as fotografias aéreas são exemplos de representações matriciais (LONGLEY et al.,2011) já os dados temáticos são exemplos de representações vetoriais.

Dentre as tecnologias de aquisição de dados para alimentação de um Sistema de Informações Geográficas, o sensoriamento remoto talvez seja a tecnologia mais utilizada, pois permite a obtenção de informações dos objetos que compõem a superfície terrestre sem a necessidade de contato direto com os mesmos (MORAES, 2002). Os sensores remotos ou câmaras geralmente são colocados a bordo de aeronaves ou de satélites. Entre os produtos do sensoriamento remoto estão as imagens e as fotografias aéreas.

É possível utilizar dados de sensoriamento remoto em estudos sobre movimentos de massa, seja para detecção das consequências desses processos, tais como remoção da cobertura vegetal e exposição do solo, que podem ser visualizadas em certas imagens de satélite, seja pelo estudo das características espectrais detectadas pelos sensores remotos, relativos à cobertura vegetal, uso da terra, tipologia das encostas, umidade, entre outros (RIFFEL, 2012).

Outro dado de entrada bastante utilizado em análises desenvolvidas em Sistemas de Informações Geográficas são os Modelos Digitais de Terreno (MDT). Um MDT pode ser definido como uma representação matemática computacional da distribuição de um fenômeno espacial que ocorre dentro de uma região da superfície terrestre. Os Modelos Digitais de Terreno podem ser construídos a partir de dados altimétricos obtidos de levantamentos

diretamente realizados no terreno, digitalização de curvas de nível em cartas topográficas, fotografias aéreas, e sistemas orbitais (RIFFEL, 2012).

A partir dos Modelos Digitais de Terreno podem-se extrair diversas informações tais como volumes, áreas, perfis e seções transversais, mapas de declividade e exposição, mapas de escoamento superficial, mapas de drenagem, limites de bacias hidrográficas, sendo algumas dessas análises essenciais para estudos sobre movimentos de massa.

2.3.2 Sistema de Suporte à Decisão em SIG

A avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa em ambiente SIG pressupõe a consideração de diversos critérios que condicionam a ocorrência dos movimentos de massa. O cruzamento dessas variáveis constitui-se em um problema complexo, uma vez que cada critério influencia de maneira distinta na estabilização/ instabilização das encostas (BRITO, 2014).

Para a combinação ou cruzamento dos diferentes critérios alguns *softwares* de SIG já possuem incorporados Sistemas de Suporte à Decisão. Esses sistemas combinados vêm se mostrando uma ferramenta poderosa e eficiente para a solução de problemas de planejamento e/ou zoneamento ambiental, pois ao mesmo tempo em que possuem a capacidade de combinar dados espaciais, possuem a capacidade de descrever e analisar suas iterações permitindo uma redução na ambiguidade das interpretações que normalmente são obtidas através da análise individual dos critérios envolvidos.

De forma resumida, os Sistemas de Apoio à Decisão funcionam da seguinte forma: definição do objetivo a ser alcançado, estruturação do modelo, definição dos critérios necessários para a solução do problema, normalização ou padronização dos critérios, distribuição de pesos e por fim, combinação dos múltiplos critérios.

Segundo Eastman (1998), apesar dos Sistemas de Suporte à Decisão serem funções importantes de um SIG, as ferramentas desenhadas especialmente para este fim existem em número relativamente pequeno na maior parte dos *softwares* de SIG. Nesse sentido, o *software* IDRISI Taiga possui um dos mais amplos conjuntos de ferramentas para auxiliar nos processos de tomada de decisão que envolvam a avaliação de múltiplos critérios e/ou múltiplos objetivos (LONGLY et al., 2013).

Um dos módulos de auxílio à tomada de decisão presentes no *software* IDRISI Taiga é o *DecisionWizard*. Essa ferramenta funciona como um assistente no processo de decisão, orientando a resolução de problemas multi-criteriais e/ou multi-objetivos.

Em SIG, a avaliação de problemas multi-criteriais é um processo que envolve múltiplos planos de informação que são agregados para produzir um único mapa de saída. Os planos de informações são os critérios (representados por uma camada de imagem raster) que podem ser medidos e avaliados para se chegar ao objetivo (mapa de saída). Os critérios podem ser divididos em fatores e restrições.

Fatores são critérios que definem algum grau de adequação das regiões geográficas aos objetivos do estudo. No caso específico de suscetibilidade a movimento de massa, eles definem áreas potenciais para a ocorrência de tais processos. Os valores dos fatores individuais podem tanto realçar (com valores altos) ou depreciar (com valores baixos) o potencial de suscetibilidade de uma determinada área (o grau com que isso acontece depende do método de agregação usado).

Por outro lado, restrições são aqueles critérios que restringem (limitam) regiões geográficas particulares ao objetivo do estudo. Independentemente do método eventualmente utilizado para agregar os critérios, restrições são sempre imagens Booleanas, ou seja, são padronizados em valores Booleanos (0 e 1) em que o valor 1 é atribuído para as áreas que podem ser consideradas aptas, ou no caso específico, suscetíveis ao movimento de massa, e o valor 0 é atribuído para as áreas que não podem ser consideradas aptas sob nenhuma condição, ou no caso específico, áreas em que não devem ocorrer movimentos de massa sob nenhuma condição.

Antes de serem combinados, os fatores também devem ser padronizados para uma escala comum que permita compará-los e combiná-los entre si. Segundo Eastman (2009), fatores podem ser padronizados de diversas formas dependendo dos critérios individuais e da forma de agregação eventualmente usada. O *DecisionWizard* oferece a alternativa de utilizar o módulo *fuzzy* para a padronização dos fatores. O módulo *fuzzy* padroniza as imagens em uma escala contínua de 0-255, em que 0 representa uma região não apta, ou no caso específico, sem potencial para ocorrência de movimentos de massa e 255 representa uma região perfeitamente apta. Caso seja necessária a realização de outros tipos de padronização, as mesmas devem ser realizadas fora do assistente.

Depois de realizada a padronização dos fatores, o *DecisionWizard* oferece a opção de ponderá-los de forma a se definir a importância relativa de cada fator com o objetivo do estudo. O assistente oferece três opções de ponderação: 1) não distribuir pesos aos fatores, 2) distribuir pesos definidos pelo usuário ou 3) utilizar o Processo Analítico Hierárquico – AHP para a definição dos pesos. Dentre as opções mencionadas, a mais utilizada em análises de suscetibilidade a movimentos de massa é o Processo Analítico Hierárquico (AHP). Neste procedimento, os diferentes critérios que influenciam o processo são comparados par a par, e um valor de importância relativa é atribuído ao relacionamento entre estes critérios, segundo uma escala pré-definida (SAATY, 2008).

Por fim, a combinação dos fatores e restrições é realizada resultando em um mapa de saída e na concretização do objetivo definido inicialmente. O *software* Idrisi, possui três métodos específicos para a combinação dos múltiplos critérios: booleana; média ponderada ordenada (OWA - *OrderedWeightedAverage*); e combinação linear ponderada (WLC - *Weighted Linear Combination*) (EASTMAN, 2009).

A abordagem booleana é a mais simples. Nesse método os critérios são convertidos para a forma binária, onde o valor 1 representa áreas nas quais a informação se adequa às condições impostas pelo estudo (fatores), enquanto que o valor 0 representa áreas inadequadas (restrições). Após esta padronização, os critérios são combinados, gerando um mapa com as regiões que atendem ou não às condições estabelecidas (CÂMARA e MEDEIROS, 1996).

Na combinação linear ponderada, os critérios são padronizados para uma escala numérica comum, ponderados de acordo com a sua contribuição ao processo estudado e combinados por meio de uma média ponderada (EASTMAN, 2009). O resultado é uma imagem de aptidão com valores contínuos que representam a adequação da superfície de estudo para o objetivo proposto. Este método é o mais utilizado, entre os métodos de avaliação por múltiplos critérios, para mapeamento de suscetibilidade (BRITO, 2014).

O método da média ponderada ordenada diferencia-se da combinação linear ponderada porque, além de utilizar os pesos de importância dos critérios (chamados de pesos de compensação), considera outros conjuntos de pesos, denominados pesos de ordenação (EASTMAN, 2009). Os pesos de ordenação controlam a maneira pela qual os pesos de compensação são agregados, possibilitando um maior grau de controle sobre o nível global

decompensação entre os fatores, assim como do nível de risco na determinação da aptidão (EASTMAN, 1998; JIANG e EASTMAN, 2000).

De forma geral, os Sistemas de Informações Geográficas tem o poder de integrar diferentes níveis de informações espaciais de um banco de dados. Segundo Eastman et al. (1993) os Sistemas de Suporte à Decisão em SIG, possibilitam uma maior flexibilidade na integração dessas informações, liberando a análise dentro de margens de riscos estabelecidas para uma determinada decisão e permitindo que um critério favorável compense outro desfavorável para obter um resultado mais coerente.

Neste contexto, inúmeros trabalhos na literatura nacional e internacional dedicaram-se a investigar a suscetibilidade a movimentos de massa utilizando Sistemas de Suporte à Decisão e Sistema de Informações Geográficas.

Carvalho e Riedel (2005) geraram uma carta de suscetibilidade aos escorregamentos translacionais nos entornos dos polidutos de Cubatão, São Paulo, utilizando o *software* SPRING 4.0 e o Processo Analítico Hierárquico (AHP - *Analytical Hierarchy Process*) como ferramenta de suporte à decisão. Como fatores aos escorregamentos translacionais, foram selecionados: geologia, declividade, geomorfologia e vegetação. Os autores concluíram que a área de estudo pode ser considerada como altamente suscetível a escorregamentos translacionais e que os polidutos avaliados se encontram quase que inteiramente em área de alta suscetibilidade.

Martini et al. (2006) avaliaram a suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa, na área de influência direta do reservatório da usina hidrelétrica Quebra-Queixo, localizada no rio Chapecó, Santa Catarina. Para a elaboração do trabalho foi utilizado o *software* Idrisi. Como critérios foram selecionados: relevo, solo e cobertura vegetal, os quais foram subdivididos em onze fatores predominantes (geomorfologia, declividade, comprimento dos pendentes, orientação das vertentes, drenagem interna do solo, profundidade do solo, textura o solo, pedregosidade, retenção superficial de água, tipo de cobertura vegetal e densidade da cobertura vegetal). Para a agregação dos fatores utilizou-se o método da combinação linear ponderada, com pesos e escores atribuídos por consenso técnico. O principal resultado obtido na aplicação dos procedimentos foi um mapa temático com a distribuição espacial das classes de suscetibilidade a processos erosivos e movimentos de massa no entorno do reservatório.

Vanacôr (2006) apresentou um método para mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos na região nordeste do Rio Grande do Sul, Brasil. Como fatores foram testados parâmetros topográficos, geológicos, geotécnicos e antrópicos gerados a partir de imagens ASTER, fotografias aéreas e mapas temáticos. O peso dos fatores foram atribuídos a partir do Processo Analítico Hierárquico (AHP). Por fim, a combinação dos fatores foi realizada pelo método de combinação linear ponderada, obtendo como produto o mapa de suscetibilidade da área. Segundo o autor, a metodologia utilizada se mostrou rápida, de fácil aplicação e relativamente de baixo custo, podendo ser usada por instituições públicas para a previsão de deslizamentos e para auxiliar no gerenciamento do uso do solo.

Brito (2014) desenvolveu uma proposta metodológica para mapear a suscetibilidade a escorregamentos no município de Porto Alegre/RS. As variáveis utilizadas foram: declividade, geologia, distância delineamentos, acúmulo de fluxo, uso do solo e cobertura vegetal, as quais foram processadas no *software* Idrisi. A importância de cada variável na predisposição do terreno a escorregamentos foi definida com base na consulta a especialistas e com o apoio do Processo Analítico Hierárquico (AHP). A integração das variáveis foi realizada por meio de combinação linear ponderada. Os resultados indicam que as áreas mais suscetíveis a escorregamentos situam-se, principalmente, nos morros da Crista de Porto Alegre e nos morros isolados no sul do município.

A RMPA é a área mais densamente povoada do Rio Grande do Sul concentrando em torno de 4 milhões de habitantes em uma área de 10.085 km² (IBGE, 2010) resultando em uma densidade demográfica média de 394,6hab/km². A Tabela 3.1 apresenta a área e a população dos municípios da RMPA.

Tabela 3.1: Área e população dos municípios da RMPA.

| Município | Área (km ²) | População (habitantes) |
|---|-------------------------|------------------------|
| Alvorada | 70,24 | 195.718 |
| Araricá | 35,32 | 4.868 |
| Arroio dos Ratos | 426,73 | 13.608 |
| Cachoeirinha | 43,80 | 118.294 |
| Campo Bom | 61,21 | 60.081 |
| Canoas | 131,51 | 324.025 |
| Capela de Santana | 182,95 | 11.613 |
| Charqueadas | 216,52 | 35.363 |
| Dois Irmãos | 66,07 | 27.572 |
| Eldorado do Sul | 509,98 | 34.335 |
| Estância Velha | 52,71 | 42.589 |
| Esteio | 27,25 | 80.669 |
| Glorinha | 323,94 | 6.885 |
| Gravataí | 464,28 | 255.762 |
| Guaíba | 376,58 | 95.204 |
| Ivoti | 61,68 | 19.877 |
| Montenegro | 420,78 | 59.436 |
| Nova Hartz | 62,41 | 18.346 |
| Nova Santa Rita | 217,64 | 22.706 |
| Novo Hamburgo | 222,01 | 239.051 |
| Parobé | 109,57 | 51.481 |
| Portão | 160,02 | 30.881 |
| Porto Alegre | 494,03 | 1.409.939 |
| Rolante | 296,69 | 19.493 |
| Santo Antônio da Patrulha | 1.048,71 | 39.679 |
| São Jerônimo | 936,65 | 22.141 |
| São Leopoldo | 104,20 | 214.210 |
| Sapiranga | 137,66 | 75.020 |
| Sapucaia do Sul | 57,45 | 130.988 |
| Taquara | 455,34 | 54.656 |
| Triunfo | 822,61 | 25.811 |
| Viamão | 1.488,10 | 239.234 |
| Região Metropolitana de Porto Alegre | 10.084,64 | 3.979.535 |
| Rio Grande do Sul | 281.730,22 | 10.693.929 |

Fonte: IBGE (2010).

A RMPA foi escolhida para o desenvolvimento desse trabalho pelo fato de possuir alta densidade demográfica e concentrar as principais atividades sociais e econômicas do Estado do Rio Grande do Sul. Conforme dados da Fundação de Economia e Estatística – FEE, em 2010, a RMPA representava 44,39% do PIB do Rio Grande do Sul (MARTINS, C., 2014). Dessa forma, essa região constitui-se numa área estratégica para o desenvolvimento do Estado sendo, portanto, importante investir em mapeamentos de áreas de risco de forma a auxiliar as políticas públicas de planejamento urbano dos municípios visando à prevenção de perdas humanas e econômicas.

3.2 GEOMORFOLOGIA

A caracterização Geomorfológica da RMPA descrita a seguir foi inteiramente baseada no Mapa Geológico Integrado da RMPA desenvolvido pela CPRM (2006) em escala 1:250.000, e que serviu como subsídio para a elaboração do Plano Diretor de Mineração da RMPA.

Dentre os domínios morfoestruturais reconhecidos na compartimentação do relevo da RMPA, quatro regiões geomorfológicas são distinguidas: Planície Costeira; Planalto Norte rio-grandense; Depressão Central e Planalto Sul rio-grandense.

A região geomorfológica Planície Costeira reúne diversos tipos de modelados de acumulação relacionados principalmente ao grande número de rios e canais fluviais, bem como terraços fluviais, terraços lagunares e pediplanos distribuídos na região. Essas áreas ocupam uma porção expressiva a leste e oeste da RMPA.

A região geomorfológica Planalto Norte rio-grandense é representada pelas unidades geomorfológicas Serra Geral e Patamares da Serra Geral que ocupam a porção norte da RMPA. Essa área serrana entra em contato com a região geomorfológica Depressão Central Gaúcha através de relevos abruptos que variam desde escarpas e ressaltos topográficos até bordas de patamares estruturais.

Na região geomorfológica Depressão Central, destaca-se a unidade geomorfológica Depressão Rio Jacuí, que apresenta relevo sem grandes variações altimétricas, predominando formas alongadas conhecidas como coxilhas.

A região geomorfológica Planalto Sul rio-grandense ocorre ao sul da Depressão Central, em áreas distribuídas ao longo do lago Guaíba. O relevo é bastante dissecado configurando colinas geralmente tabulares e encostas íngremes.

A Figura 3.2 apresenta o mapa hipsométrico do relevo da RMPA.

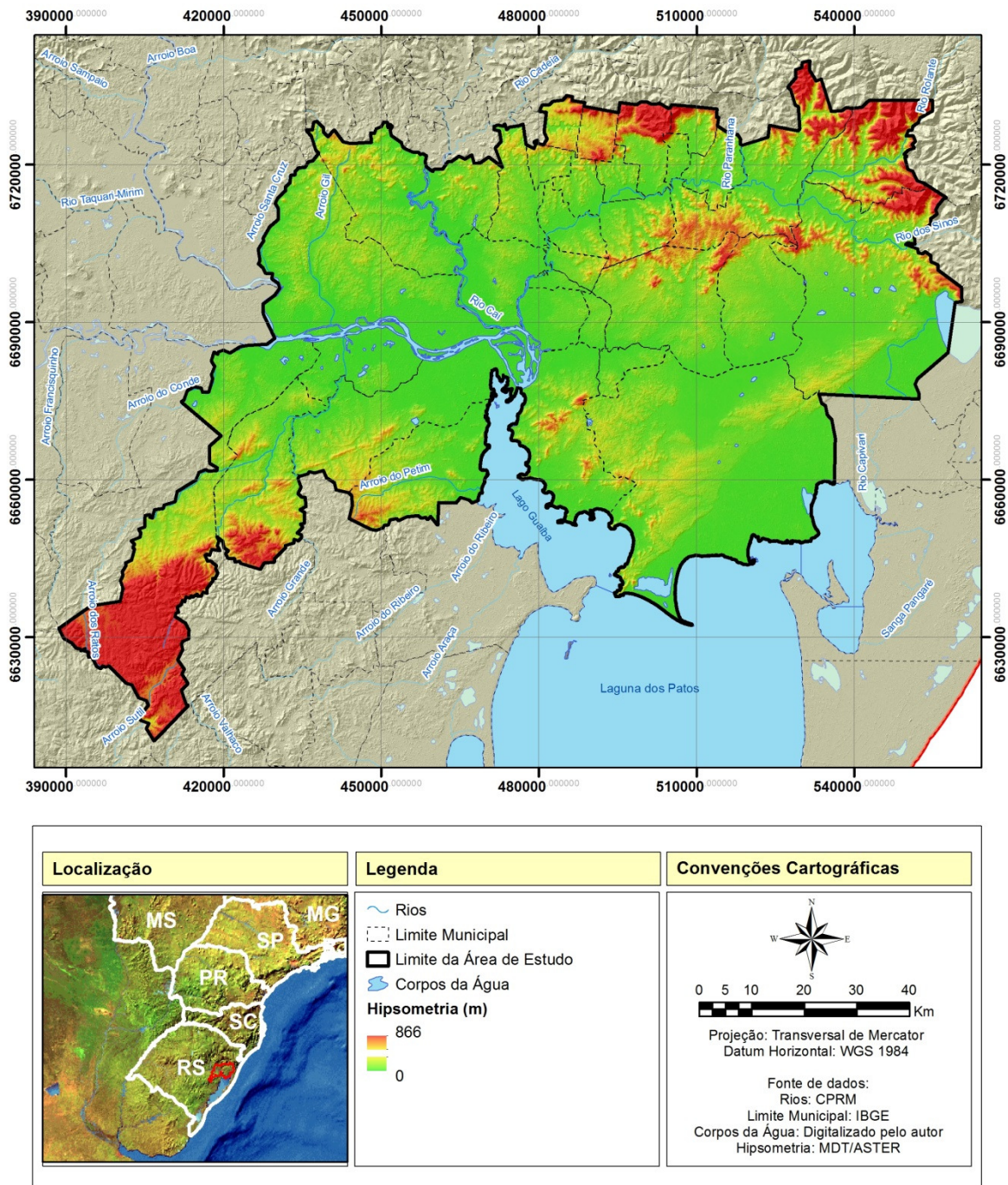


Figura 3.2: Mapa hipsométrico do relevo da Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor).

3.3 PEDOLOGIA

A caracterização pedológica da RMPA descrita a seguir foi baseada no Mapa de solos do Rio Grande do Sul realizado no estudo de Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973) em escala 1:750.000 com nomenclatura atualizada para o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos desenvolvido pela EMBRAPA (2006).

Os solos são assim distribuídos nas regiões geomorfológicas da RMPA:

- Planalto Norte rio-grandense: Predominam os Cambissolos, Argissolos e Nitossolos;
- Depressão Central: Predominam Argissolos, Planossolos, Neossolos e Gleissolos;
- Planalto Sul rio-grandense: Predominam Argissolos e Neossolos;
- Planície Costeira: Predominam os Planossolos.

Conforme o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), os Argissolos são caracterizados por conter elevado conteúdo de argila. Apresentam evolução avançada com atuação incompleta e mobilização de argila da parte mais superficial do solo, com concentração ou acumulação em horizonte subsuperficial. São solos geralmente profundos e bem drenados. Na RMPA ocorrem em relevos suaves e ondulados na Depressão Central e nas Encostas dos Planaltos.

Os Cambissolos são solos rasos em processo de transformação, com pedogênese pouco avançada evidenciada pelo desenvolvimento da estrutura do solo, alteração do material de origem expressa pela quase ausência da estrutura da rocha ou da estratificação dos sedimentos. Na RMPA, ocorrem no Planalto Norte rio-grandense em áreas de maior altitude com baixas temperaturas.

Os Nitossolos são solos profundos com aparência similar aos latossolos, diferindo destes por apresentar um horizonte B com uma estrutura mais desenvolvida com revestimento brilhante (cerosidade). Em função da profundidade, apresentam boa drenagem e porosidade.

Os Planossolos apresentam desargilização vigorosa da parte mais superficial e acumulação ou concentração intensa de argila no horizonte subsuperficial. Estão normalmente associada à mudança textural abrupta; ou com transição abrupta conjugada com acentuada diferença de textura entre os horizontes. Apresentam restrição de permeabilidade em subsuperfície, que interfere na infiltração e no regime hídrico. Na RMPA, estão presentes ao longo dos rios Caí,

Jacuí, Sinos e Gravataí, e nas margens direita e esquerda do lago Guaíba. Também aparecem juntos às lagoas da Planície Costeira.

Os Neossolos são solos pouco desenvolvidos e normalmente rasos, ou seja, em via de formação, seja pela reduzida atuação dos processos pedogenéticos ou por características inerentes ao material originário. Apresenta limitada diferenciação de horizontes e predomínio de características herdadas do material originário. Podem estar presentes tanto em relevos suaves, ondulados até relevos fortemente ondulados. No caso da RMPA, estão presentes nos municípios de Rolante, Taquara e São Jerônimo.

Por fim, os Gleissolos são solos pouco profundos, mal drenados de cor acinzentada ou preta e ocorrem em depressões com baixa declividade. Na RMPA, estão presentes na área do Banhado Grande.

3.4 HIDROGRAFIA

Estendendo-se ao norte da Laguna dos Patos, a RMPA em sua extensão é cortada por seis bacias hidrográficas: a bacia do lago Guaíba, cujas margens beiram Porto Alegre e, as bacias dos rios: Gravataí, rio dos Sinos, rio Caí, rio Jacuí (em sua parte baixa) e em pequena parte da bacia dos rios Taquari e Antas, nos municípios de Montenegro e Triunfo (FEE, 2013).

Os rios Gravataí, Sinos, Caí e Jacuí possuem a foz localizada na região denominada de Delta do Jacuí na bacia hidrográfica do lago Guaíba, na divisa entre os municípios de Porto Alegre e Eldorado do Sul. Em função disso, essa região possui características hidrológicas e geomorfológicas próprias, configurada por extensa área úmida de banhados e restingas que são periodicamente inundadas por reflexo lateral dos rios ou do próprio lago Guaíba e/ou pela precipitação direta (RIO GRANDE DO SUL, 2014a). O lago Guaíba possui área de 480 km² e se estende por 50 km até desaguar na Lagoa dos Patos (RIO GRANDE DO SUL, 2004).

Além das áreas úmidas do Delta do Jacuí, devem-se destacar também as áreas úmidas do Banhado Grande constituído por um conjunto de banhados formadores do rio Gravataí, conhecidos pelos nomes de Banhado do Chico Lomã, Banhado dos Pachecos e Banhado Grande (RIO GRANDE DO SUL, 2014a). A área abrange os municípios de Glorinha, Gravataí, Viamão e Santo Antônio da Patrulha.

3.5 CLIMA

Devido as diferenças geomorfológicas da RMPA, o clima nessa região apresenta grande variação espacial. Pode-se dizer que do centro ao sul da RMPA o clima é subtropical úmido (Cfa) e ao norte, já no Planalto Norte rio-grandense, o clima é temperado (Cfb), conforme classificação de Koppen-Geiger (BRASIL, 1973).

Nas regiões de clima subtropical registram-se temperaturas superiores a 22°C no verão e uma variação de -3 a 18°C no inverno. Já em regiões de clima temperado as temperaturas dos meses mais quentes são inferiores a 22°C (LIVI, 1998).

Na RMPA, o volume de chuvas também é diferenciado do norte ao sul devido às diferentes regiões geomorfológicas. Ao sul, a precipitação média situa-se entre 1.300 e 1.500mm e, ao norte a média está entre 1.500 e 1.800mm, com intensidade maior de chuvas à nordeste, especialmente na encosta do planalto, local com maior precipitação da região (BRASIL, 1973; RIO GRANDE DO SUL, 2014b).

No Rio Grande do Sul e, por conseguinte na RMPA, as chuvas são muito variáveis. Esta variação é verificada não somente entre anos, mas também na distribuição durante o ano (BRASIL, 1973). De acordo com as normais climatológicas de precipitação e umidade para o período de 1961 a 1990, apresentadas respectivamente nas Figura 3.3 e Figura 3.4, a partir dos dados do 8º Distrito de Meteorologia de Porto Alegre, pode-se perceber que a precipitação é bem distribuída durante o ano, sendo o período com maior acumulado de chuvas de junho a setembro, sendo junho e julho o período em que também são registrados os maiores índices de umidade (INMET, 2014).

Por fim, cabe ressaltar que as chuvas torrenciais são frequentes no Estado e na RMPA. Em 24 horas pode ocorrer precipitação maior que 100mm em qualquer área do Estado, sendo que, em Porto Alegre, por exemplo, já foi registrada chuva de 49,2 mm em apenas 15 minutos (BRASIL, 1973).

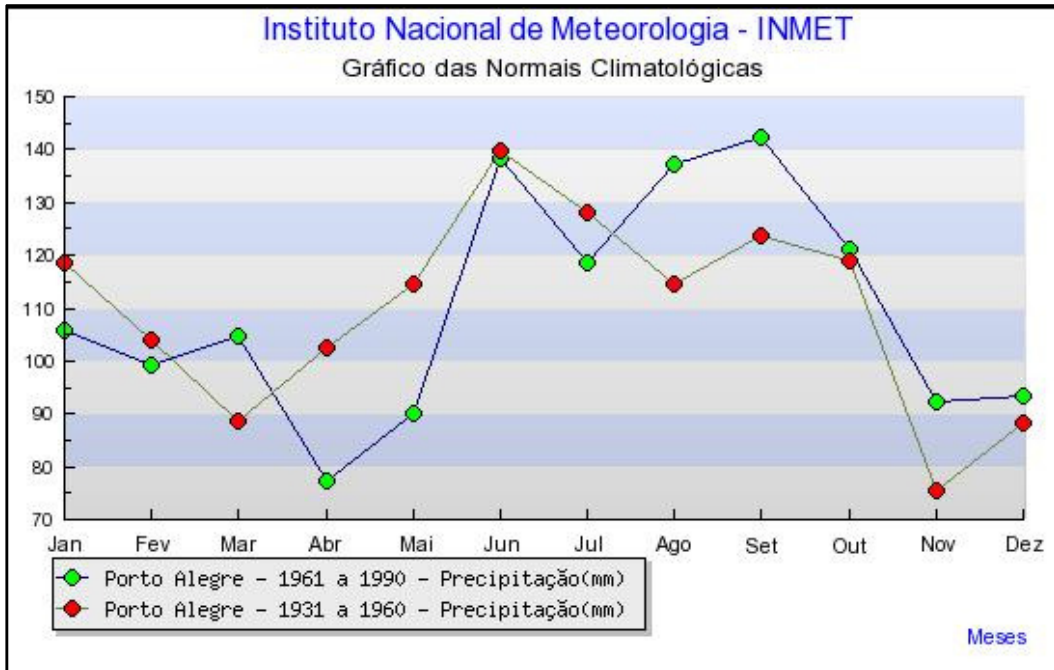


Figura 3.3: Normais Climatológicas da precipitação para o município de Porto Alegre (Fonte: INMET, 2014).

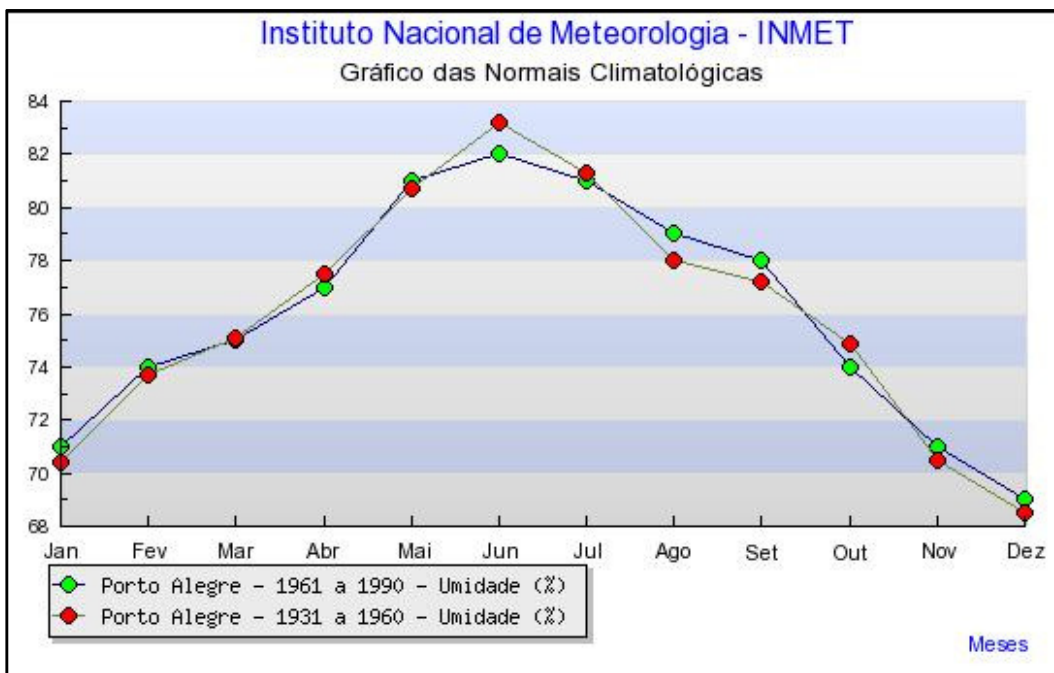


Figura 3.4: Normais Climatológicas da umidade para o município de Porto Alegre (Fonte: INMET, 2014).

4 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a descrição dos procedimentos realizados para a elaboração do modelo de suscetibilidade a deslizamentos na RMPA utilizando um Sistema de Suporte à Decisão em SIG. Neste capítulo são apresentadas as atividades executadas no que tange a aquisição e tratamento dos dados de entrada, a derivação de novos dados, ao desenvolvimento do modelo e a interpretação das informações obtidas.

Para o alcance dos objetivos deste trabalho optou-se por utilizar o *software* Idrisi Taiga e o módulo de auxílio à tomada de decisão *Decision Wizard* pelo fato de mesmo construir um modelo completo de apoio à decisão auxiliando o usuário desde a definição do objetivo do problema, passando pela determinação dos fatores e restrições, padronização dos fatores, ponderação, até a agregação final dos mesmos. Para a edição final dos mapas foi utilizado o *software* ESRI ArcMap 10.1. A Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) possui licença institucional destes *softwares*, com permissão de acesso e uso ilimitado por pesquisadores e estudantes. As seções subsequentes detalham como foi construída a regra de decisão em SIG, a fim de gerar o modelo de suscetibilidade, foco do presente trabalho.

4.1 DEFINIÇÃO DOS FATORES E RESTRIÇÕES

Antes de selecionar os fatores e as restrições que darão entrada ao modelo de suscetibilidade foram definidos os tipos de movimentos de massa que serão considerados na análise. Essa definição é de fundamental importância, pois nem todos os tipos de movimentos de massa estão associados às mesmas causas de ocorrência. Nesse sentido, neste trabalho foram considerados somente os movimentos de massa do tipo deslizamento de solos e detritos.

4.1.1 Fatores

A seleção dos fatores relacionados à ocorrência de deslizamentos é a etapa mais crítica ao longo do desenvolvimento do modelo, pois a utilização de poucas variáveis pode levar à desconsideração de aspectos importantes e, até mesmo fundamentais, mas por outro lado, um número grande de fatores pode desviar a atenção de aspectos relevantes e aumentar desnecessariamente o tempo de processamento, bem como o esforço na análise e interpretação dos resultados.

Sabe-se que geralmente os deslizamentos estão associados aos períodos chuvosos. Quando a precipitação cai sobre a encosta, uma parte da mesma é interceptada pela vegetação, outra se infiltra no solo ou é armazenada nas depressões do terreno para logo infiltrar-se no solo. O processo de infiltração continua mesmo após a chuva cessar. Em algum momento podem-se criar situações críticas para o talude, já que a umidade do solo e o nível do lençol freático estão aumentando, gerando poro-pressões, diminuindo as tensões efetivas e, por conseguinte, diminuindo a resistência ao cisalhamento (Gonzales et al., 1999).

Nesse sentido, foram selecionados fatores que apresentam relação direta ou indireta com o escoamento e a infiltração da água da chuva, sempre tomando o devido cuidado para não selecionar fatores redundantes. Além disso, procurou-se selecionar fatores cujas informações estão disponíveis não somente para a área de estudo, mas para a totalidade do território do Rio Grande do Sul, facilitando a aplicação do modelo em outras áreas se necessário.

Os fatores selecionados foram os seguintes: declividade, direção de fluxo (escoamento), profundidade do solo, drenagem do solo, umidade e vegetação. Foram utilizados os seguintes dados de entrada para derivação dos fatores selecionados:

- Imagens do satélite LANDSAT/TM 5, de 02/07/2009 obtidas a partir da base de dados do Serviços Geológicos dos Estados Unidos(USGS) no sítio eletrônico <http://www.usgs.gov/>. O sensor TM possui 7 bandas, cada uma representando uma faixa do espectro eletromagnético. As bandas 1,2,3,4,5 e 7 possuem 30 m de resolução espacial, ou seja, cada pixel da imagem representa uma área de 900 m² de terreno, enquanto que a banda 6, possui resolução de 120 m. O satélite LANDSAT/TM 5 possui período de revisita (observação) da mesma área de 16 dias;
- Modelo Digital de Terreno (MDT) ASTER Versão 2, com resolução espacial de 30 metros, criadoem uma colaboração entre a NASA e o governo Japonês a partir de imagens de pares estereoscópicos obtidas pelo sensor ASTER (*AdvancedSpacebornThermalEmissionandReflectionRadiometer*) a bordo do satélite Terra. O MDT ASTER é disponibilizado gratuitamente no seguinte sítio eletrônico do governo japonês <http://gdem.ersdac.jspacesystems.or.jp/index.jsp/>;

- Mapa temático de solos do Rio Grande do Sul na escala 1:750.000 elaborado no estudo de levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul (BRASIL, 1973) disponibilizado pela CPRM (Serviços Geológicos do Brasil) no sítio eletrônico <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>.

Antes de qualquer análise e/ou manipulação, os dados de entrada foram convertidos para o sistema de projeção Transversal de Mercator e Datum Horizontal WGS 1984.

4.1.1.1 Declividade

O fator declividade foi selecionado pelo fato de estar intimamente relacionada com as tensões de cisalhamento do solo. A declividade fornece a medida de inclinação (em graus ou percentual) do relevo em relação ao plano horizontal e está diretamente relacionada à velocidade de deslocamento de material e à capacidade de transporte de massas sólidas e líquidas no terreno (MUÑOZ, 2005). Segundo Guidicini e Nieble (1984), quanto maior o ângulo de inclinação da encosta, maior é a tensão cisalhante já que a relação de dependência entre a tensão cisalhante e o ângulo de atrito é linear. Elevadas tensões cisalhantes associadas a outros fatores podem levar a desestabilização da encosta e a ocorrência de deslizamentos.

O fator declividade foi derivado do Modelo Digital de Elevação (MDT) ASTER utilizando a ferramenta SLOPE do *software* Idrisi Taiga. A declividade representa a primeira derivada da altitude e corresponde à inclinação da superfície do terreno em relação ao plano horizontal. Ela é determinada a partir de janelas móveis de 3 x 3 pixels (3 linhas x 3 colunas), na qual a altitude do pixel central é comparada com as altitudes dos pixels adjacentes nos lados esquerdo, direito, superior e inferior. O vetor resultante da declividade ao longo dos eixos X e Y ilustra o gradiente de inclinação ao longo de certa distância, que, neste caso, é do tamanho de um pixel (EASTMAN, 2009). O resultado pode ser expresso em porcentagem ou em graus.

A declividade da RMPA ainda foi analisada utilizando-se outros operadores de contexto também conhecidos como operadores de vizinhança. Os operadores de contexto são utilizados para gerar um novo mapa (ou camada de informação) com base nas informações de mapas existentes e no contexto no qual a feição é encontrada (LACRUZ e FILHO, 2009). Utilizando operadores de contexto foi possível agrupar todas as áreas ou pixels vizinhos de mesma declividade. Esse procedimento foi realizado tomando como premissa que áreas maiores (grupos de pixels vizinhos) de mesma declividade indicam áreas mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos do que áreas menores (pixels isolados) de mesma declividade.

Dessa forma, a partir do mapa de declividade criaram-se dois fatores de entrada (ou camadas de informação) ao modelo: o primeiro é a própria declividade e o segundo são áreas isoladas de mesma declividade. A todos os pixels pertencentes a um grupo isolado de mesma declividade foi atribuído o valor de área deste grupo.

4.1.1.2 Direção de Fluxo

O fator direção de fluxo ou direção do escoamento foi selecionado de modo a representar indiretamente o comportamento do escoamento das águas superficiais e subsuperficiais quando da ocorrência de uma precipitação, sendo possível determinar a partir do mapa de direção de fluxo e de operadores de contexto, os locais em que pode haver grande acúmulo de água, condição que pode ocasionar o deslizamento.

O mapa de direção de fluxo foi derivado do Modelo Digital de Elevação ASTER utilizando a ferramenta FLOW do *software* Idrisi Taiga. Essa ferramenta indica a direção do escoamento de cada pixel. O sentido atribuído a cada pixel é estabelecido por análise de todos os oito pixels vizinhos e o sentido do escoamento deve seguir a direção da inclinação mais acentuada. Dessa forma, há oito direções válidas que o fluxo pode seguir conforme se verifica na Figura 4.1. Esta abordagem é comumente referida como um modelo de fluxo de oito direções (D8) apresentada por Jenson e Domingues (1988).

Utilizando operadores de contexto foi possível agrupar todas as áreas ou pixels vizinhos que possuem mesma direção de escoamento. Esse procedimento foi realizado tomando como premissa que pixels vizinhos de mesma direção de escoamento permitem que a água escoe na mesma direção. Essa condição associada a solos poucos profundos e de difícil drenagem pode ocasionar deslizamentos.

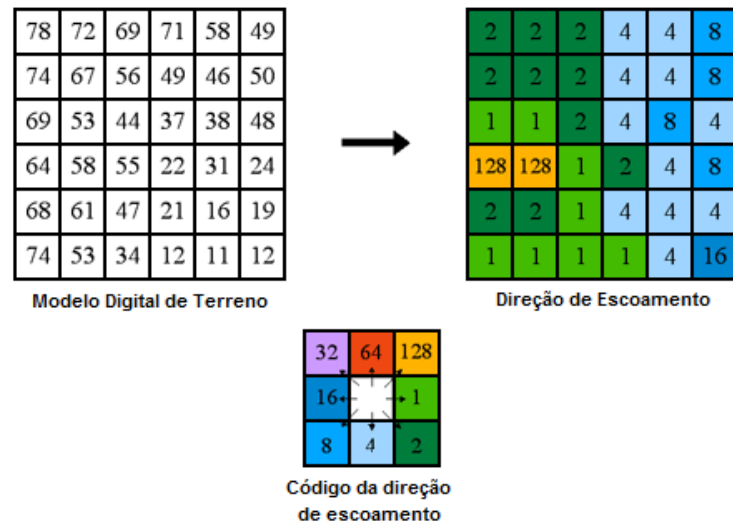


Figura 4.1: Estimativa da direção de fluxo a partir do MDT (Fonte: adaptado de ESRI ArcMap, 2012).

Dessa forma, a partir do mapa de direção de fluxo criou-se um único fator de entrada (ou camada de informação) ao modelo, ou seja, áreas isoladas de mesma direção de fluxo.

4.1.1.3 Profundidade do Solo

O fator profundidade do solo foi selecionado pelo fato de estar intimamente ligado com a saturação do solo. Solos rasos tendem a saturar mais rapidamente que solos mais profundos devido à pequena espessura de suas camadas. A saturação pode gerar camadas de descontinuidades mecânica e hidrológica entre o solo e a rocha onde condições críticas de poro-pressão podem ser alcançadas durante eventos pluviométricos de alta intensidade, favorecendo a ocorrência de deslizamentos (FERNANDES e AMARAL, 2003).

Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 2006), as classes de profundidade são qualificadas pelos termos raso, pouco profundo, profundo e muito profundo. Estes termos são empregados para designar condições de solos nas quais um contato lítico ou lítico fragmentário ocorra conforme limites especificados a seguir:

- Raso: ≤ 50 cm de profundidade
- Pouco profundo: $> 50\text{cm} \leq 100\text{cm}$ de profundidade
- Profundo: $> 100\text{cm} \leq 200\text{cm}$ de profundidade
- Muito profundo: $> 200\text{cm}$ de profundidade

4.1.1.4 Drenagem do Solo

O fator drenagem do solo também foi selecionado pelo fato de estar relacionado com a saturação do solo. Solos que conseguem drenar a água com maior facilidade tendem a não acumular grandes volumes de água e consequentemente, não saturar.

Segundo critérios derivados do *Soil Survey Manual* (ESTADOS UNIDOS, 1951; 1993) e implementados no Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (EMBRAPA, 2006), as classes de drenagem distinguidas são qualificadas conforme as especificações a seguir:

- Excessivamente drenado - a água é removida do solo muito rapidamente; o material de solo tem elevada porosidade e permeabilidade, sendo comum aos solos com esta classe de drenagem a textura arenosa.
- Fortemente drenado - a água é removida rapidamente do perfil; os solos com esta classe de drenagem são muito porosos, de textura média a arenosa e muito permeáveis.
- Acentuadamente drenado - a água é removida rapidamente do perfil; os solos com esta classe de drenagem são normalmente de textura argilosa e média, porém sempre muito porosos e bem permeáveis.
- Bem drenado - a água é removida do solo com facilidade, porém não rapidamente; os solos com esta classe de drenagem comumente apresentam textura argilosa ou média.
- Moderadamente drenado - a água é removida do solo um tanto lentamente, de modo que o perfil permanece molhado por uma pequena, porém significativa, parte do tempo. Os solos com esta classe de drenagem comumente apresentam uma camada de permeabilidade lenta no solum ou imediatamente abaixo dele. O lençol freático acha-se imediatamente abaixo do solum ou afetando a parte inferior do horizonte B, por adição de água, através de translocação lateral interna ou alguma combinação dessas condições.
- Imperfeitamente drenado - a água é removida do solo lentamente, de tal modo que este permanece molhado por período significativo, mas não durante a maior parte do ano. Os solos com esta classe de drenagem comumente apresentam uma camada de permeabilidade lenta no solum, lençol freático alto, adição de água através de translocação lateral interna ou alguma combinação destas condições.
- Mal drenado - a água é removida do perfil tão lentamente que este permanece molhado por uma grande parte do ano. O lençol freático comumente está à superfície ou próximo dela durante uma considerável parte do ano. As condições de má

drenagem são devidas a lençol freático elevado, camada lentamente permeável no perfil, adição de água através de translocação lateral interna ou alguma combinação destas condições.

- Muito mal drenado - a água é removida do perfil tão lentamente que o lençol freático permanece à superfície ou próximo dela durante a maior parte do ano. Solos com drenagem desta classe usualmente ocupam áreas planas ou depressões, onde há, frequentemente, estagnação de água. É comum nesses solos acúmulo, pelo menos superficial, de matéria orgânica.

4.1.1.5 Umidade do Solo

O elevado teor de umidade nos solos influencia diretamente na ocorrência de deslizamentos uma vez que diminui a coesão, medida de resistência decorrente da ação de forças cimentantes, entre as partículas dos solos. O elevado teor de umidade do solo associado à ocorrência de precipitação pode levar o solo a alcançar seu limite de liquidez a partir do qual o solo passa a se comportar como um fluido denso.

O mapa de umidade foi derivado da imagem do satélite LANDSAT/ TM 5. Foi selecionada a imagem do dia 02/07/2009 visando avaliar o pior cenário de umidade possível, que compreende o período de maio a setembro conforme análise climática realizada para a área de estudo no Capítulo 3, período este em que ocorrem os maiores volumes de chuva na RMPA

Para a obtenção do mapa de umidade foi utilizada a ferramenta TASSCAP do *software* Idrisi Taiga. A ferramenta TASSCAP utiliza seis bandas do sensor TM excluindo a banda termal. A partir da composição das bandas são produzidos três produtos: brilho do solo (*soilbrightness*), cor verde ou biomassa (*greenness*) e umidade do solo (*moistness*), sendo este último utilizado no modelo.

4.1.1.6 Vegetação

Apresença de vegetação densa foi considerada um fator negativo e deflagrante dos deslizamentos devido à sobrecarga adicional que as árvores podem causar a um solo que se encontra próximo do seu limite de saturação após a ocorrência de elevados índices de precipitação, principalmente em encostas com alta declividade. A vegetação densa ainda pode provocar o efeito alavanca, que é a transferência de forças cisalhantes pelos troncos das

árvores ao terreno quando suas copas são atingidas por fortes ventos, e suas raízes podem gerar caminhos preferenciais para a infiltração da água.

O fatorvegetação também foi derivado da imagem do satélite LANDSAT/ TM 5 de 02/07/2009 e foi obtido através da ferramenta VEGINDEX utilizando-se o índice NDVI (*NormalizedDifferenceVegetation Index*) presente no *software* Idrisi Taiga.

O NDVI é calculado utilizando as porções da energia eletromagnética refletida pela vegetação nas bandas do vermelho visível e do infravermelho próximo. As plantas verdes e com vida absorvem fortemente radiação solar na região do vermelho visível para utilizar esta radiação como fonte de energia no processo de fotossíntese. Por outro lado, as células das plantas refletem fortemente na região do infravermelho próximo. As porções absorvidas no vermelho e refletidas no infravermelho variam de acordo com as condições das plantas. Quanto mais verdes, nutridas, saudáveis e bem supridas do ponto de vista hídrico for a planta, maior será a absorção do vermelho e maior será a refletância do infravermelho. Assim a diferença entre as refletâncias das bandas do vermelho e do infravermelho será tanto maior quanto mais verde for a vegetação (INSA, 2014).

A avaliação do NDVI no *software* Idrisi Taiga é aplicada diretamente sobre cada par de pixel nas bandas do vermelho e infravermelho próximo, produzindo um valor pertencente ao intervalo $[-1, 1]$. Quanto mais próximo de 1, maior a probabilidade de estar se tratando de um pixel de vegetação.

4.1.2 Restrições

Como comentado anteriormente, restrições são critérios que limitam (excluem) um determinado local da análise. Dessa forma, como restrições ao objetivo deste trabalho foram selecionados os corpos d'água (lagos, lagoas e rios) e as áreas de declividades menores que 20 graus pelo fato de deslizamentos geralmente não ocorrerem em locais planos ou suavemente ondulados.

Muitos estudos comentam que os deslizamentos ocorrem geralmente entre declividades de 20 a 45 graus. Filho e Magalhães (2004), identificando áreas de instabilidade em São Paulo, observaram a predominância destes em declividades das encostas entre 20° e 40°. Salter et al. (1981), estudando a distribuição de deslizamentos na Nova Zelândia após chuvas intensas observaram que 97% dos deslizamentos ocorreram em encostas com declividade acima de

20°.Adicionalmente, declividades menores que 20 graus também acabam por restringir áreas de banhados, presentes em grande número na área de estudo.

4.2 PADRONIZAÇÃO DOS FATORES

Para a integração dos diferentes fatores e restrições no Sistema de Suporte à Decisão *DecisionWizard* no *software* Idrisi Taiga, os mesmos precisam ser representados por uma camada de imagem raster e possuir o mesmo número de linhas e colunas. Dessa forma, os mapas de drenagem e profundidade dos solos, inicialmente disponibilizados em formato vetorial pela CPRM, foram transformados em formato raster a partir da ferramenta RASTERVECTOR do *software* Idrisi Taiga. Feito isso, criou-se um novo arquivo raster com resolução espacial de 30 metros para a delimitação da área de estudo sendo esta definida por um retângulo delimitado pelas coordenadas UTM 6609500 m ao sul, 6743000 m ao norte, 387500 m à oeste e 563000 m à leste. Todos os fatores e restrições foram recortados pela área de estudo e, ao final, todos os arquivos encontravam-se em formato raster com 30 metros de resolução possuindo 5.850 colunas e 4.450 linhas.

Para tornar a integração dos múltiplos critérios possível no *DecisionWizard*, todos os fatores devem ser padronizados, ou seja, reescalados para uma escala de valores comum. Este processo é imprescindível porque as variações de valores dos fatores selecionados não são comparáveis entre si, o que inviabiliza a sua agregação imediata. Além disso, é impossível combinar o mapa de declividade, quantitativo, com o mapa de drenagem dos solos que é qualitativo.

Dessa forma, antes de reescalar os fatores para uma escala de valores comum, os mapas de drenagem e de profundidade do solo, ambos originalmente em escala qualitativa, tiveram que ser transformados para mapas quantitativos. Para o mapa de drenagem do solo foram atribuídos valores às características de drenagem adotando-se uma escala de 0 a 1, onde os menores valores representam solos de fraca drenagem, enquanto que os maiores valores representam solos de alta drenagem. Para o mapa de profundidade do solo também se adotou uma escala de 0 a 1, onde os menores valores representam solos rasos, enquanto que os maiores valores representam solos profundos. Os valores podem ser verificados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Valores atribuídos às classes dos fatores drenagem e profundidade do solo.

| Fator | Classes* | Valor atribuído |
|-----------------------------|---------------------|-----------------|
| <i>Drenagem do Solo</i> | muito mal | 0,1 |
| | mal | 0,2 |
| | imperfeita | 0,3 |
| | moderada/imperfeita | 0,4 |
| | moderada | 0,5 |
| | moderada/bem | 0,6 |
| | bem | 0,7 |
| | acentuada | 0,8 |
| | excessiva | 0,9 |
| <i>Profundidade do Solo</i> | <50 cm | 0,1 |
| | <100 cm | 0,2 |
| | <150 cm | 0,3 |
| | >100 cm | 0,4 |
| | >150 cm | 0,5 |
| | >200 cm | 0,6 |
| | >250 cm | 0,7 |
| | >300 cm | 0,8 |

Fonte: elaborado pelo autor.

Feito isso, procedeu-se com a padronização de todos os fatores junto ao *DecisionWizard*. A padronização foi realizada por meio de abordagens contínua, através da lógica *fuzzy* onde os pixels dos fatores assumem valores contínuos de suscetibilidade de 0 (menos suscetível) a 255 (mais suscetível).

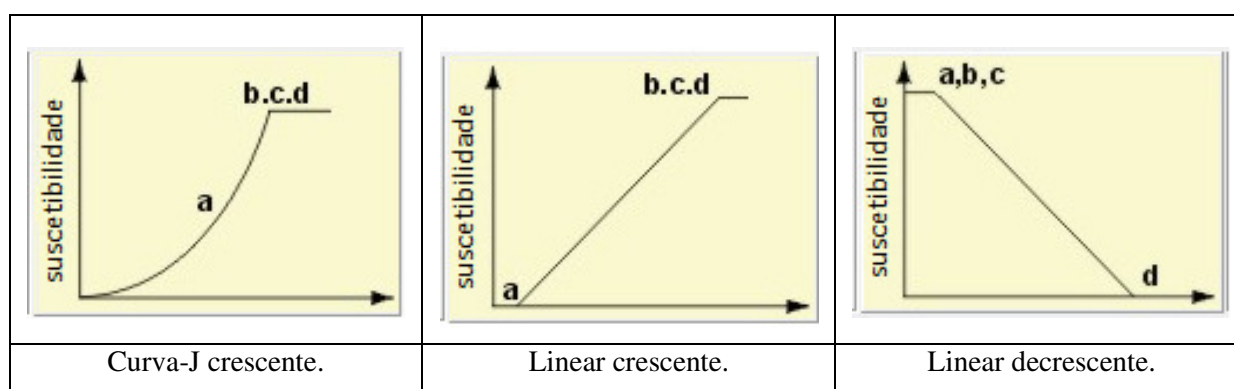
Para a transformação dos fatores através da lógica *fuzzy* deve-se escolher uma função de pertinência para cada fator, ou seja, uma função que melhor relaciona o comportamento desse fator com o objetivo do estudo. Pode-se escolher entre funções lineares, sigmoidais ou curvas-J e ainda pode-se analisar se a relação entre o fator e o objetivo é crescente, decrescente ou simétrico. Após escolhida a função que melhor relaciona o fator com o objetivo do estudo deve-se determinar os pontos de inflexão, também chamados pontos de controle, que determinam os valores de x em que a curva começa a crescer, decrescer ou estabilizar.

A Tabela 4.2 e a Figura 4.2 apresentam a função de pertinência *fuzzy* e os pontos de inflexão adotados para a padronização dos fatores considerados neste estudo.

Tabela 4.2: Funções de pertinência *fuzzy* e pontos de inflexão utilizados na padronização dos fatores.

| Fator | Função de padronização | Pontos de inflexão | | | |
|---|------------------------|--------------------|-------|---|---|
| | | a | b | c | d |
| Declividade (graus) | Curva-J crescente | 0 | 30 | - | - |
| Áreas vizinhas de mesma declividade (km ²) | Linear crescente | 0 | 0,014 | - | - |
| Áreas vizinhas de mesma direção de fluxo (km ²) | Linear crescente | 0 | 0,5 | - | - |
| Profundidade do Solo | Linear decrescente | - | - | 0 | 1 |
| Drenagem do Solo | Linear decrescente | - | - | 0 | 1 |
| Umidade do Solo | Linear crescente | 0 | 100 | - | - |
| Vegetação | Curva-J crescente | 0 | 0,6 | - | - |

Fonte: elaborado pelo autor.

**Figura 4.2: Funções de pertinência *fuzzy* adotadas (Fonte: adaptado de EASTMAN, 2009).**

No reescalamento do fator declividade considerou-se que a suscetibilidade a deslizamentos aumenta exponencialmente com o aumento da declividade e estabiliza aos 30 graus. Assim, todas as áreas com declividades maiores que 30 graus apresentam igual potencial de ocorrência de deslizamentos. O motivo para isso é que, se por um lado declividades acentuadas favorecem a ruptura, por outro não propiciam a infiltração de água no solo, o que é decisivo para sua movimentação (OLIVEIRA e AUGUSTO FILGO, 2005). Foi considerado o valor de 30 graus pelo fato do mesmo ser utilizado como parâmetro para permissão de parcelamento do solo - Lei Federal nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979 (BRASIL, 1979), e pelo fato de ser mencionado em diversos trabalhos acadêmicos (Filho e Magalhães (2004); Muñoz (2005); Riffel (2012)) como sendo um valor crítico ao deslizamento. Para reescalar esse fator foi utilizada uma função curva-J crescente, com pontos de inflexão em 0 e 30 graus.

O fator áreas vizinhas de mesma declividade foi utilizado como um complemento à análise de declividade, pois o mesmo destaca as áreas isoladas de mesma declividade compostas por vários pixels daquelas compostas apenas por um único pixel.

Para o reescalonamento desse fator considerou-se que quanto maior a área de mesma declividade, tanto maior será a suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos, portanto, utilizou-se uma curva linear crescente, sendo o ponto de inflexão, a maior área de mesma declividade obtida nas análises, ou seja, 0.014 km².

Para o reescalonamento do fator áreas vizinhas de mesma direção de fluxo também foi utilizada uma função linear crescente, pois considerou-se que quanto maior a área de mesma direção de fluxo, tanto maior será o acúmulo de água nesses locais, principalmente a jusante, o que pode facilitar a saturação do solo dependendo das características do mesmo e maior é a velocidade do escoamento. O ponto de inflexão representa a maior área de mesma direção de fluxo obtida nas análises, ou seja, 0,5 km².

Para o reescalonamento dos fatores profundidade e drenagem do solo foi utilizada uma função linear decrescente, pois considerou-se que solos profundos e com boa drenagem são menos suscetíveis a deslizamentos pelo fato de altas profundidades conseguirem reter maiores volumes de água levando mais tempo para saturar e pelo fato de solos com boa drenagem conseguirem escoar a água mais rapidamente dificultando o processo de saturação. Os valores dos pontos de inflexão são aqueles atribuídos às características qualitativas na Tabela 4.1.

No reescalonamento do fator umidade considerou-se que áreas com maior teor de umidade são mais suscetíveis à ocorrência de deslizamentos, pois o elevado teor de umidade nos solos diminui a coesão entre as partículas diminuindo a resistência ao cisalhamento. Utilizou-se assim uma função linear crescente cujos pontos de inflexão são os valores mínimo e máximo obtidos no mapa de umidade da área de estudo.

Por fim, o fator vegetação foi reescalonado utilizando uma função curva-J crescente considerando-se que a suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos aumenta exponencialmente devido ao peso que as árvores exercem sobre o solo, funcionando como um fator deflagrante dos deslizamentos para solos que se encontram próximo do seu limite de saturação após a ocorrência de elevados índices de precipitação. Considerou-se ainda que todo pixel de vegetação representado pelo índice NDVI maior que 0,6 apresenta mesma suscetibilidade a deslizamentos, pois estes pixels representam áreas de densas vegetações e árvores de grande porte.

As restrições originais, ou seja, os corpos d'água e as áreas de declividade menores que 20 graus foram mantidos como imagens Booleanas para atuar simplesmente como uma máscara de exclusão no último passo do *DecisionWizard* onde todos os critérios são agregados.

4.3 PONDERAÇÃO DOS FATORES

Antes da agregação final dos critérios, foi realizada a ponderação dos fatores para definir a importância relativa de cada um na predisposição a deslizamentos. Para isso, foi utilizado o Processo Analítico Hierárquico (AHP) proposto por Saaty (1977, 1980) incorporado ao *DecisionWizard* do *software* Idrisi Taiga. Neste procedimento, os diferentes fatores que influenciam o processo são comparados par a par, e um valor de importância relativa é atribuído ao relacionamento entre eles, segundo uma escala pré-definida (SAATY, 2008). Oliveira et. al. (2009) comentam que, para análises de cunho ambiental, o método apresenta desempenho favorável pela possibilidade de congregar dentro de uma única avaliação um grande número de variáveis.

O primeiro passo do processo consiste na geração de uma matriz de comparação entre os fatores. Todos os fatores são dispostos tanto nas linhas como nas colunas da matriz de forma a serem comparados par a par com vistas a definir a importância que um exerce sobre o outro. Desta forma, problemas complexos são decompostos em comparações mais simples. A importância entre os fatores é atribuída conforme uma escala pré-definida ilustrada na Figura 4.3.

| | | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------|------------|------------------------------|------------|---------------|------------------------|---------------------|--------------|
| 1/9 | 1/7 | 1/5 | 1/3 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 |
| extremamente | muito fortemente | fortemente | moderadamente | igualmente | moderadamente | fortemente | muito fortemente | extremamente |
| Menos Importante | | | Igualmente Importante | | | Mais Importante | | |

Figura 4.3: Escala de importância relativa entre os fatores (Fonte: adaptado de EASTMAN, 2009).

A escala de intensidade de importância varia de 1/9 a 9, sendo que 1/9 significa que uma variável é extremamente menos importante em relação a outra, 1 indica a indiferença de importância entre as mesmas, e 9 significa a extrema importância de um critério sobre outro. A realização desses julgamentos deve ser uma etapa de debates e discussões, onde deve ser solicitado o conhecimento específico de vários profissionais, de modo a contemplar adequadamente todos os fatores do maior número de pontos de vista (BRITO, 2014).

No caso deste trabalho, o julgamento da importância relativa entre os fatores foi realizado pelo autor acompanhado por um especialista em sensoriamento remoto, sistema de informações geográficas e planejamento ambiental.

A partir do julgamento da importância relativa, foi desenvolvida então a matriz de comparação pareada que pode ser verificada na Tabela 4.3. Os elementos desta tabela correspondem à importância relativa entre dois fatores, sendo que cada valor representa a importância do critério da linha em relação ao critério da coluna. Por exemplo, a drenagem do solo foi considerada como sendo moderadamente mais importante (valor 3) que a profundidade do solo. Como essa matriz é recíproca, apenas a metade triangular inferior necessita ser preenchida.

Tabela 4.3: Matriz de comparação pareada entre os fatores selecionados.

| Fatores | Declividade | Profundidade | Drenagem | Umidade | Vegetação | Áreas de mesma direção de fluxo | Áreas de mesma declividade |
|---------------------------------|-------------|--------------|----------|---------|-----------|---------------------------------|----------------------------|
| Declividade | 1 | | | | | | |
| Profundidade | 1/5 | 1 | | | | | |
| Drenagem | 1/3 | 3 | 1 | | | | |
| Umidade | 1/3 | 3 | 1 | 1 | | | |
| Vegetação | 1/5 | 1 | 1/3 | 1/3 | 1 | | |
| Áreas de mesma direção de fluxo | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1 | |
| Áreas de mesma declividade | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1 | 1 |

Fonte: elaborado pelo autor.

A última etapa da técnica AHP consiste na verificação do grau de consistência (*Consistency Ratio* - CR) dos julgamentos realizados. O CR é determinado através da Equação 1.

$$CR = \frac{CI}{RI} < 0,1 = 10\% \text{(Equação 1)}$$

Onde:

CR = grau de consistência;

CI = índice de consistência; e

RI = índice de aleatoriedade.

Esta razão indica a probabilidade dos valores da matriz terem sido gerados ao acaso. Quanto mais próximos os resultados forem de zero, mais coerentes são os pesos de compensação adotados e maior é a confiabilidade do julgamento. Caso esse valor seja superior a 0,10 é necessário descartar os resultados e refazer os julgamentos para que a inconsistência seja minimizada (SAATY, 2008).

O índice de consistência (CI) é obtido a partir da Equação 2. Saaty (2008) comenta que para uma matriz ser consistente, o autovalor máximo deve ser igual ao número de fatores selecionados (n).

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \text{ (Equação 2)}$$

Onde:

n = número de fatores utilizados; e

λ_{max} = máximo autovalor da matriz.

O índice de aleatoriedade (RI), por sua vez, é tabelado a partir do número de fatores utilizados na análise, conforme mostrado a Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Índice de aleatoriedade (RI) conforme o número de fatores (n).

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

Fonte: adaptado de Saaty (1980).

A razão de consistência obtida a partir da matriz da Tabela 4.3 foi de 0,06, o que indica que o julgamento apresentou consistência aceitável. Desta forma, os seguintes pesos foram definidos pela técnica AHP:

- Fator Declividade: 0.3651
- Fator Profundidade do Solo: 0.0903
- Fator Drenagem do Solo: 0.1768
- Fator Umidade: 0.1768
- Fator Vegetação: 0.0903
- Fator Áreas de mesma direção de escoamento: 0.0471
- Fator Áreas de mesma declividade: 0.0537

4.4 AGREGAÇÃO DOS FATORES E RESTRIÇÕES

A etapa de concretização do modelo consistiu na agregação dos critérios através do assistente *Decision Wizard* do software Idrisi. O *Decision Wizard* combina os critérios fazendo uso do método Combinação Linear Ponderada (*Weight Linear Combination - WLC*). Dessa forma todos os fatores (padronizados no intervalo 0 a 255) foram multiplicados pelo seu respectivo peso, obtido através da técnica AHP, e em seguida foram somados e multiplicados pelas restrições Booleanas impostas pelos cursos d'água da região e áreas de declividades menores que 20 graus, conforme demonstra a Equação 3.

$$S = (dec * w_{dec} + prof * w_{prof} + dren * w_{dren} + umid * w_{umid} + veg * w_{veg} + amesc * w_{amesc} + amdec * w_{amdec}) * res$$

(Equação 3)

Onde:

S = suscetibilidade;

dec = fator declividade;

$prof$ = fator profundidade;

$dren$ = fator drenagem;

$umid$ = fator umidade;

veg = fator vegetação;

$amesc$ = fator área de mesma direção do escoamento;

$amdec$ = fator área de mesma declividade;

w = peso dos fatores.

Esse cálculo foi realizado pixel a pixel, como ilustrado na Figura 4.4.

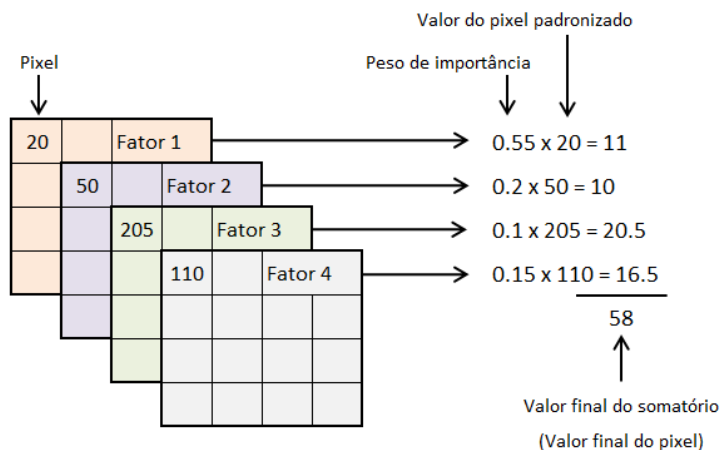


Figura 4.4: Ilustração do processo de agregação dos fatores através do método da combinação linear ponderada (Fonte: elaborado pelo autor).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos por meio da aplicação da metodologia proposta. Primeiramente, é realizada uma contextualização dos dados de entrada do modelo na área da RMPA e em seguida são apresentados os resultados finais.

5.1 CONTEXTO AMBIENTAL DA RMPA SEGUNDO OS CRITÉRIOS ADOTADOS DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS

5.1.1 Declividade

Para as análises finais, o mapa de declividade foi padronizado conforme sistema de classificação das formas de relevo adotada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e EMBRAPA (2006) que divide o relevo nas seguintes classes:

- Plano: 0 a 3%;
- Suave ondulado: 3 a 8%;
- Ondulado: 8 a 20%;
- Forte ondulado: 20 a 45%;
- Montanhoso: 45 a 75%;
- Escarpado: > 75%.

Os resultados podem ser visualizados na Figura 5.1.

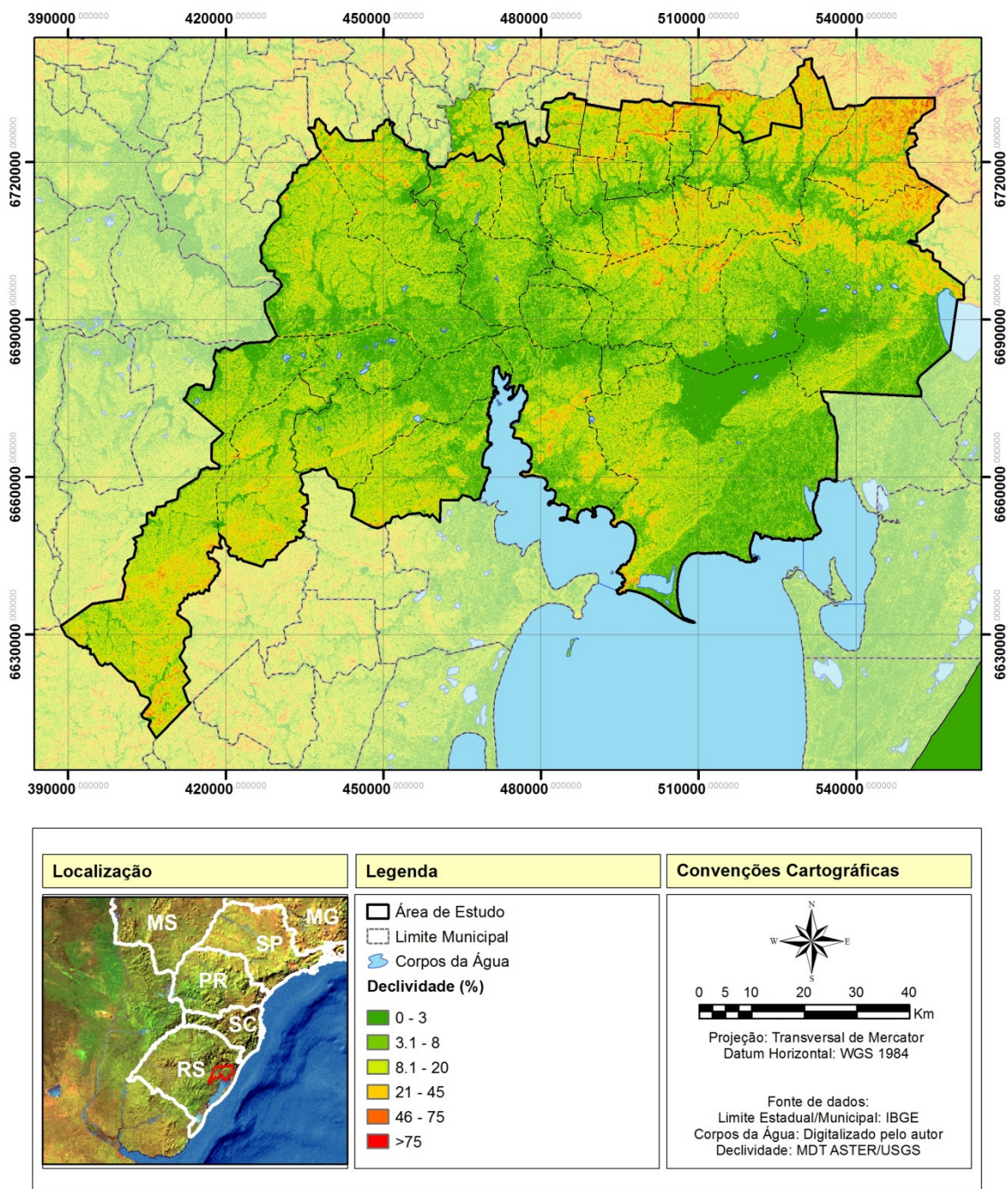


Figura 5.1: Mapa de declividade da Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor).

Os dados de declividade foram então cruzados com o limite dos municípios da RMPA utilizando a ferramenta CROSSTAB do *software* Idrisi Taiga e os resultados são apresentados na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Distribuição da declividade nos municípios da RMPA.

| Município | Declividade | | | | | | | | | | | | Área Total (km ²) |
|---------------------------|--------------------|-------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------|--------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|-------------------------------|
| | 0-3% | | 3-8% | | 8-20% | | 20-45% | | 45-75% | | >75% | | |
| | (km ²) | (%) | (km ²) | (%) | (km ²) | (%) | (km ²) | (%) | (km ²) | (%) | (km ²) | (%) | |
| Alvorada | 7,01 | 9,97 | 25,61 | 36,45 | 31,79 | 45,25 | 5,80 | 8,26 | 0,05 | 0,06 | 0,00 | 0,00 | 70,24 |
| Araricá | 2,51 | 7,10 | 10,45 | 29,58 | 15,54 | 44,00 | 6,04 | 17,10 | 0,67 | 1,91 | 0,11 | 0,31 | 35,32 |
| Arroio dos Ratos | 13,12 | 3,07 | 73,99 | 17,34 | 212,61 | 49,82 | 120,86 | 28,32 | 5,95 | 1,39 | 0,20 | 0,05 | 426,73 |
| Cachoeirinha | 4,39 | 10,02 | 17,00 | 38,82 | 19,63 | 44,82 | 2,77 | 6,33 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 43,80 |
| Campo Bom | 4,43 | 7,23 | 18,05 | 29,49 | 26,60 | 43,45 | 10,90 | 17,80 | 1,14 | 1,87 | 0,10 | 0,16 | 61,21 |
| Canoas | 15,40 | 11,71 | 53,11 | 40,39 | 55,95 | 42,55 | 6,84 | 5,20 | 0,20 | 0,15 | 0,01 | 0,01 | 131,51 |
| Capela de Santana | 12,49 | 6,83 | 52,76 | 28,84 | 85,28 | 46,62 | 29,84 | 16,31 | 2,41 | 1,32 | 0,16 | 0,09 | 182,95 |
| Charqueadas | 30,77 | 14,21 | 82,23 | 37,98 | 86,63 | 40,01 | 16,52 | 7,63 | 0,36 | 0,16 | 0,02 | 0,01 | 216,52 |
| Dois Irmãos | 1,98 | 3,00 | 11,42 | 17,29 | 32,00 | 48,44 | 18,98 | 28,72 | 1,60 | 2,43 | 0,08 | 0,13 | 66,07 |
| Eldorado do Sul | 55,70 | 10,92 | 173,09 | 33,94 | 216,75 | 42,50 | 62,88 | 12,33 | 1,55 | 0,30 | 0,02 | 0,00 | 509,98 |
| Estância Velha | 2,12 | 4,03 | 10,86 | 20,61 | 24,91 | 47,25 | 13,50 | 25,62 | 1,26 | 2,38 | 0,05 | 0,10 | 52,71 |
| Esteio | 2,49 | 9,15 | 10,33 | 37,91 | 12,96 | 47,56 | 1,46 | 5,37 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 27,25 |
| Glorinha | 29,60 | 9,14 | 116,60 | 35,99 | 143,04 | 44,16 | 32,89 | 10,15 | 1,55 | 0,48 | 0,26 | 0,08 | 323,94 |
| Gravataí | 27,53 | 5,93 | 118,79 | 25,59 | 216,98 | 46,73 | 91,90 | 19,79 | 8,15 | 1,76 | 0,93 | 0,20 | 464,28 |
| Guaíba | 25,54 | 6,78 | 104,59 | 27,78 | 180,33 | 47,89 | 63,84 | 16,95 | 2,21 | 0,59 | 0,06 | 0,02 | 376,58 |
| Ivoti | 2,13 | 3,46 | 11,58 | 18,77 | 27,81 | 45,10 | 16,95 | 27,48 | 2,92 | 4,74 | 0,28 | 0,46 | 61,68 |
| Montenegro | 24,91 | 5,92 | 108,61 | 25,81 | 203,74 | 48,42 | 77,23 | 18,35 | 5,81 | 1,38 | 0,48 | 0,11 | 420,78 |
| Nova Hartz | 2,65 | 4,24 | 11,91 | 19,08 | 23,28 | 37,30 | 19,81 | 31,75 | 4,25 | 6,81 | 0,51 | 0,82 | 62,41 |
| Nova Santa Rita | 28,28 | 12,99 | 87,10 | 40,02 | 89,00 | 40,89 | 13,21 | 6,07 | 0,05 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 217,64 |
| Novo Hamburgo | 11,24 | 5,06 | 51,08 | 23,01 | 99,46 | 44,80 | 53,64 | 24,16 | 5,95 | 2,68 | 0,64 | 0,29 | 222,01 |
| Parobé | 8,18 | 7,46 | 32,47 | 29,64 | 44,85 | 40,93 | 21,92 | 20,00 | 2,06 | 1,88 | 0,10 | 0,09 | 109,57 |
| Portão | 7,77 | 4,86 | 38,87 | 24,29 | 80,17 | 50,10 | 31,37 | 19,61 | 1,79 | 1,12 | 0,04 | 0,02 | 160,02 |
| Porto Alegre | 59,27 | 12,00 | 150,28 | 30,42 | 205,12 | 41,52 | 73,65 | 14,91 | 5,45 | 1,10 | 0,27 | 0,05 | 494,03 |
| Rolante | 6,50 | 2,19 | 32,46 | 10,94 | 86,49 | 29,15 | 128,07 | 43,17 | 37,97 | 12,80 | 5,20 | 1,75 | 296,69 |
| Santo Antônio da Patrulha | 102,08 | 9,73 | 303,17 | 28,91 | 432,58 | 41,25 | 187,73 | 17,90 | 21,47 | 2,05 | 1,69 | 0,16 | 1.048,71 |
| São Jerônimo | 43,85 | 4,68 | 193,99 | 20,71 | 453,28 | 48,39 | 227,55 | 24,29 | 16,90 | 1,80 | 1,09 | 0,12 | 936,65 |
| São Leopoldo | 6,68 | 6,41 | 30,35 | 29,13 | 51,41 | 49,34 | 15,33 | 14,72 | 0,41 | 0,39 | 0,02 | 0,01 | 104,20 |
| Sapiranga | 6,81 | 4,95 | 29,49 | 21,42 | 51,87 | 37,68 | 40,48 | 29,40 | 8,06 | 5,85 | 0,95 | 0,69 | 137,66 |
| Sapucaia do Sul | 3,41 | 5,94 | 15,90 | 27,67 | 27,76 | 48,32 | 9,94 | 17,31 | 0,42 | 0,73 | 0,01 | 0,02 | 57,45 |
| Taquara | 21,19 | 4,65 | 91,19 | 20,03 | 175,49 | 38,54 | 143,07 | 31,42 | 22,66 | 4,98 | 1,73 | 0,38 | 455,34 |
| Triunfo | 87,80 | 10,67 | 256,97 | 31,24 | 375,61 | 45,66 | 99,00 | 12,04 | 2,98 | 0,36 | 0,24 | 0,03 | 822,61 |
| Viamão | 189,96 | 12,77 | 535,22 | 35,97 | 600,04 | 40,32 | 156,29 | 10,50 | 6,27 | 0,42 | 0,32 | 0,02 | 1.488,10 |
| Total | 847,77 | 8,41 | 2.859,54 | 28,36 | 4.388,98 | 43,52 | 1.800,24 | 17,85 | 172,53 | 1,71 | 15,59 | 0,15 | 10.084,64 |

Fonte: elaborado pelo autor.

Dessa forma, verificou-se que o relevo da RMPA configura-se como sendo plano a ondulado, com predominância de declividades menores que 20% abrangendo mais de 80% da área da região. Conforme Embrapa (2006) essas áreas possuem superfície de topografia pouco movimentada, constituída por conjunto de colinas e/ou outeiros com declividades suaves à moderada.

As maiores declividade (45 a 75%) são registradas junto aos municípios de Rolante, Taquara, Santo Antônio da Patrulha, São Jerônimo, Sapiranga, Gravataí, Novo Hamburgo e Nova Hartz. Conforme Embrapa (2006) essas áreas possuem superfície de topografia movimentada a acidentada, sendo aquelas acima de 75% caracterizadas como superfícies de formas abruptas ou íngremes formada por morros, montanhas, maciços montanhosos, apresentando desnivelamentos relativamente grandes.

5.1.2 Direção de Fluxo

A Figura 5.2 mostra o mapa de direção de fluxo obtido para a RMPA. A partir do mapa percebe-se que as maiores áreas de mesma direção de escoamento estão localizadas na margem esquerda do rio dos Sinos e na Depressão Central, próximas ao rio Jacuí. Pelo mapa também percebe-se a grande área compreendida pelo Banhado Grande mais a leste. O Banhado Grande possui duas direções de escoamento bem definidas, aquela que drenam de leste para oeste e aquelas que drenam de sul para o norte, as duas convergindo em direção ao rio Gravataí.

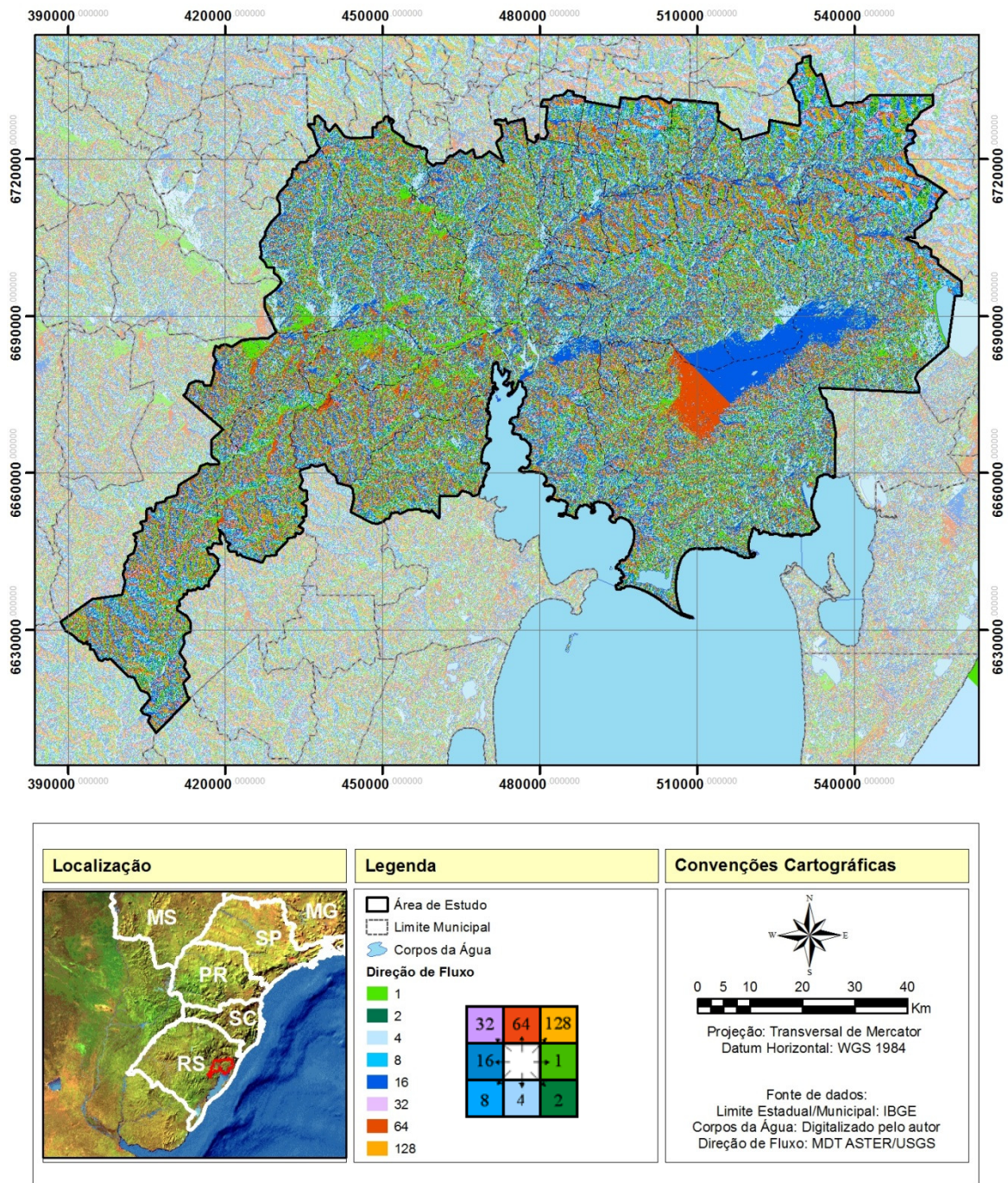


Figura 5.2: Mapa da direção de escoamento da Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor).

5.1.3 Profundidade dos solos

O mapa de profundidade do solo da RMPA foi derivado do mapa temático de solos do Rio Grande do Sul na escala 1:750.000 disponibilizado pela CPRM e está apresentado na Figura 5.3.

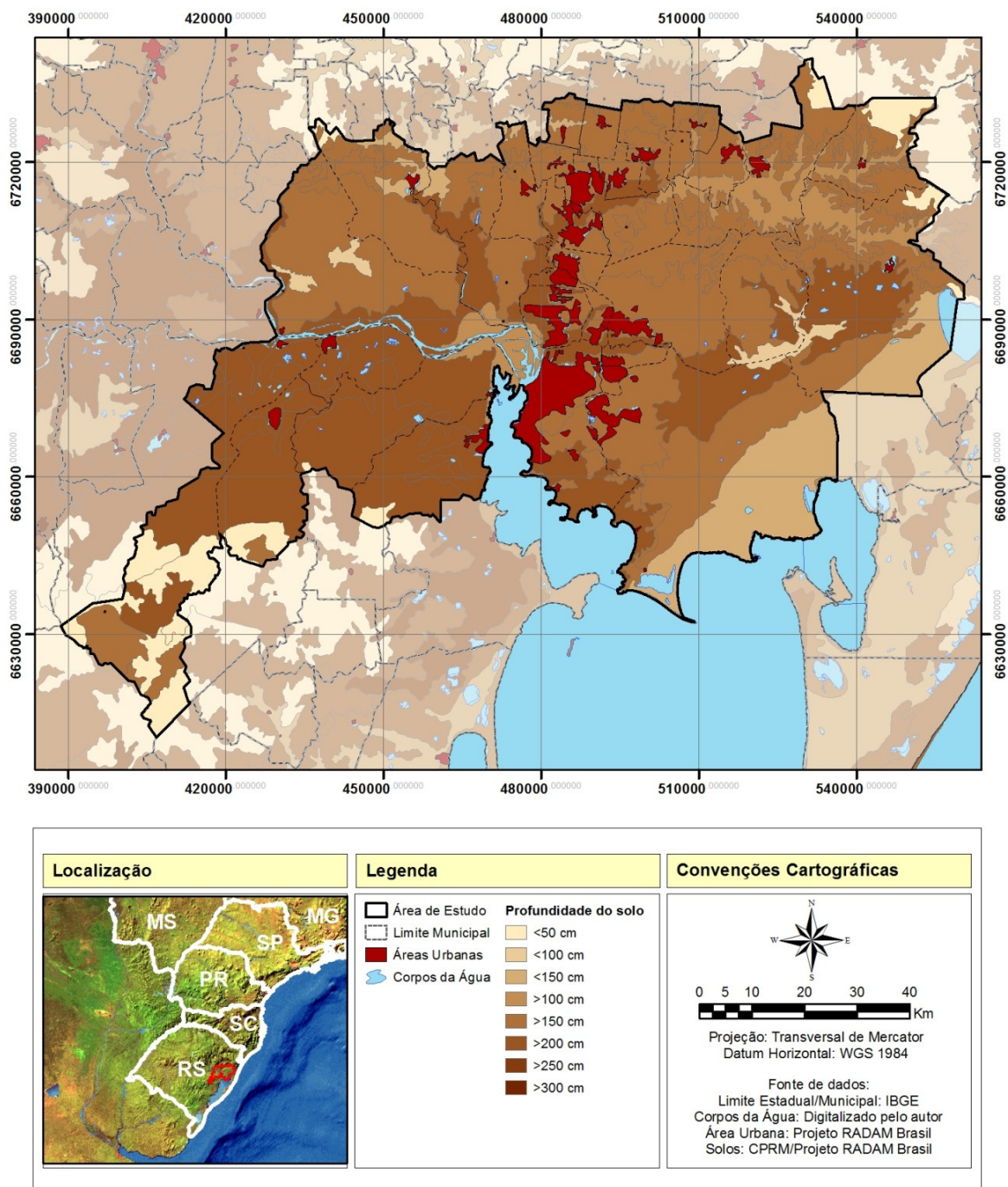


Figura 5.3: Mapa de profundidade do solo da Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor).

Com base na Figura 5.3 verificou-se a predominância de solos entre 1,5 e 2,0 metros de profundidade localizados principalmente na Depressão Central, nas planícies dos rios Gravataí, Sinos, Caí e Jacuí e na foz desses rios com o lago Guaíba. As mesmas profundidades também foram constatadas ao longo das margens direita e esquerda do lago Guaíba.

Já os solos de profundidades entre 0,5 e 1,5 metro são encontrados nas escarpas do Planalto Norte rio-grandense em locais de elevadas declividades predominantes nos municípios de São Jerônimo, Rolante, Arroio dos Ratos, Santo Antônio da Patrulha, Taquara, Guaíba, Montenegro e Eldorado do Sul.

5.1.4 Drenagem dos solos

O mapa de drenagem do solo da RMPA também foi derivado do mapa temático de solos do Rio Grande do Sul e está apresentado na Figura 5.4.

Conforme Figura 5.4, o solo da RMPA em sua maioria apresenta baixa capacidade de drenagem. Esse fato além de estar relacionado com a granulometria dos solos, também está associado à baixa profundidade do lençol freático. A RMPA está localizada na região de confluência dos principais rios do Estado do Rio Grande do Sul, o que torna a região extremamente úmida e com lençol freático muito próximo da superfície. A região apresenta grande número de banhados dos quais pode-se destacar a região do Delta do rio Jacuí e o Banhado Grande cuja presença dificulta a drenagem dos solos uma vez que os mesmos já se encontram encharcados ou até mesmo saturados. Esse fato foi importante na construção do modelo de suscetibilidade, pois caso não fossem excluídas as áreas com declividades menores que 20 graus, os banhados iriam se destacar no mapa de suscetibilidade, pois receberiam grande valor em função da sua baixa capacidade de drenagem já que conforme o modelo, solos de baixa drenagem foram considerados mais aptos à ocorrência de deslizamentos do que solo de excessiva drenagem. Excluindo-se então os banhados da análise, ainda são encontrados solos de drenagem moderada nos municípios de Taquara, Santo Antônio da Patrulha, Rolante, Parobé, Novo Hamburgo, Nova Hartz, Araricá e Sapiranga. O restante da região apresenta solos com boa capacidade de drenagem.

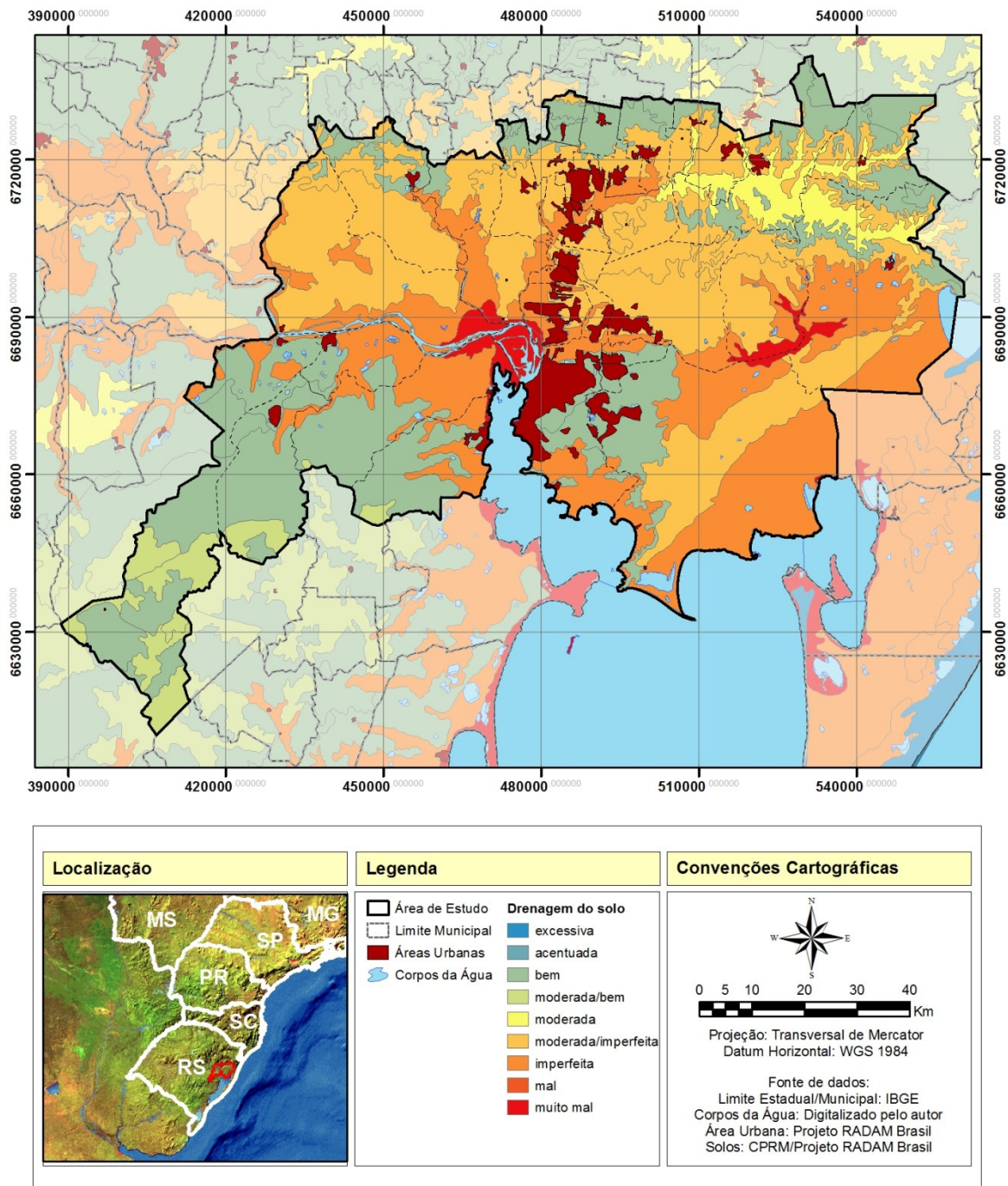


Figura 5.4: Mapa de drenagem dos solos da Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor).

5.1.5 Umidade do Solo

O mapa do teor de umidade (Figura 5.5) do solo está relacionado tanto ao mapa de drenagem como ao mapa de vegetação, de modo que a presença de vegetação e seus sistemas radiculares retêm a água por mais tempo no solo. O teor de umidade do solo encontra-se bem distribuído por toda região da área de estudo. No entanto, nota-se um aumento partindo das áreas urbanas

em direção ao Planalto Norte rio-grandense e em direção Planalto Sul rio-grandense. Teores de umidade elevados também foram evidenciados nas lavouras de arroz localizadas na margem direita do lago Guaíba.

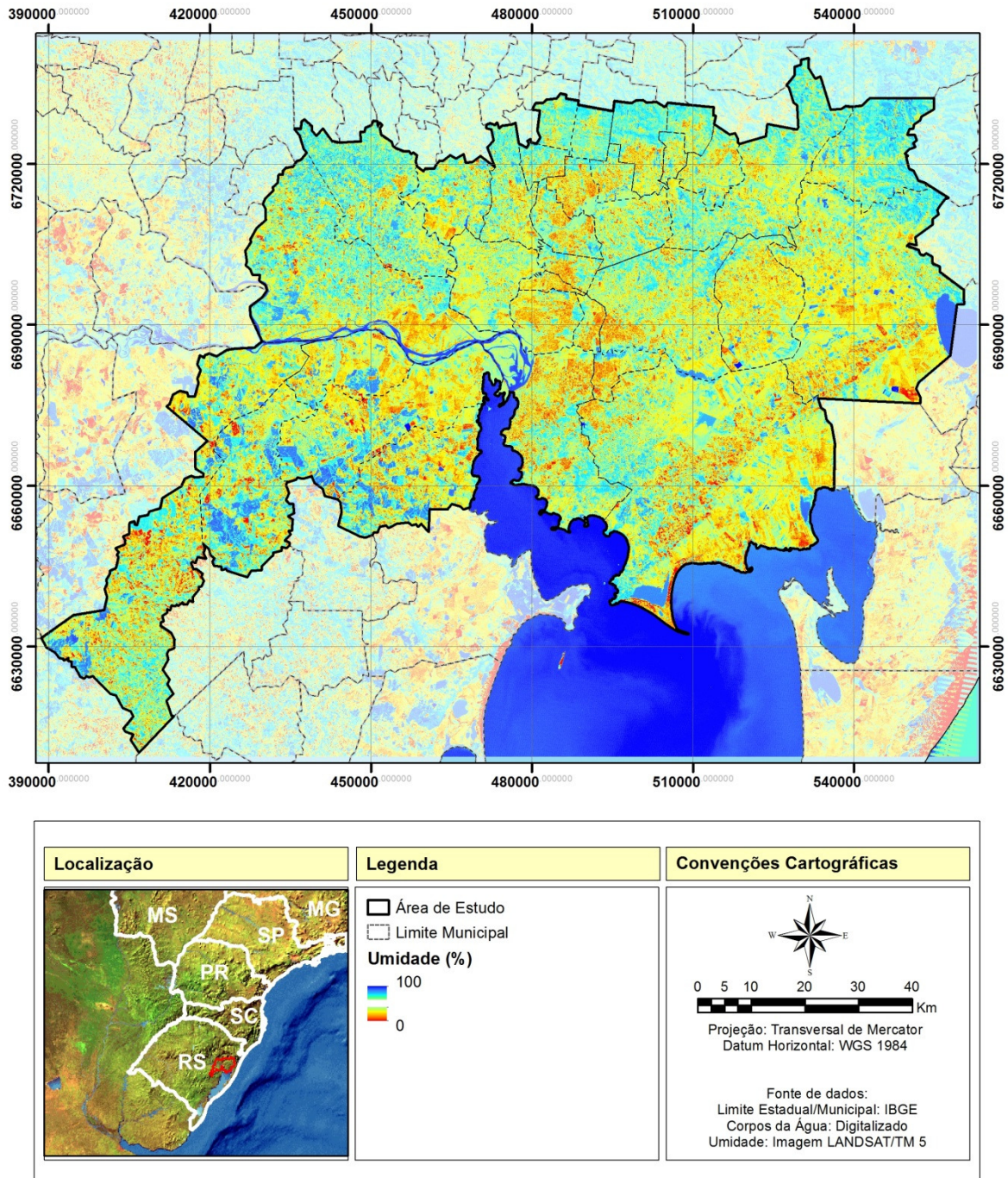


Figura 5.5: Mapa de umidade do solo da Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor).

5.1.6 Vegetação

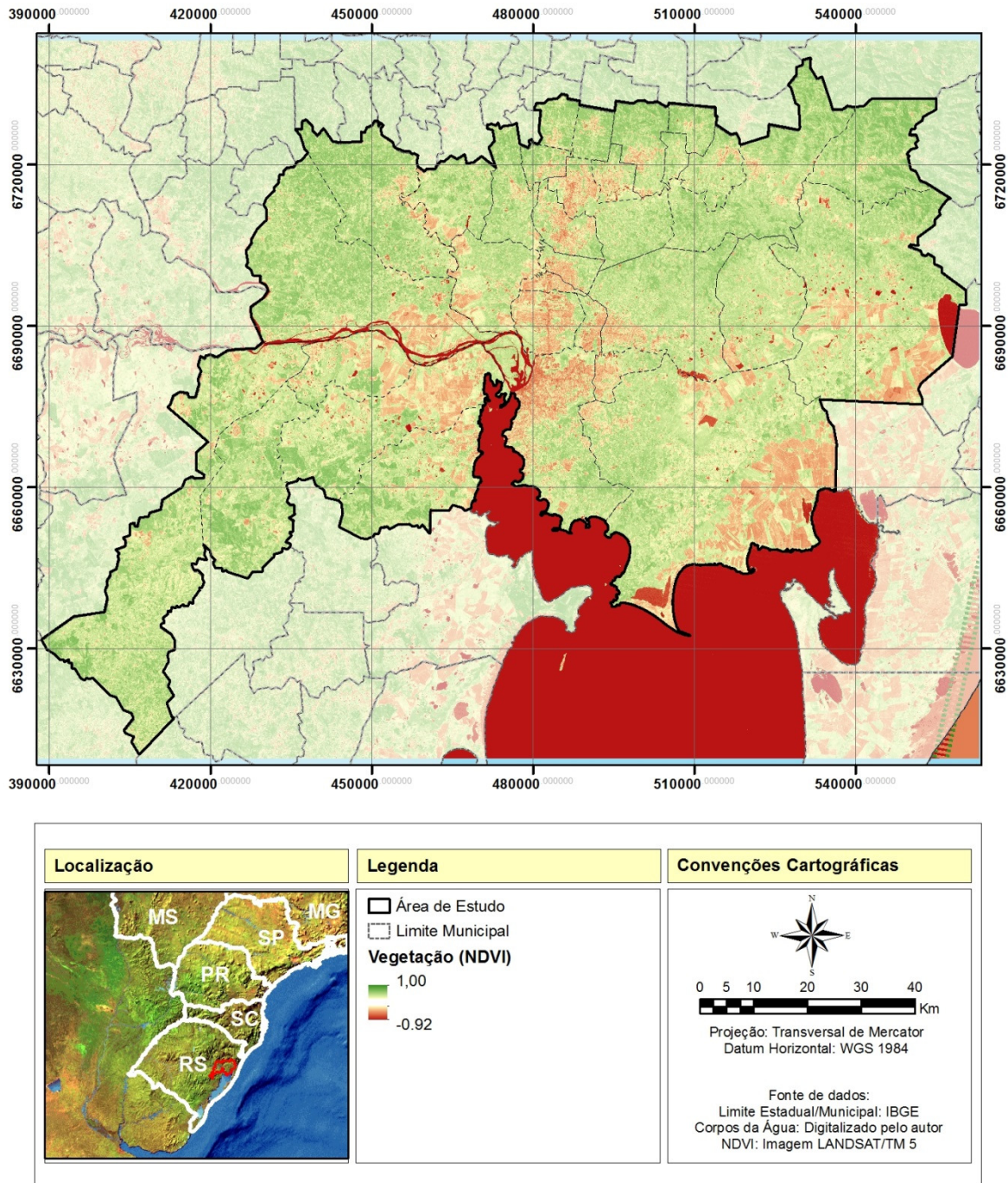


Figura 5.6: Mapa da vegetação na Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor).

Com relação ao mapa de vegetação (Figura 5.6) da área de estudo, nota-se ampla diferença entre a presença de vegetação nas áreas urbanas e nas áreas rurais. Assim como no mapa de umidade, no mapa de vegetação nota-se que a presença de vegetação densa cresce em função da distância das áreas urbanas onde por fim se espalha por toda a área de estudo.

5.2 O MODELO BASEADO EM SIG DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS

A metodologia proposta resultou no mapa de suscetibilidade a deslizamentos da Região Metropolitana de Porto Alegre que pode ser visualizado na Figura 5.7.

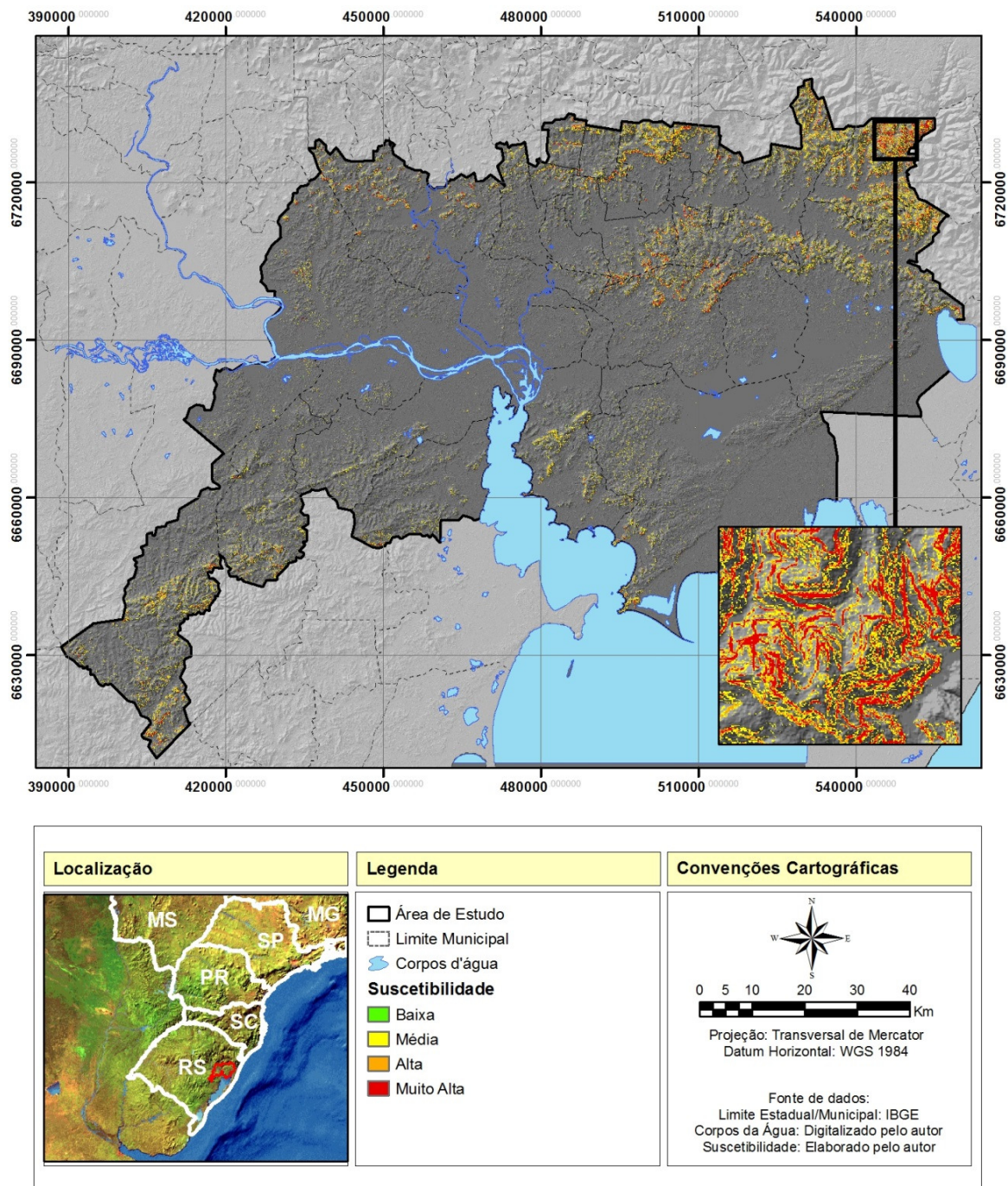


Figura 5.7: Mapa de suscetibilidade a deslizamentos na Região Metropolitana de Porto Alegre (Fonte: elaborado pelo autor).

O mapa, que inicialmente estava em escala contínua (0-255), foi reclassificado em classes de suscetibilidade utilizando a ferramenta RECLASS do *software* Idrisi Taiga. Para isso, a escala contínua foi dividida em três intervalos igualmente espaçados, a saber: 1-85 (baixa suscetibilidade), 85-170 (média suscetibilidade), 170-255 (alta suscetibilidade). A classe de alta suscetibilidade ainda foi dividida em duas, de modo a ser possível diferenciar as áreas onde todas as condições para a ocorrência de deslizamentos foram atendidas, das demais.

A Tabela 5.2 apresenta a distribuição das classes de suscetibilidade na área de estudo. Os dados demonstram que 96% da área da RMPA possui muito baixa ou baixa suscetibilidade a deslizamentos. As áreas com suscetibilidade alta e muito alta correspondem a 1,52% da região, restando 2,48% da área com média suscetibilidade a deslizamentos.

Tabela 5.2: Distribuição das classes de suscetibilidade a deslizamentos na RMPA.

| Classes de Suscetibilidade | Área (km ²) | Área (%) |
|----------------------------|-------------------------|----------|
| Muito Baixa | 9.680,90 | 95,99 |
| Baixa | 2,20 | 0,01 |
| Média | 280,74 | 2,48 |
| Alta | 111,95 | 0,93 |
| Muito Alta | 9,21 | 0,59 |
| Área Total - RMPA | 10.085,00 | |

Fonte: elaborado pelo autor.

A distribuição das classes de suscetibilidade também foi analisada por município da RMPA conforme a Tabela 5.3.

Tabela 5.3: Distribuição das classes de suscetibilidade a deslizamentos por município da RMPA.

| Município | Classes de Suscetibilidade | | | | | | | | | | Área Total (km ²) |
|-------------------|----------------------------|-------|--------------------|------|--------------------|------|--------------------|------|--------------------|------|-------------------------------|
| | Muito Baixa | | Baixa | | Média | | Alta | | Muito Alta | | |
| | (km ²) | (%) | (km ²) | (%) | (km ²) | (%) | (km ²) | (%) | (km ²) | (%) | |
| Alvorada | 70.00 | 99.66 | 0.01 | 0.01 | 0.22 | 0.31 | 0.01 | 0.02 | 0.00 | 0.00 | 70.24 |
| Araricá | 33.63 | 95.21 | 0.00 | 0.00 | 1.01 | 2.86 | 0.49 | 1.38 | 0.19 | 0.55 | 35.32 |
| Arroio dos Ratos | 408.60 | 95.75 | 0.03 | 0.01 | 13.82 | 3.24 | 3.16 | 0.74 | 1.12 | 0.26 | 426.73 |
| Cachoeirinha | 43.75 | 99.87 | 0.00 | 0.01 | 0.05 | 0.12 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.00 | 43.80 |
| Campo Bom | 58.65 | 95.81 | 0.01 | 0.02 | 1.52 | 2.48 | 0.65 | 1.06 | 0.39 | 0.63 | 61.21 |
| Canoas | 131.05 | 99.65 | 0.00 | 0.00 | 0.31 | 0.24 | 0.11 | 0.08 | 0.03 | 0.03 | 131.51 |
| Capela de Santana | 177.38 | 96.95 | 0.00 | 0.00 | 3.30 | 1.80 | 1.19 | 0.65 | 1.08 | 0.59 | 182.95 |
| Charqueadas | 215.33 | 99.45 | 0.01 | 0.00 | 1.00 | 0.46 | 0.17 | 0.08 | 0.02 | 0.01 | 216.52 |
| Dois Irmãos | 62.03 | 93.89 | 0.00 | 0.00 | 2.79 | 4.22 | 0.89 | 1.34 | 0.37 | 0.55 | 66.07 |
| Eldorado do Sul | 504.12 | 98.85 | 0.01 | 0.00 | 5.11 | 1.00 | 0.67 | 0.13 | 0.07 | 0.01 | 509.98 |
| Estância Velha | 49.61 | 94.13 | 0.00 | 0.01 | 1.98 | 3.75 | 0.69 | 1.31 | 0.42 | 0.80 | 52.71 |

| Município | Classes de Suscetibilidade | | | | | | | | | | Área Total (km ²) |
|---------------------------|----------------------------|--------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|--------------------|-------------|-------------------------------|
| | Muito Baixa | | Baixa | | Média | | Alta | | Muito Alta | | |
| | (km ²) | (%) | (km ²) | (%) | (km ²) | (%) | (km ²) | (%) | (km ²) | (%) | |
| Esteio | 27,23 | 99,95 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 27,25 |
| Glorinha | 319,76 | 98,71 | 0,00 | 0,00 | 2,60 | 0,80 | 0,74 | 0,23 | 0,85 | 0,26 | 323,94 |
| Gravataí | 445,00 | 95,85 | 0,01 | 0,00 | 10,82 | 2,33 | 3,86 | 0,83 | 4,59 | 0,99 | 464,28 |
| Guaíba | 369,45 | 98,11 | 0,02 | 0,00 | 5,51 | 1,46 | 1,10 | 0,29 | 0,50 | 0,13 | 376,58 |
| Ivoti | 55,62 | 90,18 | 0,00 | 0,00 | 3,45 | 5,59 | 1,44 | 2,33 | 1,17 | 1,90 | 61,68 |
| Montenegro | 406,76 | 96,67 | 0,01 | 0,00 | 8,43 | 2,00 | 3,00 | 0,71 | 2,59 | 0,62 | 420,78 |
| Nova Hartz | 53,75 | 86,13 | 0,00 | 0,00 | 4,63 | 7,42 | 2,72 | 4,35 | 1,31 | 2,09 | 62,41 |
| Nova Santa Rita | 217,29 | 99,84 | 0,00 | 0,00 | 0,32 | 0,15 | 0,03 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 217,64 |
| Novo Hamburgo | 208,33 | 93,84 | 0,14 | 0,06 | 7,58 | 3,41 | 2,75 | 1,24 | 3,21 | 1,45 | 222,01 |
| Parobé | 104,42 | 95,30 | 0,01 | 0,00 | 3,27 | 2,99 | 1,03 | 0,94 | 0,85 | 0,77 | 109,57 |
| Portão | 155,20 | 96,99 | 0,00 | 0,00 | 3,45 | 2,16 | 1,08 | 0,68 | 0,29 | 0,18 | 160,02 |
| Porto Alegre | 480,70 | 97,30 | 0,41 | 0,08 | 9,35 | 1,89 | 3,18 | 0,64 | 0,40 | 0,08 | 494,03 |
| Rolante | 221,28 | 74,58 | 0,00 | 0,00 | 37,37 | 12,60 | 19,77 | 6,66 | 18,27 | 6,16 | 296,69 |
| Santo Antônio da Patrulha | 998,22 | 95,18 | 0,02 | 0,00 | 31,81 | 3,03 | 11,49 | 1,10 | 7,18 | 0,68 | 1.048,71 |
| São Jerônimo | 893,60 | 95,40 | 0,02 | 0,00 | 29,06 | 3,10 | 9,23 | 0,99 | 4,74 | 0,51 | 936,65 |
| São Leopoldo | 102,78 | 98,64 | 0,03 | 0,03 | 1,04 | 1,00 | 0,22 | 0,21 | 0,14 | 0,14 | 104,20 |
| Sapiranga | 120,63 | 87,63 | 0,00 | 0,00 | 9,80 | 7,12 | 5,45 | 3,96 | 1,78 | 1,29 | 137,66 |
| Sapucaia do Sul | 56,20 | 97,84 | 0,00 | 0,00 | 0,86 | 1,50 | 0,23 | 0,40 | 0,14 | 0,25 | 57,45 |
| Taquara | 405,58 | 89,07 | 0,00 | 0,00 | 30,13 | 6,62 | 13,52 | 2,97 | 6,11 | 1,34 | 455,34 |
| Triunfo | 814,84 | 99,06 | 0,00 | 0,00 | 5,59 | 0,68 | 1,31 | 0,16 | 0,87 | 0,11 | 822,61 |
| Viamão | 1.469,75 | 98,77 | 0,12 | 0,01 | 13,67 | 0,92 | 3,59 | 0,24 | 0,96 | 0,06 | 1.488,10 |
| Total | 9.680,54 | 95,99 | 0,87 | 0,01 | 249,84 | 2,48 | 93,76 | 0,93 | 59,64 | 0,59 | 10.084,64 |

Fonte: elaborado pelo autor.

Conforme a Tabela 5.3 os municípios que apresentam maiores áreas classificadas como de alta e muito alta suscetibilidade a deslizamentos na RMPA são: Rolante (38,04 km²), Taquara (19,63 km²), Santo Antônio da Patrulha (18,67 km²), São Jerônimo (13,97 km²), Gravataí (8,45 km²), Sapiranga (7,22 km²), Novo Hamburgo (5,96 km²) e Montenegro (5,59 km²). Os outros municípios também possuem alguma área enquadrada na classe de suscetibilidade alta e muito alta, mas em proporções menores que as dos municípios mencionados, com exceção de Cachoeirinha e Esteio que não apresentaram área de alta e muito alta suscetibilidade a deslizamentos.

A classe de baixa suscetibilidade (compreendida entre 1-85 na escala *fuzzy*) não apresentou áreas relevantes em nenhum município. Dessa forma, a mesma foi suprimida das próximas análises.

Devido à pequena escala de análise deste trabalho e a dificuldade de visualização dos resultados no mapa da Figura 5.7, optou-se por selecionar o município de Rolante, localizado a nordeste da área de estudo, visando aumentar a escala e os níveis de detalhes dos resultados. Foi selecionado o município de Rolante pelo fato do mesmo ter apresentado o maior número de áreas suscetíveis a deslizamentos na Região Metropolitana de Porto Alegre. O mapa das áreas suscetíveis a deslizamentos no município de Rolante é apresentado na Figura 5.8.

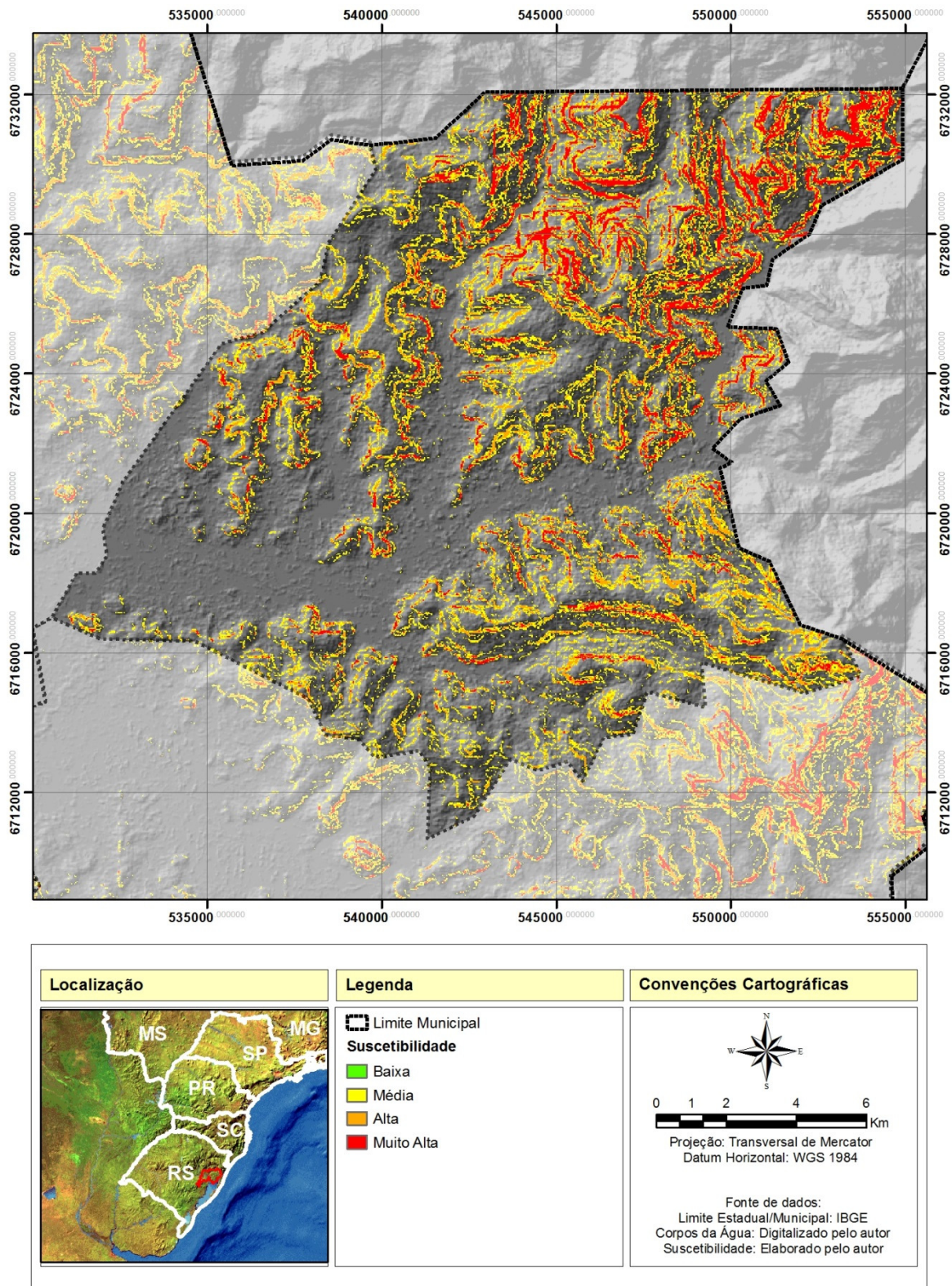


Figura 5.8: Mapa de suscetibilidade adelslizamentos no município de Rolante(Fonte: elaborado pelo autor).

Os resultados foram transferidos para o *software* Google Earth para melhor visualização e comparação com o relevo e o uso e cobertura do solo conforme apresenta a Figura 5.9.

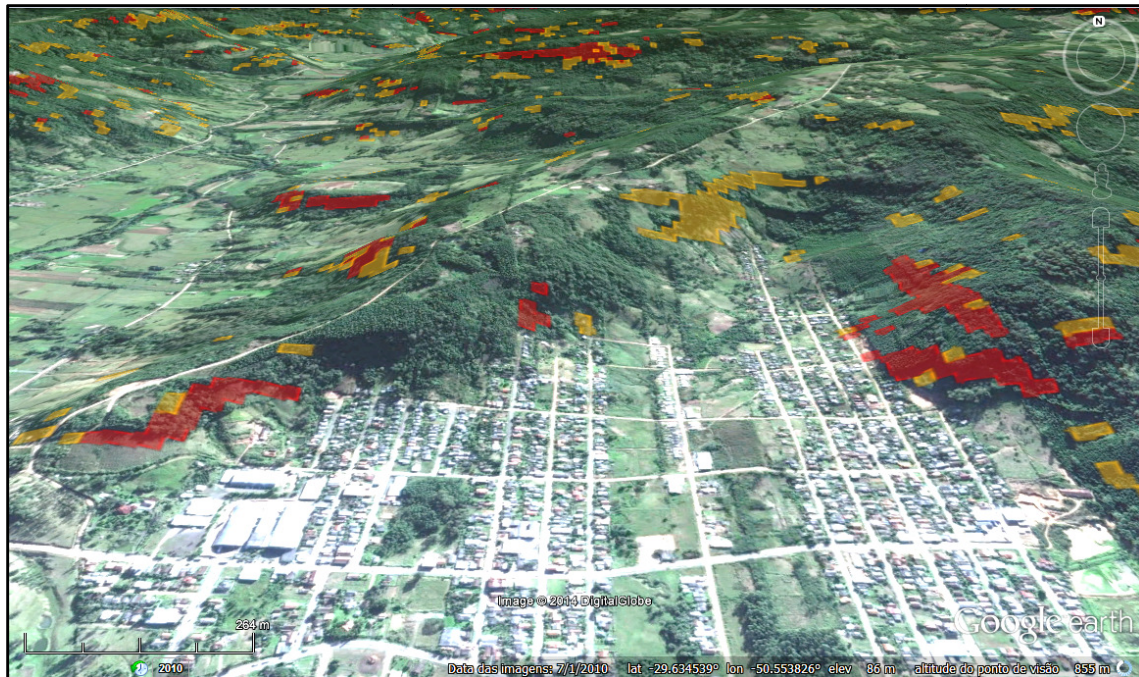


Figura 5.9: Áreas de alta (laranja) e muito alta (vermelho) suscetibilidade a deslizamentos nas áreas de expansão urbana do município de Rolante(Fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2013).

Conforme Figura 5.9, pode-se perceber a existência de áreas de alta suscetibilidade a deslizamentos próximas à zona urbana de Rolante. Alguns locais da cidade estão sobre alto risco de sofrerem as consequências de um possível deslizamento. Nesse caso, seria importante a elaboração de um mapa de risco com o objetivo de estimar os danos potenciais a pessoas, a propriedades e a fatores ambientais quando da ocorrência de deslizamentos nos locais mapeados. Também percebe-se que outras áreas que aparentemente parecem possuir suscetibilidade a deslizamentos não foram mapeadas pelo modelo.

As Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 a seguir apresentam uma sequência de comparação entre as classes média, alta e muito alta suscetibilidade a deslizamentos no município de Rolante.

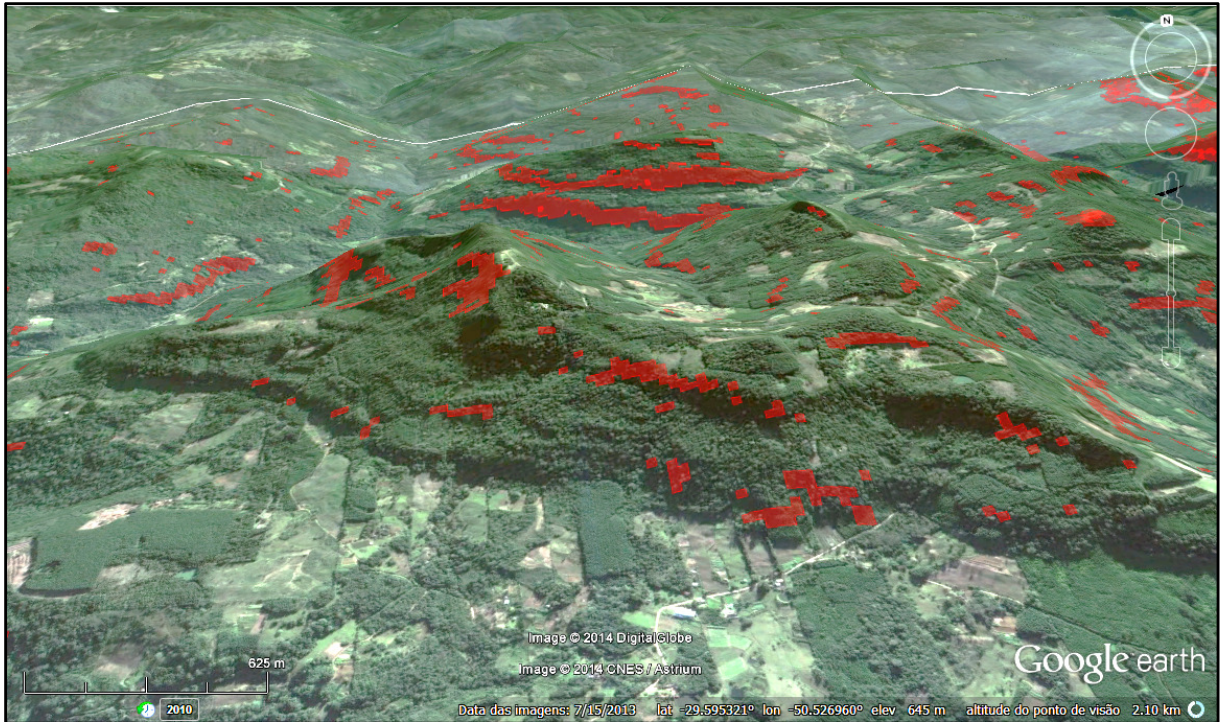


Figura 5.10: Áreas de muito alta suscetibilidade a deslizamentos no interior do município de Rolante (Fonte: adaptado deGOOGLE EARTH, 2013).

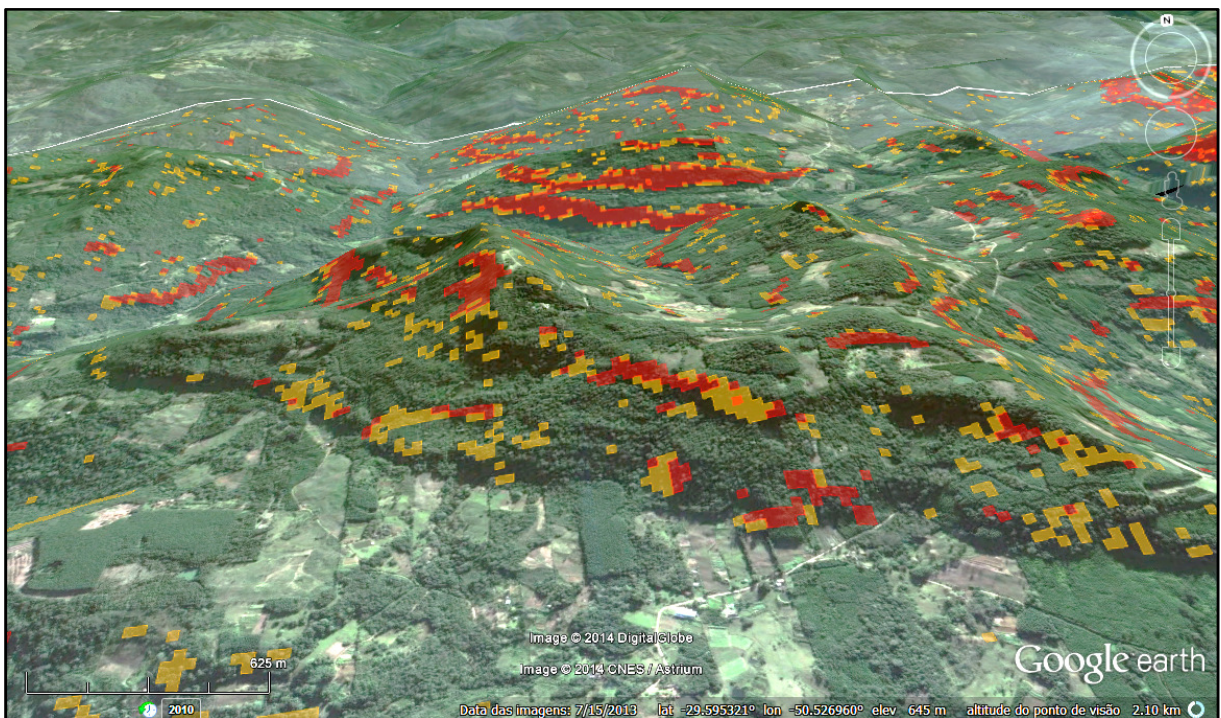


Figura 5.11: Áreas de alta (laranja) e muito alta (vermelho) suscetibilidade a deslizamentos no interior do município de Rolante (Fonte:adaptado de GOOGLE EARTH, 2013).

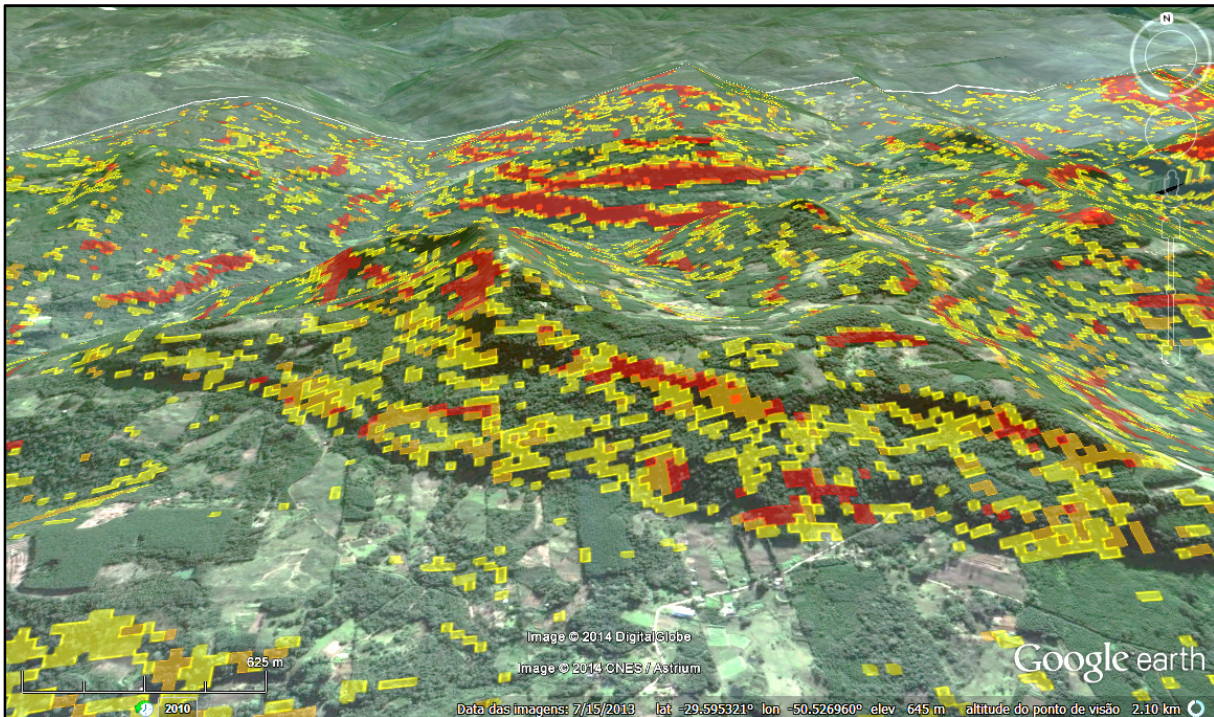


Figura 5.12: Áreas de média (amarelo), alta (laranja) e muito alta (vermelho) suscetibilidade a deslizamentos no interior do município de Rolante (Fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2013).

A partir da comparação anterior, pode-se dizer que as classes alta e muito alta representam bem as áreas suscetíveis a deslizamento no município de Rolante e, por conseguinte em toda a RMPA. A classe média suscetibilidade, no entanto, acabou por selecionar algumas áreas que visualmente não parecem ser suscetíveis a deslizamento, tais como as áreas planas evidenciadas na Figura 5.13.



Figura 5.13: Exemplos de erros obtidos através do modelo (Fonte: adaptado de GOOGLE EARTH, 2013).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os Sistemas de Suporte à Decisão incorporados aos Sistemas de Informações Geográficas mostraram-se ferramentas apropriadas para a análise espacial da suscetibilidade a deslizamentos na RMPA. As ferramentas tornaram ágil a análise dos fatores, diminuindo a subjetividade na ponderação e agregação dos mesmos, e por fim, permitiram a elaboração de mapas através da grande quantidade de recursos gráficos presentes nos *softwares* de SIG.

O modelo mostrou-se insatisfatório no sentido de mapear todas as áreas suscetíveis a deslizamentos, pois constatou-se a partir de imagens do *software* Google Earth que algumas áreas aparentemente suscetíveis a deslizamentos foram ignoradas. Ainda a partir do *software* Google Earth foram verificados outros erros isolados em áreas de baixa declividade, próximos a rios e sobre telhados de casas. Esses erros podem ter ocorrido pela comparência dos demais fatores nessas áreas, que combinados acabam por atribuir um valor maior ao pixel, pela resposta espectral de alguns pixels aos índices NDVI (vegetação) e Moistness (umidade), ou ainda podem ser atribuídos a linhagem dos dados utilizados.

Dessa forma, deve-se realizar um aprimoramento do modelo e dos dados de entrada, assim como uma posterior validação dos resultados através de estudos de campo ou através do cruzamento com um mapa de inventário de deslizamentos de algum município da região.

Independentemente dos resultados obtidos deve-se valorizar a utilização dos fatores de influência pedológica, hidrológica e geomorfológica no modelo, já que os deslizamentos no Brasil, em sua maioria, decorrem de sua combinação. Também deve-se destacar o fácil acesso aos dados de entrada utilizados no modelo, tornando-o aplicável em outros municípios, com o intuito de aumentar o conhecimento sobre a suscetibilidade a deslizamentos em outras regiões.

Conforme o modelo, os municípios que apresentam as maiores áreas classificadas como de alta e muito alta suscetibilidade a deslizamentos na RMPA são: Rolante, Taquara, Santo Antônio da Patrulha, São Jerônimo, Gravataí, Sapiranga, Novo Hamburgo, Montenegro, Viamão, Arroio dos Ratos, Nova Hartz, Porto Alegre e Ivoti.

Os resultados, após aprimoramento e validação, podem ser incorporados às políticas públicas municipais de ordenamento territorial e planejamento urbano de modo a evitar a consolidação da ocupação em áreas inseridas na classe de suscetibilidade alta e muito alta. Os resultados, ainda, indicam, preliminarmente, os locais onde é necessário realizar mapeamentos detalhados de risco, possibilitando melhor planejamento dos recursos humanos, tecnológicos e financeiros.

Para o aprimoramento do modelo, sugere-se a substituição do fator direção de fluxo pelo fator fluxo acumulado de forma a se determinar as áreas de convergência do escoamento. O fluxo acumulado reúne, além de características do comprimento de rampa (conexão com divisores de água a montante), também a curvatura horizontal (confluência e divergência das linhas de fluxo). Sugere-se também a aplicação deste modelo em escala menor e com dados de entrada de maior resolução. A declividade é o fator mais importante no mapeamento de áreas suscetíveis a deslizamentos, dessa forma, sugere-se, para futuros trabalhos, a realização de um levantamento topográfico por fotogrametria aérea ou outra técnica que resulte em curvas de nível ou MDT mais detalhados.

Sugere-se ainda, para aprimoramento do modelo, a utilização das imagens do satélite SMOS da Agência Espacial Europeia, lançado em 02 de novembro de 2009, com a missão específica de medir a umidade da superfície da Terra e a salinidade da superfície dos oceanos. O SMOS fornece imagens globais de umidade do solo a cada três dias que juntamente com técnicas de modelagem numérica, resulta em uma melhor estimativa do teor de água no solo até uma profundidade de 1-2 m (ESA, 2014).

Por fim, e não menos importante, cabe mencionar algumas das diretrizes e objetivos da Política Nacional de Defesa Civil (BRASIL, 2012):

Diretriz nºIII - a prioridade às ações preventivas relacionadas à minimização de desastres;

Diretriz nºV - planejamento com base em pesquisas e estudos sobre áreas de risco e incidência de desastres no território nacional;

Objetivonº VII - promover a identificação e avaliação das ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades a desastres, de modo a evitar ou reduzir sua ocorrência;

Objetivo nºXI - combater a ocupação de áreas ambientalmente vulneráveis e de risco e promover a realocação da população residente nessas áreas

Objetivo nºXV - integrar informações em sistema capaz de subsidiar os órgãos do SINPDEC na previsão e no controle dos efeitos negativos de eventos adversos sobre a população, os bens e serviços e o meio ambiente.

Fica evidente, portanto, os elementos trazidos pelo presente trabalho segundo o que é previsto pelas diretrizes e objetivos acima citados, uma vez que os resultados apontam, dentro do universo compreendido pela RMPA, áreas suscetíveis a deslizamentos sendo essa uma ação preventivas relacionadas à minimização de desastres. Além disso, agrega e apresenta novos critérios de avaliação, vindo ao encontro no que é estabelecido na Diretriz nº 5.

Além disso, por tratar-se de um modelo em SIG, poderá vir a dar subsídios no futuro para o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil– SINPDEC, ou sua versão em nível estadual, ainda não implementado, mas com contratação de serviço em andamento.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHRENDT, A. **Movimentos de massa gravitacionais - proposta de um sistema de revisão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP.** 2005. 390 f. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.
- ARONOFF, S. *Geographic Information Systems.* WDL. Publications, Canada. 1989.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: Conferência Brasileira sobre estabilidade de encostas, 1., Rio de Janeiro. **Anais...** São Paulo: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica; Associação Brasileira de Geologia de Engenharia: 1992b. v. 2, p. 721-733.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de taludes. In: OLIVEIRA, A. M. D. S.; BRITO, S. N. A. D. (Eds.). **Geologia de Engenharia.** 2ª ed. São Paulo: ABGE, 2004. p. 243-269.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Rio Grande do Sul.** Recife, 1973. 431 p. (Brasil. Ministério da Agricultura-DNPEA-DPP. Boletim Técnico, 30).
- BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei nº 6.766 de 19 de dezembro de 1979.** Dispõe sobre o Parcelamento do Solo Urbano e dá outras Providências. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l6766.htm>. Acesso em: 08 out 2014.
- BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **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. Brasília, DF, 2012. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm>. Acesso em: 20 nov 2014.
- BRITO, M. M. **Geoprocessamento aplicado ao mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos no município de Porto Alegre, RS.** 2014. 167 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.
- BULL, G. Ecosystem Modelling with GIS. **Environmental Management**, 18 (3): p. 345-349, 1994.
- CÂMARA, G.; MEDEIROS, J. S. **Geoprocessamento para projetos ambientais.** São José dos Campos: INPE, 1996. 147 p.

CARVALHO, C. M.; RIEDEL, P. S. **Técnicas de Geoprocessamento aplicadas ao estudo da suscetibilidade a escorregamentos translacionais nos entornos dos polidutos de Cubatão – SP.** Brasil. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 2901-2908.

CASTRO, J. M. G. **Pluviosidade e movimentos de massa nas encostas de Ouro Preto.** 2006. 138p. Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Civil) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

CLERICI, A.; PEREGO, S.; TELLINI, C.; VESCOVI, P. Landslide failure and runoutsusceptibility in the upper T. Ceno valley (Northern Apennines, Italy). **Natural Hazards**, v. 52, n. 1, p. 1-29, 2010.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Plano Diretor de Mineração da Região Metropolitana de Porto Alegre (RS)** Porto Alegre, 2006. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/cgi/cgilua.exe/sys/start.htm?infoid=503&sid=39>>. Acesso em: 08 set 2014.

CRUDEN, D. M. A simple definition of a landslide. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**. n. 43, 1991, pp. 27-29.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide Types and Processes. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (Eds.). **Landslides: Investigation and Mitigation**. Transportation Research Board, Special Report 247. p36—75. National Research Council, National Academy Press, Washington. D.C., 1996.

DELMONACO, G.; IPPOLITO, F.; MARGOTTINI, C. The CEC Project. Meteorological Factors influencing slope stability and slope movement type: evaluation of hazard prone areas. **Proc. 1st Review Meeting of Hydrological and Hidrogeological Risks**. Brussels, p. 259-283, editado por R. Casale, Official Publications of European Communities. Bruxelas, 1995.

DI GREGORIO, L. T.; SOARES, C. A. P.; FEITOSA, F. F.; NERY, T. BODART, M. Aplicabilidade dos mapeamentos de suscetibilidade, perigo (*hazard*) e risco na redução de desastres naturais. In: Congresso Brasileiro sobre Desastres Naturais, 1, Rio Claro. **Anais...** São Paulo: Universidade Estadual Paulista, 2012.

DIAS, F. P.; HERRMANN, M. L. de P. Susceptibilidade a deslizamentos: estudo de caso no bairro Saco Grande, Florianópolis – SC. **Caminhos de Geografia**, v. 3, n. 6, p. 57-73, 2002.

DIETRICH, W. E.; REISS, R., HSU, M. L.; MONTGOMERY, D. R. A process based model for colluvium soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. **Hydrological Process**, v. 9, n. 3-4, p. 383-400, 1995.

DIKAU, R.; BRUNSDEN, D.; SCHROTT, L. **Landslide recognition: identification, movement and causes: identification, movement and courses**. New York: John Wiley, 1996.

EASTMAN, J. R. **IDRISI for Windows: Introdução e Exercícios Tutoriais**. Tradução de Heinrich Hasenack e Eliseu Weber. Porto Alegre: UFRGS (Centro de Recursos Idrisi), 1998. 240 p.

EASTMAN, J. R. **IDRISI for Windows**: Version 16.03. Clark Labs for Cartographic Technology and Geographic Analysis. Worcester, MA. Graduate School of Geography, Clark University, 2009.

EASTMAN, J. R.; JIN, W.; KYEM, P.A.K.; TOLEDANO, J. GIS and decision making. In: Explorations in geographic information system technology. Genebra: **UNITAR**, v.04, pp.112, 1993.

EMPRAPE - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed.** Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

ENTRALGO, J. F. T. **Análise espacial e estatística dos movimentos de massa deflagrados pelas chuvas dos dias 11 e 12 de janeiro de 2011 na região serrana do estado do Rio de Janeiro, Brasil.** 2013. 116 p. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental. Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília, 2013.

ESA - EUROPEAN SPACE AGENCY. **Introducing SMOS.** Paris, 2014. Disponível em: <http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/SMOS/Introducing_SMOS>. Acesso em: 02 dez 2014.

ESRI ArcMap, version 10.1: **How Flow Accumulation works.** ESRI Inc, 2012.

FARAH, F. **Ocupação urbana e instabilidade de encostas.** Coleção Habitare - habitação em encostas. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, v. 2, 2003. 312 p.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C. CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z. Joint Technical Committee on landslides and engineered slopes, JTC-1. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3-4, p. 99-111, 2008.

FERNANDES, N. F., GUIMARÃES, R. F., GOMES, A. T., VIEIRA, B. C., MONTGOMERY, D. R. e GREENBERG, H. Condicionantes Geomorfológicas dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T. E CUNHA, S. B. (org.) **Geomorfologia e Meio Ambiente.** 4ª. ed. Rio de Janeiro: Bertrand, 2003. cap. 3, p. 123-194.

FILHO, O. A.; MAGALHÃES, F. S. Identification of slope instability hazard areas in the Anchieta – Imigrantes highway system, located in the Serra do Mar mountain range, São Paulo State, Brazil. In: LACERDA, EHRlich, FONTOURA & SAYÃO (Eds) **Landslides: Evaluation and Stabilization.** Taylor & Francis Group, London, 2004. 273-279.

FREIRE, E. S. M. Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática. **Construção**, v. 8, n. 1, p. 10-18, 1965.

GONZALES, G. A. J.; ZAMUDO, H. E.; CASTELLANOS, J. R. Relaciones de precipitación crítica – duración de lluvias que disparan movimientos de massa em Santafé de Bogotá – Colômbia. **XI Panamerican Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (PCSMGE).** Foz do Iguaçu, 1999. 709-716.

GREENWAY, D. R. Vegetation and slopes stability. In: ANDERSON, M. G; RICHARDS, K. S. (Eds.). **Slope stability: geotechnical engineering and geomorphology**. Chichester: John Wiley, 1989. cap. 6, p. 187-230.

GUIDICINI, G. e NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2ª Edição. São Paulo, 1984: Editora Edgard Blucher Ltda, 1984. 9788521201861.

HUTCHINSON, J. N. General report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to Geology and Hydrogeology. In: International Symposium on Landslides, 5., 1988, Rotterdam. **Proceedings...** Rotterdam: A.A. Balkema, 1988. v.1, p.3-35.

HUTCHINSON, J. N. Mass movement. In: FAIRBRIDGE, R. W. (Ed.). **Encyclopedia of geomorphology**. New York: Reinhold: 1968. p. 688-695.

IAEG, International Association for Engineering Geology and the Environment. Rock and soil description and classification for engineering geological mapping. **Bulletin of International Association of Engineering Geology**, v. 24, n. 1, p. 253-274, 1981.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010. Censo Demográfico 2010. Disponível em: <<http://www.censo2010.ibge.gov.br>>. Acesso em: 08 set 2014.

INSA - INSTITUTO NACIONAL DO SEMIÁRIDO. **Índice de vegetação por diferença normalizada**. Disponível em: <<http://www.insa.gov.br/ndvi/#.VIWZxzHF9u5>>. Acesso em: 22 nov 2014.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Elaboração de subsídios técnicos para um plano de emergência para a área de Cubatão, Estado de São Paulo**. São Paulo. 1985 (IPT, Relatório nº 22.797).

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Ocupação de Encostas**. São Paulo: IPT, 1991. 216 p.

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Gráfico Climatológicos**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/graficosClimaticos>> Acesso em: 08 set 2014.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS. **Desastres naturais e geotecnologias – Sistemas de Informação Geográfica: caderno didático nº 4**. São José dos Campos, 2009.

JENSON, S. K.; DOMINGUE, J. O. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. Volume 54, nº 11, November 1988, p. 1593 -1600. Disponível em: <<http://edna.usgs.gov/Edna/pubs/extractingtopographicstructure1.pdf>>. Acesso em: 20 nov 2014.

JIANG, H.; EASTMAN, J. R. Application of fuzzy measures in multi-criteria evaluation inGIS. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 14, n. 2, p. 173-184,2000.

KOBIYAMA, M., MENDOÇA, M., MORENO, D. A., MARCELINO, I. P. V. O., MARCELINO, E. V., GONÇALVES, E. F., BRAZEETI, L. P., GOERL, R. F., MOLLERI, G. S. F., RUDORFF, F. M. 2006. **Prevenção de desastres naturais: conceitos básicos**. Curitiba: Organic Trading, 2006. 109 p.

KOULI, M.; LOUPASAKIS, C.; SOUPIO, P.; VALLIANATOS, F. Landslide hazardzonation in high risk areas of Rethymno Prefecture, Crete Island, Greece. **Natural Hazards**, v. 52, n. 3, p. 599-621, 2010.

LACRUZ, M. S. P.; FILHO M. A. S. **Desastres naturais e geotecnologias – Sistemas de Informação Geográfica: Caderno Didático nº 4**. INPE São José dos Campos, 2009. Disponível em:<<http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/05.18.18.24/doc/publicacao.pdf>>. Acessoem: 20 nov 2014.

LIVI, F. P. Climatic elements: the contrast between cold and warm weather. In.: MENEGAT, R.; PORTO, M. L.; CARRARO, C. C.; FERNANDES, L. A. D. (Coords.). **Environmental atlas of Porto Alegre – condensed version**. Porto Alegre: UFRGS, 1998. cap. 7, p. 56-57

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. 2013. **Sistemas e ciência da informação geográfica**. Tradução de HenrichHasenack e Eliseu Weber. 3ª ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

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

MARCELINO, E. V.; NUNES, L. H.; KOBIYAMA, M. Mapeamento de risco de desastresnaturais do estado de Santa Catarina. **Caminhos de Geografia**, v. 8, n. 17, p. 72-84, 2006.

MARTINI, L. C. P., UBERTI, A. A. A., SCHEIBE, L. F., COMIN, J. J., OLIVEIRA, M. A. T. 2006. Avaliação da Suscetibilidade a Processos Erosivos e Movimentos de Massa: Decisão Multicriterial Suportada em Sistemas de Informações Geográficas. Brasil. **Revista do Instituto de Geociências – USP**. Geol. USP Sér. Cient., São Paulo, v. 6, n. 1, 41-52 p., 2006.

MARTINS, C. M. R. **Textos para Discussão FEE nº 112: Caracterização da Região Metropolitana de Porto Alegre**. Secretaria do Planejamento, Gestão e Participação Cidadã. Fundação de Economia e Estatística Siegfried Emanuel Heuser. Porto Alegre, 2013. ISSN 1984 5588. Disponível em <<http://cdn.fee.tche.br/tds/112.pdf>>. Acesso em: 20 set 2014.

MARTINS, P. A. **Mapeamento das áreas suscetíveis a deslizamentos no perímetro urbano de Igrejinha - RS**. 2013. 158 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2013.

MICHEL, G. P. **Modelagem de estabilidade de encostas com consideração do efeito da vegetação**. 2013. 152 p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFSC, Florianópolis, 2013.

MONTGOMERY, D. R.; SULLIVAN, K.; GREENBERG, H. M. Regional test of a model for shallow landslides. **Hydrological Processes**, v. 12, p. 943-955, 1998.

MORAES, E. C. **Fundamentos de Sensoriamento Remoto. Capítulo 1.** São José dos Campos: DSR/INPE, 2002. Disponível em: <http://mtc-m12.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/sergio/2005/06.14.12.18/doc/CAP1_ECMoraes.pdf>. Acesso em: 18 nov. 2014.

MUÑOZ, V.A. **Análise comparativa de técnicas de inferência espacial para identificação de unidades de suscetibilidade aos movimentos de massa na região de São Sebastião, São Paulo, Brasil.** São José dos Campos, 2005.

OLIVEIRA, A. M. S.; AUGUSTO FILGO, O. Análise de movimentos de massa com base em observações do evento do ano 2000 de Campos do Jordão (Estado de São Paulo, Brasil). **Solos e Rochas**, v. 28, n. 1, p. 99-111, 2005.

OLIVEIRA, P. T. S.; RODRIGUES, D. B. B.; ALVES SOBRINHO, T.; PANACHUKI; Elói. Processo Analítico Hierárquico aplicado à vulnerabilidade natural a erosão. **Geociências**, vol.28, n. 4. São Paulo, 2009.

PARISE, M. Landslide mapping techniques and their use in the assessment of the landslide hazard. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, v. 26, n. 9, p. 697-703, 2001.

RIFFEL, E. S. **Análise e mapeamento das ocorrências de movimentos de massa na bacia hidrográfica do Rio Paranhana (RS).** 2012. 115 f. Dissertação (Mestrado). - Programa de Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2012.

RIO GRANDE DO SUL. Assembleia Legislativa. **Lei Complementar Estadual nº 13.496, de 05 de agosto de 2010.** Disponível em: <<http://www.al.rs.gov.br/>>. Acesso em: 20 ago 2014.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Meio Ambiente, 2014a. **Unidades de Conservação Estaduais: APA do Banhado Grande.** Disponível em: <http://www.sema.rs.gov.br/conteudo.asp?cod_menu=174>. Acesso em: 08 set 2014.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria do Planejamento, Gestão e Participação Cidadã, 2014b. **Atlas Socioeconômico do Rio Grande do Sul.** Disponível em: <<http://www.scp.rs.gov.br/atlas/default.asp>>. Acesso em: 02 set 2014.

RIO GRANDE DO SUL. Secretaria Estadual do Meio Ambiente. Departamento de Recursos Hídricos. **Estudos preliminares para subsídio ao Plano de Bacia do Lago Guaíba,** 2004.

RODRIGUES, B. B. **Proposta sistemática e tomada de decisão relativa a movimentos de massa gravitacionais: aplicação em Ouro Preto (MG).** 2002. 308 f. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2002.

- RODRIGUES, M. Introdução ao Geoprocessamento. In: **Simpósio Brasileiro de Geoprocessamento**. São Paulo. Universidade de São Paulo. 1990. p. 1-26 p.
- SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n.1, 2008.
- SALTER, R.T.; CRIPPEN, T.F.; NOBLE, K.E. Storm Damage Assessment of Thames-TeAroha Area following the Storm of April 1981: Final Report. Water and Soil Science Centre, Ministry of Works and Developments, **Report n.44**. New Zealand, 1981.
- SAMPAIO, T. Q.; PIMENTEL, J.; SILVA, C. R.; MOREIRA, H. F. A atuação do Serviço Geológico do Brasil – CPRM na gestão de riscos e repostas a desastres naturais. In: Congresso CONSAD de Gestão Pública, 6., Brasília **Anais...** Brasília: CONSAD, 2013.
- SELBY, M. J. 1993. **Hillslope Materials and Process**. New York: Oxford University Press, 1993, 451 p.
- SHARPE, C. F. S. **Landslides and related phenomena**. New York: Columbia University Press, 1938. 137 p.
- SIDLE, R. C.; PEARCE, A. J.; O'LOUGHLIN, C. L. **Hillslope stability and land use**. Washington: American Geophysical Union, 1985. 141p.
- SILVA, F. C.; MACEDO, E. S. Importância do estudo da percepção ambiental sobre riscos naturais: enfoque em deslizamentos. **OLAM: Ciência&Tecnologia**, v. 7, p. 569-584, 2007.
- SOETERS, R. e VAN WESTEN, C. J. Slope instability recognition, analysis, and zonation. In: **Landslides Investigation and Mitigation**/TURNER, A. K. e SCHUSTER, R. L. Special Report 247, Transportation Research Board, National research Council, Washington D.C., 1996, p.129-177.
- TATIZANA, C., OGURA, A.T., CERRI, L.E.S., ROCHA, M.C.M. 1987. Análise de Correlação entre Chuvas e Escorregamentos – Serra do Mar, Município de Cubatão. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5., São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1987. v. 2, p. 225-236.
- TERZAGHI, K. Soil mechanics in action. **Civil Engineering**. v. 29, n. 2, p. 69-70, 1959.
- USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. Landslide Types and Processes. **Fact Sheet 2004-3072**. Reston, Virginia, United States Geological Survey, 2004. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf>>. Acesso em: 21 nov 2014.
- USGS - UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY. The landslide handbook – A guide to understanding landslides. **Circular 1325**. Reston, Virginia, United States Geological Survey, 2008, 129 p.
- VAN WESTEN, C. J.; ABELLA, E. C.; KURIAKOSE, S. L. Spatial data for landslides susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3-4, p. 112-131, 2008.
- VANACÔR, R. N. **Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao mapeamento das áreas susceptíveis a movimentos de massa na região nordeste do**

Estado do Rio Grande do Sul. 2006. 129 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

VARNES, D. J. Slope movement and types and process. In: SCHUSTER, R. L. KRIZEK, R.J. (Orgs.) **Landslides: Analysis and control.** Washinton D.C.: National Academy Press, 1978. cap. 2, p. 11-33.

VARNES, D. J.; IAEG, International Association of Engineering Geology Commission on Landslides And Other Mass Movements On Slopes. **Landslide hazard zonation: a review of principles and practice.** Paris: UNESCO, 1984.

WP/WLI, International Geotechnical societies UNESCO Working Party on World Landslide Inventory. **Multilingual landslide glossary.** WP/WLI. Richmond: BiTech Publishers Ltd, 1993.