

Raíza Sartori Peruzzo

**ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS NO
SETOR NORTE DO MUNICÍPIO DE BLUMENAU - SC**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós Graduação em Desastres Naturais
da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Mestre em Desastres Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Edison Ramos
Tomazzoli

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Peruzzo, Raíza

Análise da suscetibilidade a deslizamentos no setor norte do município de Blumenau, SC / Raíza Peruzzo ; orientador, Edison Ramos Tomazzoli , 2018.
118 p.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-Graduação em Desastres Naturais, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

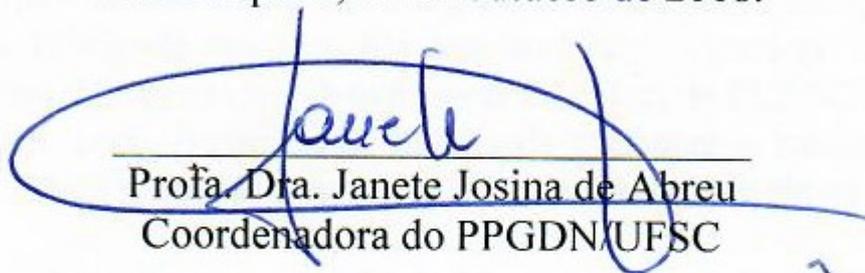
1. Desastres Naturais. 2. deslizamento. 3. modelo. 4. suscetibilidade. 5. validação. I. , Edison Ramos Tomazzoli.
II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Desastres Naturais. III. Título.

Raíza Sartori Peruzzo

“Análise da Suscetibilidade a Deslizamentos no Setor Norte do Município de Blumenau - SC”

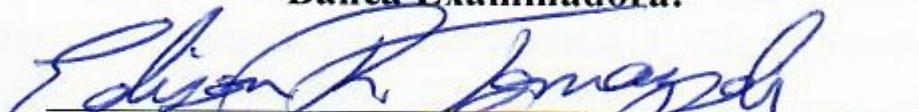
Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Desastres Naturais”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-graduação em Desastres Naturais.

Florianópolis, 03 de outubro de 2018.



Profa. Dra. Janete Josina de Abreu
Coordenadora do PPGDN/UFSC

Banca Examinadora:



Prof. Dr. Edison Ramos Tomazzoli
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC)



Profa. Dra. Edna Lindaura Luiz
Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)



Profa. Dra. Bianca Carvalho Vieira
Universidade de São Paulo (USP)

AGRADECIMENTOS

Todo este esforço é dedicado ao meu pai (*in memoriam*), que, mesmo não acompanhando este processo, esteve presente de outras formas e sem dúvidas conseguiu me ajudar muito mais do que em vida. A ele, dedico cada passo de meus desafios. Agradeço muito à minha mãe que ensinou-me a ser forte e resistente aos obstáculos da vida. Com certeza e graças a isso, o processo de pesquisa não me causou tanto desgaste físico e emocional.

Agradeço ao professor e orientador Edison Ramos Tomazzoli, que acreditou no trabalho e que tanto me auxiliou nesta construção, desde a graduação. Obrigada também por sua amizade. Agradeço à professora Janete Josina de Abreu que, através do orientador, da FEESC e Ministério das Cidades, pôde financiar as bolsas de pesquisa e saídas de campo essenciais a esta pesquisa e também à minha permanência na academia.

As colegas do Laboratório de Mecânica dos Solos, UFSC, Ângela Grando, Cândida Bernardi e Miryan Yumi, que sempre dispostas, auxiliaram nos ensaios, agradeço também à valiosa companhia e por compartilharem tantos cafés.

Agradeço aos colegas da primeira turma de Mestrado em Desastres Naturais da UFSC, que foram inspiradores, especialmente durante o andamento das disciplinas. Agradecimento especial às amigas Drielly Rosa Náu e Cyntia Alves Fernandes de Oliveira por compartilharem os angustiantes momentos acadêmicos e os divertidos momentos pessoais. Aos bons e velhos amigos (as), Katherini Coelho, Cristine Corrêa, Adriana Eidt, Mounique Atherino, Caio Simões, Jeniffer Souza, Maíra Abreu, Maíra Poeta, José Guilherme Fronza, Sidney Secanechia, e tantos outros, que sempre me lembraram do que sou capaz e me inspiraram a continuar este processo, sem contar os momentos de descontração, tão essenciais para a saúde mental durante trabalhos acadêmicos. Obrigada também à amiga Graziela Maziero, que me inspirou com tantas ideias e com seu entusiasmo pela pesquisa, e também por me apresentar às pessoas que contribuíram para meu desenvolvimento acadêmico.

Aos colegas da Socioambiental Consultores Associados, que sempre incentivaram e também apoiaram minha formação de diversas maneiras. Em especial aos amigos Guilherme Araújo e Vitor Zimmermann.

RESUMO

Movimentos gravitacionais de massa são processos naturais importantes na evolução das paisagens. Quando estes fenômenos ocorrem em áreas ocupadas e vulneráveis, podem ocasionar desastres socioambientais. O Município de Blumenau, localizado na região do Vale do Itajaí, devido à frequência e magnitude de eventos de inundações e escorregamentos, tornou-se área prioritária para a execução de ações de previsão e prevenção de desastres naturais, especialmente após o mês de novembro de 2008, quando ocorreram, além das típicas inundações, generalizados escorregamentos que ocasionaram elevados prejuízos econômicos e sociais para o município. Existem diferentes tipos de escorregamentos e de mecanismos de ruptura que tornam estes fenômenos complexos de prever. Diversos métodos têm sido empregados com o intuito de identificar suscetibilidade a escorregamentos, entre estes métodos, destacam-se os modelos matemáticos apoiados em bases físicas. O objetivo desta pesquisa é determinar a distribuição espacial das áreas suscetíveis a escorregamentos no setor norte do município de Blumenau, SC. Para atingir estes objetivos, foi realizada a caracterização geológica, geomorfológica e geotécnica, com coletas em campo e com o tratamento de dados em laboratório. Os modelos foram aplicados para dois tipos de unidades geotécnicas distintas, originando 4 simulações que foram comparadas por intermédio da validação. A validação dos modelos foi feita por meio de curvas de validação que demonstram o percentual acumulado de cicatrizes em cada classe de suscetibilidade do modelo. A análise das curvas de validação mostrou que todos os modelos apresentaram bons resultados para identificar os locais suscetíveis à ocorrência de escorregamentos. O SHALSTAB, apesar de identificar as áreas de alta suscetibilidade, não obteve bons resultados na identificação das áreas de segurança. Já os modelos relacionados ao Fator de segurança, além de identificar as áreas de suscetibilidade, foram mais assertivos na identificação das áreas de segurança. O modelo Fator de Segurança originado nas unidades geomorfo-pedogeológicas foi o que apresentou melhores resultados de validação e por isso foi eleito como modelo de suscetibilidade, tendo então sido reclassificado em três classes de suscetibilidade (alta, média e baixa), também com base em sua curva de validação. A análise deste mapa identificou que a unidade Gnaisse máfico em colinas baixas possui alta suscetibilidade a escorregamentos, enquanto que a unidade Piroxenito em colinas baixas tem baixa suscetibilidade a escorregamentos. Os resultados dos ensaios mostraram uma variação significativa nos parâmetros de resistência e distribuição granulométrica

dos solos quando em modelados de relevo distintos, até mesmo quando originados da mesma litologia e unidade geotécnica. Portanto, sugere-se que estudos de suscetibilidade, baseados em modelos matemáticos, sejam validados, sempre que possível, com as cicatrizes de escorregamentos, principalmente quando aplicados a áreas de grande extensão territorial.

Palavras-chave: Desastres socioambientais. Modelos de suscetibilidade a escorregamentos. Validação.

ABSTRACT

Mass movements are an important natural process in the landscape evolution. When these events occur in areas that have been settled in and are vulnerable, they can cause environmental and socio-economic impacts. The municipality of Blumenau, located in the region of Vale do Itajaí, has become a priority area for the implementation of actions for forecasting and prevention of natural disasters, due to the frequency and magnitude of floods and landslides. This became especially apparent after November 2008, when besides the typical floods, widespread erosion also occurred which has led to high economic and social losses for the city. There are distinct types of landslides and triggering mechanisms, which makes these events complex from a forecasting perspective. Various methods have been used in order to identify susceptibility to landslides, amongst those methods include physics-based mathematical models. This research aims to analyse the susceptibility to landslides in the north section of the Blumenau municipality, in the state of Santa Catarina, from the application and comparison of mathematical methods (Shalstab and Safety Factor), validated by the landscape scars. To achieve these objectives, a geological, geomorphological and geotechnical characterization of the study area has been carried out through gathering in fields and data treatment in the laboratory. The models were applied to two different geotechnical units, originating four simulations which were compared through the validation. The model validations were made from two prediction-rate curves, which demonstrate the accumulated percentage of scars in each class of susceptibility of the model. This prediction-rate curve analysis has shown good results for all models for the identification of susceptibility areas and the occurrence of landslides in the study area. Other than the identification of high susceptibility areas, The Shalstab model, has not obtained good results in the identification of security areas. On the other hand, the models of the safety factor besides identifying the areas of susceptibility, were more effective in the identification of the safety areas. The safety factor model, originated from geomorph-pedogeological units, has presented the best validation results, therefore it has been chosen as a susceptibility model for the study area. In this way, it has been reclassified in three susceptibility classes (higher, medium and lower degree), also based on its prediction-rate curve. The analyses of this map has identified that gneiss units in lower hills has showed higher susceptibility to landslides, where as Piroxenito units in lower hills has showed low susceptibility to landslides. The test results have showed a

significant variation in the resistance and distribution of soil properties, when in distinct relief models, even when originating from the same lithology and geotechnical unit. Consequently, it is suggested that susceptibility studies based on mathematical models, are whenever possible validated with landslide scars, particularly when it is applied to large areas of territory

Key words: Socio-environmental disasters. Models of susceptibility to landslides. Validation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	OBJETIVOS.....	21
3	JUSTIFICATIVA.....	23
4	CONTEXTO GEOGRÁFICO DA ÁREA DE ESTUDOS	25
5	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	37
5.1	MOVIMENTOS DE MASSA NO BRASIL	37
5.2	TIPOLOGIA DOS MOVIMENTOS DE MASSA	40
5.3	AGENTES E MECANISMOS CONDICIONANTES DOS MOVIMENTOS DE MASSA	46
5.4	ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS	51
5.5	VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS	54
6	MATERIAIS E MÉTODOS	57
6.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	57
6.2	MODELAGEM DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A ESCORREGAMENTOS	77
6.3	VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SUSCETIBILIDADE	81
6.4	MAPA DE SUSCETIBILIDADE FINAL A ESCORREGAMENTOS	82
7	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	85
7.1	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS	85
7.2	INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS	121
7.3	RESULTADOS DOS MODELOS	129
7.4	VALIDAÇÃO DOS MODELOS	141
7.5	SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS	146
8	CONCLUSÕES.....	155
9	REFERÊNCIAS	159

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Escorregamentos em área urbana do município de Blumenau no episódio de novembro de 2008.....	23
Figura 2. Precipitações médias anuais.....	30
Figura 3. Áreas suscetíveis a escorregamentos, densamente urbanizadas...	31
Figura 4. Layout do Sistema AlertaBlu.....	34
Figura 5. Avisos emitidos pelo Sistema AlertaBlu.	34
Figura 6. Critérios para a emissão de alertas de escorregamentos.	35
Figura 7. Tipos básicos de movimentos de massa.....	42
Figura 8 - Esquema de deslizamento translacional.	44
Figura 9 - Esquema de deslizamento rotacional.....	45
Figura 10. Esquema de atuação das forças de resistência e forças cisalhantes.	50
Figura 11 - Esquema dos componentes do modelo SHALTAB para gerar o mapa de suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos rasos.....	53
Figura 12. Gráfico exemplificando a curva de validação de um modelo de suscetibilidade a escorregamentos. A linha contínua mostra uma curva ideal.....	56
Figura 13. Anéis de coleta das amostras indeformadas.....	70
Figura 14. Metodologia de mapeamento das zonas de ruptura.	76
Figura 15. Seção transversal de um perfil de Cambissolo em Gnaiss máfico.....	79
Figura 16. Curva de validação referente aos resultados da Tabela 6.	82
Figura 17. Curva de validação segmentada em 3 classes de suscetibilidade.	83
Figura 18. Migmatito formado por bandas graníticas rosadas intercaladas às do gnaiss máfico.....	94
Figura 19. Aspectos do metapiroxenito.....	95

Figura 20. Corpo de gabro maciço.	96
Figura 21. Gnaiss gabronorítico.	96
Figura 22. Granitoide com foliação milonítica. L.P.	97
Figura 23. Diagrama de setores elaborado a partir dos lineamentos.	101
Figura 24. Rampa de colúvio no sopé de encosta.	111
Figura 25. Ocorrências de escorregamentos rotacionais do tipo desencadeado por causas induzidas.	125
Figura 26. Cicatriz de deslizamento translacional parcialmente coberta por vegetação.	126
Figura 27. Curva de validação dos modelos SHALSTAB e Fator de Segurança. As classes de suscetibilidade estão representadas por pontos, com seus respectivos números.	142
Figura 28. Curvas de validação dos modelos pelo método SHALSTAB. .	144
Figura 29. Curva de validação dos modelos pelo método do Fator de Segurança.	145
Figura 30. Classes de suscetibilidade do modelo Fator de Segurança – geomorfo-pedogeológicas.	149

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Registros das maiores enchentes ocorridas no município de Blumenau e o respectivo nível do rio medido na régua (m).....	32
Tabela 2. Principais eventos relacionados a movimentos de massa no Brasil.	38
Tabela 3. Identificação das Unidades Geotécnicas de acordo com a metodologia de Davison Dias (1995).	63
Tabela 4. Identificação das Unidades Geotécnicas de acordo com as Unidades de Relevô.....	69
Tabela 5. Identificação dos pontos de coleta das amostras deformadas e indeformadas.	71
Tabela 6. Correlação das classes de suscetibilidade e cicatrizes de escorregamentos.	81
Tabela 7. Percentual de abrangência das unidades geológicas.....	89
Tabela 8. Percentual de abrangência das unidades pedológicas.....	115
Tabela 9. Resultados dos ensaios de caracterização física.	117
Tabela 10. Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento.	119
Tabela 11. Percentual de abrangência das cicatrizes por litologia.	126
Tabela 12. Frequência da área de cicatrizes por classe de declividade.	127
Tabela 13. Percentual de abrangência de cicatrizes por unidade pedológica.	127
Tabela 14. Percentual de abrangência de cicatrizes por modelados de relevô.	128
Tabela 15. Percentual de abrangência de cicatrizes por unidade geomorfo-pedogeológica.	128
Tabela 16. Percentual de abrangência de cicatrizes por unidade pedogeológica.	129

Tabela 17. Classes de estabilidade do SHALSTAB por unidade geotécnica.	135
Tabela 18. Classes de estabilidade do Fator de Segurança por unidade geotécnica.	136
Tabela 19. Resultados da validação/verificação do modelo SHALSTAB.	143
Tabela 20. Resultados da validação/verificação do modelo Fator de Segurança.	145
Tabela 21. Área (m ²) das unidades de Alta Suscetibilidade	150
Tabela 22. Área (m ²) das unidades de Baixa Suscetibilidade.....	151
Tabela 23. Área (m ²) das unidades de Média Suscetibilidade.....	153
Tabela 24. Parâmetros geotécnicos referentes às unidades de Alta, Média e Baixa Suscetibilidade.	153

LISTA DE MAPAS

Mapa 1. Localização do município de Blumenau.	27
Mapa 2. Unidades pedogeológicas.	61
Mapa 3. Unidades geomorfo-pedogeológicas.	67
Mapa 4. Localização dos pontos de coleta de amostras de solo.	73
Mapa 5. Localização da área de estudos (setor norte do município de Blumenau).	87
Mapa 6. Mapa geológico do setor norte do município de Blumenau.	91
Mapa 7. Mapa de densidade/interseção de lineamentos do setor norte de Blumenau.	99
Mapa 8. Hipsometria.	103
Mapa 9. Declividades.	105
Mapa 10. Modelados do relevo.	107
Mapa 11. Modelados do relevo, CPRM.	109
Mapa 12. Distribuição das unidades pedológicas.	113
Mapa 13. Cicatrizes de escorregamentos.	123
Mapa 14. Resultado do modelo SHALSTAB baseado nas unidades pedogeológicas.	131
Mapa 15. Resultado do modelo SHALSTAB baseado nas unidades geomorfo-pedogeológicas.	133
Mapa 16. Resultado do modelo Fator de Segurança baseado nas unidades pedogeológicas.	137
Mapa 17. Resultado do modelo Fator de Segurança baseado nas unidades geomorfo-pedogeológicas.	139
Mapa 18. Suscetibilidade a escorregamentos no setor norte do Município de Blumenau, SC.	147

1 INTRODUÇÃO

Os movimentos gravitacionais de massa (MGM) são processos naturais importantes na evolução das paisagens como modeladores das formas de relevo. Compreendem fenômenos extremamente complexos em termos de previsão e tipologia. Pela complexidade, estes processos têm sido amplamente investigados pela comunidade científica, principalmente por causa da sua importância na ocorrência de desastres socioambientais.

Movimentos gravitacionais de massa são causados pelo aumento das tensões que atuam nas encostas ou pela diminuição da resistência dos materiais que compõe os solos (SELBY, 1993); (GUIDICINI e NIEBLE, 1976). Características intrínsecas, ou seja, características naturais, inerentes às encostas, como o complexo geológico e estrutural, morfológico, por exemplo, são fatores que predispõem uma encosta à ocorrência de rupturas (SELBY, 1993). Alguns fatores são diretamente responsáveis pelo desencadeamento da ruptura nas encostas, entre eles podem-se citar episódios intensos de chuvas, erosão, desflorestamento e alterações antrópicas.

Em novembro de 2008, todo o Vale do Itajaí, região nordeste do Estado de Santa Catarina, foi atingido por intensas chuvas que ocasionaram, além de grandes inundações, numerosos e generalizados escorregamentos, ocasionando fatalidades, centenas de feridos, milhares de desabrigados e vultosos prejuízos econômicos e sociais para a região. De acordo com registros da Defesa Civil do Estado foram confirmados 135 óbitos e 02 desaparecimentos (sendo que mais de 97% das mortes foram causadas por soterramento). Em consequência disso, diversos municípios do Estado de Santa Catarina decretaram estado de calamidade pública.

Desde então, intenso esforço vem sendo realizado por profissionais da defesa civil e de prefeituras municipais, além de pesquisadores das áreas de geografia, engenharia, geologia, assistência social, no intuito de contribuir para a previsão e prevenção desses fenômenos que podem ocasionar desastres socioambientais.

Dentro da gama de estudos voltados à previsão de movimentos de massa, os modelos matemáticos têm se destacado como uma metodologia eficaz para a avaliação da suscetibilidade a tais movimentos, principalmente escorregamentos. Dentre os autores dedicados à aplicação de modelos matemáticos, podem-se citar os estudos de realizados por Montgomery & Dietrich (1994) no Vale do Tennessee, Califórnia; Vieira (2007) na região da Serra do Mar, SP; Fernandes (2001), no maciço da

Tijuca e Serra dos Órgãos, RJ; Sbroglia (2015) na região do Vale do Itajaí, SC, entre outros.

Metodologias fundamentadas em modelos matemáticos possibilitam a inserção de dados de entrada e formulações complexas para identificar de maneira automática as áreas suscetíveis a escorregamentos. Outra vantagem dos modelos matemáticos é que eles diminuem a subjetividade das análises empíricas baseadas apenas no ‘olhar’ do técnico ou pesquisador. Com isso, tais modelos têm sido avaliados para aplicação no âmbito do planejamento urbano com o intuito de prevenir desastres socioambientais.

Recentemente, o Ministério das Cidades, por meio da Secretaria Nacional de Acessibilidade e Programas Urbanos, em parceria com diferentes universidades federais do Brasil, vem promovendo o desenvolvimento de metodologias de elaboração de cartas de aptidão à urbanização, voltadas à prevenção de desastres naturais, e a sua aplicação em vários municípios brasileiros. A Universidade Federal de Santa Catarina integra essa parceria com o Ministério das Cidades com o projeto intitulado ‘Elaboração de cartas de aptidão frente aos desastres naturais nos municípios de Blumenau, Brusque, Botuverá, Rodeio, Timbó, Itajaí, Camboriú e Balneário Camboriú’. O objetivo desse projeto consiste em indicar as áreas passíveis de expansão urbana no perímetro urbano desses municípios, considerando a suscetibilidade a escorregamentos e inundações. Como metodologia para a localização das áreas suscetíveis, ele utiliza metodologias de mapeamento geotécnico e aplicação de modelos matemáticos apoiados em bases físicas.

2 OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa é determinar a distribuição espacial das áreas suscetíveis a escorregamentos no setor norte do Município de Blumenau, SC.

Visando atingir o objetivo geral da pesquisa, foram estabelecidos as seguintes etapas metodológicas:

- Identificar as características físicas, considerando os aspectos geológicos, geomorfológicos e geotécnicos;
- Elaborar mapa de cicatrizes de escorregamentos e respectivas áreas de ruptura, para avaliação dos resultados e validação;
- Elaborar mapa com unidades geotécnicas e identificar as unidades geotécnicas de maior ocorrência de escorregamentos;
- Diagnosticar o comportamento mecânico dos solos nas unidades geotécnicas;
- Determinar o grau de suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos das unidades geotécnicas usando modelos de suscetibilidade;
- Verificar a validade dos modelos de suscetibilidade gerados;
- Comparar a eficácia de modelos gerados pelas distintas unidades geotécnicas;
- Elaborar mapa de suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos, indicando as áreas de alta, média e baixa suscetibilidade.

3 JUSTIFICATIVA

Desde o início de sua fundação, o município de Blumenau convive com os impactos ocasionados por fenômenos naturais, tais como enxurradas, inundações, movimentos de massa e principalmente enchentes. Registros históricos cedidos pela Prefeitura Municipal mostram que desde o ano de 1852, dois anos após a fundação da Cidade de Blumenau, esses fenômenos naturais vêm sendo recorrentes, com frequência de 1 evento a cada 1 ano e meio (Tabela 1).

Nos dias 23 e 24 de novembro de 2008, em decorrência dos 283 mm de chuva registrada em 24h, desencadearam-se, além das típicas inundações, numerosos e generalizados escorregamentos nas encostas, ocasionando 24 fatalidades, 2.383 feridos, 5.209 desabrigados e vultosos prejuízos econômicos e sociais para o município (SINPDEC, 2008).

As graves consequências desses fenômenos são reflexos das características intrínsecas aos aspectos geográficos das encostas do município que favorecem a ocorrência de escorregamentos, associados ao processo de desenvolvimento econômico e expansão urbana municipal. A Figura 1 mostra algumas das consequências ocorridas durante o evento de novembro de 2008 no Município de Blumenau.

Figura 1. Escorregamentos em área urbana do município de Blumenau no episódio de novembro de 2008.



Fonte: Arquivo da Prefeitura Municipal de Blumenau, 2008.

Dentro deste contexto, a caracterização e localização das áreas suscetíveis à ocorrência desses fenômenos são imprescindíveis para a prevenção e mitigação dos danos referentes a desastres socioambientais no município de Blumenau. O mapeamento de áreas suscetíveis à ocorrência de escorregamentos usando modelagens específicas é uma alternativa amplamente utilizada na análise desses fenômenos naturais.

Julga-se oportuno realizar esta pesquisa, voltada à delimitação de áreas de suscetibilidade a escorregamentos no setor norte do município de Blumenau, pois, nessa área, foram mapeadas 103 cicatrizes de escorregamentos, a maioria delas relacionada ao evento de novembro de 2008. Como a área foi objeto de recente mapeamento por equipe do projeto ‘Elaboração de cartas de aptidão frente aos desastres naturais nos municípios de Blumenau, Brusque, Botuverá, Rodeio, Timbó, Itajaí, Camboriú e Balneário Camboriú’, utilizaram-se os dados levantados inclusive pela autora, que integra essa equipe para o desenvolvimento desse projeto.

4 CONTEXTO GEOGRÁFICO DA ÁREA DE ESTUDOS

A seguir, serão apresentadas as características gerais de localização e socioeconômicas do município de Blumenau, contexto onde está inserida a área de estudo desta pesquisa. Seguem demonstrados os principais eventos relacionados a desastres naturais que ocorreram no período de 1980 a 2017. Além disso, serão expostas as principais ações de previsão, prevenção e preparação a desastres naturais, ou seja, como o município aprendeu, com as experiências, a lidar com os fenômenos naturais que são frequentes em seu território.

Cabe ressaltar que uma caracterização mais detalhada da área de estudos foi objetivo desta dissertação e será apresentada no Capítulo 7.1.

4.1.1 Aspectos gerais do município de Blumenau

O Município de Blumenau está localizado na porção nordeste do Estado de Santa Catarina, na região do médio vale do Itajaí, de grande relevância ao estudo de desastres socioambientais (Mapa 1).

A região da bacia do rio Itajaí apresenta alta suscetibilidade e vulnerabilidade frente aos desastres e recorrentes catástrofes geradas por inundações, movimentos de massa e enxurradas (MATTEDI et al., 2009). As características naturais e sociais intrínsecas à área justificam a suscetibilidade e vulnerabilidade presentes na região.

O território do município de Blumenau compreende 518,497 km² de extensão, divididos pelo rio Itajaí-Açu que segmenta o município em dois setores (norte e sul) com características geológicas, geomorfológicas e topográficas bastante distintas.

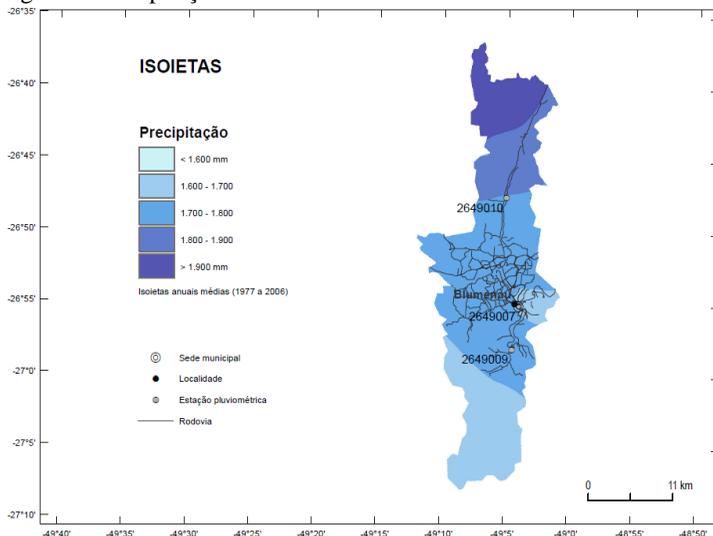
Sob o ponto de vista geológico e geomorfológico, o território do município compreende as rochas do Complexo Luiz Alves, predominantemente no setor norte do município, caracterizadas por gnaisses e rochas máficas e ultramáficas. As rochas do Complexo Ribeirão da Prata, Complexo Brusque e do Grupo Itajaí ocorrem no sul do município. Destas três estruturas geológicas, tem expressão o Complexo Ribeirão da Prata, formado por migmatitos, biotita gnaisses e anfibólitos gnaisses máficos (WILDNER et al., 2014). O Grupo Itajaí é representado por associações de rochas vulcano-sedimentares sub-horizontais ou com baixa inclinação do acamadamento, com predominância de conglomerados arenitos arcoseanos e espessos pacotes de camadas rítmicas de arenitos finos e folhelhos (ardósias) de baixo grau metamórfico (AUMOND, 2009).

No sul de Blumenau, a tectônica, o sistema de fraturas, a morfologia do terreno, somados ao avançado estado de alteração dessas rochas, tornam algumas áreas inadequadas à ocupação humana, por serem áreas com risco de escorregamentos. Já o setor norte de Blumenau, onde afloram os gnaisses, a morfologia é suavizada e os vales assumem a forma de “U” aberto, formando planícies com centenas de metros de largura, principalmente próximas ao rio Itajaí-Açu e ribeirão Itoupava. Pela sua morfologia, constituição geológica e ausência de cheias periódicas, constitui área com vocação para expansão urbana (AUMOND, 2009).

Frequentemente, a região do Vale do Itajaí é afetada por sistemas atmosféricos que geram chuvas intensas e ocasionam os recorrentes episódios de inundações, enxurradas e escorregamentos. Nery, Baldo e Martins (2000) observaram uma maior concentração de chuva nos meses de dezembro, janeiro, fevereiro e março. Já os meses de outubro, dezembro, janeiro, fevereiro e março apresentaram maiores quantidades de dias chuvosos e os meses de maio, junho e julho tiveram menor precipitação. Silva e Severo (2009) complementam indicando que a precipitação de origem convectiva predomina no verão, enquanto que a frontal é frequente no inverno e, principalmente, na primavera.

No município de Blumenau, os meses de novembro e fevereiro apresentaram a maioria dos registros de desastres naturais, incluindo enxurradas, inundações e escorregamentos (SINPDEC, 2017). A média das precipitações anuais em Blumenau situa-se em 1.610 mm (Figura 2)

Figura 2. Precipitações médias anuais.



Fonte: CPRM e IPT (2004).

As quantidades de precipitação da região do Vale do Itajaí nos períodos chuvosos não definem o grau de cheias, mas sim as características quantitativas da duração e extensão, correlacionadas ao tempo, área e intensidade (FRAGA, 2000). Destaca-se que as condições topográficas do relevo, da vegetação e da ação antrópica favorecem a ocorrência das inundações e movimentos de massa no município.

Fundada em 1850, por imigrantes alemães, Blumenau concentra hoje uma população de aproximadamente 309.011 habitantes, sendo que 95,39% da população reside em situação domiciliar urbana (BRASIL, 2010).

Com limitado espaço plano livre das inundações, as áreas de encostas íngremes e inseguras do ponto de vista geotécnico estão sendo densamente ocupadas, principalmente no setor norte do município. Especialmente após a década de 70, período em que o município passou por intenso processo de crescimento populacional, os riscos de escorregamentos tornaram-se mais evidentes (VIEIRA, 2004). A Figura 3 exemplifica a situação demonstrada acima, em que é possível notar a ocorrência de um deslizamento, ainda ativo, no bairro Itoupava Norte e a tentativa da prefeitura na contenção da encosta.

Figura 3. Áreas suscetíveis a escorregamentos, densamente urbanizadas.



Fonte: própria autora.

Fonte: própria autora.

A implantação das edificações está condicionada a cortes e aterros que muitas vezes são realizados de forma inadequada à estrutura geológica existente no local, potencializando os escorregamentos. Em geral, são realizados cortes de terreno, terraplanagem, gerando um problema de instabilidade agravado ainda pela geração de escoamentos superficiais e subsuperficiais da água, seja da precipitação ou de outra fonte, como lançamento de esgotos domésticos ou vazamentos de água potável (VIEIRA et al., 2005).

4.1.2 Contexto histórico em desastres naturais

Desde o início de sua fundação¹, o município de Blumenau convive com os impactos ocasionados por fenômenos naturais, tais como enxurradas, inundações, movimentos de massa e principalmente enchentes (VIEIRA; JANSEN; POZZOBON, 2016). Registros históricos do município mostram que desde o ano de 1852, dois anos após a fundação da Cidade de Blumenau, este problema é frequente, tendo recorrência média de 1 cheia a cada 2 anos aproximadamente (ZIMMER et al., 2012).

Em julho de 1983 ocorreram 2 enchentes consecutivas que duraram 31 dias. No ano seguinte, o evento voltou a ocorrer, porém, de maior intensidade e menor duração. A Tabela 1 mostra os registros das

¹ Fundada em 1850 pelo filósofo e farmacêutico alemão Hermann Bruno Otto Blumenau.

maiores enchentes ocorridas no município de Blumenau do ano de 1852 a 2011. Merece destaque o evento pluviométrico de outubro de 1990, que mesmo não tendo sido obtida a medição da cota do rio, provocou enxurrada, ocasionando a morte de 21 pessoas na região sul do município (ZIMMER et al., 2012).

Tabela 1 Registros das maiores enchentes ocorridas no município de Blumenau e o respectivo nível do rio medido na régua (m).

ANO	COTA DO RIO (m)	ANO	COTA DO RIO (m)
1852	16,30	1954	12,18
1855	13,30	1957	13,02
1868	13,30	1961	12,38
1880	17,10	1973	12,14
1888	12,80	1975	12,50
1891	13,80	1980	13,25
1898	12,80	1983	15,34
1900	12,80	1984	15,46
1911	16,90	1992	12,80
1927	12,30	2008	11,52
1928	11,76	2011	12,60
1933	11,85		

Fonte: Arquivo da Prefeitura Municipal de Blumenau.

Passados 6 anos do evento de 1983 e por ocasião da ocorrência de frequentes enchentes e inundações, foi criada, em 1989, a Secretaria de Defesa do Cidadão, que, a partir desse ano, iniciou diversas ações para minimizar as perdas ocasionadas pelas chuvas, tais como estabelecimento de padrões e procedimentos em situações de desastres, elaboração do plano de contingência e preparo de lideranças comunitárias. Atualmente, sob a coordenação de Carlos Olimpio Menestrina², é o órgão responsável por todo o gerenciamento do risco a desastres naturais no Município, estruturando diversas ações de previsão e prevenção.

² Carlos Olimpio Menestrina, atualmente assume o cargo de Secretário de Defesa do Cidadão.

Uma das maiores catástrofes relacionadas a escorregamentos foi registrada em todo o território do município no mês de novembro de 2008, quando foram totalizadas 24 vítimas fatais, 103.000 afetados indiretos e 27.893 pessoas atingidas por danos humanos (desabrigados, desalojados, deslocados) (SINPDEC, 2008). Nessa ocasião, diversos recordes pluviométricos foram quebrados na região do Vale do Itajaí, litoral Norte e na Grande Florianópolis no mês de novembro. Em Blumenau, por exemplo, foi registrado um total de 1.002 mm, do dia 1º ao dia 27 de novembro, sendo que o recorde anterior obtido foi de 281,8 mm, registrados no ano de 1961 (CEPED, 2009).

4.1.3 Ações de previsão e prevenção a desastres naturais

Dentre as ações de monitoramento executadas pela Prefeitura Municipal, destaca-se o sistema *AlertaBlu*, um sistema de previsão e monitoramento do tempo que disponibiliza para a população informações sobre o nível do rio e sobre a quantidade de precipitação em tempo real *website*³ e também por meio de um aplicativo para smartphone (Figura 4). As informações disponibilizadas por esses mecanismos são coletadas nas 15 estações pluviométricas distribuídas pelo Município.

³*Website* de acesso ao sistema 'AlertaBlu'
<http://alertablu.cob.sc.gov.br/p/detalhada>

Figura 4. Layout do Sistema AlertaBlu.

The screenshot shows the AlertaBlu web interface. The main section displays a weather forecast for Blumenau for the next 24 hours, broken down by day and time (Manhã, Tarde, Noite, Madrugada). It includes icons for weather conditions, cloud cover, precipitation, wind, and temperature. A sidebar on the right shows the 'Situação Atual' (Current Situation) for the Itajaí-Açu river, indicating a 'Vigilância' (Monitoring) status. Below the main forecast, there are sections for 'Mínima & Máxima' (Minimum & Maximum) and 'Tábua de Marés' (Tide Table).

	05/08/2016 Manhã	05/08/2016 Tarde	05/08/2016 Noite	06/08/2016 Madrugada
Condição do Tempo				
Céu	Litocúmbio	Nublado a Parcialmente Nublado	Nublado a Parcialmente Nublado	Parcialmente Nublado
Precipitação	Sem Chuva	Sem Chuva	Sem Chuva	Sem Chuva
Vento	Fraco de E/SE	Fraco de E/SE	Fraco a Moderado de W/NW	Fraco de NW
Temperatura	Elevação	Elevação	Estável	Estável
Mínima & Máxima	Dia: 05/08/2016 — Mín.: 17 °C / Máx.: 24 °C			
Tábua de Marés	Baixa: 0,2m às 05:00/2016 08:02			
	Alta: 1,1m às 05:00/2016 16:00			
	Baixa: 0,3m às 05:00/2016 20:19			
	Alta: 1,1m às 06:00/2016 03:57			

Fonte: Blumenau (2017).

Quando as condições meteorológicas indicam a alta probabilidade de chuvas intensas sobre o município, é emitido um aviso em função da intensidade da chuva esperada em cada localidade. Os 4 estágios de monitoramento são Vigilância, Atenção, Alerta e Alerta Máximo (Figura 5).

Figura 5. Avisos emitidos pelo Sistema AlertaBlu.

Previsão de Chuva para as Próximas Horas	
Estado	Descrição
Vigilância	Situação em que não há previsão de chuva ou previsão de chuva fraca nas próximas horas. Os operadores realizam apenas monitoramento das condições meteorológicas.
Atenção	Previsão de chuva moderada, ocasionalmente forte, nas próximas horas. Neste estágio os operadores do AlertaBlu estão em constante comunicação com os órgãos municipais que atuam nas situações de chuva.
Alerta	Previsão de chuva forte nas próximas horas, podendo causar alagamentos e deslizamentos isolados. Nesta situação são emitidos boletins de alerta à população (via imprensa e site do AlertaBlu).
Alerta Máximo	Previsão de chuva muito forte nas próximas horas podendo causar alagamentos e deslizamentos generalizados. Este estágio é acionado nas situações em que o Sistema já se encontra em estágio de Alerta e há a previsão de intensificação da chuva.

Fonte: Prefeitura Municipal Blumenau (2017).

O estágio de Atenção é acionado quando o nível do rio Itajaí-Açu chega a 4m na régua de medição, o estágio de Alerta é com 6m. Nesta fase já é acionado o Grupo de Resposta e Ações Coordenadas – GRAC.

Com 8m, o Alerta Máximo é emitido e inicia-se a mobilização dos abrigos.

O Sistema AlertaBlu também informa as seguintes probabilidades de ocorrência de escorregamentos quando a rede de pluviômetros detecta valores de chuva que ultrapassam limites preestabelecidos (Figura 6).

Figura 6. Critérios para a emissão de alertas de escorregamentos.

Probabilidade de Escorregamento	
Estado	Descrição
Baixa	Possibilidade de ocorrências de escorregamentos circunstanciais (movimentos de massa não deflagrados diretamente pela ação das chuvas, tendo como agente de maior importância uma circunstância localizada relacionada a efeitos naturais ou antrópicos, como por exemplo, rompimento de tubulações, dilatações térmicas, vibrações, etc).
Média	Possibilidade de ocorrências de escorregamentos ocasionais (movimentos de massa deflagrados pelas chuvas, predominantemente em taludes artificiais (corte e/ou aterro), com distribuição pouco expressiva).
Alta	Ocorrência de escorregamentos esparsos (movimentos de massa deflagrados pelas chuvas em taludes naturais e artificiais, com moderada a grande distribuição).
Muito Alta	Ocorrência de escorregamentos generalizados (movimentos de massa deflagrados pelas chuvas em taludes naturais e artificiais, com distribuição muito grande, especialmente nas vias que cortam os maciços montanhosos).

Fonte: Prefeitura Municipal de Blumenau (2017).

Como ações de prevenção, a Secretaria implantou o Programa Defesa Civil na Escola e Programa Agente Mirim objetivando atingir uma mudança cultural na percepção de risco em crianças de 10 escolas do Município. A Secretaria realiza treinamentos dos NUDESC - Núcleos Comunitários de Defesa Civil e organiza simulados anualmente.

O Município conta com um plano de contingência (BLUMENAU, 2017a) atualizado anualmente que se torna ferramenta indispensável e confiável para que a população e agentes de entidades saibam como agir diante de um evento catastrófico. A cada nível do rio são estabelecidas ações que devem ser executadas por cada uma das entidades governamentais e não governamentais que têm acesso ao plano. Existem 60 abrigos cadastrados e um número de 600 voluntários cadastrados no plano de contingência.

O Município conta com parceria do governo federal na implantação de prismas para monitoramento de movimentos de massa. O aparelho detecta cada movimentação do solo, quando há deslocamento de 2mm, o laser é acionado e emite alerta para a Central da Defesa Civil. Além disso, o município foi alvo das pesquisas do “Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Riscos em Desastres Naturais”, denominado GIDES, convênio estabelecido entre o Governo brasileiro e o Japão.

A aplicação de modelos com bases físicas, como os que foram aplicados nesta pesquisa, podem auxiliar na determinação mais precisa dos limiares de chuva necessários para ocorrência de rupturas, melhorando desta forma os sistemas de alertas de escorregamentos já existentes.

5 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

5.1 MOVIMENTOS DE MASSA NO BRASIL

No Brasil, eventos extremos têm sido frequentes, em especial na região sul do país, que ganha destaque para a ocorrência destes fenômenos.

Por suas características geográficas, o país tem presenciado além das típicas inundações provocadas por chuvas intensas nos vales dos principais rios, grandes eventos de movimentos de massa que têm provocado sucessivas perdas sociais e econômicas. Aliada a isto, a crescente urbanização permite que áreas frágeis do ponto de vista natural sejam ocupadas, o que acaba por incrementar a vulnerabilidade daquela população.

Eventos extremos desta magnitude nos últimos anos têm sido recorrentes no país (Tabela 2). Entre 23 e 29 de dezembro de 1995, o Sul de Estado de Santa Catarina foi atingido por enchentes iniciadas por uma catástrofe que atingiu três vales nos municípios de Jacinto Machado, Timbé do Sul e Siderópolis. Em abril de 2010, os Municípios de Niterói e Rio de Janeiro/RJ sofreram com inundações e, em 2011, novamente o Estado do Rio de Janeiro foi atingido por outra catástrofe, desta vez na região serrana, afetando 141 cidades. A recorrência desses eventos demonstra a importância das pesquisas e a necessidade de melhor conhecer os fenômenos.

Tabela 2. Principais eventos relacionados a movimentos de massa no Brasil.

1928	Santos (SP)	60 mortes e destruição parcial da Santa Casa
1948	Vale do Paraíba (SP/RJ)	250 mortes e destruição de centenas de casas
1956	Santos (SP)	43 mortes e destruição de 100 casas
	Rio de Janeiro (RJ)	100 mortes
1967	Serra das Araras (RJ)	1200 mortes e destruição de centenas de casas
	Caraguatatuba (SP)	120 mortes e destruição de 400 casas
1971	Salvador (BA)	104 mortes e milhões de desabrigados
1972	Campos do Jordão (SP)	Mais de 10 mortes e destruição de 60 casas
1974	Tubarão (SC)	40 mortes e destruição de casas, pontes e vias
1986	Lavrinhas (SC)	11 mortes e destruição de casas e pontes
1988	Cubatão (SP)	10 mortes
	Petrópolis (RJ)	171 mortes e 1100 desabrigados
	Rio de Janeiro (RJ)	Mais de 30 mortes e destruição de casas
1989	Salvador (BA)	100 mortes e destruição de dezenas de casas
1990	Blumenau (SC)	10 mortes, destruição de casas, pontes e vias
1992	Contagem (MG)	36 mortes, destruição de moradias e centenas de desabrigados
1995	Timbé do Sul (SC)	29 mortes, destruição de dezenas de plantações, edificações, pontes e vias
2001	Petrópolis (RJ)	65 mortes, 300 famílias afetadas e centenas de casas destruídas
2008	Santa Catarina, principalmente o Vale do Itajaí.	135 mortes, 78 mil desabrigados, 4 mil escorregamentos, milhares de casas destruídas e destruição da infraestrutura
2010	Niterói (RJ)	85 mortos, 50 casas destruídas no Morro do Bumba
	Angra dos Reis (RJ)	54 mortes, 1207 casas destruídas e 2284 pessoas desalojadas
2011	Teresópolis, Nova Friburgo, Petrópolis,	830 mortes, 9.988 desabrigados e 91.867 pessoas afetadas

	Sumidouro e São José do Vale do Rio Preto (RJ)	
	Blumenau (SC)	260 pessoas desalojadas, 20 famílias desabrigadas e 1 óbito registrado
	Ilhota (SC)	204 pessoas desalojadas, 112 deslocadas e 4.132 pessoas afetadas
2013	Petrópolis (RJ)	4.000 pessoas deslocadas

Atualizado por Raíza Sartori Peruzzo - Modificado de Marcelino (2003); Vieira e Gramani (2015).

O Estado de Santa Catarina é comumente afetado por adversidades climáticas, especialmente aquelas relacionadas aos episódios pluviiais intensos. O Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina, organizado por Herrmann (2007), aponta os principais eventos que atingiram o Estado durante o período de 1980 a 2010, em que se destacam as inundações acompanhadas por escorregamentos. Os anos de 1991, 1995 e 2008 foram marcados por episódios de intensas chuvas, aliadas a escorregamentos que causaram grandes impactos nas serras do Leste Catarinense, na serra Geral e na região do vale do rio Itajaí. Após o desastre de novembro de 2008, intensificaram-se os estudos envolvendo movimentos de massa e inundações, especialmente no vale do Itajaí.

O funcionamento e a aplicação de políticas públicas não têm conseguido acompanhar o ritmo acelerado do crescimento populacional, permitindo que cada vez mais áreas suscetíveis sejam ocupadas. Soma-se, ainda, a falta de conhecimento técnico ou a recusa por parte dos entes públicos para a aplicação de estudos que constantemente têm sido desenvolvidos dentro das universidades e institutos técnicos do país.

No ano de 2012 com a regulamentação da Lei 12.608 que instituiu a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC (BRASIL, 2012), o país oficializou a necessidade de legislar sobre desastres naturais e colocar estados e municípios na obrigatoriedade de criar medidas preventivas e mitigatórias aos impactos dos desastres naturais. Dentre as diversas recomendações, está a necessidade de “promover a identificação e avaliação das ameaças, suscetibilidades e vulnerabilidades a desastres, de modo a evitar ou reduzir sua ocorrência” (BRASIL, 2012), e elaborar “carta geotécnica em municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de escorregamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos” (BRASIL, 2012). O que chama a atenção é que grandes desastres já vinham prejudicando econômica e

socialmente o país antes da oficialização da lei, evidenciando a maneira deficitária do país em lidar com a prevenção de desastres naturais.

A dificuldade para previsão da ocorrência de movimentos de massa tem demandado intenso esforço de engenheiros, geógrafos, geólogos, entre outros profissionais das ciências naturais, na tentativa de compreender o funcionamento destes fenômenos e os fatores que influenciam sua ocorrência.

Escorregamentos em encostas naturais ou modificadas representam fenômenos que repercutem na comunidade científica questões como os fatores condicionantes de instabilidade, e as soluções que devem ser tomadas para a prevenção ou mitigação.

As dificuldades enfrentadas para o conhecimento/domínio dos fatores que desencadeiam escorregamentos, suas causas e consequências, faz com que esses eventos sejam tratados, principalmente pelas instituições públicas e de gestão, como uma situação inesperada. Ocorrendo sem que se esteja preparado, resta apenas utilizar-se de mecanismos para a normalização da situação, por meio da reconstrução. Mesmo que apresentando baixa frequência, esses fenômenos voltam a ocorrer e, novamente, sem que a sociedade esteja preparada. Mostra-se de extrema importância o investimento de vultosos recursos, não apenas para a reconstrução, mas também para as etapas de previsão e preparação.

Diversos fatores geológicos, climáticos e ecológicos influenciam nos processos geomorfológicos de movimentos de massa. A combinação desses fatores, que se apresentam cada um deles com sua própria dinâmica, influenciam também de formas distintas a suscetibilidade ao intemperismo, erosão e consequente ruptura (SELBY, 1993).

Entender como funciona a dinâmica das paisagens e suas mudanças é uma parte indispensável para o total entendimento do sistema natural e proporciona conhecimentos que melhoram o gerenciamento de políticas de infraestrutura e urbanização.

5.2 TIPOLOGIA DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Conhecer os fenômenos envolvidos, sua tipologia e mecanismos faz parte do entendimento da dinâmica das paisagens e compreende uma parte fundamental para os estudos que envolvem os desastres socioambientais.

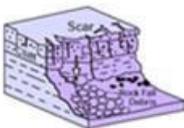
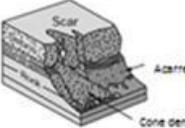
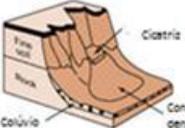
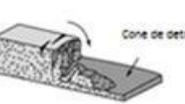
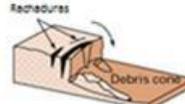
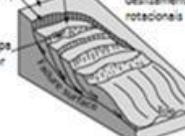
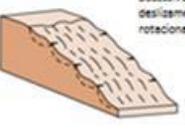
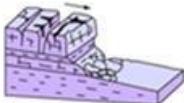
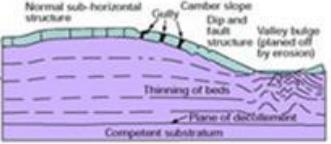
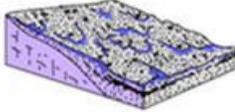
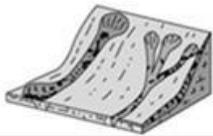
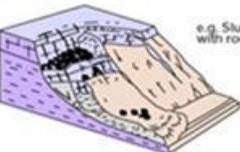
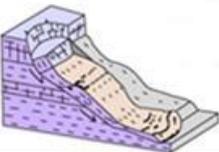
O entendimento dos mecanismos de movimentos de massa e suas diversas classificações é uma tarefa complexa de ser realizada, pelo fato de serem fenômenos da natureza em constante transformação, além da

grande variedade de materiais, processos e fatores que condicionam as rupturas.

Neste trabalho será realizada uma caracterização geral dos movimentos de massa levando em consideração a classificação proposta por Varnes (1978). Os escorregamentos, por se tratarem do objeto de estudo, serão caracterizados de forma mais detalhada nesta pesquisa.

A classificação dada por Sharpe (1938) foi a pioneira de amplo aceite, servindo como base para os outros trabalhos posteriores. Correlaciona o tipo e a velocidade de movimentação com a natureza do material em movimento. Por ter sido desenvolvida para ambientes de condições climáticas rigorosas, de acordo com Guidicine & Nieble (1984), dificilmente podem ser utilizadas no meio físico brasileiro. Já as propostas por Freire (1965), Vargas (1966) e Costa Nunes e Hunt (1979) são voltadas à classificação de movimentos de massa em ambiente tropical e subtropical úmido, como é o caso do meio físico brasileiro. Ainda assim, a proposta de classificação de Varnes (1978), mesmo que internacional, continua sendo a mais difundida no Brasil. Diferente de Sharpe (1938), esta se baseia apenas no tipo de movimento e do material transportado, tornando-a simplificada e de fácil entendimento e reconhecimento em campo. A Figura 7 contém os tipos básicos de movimentos de massa.

Figura 7. Tipos básicos de movimentos de massa.

Material	Rocha	Detritos	Terra
Tipo de movimento			
Quedas			
Tombamentos			
Escorregamento	Rotacional 		
	Translacional 		
Dispersão (Spreads)			
Fluxos			
Complexos			

Fonte: Highland (2008).

Quedas ou tombamentos é a movimentação de solo ou rocha em alta velocidade e em queda livre ou em um plano inclinado. As quedas de solo ou de rochas geralmente envolvem uma pequena quantidade de material se comparadas aos escorregamentos e fluxos. Decorrem das ações de intemperismo e abertura de fissuras nas rochas, resultantes de pressões hidrostáticas nas fraturas (CHRISTOFOLETTI, 1980; SELBY, 1993; PRESS et al., 2006 GERSCOVICH, 2012;).

Os rastejos descrevem os movimentos que, apesar de lentos, mobilizam qualquer tipo de material, como solo e rocha. Deslocam grande quantidade de massa em velocidades muito baixas (mm a cm/ano), sendo a energia destrutiva menor que a dos demais tipos. Esse movimento pode ser facilmente identificado pela mudança na verticalidade das árvores, postes e muros (SELBY, 1993; BRASIL, 2007).

Os fluxos ou corridas de massa correspondem a formas rápidas de escoamento de fluidos viscosos que, apesar de acontecerem com menor frequência que os escorregamentos, causam danos muito maiores, isto porque mobilizam junto com a água um grande volume de material fornecido pelos escorregamentos já ocorridos na encosta (SELBY, 1993; PRESS et al., 2006). Dependendo da viscosidade e do material transportado, assumem características de corridas de lama ou corrida de detritos. Denomina-se de corrida de lama o material deslizado com elevado teor de água, de extrema fluidez e é geralmente produzida pela ação de remoção dos solos pelo curso d'água durante longos períodos de chuva; nas corridas de detritos, o material é mais grosseiro, transportando rochas de vários tamanhos.

5.2.1 Escorregamentos

Os escorregamentos são movimentos rápidos (m/h a m/s) e de curta duração de uma massa do terreno conhecida quanto a seu volume, e ocorrem sob uma superfície de ruptura bem definida. Tanto em materiais rochosos ou em solos, a ruptura ocorre na superfície de menor resistência, quando as forças atuantes superam as forças resistentes. A forma da superfície de ruptura permite distinguir os movimentos em translacionais ou rotacionais (FERNANDES E AMARAL, 2003; GUIDICINI E NIEBLE, 1976). Os primeiros sinais deste tipo de movimento são rachaduras na superfície original do terreno ao longo da qual a principal escarpa do deslizamento se formará (CARVALHO et al., 2007).

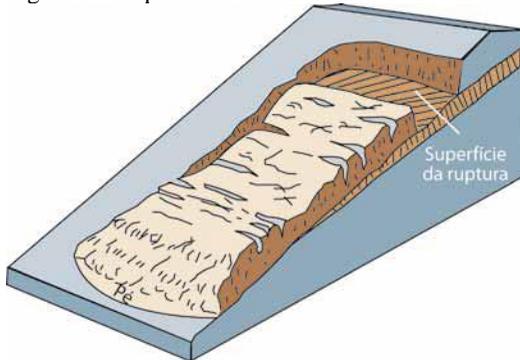
A Classificação e Codificação Brasileira de Desastres (COBRADE) considera os escorregamentos como movimentos de massa de tipo geológico e considera apenas o tipo de material para sua

classificação. Ela englobará os escorregamentos de solo e/ou rocha. Autores, como Guidicine e Nieble (1976), Brasil (2007), Varnes (1978) e Fernandes e Amaral (2003), trazem classificações que consideram a superfície de ruptura, o tipo de material e a velocidade do deslocamento.

5.2.1.1 Escorregamentos translacionais

Escorregamentos translacionais são os movimentos mais comumente encontrados nas encostas. Estes movimentos são rasos e apresentam planos de ruptura essencialmente retos, que geralmente se desenvolvem ao longo de um limite entre os materiais do solo de diferentes densidades ou permeabilidade ou entre o horizonte de contato de solo e rocha (SELBY, 1993). A Figura 8 mostra um esquema de deslizamento translacional.

Figura 8 - Esquema de deslizamento translacional.



Fonte: Highland (2008).

Nos escorregamentos translacionais, o volume de solo se desloca para fora e para baixo do talude ao longo de uma superfície planar ou suavemente ondulada (VARNES, 1978). A superfície de ruptura planar é controlada pelas estruturas geológicas, geomorfológicas e pedológicas do terreno, tais como falhas, fraturas, foliações, planos de acamamento e variações na resistência de cisalhamento entre as camadas de solo, ou ainda pelo contato do solo com a rocha que origina importante descontinuidade mecânica e hidrológica.

Tais escorregamentos desenvolvem-se em solos pouco espessos de encostas com declividades altas. Eles são mais extensos e o comprimento é superior à largura (GUIDICINE & NIEBLE, 1976).

Esses movimentos deixam cicatrizes alongadas e rasas, já que o plano de ruptura se encontra, geralmente, em profundidades rasas. Além disso, as rupturas tendem a ocorrer rapidamente por causa do aumento da poropressão positiva durante os eventos pluviométricos (FERNANDES E AMARAL, 2003).

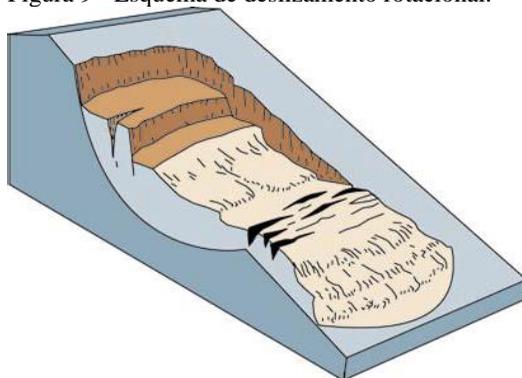
Esses tipos de escorregamentos são mais frequentes, principalmente no sudeste e sul do Brasil durante períodos de intensa precipitação, característicos dessas regiões.

5.2.1.2 Escorregamentos rotacionais

Escorregamentos rotacionais estão geralmente associados a pacotes de solo ou depósitos mais espessos em comparação aos escorregamentos translacionais. O volume de material movimentado é depositado em forma de ‘barriga’ na parte inferior podendo mobilizar a infraestrutura ali localizada.

O movimento ocorre ao longo de uma superfície de ruptura curvada e côncava para cima, apresentando diversas rupturas sucessivas e concêntricas que coincidem com a direção do movimento. A superfície de ruptura, mais as escarpas expostas, é semelhante ao formato de uma colher (VARNES, 1978; FERNANDES E AMARAL, 2003; BRASIL, 2003). A Figura 9 mostra um esquema de deslizamento rotacional.

Figura 9 - Esquema de deslizamento rotacional.



Fonte: Highland (2008).

5.3 AGENTES E MECANISMOS CONDICIONANTES DOS MOVIMENTOS DE MASSA

São diversos os agentes condicionantes de ruptura aos quais as encostas estão suscetíveis, tanto por causas internas e intrínsecas quanto por causas externas. A forma de atuação de determinado agente condicionante chama-se causa, e um mesmo agente condicionante pode atuar de diferentes maneiras na instabilidade de uma encosta. Guidicini e Nieble (1976) fazem uma distinção dos agentes, entre *predisponentes* e *efetivos*.

As condições naturais, como a componente geológica, presença de falhas, fraturas nas rochas, a morfologia do terreno, o clima, hidrologia, tipo de cobertura vegetal, podem ser chamadas, segundo os autores, de *agentes predisponentes*. Estes agentes fornecem as condições, mas não são responsáveis diretamente pela ocorrência da ruptura. Em uma situação hipotética em que duas encostas de localizações distintas apresentam características naturais idênticas, como por exemplo, o mesmo complexo geológico, ângulo de declividade, elas podem, mesmo assim, apresentar diferentes causas de ruptura ou, ainda, uma delas se manter estável.

Os agentes efetivos atuam de forma mais direta na ocorrência dos movimentos de massa. Eles são os episódios intensos de precipitação, erosão pela água ou vento, congelamento e degelo, oscilações térmicas, retirada da vegetação e as ações antrópicas (GUIDICINI E NIEBLE, 1976).

As causas podem ser internas, ou seja, não são verificadas alterações nas condições geométricas do talude que resultem de uma diminuição nas forças de resistência interna dos materiais constituintes. De outra parte, há também as forças externas, que promovem um aumento das tensões cisalhantes, sem alterar as condições de resistência. O aumento das forças de cisalhamento e a diminuição das forças de resistências são os mecanismos responsáveis pelas rupturas nas encostas (Quadro 1).

Quadro 1. Fenômenos atuantes na instabilidade das encostas.

Mecanismos	Causas	Agentes geológicos/antrópicos
Aumento da tensão cisalhante	Remoção de suporte lateral ou de base	Erosão
		Escorregamentos
		Cortes
	Sobrecarga	Peso da água da chuva, neve, granizo, etc.
		Acúmulo natural de material (depósitos)
		Peso da vegetação
		Construção de estruturas, aterros, etc.
	Condições dinâmicas	Terremotos, ondas, vulcões, etc.
		Explosões, tráfego, sismos induzidos
	Pressões laterais	Água em trincas
Congelamento		
Material expansivo		
Redução da resistência	Características intrínsecas aos materiais	Características geomecânicas do material
		Descontinuidades e falhas
		Declividade
	Mudanças ou fatores variáveis	Alterações físico-químicas causadas pelo intemperismo
		Processos de deformação em decorrência de variações cíclicas de umedecimento e secagem
		Variação da poropressão
		Elevação do lençol freático
		Infiltração da água
		Fluxo preferencial através de trincas ou juntas

Fonte: Adaptado de Varnes (1978) e Gerscovich (2012).

Dentre os agentes condicionantes, a água é considerada o fator mais importante nos estudos de estabilidade das encostas. A atuação da água em episódios pluviométricos extremos, por exemplo, pode aumentar a tensão cisalhante pela contribuição do peso em que a água exerce no solo ou, ainda, pela ação da erosão removendo o suporte lateral ou de base. Ela também contribui para a diminuição das resistências, quando, por causa de suas características de redução da tensão capilar, tende a afastar os grãos ocasionando a perda da coesão e também a diminuição do atrito entre os grãos (SELBY, 1993).

A composição mineralógica da rocha pode alterar significativamente as condições de intemperismo e formação do manto de regolito que refletem nas características de coesão e ângulo de atrito do solo. Além disso, as estruturas inerentes às rochas, tais como fraturas, falhas, acamadamentos e descontinuidades, orientação ou inclinação das camadas, influenciam na velocidade e espessura do intemperismo. A água que infiltra pelos planos de fraturas de determinada rocha possibilita o desenvolvimento de zonas de intemperismo, condicionando a formação das descontinuidades mecânicas e alterando as propriedades de coesão e ângulo de atrito (FERNANDES E AMARAL, 2003). O intemperismo é mais rápido e mais profundo onde o sistema de diaclases é mais concentrado ou onde a rocha é menos resistente.

Falhas atuam como caminho preferencial de alteração, permitindo que a água e conseqüentemente o desenvolvimento do intemperismo avancem para o interior do maciço rochoso. Afetam diretamente a dinâmica hidrológica, criando fluxos subterrâneos que são os caminhos que a água percorre por entre as rochas. Esses caminhos também podem originar barreiras ao fluxo d'água (GUIDICINI e NIEBLE, 1976). Isso também acontece em rochas granítico-gnáissicas, onde a presença de diques básicos pode influenciar a dinâmica hidrológica, semelhante às falhas, podendo ocasionar a deflagração de escorregamentos (FERNANDES e AMARAL, 2003).

Os parâmetros topográficos, como inclinação e formas das encostas também constituem fatores importantes nos estudos de estabilidade das encostas. O ângulo de inclinação do talude pode influenciar na velocidade de deslocamento do material e também na diminuição do fator de segurança e conseqüente aumento da suscetibilidade à ruptura. No entanto, declividades extremamente elevadas desfavorecem os escorregamentos, uma vez que nestas declividades costuma haver somente pequenas espessuras de solo ou mesmo maciço rochoso. Em declividades inferiores, para que haja um deslocamento de solo, é necessária a presença de grande quantidade de água para ocasionar saturação do solo através do preenchimento dos vazios entre os grãos, diminuindo sua coesão e ângulo de atrito (FERNANDES e AMARAL, 2003).

A orientação das linhas de drenagem depende diretamente das formas das encostas. Assim, encostas côncavas ou convergentes tendem a acumular água e conseqüentemente aceleram a saturação do solo nessas áreas, acabando por apresentar maior probabilidade de ruptura. Nos *hollows* há uma tendência mais rápida de acumulação de material coluvionar e de fluxo d'água, tornando esses locais ainda mais propensos

aos processos de escorregamentos. Por outro lado, formas convexas estão potencialmente mais expostas à erosão do que as côncavas. Isso também pode facilitar as condições de ruptura.

Percebe-se a existência de inúmeros agentes que atuam e influenciam para a ocorrência de movimentos de massa, e um deslizamento, por exemplo, raramente está atribuído a apenas uma causa definida, ainda que seja possível identificar um efeito dominante ou a causa da ruptura (SELBY, 1993). Na maioria dos casos, as rupturas são ocasionadas por fatores que ocorrem simultaneamente, portanto, a tentativa de definir apenas um agente causador da ruptura é difícil e também incorreta (VARNES, 1978).

Em geral, a estabilidade de uma encosta é calculada pelo Fator de Segurança (FS). Ele indica a relação entre as forças de resistência e as forças cisalhantes que promovem o deslocamento do material.

$$\text{Fator de Segurança} = \frac{\text{Forças de resistência}}{\text{Forças cisalhantes}}$$

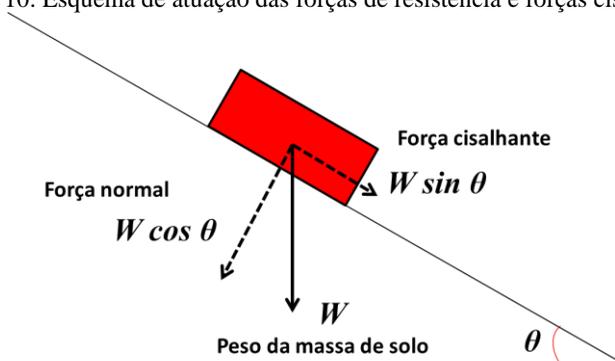
Quando as forças que promovem a estabilidade são exatamente iguais às forças que promovem a instabilidade ocorrem algumas reações: (i) se o FS = 1, a encosta encontra-se instável; (ii) se o FS < 1, a encosta está em condição de ruptura, as forças cisalhantes aumentam e/ou as forças de resistência diminuem; (iii) se o FS > 1, a encosta provavelmente está estável, ou seja, as forças que promovem a instabilidade são menores que as forças que promovem a resistência.

De acordo com Selby (1993), a maioria das encostas naturais com ocorrência de escorregamentos atingiu o Fator de Segurança 1 a 1,3. Todavia, para determinar a segurança de um talude, é necessário que valores mais conservadores sejam estabelecidos. Em normas técnicas e boas práticas, por exemplo, utiliza-se o FS > 1,5 para determinar uma encosta estável (NBR 11.682) e, com base nesses índices, são estabelecidos os graus de segurança (alto, médio ou baixo) necessários ao local, principalmente em relação aos riscos envolvendo seres humanos e edificações. O grau de segurança é definido pelo Fator de Segurança considerando a geometria do talude e os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo.

Em um esquema em que estão representados o talude e um bloco de solo (Figura 10), as forças cisalhantes são dependentes basicamente da força da gravidade e da inclinação da encosta que indicam um movimento para baixo e fora do talude. As forças de resistência derivam da força

normal e do peso do bloco de solo, que são as forças que, de certa forma, seguram o pacote de solo estável em certa inclinação. Para ocorrer a ruptura, o somatório das *forças de cisalhamento* deve ser maior que o somatório das *forças de resistência*. Em uma vertente estável, como já citado, essas duas forças estariam em equilíbrio.

Figura 10. Esquema de atuação das forças de resistência e forças cisalhantes.



Fonte: Michel (2016).

A lei de Mohr-Coulomb considera que, no momento da ruptura, o peso do solo torna-se igual à resultante das forças estabilizadoras. Isso pode ser expresso pela equação abaixo, onde: τ = tensão cisalhante no momento da ruptura; c = coesão do solo; σ = tensão normal; u = poropressão; ϕ = ângulo de atrito interno do solo.

$$\tau = c + (\sigma - u) \cdot \tan \phi$$

A resistência ao cisalhamento dos solos deve-se essencialmente ao atrito e coesão entre as partículas.

A coesão é derivada da atração química entre as partículas, uma ligação efetiva entre os grãos, e pode ser alterada de acordo com a umidade e seu índice de vazios. A umidade atua nos interstícios dos grãos alterando as forças de natureza eletroquímica. O índice de vazios depende da aproximação dos grãos e de seu arranjo; a presença de água, neste caso, altera o distanciamento entre as partículas. Como cita Christofoletti (1980), a presença de água exerce função importante no movimento do solo, aumentando o peso da massa através do preenchimento dos espaços entre os poros (índice de vazios) o que ocasiona também a redução da coesão do solo.

O ângulo de atrito interno é oriundo da interação física entre duas superfícies na região de contato. O entrosamento entre os grãos é proporcional à coesão e ao atrito interno, desta forma, quanto maior a aproximação das partículas, maior também será a coesão e o ângulo de atrito interno que proporcionam maior resistência ao cisalhamento. Quanto mais bem distribuídos granulometricamente os grãos de solo, por exemplo, melhor será o entrosamento existente e então maior também será o seu ângulo de atrito interno, promovendo também maior resistência ao cisalhamento (VARGAS, 1966; SELBY, 1993). Um baixo índice de vazios pode diminuir a capacidade de absorção de água e percolação, permitindo maior entrosamento entre os grãos.

5.4 ANÁLISES DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS

São inúmeros os técnicos e cientistas, entre eles geógrafos, geólogos, geomorfólogos e engenheiros, que se dedicam aos estudos dos mecanismos e fatores condicionantes dos movimentos de massa e buscam localizar as áreas suscetíveis a escorregamentos, especialmente nas regiões de vulnerabilidade social. A complexidade desta temática reflete diretamente no sucesso da prevenção de ocorrência desses fenômenos e, por isso, é tão importante.

Análises de suscetibilidade a escorregamentos buscam identificar as áreas de determinada bacia hidrográfica ou encosta que apresentam potencialidade à ocorrência de escorregamentos. De maneira analógica ou empírica, determina-se um índice que permita quantificar o quão próximo da ruptura se encontra a encosta (AUGUSTO FILHO & VIRGILI, 1998).

Mapeamentos de áreas suscetíveis com a utilização de modelos de estabilidade de encostas são as principais técnicas aplicadas para a previsão de movimentos de massa. As formulações matemáticas e as leis físicas e de mecânica dos solos diminuem a subjetividade na análise da estabilidade das encostas. Todavia, tais modelos, por se utilizarem de formulações matemáticas que abstraem as forças e eventos envolvidos nos movimentos de massa, dificultam reproduzir toda a dinâmica que compõe as encostas, principalmente quando aplicados em grandes áreas. De acordo com Bigarella (2007), a confiabilidade das previsões na avaliação do fator de segurança de taludes e, conseqüentemente, seus custos, aumentam quanto maior o grau de detalhamento dos parâmetros de campo e do entendimento dos processos envolvidos na sua estabilidade.

5.4.1 SHALSTAB

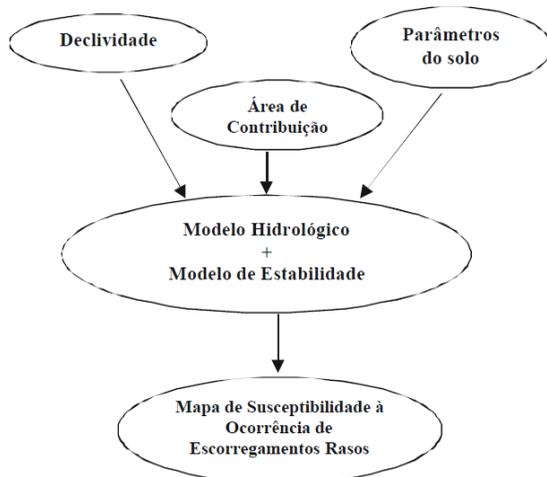
O SHALSTAB é um modelo matemático determinístico, desenvolvido por Montgomery e Dietrich na década de 1990, para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos. Calcula o grau de suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos para cada pixel do grid usando o software ArcGis. Dessa maneira, cada célula contém o valor dos parâmetros morfométricos, possibilitando a sua análise individualmente (MICHEL, 2011). Para isso, combina um modelo hidrológico de recarga uniforme (O'LOUGHLIN, 1986) e um modelo de estabilidade de encosta do talude infinito (Mohr-Coulomb) dentro de um ambiente SIG.

Detalhamentos do arcabouço teórico-conceitual podem ser obtidos em: Montgomery e Dietrich (1994); Guimarães et al. (2003); e na pesquisa de Michel (2011);

O modelo SHALSTAB utiliza três variáveis topográficas: a área drenada (a), o comprimento de contorno unitário (b) e o ângulo da encosta (θ); três variáveis geotécnicas: a densidade do solo úmido (ρ), o ângulo de atrito interno do solo (ϕ) e a coesão (c).

A Figura 11 detalha os componentes do modelo em que os dados de declividade, área de contribuição e parâmetros do solo são importados para a combinação entre o modelo de estabilidade e o modelo hidrológico, gerando o mapa de suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos rasos. O comprimento de contorno está relacionado ao tamanho do pixel do MDT. As variáveis áreas de contribuição e o ângulo de declividade são mapas em *raster* derivados do MDT.

Figura 11 - Esquema dos componentes do modelo SHALTAB para gerar o mapa de suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos rasos.



Fonte: Guimarães et al. (2003)

A resposta do modelo é gerada em função de um “parâmetro livre” (q/T) que é responsável pela classificação da estabilidade. A formulação final adotada pelo SHALSTAB é:

$$\frac{q}{T} = \frac{b}{a} \cdot \sin \theta \cdot \left\{ \frac{\rho}{w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \theta} \right) + \frac{c}{\cos^2 \theta \cdot \tan \theta \cdot p_w \cdot g \cdot z} \right\}$$

Nesta formulação, a variável ‘ q ’ refere-se à chuva em estado crítico e ‘ T ’ à transmissividade do solo saturado. Os resultados permitem hierarquizar a área em 7 classes de suscetibilidade (Quadro 2), em que, quanto maior for o valor resultante da razão de q/T , maior será a instabilidade do local (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994).

Quadro 2. Classes de estabilidade do SHALSTAB.

Log q/T	Classe de estabilidade SHALSTAB
Incondicionalmente Instável	1 - Incondicionalmente instável e saturada
≤ -3.1	2 - Incondicionalmente instável e não saturada
$-3.1 - -2.8$	3 - Instável e saturada
$-2.8 - -2.5$	4 - Instável e não saturada
$-2.5 - -2.2$	5 - Estável e não saturada
≥ -2.2	6 - Incondicionalmente estável e não saturada
Incondicionalmente Estável	7 - Incondicionalmente estável e saturada

5.5 VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS

Os modelos matemáticos, conforme apresentam os capítulos anteriores, objetivam a simulação de um sistema natural e o conhecimento de suas variáveis, todavia dificilmente conseguirão explicar um processo natural em sua totalidade. Uma questão importante para a correta utilização de modelos matemáticos é a avaliação da sua qualidade usando processos de validação adequados.

Qualquer modelamento matemático necessita de provas e evidências de que seus resultados compreendem a realidade, ou parte, do sistema estudado. A inexistência de validação torna o modelo de predição de pouca utilidade científica. Modelos não validados são tão bons quanto hipóteses não testadas (CHUNG E FABBRI, 2003). Quando um modelo de suscetibilidade a escorregamentos é aplicado, a classificação de acordo com a suscetibilidade resulta em consequências econômicas (FRATTINI, CROSTA, CARRARA, 2010). Por isso a importância em avaliar a qualidade desses modelos.

Validação é o processo que determina o grau de representação do mundo real usando a perspectiva do modelo. Os modelos de suscetibilidade a escorregamentos de terra com bases físicas podem ser verificados porque geralmente existe uma solução analítica para a maioria dos mecanismos de deslizamento de terra, e eles também podem ser validados desde que os dados experimentais ou de campo estejam

disponíveis. Dessa forma, os erros podem ser identificados e removidos do modelo (COROMINAS et al., 2011).

A validação de modelos é muitas vezes uma tarefa difícil por causa da inexistência de dados suficientes para a validação. Como aponta Fernandes (2016), “é difícil esperar a ocorrência de um deslizamento para que a validação possa ser feita, confirmando que ali tínhamos uma área crítica”.

Os procedimentos de validação visam avaliar se os escorregamentos coincidem com as classes de maior suscetibilidade do modelo e se é feita uma distinção correta das áreas potencialmente livres de escorregamentos (CHUNG e FABBRI, 2003; FERNANDES, 2016). Existem diversas metodologias para executar os processos de validação da suscetibilidade, por exemplo, aqueles executados por Gao (1993); Chung e Fabbri (2003).

A proposta de Chung e Fabbri (2003), escolhida como metodologia para esta pesquisa, compreende a construção de uma curva de validação. Esta curva representa a proporção de cicatrizes para cada classe de suscetibilidade e mostra o resultado utilizando estatísticas acumuladas.

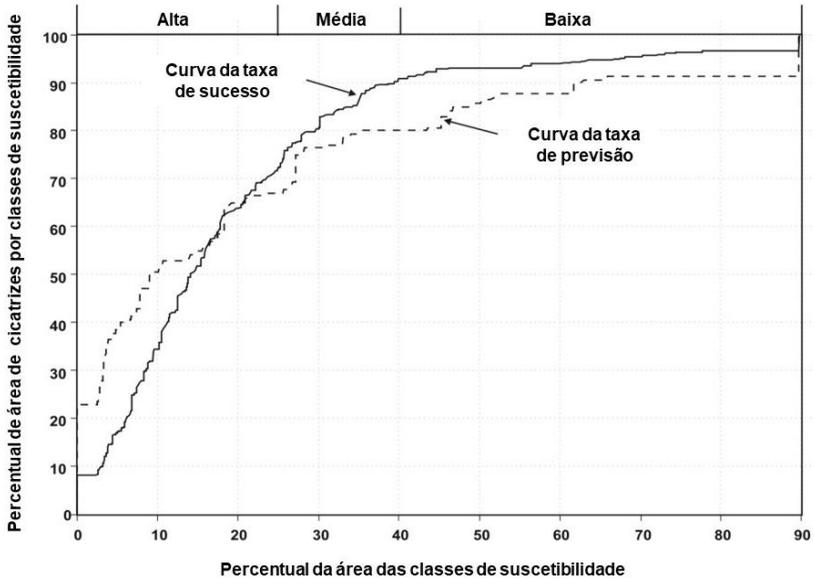
Esta metodologia indica que, para a validação de modelos estatísticos, é necessário que as cicatrizes de escorregamentos que ocorreram posteriormente à elaboração do modelo coincidam com suas classes de maior suscetibilidade. Caso o mapa de suscetibilidade não tenha sido gerado diretamente a partir de cicatrizes, como é o caso do modelo determinístico utilizado nesta pesquisa, todas as cicatrizes da área devem ser utilizadas para a validação. As cicatrizes de escorregamentos devem estar segmentadas, sendo utilizada apenas a área de ruptura, quando os modelos gerados têm por objetivo determinar somente as favoráveis a rupturas.

A curva de validação é construída por meio de um diagrama binário, cujo eixo X representa a área, em percentagem acumulada, das classes de suscetibilidade dispostas em ordem decrescente do grau de suscetibilidade (as mais suscetíveis ficam à esquerda); o eixo Y representa a percentagem acumulada da área das cicatrizes (ou de sua cabeceira).

A curva de validação mostra o percentual acumulado de cicatrizes para cada classe de suscetibilidade (Figura 12). De acordo com Chung e Fabbri (2003), o ideal é que, na curva, 20% da área que compreende as classes de maior suscetibilidade (eixo X do diagrama) correspondam de 50% a 60% da frequência acumulada de cicatrizes (eixo Y do diagrama). Esta proporção mostra que a maioria das cicatrizes ocorre nas classes de maior suscetibilidade. Quando as cicatrizes se distribuem em quantidades uniformes em todas as classes do mapa, o gráfico de validação tende a ter

uma reta, e evidencia que o modelo não é satisfatório, pois não possui nenhum poder de previsão.

Figura 12. Gráfico exemplificando a curva de validação de um modelo de suscetibilidade a escorregamentos. A linha contínua mostra uma curva ideal.



Fonte: Corominhas (2011).

O poder de validação de modelos está diretamente associado aos erros e incertezas existentes na pesquisa, seja na etapa de coleta das informações (por ex., cartas topográficas, imagens, mensurações e experimentos de campo, etc.), ou na de tratamentos dos dados ou mesmo na etapa de modelagem (FERNANDES, 2016).

6 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram recolhidas informações bibliográficas acerca das características geográficas/físicas e socioeconômicas e sobre o histórico dos eventos que ocasionaram desastres naturais relacionados a escorregamentos. Além disso, foi realizada visita à Secretaria de Defesa do Cidadão da Prefeitura Municipal de Blumenau, para coletar fotografias e materiais cartográficos, além de informações bibliográficas.

A área conta com um Ortofotomosaico com resolução espacial de 0,39 m e um Modelo Digital do Terreno com resolução de espacial de 1 m que foram disponibilizados pela Secretaria de Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina (SDS-SC). O mapa geológico foi elaborado no âmbito de um projeto vinculado ao Ministério das Cidades⁴, no qual esta pesquisa está inserida. O mapa foi confeccionado na escala 1:10.000 e utilizado como base para o mapeamento geotécnico mais o mapa pedológico em escala 1:100.000 do Projeto Gerenciamento Costeiro – GERCO, disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2003).

6.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A etapa de caracterização da área é parte essencial e pioneira, tendo em vista a metodologia utilizada para a pesquisa. Para que modelos matemáticos se tornem mais assertivos e passíveis de aplicação é necessário conhecimento das características físicas, tais como embasamento geológico, aspectos geomorfológicos, dados geotécnicos e características topográficas. Nesta pesquisa, julgou-se oportuno realizar o mapeamento geológico de detalhe e o mapeamento geomorfológico da área para subsidiar a delimitação das unidades geotécnicas (unidades pedogeológicas e unidades geomorfo-pedogeológicas) e, posteriormente, a análise das amostras de solo. As cicatrizes de escorregamentos também foram mapeadas para serem utilizadas nos processos de validação.

⁴ UFSC/MINISTERIO DAS CIDADES. Elaboração de cartas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais no município de Blumenau, Estado de Santa Catarina. Relatório final. UFSC, Florianópolis, 2018. (Relatório inédito).

6.1.1 Caracterização geológica

Para a caracterização geológica foi realizado um mapeamento geológico na escala 1:10.000. Partiu-se da interpretação do Mapa geológico cedido pela Prefeitura Municipal de Blumenau mais a interpretação do Ortofotomosaico associado a trabalhos de campo. Os trabalhos de campo consistiram em paradas em pontos estratégicos onde havia afloramentos de rocha ou cicatrizes de escorregamentos. Ao total foram coletados 218 pontos-afloramento. Em cada ponto foram anotadas suas coordenadas, informações de geologia e geomorfologia, fotografias foram registradas e amostras de rocha coletadas para posteriores trabalhos de laminação. Além do mapa geológico foi elaborado também um mapa de lineamentos de relevo.

6.1.1.1 Mapa de Lineamentos

Para o mapa de lineamentos foram considerados os alinhamentos de vales e de cristas sobre o modelo digital do terreno. Utilizou-se o modelo de sombreamento do relevo gerado pelo modelo digital do terreno (MDT), fornecido pela SDS, com tamanho de pixel de 1 metro. Foram utilizados modelos de sombreamento com iluminação segundo os azimutes 45°, 135°, 225° e 315° e elevação de 45°, permitindo um melhor realce de todas as direções dos lineamentos. Esse mapa de lineamentos serviu como base para gerar um mapa de densidade de lineamentos, considerando a densidade, comprimento e grau de interseção dos lineamentos. Para isso foi utilizado o *software RockWorks*. Nesse mapa foram obtidas 33 classes de suscetibilidade, sendo que as mais altas representam um maior grau de densidade e interseção de fraturas.

Embora esses mapas de lineamentos e das classes de maior e menor densidade e interseção de fraturas não tenham sido utilizados efetivamente na elaboração dos modelos matemáticos, como inicialmente se pensava fazer, serviram indiretamente para uma melhor caracterização das unidades geotécnicas.

6.1.2 Caracterização geotécnica

Para a caracterização das unidades geotécnicas, duas metodologias distintas foram utilizadas. A primeira foi realizada de acordo com a metodologia elaborada por Davison Dias (1995), que define as unidades pedogeológicas, e a segunda foi elaborada usando as características

geomorfológicas e pedogeológicas. Esse trabalho deu origem a 2 mapas geotécnicos distintos para a simulação dos modelos.

6.1.2.1 Unidades pedogeológicas

Estas unidades foram definidas pela metodologia de mapeamento geotécnico elaborada por Davison Dias (1995), que propõe um mapeamento geotécnico básico de regiões tropicais usando a sobreposição dos mapas pedológico e geológico. De acordo com os estudos desenvolvidos pela autora, os solos oriundos de uma mesma unidade geotécnica apresentam comportamento mecânico semelhante, desta forma, os resultados obtidos em um ponto podem ser extrapolados para toda a unidade em questão.

Ressalta-se que esta metodologia surgiu dos estudos da mesma autora em sua tese para fins de construção civil nas cidades de Gravataí e Porto Alegre, onde as unidades geotécnicas subsidiariam a localização das fundações de linhas de transmissão (DAVISON DIAS, 1987). Mais adiante, a mesma autora publicou uma proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais (DAVISON DIAS, 1995). Seguindo essa metodologia, as unidades geotécnicas deste trabalho foram nomeadas utilizando a simbologia "Xxy", cujas letras maiúsculas correspondem à classificação pedológica e as minúsculas são identificadoras da geologia.

Considerando os tipos de solo, obteve-se um mapa das unidades pedogeológicas (Mapa 2) que foi sobreposto ao mapa geológico (Mapa 6) originando o mapa das unidades pedogeológicas (Mapa 3).

As unidades geotécnicas e suas respectivas simbologias estão na tabela abaixo. (Tabela 3).

Tabela 3. Identificação das Unidades Geotécnicas de acordo com a metodologia de Davison Dias (1995).

Ponto	Litologia	Sigla	Pedologia	Siglas	Unidades Geotécnicas
BL18	Rochas Ultramáficas/Piroxenitos	px	Podzólicos Vermelho Amarelo Latossólicos	PVL	PVLpx
M117	Depósitos colúviais	de	Cambissolos	C	Cde
M120	Gnaiss Félsico	gn1	Podzólicos Vermelho Amarelo Latossólicos	PVL	PVLgn1
BL501	Gnaiss Félsico	gn1	Cambissolos	C	Cgn1
M119	Gabro	gb	Podzólicos Vermelho Amarelo Latossólicos	PVL	PVLgb
BL41	Granito-Migmatito	mg	Podzólicos Vermelho Amarelo Latossólicos	PVL	Cmg
M130	Granito-Migmatito	mg	Podzólicos Vermelho Amarelo Latossólicos	PVL	PVLmg
BL205	Granitoide	g	Podzólicos Vermelho Amarelo Latossólicos	PVL	PVLg
M118	Gnaiss Máfico	gn	Cambissolos	C	Cgn
M129	Gnaiss Máfico	gn	Podzólicos Vermelho Amarelo Latossólicos	PVL	PVLgn
M132	Gabro	gb	Cambissolos	C	Cgb
M57	Gnaiss Máfico	gn	Podzólicos Vermelho Amarelo	PV	PVgn
M121	Rochas Ultramáficas/Piroxenitos	px	Cambissolos	C	Cpx
BL04	Rochas Ultramáficas/Piroxenitos	px	Podzólicos Vermelho Amarelo	PV	PVpx

6.1.2.2 Unidades geomorfo-pedogeológicas

Estas unidades geotécnicas foram definidas a partir das características geomorfológicas e geológicas. Zuquette (1987), ao contrário de Davison Dias (1995), considera que solos de uma mesma unidade geotécnica oriundos de diferentes elevações, por exemplo, podem apresentar comportamento mecânico heterogêneo. Desta forma, o autor propõe a utilização de feições topográficas, *landforms*, na escolha dos pontos de coleta de amostras para a caracterização do comportamento dos solos.

Durante os trabalhos de campo e por meio do imageamento do relevo da área desta pesquisa, foi possível identificar que o setor norte do município de Blumenau compreende duas regiões com formas de relevo distintas. Cada um desses padrões de relevo identificados guarda elevado grau de semelhança quanto às formas e aspecto fisionômico. Essas unidades foram nomeadas de Modelado em Morrarias e Modelado em Colinas Baixas. O Capítulo 7.1.3 trará uma caracterização geomorfológica mais detalhada da área de estudo.

Com base nessa observação, surgiu a necessidade de conhecer o comportamento mecânico dos solos oriundos da mesma litologia e de modelados de relevo distintos para poder comparar com os resultados dos modelos elaborados usando a metodologia de mapeamento geotécnico de Davison Dias (1995).

Os padrões do relevo gerou um mapa das unidades de relevo (Mapa 10), que foi sobreposto ao mapa geológico (Mapa 6), originando o mapa das unidades geomorfo-pedogeológicas (Mapa 3).

A nomenclatura utilizada para identificação das unidades considerou os modelados de relevo identificados em letra maiúscula e a geologia identificada em letra minúscula. A Tabela 4 apresenta os pontos utilizados para as modelagens, sua litologia, unidades de relevo e respectivas siglas.

Tabela 4. Identificação das Unidades Geotécnicas de acordo com as Unidades de Relevo.

Ponto	Litologia	Sigla	Unidades de Relevo	Siglas	Unidades Geotécnicas
M121	Piroxenito	px	Morrarias	M	Mpx
BL18	Piroxenito	px	Colinas baixas	C	Cpx
M132	Gabro	gb	Morrarias	M	Mgb
M119	Gabro	gb	Colinas baixas	C	Cgb
M117	Depósitos coluviais	de	Morrarias	M	Mde
BL205	Granitoide	g	Morrarias	M	Mg
BL41	Granito Migmatito	mg	Morrarias	M	Mmg
M130	Granito Migmatito	mg	Colinas baixas	C	Cmg
BL501	Gnaiss Félsico	gn1	Morrarias	M	Mgn1
M120	Gnaiss Félsico	gn1	Colinas baixas	C	Cgn1
M118	Gnaiss Máfico	gn	Morrarias	M	Mgn
M129	Gnaiss Máfico	gn	Colinas baixas	C	Cgn

6.1.2.3 Diagnóstico do comportamento mecânico dos solos

Cada uma das unidades acima apresentadas foi caracterizada sob o ponto de vista mecânico dos solos. O diagnóstico do comportamento mecânico desses tipos de solos consistiu em caracterizar a granulometria, o índice de plasticidade e a massa específica. Também foram obtidos os parâmetros de resistência de coesão e ângulo de atrito. Para todos os pontos foram coletadas amostras deformadas para os ensaios de caracterização e amostras indeformadas para obtenção dos parâmetros de resistência. Algumas dificuldades foram ocasionadas porque muitas vezes os pontos de coleta das amostras estavam localizados em regiões urbanizadas, dentro de propriedades. Para agilizar os procedimentos foram moldados os anéis no próprio local de coleta, conforme recomenda

Davison Dias (1995) e acondicionados em caixas para o transporte ao laboratório (Figura 13).

Figura 13. Anéis de coleta das amostras indeformadas.



Fonte: própria autora.



Fonte: própria autora.

As coletas foram realizadas em 19 pontos de diferentes unidades geotécnicas, conforme Mapa 4. A Tabela 5 traz a identificação dos pontos e suas características pedológicas, geológicas e geomorfológicas.

Tabela 5. Identificação dos pontos de coleta das amostras deformadas e indeformadas.

PONTO	PEDOLOGIA	GEOLOGIA	GEOMORFOLOGIA
BL 18	PVL	ULTRAMÁFICA	Colinas baixas
BL 04	PV	ULTRAMÁFICA	Morrarias
BL 41	C	GRANITO MIGMATITO	Morrarias
BL 69	PVL	GRANITO MIGMATITO	Morrarias
BL 190	PVL	GNAISSE FÉLSICO	Morrarias
BL 205	PVL	GRANITOIDE	Morrarias
BL 501	C	GNAISSE FÉLSICO	Morrarias
M56	PVL	GNAISSE MÁFICO	Morrarias
M57	PVL	GNAISSE MÁFICO	Colinas baixas
M55	C	COLUVIO	Morrarias
M118	C	GNAISSE MÁFICO	Morrarias
M129	PVL	GNAISSE MÁFICO	Colinas baixas
M119	PVL	GABRO	Colinas baixas
M121	C	ULTRAMÁFICA	Morrarias
M120	PVL	GNAISSE FÉLSICO	Colinas baixas
M132	C	GABRO	Morrarias
M130	PVL	GRANITO MIGMATITO	Colinas baixas

Os parâmetros geotécnicos estimados em cada ponto foram coesão (c) e ângulo de atrito (ϕ), obtidos pelo ensaio de cisalhamento direto.

Os ensaios de caracterização compreenderam a análise granulométrica, densidade real dos grãos e limites de plasticidade. Os ensaios foram realizados conforme as normas ABNT NBR 7181/84 (Solo – Análise Granulométrica); NBR 6508/84 (Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da Massa Específica); NBR 6459/1984 (Solo – Determinação do Limite de Liquidez) e NBR 7180/1984 (Solo – Determinação do Limite de Plasticidade).

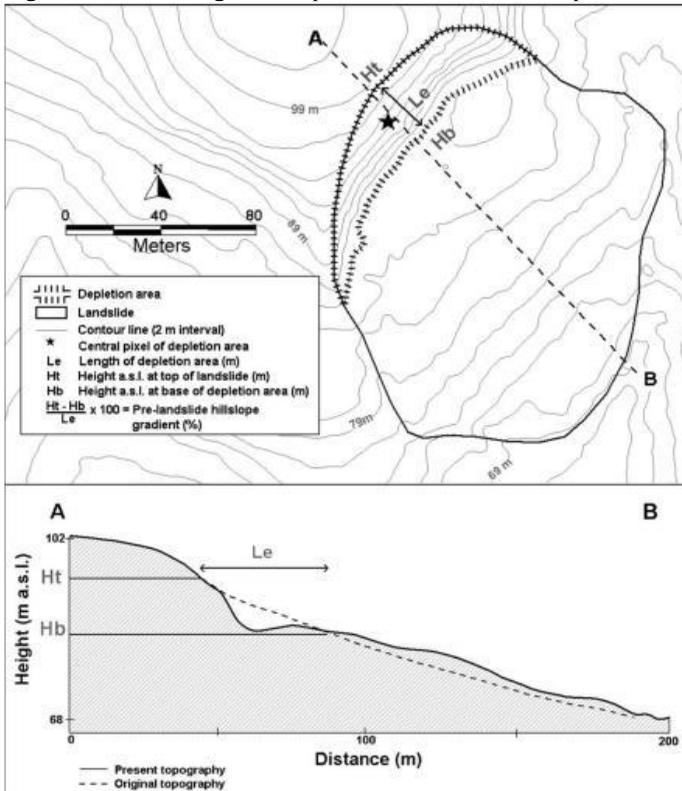
6.1.3 Identificação das cicatrizes de escorregamentos

A validação do resultado do modelo é também extremamente dependente desta fase da pesquisa, tornando a validação possível e, em função disso, o modelo confiável. O mapeamento das cicatrizes de escorregamentos foi realizado em forma vetorial pela interpretação do Ortofotomosaico SDS, e pela composição infravermelha da imagem Rapideye, composição colorida RGB 135 com resolução espacial de 2,5 m.

Ao todo foram mapeadas 103 cicatrizes. Elas foram conferidas com visitas em campo, além disso, aquelas identificadas em campo e que não foram identificadas nas imagens, foram devidamente inseridas no inventário.

Para melhor validar o modelo, as cicatrizes de escorregamentos mapeadas em sua extensão total foram posteriormente segmentadas em área de ruptura e área de deposição, conforme mostra a Figura 14.

Figura 14. Metodologia de mapeamento das zonas de ruptura.



Fonte: EECKHAUT et al. (2006)

A necessidade de segmentação dá-se porque o modelo SHALSTAB traz como resultado apenas a área de ruptura. Ele não tem o objetivo de expor e considerar suscetíveis as áreas de possíveis depósitos.

Apesar de diversos pontos terem sido registrados pela Prefeitura dentro do perímetro urbano e nas áreas de maior urbanização, elas não foram consideradas para o modelamento pela impossibilidade de identificação no aerofotolevanteamento.

6.2 MODELAGEM DAS ÁREAS SUSCETÍVEIS A ESCORREGAMENTOS

Para a modelagem das áreas suscetíveis a escorregamentos, dois modelos matemáticos foram utilizados, o modelo determinístico SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*), desenvolvido por Montgomery e Dietrich (1994) e o modelo de Bishop para os cálculos do Fator de Segurança. Cada modelo foi aplicado para cada uma das unidades geotécnicas citadas anteriormente (unidades pedogeológicas e unidades geomorfo-pedogeológica). Isso gerou a obtenção de 4 cenários, 02 deles pelo Fator de Segurança e 02 pelo SHALSTAB:

1. SHALSTAB pedogeológico;
2. SHALSTAB geomorfo-pedogeológico;
3. Fator de Segurança pedogeológico;
4. Fator de Segurança geomorfo-pedogeológico.

Cada um dos 4 cenários foram validados utilizando as cabeceiras de cicatrizes e, posteriormente, reclassificados em 3 classes de suscetibilidade, alta, média e baixa, definidas depois da análise das curvas de validação, que serão detalhadas no Item 6.4 deste trabalho.

6.2.1 Modelos de suscetibilidade utilizando o SHALSTAB

A modelagem com o SHALSTAB utilizou a extensão ASA – *Automatic SHALSTAB Analysis inserida no ArcGis 10.4*, contendo a rotina automatizada da equação matemática do modelo (SBROGLIA et al., 2017). Na ferramenta ASA é possível escolher entre duas técnicas relacionadas à camada matricial direção de fluxo: Técnica ASA– Oito direções: é calculada automaticamente pela ferramenta ASA a partir da extensão Spatial Analyst Tools/Hidrology/Flow accumulation do ArcGIS, tomando-se como dado de entrada a camada de 8 direções de fluxo (Figura 11); Técnica ASA– Infinitas direções: nesta opção a camada de área de contribuição consiste em um dado de entrada (intitulado ab.tif) da ferramenta ASA, logo, deve-se ser elaborado separadamente. Para isso, é utilizada a extensão chamada TAUDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models), que é disponibilizada gratuitamente.

Os trabalhos de campo permitiram identificar a estimativa da profundidade do solo (z) nos locais onde havia cortes de taludes. Foi possível observar uma variação considerável da profundidade do solo em função dos diferentes modelados de relevo e das diferentes declividades.

Nos locais de maior ângulo de declividade, situação observada em sua maioria nos modelados de relevo em morrarias, o manto de solo tende a ser mais raso, enquanto que, em porções menos declivosas e de modelado de relevo em colinas baixas, há uma maior acumulação de solo. Entretanto, para uma estimativa mais precisa dessas profundidades, seria necessário um grande detalhamento nos trabalhos de campo, portanto, os modelos para todas as unidades geotécnicas consideraram o valor médio de 10 m de profundidade.

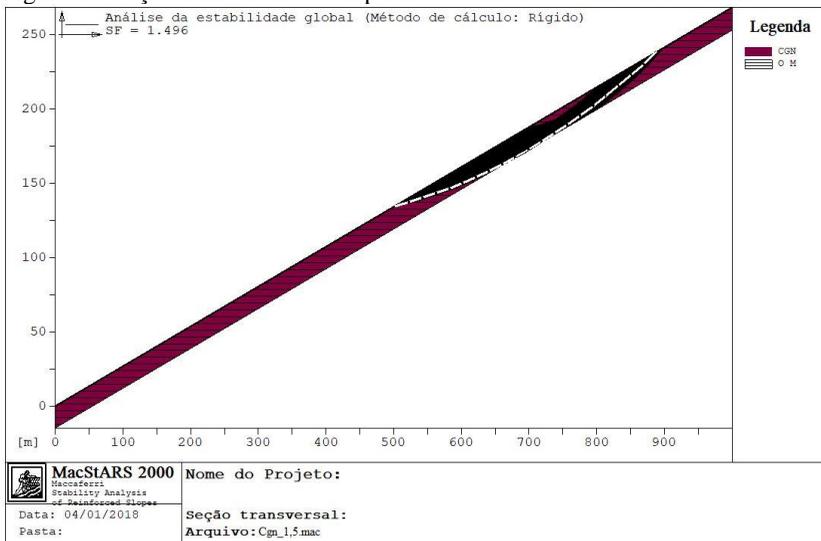
6.2.2 Modelos de suscetibilidade utilizando o Fator de Segurança

A modelagem utilizando o Fator de Segurança foi elaborada com base no mapa de declividades das unidades geotécnicas (pedogeológica ou geomorfo-pedogeológica). O *software MacStars* calculou a declividade necessária para atingir os Fatores de Segurança 0,4; 0,5; 0,6; 0,75; 1,0; 1,25; 1,5; 1,75; 2,0; 2,25; 2,5, 3,0 de cada uma das unidades geotécnicas.

O modelo de Bishop calculou o fator de segurança, cujos dados de entrada são coesão, ângulo de atrito, peso específico saturado e peso específico natural que foram obtidos nos ensaios geotécnicos previamente realizados em cada unidade. A superfície piezométrica foi configurada de forma a indicar um solo saturado. A

Figura 15 exemplifica o resultado da análise de estabilidade para um perfil de solo do tipo Cambissolo em Gnaiss máfico, no qual os parâmetros geotécnicos fizeram com que uma inclinação de 15° no talude correspondesse a um fator de segurança (FS) de 1,496 (próximo a 1,5).

Figura 15. Seção transversal de um perfil de Cambissolo em Gnaiss máfico.



Os resultados da modelagem permitiram que as declividades de cada unidade geotécnica (que possui os mesmos parâmetros geotécnicos) fossem reclassificadas em 12 classes de acordo com o Fator de Segurança. O Quadro 3 exemplifica o resultado da análise de estabilidade para os cambissolos de Gnaiss máfico. Nesses solos, por exemplo, os resultados da análise de estabilidade demonstraram que, para atingir um FS = 1,5, as declividades devem ser iguais ou superiores a 15°.

Quadro 3. Ângulos de declividade da encosta calculados para os onze fatores de segurança predeterminados, resultando em doze classes de FS, correspondentes a intervalos de declividade para a unidade Cambissolo de Gnaisse Máfico.

Cambissolo de Gnaisse Máfico		
Ângulo de declividade (°)	Fator de Segurança (FS)	Classe de FS
90 (?)	0	
		12
53	0,40	
		11
42	0,50	
		10
36	0,60	
		9
29	0,75	
		8
22	1	
		7
18	1,25	
		6
15	1,5	
		5
13	1,75	
		4
11	2	
		3
9	2,5	
		2
7,5	3	
		1
0 (?)	infinito	

Com base nos intervalos de declividade, expressos, por exemplo, no Quadro 3, o mapa de declividades de cada classe geotécnica (que é constituída pelos mesmos parâmetros geotécnicos) foi reclassificado para essas doze classes de fator de segurança. A seguir foram justapostas todas as unidades geotécnicas reclassificadas dessa maneira, resultando no modelo de suscetibilidade a escorregamentos.

6.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SUSCETIBILIDADE

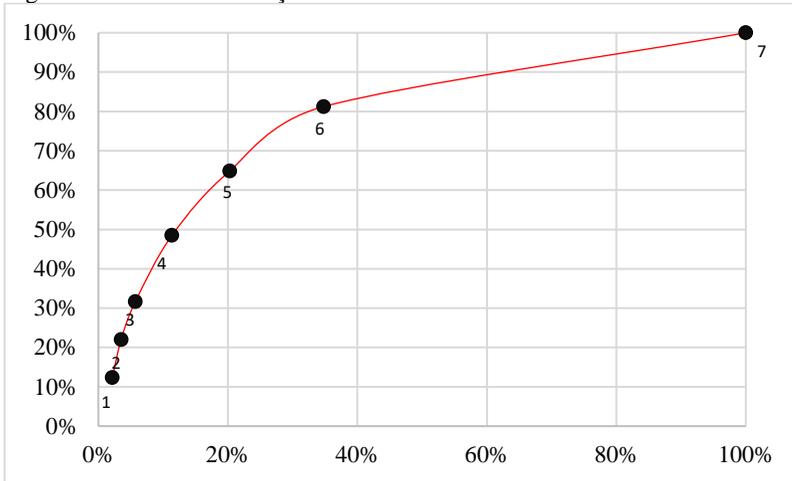
A verificação da validade dos modelos usou a metodologia de Chung e Fabbri (2003) que permite observar em uma curva de validação se há correlação positiva entre as áreas de ruptura das cicatrizes e as áreas de maior suscetibilidade do modelo.

O mapa com as áreas de ruptura das cicatrizes foi transformado em arquivo raster e sobreposto a cada um dos 4 cenários usando o módulo Álgebra de Mapas no ArcGis 10.4. O resultado desta sobreposição possibilitou a construção de uma tabela com a área e a porcentagem de cicatrizes por cada classe de suscetibilidade para cada modelo gerado. Os dados da Tabela 6 permitiram o desenho de um gráfico em que o eixo Y é representado pela porcentagem acumulada de cicatrizes (soma acumulada das porcentagens para cada classe) e, o eixo X mostra as classes de suscetibilidade (em ordem decrescente de suscetibilidade) abarcando a área de cada classe, até perfazer 100% da área. O gráfico resultante é em forma de curva (Figura 16) denominada curva de validação.

Tabela 6. Correlação das classes de suscetibilidade e cicatrizes de escorregamentos.

Classes	Área do modelo		Correlação das cicatrizes com o modelo	
	Porcentagem da área de cada classe	Porcentagem acumulada das áreas de cada classe	Porcentagem da área de cabeceira de cicatrizes em cada classe	Porcentagem acumulada das áreas de cabeceira de cicatrizes
1	2.15%	2.15%	12.38%	12.38%
2	1.37%	3.52%	9.65%	22.02%
3	2.20%	5.72%	9.66%	31.68%
4	5.65%	11.38%	16.84%	48.52%
5	8.93%	20.31%	16.35%	64.87%
6	14.48%	34.79%	16.36%	81.24%
7	65.21%	100.00%	18.76%	100.00%

Figura 16. Curva de validação referente aos resultados da Tabela 6.



O Eixo X corresponde à percentagem acumulada das áreas de cada classe e o Eixo Y é representado pela percentagem acumulada da área das cicatrizes. A linha vermelha representa o traçado da curva. Pontos em preto representam as classes de suscetibilidade, neste caso, 7 classes referentes ao modelo Shalstab.

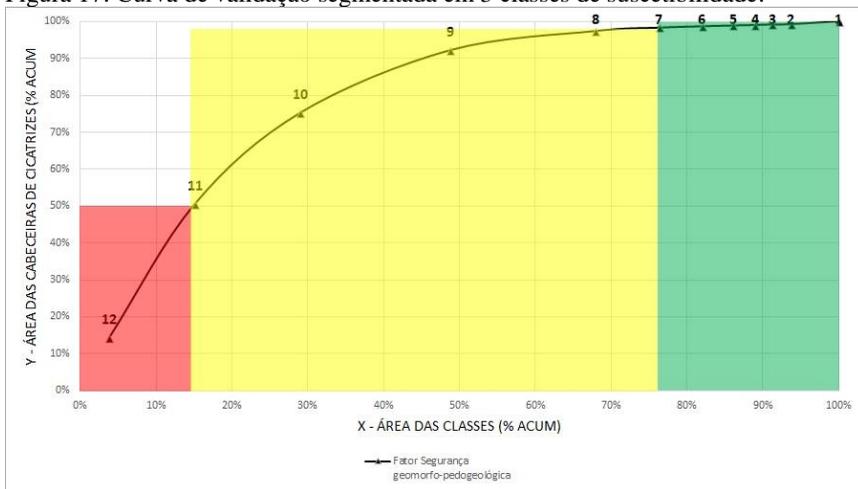
6.4 MAPA DE SUSCETIBILIDADE FINAL A ESCORREGAMENTOS

O mapa de suscetibilidade final a escorregamentos representa o cenário de suscetibilidade com a melhor resposta após os procedimentos de validação indicados. Ele foi reclassificado para 3 classes que também foram definidas pela curva de validação. O modelo escolhido apresentou o maior percentual de cicatrizes em 20% da área das classes de suscetibilidade. Para essa escolha, também foi levado em consideração o percentual de cicatrizes das áreas de segurança. Assim, foram definidas as classes alta (vermelha), média (amarela) e baixa (verde) de suscetibilidade, conforme mostra a Figura 17.

A seleção dos intervalos das três classes foi feita com base na proporção de cicatrizes evidenciada pela curva de validação. Na Figura 17, as áreas das classes 11 e 12 foram consideradas como de alta suscetibilidade a escorregamentos (por isso estão em vermelho) porque a curva mostra que, embora constituam menos de 15% da área total estudada, nelas, a incidência do total de cicatrizes foi de 50%. Já as áreas das classes 1, 2, 3, 4, 5, 6, e 7 foram consideradas como de baixa suscetibilidade (áreas de segurança: cor verde) porque, embora

constituam cerca de 24% da área total, tiveram a incidência de apenas cerca de 2% do total de cicatrizes. As demais classes (em amarelo) foram consideradas áreas de média suscetibilidade, onde se recomenda atenção, principalmente frente a processos de ocupação.

Figura 17. Curva de validação segmentada em 3 classes de suscetibilidade.



Este mapa de suscetibilidade com 3 classes foi, posteriormente, sobreposto ao mapa das unidades geotécnicas, com o objetivo de identificar as unidades com alta, média e baixa suscetibilidade abrangendo uma análise mais abrangente dos resultados dos modelos.

7 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

7.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDOS

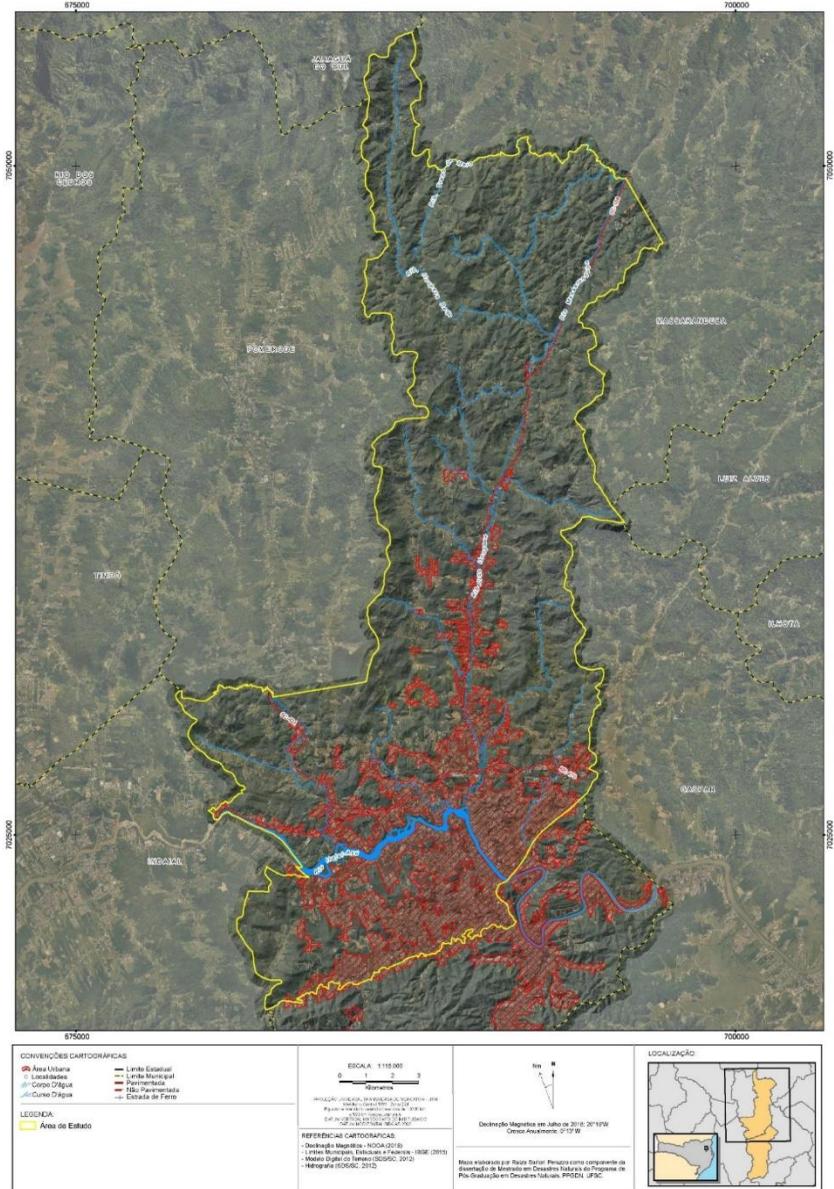
A área de estudos desta pesquisa compreende o setor norte do município de Blumenau (Mapa 5). Nesse município, o rio Itajaí-Açu segmenta o território em dois setores (norte e sul) que apresentam características geológicas, geomorfológicas e topográficas bastante distintas.

Sob o ponto de vista geológico e geomorfológico, o setor norte do município compreende as rochas do Complexo Luízes Alves caracterizadas por gnaisses e rochas ultramáficas. A morfologia do terreno é suavizada e os vales assumem a forma de “U” aberto, formando planícies com centenas de metros de largura, principalmente próximas aos rios Itajaí-Açu e Itoupava. Pela sua morfologia, constituição geológica e ausência de cheias periódicas, é uma área com vocação para expansão urbana (AUMOND, 2009).

Buscou-se, nesta seção, apresentar os resultados obtidos durante a investigação geológica, geomorfológica e geotécnica. Além dessa caracterização foram identificadas as cicatrizes de escorregamentos que ocorreram na área.

Mapa 5. Localização da área de estudos (setor norte do município de Blumenau).

ANÁLISE DOS DESLIZAMENTOS NO SETOR NORTE DO MUNICÍPIO DE BLUMENAU, SC
 Mapa de localização da área de estudos



7.1.2 Contexto geológico do setor norte do município de Blumenau

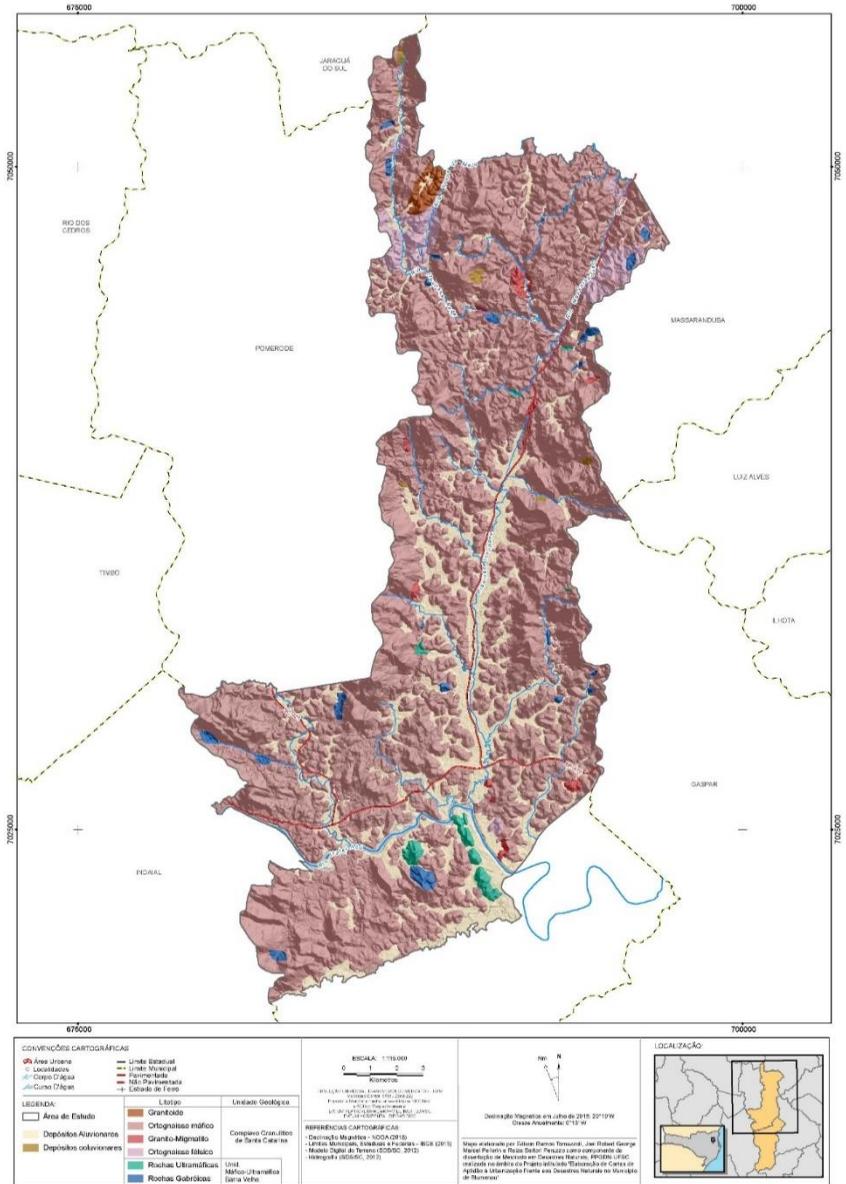
De acordo com Tomazzoli et al. (2017), a área é formada pelas seguintes unidades: Complexo Granulítico de Santa Catarina, composto pela Unidade Máfico-Ultramáfica Barra Velha, que compõe 1,85% da área e os Ortognaisses Granulíticos Luis Alves, de idade neoarqueana, os quais predominam e abrangem 81,20% da área; os corpos de granito-migmatito abrangem 0,63% da área e de rocha granitoide de idade provável paleoproterozoica que ocupam 0,50%; depósitos aluviais e coluviais quaternários juntos ocupam 15,02%. O Mapa 6 exhibe o mapeamento geológico do setor norte, e a Tabela 7 traz o percentual de abrangência das unidades geológicas.

Tabela 7. Percentual de abrangência das unidades geológicas.

Unidades	Litologia	Área das unidades (m ²)	Percentual de abrangência das unidades
Ortognaisses Granulítico Luiz Alves	Ortognaisse Félsico	7.135.102,83	2,43%
	Ortognaisse Máfico	231.200.000	78,77%
Máfico-Ultramáfica Barra Velha	Piroxenitos	2.304.366,07	0,79%
	Rochas	3.123.949,00	1,06%
	Metagabroicas		
Depósitos	Depósitos aluvionares	43.450.000	14,80%
	Depósitos coluvionares	626.863,50	0,21%
	Granito-Migmatito	1.859.216,32	0,63%
	Granitoide	1.473.705,96	0,50%
	Massa d'água	2.340.015,81	0,80%

Mapa 6. Mapa geológico do setor norte do município de Blumenau.

ANÁLISE DOS DESLIZAMENTOS NO SETOR NORTE DO MUNICÍPIO DE BLUMENAU, SC
 Mapa geológico



As rochas do Complexo Granulítico de Santa Catarina foram formadas no período Arqueano (há mais de 2,5 bilhões de anos), com eventos retrometamórficos relacionados ao paleo e neoproterozoico e representam as rochas mais antigas do estado (KAUL, 2002; TOMAZZOLI, 2012). Além dos gnaisses granulíticos máficos (enderbitos) e félsicos (charnokitos), ocorrem também núcleos de rochas máficas-ultramáficas, representados por gabros, piroxenitos e anfibólio xistos e, subordinadamente, gnaisses calcissilicáticos, kinzigitos anostositos, quartzitos, além de formações ferríferas (HARTMANN et al., 1979). Tomazzoli (2012), em sua pesquisa, observou que as rochas do Complexo Luis Alves estão cobertas por um manto de intemperismo bastante espesso, atingindo profundidades muitas vezes superiores a 30 metros.

Os Ortognaisses Granulíticos Luis Alves foram subdivididos, neste trabalho, em ortognaisses granulíticos máficos, com mais de 50% em minerais máficos, e ortognaisses granulíticos félsicos, com teores menores de 50% nestes minerais. Essa subdivisão genérica e informal objetiva, principalmente, a caracterização geotécnica dos solos derivados desses dois litotipos. Os ortognaisses máficos correspondem a gnaisses enderbíticos e opdalíticos, enquanto que os félsicos correspondem a gnaisses charnokíticos.

Os ortognaisses exibem bandamento mais ou menos pronunciado. Especialmente os máficos podem apresentar complexas estruturas migmatíticas resultantes de processos de assimilação e também de mescla ou mistura magmática com os piroxenitos, rochas gabroicas e diabásios. Enclaves angulosos ou arredondados de todas as formas e tamanhos, em diversos estágios de assimilação/mistura magmática e também fragmentos maiores dessas rochas máfico-ultramáficas são extremamente comuns. Nas zonas de maior deformação (maior strain) esses xenólitos e porções máfico-ultramáficas são transpostos para bandas do gnaisse.

Migmatitos são rochas constituídas por bandas ou bolsões leucocráticos de granito rosado (com feldspato potássico rosado) intercaladas ao bandamento dos gnaisses máficos e félsicos (Figura 18). Muitas vezes essas bandas de granito rosado intercalam-se também a gabros e piroxenitos. Associados a esses migmatitos podem ocorrer corpos de granito rosado, com dimensões decamétricas, constituindo rochas e terrenos aqui chamados de granito-migmatito. Iglesias et al. (2011) fazem referência a corpos de sieno e mozogranitos vermelhos foliados, intrusivos em ortognaisses, correlacionados à Suíte Rio da Luz. Mencionam que esses corpos seriam responsáveis por feições de

feldspatização da rocha encaixante por fraturas e veios de epidoto semelhantes às que se observam nos migmatitos da área de estudos.

Figura 18. Migmatito formado por bandas graníticas rosadas intercaladas às do gnaiss máfico.



Imagem: Edison Ramos Tomazzoli (2017).

A Unidade Máfico-Ultramáfico Barra Velha é composta por corpos de piroxenito e de rochas gabroicas, metamorfisadas nas fácies granulito ou anfibolito.

O metapiroxenito forma corpos com até 0,6 km² de extensão. Exibe granulação média a grossa; é predominantemente maciço e composto, predominantemente por piroxênio equigranular (Figura 19a) com proporções menores de hornblenda, plagioclásio, magnetita e sulfetos (pirita, calcopirita, arsenopirita). Subordinadamente ocorrem setores em que a rocha desenvolve uma forte foliação milonítica, chegando a constituir um anfibólio xisto. Por vezes, o metapiroxenito se apresenta cortado por veios de quartzo e também por veios e bandas de granito e pegmatito rosados, vindo a se tornar um migmatito. Nas bordas, os corpos de gnaiss enderbítico encaixante podem apresentar enclaves do metapiroxenito (Figura 19b). Ao microscópio, os piroxenitos costumam apresentar uma textura pseudoadcumulática, com piroxênio granoblástico mais fino, recristalizado sob condições de metamorfismo fácies granulito desenvolvendo-se no entorno de cristais ígneos relícticos de enstatita (Figura 19c).

Figura 19. Aspectos do metapiroxenito.

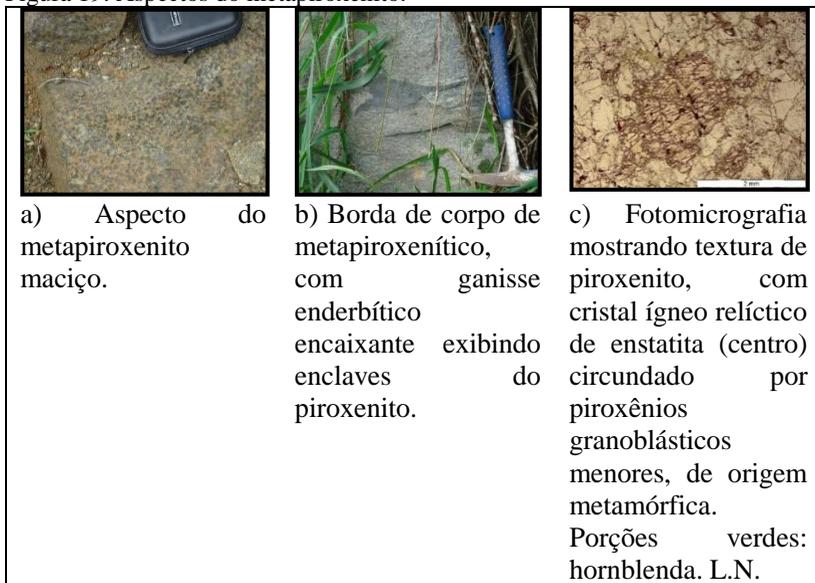


Imagem: Edison Ramos Tomazzoli (2017).

As rochas metagabroicas ocorrem em áreas com até 0,7 km². Elas podem ser corpos maciços, quase sem foliação evidente (Figura 20), nesse caso apresentando textura equigranular grossa; termos de granulação mais fina podem ser classificados como metadiabásio. Podem também exibir foliação milonítica. São constituídas por ortopiroxênio (enstatita), clinopiroxênio (diopsídio), plagioclásio cálcico e magnetita-ilmenita como minerais mais abundantes, podendo conter quantidades variáveis de olivina e anfibólio. Na maioria das vezes são classificadas como metanoritos ou metagabronoritos. Quando exibem bandamento pronunciado são classificadas como gnaisses noríticos ou gabro noríticos (Figura 21), com bandas de hornblenda e piroxênios metamórficos alternadas a bandas ricas em plagioclásio. Nas zonas de maior deformação tectônica, normalmente gradam para anfibólio, quase sempre com foliação bem desenvolvida.

Nas bordas, tanto os corpos de metapiroxenito como os de rochas metagabroicas exibem contatos gradacionais com os ortognaisses encaixantes, nos quais frequentemente ocorrem xenólitos máfico-ultramáficos, muitas vezes com feições do tipo *net-veining*, fruto de assimilação magmática desses pelos ortognaisses ou de mescla magmática dessas rochas com magmas graníticos remobilizados.

Figura 20. Corpo de gabro maciço.



Imagem: Edison Ramos Tomazzoli (2017).

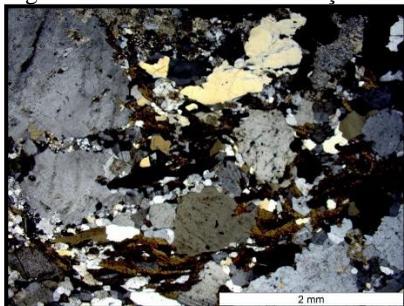
Figura 21. Gnaiss gabronorítico.



Imagem: Edison Ramos Tomazzoli (2017).

No extremo norte ocorre granitoide pórfiro maciço ou com foliação milonítica (Figura 22). Exibe fenocristais tabulares (ou porfiroclastos, quando foliado) de feldspato potássico rosado com até 30 mm sobre matriz de granulação grossa. Ocupa uma área de aproximadamente $1,6 \text{ km}^2$. Teores relativamente elevados em biotita permitem classificar a rocha, preliminarmente, como granodiorito.

Figura 22. Granitoide com foliação milonítica. L.P.



Fonte: Tomazzoli et al. (2017).

7.1.2.1 Aspectos Estruturais

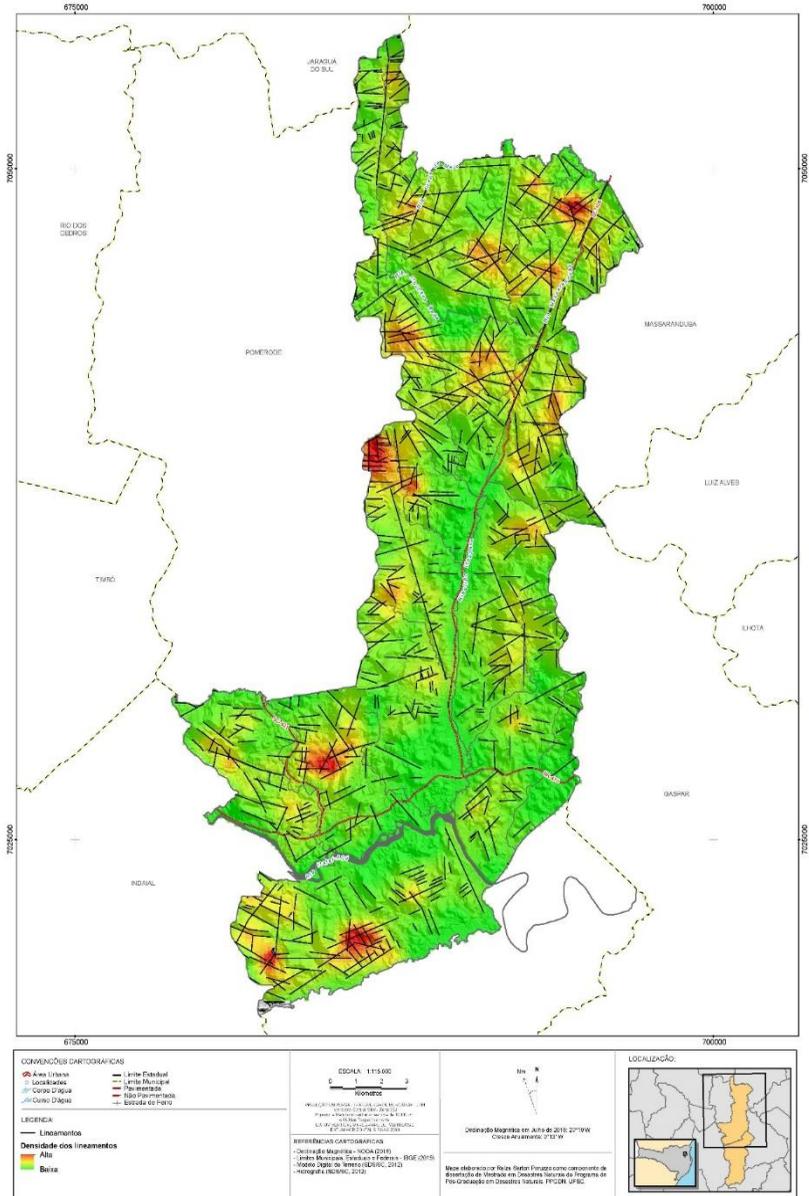
De acordo com Tomazzoli et al. (2017), as estruturas mais comuns são foliações, como bandamento gnáissico, foliação milonítica, fraturas e veios de natureza diversa, falhamentos e lineamentos de relevo.

O bandamento gnáissico - estrutura mais comum e abundante - é típico dos ortognaisses máficos e félsicos, litotipos predominantes na área de estudo, mas também ocorre nos gabros e piroxenitos. É caracterizada pela alternância de bandas claras, granoblásticas, formadas, predominantemente, por quartzo e feldspato, alternadas a bandas máficas, constituídas por anfibólios, piroxênios, biotita clorita. Por vezes esse bandamento assume carácter francamente milonítico, com pórfiro clastos de plagioclásio, piroxênio ou anfibólio, envoltos por porções ou camadas de mais elevado grau de cominuição, muitas vezes com *ribbons* de quartzo justapostos.

Lineamentos de relevo representam, na maioria das vezes, fraturas, falhamentos e zonas miloníticas de alto ângulo. O Mapa 7 apresenta o quadro de lineamentos e de densidade de lineamentos do setor norte de Blumenau, com destaque para os lineamentos formados por alinhamentos de cristas ou de vales. O mapa apresenta a distribuição espacial dos lineamentos e o grau de densidade de lineamentos, considerando a intersecção e densidade dos lineamentos no local.

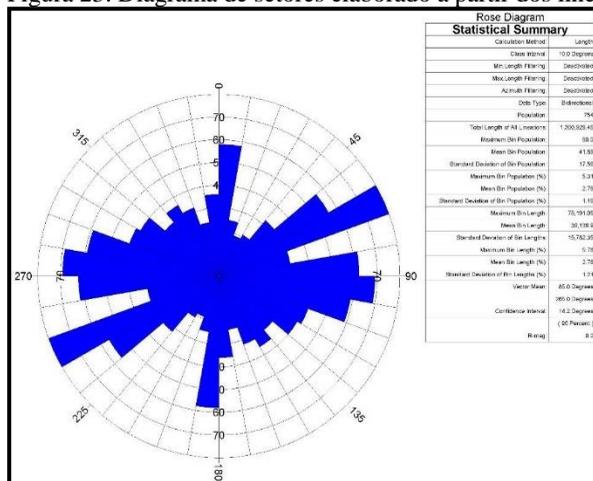
Mapa 7. Mapa de densidade/interseção de lineamentos do setor norte de Blumenau.

ANÁLISE DOS DESLIZAMENTOS NO SETOR NORTE DO MUNICÍPIO DE BLUMENAU, SC
 Mapa da densidade de lineamentos



A Figura 23 traz o diagrama de setores (*rose diagram*) desses lineamentos, que representam, na maioria das vezes, falhas, fraturas ou foliações de alto ângulo.

Figura 23. Diagrama de setores elaborado a partir dos lineamentos.



7.1.3 Aspectos geomorfológicos do setor norte do município de Blumenau

O setor norte do município de Blumenau está inserido na região dos domínios morfoestruturais do Cráton Luis Alves, composto por rochas do Complexo Granulítico de Santa Catarina e o dos Depósitos Sedimentares Quaternários, formados por material pouco consolidado ou inconsolidado (ROSA, 2002). Neste domínio manifesta-se a unidade geomorfológica denominada Serras Cristalinas Litorâneas.

O Mapa 8 e o Mapa 9 mostram, respectivamente, a hipsometria e declividades. Nota-se que a topografia apresenta variações altimétricas entre 20 e 790m (amplitude altimétrica de 770m) e as declividades variam de planas a escarpadas, predominando na área as declividades de relevo Forte ondulado e Montanhoso.

As áreas de baixas altitudes e baixas declividades localizam-se próximas ao leito dos principais rios (rio Itajaí-Açu e ribeirão Itoupava). Eles formam extensas planícies aluviais que correspondem aos terraços e às planícies elaborados pelos depósitos aluvionares inconsolidados, oriundos da deposição fluvial. No centro-norte do município, inserida no perímetro urbano e junto ao rio Itajaí-Açu, a paisagem apresenta-se

densamente urbanizada. Esta característica se repete principalmente nas planícies do rio Itajaí-Açu e ribeirão Itoupava até o limite com o modelado montanhoso, estendendo-se em direção às colinas baixas a nordeste do município.

Do ponto de vista morfoestrutural, o relevo da área pôde ser subdividido, além das áreas da planície aluvial, em um domínio mais interno, formado por colinas baixas, onde a cobertura do solo se apresentou bastante espessa e, em outro, que compreende áreas mais elevadas, com relevos em morrarias ou montanhas. Hartmann e Cupertino (1979), trabalhando em áreas do vizinho município de Luiz Alves, sugerem que essas diferenças no padrão de modelado em rochas do Complexo Granulítico de Santa Catarina têm controle estrutural e seriam reflexo da instalação de zonas de cisalhamento dúctil que teriam tornado as rochas que configuram o modelado em colinas mais foliadas e, portanto, mais suscetíveis ao intemperismo e à erosão diferencial.

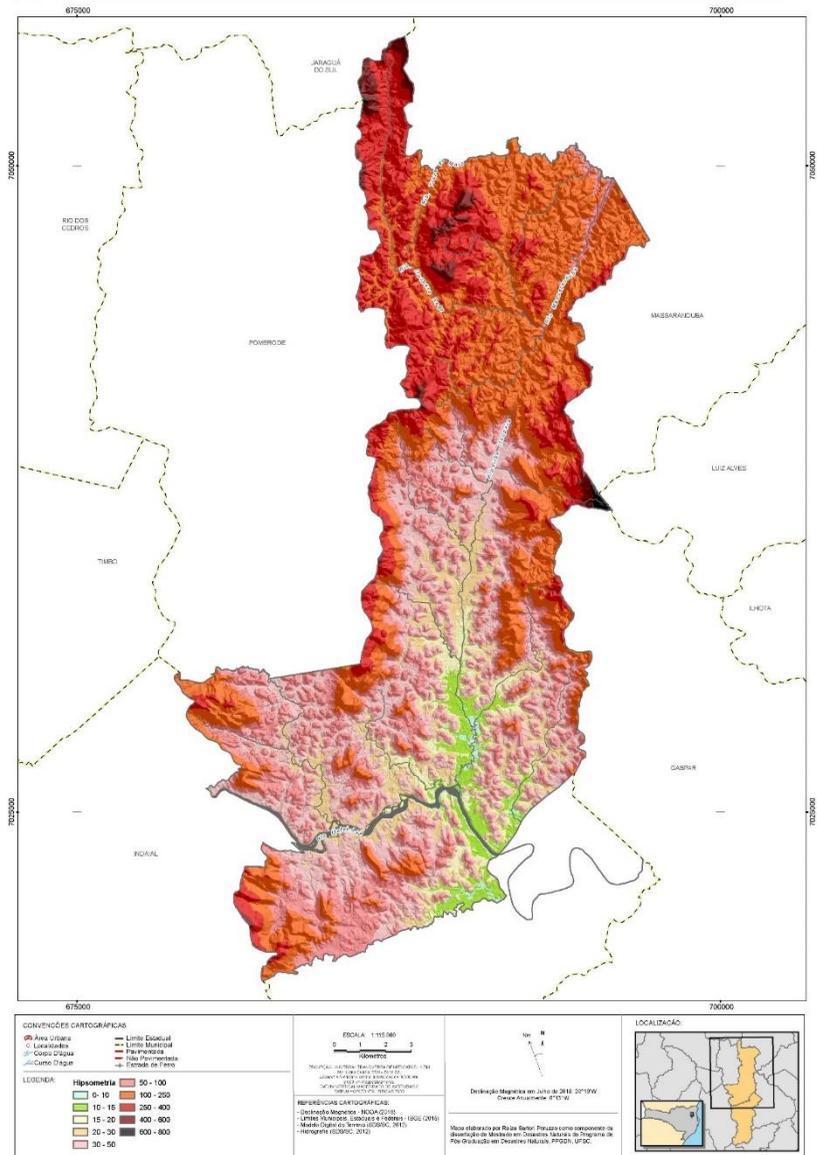
As morrarias compreendem as classes de modelados estabelecidos pela CPRM e IPT (2004) como Serras, Morros Altos e Morrotes Altos (Mapa 11). Estas regiões apresentam variação altimétrica de 70 a 790m m e declividades características de relevo Forte ondulado e Escarpado, em sua maioria.

O modelado de colinas baixas abrange as classes de modelados Colinas, Morrotes e Morros baixos. É caracterizado por relevo suave ondulado com altitudes que variam de 0 a 70m e declividades características de relevo Ondulado.

Mapa 8. Hipsometria.

ANÁLISE DOS DESLIZAMENTOS NO SETOR NORTE DO MUNICÍPIO DE BLUMENAU, SC

Mapa hipsométrico



Os depósitos aluviais são representados por cascalheiras, areias grossas a finas e sedimentos siltico-argilosos que ocorrem em calhas de córregos ou nas planícies aluviais dos cursos d'água maiores. Frequentemente formam terraços aluviais com elevações variadas, ocorrendo tanto nos modelados de morrarias como nos modelados de colinas baixas. Os depósitos aluvionares das planícies dos rios Itajaí-Açu e ribeirão Itoupava apresentam as regiões de menor altitude (0 – 20m).

Os depósitos coluviais na área formam rampas ou leques no sopé ou na meia-encosta das elevações mais íngremes (Figura 24). São depósitos extremamente heterogêneos e granulometricamente mal selecionados, compostos por matacões, blocos, areia, silte e argila de proveniência e constituição litológica variada. Depósitos de colúvio proximais à encosta são mais grosseiros e facilmente visualizáveis, por causa da grande concentração superficial de blocos e matacões, fruto da retirada das frações granulométricas mais finas por lavagem pelas águas de escoamento superficial. Foram mapeadas sete áreas que correspondem a depósitos coluviais, a maior delas tem 0,23 km² e representa o depósito com maior espessura e volume de sedimentos. No entanto, em função do relevo extremamente íngreme, é comum uma fina cobertura coluvial em quase todos os setores de baixa-encosta. Como essa cobertura, na maioria das vezes, tende a ser pouco espessa, optou-se por não representá-la no mapa geológico.

Figura 24. Rampa de colúvio no sopé de encosta.



7.1.4 Aspectos pedológicos do setor norte do município de Blumenau

A caracterização pedológica permitiu, com a ajuda do mapa geológico, a elaboração do mapa das unidades pedogeológicas de acordo com a metodologia de delimitação das unidades geotécnicas proposta por Davison Dias (1995). O Mapa 12 apresenta a distribuição das unidades pedológicas e a Tabela 8, o percentual de abrangência destas unidades.

As características geológicas compreendem solos residuais originados das rochas metagabroicas, ultramáficas, ortognaisses, granitoides e granitos-migmatito, que originam predominantemente solos Podzólicos e Cambissolos. Nas regiões de planície e áreas baixas, é composta por solos sedimentares quaternários de origem aluvionar e depósitos de encostas.

Nota-se o predomínio das unidades de Solos PVL - Podzólicos Vermelho Latossólico e C - Cambissolos que, juntas, correspondem a mais de 88% da área total de estudos. Os solos Litólicos são extremamente raros, com a rocha aflorando à superfície. Eles ocorrem em relevo íngreme, de ondulado a fortemente ondulado. Este tipo de solo foi suprimido dos modelos, pelas dificuldades de acesso às áreas de amostragem.

Mapa 12. Distribuição das unidades pedológicas.

ANÁLISE DOS DESLIZAMENTOS NO SETOR NORTE DO MUNICÍPIO DE BLUMENAU, SC

Mapa pedológico

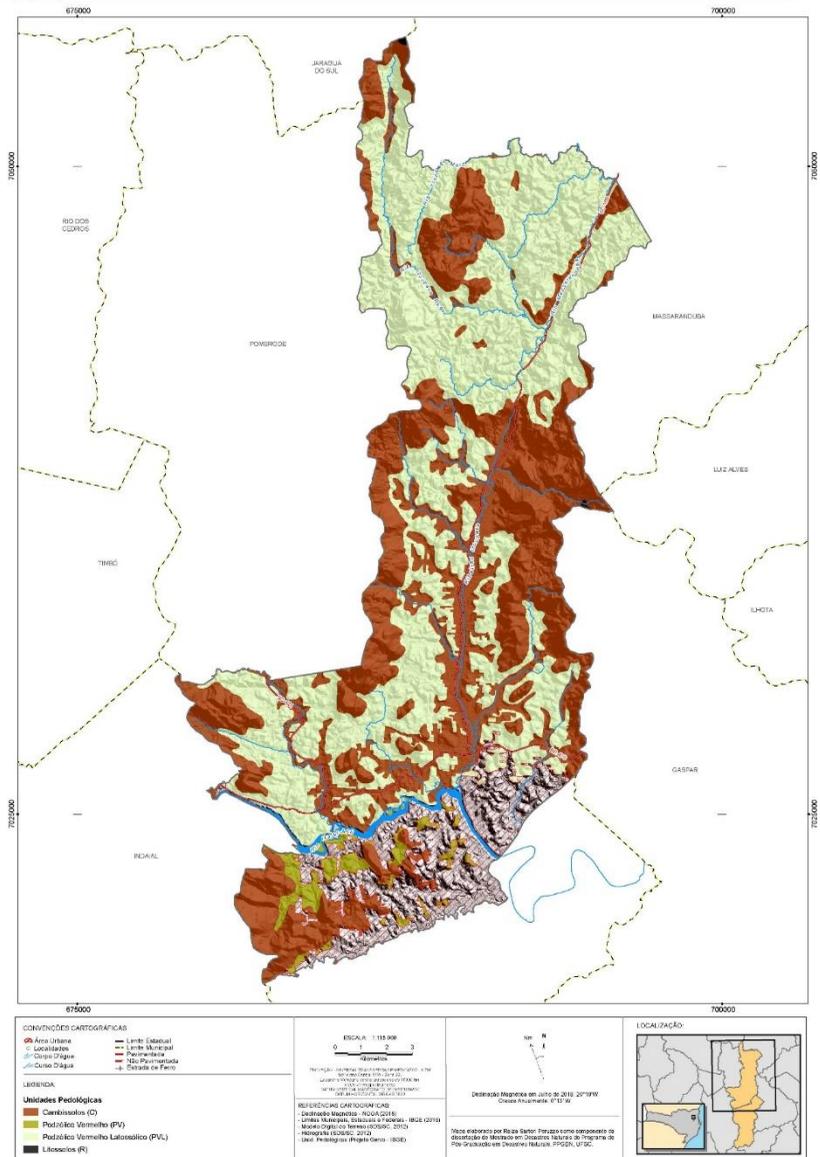


Tabela 8. Percentual de abrangência das unidades pedológicas.

Tipo de solo	Área (m²)	%
C - Cambissolos	121.552.348	41,28%
PV - Podzólicos	5.959.272	2,02%
PVL – Podzólicos Vermelho Latossólico	132.720.591	45,08%
R - Litólicos	151.677	0,05%
Hidrografia e Áreas urbanizadas	34.046.000	11,56%

Os solos predominantes são os Solos Podzólicos – PVL e PV característicos de clima úmido, sendo um tipo de solo bastante encontrado em Santa Catarina. Apresentam perfis bem desenvolvidos, profundidade mediana (1,5 a 2m), moderadamente ou bem intemperizados. Ocorrem geralmente em relevo ondulado e normalmente o teor de argila no horizonte B (de cor vermelha) é bem maior do que no horizonte A. Apresentam um horizonte B vermelho amarelado que mostra claramente a acumulação de argila (HIGASHI, 2016).

Nas regiões de ocorrência de Podzólicos, encontraram-se espessuras de solo maiores que 10m. Os resultados dos ensaios de laboratório (Tabela 9) evidenciaram características distintas e dependentes da variação da litologia.

Quanto à caracterização física, em geral, os Podzólicos apresentaram características de granulação fina, com exceção do Podzólico derivado de Piroxenitos (Ponto BL18), que mostrou um maior percentual (70,06%) de grãos grosseiros em sua composição.

Os valores de coesão dos Podzólicos variaram de 5,14 a 38,37, e os ângulos de atrito indicaram valores entre 22,2 e 29,3 (Tabela 10). O solo Podzólico, derivado de Piroxenito (Ponto BL18), apresentou o valor mais alto em termos de coesão, o que chama a atenção se comparado à sua composição granulométrica de predomínio de sedimentos de granulometria grossa.

Os Cambissolos, quando derivados de rochas como gnaisses, granitos, migmatitos, xistos e filitos, em geral, têm teores de fragmentos de rocha e/ou de minerais primários facilmente intemperizáveis, maiores que 4%, pelo menos na areia fina (HIGASHI, 2016). Os Cambissolos ocorreram nas áreas de relevo em Morrarias e com espessuras de solo menores quando comparados aos Podzólicos.

Quanto aos resultados dos ensaios de caracterização física e de resistência ao cisalhamento, os Cambissolos tiveram valores mais

homogêneos de coesão e ângulo de atrito, quando comparados aos resultados dos Podzólicos.

Também predomina a granulação fina para os Cambissolos, com exceção do Cambissolo derivado de Migmatitos, onde há a predominância de sedimentos grosseiros (60,76%). Os Cambissolos derivados de Piroxenito (Ponto m121) eram bem distintos dos Podzólicos (Ponto BL18) em termos de granulometria.

Os resultados de coesão variaram entre 16,1 e 23,6 (kN/m²) e ângulo de atrito entre 24,6 e 34,3 (Tabela 10).

Tabela 9. Resultados dos ensaios de caracterização física.

Ensaio Geotécnicos	Unidades Geotécnicas												
	m119 PVLgb	m129 PVLgn	bl04 PVpx	bl18 PVLpx	m130 PVLmg	m120 PVLgn1	bl205 PVLg	m132 Cgb	m118 Cgn	bl501 Cgn1	m121 Cpx	bl41 Cmg	
Granulometria [%]	Argila	12,59	25,56	44,63	1,6	8,4	38,75	8,43	16,04	6,54	13,45	23,82	7,36
	Silte	52,75	47,24	37,14	21,59	36,8	51,18	28,54	64,36	28,85	31,52	37,48	14,72
	A.F	12,72	15,91	3,47	6,74	38,59	4,16	18,25	4,85	23,27	11,01	17,87	17,15
	A.M	17,52	10,88	10,59	38,53	13,83	4,58	23,61	11,68	29,99	30,48	13,69	44,59
	A.G	3,97	0,42	3,16	31,29	2,37	1,22	16,19	1,91	9,91	13,1	6,23	13,94
	Pedr.	0,44	0	1	0,24	0	0,1	4,97	1,17	0	0,45	0,91	2,23
Umidade natural [%]	42,23	37,06	54,41	40,3	24,45	35,83	30	31,78	20,43	35,18	29,7	20,13	
Massa Específica	2,72	2,75	2,65	2,87	2,76	2,82	2,72	2,72	2,68	2,67	2,7	2,69	

Tabela 10. Resultados dos ensaios de resistência ao cisalhamento.

Ensaio Geotécnicos	Unidades Geotécnicas											
	m119	m129	bl18	m130	m120	bl205	bl04	m13 2	m11 8	bl501	m12 1	bl41
	PVLg b	PVLg n	PVLp x	PVLm g	PVLgn 1	PVL g	PVp x	Cgb	Cgn	Cgn1	Cpx	Cmg
φ	25,1	28	24,7	22,2	25,5	29,3	24,5	34,3	33,6	33	24,6	27,6
c (kN/m ²)	12,8	8,1	38,373	14,2	24	5,14	19,22	16,1	13,8	11,78 7	23,6	20,64 5

7.2 INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS

O mapa inventário de escorregamentos traz a distribuição espacial das ocorrências de escorregamentos (Mapa 13) que subsidiou a validação dos cenários de suscetibilidade gerados.

Foram identificadas 103 cicatrizes de escorregamentos que correspondem a 0,14% da área. Durante as pesquisas em campo, observou-se que as ocorrências compreendem escorregamentos deflagrados por causas supostamente naturais e também por causas induzidas por cortes inadequados de talude para construção de estradas e para a construção civil (Figura 25).

No primeiro grupo estão, principalmente, os escorregamentos do tipo translacionais que geralmente evoluíram para fluxos de lama e detritos nas porções mais distrais. No segundo grupo (escorregamentos induzidos) estão, principalmente, os escorregamentos do tipo rotacional, de menor porte e, por isso, menos visíveis e identificáveis nas imagens aéreas. Portanto, no mapa inventário de escorregamentos (Mapa 13) estão representados, principalmente, os escorregamentos do tipo translacional.

Figura 25. Ocorrências de escorregamentos rotacionais do tipo desencadeado por causas induzidas.



Diversas cicatrizes de escorregamentos foram rapidamente recobertas por vegetação quando em processo de estabilização. Por isso a dificuldade em validar a totalidade das ocorrências de escorregamentos, identificados previamente por fotointerpretação. A Figura 26 mostra uma ocorrência de deslizamento do episódio de novembro de 2008, totalmente coberta por vegetação em estágio avançado de regeneração. Destaca-se aqui a importância da comunicação com os moradores para melhor identificar as cicatrizes de escorregamentos.

Figura 26. Cicatriz de deslizamento translacional parcialmente coberta por vegetação.



As ocorrências de escorregamentos concentraram-se nas litologias Ortognaisse máfico e Ortognaisse félsico (Tabela 11). As litologias que abrangem os depósitos quaternários, Granito-Migmatito e Granitoide não apresentaram ocorrências de escorregamentos.

Tabela 11. Percentual de abrangência das cicatrizes por litologia.

Litologia	Número de cicatrizes por litologia	Área (m²) de cicatrizes em cada litologia	Área (m²) de cada litologia	Percentual da área de cicatrizes por área de cada litologia
Rochas Gabroicas	1	153.068	3.123.949	0,005%
Ortognaiss e Félsico	3	2,881.61	7.135.102	0,040%
Ortognaiss e Máfico	99	105,457.13	231.200.000	0,046%

Em relação às declividades (Tabela 12) a frequência de cicatrizes aumenta a partir de 45°, e entre 60-65° esta frequência diminui. A ocorrência de escorregamentos tende a diminuir em declividades muito acentuadas porque a espessura do solo é inexistente.

Tabela 12. Frequência da área de cicatrizes por classe de declividade.

Classes de declividade (°)	Área de cicatrizes (m²)	Área das classes de declividade (m²)	Porcentagem da Área de cicatrizes por classe
0-5	814	59.805.649	0,001%
5-10	1.026	53.398.436	0,002%
10-15	3.047	54.560.589	0,006%
15-20	10.521	55.635.080	0,019%
20-25	23.135	48.189.036	0,048%
25-30	31.367	31.774.307	0,099%
30-35	23.805	15.074.059	0,158%
35-40	12.195	5.540.683	0,220%
40-45	3.984	1.989.038	0,200%
45-50	1.728	677.449	0,255%
50-55	1.028	207.882	0,495%
55-60	374	56.626	0,660%
60-65	70	17.060	0,410%

Quanto à pedologia, os escorregamentos concentraram-se na unidade Ca (0,075%), PVL_a (0,012%) e 0,011% nas outras áreas que compreendem as áreas urbanizadas onde não há dados de tipo de solo.

Tabela 13. Percentual de abrangência de cicatrizes por unidade pedológica.

Unidades Pedológicas	Número de cicatrizes por unidade pedológica	Área (m²) de cicatrizes por unidade pedológica	Área (m²) de cada unidade pedológica	Percentual de cicatrizes por área das unidades pedológicas
Ca	83	89.372,84	119.400.000	0,075%
PVL _a	16	15.567,13	132.700.000	0,012%
Outras unidades	4	3.551,85	31.290.000	0,011%

Os escorregamentos concentraram-se nos solos característicos das zonas de relevo em Morrarias, cujas declividades são mais acentuadas,

indicando uma maior suscetibilidade nesta unidade pedológica. Já os solos PVLa, característicos de perfis de intemperismo bem desenvolvidos, estão localizados espacialmente nas áreas de declividades menos acentuadas, o que pode explicar o menor percentual de ocorrências de escorregamentos.

Tabela 14. Percentual de abrangência de cicatrizes por modelados de relevo.

Modelados do Relevo	Número de cicatrizes em cada modelado de relevo	Área (m²) de cicatrizes em cada modelado do relevo	Área (m²) de cada modelado do relevo	Percentual da área de cicatrizes por área de cada modelado do relevo
Morrarias	82	89.234	180.443.859	0,05%
Colinas baixas	21	19.484	114.008.956	0,02%

Em uma análise prévia, considerando a frequência de cicatrizes por unidades geotécnicas, os solos derivados de Gnaisse Máfico são mais suscetíveis à ocorrência de escorregamentos (Tabela 15 e Tabela 16).

Tabela 15. Percentual de abrangência de cicatrizes por unidade geomorfo-pedogeológica.

Unidade geomorfo-pedogeológica	Número de cicatrizes em cada unidade	Área (m²) de cicatrizes por unidade	Área (m²) das unidades	Percentual de cicatrizes por área das unidades
Mgb	1	153	2.641.408	0,006%
Mgn1	1	1.951	6.865.170	0,028%
Cgn1	2	931	265.048	0,351%
Mgn	81	86.904	155.933.618	0,056%
Cgn	18	18.553	75.065.166	0,025%

Tabela 16. Percentual de abrangência de cicatrizes por unidade pedogeológica.

Unidade pedogeológica	Número de cicatrizes em cada unidade	Área (m²) de cicatrizes por unidade	Área (m²) das unidades	Percentual de cicatrizes por área das unidades
PVLgn1	1	1.951	6.205.638	0,031%
Cgn	82	88.626	82.086.129	0,108%
PVLgn	15	14.211	126.597.327	0,011%
Cgb	1	153	901.021	0,017%

É importante considerar ressalvas quanto à validade desta análise, pois algumas áreas indicadas como de suscetibilidade apresentam um número baixo de cicatrizes. Isto significa que, nesta unidade, ocorre uma grande cicatriz em termos de área. Estatisticamente não apresenta resultado válido porque abrange uma área pequena.

7.3 RESULTADOS DOS MODELOS

A investigação das características geotécnicas e a aplicação de métodos estatísticos permitem definir e localizar espacialmente as unidades e áreas em que ocorre a maior concentração de cicatrizes de escorregamentos. Todavia, muitas vezes este tipo de análise estatística quando muito simplificada pode apresentar resultados menos significativos diante dos modelos determinísticos. Além disso, como no projeto do Ministério das Cidades, foi possível encaminhar os ensaios geotécnicos necessários, optou-se por esses últimos tipos de modelos que dão conta de analisar grande parte dos processos geológicos e geomorfológicos que influenciam na ocorrência de movimentos de massa, usando equações matemáticas de estabilidade de taludes. Dentre os modelos determinísticos foram utilizados o modelo SHALSTAB e o modelo Fator de Segurança.

7.3.1 Modelo SHALSTAB

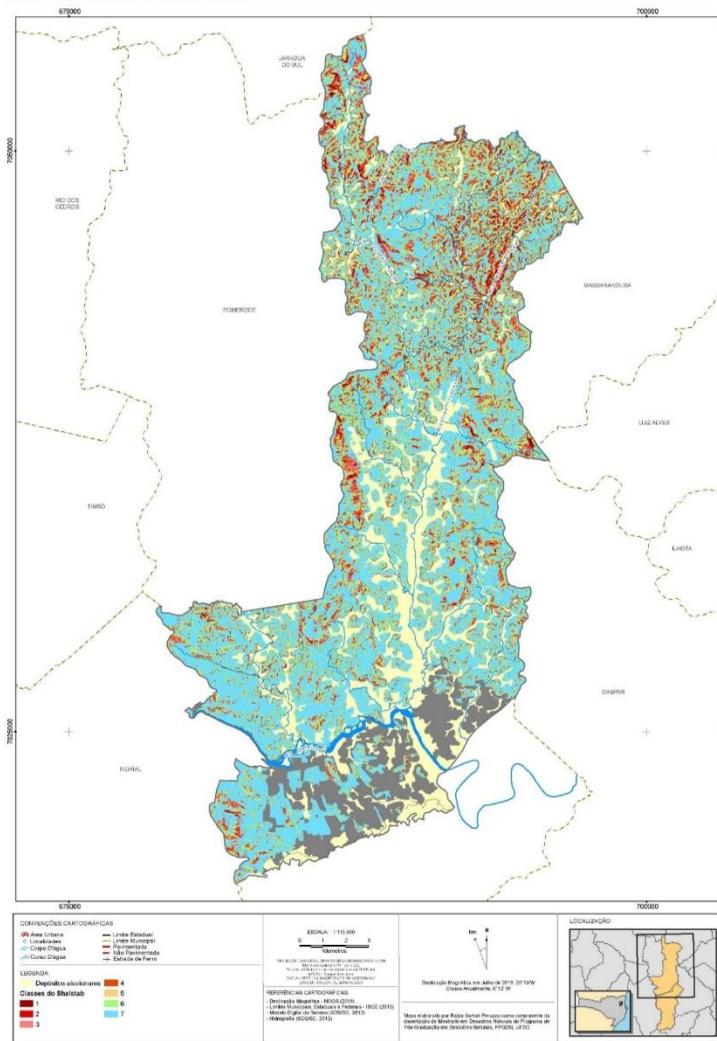
A modelagem do método SHALSTAB, considerando as unidades pedogeológicas (Mapa 14), identificou 55,75% das áreas incondicionalmente estáveis e saturadas, enquanto o modelo baseado nas unidades geomorfo-pedogeológicas (Mapa 15) apresentou 65,21% das áreas incondicionalmente estáveis e saturadas (Tabela 17). As áreas determinadas na classe incondicionalmente estável e saturada são as

encostas de relevo de baixa declividade que, mesmo com o solo saturado, não ocorrerá ruptura.

Na classe incondicionalmente instável, a declividade da encosta é elevada e propícia à ruptura, mesmo se o solo estiver sem saturação. No modelo SHALSTAB – unidades pedogeológicas, estas áreas correspondem a 3,87%, e no modelo usando as unidades geomorfo-pedogeológicas, correspondem a apenas 2,15% (Tabela 17).

Mapa 14. Resultado do modelo SHALSTAB baseado nas unidades pedogeológicas.

ANÁLISE DOS DESLIZAMENTOS NO SETOR NORTE DO MUNICÍPIO DE BLUMENAU, SC
 Resultado do modelo Shalstab baseado nas Unidades Pedogeológicas



Mapa 15. Resultado do modelo SHALSTAB baseado nas unidades geomorfo-pedogeológicas

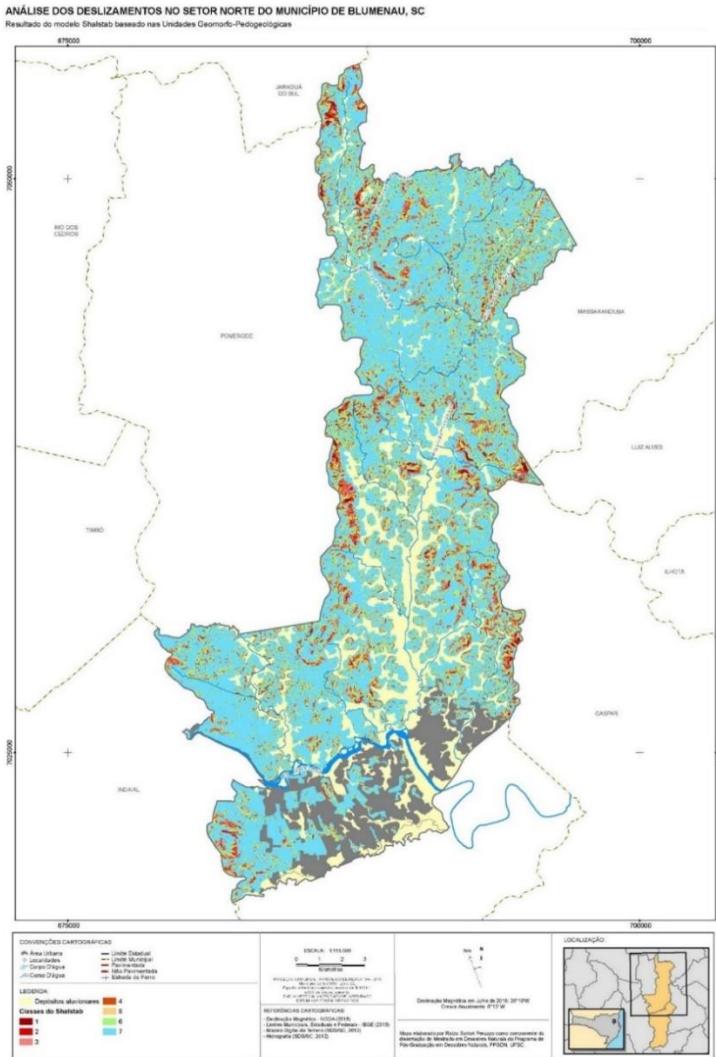


Tabela 17. Classes de estabilidade do SHALSTAB por unidade geotécnica.

Classe de estabilidade SHALSTAB	Unidades pedogeológicas	Unidades geomorfo-pedogeológicas
1 - Incondicionalmente Instável e saturado	3,87%	2,15%
2 - Incondicionalmente Instável e não saturado	2,30%	1,37%
3 - Instável e saturado	3,39%	2,20%
4 - Instável e não saturado	7,75%	5,65%
5 - Estável e não saturado	11,00%	8,93%
6 - Incondicionalmente Estável e não saturado	15,94%	14,48%
7 - Incondicionalmente Estável e saturado	55,75%	65,21%

A comparação de um mesmo modelo baseado em diferentes metodologias de delimitação das unidades geotécnicas demonstrou que os resultados podem ser bastante distintos. Isto ressalta a importância da realização da verificação de todos os modelos antes de determinar as áreas suscetíveis a escorregamentos.

7.3.2 Modelo pelo Fator de Segurança

Este modelo resulta em 12 classes, determinadas pelo Fator de Segurança, conforme citado no capítulo 6.2.2 deste trabalho. Neste caso, as áreas com um valor baixo de Fator de Segurança estão representadas na classe 12.

O Mapa 16 e Mapa 17 trazem, respectivamente, os resultados das simulações referentes às unidades pedogeológicas e geomorfo-pedogeológicas.

Ambas as simulações tiveram resultados com valores aproximados (Tabela 18), exceto na classe 12, onde a unidade Pedogeológica abrangeu um percentual maior de áreas de baixo Fator de Segurança (11,7%) quando comparada à unidade geomorfo-pedogeológica (3,8%).

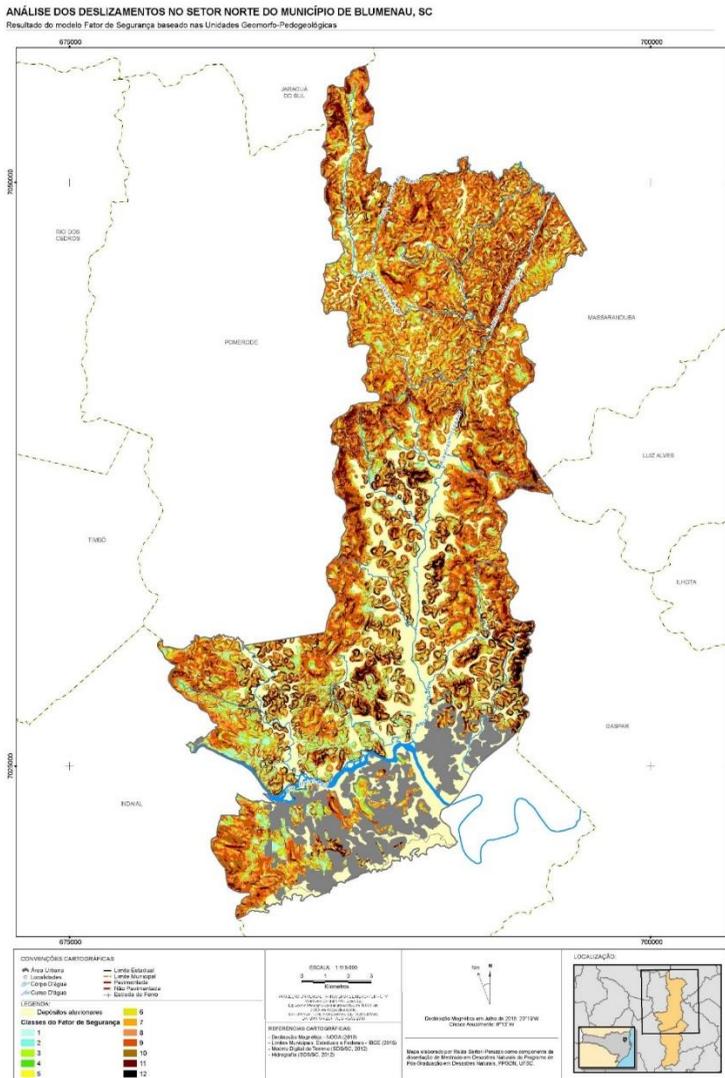
Os modelos baseados no Fator de Segurança têm a possibilidade de melhor determinar as áreas de segurança quando comparados ao Modelo Shalstab. Pois este último determina apenas 7 classes de

instabilidade, enquanto que o Fator de Segurança determina 12 classes e, portanto, abrange maior número de classes de menor suscetibilidade, permitindo segmentar com mais precisão as áreas de segurança.

Tabela 18. Classes de estabilidade do Fator de Segurança por unidade geotécnica.

Classe de estabilidade Fator de Segurança	Unidades Pedogeológicas	Unidades Geomorfo- pedogeológicas
12	11,7%	3,8%
11	14,4%	11,3%
10	14,3%	13,9%
9	17,4%	19,8%
8	16,2%	19,2%
7	6,5%	8,3%
6	4,2%	5,7%
5	3,4%	4,1%
4	2,7%	2,9%
3	1,7%	2,2%
2	2,3%	2,5%
1	5,3%	6,3%

Mapa 17. Resultado do modelo Fator de Segurança baseado nas unidades geomorfo-pedológicas.



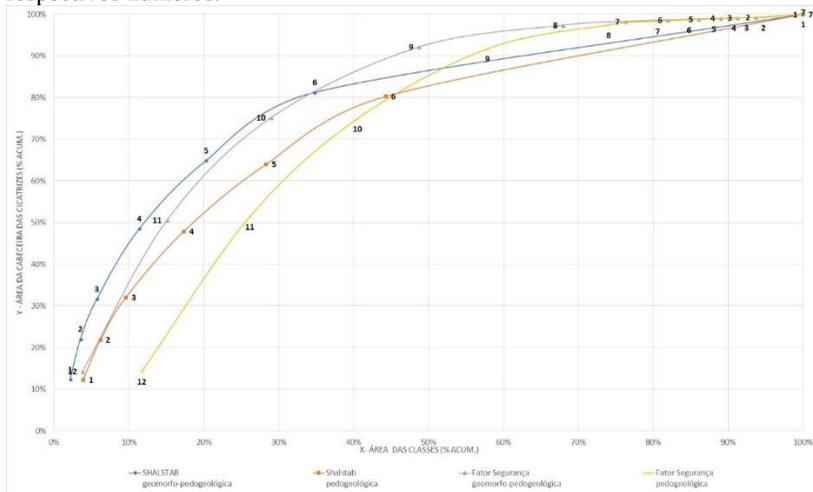
7.4 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

O conhecimento do percentual de cada classe de estabilidade dos modelos não é suficiente para eleger um cenário mais adequado. Portanto, é necessário verificar a validade e o poder de previsão desses modelos. Para isso é necessário realizar um procedimento chamado validação, que pode ser feito mediante a sobreposição das classes de suscetibilidade dos modelos desenvolvidos com as cicatrizes de escorregamentos.

Posteriormente, um tratamento estatístico adequado permitirá que os modelos matemáticos desenvolvidos possam ser mais confiáveis para determinar a suscetibilidade a escorregamentos.

Um dos procedimentos estatísticos utilizáveis é a curva de validade (CHUNG E FABRI, 2003), conforme demonstra a metodologia de validação no Item 6.3 deste trabalho. Um modelo para ser considerado satisfatório deve apresentar pelo menos 50% das cicatrizes de deslizamento concentradas em apenas 20% da área, justamente aquelas de maior suscetibilidade (CHUNG E FABRI, 2003). O modelo não apresenta resultados satisfatórios quando essas cicatrizes estão bem distribuídas por todas as classes do modelo. Quando isso ocorre, o modelo precisa ser calibrado, reavaliando todas as fases que precederam a modelagem e buscando os possíveis erros que possam ter ocorrido. A Figura 27 apresenta as curvas de validação das 4 modelagens realizadas nesta pesquisa.

Figura 27. Curva de validação dos modelos SHALSTAB e Fator de Segurança. As classes de suscetibilidade estão representadas por pontos, com seus respectivos números.



Os resultados da validação do Modelo Shalstab – unidades pedogeológicas, demonstraram que cerca de 53% das cicatrizes caem nos primeiros 20% da área do modelo (áreas mais suscetíveis). Elas correspondem às classes: 1 - Incondicionalmente instável e saturada; 2 - Incondicionalmente instável e não saturada; 3 - Instável e saturada; 4 - Instável e não saturada e parte da classe 5 (Figura 28 e Tabela 19).

Esse modelo apresentou, de acordo com a metodologia utilizada, uma ótima validação das áreas suscetíveis. A fragilidade do modelo está na incapacidade de definir as áreas de segurança, pois, ainda, 19,76% das cicatrizes ocorreram na classe 7 - Incondicionalmente estável e saturada, que corresponde a 55,75% de área do modelo.

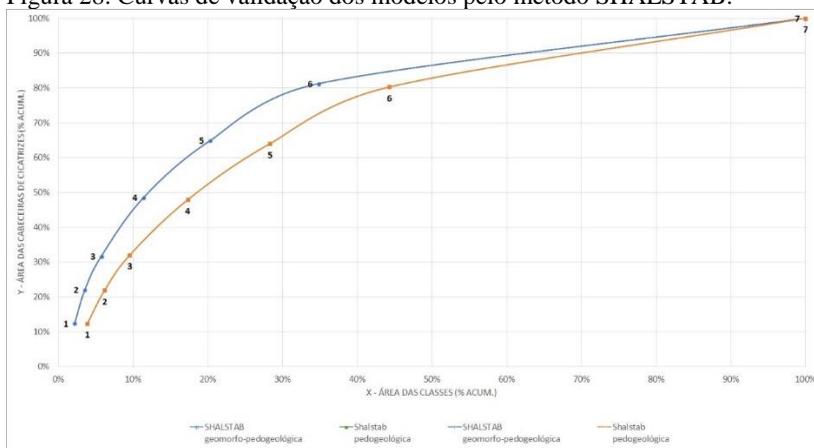
A verificação do Modelo SHALSTAB – unidades geomorfo-pedogeológicas, apresentou cerca de 64% das cicatrizes nos primeiros 20% de áreas, correspondentes às áreas/classes de maior suscetibilidade, sendo, portanto, um resultado bem melhor que o anterior. Esta área corresponde também às classes: 1 - Incondicionalmente instável e saturada; 2 - Incondicionalmente instável e não saturada; 3 - Instável e saturada; 4 - Instável e não saturada e parte da classe 5 (Figura 28 e Tabela 19). Novamente, assim como no Modelo SHALSTAB - pedogeológicas, também apresenta um bom resultado para as áreas suscetíveis, mas perde na definição das áreas de segurança, pois 18,76% das cicatrizes ocorreram

na classe 7 - Incondicionalmente estável e saturada, que corresponde a 65,21% da área do modelo.

Tabela 19. Resultados da validação/verificação do modelo SHALSTAB.

Classe de estabilidade SHALSTAB	Unidade Pedogeológica		Unidade Geomorfo-pedogeológica	
	Área de cada classe (% acum)	Proporção de cicatrizes em cada classe (% acum)	Área de cada classe (% acum)	Proporção de cicatrizes em cada classe (% acum)
1 - Incond. Instável e sat.	3,87%	12,32%	2,15%	12,38%
2 -Incond. Instável e ã sat.	6,17%	21,83%	3,52%	22,02%
3 - Instável e sat.	9,56%	32,01%	5,72%	31,68%
4 - Instável e ã sat.	17,31%	47,88%	11,38%	48,52%
5 - Estável e ã sat.	28,31%	63,97%	20,31%	64,87%
6 - Incond. Estável e ã sat.	44,25%	80,24%	34,79%	81,24%
7 - Incond. Estável e sat.	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Figura 28. Curvas de validação dos modelos pelo método SHALSTAB.



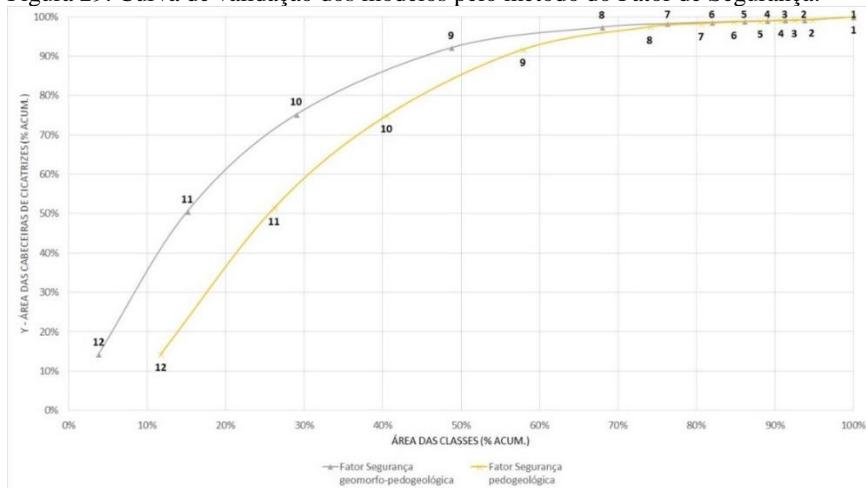
No modelamento de suscetibilidade pelo Fator de Segurança – unidades pedogeológicas, cerca de 37% das cicatrizes coincidem com primeiros 20% da área do modelo (áreas mais suscetíveis) (Figura 29). Embora tenha sido o pior dos quatro modelos quanto à previsão de áreas mais suscetíveis, a vantagem deste modelo é que apenas 2,57% das cicatrizes ocorreram nas 7 classes finais, definindo assim as áreas de segurança de forma muito mais precisa do que os modelos SHALSTAB.

O modelo Fator de Segurança – unidades geomorfo-pedogeológicas, apresentou um resultado de aproximadamente 61% das cicatrizes nos primeiros 20% da área do modelo correspondentes às áreas mais suscetíveis (Figura 29 e Tabela 20). É, portanto, um modelo bem melhor que o anterior. Além disso, foi um bom resultado para a definição das áreas de segurança, uma vez que 2,63% de cicatrizes estão localizadas nas 7 classes finais do modelo, que correspondem às classes mais estáveis.

Tabela 20. Resultados da validação/verificação do modelo Fator de Segurança.

Classe de estabilidade Fator de Segurança	Unidade Pedogeológica		Unidade Geomorfo-pedogeológica	
	Área de cada classe (% acum)	Proporção de cicatrizes em cada classe (% acum)	Área de cada classe (% acum)	Proporção de cicatrizes em cada classe (% acum)
12	11,71%	14,27%	3,79%	14,28%
11	26,15%	51,43%	15,09%	50,55%
10	40,49%	74,92%	28,98%	75,19%
9	57,88%	91,72%	48,73%	92,16%
8	74,03%	97,43%	67,94%	97,37%
7	80,58%	98,30%	76,29%	98,26%
6	84,76%	98,66%	81,97%	98,63%
5	88,11%	98,89%	86,06%	98,85%
4	90,77%	99,05%	89,00%	98,99%
3	92,43%	99,17%	91,24%	99,14%
2	94,69%	99,24%	93,69%	99,22%
1	100,00%	100,00%	100,00%	100,00%

Figura 29. Curva de validação dos modelos pelo método do Fator de Segurança.



Considerando a metodologia de verificação utilizada, todos os quatro modelos apresentaram resultados satisfatórios para a definição das áreas suscetíveis a escorregamentos. As unidades geotécnicas geomorfo-pedogeológicas apresentaram melhores resultados quanto às pedogeológicas, tanto nos modelos SHALSTAB quanto nos modelos

baseados no Fator Segurança. Os modelos baseados no Fator de Segurança, por estarem segmentados em 12 classes de suscetibilidade, permitem definir com melhor precisão as áreas de segurança, ou seja, as áreas em que pouca ou nenhuma cicatriz de deslizamento ocorreu.

Para compor o mapa de suscetibilidade final a escorregamentos do setor norte do município de Blumenau, optou-se por utilizar a modelagem baseada no Fator de Segurança usando as unidades geomorfo-pedogeológicas, pois se considera que este modelo apresentou melhores condições de definir as áreas de segurança. Além disso, obteve um bom resultado de validação para as áreas das classes de maior suscetibilidade, somente um pouco menor do que o do Shalstab – unidades geomorfo-pedogeológicas.

7.5 SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS

As curvas de validação, além de definirem o modelo ideal para determinada área, permitem identificar as áreas de alta, média e baixa suscetibilidade. O mapa com 3 classes de suscetibilidade foi elaborado depois da análise da curva de validação, observando o percentual de cicatrizes que ocorre nas classes do modelo.

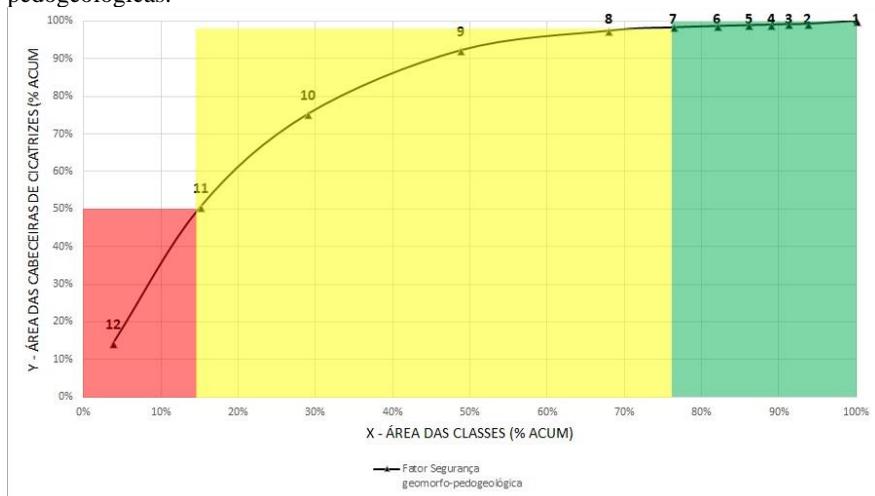
Com base nesses resultados, pôde-se definir que o modelo fundamentado no Fator de Segurança, considerando as unidades geomorfo-pedogeológicas, apresenta os melhores resultados de validação e, conseqüentemente, é o mais assertivo em identificar tanto as áreas de suscetibilidade como também as áreas de segurança. Conforme o item acima, após os procedimentos de validação, obteve-se o melhor resultado neste modelo, o que justifica a sua escolha para representar o Mapa de Suscetibilidade a deslizamento no setor norte do Município de Blumenau (Mapa 18). A Figura 30 apresenta a curva de validação do modelo Fator de Segurança considerando as unidades geomorfo-pedogeológicas, dividida em 3 classes de suscetibilidade, alta, média e baixa, baseadas no formato dessa curva.

Neste modelo, 50,55% das cicatrizes de escorregamentos ocorreram em 2 classes do modelo (Classes 12 e 11) que correspondem a apenas 15,09% da área. A área dessas duas classes foi definida como de Alta Suscetibilidade.

As áreas de Média Suscetibilidade corresponderam às classes 10, 9 e 8 em que as cicatrizes apresentaram-se bem distribuídas, 46,87% das cicatrizes ocorreram em 52,84% da área dessas 3 classes.

As classes restantes (7 a 1) do modelo correspondem a 32,06% da área e nela ocorreram apenas 2,63% das cicatrizes, neste caso, originando as áreas de Baixa Suscetibilidade que podem ser consideradas áreas de segurança.

Figura 30. Classes de suscetibilidade do modelo Fator de Segurança – geomorfo-pedogeológicas.



7.5.1 Análise da suscetibilidade das unidades geomorfo-pedogeológicas

Esta análise foi obtida a partir do cruzamento do mapa de suscetibilidade a escorregamentos (Mapa 18) com as unidades geomorfo-pedogeológicas (Mapa 3). O objetivo desse cruzamento foi identificar as unidades geotécnicas com maior suscetibilidade a escorregamentos na área. Cada classe de suscetibilidade (alta, média e baixa) foi sobreposta separadamente ao mapa das unidades geotécnicas, permitindo calcular o percentual da área de cada unidade geotécnica.

A unidade mais suscetível à ocorrência de movimentos de massa é a de Colinas baixas em Gnaiss Máfico, representada no modelo pelo Ponto M129 (Tabela 21). A análise dos parâmetros físicos (Tabela 24) do solo demonstra coesão (8.1 kNm²) e ângulo de atrito (28). O valor de coesão baixo justifica-se pelo alto percentual de Argila, maior que 25%, do total de material do solo. Outro fator de instabilidade nesse tipo de solo é o alto índice de materiais finos, como o Silte (47,24%) e a Areia Fina (15.91%) que, juntos, compreendem mais de 50% da área. A resistência ao cisalhamento é dada pela quantidade de areia presente no material, neste caso as areias Média e Grossa somam o total de 11.3%, valor considerado baixo para a estabilidade da encosta.

Tabela 21. Área (m²) das unidades de Alta Suscetibilidade

Unidades Pedo-Geomorfológicas	Área total de cada unidade (m²)	Área da unidade em alta suscetibilidade (m²)	Percentual da área da unidade em alta suscetibilidade
Mpx – Piroxenitos em Morrarias	788.635	7.485	0,95%
Mgb – Rochas metagabroicas em Morrarias	2.363.640	6.302	0,27%
Cgb – Rochas metagabroicas em Colinas baixas	481.726	13.044	2,71%
Mde – Depósitos coluvionares	626.916	54.331	8,67%
Mg – Granitoide em Morrarias	1.472.481	340.956	23,16%
Mmg – Granito-Migmatito em Morrarias	1.264.730	13.341	1,05%
Cmg – Granito-Migmatito em Colinas baixas	165.505	5.057	3,06%
Mgn1 – Ortognaisse félsico em Morrarias	6.865.316	197.964	2,88%
Mgn – Ortognaisse máfico em Morrarias	151.091.356	18.880.460	12,50%
Cgn – Ortognaisse máfico em Colinas baixas	61.084.721	14.618.156	23,93%

A unidade de baixa suscetibilidade corresponde aos Piroxenitos em Colinas Baixas - Cpx representados no modelo pelo Ponto BL18 (Tabela 22). A análise dos parâmetros de resistência e características do solo

evidência que, neste caso, a resistência justifica-se pela alta quantidade de matérias grossas, areia grossa e média que, juntas, correspondem a quase 70% dos materiais que compõem o solo.

Outro fator importante é o valor do ângulo de atrito correspondente a 24.7, um valor baixo se comparado ao percentual de materiais grossos, já que são esses materiais que definem a resistência ao cisalhamento. É curioso que, neste caso, o valor de coesão apresentou-se alto, 38.37 kN/m², se comparado ao percentual de argila do material. Possivelmente se deva às características dos argilominerais (esmactitas/montmorilonitas) que se desenvolvem com base nos piroxenitos.

Tabela 22. Área (m²) das unidades de Baixa Suscetibilidade.

Unidades Pedo-Geomorfológicas	Área total de cada unidade (m²)	Área da unidade em baixa suscetibilidade (m²)	Percentual da área da unidade em baixa suscetibilidade
Mpx – Piroxenitos em Morrarias	788.635	561.436	71,19%
Cpx – Piroxenitos em Colinas baixas	243.891	232.589	95,37%
Mgb – Rochas metagabroicas em Morrarias	2.363.640	1.687.630	71,40%
Cgb – Rochas metagabroicas em Colinas baixas	481.726	298.728	62,01%
Mde – Depósitos coluvionares	626.916	212.342	33,87%
Mg – Granitoide em Morrarias	1.472.481	366.967	24,92%
Mmg – Granito-Migmatito em Morrarias	1.264.730	649.911	51,39%
Cmg – Granito-Migmatito em Colinas baixas	165.505	92.237	55,73%
Mgn1 – Ortognaisse félsico em Morrarias	6.865.316	3.410.066	49,67%
Mgn – Ortognaisse máfico em Morrarias	151.091.356	43.439.710	28,75%
Cgn – Ortognaisse máfico em Colinas baixas	61.084.721	21.546.881	35,27%

As unidades de média suscetibilidade ainda que sem elevado percentual de cicatrizes em sua área, merecem a devida atenção principalmente nas áreas de alta declividade. A unidade com média suscetibilidade corresponde aos Gnaisses Máficos em Morrarias (Ponto M118), conforme apresenta a Tabela 23. Os parâmetros do solo conferem a essa região certa estabilidade, de acordo com os ensaios, a coesão apresenta 13.8 kN/m^2 e o ângulo de atrito 33.6 . Apesar de os valores apresentarem alguma estabilidade do ponto de vista mecânico, o somatório dos materiais finos ultrapassa 50%, o que, em situações de altos índices pluviométricos somados a áreas de alta declividade, podem ocasionar rupturas.

Tabela 23. Área (m²) das unidades de Média Suscetibilidade.

Unidades geomorfo-pedogeológicas	Área total de cada unidade (m ²)	Área da unidade em média suscetibilidade (m ²)	Percentual da área da unidade em média suscetibilidade
Mpx – Piroxenitos em Morrarias	788.635	219.677	27,86%
Cpx – Piroxenitos em Colinas baixas	243.891	11.299	4,63%
Mgb – Rochas metagabroicas em Morrarias	2.363.640	669.703	28,33%
Cgb - Rochas metagabroicas em Colinas baixas	481.726	169.954	35,28%
Mde – Depósitos coluvionares	626.916	309.701	49,40%
Mg – Granitoide em Morrarias	1.472.481	764.558	51,92%
Mmg – Granito-Migmatito em Morrarias	1.264.730	601.478	47,56%
Cmg - Granito-Migmatito em Colinas baixas	165.505	68.211	41,21%
Mgn1 – Ortognaisse félsico em Morrarias	6.865.316	3.257.277	47,45%
Mgn – Ortognaisse máfico em Morrarias	151.091.356	88.699.541	58,71%
Cgn – Ortognaisse máfico em Colinas baixas	61.084.721	24.752.257	40,52%

Tabela 24. Parâmetros geotécnicos referentes às unidades de Alta, Média e Baixa Suscetibilidade.

Classes Suscetib.	Unid. geomorfo-pedogeol.	GRANULOMETRIA							
		Argila	Silte	A.F	A.M	A.G	Pedr.	φ	c (kN/m ²)
Baixa	Cpx	1,6	21,5	6,74	38,5	31,2	0,24	24,7	38,3
Média	Mgn	6,54	28,8	23,2	29,9	9,91	-	33,6	13,8
Alta	Cgn	25,56	47,2	15,9	10,8	0,42	-	28	8,1

Percebeu-se que em uma mesma unidade litológica há uma variação significativa nas características de granulometria, nos resultados de coesão e no ângulo de atrito que podem ser atribuídos às características

morfoestruturais do terreno. Um exemplo são as amostras coletadas em Piroxenito. Elas apresentaram valores de coesão de 19,22 kN/m² e 23,6 kN/m² em morrarias e 38,37 kN/m² em colinas baixas. Esses valores são os mais elevados dentre as unidades, podendo justificar a baixa suscetibilidade dos modelos. Já os resultados de ângulo de atrito ficaram próximos, variando de 24,5 a 24,7.

As amostras de Gnaisse Máfico também tiveram valores distintos de coesão, variando de 3,8 kN/m² a 13,8 kN/m², sendo o valor de coesão menor em colinas baixas. Os valores de ângulo de atrito variaram entre 28 e 33,6, respectivamente em Colinas baixas e Morrarias.

A variação de resultados dos ensaios de caracterização e de resistência para uma mesma unidade litológica é resultado da dinâmica natural dos solos. Os solos derivados de mesma litologia apresentam características mecânicas distintas. Somam-se a isso as características topográficas, a dinâmica hídrica, a espessura dos solos, entre outros fatores que são dinâmicos e variáveis, conforme a localização dos pontos de coleta em uma mesma encosta. Estes fatores podem ocasionar erros que refletem nos modelos de suscetibilidade, principalmente em áreas de grande extensão territorial.

Por causa dessa realidade extremamente dinâmica das características dos solos, e dos diversos fatores desencadeantes de movimentos de massa, mostra-se necessária a investigação detalhada das encostas identificadas como de alta suscetibilidade, considerando a tipologia dos fenômenos, seus agentes e mecanismos condicionantes.

8 CONCLUSÕES

O setor norte do Município de Blumenau, localizado na região do Vale do Itajaí, pela frequência e magnitude dos eventos de escorregamentos ocorridos recentemente, torna-se área prioritária para a execução de ações de previsão e prevenção de desastres naturais.

Os modelos matemáticos validados e aplicados nesta pesquisa mostraram-se satisfatórios para a previsão de escorregamentos e consequente aplicação para a análise da suscetibilidade na área de estudos. É importante destacar que a aplicação de modelos apoiados em bases físicas apresentam fragilidades que podem influenciar na análise de suscetibilidade, especialmente aqueles referentes às áreas com grande extensão territorial, como a área de estudo desta pesquisa.

Considerando essas fragilidades, os procedimentos de validação mostraram-se, nesta pesquisa, essenciais para avaliar a eficácia de modelos matemáticos propostos e também para definir a metodologia de definição das unidades geotécnicas mais adequadas para a análise de suscetibilidade na área de estudos.

Tanto os modelos SHALSTAB (utilizando-se unidades geomorfo-pedogeológicas ou pedogeológicas) quanto o Fator de Segurança (utilizando-se unidades geomorfo-pedogeológicas ou pedogeológicas), aplicados nesta pesquisa, responderam adequadamente às curvas de validação. A análise detalhada dessas curvas permitiu identificar o modelo apropriado aos objetivos da pesquisa.

A análise desses modelos identificou que as duas simulações (unidades geomorfo-pedogeológicas e pedogeológicas) obtidas pelo modelo SHALSTAB foram adequadas para a identificação das classes de maior suscetibilidade, todavia, apresentaram resultados limitados para a determinação das áreas de baixa suscetibilidade ou áreas de segurança. O modelo SHALSTAB resulta em 7 classes de estabilidade e, em todas as simulações, a última classe (de baixa suscetibilidade) compreendeu uma área de extensão territorial muito grande (em torno de 55 ou 66% da área), onde ocorreram cerca de 18% do total de cicatrizes. Por serem muito extensas, não é possível delimitar áreas de segurança, pelo menos não como esse modelo está estruturado (em sete classes).

As duas simulações obtidas com base no Fator de Segurança (unidades geomorfo-pedogeológicas e pedogeológicas) apresentaram sucesso na identificação das classes de maior suscetibilidade e permitiram segmentar as áreas de média e baixa suscetibilidade, de forma mais precisa e adequada que aquelas referentes ao modelo SHALSTAB. Isso é explicado porque o modelo do Fator de Segurança resulta em 12 classes

de estabilidade que estão mais eficientemente distribuídas, permitindo segmentar com mais precisão as áreas de média e, principalmente, de baixa suscetibilidade.

A delimitação das unidades geotécnicas usando a metodologia das unidades geomorfo-pedogeológicas apresentou melhores resultados com relação às curvas de validação quando comparadas às unidades pedogeológicas. Estes resultados foram satisfatórios tanto no modelo SHALSTAB quanto no baseado no Fator de Segurança.

Em função disso, a simulação por meio do Fator de Segurança, baseado nas unidades geomorfo-pedogeológicas, obteve maior assertividade em definir as áreas de segurança e as áreas de alta suscetibilidade e, portanto, foi esse o modelo escolhido para ser utilizado para a elaboração do mapa de suscetibilidade com três classes (de alta, média e baixa suscetibilidade).

Diferentemente de outros trabalhos que utilizam modelos matemáticos determinísticos também baseados nos parâmetros geotécnicos do solo, a reclassificação em áreas de alta, média e baixa suscetibilidade foi determinada estatisticamente por meio de curvas de validação elaboradas considerando-se a ocorrência natural de cicatrizes de escorregamentos. Embora os modelos tenham sido construídos com base principalmente em parâmetros geotécnicos, é a natureza, evidenciada pela ocorrência de escorregamentos, que diz se as áreas são de alta, média ou baixa suscetibilidade. Essa metodologia, como foi aplicada, é inédita e apresenta grandes vantagens em relação àquelas em que o limite entre áreas de alta e média suscetibilidade é arbitrado, por exemplo, pelo Fator de segurança 1,5 ou pelas classes predefinidas do modelo SHALSTAB.

A unidade geotécnica Gnaiss máfico em colinas baixas é mais suscetível a escorregamentos, resultado que parece refletir a característica dos parâmetros de resistência dos solos. As áreas delimitadas como Piroxenito em colinas baixas foram as com menor suscetibilidade, refletindo, com isso, as características físicas encontradas nos solos dessa unidade.

Os resultados dos ensaios mostraram uma variação significativa nos parâmetros de resistência e distribuição granulométrica dos solos quando em modelados de relevo distintos, até mesmo quando originados da mesma litologia e unidade geotécnica. Esta dinâmica pedogenética, associada às características topográficas, dinâmica hídrica, espessura dos solos, entre outros fatores importantes na análise da estabilidade das encostas, pode ocasionar erros que certamente se refletem nos modelos de suscetibilidade, principalmente em áreas de grande extensão territorial.

Portanto, sugere-se que estudos de suscetibilidade baseados em modelos matemáticos sejam, sempre que possível, validados com as cicatrizes de escorregamentos, principalmente quando aplicados a áreas de grande extensão territorial.

9 REFERÊNCIAS

AUMOND, Juarês José et al. Condições naturais que tornam o vale do Itajaí sujeito aos desastres. In: FRANK, B.; SEVEGNANI, L. (Orgs.). **Desastre de 2008 no Vale do Itajaí: água, gente e política**. Blumenau: Agência de Água do Vale do Itajaí, 2009.

AUGUSTO FILHO, O. and J. C. VIRGILI. 1998. Estabilidade de Taludes. In ABGE (ed) Estabilidade de Taludes. ABGE, São Paulo.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: UFSC, 2007 - v. 3.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. IBGE. **Projeto Gerenciamento Costeiro GERCO – 3ª fase: Relatório Técnico**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. _____. **Censo demográfico 2010**. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

BRASIL, Ministério das Cidades, Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Brasília, 2007.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC. Disponível em: <<http://defesacivil.gov.br/legislacao/index.asp>> Acesso em: 04 jun. 2016.

CARVALHO, et al. **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios**. Brasília: Ministério das Cidades, 2007.

CEPED. **Resposta apo desastre em Santa Catarina no ano de 2008: avaliação das áreas atingidas por movimentos de massa e dos danos em edificações durante o desastre**. Florianópolis, 2009. 46p

CHRISTOFOLETTI, Antonio. **Geomorfologia**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

CHUNG, Chang-jo F.; FABBRI, Andrea G. Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. **Natural Hazards**, Netherlands, v. 1, n. 30, p.451-472, 2003.

COSTA NUNES, Antonio José; HUNT, Roy. (Ed.). *Landslides of Brazil*. In: VOIGHT, Barry. **Rockslides and Avalanches**. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979. p. 419-446.

COROMINAS, Jordi et al (Org.). **Recommended Procedures for Validating Landslide Hazard and Risk Models and Maps**. Catalonia: Safeland, 2011.

CPRM; IPT. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações**: Nota técnica explicativa. Brasília: IPT, 2004.

CRUDEN, D.M.; VARNES, D.J. Landslide types and processes. In Special Report 247: **Landslides**: investigation and mitigation, transportation research board, Washington D.C. 1996.

DAVISON DIAS, Regina. **Aplicação de pedologia e geotecnia no projeto de fundações de linhas de transmissão**. 1987. 364 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Ciências em Engenharia Civil, UFRJ, Rio de Janeiro, 1987.

_____. Proposta de metodologia de definição de carta geotécnica básica em regiões tropicais e subtropicais. **Revista Ig**, São Paulo, p.51-55, 1995.

FERNANDES, Nelson Ferreira, et al. Condicionantes geomorfológicos dos escorregamentos 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, Nelson Ferreira; AMARAL, C. P. **Movimentos de massa**: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T. 2003.

_____. Modelagem em Geografia Física: teoria, potencialidades e desafios. **Espaço Aberto**, Rio de Janeiro, v. 6, n. 1, p.209-247, jan. 2016.

FRATTINI P., CROSTA G.B., CARRARA A. (2010) Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. **Engineering Geology**, 111(1-4), 62-72.

FRAGA, As enchentes no Vale do Itajaí-Açu, SC: das obras de contenção à indústria da enchente. Maringá: Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Geografia/UEM/Capes, 2000. 354 p. (Dissertação, Mestrado).

- FREIRE, E.S.M; Movimentos coletivos de solos e rochas e sua moderna sistemática. **Construção**, Rio de Janeiro, 1965. 8, 10-18pp.
- GAO, Jay. Identification of topographic settings conducive to landsliding from dam in Nelson County, Virginia, U.S.A. **Earth Surface Processes And Landforms**, Suisse, v. 18, n. 1, p.579-591, jan. 1993.
- GEE, M. D. (1992) **Classification of landslide hazard zonation methods and a test of predictive capability**. 6th Int. Symp. on Landslides, A. A. Balkema, Christchurch: 947-952.
- GERSCOVICH, Denise. **Estabilidade de taludes**. São Paulo: Oficina de Textos, 2012.
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. Edgard Blucher, 1984. 194p. 1976.
- GUIMARÃES, R.F.; FERNANDES N.F.; GOMES R.A.T.; CARVALHO O.A.J. Fundamentação teórica do modelo matemático para previsão de escorregamentos rasos shallow stability. **Espaço e Geografia**, v. 6, n. 2, ISSN: 1516-9375, 2003, p. 133-150.
- GUZZETTI, F., et al. Comparing landslide maps: a case study in the upper Tiber River basin, central Italy. **Environmental Management** 25, 247–263, 2000.
- HARTMANN, L.A.; NARDI, L.S.; CUPERTINO, J.A. 1979. A catástrofe nos granulitos de Luis Alves (Santa Catarina). **Acta Geológica Leopoldensia**, 3:29-43.
- HARTMANN, L.A.; SILVA, L.C.; ORLANDI, V. (1979) O complexo granulítico de Santa Catarina. **Acta Geológica Leopoldensia** , v.6, p.94-112.
- HERRMANN, Maria Lúcia de P. (org.). **Atlas de desastres naturais do estado de Santa Catarina**. Florianópolis: IOESC, 2007.
- HIGASHI, Rafael. **Mecânica dos Solos I**. Florianópolis: Disciplina de Mecânica dos Solos, UFSC, 2016. Color.
- HIGHLAND, L.M. The landslide handbook: A guide to understanding landslides. Reston, Virginia, **U.S. Geological Survey Circular** 1325, 12p, 2008.
- KAUL, P. F. T.; FERNANDES, E.; SANTOS NETO, A. Projeto Gerenciamento Costeiro GERCO - 3º Fase: **Geologia**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE, 2002. 63p.

MARCELINO, Emerson Vieira. **Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos no município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de sensoriamento remoto e SIG.** 2003. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Sensoriamento Remoto, INPE, São José dos Campos, 2003.

MATTEDI, Marcos Antonio et al. **Desastre de 2008 no Vale do Itajaí:** água, gente e política. Blumenau: Agência de Água do Vale do Itajaí, 2009.

MICHEL, Gean Paulo. **Estudo de escorregamentos na bacia do Rio Cunha, Rio dos Cedros/SC, com os modelos SHALSTAB e SINMAP.** 2011. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2011.

_____. **Modelagem de Estabilidade de Encostas:** Porto Alegre: III Curso de Capacitação em Mapeamento de Áreas de Risco Para Prevenção de Desastres Hidrológicos Com Ênfase em Modelagem Hidrogeomorfológica, 2016. 79 slides, color.

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically-based model for topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153-1171, 1994.

NERY, Jonas Teixeira; BALDO, Maria Cleide; MARTINS, Maria de Lourdes Orsini Fernandes. O comportamento da precipitação na Bacia do Itajaí. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 22, n. 5, p.1429-1435, jan. 2000.

O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, v.22, n.5, p.794-804. 1986.

PARIZOTO, Daniel Galvão Veronez. **Contribuições dos diferentes fatores aos processos de deslizamento e a influência antrópica no nível de danos do desastre de 2008:** o caso do Complexo do Morro do Baú - Ilhota/SC. 2014. 304 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

PREFEITURA MUNICIPAL DE BLUMENAU, Defesa Civil. **AlertaBlu.** Disponível em: <<http://alertablu.cob.sc.gov.br/p/detalhada>>. Acesso em: 26 abr. 2017.

_____. _____. **Plano de Contingência: inundações e** escorregamentos. 2017a. Disponível em: <http://alertablu.cob.sc.gov.br/static/app/defesa-civil/Plano_de_conting%C3%Aancia_2017.pdf>. Acesso em: 25 jul. 2018.

PRESS, F.; SIEVER R.; GROTZINGER, J. & JORDAN, T. H., 2006. **Para entender a terra.** Tradução Rualdo Menegat, 4 ed. – Porto Alegre: Bookman, 656 p.: il.

ROSA, Rogério de Oliveira; MACIEL, Natanael Sérgio. Projeto Gerenciamento Costeiro: Geomorfologia. **Folha Itajaí** - Escala 1:100.000. Florianópolis: IBGE. 2002

REGINATTO, Gisele Marilha Pereira. **Caracterização de movimentos de massa na bacia hidrográfica do rio Cunha, Rio dos Cedros - SC, com ênfase em escorregamentos translacionais.** 2013. 230 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

RIBEIRO, Guilherme Ramos. **Análise e validação de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa por meio de análises estatísticas em ambiente SIG na região de Belchior Central, Gaspar, SC.** 2016. 169 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SBROGLIA, Regiane Mara. **Mapeamento geotécnico e das áreas suscetíveis a deslizamentos na microbacia do Ribeirão do Baú, Ilhota/SC.** 2015. 185 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

SBROGLIA, Regiane Mara et al. Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Translacionais com o Uso da Ferramenta ASA - Automatic Shalstab Analysis. **XII Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas Cobrae 2017**, Florianópolis, v. 1, n. 1, p.1-8, nov. 2017.

SELBY, Michael John. Mass Wasting of Soils. In: SELBY, Michael John. **Hillslope Materials and Processes.** Oxford: Oxford University Press, 1993. p. 249-264.

SHARPE, C.F.S; **Landslide and related phenomena.** 1938. Pageant: New Jersey, 137p.

SILVA, H. S. e D. L. Severo; O Clima. In: **Bacia do Itajaí: aspectos físicos e biológicos**. Orgs: Juarês José Aumond, Adilson Pinheiro, Beate Frank. Blumenau: Edifurb, 2009.

SINPDEC. **Relatório Gerencial: danos informados**. 2008. Data Inicial: 01/11/2008; Data Final: 01/12/2008. Disponível em: <<https://s2id.mi.gov.br/paginas/relatorios/>>. Acesso em: 12 abr. 2017

TOMAZZOLI, E. R.; PARIZOTO, D. G. V.; ABREU, J.; PELLERIN, J. R. G. M. **Análise e mapeamento das áreas de risco a movimentos de massa e inundações nos municípios de Gaspar, Ilhota e Luiz Alves (Complexo do Morro do Baú), SC**. FAPESC - Convênio 16319/2010-8. UFSC, Florianópolis, 2012. 207p.

TOMAZZOLI, E.R.; PELLERIN, J. R. G. M.; SARTORI, R. Geologia do Setor Norte do Município de Blumenau (SC). Projeto: Elaboração de Cartas de Aptidão frente aos Desastres Naturais nos Municípios de Blumenau, Brusque, Botuverá, Rodeio, Timbó, Itajaí, Camboriú e Balneário Camboriú, estado de Santa Catarina. Ministério das Cidades. 2017 (inédito).

UFSC/MINISTÉRIO DAS CIDADES. Elaboração de cartas de aptidão à urbanização frente aos desastres naturais no município de Blumenau, estado de Santa Catarina. **Relatório final**. UFSC: Florianópolis, 2018. (Relatório inédito).

VARGAS, M. **Estabilização de taludes em encostas de gnaisses decompostos**. In: Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, 3°. Belo Horizonte, 1966. Anais... Belo Horizonte, Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, 1966. V. 1.

VIEIRA, Rafaela. **Um olhar sobre a paisagem e o lugar como expressão do comportamento frente ao risco de deslizamento**. 2004. 198 f. Tese (Doutorado) - Curso de Geografia, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

_____. **Análise integrada dos fatores físicos e sociais para identificação das áreas suscetíveis a escorregamentos**. In: VIEIRA, Rafaela et al. **Um olhar sobre as áreas de risco de escorregamento no município de Blumenau: em busca da prevenção**. Blumenau: IPA, 2005. p. 56-71.

VIEIRA, Rafaela; JANSEN, Giane Roberta; POZZOBON, Mauricio. Redução de riscos de desastres naturais: a construção de políticas públicas em Blumenau, SC. **Política Pública**, São Paulo, v. 02, n. 188, p.1-10, 2016. Disponível em:

<<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/16.188/5915>>.
Acesso em: 25 abr. 2017.

VIEIRA, Bianca Carvalho. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas**. 2007. 213 f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Geografia, Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

VARNES, D. J. **Slope movement types and processes**. In: R.J. Schuster and R.J. Krizek (eds), *Landslides, Analysis and Control*. Transportation Research Board, National Academy of Sciences. Anais... Washington, DC. Special Report 176, p. 11-33, 1978.

WIDNER, W.; CAMOZZATO, E.; TONIOLO, J. A.; BINOTTO, R. B.; IGLESIAS, C. M. F.; LAUX, J. H. **Mapa geológico do estado de Santa Catarina**. Porto Alegre. CPRM. 2014. Escala 1:500.000. Programa Geologia do Brasil. Subprograma de Cartografia Geológica Regional.

ZIMMER, Eduardo et al. **AlertaBlu: Uma proposta metodológica para o sistema de monitoramento e alerta de eventos naturais extremos de Blumenau, Santa Catarina**. In: Congresso Brasileiro de Desastres Naturais, 2012, CBDN, 2012. p. 1 - 10.

ZUQUETTE, L. V.: **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras**. Tese de Doutorado em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1987, v. 3, 657p.