Dissertação de Mestrado

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESCALA DO MAPA LITOLÓGICO NOS MODELOS DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS, NO MUNICÍPIO DE CAETÉ (MG), UTILIZANDO MÉTODOS ESTATÍSTICOS

AUTORA: LARISSA FLÁVIA MONTANDON

NUGEO

ESCOLA DE MINAS / UFOP

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luís de Almeida Prado Bacellar (UFOP)

COORIENTADOR: Prof. Dr. Cesar Falcão Barella (UFOP)

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOTECNIA DA UFOP

OURO PRETO - AGOSTO DE 2017

M764a Montandon, Larissa Flávia.
Avaliação da influência da escala do mapa litológico nos modelos de suscetibilidade a escorregamentos, no município de Caeté (MG), utilizando métodos estatísticos [manuscrito] / Larissa Flávia Montandon. - 2017.
xix,150f.: il.: color; grafs; tabs; mapas.

Orientador: Prof. Dr. Luís de Almeida Prado Bacellar.
Coorientador: Prof. Dr. Cesar Falcão Barella.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Núcleo de Geotecnia. Programa de Pós-Graduação em Geotecnia.
Área de Concentração: Engenharia Geotécnica.

1. Catástrofes naturais. 2. Petrologia. 3. Mecânica de rochas. I. Bacellar, Luís de Almeida Prado. II. Barella, Cesar Falcão. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Titulo.

CDU: 624.13

Catalogação: www.sisbin.ufop.br

AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA ESCALA DO MAPA LITOLÓGICO NOS MODELOS DE SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS, NO MUNICÍPIO DE CAETÉ (MG), UTILIZANDO MÉTODOS ESTATÍSTICOS

Dissertação apresentada ao Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica do Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Geotécnica**, área de concentração em *Gestão de Riscos em Geotecnia e Desastres Naturais.*

Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 18 de agosto de 2017, pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Prof. Dr.. Luís de Almeida Prado Bacellar (Orientador - UFOP)

Prof. Dr. Cesar Falcão Barella (Coorientador - UFOP)

Profª. Drª. Rosyelle Cristina Corteletti (UFOP)

Profª. Drª. Maria Giovana Parizzi (UFMG)

CITAÇÃO

“Se la montagna viene verso di te,
e tu non sei Maometto,
corri, perché è uma frana”.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Silvia e Ricardo, pelo amor, dedicação e incentivo. Ao meu grande companheiro, Júnior, por sempre acreditar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, aos meus pais pelo amor, carinho e apoio em todos os momentos, sempre me incentivando no caminho da busca pelo conhecimento. Meus mais sinceros “Muito Obrigada!!!”. Ao meu querido irmão Breno, que apesar muitas vezes eu não demonstrar, é uma grande inspiração para mim.

Ao meu grande companheiro de caminhada, de longa data, Júnior. Seu carinho, compreensão e paciência foram fundamentais para que eu pudesse chegar até aqui. Sem você, o caminho seria muito mais tortuoso e pesado. Ao meu técnico de campo, minha eterna gratidão.

Ao meu orientador, Professor Luís Bacellar, pela disponibilidade e acessibilidade. Suas contribuições enriqueceram o trabalho e me incentivaram a buscar novos conhecimentos.

Ao meu co-orientador, Prof. César Barella, pela acessibilidade. Seus ensinamentos e discussões foram indispensáveis para a conclusão desse trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geotecnia da UFOP, a todos os professores e funcionário do NUGEO, principalmente as secretárias Viviane e Gisele.

Aos colegas de mestrado, que sem dúvida deixaram a caminha mais leve e interessante.

A minha querida prima Samira, por me receber tão bem em sua casa, e dividir comigo seu cantinho. Ter um rosto familiar também amenizou as longas horas de aula em Ouro Preto.

Aos meus colegas da CPRM, pelas discussões.

Por último, mas não menos importante, a Deus por me ajudar a manter o foco e paciência.

E a todos, que de alguma forma, contribuíram para a conclusão de mais uma etapa.

RESUMO

As cartas de suscetibilidade a escorregamentos são ferramentas fundamentais no reconhecimento de áreas sujeitas a esse fenômeno e no planejamento territorial, a fim de se evitar as possíveis consequências socioeconômicas associadas. Uma das maiores dificuldades na execução do mapeamento sistemático desse tema é a inexistência de bases cartográficas em escala compatível com o detalhamento pretendido, tal como o mapa geológico. Este trabalho tem o objetivo de avaliar a possibilidade de utilização do mapa de unidade litológica em escala menor do que a escala de trabalho, por meio da ponderação do ganho/perda da qualidade do modelo comparativamente àqueles elaborados com esse parâmetro na escala adequada. Para tanto, o estudo de caso foi desenvolvido no município de Caeté (MG), com a produção de três modelos. O Modelo I se refere àquele com o emprego do mapa litológico na escala 1:25.000, o Modelo II com o mapa litológico na escala 1:100.000 e o Modelo III não utiliza esse parâmetro. Foram aplicadas técnicas de análise de sensibilidade – Área Abaixo da Curva, *Accountability* e *Reliability* – a fim de analisar o grau de relevância de cada fator no condicionamento dos escorregamentos. Os métodos de Curva de Sucesso e Curva de Predição foram ampregados para avaliar o grau de adequação e a capacidade preditiva dos diferentes modelos elaborados. De modo geral, o ângulo de inclinação das encostas, a orientação das vertentes e a unidade litológica foram os parâmetros que apresentaram maior importância no desenvolvimento de escorregamentos na área de estudo. A análise de sensibilidade também indicou melhores resultados para a unidade litológica na escala 1:100.000, do que na escala 1:25.000. No que diz respeito ao grau de adequação, o Modelo II obteve resultado ligeiramente melhor que o Modelo I, sendo ambos mais satisfatórios do que o Modelo III. Em relação à capacidade preditiva, os Modelos I e III apresentaram valores maiores que o Modelo II. Tendo em vista os valores das curvas de Sucesso e Predição obtidos, acredita-se que as bases geológicas de menor detalhe podem ser utilizadas sem prejuízos à qualidade do modelo final, com a ressalva de sempre priorizar a validação do modelo em campo.

Palavras chaves: Suscetibilidade a escorregamento, Litologia, Análise de Sensibilidade, Curva de Sucesso, Curva de Predição.

ABSTRACT

Landslide susceptibility maps are fundamental tools in the study of prone areas to the development of this phenomenon and in the territorial planning, in order to prevent socio-economic consequences related to landslides. Among the limitations for the systematic susceptibility mapping is the absence of cartographic base in compatible scale, such as the geological map. This dissertation intends to evaluate the possibility to use the parameter lithology in a smaller scale than the one of the final map, through the assessment of the model gain/loss of quality. The case study was developed in Caeté area, in the state of Minas Gerais, and three different models were produced. Model I refers to the one which applies the 1:25.000 lithology scale, while Model II uses the 1:100.000 lithology scale and Model III uses no lithology. For the purpose of analyzing the relevance of each parameter in the explanation of the movement, some sensitivity analysis techniques were applied – Area Under the Curve, Accountability and Reliability – and to estimate the model performance and prediction power, the Success and Prediction Rate Curves were calculated. Generally, the sensitivity analysis demonstrates that slope, aspect, and lithology were the factors which showed more importance in the development of landslides in the study area, being values found on the 1:100.000 lithology scale higher than the ones calculated on 1:25.000 lithology scale. Regarding the model performance, Model II got slightly better results than Model I, both superior to Model III. Considering the predictive power, Models I and III present higher values than Model II. In view of the results of Success and Prediction Rate Curves, the smaller scale geological bases may be applied without damage to the final map quality, prioritizing field validation at all times.

Key words: Landslide susceptibility, Lithology, Sensitivity Analysis, Success Rate Curve, Prediction Rate Curve.

Lista de Figuras

Figura 1.1: Pessoas atingidas por movimentos de massa, por região, no Brasil, no período de 1991 a 2010. Fonte: CEPED-UFSC, 2012. 1

Figura 3.1: Ilustração esquemática do escorregamento do tipo translacional. 10

Figura 3.2: Ilustração do esquema de escorregamento do tipo rotacional. 12

Figura 3.3: Ilustração do esquema de escorregamento do tipo em cunha. 13

Figura 3.4: Exemplo de expressões das feições de escorregamentos no contorno topográfico (retirado de Rogers, 1995). 30

Figura 3.5: Classificação dos métodos de mapeamento de suscetibilidade (adaptado de Aleotti & Chowdhury, 1999; Soeters & van Westen, 1996). 39

Figura 3.6: Exemplo de um gráfico de Curva de Sucesso ou de Predição (linha verde). A diferença entre as duas está na parcela do inventário de escorregamentos que é utilizada nos cálculos, na primeira consideram-se os escorregamentos ocorridos e a segunda, os escorregamentos preditos (que o modelo desconhece). 57

Figura 4.1: Mapa de localização da área de estudo.....60

Figura 4.2: Coluna estratigráfica da área de estudo, adaptada de CPRM (2010) e Lobato *et al*. (2005).....62

Figura 4.3: Mapa litológico da área de estudo, na escala 1:25.000, adaptado de Lobato *et al*. (2005).....64

Figura 4.4: Contexto estrutural da área de estudo (em vermelho) inserida na região do Quadrilátero Ferrífero, modificado de Baltazar & Zucchetti (2007). 67

Figura 4.5: Diagrama de rosetas, mostrando as direções do acamamento e foliação das rochas na área de estudo, sendo que a direção predominante é ENE-WSW.....68

Figura 4.6: Estereograma com a concentração das medidas de acamamento e foliação, com a medida geral 163/35. 68

Figura 4.7: Diagrama de rosetas exibindo a distribuição das direções das fraturas na área de estudo. 68

Figura 4.8: Mapa de isoietas anuais médias – 1977 a 2006. Adaptado de Pinto *et al*. 2011. 69

Figura 4.9: Mapa de solos da área de estudo, retirado e adaptado de Machado & Silva (2010). 70

Figura 4.10: Localização das áreas urbanas e estrutura de mineração. 71

Figura 5.1: Etapas para a avaliação da influência das diferentes escalas do mapa geológico no mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos. 72

Figura 5.2: Combinações entre curvatura vertical (longitudinal) e horizontal (transversal) para determinação das diferentes formas do terreno. Modificado de Dikau (1990) e Kimerling *et al*. (2011). 76

Figura 5.3: Vista da unidade de relevo colina, localizada na porção nordeste na área de estudo, onde predominam relevos suaves. Coordenadas UTM 648519 mE / 7805175 mS, fuso 23K. 78

Figura 5.4: Região com predomínio de colinas e morrotes. Coordenada UTM 643716 mE / 7806572 mS, fuso 23K. 78

Figura 5.5: Vista da região de domínio da unidade de relevo morros altos, localizada na porção norte na área de estudo. Coordenadas UTM 641201 mE / 7814654 mS, fuso 23K. 78

Figura 5.6: Vista da região de domínio da unidade de relevo morros altos, localizada na porção sudoeste na área de estudo. Coordenadas UTM 638238 mE / 7796301 mS, fuso 23K. 78

Figura 5.7: Vista da Serra das Cambotas, região escarpada com paredões de quartzitos. Coordenadas UTM 653044 mE / 7799179 mS, fuso 23K.....78

Figura 5.8: Vista da Serra da Piedade. Coordenadas UTM 636491 mE / 7803923 mS, fuso 23K.....78

Figura 5.9: Exemplo de como o recurso de imagem histórica do *Google Earth* facilita a identificação de feição de escorregamento. À esquerda, na imagem com data de 20/12/10, é possível distinguir indícios que possível movimento, entretanto somente na imagem à direita, datada de 09/06/15, é possível reconhecer que, de fato, se trata de uma cicatriz de escorregamento, validada em campo (Coordenadas UTM 636003 mE / 7789263 mS, fuso 23 K).....84

Figura 5.10: Mapa da distribuição das cicatrizes de escorregamentos na área de estudo, divididas no conjunto de treino e de teste.....87

Figura 5.11: Exemplo de curva de predição utilizada na classificação dos modelos de suscetibilidade gerados para a área de estudo.....90

Figura 6.1: Cicatriz de escorregamento à esquerda na imagem de satélite mostrando o polígono delimitado utilizado na modelagem e à direita em fotografia no campo com tracejado amarelo identificando a crista do movimento. Coordenadas UTM da feição 649542 mE/7806401 mS, fuso 23 K. 91

Figura 6.2: Cicatriz de escorregamento à esquerda na imagem de satélite mostrando o polígono delimitado utilizado na modelagem e à direita em fotografia no campo com tracejado amarelo identificando a crista do movimento. Coordenadas UTM da feição 638767 mE/7797717 mS, fuso 23 K. 92

Figura 6.3: Cicatriz de escorregamento à esquerda na imagem de satélite mostrando o polígono delimitado utilizado na modelagem e à direita em fotografia no campo com tracejado amarelo identificando a crista do movimento. Coordenadas UTM da feição 636003 mE/7789263 mS, fuso 23 K. 92

Figura 6.4: Cicatrizes de escorregamentos à esquerda na imagem de satélite mostrando os polígonos delimitados utilizados na modelagem e à direita em fotografia no campo com tracejado amarelo identificando as cristas dos movimentos. Coordenadas UTM da feição 642066 mE/7796779 mS, fuso 23K.....92

Figura 6.5: À direita, escorregamento muito recente identificado em campo e sua localização na imagem de satélite, à esquerda, em área densamente vegetada sendo impossível sua visualização. Coordenadas UTM da feição 636438 mE/7793451 mS, fuso 23 K.....93

Figura 6.6: Vista em três dimensões da Serra da Piedade, onde as feições de movimentos de massa podem ser observadas a esquerda da imagem (a oeste da crista da Serra da Piedade). Fonte: Imagem do *Google Earth*.....94

Figura 6.7: Feições de escorregamentos delimitadas no alto da Serra da Piedade (à esquerda), e vista em campo de algumas dessas feições (à direita). 94

Figura 6.8: Mapa de ângulo das encostas para a área de estudo.....97

Figura 6.9: Gráfico com as probabilidades de ocorrência de escorregamentos, por classe do parâmetro ângulo das encostas.....98

Figura 6.10: Mapa de orientação das vertentes para a área de estudo. 99

Figura 6.11: Gráfico com as probabilidades de ocorrência de escorregamentos, por classe do parâmetro orientação das vertentes. 99

Figura 6.12: Mapa de perfil das encostas (curvatura) para a área de estudo.....101

Figura 6.13: Gráfico com as probabilidades de ocorrência de escorregamentos, por classe do parâmetro perfil das vertentes. 101

Figura 6.14: Mapa de unidades litológicas para a área de estudo, na escala 1:100.000. 102

Figura 6.15: Mapa de unidades litológicas para a área de estudo, na escala 1:25.000. 103

Figura 6.16: Gráfico com as probabilidades de ocorrência de escorregamentos, por classe do parâmetro unidades litológicas, na escala 1:100.000. GN – Gnaisse granítico; IT – Itabirito; MMU – Metamáfica e metaultramáficas; Q – Quartzito; X – Xisto; F – Filito; MS – Metassedimentares. 104

Figura 6.17: Gráfico com as probabilidades de ocorrência de escorregamentos, por classe do parâmetro unidades litológicas, na escala 1:25.000. CG – Canga; FF – Formação Ferrífera; PG/MCH – Pegmatito e Metachert; Q – Quartzito; MMU – Metamáfica e metaultramáficas; F – Filito; IT – Itabirito; GN – Gnaisse granítico; MS – Metassedimentares; AL - Aluvião; CL – Colúvio; X – Xisto; HEM – Hematita compacta. 104

Figura 6.18: Mapa de unidades de relevo para a área de estudo.....105

Figura 6.19: Gráfico com as probabilidades de ocorrência de escorregamentos, por classe do parâmetro unidades de relevo. 106

Figura 6.20: Mapa do inverso do índice de umidade para a área de estudo. 107

Figura 6.21: Gráfico com as probabilidades de ocorrência de escorregamentos, por classe do parâmetro inverso do *Wetness Index*. 108

Figura 6.22: Valor da área abaixo da curva das Curvas de Sucesso e de Predição, para cada etapa de integração dos parâmetros, para cada um dos três modelos.....113

Figura 6.23: Representação gráfica da Curva de Sucesso para os três modelos produzidos.....114

Figura 6.24: Representação gráfica da Curva de Predição para os três modelos produzidos.....115

Figura 6.25: Polígono de cicatriz de escorregamento, contendo, no mapa litológico na escala 1:25.000, à esquerda, gnaisse granítico, e no mapa litológico na escala 1:100.000, à direita, gnaisse granítico e quartzito. 116

Figura 6.26: Polígono de cicatriz de escorregamento, contendo, no mapa litológico na escala 1:25.000, à esquerda, itabirito, e no mapa litológico na escala 1:100.000, à direita, outra litologia completamente distinta, rochas metamáficas e ultramáfica. 117

Figura 6.27: Polígono de cicatriz de escorregamento, no mapa litológico na escala 1:25.000, à esquerda, contendo itabirito e duas unidades litológicas – filito e canga - não encontradas no mapa litológico na escala 1:100.000, à direita, que contém somente o itabirito.....117

Figura 6.28: Relação entre os Valores Informativos obtidos para cada unidade litológica, para as diferentes escalas. 1 – Canga; 2 – Formação Ferrífera; 3 – Quartzito; 4 – Metamáfica e metaultramáficas; 5 – Filito; 6 – Itabirito; 7 – Gnaisse granítico; 8 – Xisto. As unidades 1, 2 e 5 são encontradas somente na escala 1:25.000.....118

Figura 6.29: Comparação visual da classificação final dos três modelos de suscetibilidade a escorregamento: vermelho - alta suscetibilidade; amarelo - média suscetibilidade; e verde - baixa suscetibilidade. 120

Figura 6.30: Gráfico com a distribuição em área das classes de suscetibilidade a escorregamento dos três modelos elaborados. 121

Figura 6.31: Modelo de suscetibilidade a escorregamento elaborado com a utilização do parâmetro unidade litológica na escala 1:100.000. A influência das litologias – delimitado em preto – com maiores Valores Informativos é bem marcante nesse modelo. 121

Figura 6.32: Comparação entre a classificação final dos modelos de suscetibilidade I e III. A influência das classes de orientação de vertentes – delimitado em preto – com maiores Valores Informativos é significativa no resultado do modelo III, quando comparado com o modelo I. 122

Figura 6.33: Vista do ponto 42, visada NE. Ver figura 6.34. 125

Figura 6.34: Resultados dos Modelos I, à esquerda, e III à direita, que mostram a diferença entre as classes média e alta, sendo o segundo modelo mais conservador. ..125

Figura 6.35: Vista do ponto 43, visada ENE. Ver figura 6.36. 126

Figura 6.36: Resultados dos Modelos I, à esquerda, e III à direita, que mostram a diferença entre as classes média e alta, sendo o segundo modelo mais conservador. ..126

Figura 6.37: Comparação entre os três modelos elaborados, com detalhe na região oeste da área de estudo, no limite entre as unidades litológicas rocha metamáficas/ultramáfica e xisto.....127

Figura 6.38: Agrupamento de unidades litológicas no mapa na escala de 1:100.000 (à direita) e a ocorrência de feições de escorregamentos em unidades litológicas diferentes (formação ferrífera e itabirito) no mapa litológico na escala de 1:25.000 (à esquerda). 128

Figura 6.39: Características do maciço rochoso no limite leste da área de estudo, classificado como alta suscetibilidade a escorregamentos. À esquerda (a), observa-se a foliação da rocha em sentido oposto ao da vertente, que varia de vertical para oeste/sudoeste. À direita (b), continuação do mesmo paredão de quartzito, exibindo família de fraturas verticais e horizontais, que em conjunto com a foliação podem delimitar blocos, os quais tem o potencial de se movimentar. 129

Lista de Tabelas

Tabela 3.1: Classificação de movimentos de massa, adaptado de Varnes (1978). 6

Tabela 3.2: Classificação fenomenológica de movimentos de massa, apresentada por Augusto Filho (1992). 7

Tabela 3.3: Visão geral dos fatores condicionantes e sua importância para o mapeamento de suscetibilidade, na escala média e utilizando método estatístico de análise. Adaptado de Soeters & van Westen (1996) e van Westen *et al*. (2008). 15

Tabela 3.4: Tipos e níveis recomendados de zoneamento e escala relacionado ao objetivo do mapeamento (retirado de Fell *et al*., 2008). 22

Tabela 3.5: Critérios e níveis de qualidade para os modelos de suscetibilidade a escorregamentos de acordo com os procedimentos de validação adotados (Guzzetti *et al*., 2006). 53

Tabela 5.1: Especificações do Modelo Digital de Elevação utilizado para obtenção dos dados empregados no modelo de suscetibilidade a escorregamento. 74

Tabela 5.2: Classificação do parâmetro orientação das vertentes em função de amplitudes de azimutes. 75

Tabela 5.3: Critérios adotados na classificação das unidades de relevo. Adaptado de IPT (1981) e IPT/CPRM (2014). 77

Tabela 5.4: Relação das unidades litológicas presentes na Folha Caeté, na escala de 1:25.000, e os agrupamentos das unidades litológicas adotadas. 80

Tabela 5.5: Relação das unidades litológicas presentes na Folha Belo Horizonte, na escala de 1:100.000, e os agrupamentos das unidades litológicas adotadas. 82

Tabela 6.1: Relevância dos fatores condicionantes de acordo com a ordem de integração – média dos valores de sensibilidade de cada parâmetro de acordo com os índices *Accountability (Acc)*, *Reliability (Rl)* e Área Abaixo da Curva (AAC). 109

Tabela 6.2: Avaliação das diferentes classificações do mapa de ângulo das encostas em função da Área Abaixo da Curva. 110

Tabela 6.3: Valor Informativo (V.I.) calculado para cada classe dos parâmetros empregados na modelagem de suscetibilidade a escorregamentos. 110

Tabela 6.4: Modelos elaborados e analisados e ordem de integração de parâmetros para cada um deles. 111

Tabela 6.5: Valores obtidos para a Curva de Sucesso e de Predição, referente aos modelos parciais, a cada integração de parâmetros, e aos modelos finais. 113

Índice

1 INTRODUÇÃO.....1

2 OBJETIVOS 4

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....5

3.1 MOVIMENTOS DE MASSA 5

3.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA 5

3.1.2 FATORES CONDICIONANTES DOS MOVIMENTOS DE MASSA...13

3.2 TIPOS DE ZONEAMENTOS GEOLÓGIGO-GEOTÉCNICOS 21

3.2.1 MAPA DE INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS.....23

3.2.2 MAPA DE SUSCETIBILIDADE.....36

3.3 MÉTODOS DE MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE 39

3.3.1 MÉTODOS QUALITATIVOS.....39

3.3.2 MÉTODOS QUANTITATIVOS.....42

3.4 MÉTODOS ESTATÍSTICOS DE ANÁLISE 47

3.4.1 VALOR INFORMATIVO 47

3.4.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE 50

3.4.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS ESTATÍSTICOS DE SUSCETIBILIDADE 52

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....60
4.1 LOCALIZAÇÃO.....60
4.2 GEOMORFOLOGIA.....60
4.3 CONTEXTO GEOLÓGICO.....61
4.3.1 UNIDADES LITOLÓGICAS.....61
4.3.2 CONTEXTO ESTRUTURAL.....65
4.4 CLIMA.....68
4.5 SOLOS.....70
4.6 USO E OCUPAÇÃO/VEGETAÇÃO.....70
5 MATERIAIS E MÉTODOS.....72
5.1 PRODUÇÃO DOS MAPAS DE PARÂMETROS.....73
5.1.1 CLASSIFICAÇÃO DAS UNIDADES LITOLÓGICAS.....79
5.2 MAPA DE INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS.....83
5.2.1 DIVISÃO DO INVENTÁRIO.....87
5.3 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS ESTATÍSTICOS.....88
6 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS.....91
6.1 VALIDAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTO.....91
6.2 MAPAS DE PARÂMETROS.....96
6.3 RESULTADOS DOS MÉTODOS ESTATÍSTICOS.....108

6.4 VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SUSCETIBILIDADE EM CAMPO ..124

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES.....130

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 135

APÊNDICE.....146

1 INTRODUÇÃO

A intensificação da expansão populacional, e a ausência de políticas habitacionais adequadas, tem levado a ocupação desordenada de terrenos geologicamente desfavoráveis, tornando a sociedade cada vez mais vulnerável aos processos geodinâmicos externos. Os escorregamentos, fluxos de detritos, enxurradas, inundações, erosões, subsidências e colapsos representam os principais causadores de acidentes naturais no Brasil, sendo os movimentos de massa a segunda maior causa de mortes por desastres naturais.

Nas últimas décadas, os movimentos gravitacionais de massa, ocorridos no país, atingiram aproximadamente dois milhões de pessoas, ceifando milhares de vidas e acarretando em perdas materiais expressivas. Segundos dados da CEPED-UFSC (2012), referentes ao período entre os anos de 1991 e 2010, mais de 80% dos registros de eventos danosos encontram-se na região sudeste (Figura 1.1). Tal fato se dá, possivelmente, por se tratar da área com a maior densidade demográfica do país, aliado à existência de condições climáticas e geomorfológicas propícias à ocorrência de escorregamentos.

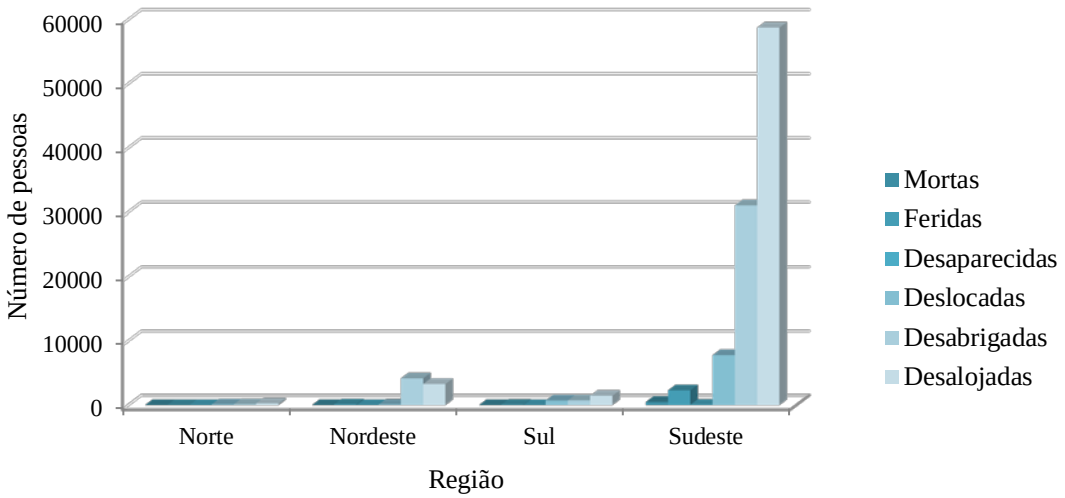

Figura 1.1: Pessoas atingidas por movimentos de massa, por região, no Brasil, no período de 1991 a 2010. Fonte: CEPED-UFSC, 2012.

Os zoneamentos geológico-geotécnicos, dentre eles as cartas de suscetibilidade, são uma ferramenta útil para o planejamento do uso e ocupação do território, alertando

quanto à possibilidade de ocorrência de tal fenômeno. Esse tipo de carta tem função informativa e consultiva (Fell *et al*. 2008) e pode ser utilizada para prevenção de desastres, ao passo que indica as áreas impróprias para a ocupação urbana. É de amplo conhecimento, não só no que tange aos desastres naturais, que os gastos com medidas de prevenção e mitigação são imensamente menores do que as despesas com reparação dos danos causados por esses processos, sem contar com as perdas de vidas humanas, um dano irreversível.

Em função dos últimos desastres naturais ocorridos no país, tais como o desastre de Santa Catarina em 2008, as inundações de Alagoas e Pernambuco em 2010, e as chuvas catastróficas ocorridas na região serrana do Rio de Janeiro em janeiro de 2011, foi decretada a Lei Nº 12.608/2012, para ajudar na prevenção, alerta e gestão de desastres. O inciso IV do artigo 6° diz que compete à União "apoiar os Estados, o Distrito Federal e os Municípios no mapeamento das áreas de risco, nos estudos de identificação de ameaças, suscetibilidades, vulnerabilidades e risco de desastre e nas demais ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação" (Brasil, 2012). A execução nacional desses mapeamentos ficou a cargo do Serviço Geológico do Brasil – CPRM.

O mapeamento da suscetibilidade a movimentos de massas executado pela CPRM adota a metodologia já empregada pelo o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, órgão com experiência na elaboração desses mapeamentos de forma sistematizada. Para a disseminação e aplicação dessa metodologia de maneira padronizada, para todo o território nacional, foram necessárias algumas adaptações, visto que a qualidade das informações básicas necessárias para o desenvolvimento do trabalho são completamente dispares entre as regiões e estados brasileiros. Um exemplo dessa disparidade é a escala da base topográfica, sendo que para grande parte do país, o único Modelo Digital de Elevação (MDE) disponível é o Topodata com resolução espacial de 90 metros, enquanto algumas regiões do sudeste possuem levantamentos com resolução espacial de 2,5 metros.

A definição dos parâmetros que seriam avaliados para a elaboração do modelo de suscetibilidade a movimento de massa também esbarrou na limitação das informações disponíveis. No que se refere ao mapeamento geológico básico, o território nacional

apresenta cobertura integral somente na escala 1:1.000.000, inadequada para ser aplicada para trabalhos que visam um detalhamento final na escala 1:25.000. O mapeamento geológico na escala de 1:100.000 tem abrangência em menos de 6% território brasileiro, sendo que a maioria das folhas nessa escala estão localizadas na região sudeste. Em algumas áreas de alto interesse econômico para atividade de mineração, encontra-se mapas geológicos na escala 1:25.000, como por exemplo, no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais.

Devido à ausência de ampla cobertura de mapeamento geológico, a litologia não é utilizada nos modelos de suscetibilidade elaborados pelo Governo Federal. Optou-se por empregar a declividade, perfil das encostas e a densidade de lineamentos como parâmetros de predisposição do meio físico, os quais são facilmente derivados do MDE com o uso de programas computacionais da plataforma de Sistema de Informação Geográfica (SIG) ou por meio de interpretação expedita de imagens de satélite.

Diversos trabalhos regionais, que empregam modelagem estatística para estabelecer a suscetibilidade a movimentos de massa, mostram a relevância da geologia na explicação do desencadeamento de escorregamentos. Portanto, a não utilização desse parâmetro tem sido frequentemente questionada pela comunidade científica quando esta se depara com os modelos produzidos somente com os fatores citados acima.

Dessa forma, esse trabalho pretende avaliar a influência da escala do mapeamento geológico na resposta do modelo na identificação e previsão de escorregamentos existentes e futuros, e verificar a possibilidade de utilização do mapa do parâmetro litologia em escalas menores do que a escala de trabalho pretendida, avaliando-se a qualidade dos modelos com relação aos outros parâmetros.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo específico avaliar a possibilidade de utilização do mapa de unidades litológicas em uma escala menor (regional - 1:100.000) na elaboração de modelos estatísticos de suscetibilidade a escorregamentos, por meio da ponderação do ganho/perda da qualidade do modelo, comparativamente àqueles elaborados na escala de detalhe pretendida (1:25.000) e com parâmetros de mais simples obtenção.

Espera-se, também, contribuir para ampliar o conhecimento sobre a aplicabilidade prática dos métodos estatísticos de elaboração e validação de modelos de suscetibilidade a escorregamentos, em uma área com grande variabilidade de características geológicas e geomorfológicas e com restrições de informações básicas (base topográfica e inventário de escorregamentos).

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos gravitacionais de massa desempenham papel significativo no processo natural de dinâmica das encostas, participando na evolução geomorfológica do relevo. É definido como o movimento do solo, rocha e/ou vegetação ao longo da vertente sob ação direta da gravidade. A ação da água ou do gelo se dá pela redução da resistência dos materiais e/ou pela indução do comportamento plástico e fluido dos solos (Tominaga, 2015). O termo genérico em língua inglesa "*Landslide*" se refere também a quase todos os tipos de movimentos de massa, tais como queda de rochas, tombamentos e fluxo de detritos, que envolvem pouco ou nenhum deslizamento real (Varnes *et al*., 1984).

3.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Devido à variedade de abordagens na análise de movimentos de massa, existem diferentes sistemas de classificação propostos por vários autores. A adoção de uma classificação é fundamental para correlacionar os tipos de movimentos com um conjunto de características e os fatores que os deflagram. Estas características se referem ao material instabilizado, ao tipo/geometria dos movimentos, aos fatores condicionantes, a área de alcance, entre outros.

A classificação dos movimentos gravitacionais de massa mais empregada internacionalmente é a de Varnes (1978) e os trabalhos desenvolvidos posteriormente com o intuito de complementar essa classificação, tais como WP/WLI (1995) e de Cruden & Varnes (1996). Hungr *et al.* (2014) propuseram uma atualização da "Classificação de Varnes", principalmente por meio da revisão das definições dos materiais transportados, com o intuito de fornecer compatibilidade entre as terminologias de rocha e solos utilizadas na geotecnia e na geologia.

Sendo a proposta considerada como a classificação oficial da IAEG (*International Association for Engineering Geology*), a classificação de Varnes (1978) divide os

movimentos de massa de acordo com o tipo de material transportado e o tipo de movimento (Tabela 3.1).

Tabela 3.1: Classificação de movimentos de massa, adaptado de Varnes (1978).

Tipo do Movimento	Tipo de Material		
	Rocha	**Solo Fino**	**Solo Grosso**
Quedas (*falls*)	Queda de rocha	Queda de solo	Queda de detritos
Tombamentos (*toppless*)	Tombamento de rocha	Tombamento de solo	Tombamento de detritos
Escorregamentos (*slides*): rotacional e translacional/planar	Escorregamento de rocha	Escorregamento de solo	Escorregamento de detrito
Expansão Lateral (*lateral spread*)	Expansão de rocha	Expansão de solo	Expansão de detritos
Fluxos ou corridas (*flows*)	Fluxo de rocha (rastejo profundo)	Fluxo de solo	Fluxo de detritos
Complexos	Combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos		

Dentre as classificações de autores brasileiros destacam-se as de Freire (1965), Guidicini & Nieble (1984) e de Augusto Filho (1992). Freire (1965, *apud* Guidicini & Nieble, 1984) classifica os movimentos de massa em três tipos: escoamentos, escorregamentos e subsidências.

Os escoamentos representam uma deformação, ou movimento progressivo, com ou sem superfície de transporte determinada. São classificados de acordo com as particularidades do movimento, em dois tipos: corrida, onde o escoamento é fluido-viscoso e os rastejo ou reptação, com escoamento plástico. Já os escorregamentos (*stricto sensu*) são movimentos definidos por um deslocamento finito ao longo de uma superfície definida pela qual o material se move. Subdividem-se em escorregamentos rotacionais ou translacionais. Por fim, a subsidência corresponde ao deslocamento finito, ou deformação contínua, de direção fundamentalmente vertical. São classificadas em subsidência propriamente dita de deformação contínua, recalques e desabamentos. Os recalques ocorrem por eliminação de fluidos, que produz o deslocamento e rearranjo das partículas, causando uma deformação geral no maciço de solo. Normalmente trata-se de processo mais lento. Já os desabamentos são rápidos e consistem basicamente no deslocamento vertical da massa de solo.

Esse autor caracteriza as classes de movimentos segundo parâmetros físico-mecânicos-causais, que são eles: natureza da superfície de movimentação; inclinação do talude; características qualitativas do movimento; tipo do movimento; velocidade e duração;

termos de passagem de um tipo de movimento para o outro; causas intrínsecas e extrínsecas, estas últimas divididas em indiretas e diretas, estas subdivididas em preparatórias e imediatas; o modo de ação do movimento; natureza física de ações significativas das causas; efeitos sobre as condições de equilíbrio; e processos corretivos dos movimentos de massa.

Guidicini & Nieble (1984) classificam os movimentos de massa em quatros classes principais: escoamentos, escorregamentos, subsidências e formas de transição e movimentos complexos. Basicamente, estão subdivididos da mesma forma que Freire (1965), somente os escorregamentos estão divididos em rotacionais, translacionais, quedas de blocos e queda de detritos. Os movimentos complexos não apresentam subdivisão.

A classificação de Augusto Filho (1992), que vem sendo amplamente empregada no Brasil, fundamenta-se nos processos de movimento de massa, separados em quatro grupos fenomenológicos mostrados na tabela 3.2.

Tabela 3.2: Classificação fenomenológica de movimentos de massa, apresentada por Augusto Filho (1992).

Processos	Característica do Movimento/ Material/Geometria
Rastejos (*creep*)	• vários planos de deslocamento (internos); • velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade; • movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; • solo, depósito, rocha alterada/fraturada; • geometria indefinida.
Escorregamentos (*slide*)	• poucos planos de deslocamento (externo); • velocidades muito médias (m/h) a alta (m/s); • pequenos a grandes volumes de material; • geometria e materiais variáveis; Planares: solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza; Circulares: solos espessos homogêneos e rochas extremamente fraturadas; Em cunha: solos e rochas com dois planos principais de fraqueza.
Quedas (*falls*)	• sem plano de deslocamento; • movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado; • velocidades muito altas (vários m/s); • material rochoso; • pequenos a médios volumes; • geometria variável: lascas, placas, blocos, etc.;

Corridas (*flows*)	Rolamento de matacão; Tombamento. • muitas superfícies de deslocamento; • movimento semelhante ao de um líquido viscoso; • desenvolvimento ao longo das drenagens; • velocidades médias a altas; • mobilização de solo, rocha, detritos e água; • grandes volumes de material; • extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas.

Segundo Fernandes & Amaral (1996), qualquer sistema proposto apresenta restrições, visto que na natureza os escorregamentos têm a tendência de manifestar formas mais complexas, dificultando constituir limiares entre as classes ou ainda pela manifestação de mais de uma classe em uma mesma feição de movimento. Este trabalho dará enfoque ao processo de escorregamentos, os quais serão descritos com mais detalhes a seguir. Os demais processos não serão abordados nesse estudo.

3.1.1.1 Escorregamentos

Dentre os processos de movimento de massa, os mais frequentes no Brasil são os escorregamentos. Entre os termos utilizados para se referir aos escorregamentos tem-se deslizamentos de terra e na linguagem popular queda de barreira e desbarrancamento, sendo *slide* o termo equivalente em língua inglesa. No presente trabalho, os termos escorregamentos e deslizamentos serão utilizados como sinônimos.

Guidicini & Nieble (1984) definem escorregamentos como sendo movimentos rápidos, de porções de terrenos (solos e rochas), geralmente com volumes definidos, deslocando-se sob ação da gravidade, para baixo e para fora do talude ou encosta. Varnes (1978) acrescenta que uso mais restrito do termo escorregamento se refere somente aos movimentos de massa onde exista uma zona de fraqueza bem definida que separa o material deslocado do material estável remanescente na vertente. Fernandes & Amaral (1996) afirmam que, os escorregamentos, bem como os processos de intemperismo e erosão, são fenômenos naturais de dinâmica externa da Terra, que esculpem a paisagem. São amplamente estudados por pesquisadores e debatidos pelos gestores públicos devido aos grandes danos causados ao homem e as propriedades.

Em linhas gerais, um escorregamento ocorre quando a razão entre a resistência ao cisalhamento do material e a tensão de cisalhamento na superfície potencial de ruptura atinge um valor menor que uma unidade (Guidicini & Nieble, 1984). Em outras palavras, quando a força gravitacional supera o atrito interno entre as partículas, responsável pela estabilidade, a massa de material (solo, rocha) desloca-se encosta abaixo. Um dos principais fatores responsável por esse fenômeno é a acumulação de água no material o que gera poropressão, a qual atua em sentido contrário às tensões grão a grão, com consequente diminuição ou perda total do contato entre as partículas, o que reduz o atrito entre elas.

De acordo com a geometria da superfície de ruptura e o tipo de material instabilizado, os escorregamentos são subdivididos em três tipos, que são: escorregamentos planares ou translacionais, escorregamentos rotacionais ou circulares e escorregamentos em cunha. Também é bastante comum a ocorrência de escorregamentos mistos, onde se observa superfície inicialmente circular se tornando plana, ou vice versa.

3.1.1.1.1 Escorregamentos Planares ou Translacionais

De acordo com os trabalhos de Highland & Bobrowsky (2008) e Tominaga (2015), os escorregamentos planares ou translacionais são os mais frequentes entre todos os movimentos de massa, encontrados em todo o mundo, em todos os tipos de ambientes e condições. A massa deslocada move-se ao longo de uma superfície de ruptura planar, a qual que está associada às heterogeneidades presentes nos solos e rochas que, em geral, representam descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas derivadas de processos geológicos, geomorfológicos ou pedológicos. Esse tipo de escorregamento pode progredir por distâncias consideráveis, se a superfície de ruptura estiver suficientemente inclinada. O material pode variar de solo até grandes placas de rochas, ou ambos, cuja velocidade de movimento pode ser inicialmente vagaroso (1,5 metros por mês), atingindo velocidades moderadas (1,5 metros por dia) a extremamente rápidos. A figura 3.1 ilustra a ocorrência típica de um escorregamento planar.

Em geral, os escorregamentos planares ocorrem durante ou logo após períodos de chuvas intensas, graças ao aumento do nível de saturação do solo ou rocha. Também

podem ser desencadeados por degelos, inundações ou pelo aumento do nível de água devido à irrigação e vazamento de tubulações. Igualmente, terremotos e tremores de terra podem provocar esse fenômeno. É comum que a superfície de ruptura coincida com a interface solo-rocha, a qual desempenha papel de descontinuidade mecânica e hidrológica. O aumento acelerado da poropressão positiva no material (solo, rocha), quando da ocorrência de eventos de alta pluviosidade, ocorre em consequência da dinâmica hidrológica nesse processo ser mais superficial, fazendo com que as rupturas ocorram em curto espaço de tempo (Fernandes & Amaral, 1996).

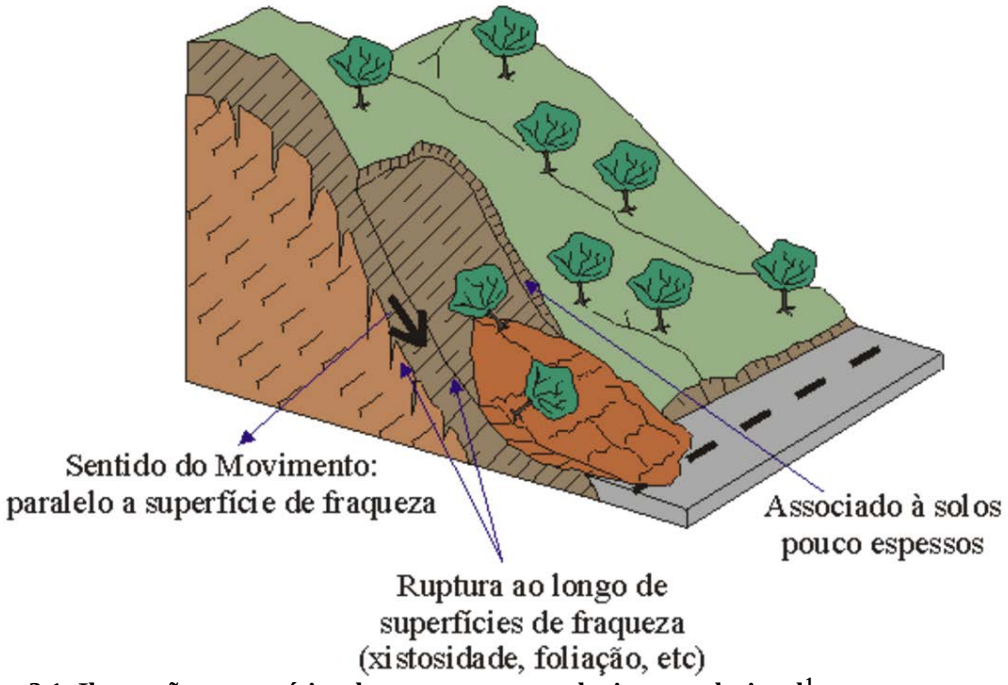

Figura 3.1: Ilustração esquemática do escorregamento do tipo translacional[1].

A morfologia dos escorregamentos translacionais caracteriza-se por serem rasos, com o plano de ruptura, na maioria das vezes, a 0,5 a 5,0 m de profundidade e com maiores extensões no comprimento (Fernandes & Amaral, 1996). Podem ocorrer em encostas tanto de alta como de baixa declividade. Com base no tipo de material transportado, Guidicini & Nieble (1984) subdividiram os escorregamentos planares em: de rocha, de solo e de solo e rocha.

[1] Disponível em http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09b.html, acessado em 14/04/16.

Escorregamentos planares de rocha é o deslocamento de massas de rochas através de descontinuidades, ou planos de fraqueza preexistentes. Ocorrem em diversas escalas, desde um bloco isolado de pequena dimensão até a movimentação de grandes quantidades de rocha em vertentes montanhosas. A movimentação se dá em superfícies associadas à estrutura geológica, tais como planos de acamamento, estratificação, foliação, bandamentos gnáissicos, falhas, juntas de alívio de tensão e fraturas.

Escorregamentos planares de solo é o movimento ao longo de uma superfície plana condicionada a alguma feição estrutural do substrato. Usualmente, ocorrem dentro do manto de alteração ou regolito, com espessuras que dependem da natureza da rocha que formou o solo, do clima, da drenagem e da declividade. O material escorregado, via de regra, apresenta forma tabular. O movimento apresenta velocidade elevada e grande poder de destruição. Quando associados a grandes quantidades de água, podem passar a corridas, ou a rastejo após a acumulação do material movimentado no pé da vertente. A definição do termo refere-se à predominância de solo no material transportado, bem como a localização da superfície de ruptura dentro de horizontes do solo, ou ao longo do contato solo-rocha.

Escorregamentos planares de solo e rocha é o movimento no qual a massa transportada mostra um significativo volume de rocha, sendo o principal exemplo o movimento de depósito de tálus. Estes se formam pelo acumulo de blocos de rochas no sopé de encostas originados por efeito da gravidade, estando os blocos envoltos em matriz de solo, provenientes do processo de acumulação ou de alteração dos próprios blocos, os quais se dispõem de maneira caótica, sem estrutura de acamamento.

3.1.1.1.2 Escorregamentos Rotacionais ou Circulares

Os escorregamentos rotacionais ou circulares caracterizam-se por uma superfície de ruptura curva e o movimento pode ser mais ou menos rotatório em torno de um eixo paralelo ao contorno do talude (Highland & Bobrowsky, 2008). A ocorrência desse movimento está usualmente associada à existência de pacotes de solos espessos e homogêneos. O escorregamento rotacional é frequentemente iniciado pela execução de cortes na base destes materiais, para a implantação de estradas, construção de

edificações ou ainda pela erosão fluvial no sopé da encosta (Fernandes & Amaral, 1996). A figura 3.2 mostra o esquema de ocorrência típica de um escorregamento rotacional.

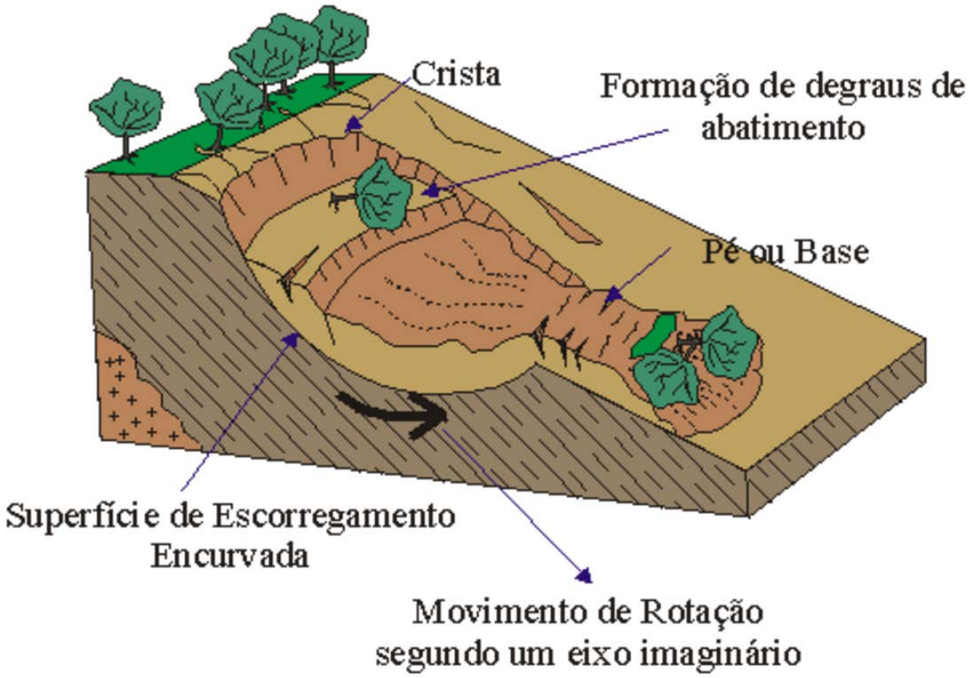

Figura 3.2: Ilustração do esquema de escorregamento do tipo rotacional[2].

3.1.1.1.3 Escorregamentos em cunha

Os escorregamentos em cunha estão associados aos saprolitos e maciços rochosos, nos quais a existência de duas estruturas planares, desfavoráveis a estabilidade, condiciona a movimentação de um bloco ao longo do eixo de interseção entre esses planos. Ocorrem principalmente em taludes de corte e encostas desconfinadas por ação antrópica ou natural (Infanti Jr & Fornasari Filho, 1998). Tem ocorrência mais restrita às regiões que apresentam um relevo fortemente controlado por estruturas geológicas (Tominaga, 2015). A figura 3.3 apresenta um esquema do escorregamento em cunha.

[2] Disponível em http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09b.html, último acesso em 14/04/16.

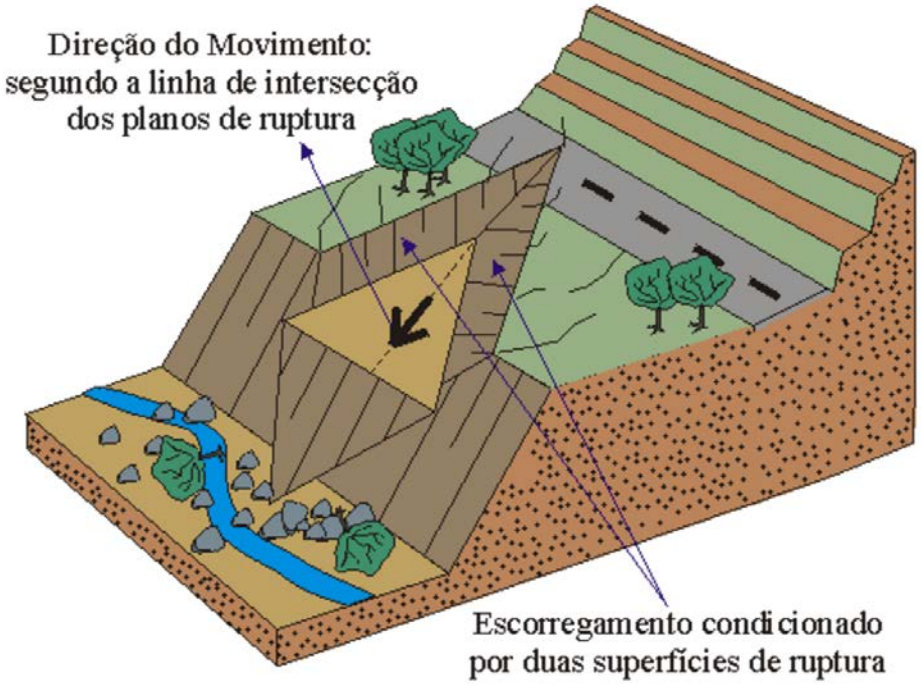

Figura 3.3: Ilustração do esquema de escorregamento do tipo em cunha[3].

3.1.2 FATORES CONDICIONANTES DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Dentre os diversos elementos que afetam a instabilidade de uma encosta, os trabalhos de Varnes (1978), Guidicini & Nieble (1984), Varnes *et al*., (1984), Cruden & Varnes (1996) e Glade & Crozier (2005) apresentam os fatores que condicionam a ocorrência de movimentos de massa. Apesar de divididos de maneiras distintas por esses autores, esses fatores geralmente correspondem àqueles relacionados às características inerentes do terreno (predisposição), aos fatores de preparação que reduzem a estabilidade do meio, e aos fatores desencadeantes, que são aqueles que dão início ao processo de movimentação.

Como fatores de predisposição, entende-se como sendo aqueles fatores estáticos, os quais não só influenciam a estabilidade, mas mais importante, age como um catalisador que permite que outros fatores dinâmicos instabilizantes possam operar de maneira eficaz. Por exemplo, materiais que perdem a resistência mais prontamente que outros na presença de água predispõe a ruptura da encosta durante uma chuva intensa; ou orientação da estrutura em uma rocha pode aumentar a instabilidade durante um corte

[3] Disponível em http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/interacao/inter09b.html, último acesso em 14/04/16.

(Glade & Crozier, 2005). Para Guidicini & Nieble (1984), os agentes predisponentes correspondem ao conjunto de condições geológicas, topográficas e ambientais da área onde se desenvolve o movimento de massa. São as condições naturais dadas pelas características intrínsecas dos materiais, sem ação do homem. Varnes (1978) considera que os fatores inerentes ao material (características geomecânicas do material, tensões iniciais, textura, geometria, estruturas, entre outros) podem ter ação na redução da resistência.

Para Glade & Crozier (2005), os fatores preparatórios são dinâmicos que reduzem a estabilidade da encosta ao longo do tempo, sem na realidade iniciar o movimento. Consequentemente, facilitado pelos fatores de predisposição, são responsáveis por transformar a encosta de estável para marginalmente estável. Exemplos desses fatores preparatórios são intemperismo, que reduz a resistência do material, mudança climática, aumento da declividade de encostas por atividade erosiva, desmatamento ou ações antrópicas que modifiquem a encosta. Denominados agentes efetivos preparatórios por Guidicini & Nieble (1984), referem-se ao conjunto de fatores diretamente responsáveis pelo desencadeamento do movimento de massa. São considerados como esses fatores pluviosidade, erosão pela água ou vento, oscilação do nível de lagos e marés e do lençol freático, ação de animais e antrópica, como desmatamentos.

Os denominados fatores desencadeantes ou deflagradores são aqueles responsáveis por iniciar o movimento. Os fatores mais comuns são chuvas intensas ou por períodos prolongados, rápido derretimento de geleiras, terremotos e modificação da geometria das encostas. Usualmente trata-se de forças externas desestabilizadoras impostas a encosta, entretanto é possível que o movimento se inicie na ausência de fatores externos identificáveis, assim assume-se que limiares de estabilidade de fatores intrínsecos foram ultrapassados (Glade & Crozier, 2005). Para Guidicini & Nieble (1984) esses fatores são chamados de agentes efetivos imediatos, e como exemplo citam chuva intensa, erosão, terremoto, ondas, ventos, interferência do homem, entre outros.

Dessa forma, os fatores preponderantes que influenciam a ocorrência de movimentos de massa estão relacionados com as características geológicas e geomorfológicas do meio físico, além dos aspectos climáticos e hidrológicos e da ação do homem relativa às

formas de uso e ocupação do solo (Varnes *et al*., 1984; Cruden & Varnes, 1996; Fernandes & Amaral, 1996; Augusto Filho, 2001; Tominaga, 2007).

No que tange ao mapeamento da previsão da possibilidade de ocorrência de um movimento de massa em uma determinada área – as cartas de suscetibilidade – os parâmetros mais utilizados foram apresentados por van Westen *et al*. (2008) e são sumarizados na tabela 3.3, para a escala média e o método de mapeamento estatístico adotados nesse trabalho. Relativamente à escala, os autores avaliaram a importância do fator e sua aplicabilidade em função da viabilidade de obtenção da informação.

Tabela 3.3: Visão geral dos fatores condicionantes e sua importância para o mapeamento de suscetibilidade, na escala média e utilizando método estatístico de análise. Adaptado de Soeters & van Westen (1996) e van Westen *et al*. (2008).

Grupo	Parâmetro	Relevância	Grau de Importância do Parâmetro	
			Escala Média*	Modelo Estatístico
Modelo Digital de Elevação	Declividade	Fator mais importante em movimentos gravitacionais de massa	Alto	Alto
	Orientação das vertentes	Pode refletir diferenças na umidade do solo e vegetação	Alto	Alto
	Morfologia das encostas	Indicador para a hidrologia da encosta	Alto	Alto
	Direção de fluxo	Utilizado na modelagem hidrológica da encosta	Médio	SI
	Fluxo acumulado	Utilizado na modelagem hidrológica da encosta	Médio	Médio
	Densidade de drenagem	Usado como indicador do tipo de terreno em avaliação de pequena escala	Médio	SI

Geologia	Litologia	Mapa geológico baseado em características de engenharia é preferível	Alto	Alto
	Grau de alteração	A profundidade do perfil de alteração é um importante fator para os deslizamentos	Médio	SI
	Descontinuidades	A distribuição e as características das descontinuidades são relevantes em movimentos rochosos	Médio	SI
	Aspectos estruturais	As estruturas geológicas são importantes quando analisadas em conjunto com a declividade e a orientação das vertentes	Alto	Alto
	Falhas	As distâncias das falhas ativas, bem como a largura das zonas de falhas, é importante	Alto	Alto
Solos	Tipo de solo	Tipos de solos baseados na classificação genética ou geotécnica	Alto	Alto
	Profundidade	A profundidade do solo baseado em sondagens, geofísica e afloramentos são cruciais para a análise de estabilidade	Médio	SR
	Propriedades Geotécnicas	A distribuição dos tamanhos dos grãos, coesão, ângulo de atrito e o peso específico são cruciais para a análise de estabilidade de taludes	Médio	SI
Hidrologia	Propriedades Hidrológicas	A porosidade, a condutividade saturada e a curva de retenção de água no solo são os principais parâmetros usados nos modelos de água subterrânea	Médio	SI
	Nível d'água	Variação espacial e temporal da profundidade do nível d'água	Baixo	SI

	Teor de água no solo	A variação espacial e temporal do teor de umidade no solo é um dos principais componentes na análise de estabilidade	Baixo	SI
	Componentes Hidrológicos	Intercepção, evapotranspiração, escoamento superficial, infiltração, percolação, etc.	Alto	SI
	Rede de Drenagem	Áreas de influência em torno dos cursos d'água de 1ª ordem ou em torno de rios em erosão	Alto	SI
Geomorfologia	Unidades Fisiográficas	Corresponde a 1ª subdivisão do terreno em zonas. É relevante para o mapeamento em escalas pequenas	Médio	SI
	Unidades de Terreno	Unidades homogêneas com respeito à litologia, à morfologia e aos processos	Médio	SI
	Unidades Geomorfológicas	Classificação genética dos principais processos de construção das formas de relevo	Alto	Médio
	Subunidades Geomorfológicas	Subdivisão geomorfológica de unidades de relevo em unidades menores	Alto	Alto
	Mapa de uso do solo	O tipo de uso/cobertura do solo é um dos principais componentes da análise de instabilidade	Alto	Alto
Uso do solo	Mudanças no uso do solo	Variação temporal do uso/cobertura do solo também é um componente importante na análise de estabilidade	Alto	Alto
	Características da vegetação	Tipo de vegetação, cobertura, profundidade e coesão das raízes, peso, etc	Médio	SI

	Estradas	As áreas de influência das estradas e taludes associados são frequentemente utilizados como mapa de fator	Alto	SI
	Construções	As áreas com taludes de corte para a construção, são por vezes, usadas como fator	Alto	SI

*De acordo com a *International Association of Engineering Geology* (1976 *apud* Soeters & van Westen, 1996), as escalas de mapeamento podem ser diferenciadas em Regional (1:500.000 a 1:100.000), Média (1:50.000 a 1:25.000) e Grande (1:15.000 a 1:5.000). Fell *et al*. (2008) definem intervalos diferentes para as escalas: Pequena (< 1:100.000), Média (1:100.000 a 1:25.000), Grande (1:25.000 a 1:5.000) e de Detalhe (> 5.000). SR – sem relevância; SI – sem informação.

De acordo com a tabela 3.3, existe uma grande variedade de fatores com alta relevância e aplicabilidade nas análises de suscetibilidade a movimentos de massa, tanto para escala de trabalho definida quanto para o método estatístico de mapeamento. Portanto, a seleção dos parâmetros que serão adotados irá depender do tipo do movimento estudado e seus mecanismos de ruptura e das características do terreno (van Westen *et al*., 2008), além da disponibilidade dos dados e informações existentes e dos custos envolvidos para sua obtenção, em função da escala utilizada.

Assim, a escolha dos mapas de parâmetros que serão empregados no modelo de suscetibilidade envolve um grau considerável de subjetividade, entretanto essa seleção pode se dar pela avaliação do resultado final de acordo com relação interativa dos fatores (Soeters & van Westen, 1996).

Diversos trabalhos têm abordado a comparação entre mapas produzidos com diferentes conjuntos de fatores de predisposição. Sterlacchini *et al*. (2011) compararam 13 modelos diferentes, os quais são resultados de combinações de 2 até 9 fatores. Já Pereira *et al*. (2012) analisaram 120 modelos diferentes, pelo arranjo de 7 parâmetros. De modo geral, esses trabalhos mostram que o aumento do número de parâmetros utilizados não necessariamente fornece melhores resultados quanto à qualidade do modelo, e que para cada área de estudo, diferentes combinação de fatores irão produzir mapas mais adequados a realidade local. Apesar dos esforços nesse sentido, Guzzetti (2005) afirma que o aumento da qualidade e precisão dos dados primários desempenha maior sucesso

no aprimoramento da robustez e capacidade de previsão do mapa final, do que o emprego de diferentes métodos, ou a utilização vários parâmetros em um único modelo.

A padronização da utilização de parâmetros pré-determinados não é trivial, uma vez que certos fatores podem ter mais influência na instabilização de encostas em uma área do que em outra. Contudo, alguns parâmetros são amplamente adotados em diversos trabalhos, devido à facilidade de obtenção dos dados e à sua relevância na previsibilidade dos movimentos de vertentes (Barella, 2016).

Os critérios morfométricos, oriundos dos dados topográficos, tais como declividade, curvatura, orientação das vertentes, são considerados por van Westen *et al*. (2008) um dos fatores mais importantes na análise de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa. Atualmente, são facilmente adquiridos por meio do Modelo Digital de Elevação ou de Terreno (MDE ou MDT). Apesar de sua reconhecida relevância, uma vez que são derivados da mesma fonte de dados, podem apresentar certo grau de dependência entre eles (Barella, 2016).

Segundo van Westen *et al*. (2008), os mapas geológicos também mostram grande influência na análise de suscetibilidade a escorregamentos com o emprego de métodos estatísticos. Esses autores orientam que mapas litológicos classificados com um enfoque nas características geotécnicas – ângulo de atrito, coesão, descontinuidades do maciço – preferencialmente a uma classificação estratigráfica, são mais eficientes para a avaliação do processo de movimentação.

O agrupamento das litologias embasado nas propriedades geotécnicas medidas ou estimadas é proposto por Carrara *et al*. (1999). Entretanto essa abordagem, na prática, para extensas áreas se torna inviável devido ao longo tempo demandado e aos altos custos envolvidos na etapa de coleta de amostras e na execução dos ensaios. Mesmo quando tal prática é possível, a espacialização das informações geotécnicas assume grande subjetividade, dada a ampla variabilidade espacial das propriedades e o caráter pontual das análises (Soeters & van Westen, 1996).

De acordo com van Westen *et al*. (2008), a geologia estrutural também é um fator importante na avaliação de suscetibilidade, sendo que as relações entre as direções e

ângulo de mergulho das estruturas das rochas desempenham papel crucial no desencadeamento de escorregamentos em maciços rochosos. Entretanto para apresentarem bons resultados, é necessária uma grande quantidade de medidas em função da complexidade estrutural da área. Os autores também afirmam que a área de influência de zonas de falhas é um fator relevante na previsão de movimentos, entretanto devem ser tratadas com restrições, uma vez que tal afirmação pode ser verdadeira somente para falhas ativas, para uma avaliação em média escala.

O parâmetro geomorfologia, utilizado na análise de suscetibilidade a movimentos de massa, corresponde ao agrupamento das unidades de relevo de acordo com a semelhança de suas características morfométricas e genéticas, sendo ordenados em níveis taxonômicos, mapeáveis em diversas escalas. No Brasil, a depender da escala de trabalho e do nível de detalhe pretendido, pode-se utilizar o 3º ou o 4º nível taxonômico, proposto por Ross (1992). O terceiro nível taxonômico corresponde a unidades geomorfológicas associadas às formas de relevo recorrentes, geradas de uma evolução comum. São formas de relevo, que quando observadas do avião ou imagens de satélite ou radar mostram o mesmo aspecto quanto a rugosidade topográfica ou dissecação do relevo. Já o quarto nível, descreve e diferencia detalhes de uma mesma unidade de padrão de relevo, tais como padrões de disseção e índices morfométricos que denotam aspectos genéticos ligeiramente diferenciados.

A profundidade e as características geotécnicas das camadas de solo, sem dúvida, figuram entre os fatores fundamentais no estudo de estabilidade de encostas, particularmente nas análises determinísticas. A profundidade se refere à espessura do material inconsolidado que pode se deslocar, e é um parâmetro difícil de ser mapeado para grandes áreas, visto que apresenta variabilidade considerável (van Westen *et al*., 2008).

A cartografia existente com informações do solo normalmente apresenta a classificação pedológica. Apesar de conter informações que podem ser interpretadas e generalizadas para o possível comportamento geotécnico do material, para van Westen *et al*. (2008), a classificação dos mapas pedológicos consideram os horizontes superficiais, sendo menos importantes nos estudos de movimentos mais profundas que 1-2 metros.

O mapa de uso e ocupação do terreno é um tema comumente utilizado, como fatores estáticos em trabalhos de suscetibilidade a movimentos de massa. As mudanças na cobertura e uso do solo, devido à ação antrópica, tais como desmatamento, urbanização e construção de estradas podem afetar consideravelmente a estabilidade das encostas (van Westen *et al*., 2008). Dentre as influências desses aspectos estão: o reforço na resistência mecânica do solo conferida pelas raízes da vegetação, bem como na sua ação de interceptação das águas pluviais e remoção da umidade do solo; a sobrecarga produzida pela vegetação de grande porte e os esforções produzidos por fontes ventos na copa e transferido ao solo; e por fim, os processos oriundos da urbanização precária, execução de taludes de corte irregulares, lançamento inadequado de aterro, entulho, lixo, águas servidas e esgotos.

Devido às constantes e rápidas transformações a que o meio está sujeito, a utilização do mapa de uso e ocupação pode gerar resultados que não correspondam à realidade (Barella, 2016). Por exemplo, no caso de um inventário de escorregamentos com dados de movimentos ocorridos ao longo de vários anos, o uso e ocupação retratados para o estudo certamente não irão corresponder aos da época de ocorrência de cada evento.

3.2 TIPOS DE ZONEAMENTOS GEOLÓGIGO-GEOTÉCNICOS

Segundo Varnes (1984), o termo zoneamento se refere à categorização de uma determinada área em domínios homogêneos de seu grau real/potencial de desencadear um movimento de massa. Para a elaboração de um zoneamento de escorregamento, é fundamental se ter conhecimento detalhado dos processos que ocorrem ou ocorreram na área de estudo, e dos fatores que induziram os eventos de movimentação, potencialmente desastrosos. A maioria dos métodos de zoneamento baseia-se na hipótese de que as rupturas de encostas futuras irão ocorrem sob condições semelhantes que desencadearam movimentos no passado.

Fell *et al*. (2008) dividem os tipos de zoneamento em suscetibilidade, perigo e risco, em ordem do grau de informação que fornecem a respeito dos processos que apresentam (Tabela 3.4). Em uma escala média de mapeamento, as cartas de suscetibilidade têm como objetivo informar e servir de consulta aos gestores públicos e demais setores

interessados da sociedade sobre os referidos temas, eventualmente podendo a carta de suscetibilidade a escorregamentos ser utilizada, com restrições, para fins legais.

Tabela 3.4: Tipos e níveis recomendados de zoneamento e escala relacionado ao objetivo do mapeamento (retirado de Fell *et al.*, 2008).

Objetivo	Tipo de Zoneamento				Nível de Zoneamento			Escalas
	Inventário	Suscetibilidade	Perigo	Risco	Básico	Intermediário	Avançado	
Zoneamento Regional								
Informativo	X	X	-	-	X	-	-	1: 250.000 a 1:25.000
Consultivo	X	X	(X)	-	X	(X)	-	
Legal	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	
Zoneamento Local								
Informativo	X	X	X	(X)	X	(X)	-	1: 25.000 a 1:5.000
Consultivo	(X)	X	X	X	X	X	X	
Legal	-	(X)	X	(X)	-	X	X	
Zoneamento Pontual								
Informativo	NR	NR	NR	NR	NR	NR	NR	1: 5.000 a 1:1.000
Consultivo	NC	NC	NC	NC	NC	NC	NC	
Legal	-	(X)	X	X	-	X	X	
Projeto	-	(X)	(X)	X	-	(X)	X	

Nota: X = Aplicável; (X) = Pode ser aplicável; NR = Não recomendado; NC = Não comumente utilizado.

O inventário de escorregamentos pode ser considerado como o mais elementar tipo de mapa representativo da ocorrência de movimentos de massa, e é sem dúvida, a etapa mais importante que precede os demais zoneamentos, e por esse motivo será abordado com mais detalhes no item 3.2.1.

Garcia & Zêzere (2003) definem suscetibilidade como a probabilidade espacial de ocorrência de um fenômeno em uma determinada área, independente do seu período de recorrência. Essa dissertação irá abordar especificamente esse tema, que será mais bem tratado adiante, no item 3.2.2. Os demais termos serão conceituados somente a título de compreensão geral e comparação.

O termo *hazard* ou perigo, como é usualmente traduzido no Brasil como perigo é definido como sendo a probabilidade de ocorrência de um dano potencial que pode ser causado por um fenômeno, em um dado período de tempo em uma área específica (Varnes *et al.*, 1984). Para Garcia & Zêzere (2003), o conceito de perigo leva em conta além da probabilidade espacial, a probabilidade temporal de ocorrência de determinado

evento. O zoneamento de perigo pode ser expresso como a frequência de um tipo particular de movimento de determinado volume e/ou velocidade, ou seja, de mesmas características (Fell *et al*., 2008).

Já o termo risco é entendido por Garcia & Zêzere (2003) como a probabilidade e a severidade esperada do número de vidas perdidas, pessoas feridas, danos em propriedade ou paralisação de atividade econômica devido à ocorrência de um fenômeno natural específico. A avaliação de risco a escorregamentos tem como objetivo definir a perda ou prejuízos esperados para um elemento específico - pessoas, moradias, rodovias, ferrovias ou indústrias (Varnes *et al.*, 1984). Por conseguinte, o alvo do zoneamento de risco é o elemento em risco e não a área territorial em si (Guzzetti, 2005). Na concepção de Fell *et al.*(2008), o mapeamento de risco utiliza-se do resultado do zoneamento de perigo e agrega informação de danos potenciais a pessoas (probabilidade anual de mortes), a propriedade (valor anual de prejuízos as propriedades) e ao meio ambiente para o elemento em risco considerado, levando em consideração a probabilidade temporal e espacial e sua vulnerabilidade.

3.2.1 MAPA DE INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS

Um mapa de inventário de escorregamentos apresenta o registro sistemático da localização, a data de ocorrência, quando conhecida, e as características (tipo, dimensões, material) dos movimentos de massa que ocorreram em uma determinada região, ou dos quais ainda existam sinais discerníveis. Os atributos a serem catalogados dependem do escopo do estudo no qual o inventário será aplicado (Proyecto Multinacional Andino, 2007; Guzzetti *et al.*, 2012). Os termos inventário, mapa de inventário, mapa de escorregamentos, inventário de escorregamentos serão utilizados como sinônimos para mapa de inventário de escorregamentos.

Dentre os tipos de mapas de zoneamento geológico-geotécnico para o estudo de movimentos de massa, o inventário de escorregamento é considerado o mais elementar, por ser visto por como a representação mais simples, e que melhor se aproxima de um zoneamento de ameaça a movimento de massa (Guzzetti *et al.*, 2000). É uma ferramenta amplamente utilizada como insumo preliminar nas análises de suscetibilidade, perigo e

risco a movimentos de massa; na pesquisa da distribuição, tipos, padrões e recorrência dos deslizamentos em relação às características morfológicas e geológicas, bem como nos estudos estatísticos de ruptura de encostas; nos estudos da evolução do relevo onde dominam processos de denudação (Guzzetti *et al.*, 2012); ou necessários para estabelecer correlações tais como chuva-escorregamento ou sismo-escorregamento (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

Inventários de escorregamentos são produtos subjetivos, sendo que sua qualidade e plenitude derivam: da habilidade e da experiência do pesquisador; da complexidade geológica e geomorfológica da área de estudo, bem como da idade dos escorregamentos (mantendo suas feições características); do uso e ocupação do solo; da confiabilidade das informações disponíveis, tais como resolução, escala e data da fotografia aérea ou imagem de satélite, da escala e qualidade do mapa base utilizado para mostrar os dados de deslizamentos; e das ferramentas usadas na interpretação e análise das imagens, incluindo estereoscópicos e dispositivos computacionais de visualização 3D (Galli *et al*., 2008; Malamud *et al*., 2004; Guzzetti *et al*., 2012). Por isso, e outras razões Wills & McCrink (2002) consideram que um inventário de escorregamento é sempre incompleto, devido a um efeito inevitável dos métodos dos quais são obtidos. Também segundo esses autores, essa afirmação é especialmente mais precisa quando se trata de escorregamentos rasos e de menor porte.

Um inventário confiável é essencial para qualquer diagnóstico de evento de escorregamentos e para definir relações entre esses e suas condições ambientais causadoras e desencadeantes (van Westen, 2000). A confiabilidade dos produtos obtidos a partir de mapas de escorregamentos é diretamente relacionada e controlada pela qualidade e grau de integridade do inventário (Galli *et al*., 2008).

Os processos de elaboração dos inventários e da avaliação de sua qualidade, a despeito da relevância desses mapas e de sua ampla produção e utilização ao longo de anos e em diversos países, permanecem pouco definidos (Guzzetti, 2006; van Westen *et al*., 2006 e 2008), sendo que os estudos existentes ainda não propuseram critérios claros e amplamente aplicáveis. A qualidade de um inventário de escorregamento é usualmente

atestada relativamente, por comparação com outro inventário (*e.g.* Wills & McCrink, 2002; Galli *et al*., 2008).

A identificação de rupturas recentes é extremamente importante para detectar e mapear escorregamentos passados e, por conseguinte, auxiliar na previsão de escorregamentos futuros. De acordo com Guzzetti *et al*. (2012), o estudo dos movimentos de massa e a elaboração de um mapa de inventário de escorregamentos se baseiam em algumas hipóteses. Com relação aos sinais característicos deixados pelos movimentos, a maior parte pode ser distinguida e classificada por meio de interpretação de fotografia aérea, imagem de satélite ou mediante análise da superfície topográfica. Esses sinais são morfológicos, isto é, fazem alusão a alterações na forma, posição e aspecto na topografia. Normalmente essa assinatura é semelhante para o mesmo tipo de movimento, também para a mesma taxa de deslocamento.

Apesar de muitas vezes se ter a sensação de imprevisibilidade, os escorregamentos não acontecem de maneira aleatória ou ocasional. São consequências da interação de processos físicos regidos pelas leis da mecânica de estabilidade de taludes (Guzzetti *et al*., 2012), sendo elas que conduzem ao tamanho, a forma e a evolução temporal dos deslizamentos. Esses princípios são definidos ou inferidos empiricamente, estatisticamente ou por métodos determinísticos.

Pelo princípio do uniformitarismo, as condições que levaram a ruptura no passado são semelhantes àquelas que poderão induzir um novo um escorregamento. A partir disso, Aleotti & Chowdhury (1999) vão além e afirmam que, os dados sobre escorregamentos obtidos para uma determinada área podem ser difundidos e extrapolados para detecção e mapeamento de escorregamentos em outras áreas semelhantes.

De acordo com Mantovani *et al*. (1996), as informações contidas em um mapa de escorregamento abrange um período de tempo limitado que precede a data do levantamento de campo ou da fotografia aérea, por exemplo. É comum que as feições de movimentação ocorridos há um tempo considerável antes da aquisição da imagem tenham se tornados indetectáveis. A análise de fotografias multitemporais é considerada um aprimoramento na elaboração de inventários de escorregamento.

Os inventários podem ser categorizados de acordo com sua escala e tipo de mapeamento mais usual. Frequentemente, os mapas de escorregamentos compilados de informações da literatura, ou por meio de pesquisas em organizações públicas ou privadas, jornais, relatórios técnicos e científicos ou entrevista com especialistas são considerados de pequena escala ou sintético (<1:200.000). Já os inventários de média escala (1:25.000 a 1:200.000) comumente são preparados pela interpretação sistemática de fotografias aéreas em escalas que variam de 1:60.000 a 1:10.000, complementarmente a checagem local de campo e informações históricas. Por fim, os mapas de grande escala (> 1:25.000) são preparados para áreas limitadas, empregando a fotointerpretação aérea em escalas maiores que 1:20.000, imagens de satélite e/ou modelo digital de terreno de alta resolução, normalmente complementadas por pesquisa de campo. Ainda podem ser classificados pelo tipo de mapeamento, sendo o inventário de arquivo aqueles oriundos da pesquisa bibliográfica e outros meios de informação pública, e o inventário geomorfológico que se subdivide em histórico, por evento, por temporada ou multitemporal (Guzzetti *et al*., 2012).

O inventário geomorfológico histórico exibe feições de muitos eventos de escorregamentos ocorridos ao longo de décadas, séculos ou até milhares de anos. Assim, a idade dos movimentos não é distinguida ou é fornecida por termos relativos, como recente, antigo ou muito antigo. Já o mapa de escorregamentos multitemporal, se diferencia do primeiro por apresentar feições desencadeadas por múltiplos eventos ao longo de grandes períodos (anos a décadas), onde os eventos são conhecidos.

Dessa forma, o inventário de evento mostra somente os deslizamentos ocasionados por um único evento, como por exemplo, um terremoto ou um episódio de chuva intensa. Nesse caso, a data do escorregamento corresponde à data (ou período) do evento desencadeador do movimento. E por fim, o mapa de escorregamentos de temporada exibe os movimentos de um único, ou múltiplos eventos ocorridos durante uma única estação ou poucas estações, também bem determinadas.

Para Wills & McCrink (2002), o reconhecimento de escorregamentos nos estudos de grandes áreas devem ser subsidiados pela geomorfologia. Eles afirmam que as feições de relevo características cunhadas pelos movimentos são usualmente identificadas sem

grandes dificuldades, por pesquisadores treinados, com o uso de fotografias aéreas, mapas topográficos e atividade de campo. Os autores assumem, que via de regra, em regiões montanhosas, a ocorrência de escorregamentos é esperada. Entretanto esses movimentos, em razão de seu tamanho, tipo ou idade, podem ser semelhantes a outros tipos de forma de relevo, ou foram obliterados ao ponto de não serem mais distinguidos até mesmo por técnicos experientes. Isso se traduz como a maior limitação do uso das características geomorfológicas para a elaboração de inventários de movimentos de massa.

3.2.1.1 MÉTODOS DE MAPEAMENTO DE INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS

Guzzetti *et al*. (2012) apresentam os métodos utilizados para obtenção de feições e elaboração de mapas de inventário de escorregamentos. Classificam como métodos convencionais o mapeamento geomorfológico de campo e interpretação visual de fotografia aérea pela análise visual. Atualmente, a análise visual pode ser realizada de forma semi-automatizada com o auxílio de programas computacionais. Os demais métodos descritos pelos autores são classificados como técnicas recentes, sendo elas a análise da superfície topográfica; a interpretação e análise de imagem de satélite, dentre eles a interpretação visual, a análise de imagens multiespectrais e uso de dados de radar. Ambos os métodos se baseiam, uns mais outros menos, na análise das características morfométricas do relevo, tais como a diferença de altura, declividade, orientação da vertente e presença de concavidades e convexidades no terreno. O mapeamento de campo e a análise de imagem aérea ou de satélite também compartilham a dificuldade de identificar os escorregamentos devido às mudanças na cobertura vegetal, particularmente aqueles pequenos e rasos, em áreas densamente vegetadas, principalmente nas zonas tropicais e equatoriais. Nessas condições, as feições do movimento podem ser obliteradas em poucos meses.

3.2.1.1.1 MAPEAMENTO GEOMORFOLÓGICO DE CAMPO

Considerado por Wills & McCrink (2002) como o mapeamento mais completo e preciso que aqueles realizados por fotointerpretação ou análise de mapa topográfico, é também

aquele que demanda muitas horas de preparação e de trabalho de campo, além de grande aporte de recursos financeiros. De acordo com o trabalho desses autores, a interpretação de foto aérea e contorno topográfico, juntos demandaram somente 8% do tempo despendido para realizar o mapeamento detalhado de campo.

Para Guzzetti *et al*. (2012), outros empecilhos para a detecção de escorregamento em campo são a dificuldade de visão do investigador, no que se refere ao tamanho da feição, que pode ser muito grande para ser analisada por completo, não sendo possível visualizar todas as partes do movimento, e a obliteração dos escorregamentos antigos por erosão ou novos deslizamentos e pela cobertura vegetal ou a ação humana. Esses autores afirmam que, ao contrário de Wills & McCrink (2002), é um equívoco atribuir ao mapeamento de campo maior precisão do que o mapeamento remoto. Muitas vezes, a perspectiva que a visão a distância propicia é mais interessante na detecção de feições e pode gerar um inventário mais completo e de melhor acurácia. Tal afirmação depende da escala de observação e de levantamento das informações. Enquanto, por um lado, a análise de imagens pode fornecer uma melhor visualização da forma, da área e da magnitude do fenômeno, por outro, impossibilita a identificação de características – tais como descontinuidades, contatos, grau de alteração e resistência – que somente podem ser reconhecidos em campo.

Frequentemente, o mapeamento geomorfológico de campo representa uma etapa complementar importantíssima do mapeamento realizado pela interpretação de fotografia aérea ou imagem de satélite. Dessa forma, é possível verificar e validar o inventário produzido por sensoriamento remoto, obter informações sobre o tipo e as características gerais do deslizamento, averiguar áreas específicas com problemas ou limitação na imagem, e mesmo decidir-se quanto a possíveis erros de classificação. Segundo Galli *et al*. (2008), geralmente menos de 15% da área mapeada coberta pelo inventário é validada em atividade de campo.

De acordo com Guzzetti *et al*. (2012), o mapeamento de campo também conta com o surgimento de inúmeras tecnologias que auxiliam na dinâmica de levantamento de dados em campo. Seguramente, o dispositivo mais importante é o GPS (*Global Positioning System*), ou sistema de posicionamento global, que possibilita a localização

ágil de feições na superfície com precisão que muitas vezes ultrapassa a necessária a escala de mapeamento. Além disso, existem equipamentos a laser que podem ser usados para mensurar distâncias de até várias centenas de metros em campo. Complementarmente, os modernos programas computacionais processam informação geográfica de maneira simples e eficaz e ainda podem fornecer informações temáticas úteis para a identificação de escorregamentos.

3.2.1.1.2 INTERPRETAÇÃO VISUAL DE FOTOGRAFIA AÉREA

Mantovani *et al*. (1996) destacam que a elaboração de inventários de movimentos de massa com a utilização de técnicas de sensoriamento remoto abrange dois aspectos principais, a identificação da feição e a classificação (tipo) de escorregamento. A identificação se refere à possibilidade de mapear o deslizamento, com sua variabilidade de formas e características espectrais, sendo que a diferença espectral (contraste) entre a área movimentada e a adjacente, além da expressão morfológicas são pontos que merecem destaque nesse processo.

A análise visual de fotografia aérea, técnica simples e barata quando comparada a outros procedimentos, continua sendo um método amplamente utilizado na identificação de escorregamentos e elaboração de mapas de inventário. Entre as razões para esse fato estão a facilidade e rapidez no qual um profissional treinado consegue distinguir e mapear as feições e o auxílio do exagero vertical que destaca as características morfológicas do terreno facilitando a interpretação da assinatura do deslizamento (Guzzetti *et al.*, 2012).

Embora seja uma metodologia largamente empregada, trata-se de um processo empírico com grau de incerteza que pode variar enormemente devido à experiência e treinamento do mapeador. A falta de uma metodologia sistemática e de padronização na interpretação do conjunto de características (assinaturas – forma, cor, tonalidade, mosqueado, textura, padrão) pode ser considerada a principal limitação dessa técnica (Wills & McCrink 2002; Galli *et al*., 2008; Guzzetti *et al*., 2012).

3.2.1.1.3 ANÁLISE DA SUPERFÍCIE TOPOGRÁFICA

Segundo Pike (1988) a ocorrência de um escorregamento é capaz de modificar a superfície topográfica, imprimindo sobre ela diferentes assinaturas. O tamanho e o tipo de deslizamento, bem como sua extensão e magnitude comandam diretamente essas alterações. Algumas das feições topográficas formadas pelo movimento que podem ser diferenciadas são escarpas e bancadas altas em encostas (Wills & McCrink, 2002). Para esses autores, a análise do contorno topográfico é uma técnica útil que pode ser empregada como uma ferramenta de triagem dos escorregamentos, realizada anteriormente à fotointerpretação e ao mapeamento de campo.

De acordo com Rogers (1995) a configuração básica de um escorregamento pode ser reconhecida com facilidade com a análise da superfície topográfica quanto pela fotointerpretação (Figura 3.4). O deslizamento de um bloco de rocha deixa quebras nítidas na escarpa principal, podendo ser identificadas pela concavidade das linhas talude a baixo e contornos com o espaçamento próximo. Abaixo da quebra, as linhas de contorno são convexas talude abaixo e mais espaçadas, o que reflete na declividade mais suave da massa escorregada. Wills & McCrink, (2002) acreditam que, a menos que haja outra razão geológica, o padrão de contornos próximos encosta acima e distantes encosta abaixo, por si só, sugere um escorregamento.

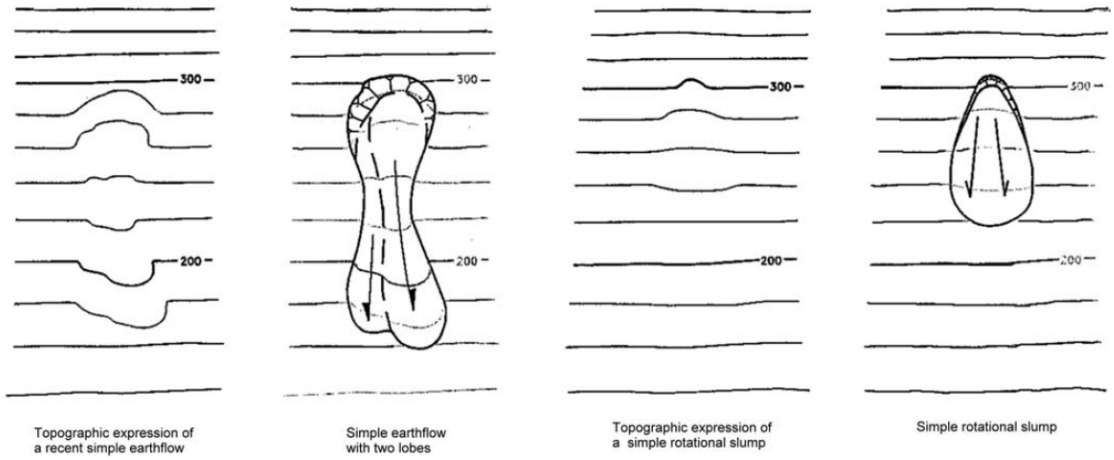

Figura 3.4: Exemplo de expressões das feições de escorregamentos no contorno topográfico (retirado de Rogers, 1995).

Dentre as limitações desse método, podem-se citar as dificuldades devido à escala e a influência da vegetação na preparação do mapa topográfico produzido. Apenas as

feições com tamanho suficiente para perturbar os contornos topográficos na escala do mapa serão perceptíveis. Dessa forma, o inventário será satisfatório em mostrar grandes blocos de deslizamentos, enquanto os deslizamentos mais superficiais e menores não serão identificados e mapeados, além de ser um método propenso a abranger feições oriundas de outros processos que possam sugerir escorregamento (Wills & McCrink, 2002).

Esses autores também relatam que quando preparados a partir de imagens de radar, os mapas topográficos exibem restrições análogas as da análise de imagem aérea. Em áreas densamente florestadas, a informação obtida pode se referir ao topo das árvores e construções e não a superfície do terreno. Com o intuito de minimizar esse erro, a produção do mapa topográfico deve incluir algoritmos para a subtração da altura típica das árvores de uma superfície visível na imagem. Como consequência, o mapa será uma aproximação da superfície do terreno. Entretanto, é importante salientar que, mesmo com esse efeito, é possível captar e perceber pequenas diferenças topográficas que tendem a se refletir na imagem de radar.

Slatton *et al*. (2007) discorre que o uso de LiDAR na obtenção de Modelos Digitais de Elevação (MDE), tem a capacidade de penetrar a cobertura vegetal, fornecendo dados detalhados e quantitativos da superfície topográfica. Essa tecnologia apresenta grandes avanços para mapear feições em áreas florestadas sobre outros métodos, *e.g*., análise de imagens aéreas ou de satélite, que não penetram a cobertura.

O trabalho de Wills & McCrink (2002) mostrou que a interpretação de contorno topográfico produziu melhor resposta que a fotointerpretação, quando comparado ao mapeamento de campo considerado como “completo” para a área de estudo dos autores. Contudo, esse resultado não é comumente previsto. Os autores explicam o fato justificando que possivelmente a interpretação do contorno topográfico foi feita com mais cuidado nas áreas densamente vegetadas para compensar o fato de não ser possível visualizar as feições nas fotos aéreas.

Segundo Guzzetti *et al*. (2012), o MDE de alta resolução obtidos por LiDAR e seus produtos derivados (mapa de contorno, relevo sombreado, declividade, curvatura)

podem ser empregados na análise visual da superfície topográfica ou no reconhecimento semiautomático de feições morfológicas de escorregamento.

A elaboração de inventário de escorregamento para grandes áreas tem na análise visual e interpretação de superfície topográfica provenientes dos MDE´s de alta resolução a aplicação mais comum e promissora. O relevo sombreado, por exemplo, pode substituir a visão estereoscópica tridimensional, admitindo a identificação de escorregamentos nessas imagens. Desse modo, podem-se definir grandes escorregamentos rotacionais e mesmo fluxo de detritos. Trata-se, portanto de uma técnica efetiva para mapear escorregamentos antigos e recentes, e em áreas cultivadas e florestadas (Guzzetti *et al*., 2012).

O reconhecimento automático ou semiautomático de feições de escorregamentos é um método que favorece a produção de inventários, sendo uma forma ágil e fácil, entretanto tem se mostrado impreciso quando se trata de áreas caracterizadas por morfologia complexa. A principal limitação do uso dessa tecnologia está na abordagem baseada no pixel, a depender do seu tamanho com relação às feições da área em análise. Esta técnica não considera ou pouco considera o contexto e a configuração geomorfológica local (Guzzetti *et al*., 2012).

3.2.1.1.4 INTERPRETAÇÃO VISUAL E ANÁLISE DE IMAGEM AÉREA E IMAGENS ÓTICAS

Há duas décadas, Mantovani *et al*. (1996) relatavam que o uso de imagens multiespectrais não era habitual para extrair dados fora da faixa visível do espectro, como por exemplo para avaliar a umidade do solo ou características da vegetação em áreas com escorregamentos

A utilização de informação obtida por satélites aplicada ao estudo de movimentos de massa tem se tornado mais comum nos últimos anos, muito devido a crescente disponibilidade de sensores de alta resolução e aos avanços nos processadores computacionais, que permitem a visualização e análise de imagens de satélite sem grandes esforços (Guzzetti *et al*., 2012). Esses autores relatam que essas imagens podem ser obtidas por sensores óticos ou de radar. Os primeiros são melhores no mapeamento

de escorregamentos pelo método visual ou analítico. Já as imagens capturadas por radar são comumente utilizadas para detectar e monitorar alterações na superfície topográfica causadas por movimentos de massa lentos. Dessa forma, pode-se medir deformação na superfície ao longo do tempo, e estabelecer uma série temporal dessa deformação.

O trabalho de Marcelino *et al*. (2009) confronta os resultados obtidos na identificação e mapeamento de escorregamentos, utilizando-se imagens de satélite de alta resolução e fotografias aéreas de resolução geográfica semelhante. Segundo o autor, as primeiras fornecem informação análoga e complementar sobre ocorrência de deslizamentos àquelas fornecidas pela análise de fotografias aéreas, abrangendo também feições que já apresentam sinais muito sutis. Uma tecnologia bastante difundida e de aplicação simples é a combinação de produtos dos Modelos Digitais de Elevação com as imagens de satélite para exibir uma visão 3D do terreno. São na verdade, imagens pseudoestereoscópicas que se comparam em qualidade e resolução com as fotografias aéreas tradicionais.

Os sensores dos satélites captam as propriedades óticas da superfície do terreno, que são alteradas depois do desencadeamento de um escorregamento, e são capazes de medir essa modificação de sua assinatura espectral, que apesar de ser uma característica ambígua na interpretação de imagens de satélite, ainda pode ser empregada para detectar e mapear feições de movimentação (Guzzetti *et al*., 2012). Esses autores também citam a facilidade e o avanço que o surgimento do *Google Earth*, no ano de 2005, provocou no mapeamento de escorregamentos, provendo os pesquisadores com novas oportunidades de explorar imagens óticas de satélite, que apresentam cobertura mundial de alta resolução, e que em muitos locais multitemporal. O programa também fornece uma ferramenta simples de visualização dessas imagens em três dimensões, produzindo um efeito estereoscópico.

3.2.1.1.5 ANÁLISE AUTOMÁTICA/SEMIAUTOMÁTICA DE IMAGENS MULTIESPECTRAIS

A utilização de imagens multiespectrais baseia-se na diferença da assinatura radiométrica das distintas classes de cobertura do terreno, tais como área construída,

florestas, corpos d'água e solo exposto. Fundamentado nesse fato, a elaboração de imagens e mapas derivados, como por exemplo, o Índice de Vegetação de Diferença de Vegetação Normalizado (NVDI) vem sendo cada vez mais utilizado na identificação visual de escorregamentos e na classificação semiautomática (segmentação) da imagem de satélite em deslizamentos (rupturas) e áreas estáveis (sem ruptura). A análise do NVDI tem-se mostrado eficaz, principalmente em áreas tropicais e equatoriais, onde, devido à densa cobertura vegetal, os escorregamentos causam alterações distintas na cobertura do terreno (Guzzetti *et al.*, 2012).

Além do custo de obtenção e da disponibilidade de informação, a principal limitação da utilização de dados multiespectrais de alta resolução reside no pré-processamento das imagens, que se refere ao tratamento preliminar da imagem bruta, com o objetivo de calibrar sua radiometria, atenuar os efeitos da atmosfera, retirar ruídos e ajustar distorções geométricas, recorrendo ao georreferenciamento e reamostragem (Florenzano, 2008). Esse tratamento inicial é mais relevante para a avaliação de imagens multiespectrais do que para a interpretação de imagens óticas. Cada etapa do pré-processamento altera a informação original, podendo afetar o resultado final de maneira desconhecida (Guzzetti *et al*., 2012). Esses autores também citam que os métodos semiautomáticos que se apoiam no pixel para identificar escorregamentos podem resultar em erros expressivos, tanto em omissões (falso negativo) quanto em excessos (falso positivo).

Alguns trabalhos buscam solucionar essa dificuldade tratando as feições de escorregamentos como objetos ou agregado de pixels com correlação espacial, em um contexto ambiental específico (*e.g.* Barlow *et al*., 2006; Martha *et al*., 2010; Lu *et al*., 2011). Essa abordagem vem apresentando resultados promissores a despeito da subjetividade na decisão sobre o tipo, o tamanho e escala dos escorregamentos, os quais são fatores que influenciam diretamente da definição do tamanho dos agregados, que dependem também da complexidade do terreno e da variabilidade da paisagem.

A análise automática/semiautomática de imagens multiespectrais é a técnica ideal para atualização de inventários após a ocorrência de grandes eventos de escorregamentos e gerenciamentos de desastres naturais. Isso porque se trata de um método de aplicação

relativamente simples e rápida, principalmente quando compara ao mapeamento de campo em áreas montanhas de difícil acesso (Lu *et al*., 2011).

3.2.1.1.6 DISCUSSÕES SOBRE OS MÉTODOS DE MAPEAMENTO DE INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS

A descrição dos diferentes métodos de obtenção de inventário de escorregamentos mostra que a identificação de feições de movimentos de massa é uma ciência inexata. Até mesmo o método mais adequado não é capaz de identificar todos os escorregamentos existentes em uma área, ou seja, nenhuma metodologia é totalmente livre erros, com a presença de feições erroneamente identificadas ou que ignora algum movimento ocorrido.

Para Wills & McCrink (2002), o mapeamento de campo intensivo é capaz de gerar inventários mais completos e precisos, entretanto seu custo e o tempo demandado para sua conclusão são fatores impeditivos em muitos casos. Também afirmam que idealmente, mapeamentos de escala regional devem agregar diferentes fontes de dados quanto possível, tais como interpretação de imagens, do mapa topográfico e atividade de campo.

Independentemente do método utilizado, a precisão do mapeamento deve ser sempre validada aproveitando-se de informação externa sobre o tipo, o tamanho e a distribuição dos escorregamentos obtidos em imagens aéreas ou por meio de pesquisa de campo. No que se refere às imagens de satélite, sua acurácia depende da escala e resolução (geográfica e espectral), tipo e abundância dos escorregamentos e da complexidade da paisagem onde eles ocorrem. Entretanto, os trabalhos referentes a esse tema não fornecem padrões mínimos para a elaboração e atualização de mapas de escorregamentos, nem mesmo apresentam um protocolo de como validar, quantidade mínima de informação que deve ser apresentada, ou como mensurar a qualidade dos mapas. Essa qualidade, em linhas gerais, depende enormemente da precisão, tipo e do grau de certeza da informação exibida (Guzzetti *et al*., 2012).

Dessa forma, todos os produtos e análises derivados dos mapas de escorregamentos, tais como estudos de erosão e evolução da paisagem, e avaliação de suscetibilidade, perigo e

risco a movimentos de massa, também sofrerão efeitos adversos bem como terão sua credibilidade e utilidade restringidas devido à carência desses padrões (Guzzetti *et al*., 2006).

Guzzetti *et al*. (2012) acreditam que as novas metodologias e técnicas de mapeamento, que utilizam informação de satélites e tecnologias modernas de sensoriamento remoto, possam contribuir para o aperfeiçoamento da produção e atualização de inventários de deslizamentos. Dentre eles, o uso sistemático dos métodos semiautomáticos e automáticos, que se valem de imagens de sensores óticos de muita alta resolução, juntamente com dados de sensores LiDAR para a representação da superfície topográficas, mostra-se como a abordagem mais promissora, com a capacidade de diminuir a subjetividade intrínseca ao mapeamento de escorregamentos.

De acordo com Guzzetti *et al*. (2012), o que se refere ao tratamento final dos dados, o advento da tecnologia de Sistema de Informação Geográfica (SIG) revolucionou a produção, atualização e visualização dos mapas de inventário de escorregamentos. Passou a ser facilmente representado por uma combinação de pontos, linhas e polígonos, mostrando respectivamente diferentes feições dos movimentos estudados. Além disso, o SIG admite a separação da informação em diversas camadas, conservando a consistência geográfica entre elas, ferramenta importante no caso dos inventários multitemporais, por exemplo, no qual é necessário mostrar vários polígonos que representam feições geomorfológicas de diferentes idades. Também permite o cálculo expedito da área do deslizamento, passo crucial na determinação da frequência de distribuição de áreas de escorregamentos (Malamud *et al*., 2004), além de facilitar a manipulação da informação de escorregamento com um conjunto de informações ambientais, tais como morfometria, geologia, uso e ocupação do solo, etapa fundamental para as modelagens computacionais de suscetibilidade, perigo e risco a movimentos de massa.

3.2.2 MAPA DE SUSCETIBILIDADE

Para Fernandes & Amaral (1996), o mapa de suscetibilidade é uma ferramenta imprescindível para a gestão das possíveis consequências oriundas de eventos de

escorregamentos, por meio da preparação e implantação de estratégias de gestão e medidas estruturais adequadas. É essencial para planejamento urbano de uso e ocupação do território, bem como na prevenção e mitigação de danos devido a eventos de movimento de massa. Fell *et al*. (2008) afirmam que o zoneamento de suscetibilidade a movimento de massa abrange a classificação, a área ou volume e a distribuição espacial de escorregamentos existentes ou potenciais em uma determinada área de estudo. Também pode incluir a descrição da área de atingimento, velocidade e intensidade dos deslizamentos. Referem-se à distribuição espacial dos fatores relacionados aos processos de instabilidade de encostas em um zoneamento de áreas predispostas aos movimentos de massa sem nenhuma alusão temporal (Chacón & Irigaray, 2007).

Utiliza-se o termo modelo/modelagem de suscetibilidade movimento de massa, pois independente da abordagem utilizada, e do grau de detalhamento e precisão, o produto gerado é uma tentativa de aproximação da realidade esperada para determinada área. Guzzetti (2005) afirma que um modelo de suscetibilidade a movimento de massa deve ser capaz de esclarecer os motivos da abundância ou ausência dos deslizamentos existentes em determinada área. Dessa forma, podem ser empregados na predição da localização de onde os escorregamentos serão abundantes ou esparsos, no futuro. Esse autor também lembra que um modelo de suscetibilidade pode ser elaborado de inúmeras formas distintas, visto que pode representar diversos tipos de movimento (escorregamentos planares, rotacionais, queda de rocha, fluxo de detritos, etc), levando em conta os principais fatores de instabilidade (declividade, morfologia, litologia, geologia estrutural, condições hidrológicas, entre outros).

Segundo os trabalhos de Fell *et al*. (2008) e van Westen *et al*. (2008), as atividades necessárias para a caracterização e determinação da distribuição espacial de escorregamentos futuros, para um zoneamento de nível básico a intermediário, são: preparação de um inventário de escorregamentos; mapeamento dos fatores geoambientais (declividade, litologia, estruturas, geomorfologia, solo, etc) que influenciam direta ou indiretamente a estabilidade de encostas; estabelecimento da correlação entre esses fatores e os escorregamentos ocorridos; e, por fim, a classificação do mapa em diferentes graus de suscetibilidade, com base nessas relações de áreas encontradas.

De acordo com esses procedimentos citados e com inúmeros trabalhos publicados, a elaboração de um mapa de suscetibilidade é relativamente simples. A quantidade de escorregamentos pretéritos e qualidade do inventário, bem como das informações temáticas utilizadas têm maior influência na qualidade do modelo final do que a escolha de um determinado método (Guzzetti *et al*., 1999). De fato, pode-se obter, para uma mesma área, modelos de suscetibilidade de diferentes formas e graus de confiabilidade, a depender do tipo e da qualidade da informação disponível (Guzzetti, 2005). Além disso, esse autor assegura que o grande avanço que os mapas de suscetibilidade têm sobre os mapas de inventário e de densidade de escorregamento é sua capacidade de predizer e fornecer uma avaliação quantitativa da probabilidade de ocorrência espacial de um futuro deslizamento, em uma dada área. Isso se deve ao fato de incorporarem os fatores de instabilidade que controlam a ocorrência e abundância espacial de deslizamentos aos escorregamentos já existentes.

Entre as limitações dos mapas de suscetibilidade, a maior delas é sua habilidade de prever somente a possível existência do escorregamento, e não tratar da quantidade de movimentos que podem ocorrer ou de sua extensão ou magnitude (tamanho, comprimento, área ou volume, ou poder destrutivo). Também não fornece nenhuma referência à frequência temporal de ocorrência dos deslizamentos esperados, não sendo possível distinguir entre aqueles de alta frequência temporal (a cada período chuvoso) daqueles de tempo de recorrência de décadas, séculos ou mesmo milhares de anos (Guzzetti, 2005).

Os modelos de suscetibilidade a escorregamento nada mais são que previsões espaciais. Assim como qualquer previsão de base científica, devem prover a informação de erro associado a tal previsão. Portanto, necessita de avaliação quantitativa de sua capacidade preditiva – finalidade do modelo – que será usado no planejamento de ocupação do território ou na prevenção e mitigação de danos, do que seu ajuste aos escorregamentos existentes (Guzzetti, 2005).

3.3 MÉTODOS DE MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE

Os métodos utilizados no mapeamento de suscetibilidade podem ter caráter qualitativo ou quantitativo. As principais metodologias utilizadas na avaliação de suscetibilidade são apresentadas na figura 3.5. Destacado em negro, estão os métodos que serão abordados nesse trabalho.

Apesar da diversidade de métodos e abordagens existentes para a avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa, Guzzetti (2005) afirma que a qualidade e confiabilidade de qualquer análise dependem muito mais da resolução e precisão das informações temáticas utilizadas para avaliar a suscetibilidade a um processo, do que do método empregado em si.

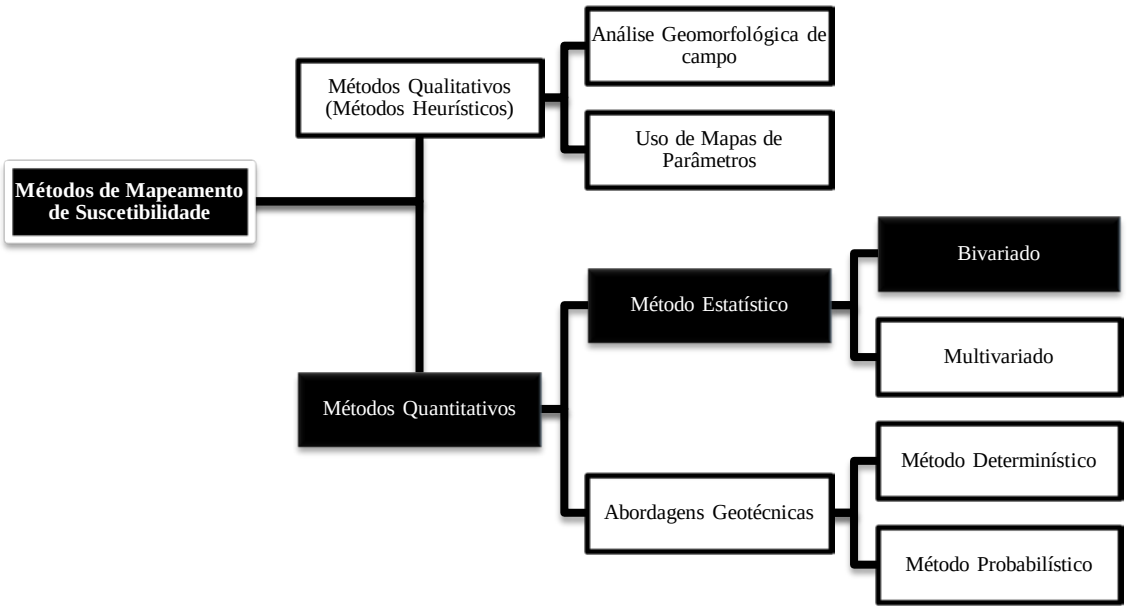

Figura 3.5: Classificação dos métodos de mapeamento de suscetibilidade (adaptado de Aleotti & Chowdhury, 1999; Soeters & van Westen, 1996).

3.3.1 MÉTODOS QUALITATIVOS

Esses métodos apresentam caráter heurístico e são baseados em avaliação qualitativa das características do meio. Apresentam grande subjetividade e estão intrinsecamente relacionados à experiência do profissional especialista que executa a análise. Os dados primários normalmente são oriundos de observações de campo com o auxílio de fotointerpretação. Dessa forma, o produto final é muito dependente da interpretação

pessoal do pesquisador que executa o mapeamento. Pode resultar em um mapa bastante confiável quando elaborado por um técnico experiente, ou mesmo mais preciso que um mapa quantitativo preparado por meio de simplificações da realidade, por ausência de dados em escala adequada (Mantovani *et al*., 1996). Entretanto, não são passíveis de reprodução e comparabilidade dos graus de suscetibilidade em áreas diferentes. Podem ser classificados em: análise geomorfológica de campo e uso de mapas de parâmetros ou mapas índices.

3.3.1.1 Análise Geomorfológica de Campo

Também conhecido como método do mapeamento direto, a análise geomorfológica de campo é considerada como uma metodologia simples, que se baseia inteiramente nas observações de campo, na experiência do pesquisador e em analogias com situações/áreas similares. Não existem normas específicas que guiem a interpretação e a justificativa para o zoneamento, uma vez que estas podem variar consideravelmente de uma área para outra (Soeters & van Westen, 1996; Alleoti & Chowdhury, 1999).

Segundo com Leroi, 1996 (*apud* Alleoti & Chowdhury, 1999), as principais limitações desse enfoque residem em: subjetividade na seleção dos dados e das regras que regem a estabilidade de taludes, o que torna inviável a comparabilidade entre mapas produzidos por diferentes geomorfólogos; a análise crítica dos resultados e atualização do mapa frente à disponibilidade de novas informações é dificultada ou mesmo impedida em decorrência da utilização de preceitos tácitos na avaliação inicial; e o tempo e recurso demandado para a realização de extensas campanhas de campo.

Segundo Mantovani *et al*. (1996), é possível avaliar o grau de incerteza de um mapa recorrendo a comparação entre diferentes mapas elaborados por diferentes geomorfólogos. Quanto maior a área classificada de forma idêntica em diversos mapas, menor é a incerteza. Contudo, não é possível determinar ou expressar o grau de incerteza de forma absoluta. Assim, o grau de subjetividade é diretamente relacionado com o nível de incerteza do mapa. Os termos objetivo e subjetivo indicam se as fases de determinação da suscetibilidade são verificáveis ou reproduzíveis por outros pesquisadores, ou se são profundamente subordinado ao seu julgamento pessoal.

Não obstante, é uma técnica aplicável a qualquer escala e capaz de proporcionar um julgamento expedito da estabilidade de uma área, ponderando diversos fatores. A avaliação é feita em duas etapas básicas: análise e extrapolação. Primeiramente, se consideram todos os aspectos que controlam a estabilidade, tanto os permanentes (topografia, geologia, hidrologia, etc) quanto os temporários (clima, uso e ocupação do solo, entre outros), e também as feições de movimentos ativas e inativas. Na segunda fase, o autor extrapola o conhecimento analisado para as demais áreas com condições físicas semelhantes. Não necessita do Sistema de Informações Geográficas, que quando utilizado é como uma ferramenta de desenho (Alleoti & Chowdhury, 1999).

3.3.1.2 Uso de Mapas de Parâmetros ou Mapas Índices

Alleoti & Chowdhury (1999), Soeters & van Westen (1996) e Mantovani *et al*. (1996) afirmam que o método de ponderação qualitativa de parâmetros, por meio do uso de mapas de parâmetros ou mapas índices, foi desenvolvido com o objetivo de diminuir a subjetividade dos mapas elaborados pela análise geomorfológica e de sua ausência de regras claras de avaliação, e tem se tornado muito popular . Nesse caso, o conhecimento geral do especialista, e das características específicas da área, é utilizado para atribuir pesos a uma série de mapas de parâmetros que controlam a estabilidade de encostas (declividade, geologia, características dos solos, etc). Entretanto, a definição dos pesos para cada parâmetro também apresenta certa subjetividade e depende da experiência do mapeador, e muitas vezes são atribuídos com pouco conhecimento de campo, o que pode levar a generalizações muitas vezes inaceitáveis. A dificuldade de extrapolar os dados de uma determinada área para outra também ocorre com a aplicação desse método.

As principais etapas para o desenvolvimento desse método são (Soeters & van Westen, 1996): categorizar os mapas de parâmetros em classes significativas; determinar valores de pesos de relevância para cada classe de parâmetro; atribuir pesos para cada mapa de parâmetro; realizar o cálculo por sobreposição dos mapas; e realizar a classificação final do mapa de suscetibilidade. Essas operações são realizadas automaticamente com o uso de programas computacionais pelo uso do Sistema de Informação Geográfica. Com essa

abordagem, é possível padronizar a gestão dos dados, desde a aquisição até o resultado final.

3.3.2 MÉTODOS QUANTITATIVOS

Os métodos quantitativos surgiram com a finalidade de atenuar a dependência do conhecimento e experiência pessoal do pesquisador, minimizando a subjetividade inerente das metodologias qualitativas, com consequente melhora na representatividade do fenômeno estudado. Podem ser divididos de acordo com a perspectiva da análise em: métodos estatísticos, métodos determinísticos e métodos probabilísticos.

3.3.2.1 Modelos Geotécnicos

3.3.2.1.1 Abordagem Determinística

Normalmente adotado em estudos geotécnicos de áreas específicas, a aplicação dos modelos geotécnicos exige dados de difícil obtenção, por meio grandes quantidade de ensaios de campo e laboratório. O índice de estabilidade é dado pelo valor do fator de segurança, calculado por modelos geotécnicos apropriados a cada caso (Alleoti & Chowdhury, 1999). A variabilidade dos parâmetros geotécnicos (coesão, ângulo de atrito, espessura da camada, profundidade do nível d'água) necessários nessa abordagem é bastante considerável, principalmente em se tratando de grandes áreas, o que não condiz com a homogeneidade de dados que esses modelos requerem (Mantovani *et al.*, 1996).

A despeito desse fato, essa metodologia vem sendo largamente emprega no estudo de mapeamento regional de escorregamentos, sobretudo após o surgimento da tecnologia SIG. Seu uso facilita a simulação de múltiplos cenários, como por exemplo, variação dos fatores desencadeantes - intensidade e recorrência de um evento chuvoso (Alleoti & Chowdhury, 1999). Trata-se de uma técnica mais adequada quando aplicada em áreas onde as condições geológicas e geomorfológicas apresentam-se homogêneas e, as ferramentas desenvolvidas mais empregadas atualmente, como por exemplo, o modelo *Shalstab*, considera o método de talude infinito, portanto se referem somente ao estudo de deslizamentos translacionais rasos. Embora se baseiem em processos físicos, quando

aplicado a levantamentos regionais podem apresentar alto grau de simplificações e generalizações (Soeters & van Westen, 1996).

De acordo com Soeters & van Westen (1996), os dados de entrada, apresentados em forma de mapa de parâmetros, necessários para a aplicação de um modelo determinístico são: espessura da camada de solo; parâmetros de resistência do solo (ângulo de atrito, coesão); profundidade abaixo do terreno da superfície de ruptura esperada; declividade da encosta; e condições de poropressão na superfície de ruptura. O modelo então calculará o fator de segurança para cada pixel da imagem da área de estudo, e então é possível obter modelos tridimensionais da estabilidade das encostas. O resultado final é um mapa que mostra o valor médio do fator de segurança para dadas condições e parâmetros de entrada. Os valores calculados normalmente não devem ser utilizados como absolutos e sim como indicativos das condições de estabilidade da área.

Segundo Alleoti & Chowdhury (1999), apesar de facilitarem enormemente a quantificação da estabilidade de encostas, a abordagem determinística não leva em consideração a grande variabilidade que os parâmetros geotécnicos de um mesmo material, em uma pequena área podem apresentar. Estudos recentes começam a dar importância às incertezas oriundas dos processos de obtenção de dados, tais como a investigação pontual em maciços de solo e rocha; número de ensaios de campo e laboratório limitado por questões financeiras e prazos; e ao fato dos ensaios não serem perfeitos e apresentarem margem de erro. Daí, a necessidade de se partir para abordagens probabilísticas de avaliação da estabilidade de encostas.

3.3.2.1.2 Abordagem Probabilística

Admissão da existência de incertezas nos parâmetros geotécnicos levou ao avanço da aplicação de métodos probabilísticos de cálculo, utilizando-se os mesmo modelos geotécnicos (Alleoti & Chowdhury, 1999). Nessa abordagem, assume-se que a probabilidade de falha é dada pelo valor abaixo da qual o fator de segurança é menor que 1 (um). Para o cálculo da probabilidade de falha, é preciso conhecer a curva de distribuição do fator de segurança, a qual pode ser caracterizada por sua média ou valor central e seu desvio padrão. Esses autores citam três principais métodos de cálculo da

probabilidade de falha comumente utilizados em trabalhos geotécnicos, sendo eles: *First Order Second Moment Method* (FOSM), Método do Ponto Estimado (PEM) e Método de Simulação de Monte Carlo.

Apesar dos grandes avanços quanto ao grau de confiabilidade dos resultados, a principal limitação do uso dos métodos probabilísticos é a necessidade de uma vasta quantidade de dados, no que diz respeito aos parâmetros geotécnicos e suas respectivas curvas de distribuição probabilística. O trabalho de Andersson-Sköld *et al*. (2014) é um ótimo exemplo do emprego dessa abordagem na avaliação de risco a movimento de massa aplicado a escala regional em uma área de centenas de quilômetros quadrados. Para elaborar o mapa de suscetibilidade, que subsidiou o julgamento do grau de risco, foram realizados mais de 1400 sondagens e 2300 ensaios geotécnicos de campo, entre eles CPT (*Cone Penetration Test*), Vane Teste e medições de poropressão, além de milhares de ensaios de laboratório e medições das condições hidrogeológicas de 34 seções ao longo da área de estudo. Esse montante de investigações demostra a grande restrição da aplicação dessa abordagem, de forma adequada e sem simplificações demasiadas, aos estudos de escorregamentos em média escala.

3.3.2.2 Métodos Estatísticos

Com o intuito de ampliar o grau de objetividade e melhorar a reprodução dos mapas de zoneamento, inúmeros métodos estatísticos foram desenvolvidos para a análise de suscetibilidade a escorregamentos. O advento de computadores com grande capacidade de processamento facilitou enormemente o emprego habitual desses métodos (Mantovani *et al*. 1996). Com esses métodos, os pesos aplicados aos fatores que provocam rupturas de encostas são obtidos por meio de cálculos estatísticos, não sendo mais dependentes da avaliação e conhecimento do pesquisador.

Segundo Alleoti & Chowdhury (1999) e Soeters & van Westen (1996), esses métodos confrontam, com a utilização de análises quantitativas estatísticas, a distribuição espacial dos escorregamentos com os fatores considerados que levaram a sua ocorrência no passado. O resultado é extrapolado para áreas livres de feições de movimentos, em condições semelhantes aquelas áreas que sediaram escorregamentos e onde há a

possibilidade de instabilidade futura na encosta. Assim, o cálculo da densidade de escorregamentos e a sobreposição de mapas de parâmetros são as bases para as análises estatísticas.

A maior dificuldade baseia-se na escolha dos processos de ruptura de encostas que deverão ser avaliados, que na verdade tem natureza subjetiva e que depende da experiência do mapeador. Umas das vantagens é que é possível validar a importância de cada parâmetro e estabelecer quais dados de entrada tem a melhor interação para o resultado final mais apropriado. Essas operações são extremamente facilitadas com o uso da tecnologia SIG, o que certamente ajuda a esclarecer o crescente uso dos métodos estatísticos (Alleoti & Chowdhury, 1999). As análises estatísticas podem ter abordagem bivariada ou multivariada.

Guzzetti *et al*. (1999) afirmam que modelos de suscetibilidade baseados em métodos estatísticos são controlados pela extensão da área de estudo, fato que dificulta ou impede a comparação de classes de suscetibilidade oriundas de diferentes áreas

3.3.2.2.1 Análise Estatística Bivariada

Nesse caso, cada parâmetro é comparado individualmente com o inventário de escorregamentos, e os pesos baseados na densidade de deslizamentos que são calculados para cada classe de parâmetro, posteriormente correlacionados com a densidade de deslizamentos de toda a área (Soeters & van Westen, 1996). Assim, é possível visualizar a importância particular de cada parâmetro. Alleoti & Chowdhury (1999) citam os procedimentos fundamentais para a determinação dos pesos: seleção e mapeamento de parâmetros significativos para a instabilidade de encostas, com posterior classificação em um número de classes essenciais; obtenção do mapa de inventário de deslizamentos para a área de estudo; sobreposição e extração do inventário com cada mapa de parâmetro; determinação da densidade de deslizamentos em cada classe de parâmetro e estabelecer seus pesos; atribuição dos valores de pesos para os mapas de parâmetros; e por fim, sobreposição e cálculo dos valores finais de índice de suscetibilidade para cada unidade de terreno.

No que diz respeito aos métodos de cálculo dos pesos, pode-se mencionar os utilizados nos trabalhos de van Westen (1993) e Barella (2016): Método de Análise de Suscetibilidade a Escorregamento ou Densidade de Escorregamentos; Método do Valor Informativo; Método dos Pesos de Evidência; *Likelihood*; e Probabilidade Bayesiana.

Esse trabalho irá utilizar o método do Valor Informativo, o qual será abordado no item 3.4.1. Conforme Barella (2016), essa metodologia apresenta excelentes resultados e mostra-se sensível as variações dos dados de entrada, além de se tratar de uma técnica inteligível, de aplicação simples e passível de ser executada com a calculadora *raster*. O trabalho de van Westen (1993) também indica o método do Valor Informativo, dentre outros, como de boa viabilidade de execução e bastante útil para a escala pretendida. O autor considera que os dados de entrada necessários para o emprego desse método em média escala são de fácil obtenção a custos razoáveis quando comparados aos resultados esperados.

3.3.2.2.2 Análise Estatística Multivariada

Esse método avalia a importância dos parâmetros relacionados à ocorrência de escorregamentos dada à contribuição relativa de cada um desses parâmetros para o total da suscetibilidade definida para uma determinada unidade de terreno. Fundamenta-se na presença ou ausência de deslizamento na unidade de terreno. A aplicação deste método é considerada mais adequada a escalas médias, uma vez que é possível obter um mapa de escorregamento e de parâmetros com precisão apropriada e onde fatores difíceis obtenção, tais como nível d'água, perfil e espessura das camadas de solo, não são necessários, como é o caso de mapeamentos executados em maiores escalas (Soeters & van Westen, 1996).

Alleoti & Chowdhury (1999) indicam as diretrizes essenciais para a análise multivariada da suscetibilidade de um fenômeno. Primeiramente, é necessário dividir a área de interesse em unidade de terreno, que podem ser unidade geomorfométricas, bacias, ou mesmo áreas quadradas de tamanho coerente com a escala de trabalho.

Posteriormente se identificam os fatores relevantes a ocorrência do processo incluindo informações sobre os escorregamentos (tipo, grau de atividade, tamanho, etc). Também

é necessária a elaboração de um mapa de inventário de escorregamentos existentes. É importante que todos os parâmetros estejam classificados de forma numérica.

Então, verifica-se a porcentagem da área afetada por deslizamento em cada unidade de terreno e as classificam-se como unidades estáveis ou instáveis. O limite para essa classificação é fixada de acordo com a densidade de escorregamentos presentes na área. Onde a densidade é alta, o limite considerado deve ser de alta percentagem para que se possam obter dois grupos significativos. Entretanto, áreas com baixa densidade de movimentos, serão consideradas representativas, caso representem um risco as atividades humanas.

A partir daí, realiza-se a associação dos mapas de parâmetros com o de unidades de terreno, e cria-se a matriz de ausência/presença de uma determinada classe de um dado parâmetro com cada unidade de terreno. Realiza-se a análise estatística multivariada, normalmente pelos métodos de regressão logística ou análise discriminante, recorrendo ao uso de programas computacionais. Por fim, reclassificam-se as unidades de terreno baseados nos resultados obtidos e sua posterior categorização em classes de suscetibilidade.

3.4 MÉTODOS ESTATÍSTICOS DE ANÁLISE

Este item apresenta os métodos estatísticos adotados na elaboração do modelo de suscetibilidade a escorregamento, bem como aqueles utilizados nas análises de sensibilidade e na avaliação da qualidade do modelo.

3.4.1 VALOR INFORMATIVO

O método do Valor Informativo (*Information Value*) é uma técnica inicialmente desenvolvida por Yin & Yan (1988 *apud* Zêzere, 2002) para avaliar a suscetibilidade de ocorrência de um escorregamento. Trata-se de um método quantitativo bivariado que apresenta a relação de pesos a cada uma das classes dos parâmetros considerados na análise de movimento de massa. Por exemplo, ângulo de inclinação das encostas, orientação das vertentes e litologia representam parâmetros que podem ser empregados na análise de escorregamentos, e entre as classes de cada um desses fatores estão faixa

de ângulos de 30° a 40°, orientação sul e itabirito, respectivamente. Esse método presume a definição anterior das unidades de terreno e a seleção dos fatores de instabilidade que serão considerados (Zêzere, 2002; Piedade, 2009). Os Valores Informativos são determinados pela seguinte equação genérica 3.1.

$$\mathbf{VI_{ij}} = \mathbf{ln}\left[\frac{\frac{S_{ij}}{N_{ij}}}{\frac{S}{N}}\right] \quad (3.1)$$

Onde: VIij – Valor Informativo de cada classe de cada parâmetro; Sij – Número de unidades de terreno que apresentam escorregamentos do parâmetro i; Nij – Número de unidade de terreno com a presença do parâmetro i; S – Número total de unidade do terreno com que apresentam escorregamentos; N – Número total de unidade de terreno na área de estudo. Exemplo: i = ângulo das encostas; orientação das vertentes; litologia; j = faixas de ângulos 20° a 30°, 30° a 40°; sul, sudeste; itabirito, xisto.

Também denominado por van Westen (1997) de *Landslide Index Method*, e posteriormente aplicado e redenominado *Statistical Index Method* (Çevik & Topal, 2003; Bui *et al.*, 2011), esse método fundamenta-se no logaritmo da razão entre a probabilidade condicionada de ocorrência de um escorregamento em uma determinada classe de um dado parâmetro ($P(S \mid N_{ij})$), e a probabilidade de ocorrência do movimento em toda a área de estudo (P(S)).

Na prática, no método analisa-se a relação entre a densidade de escorregamentos em cada classe, de cada fator de predisposição, e a densidade de escorregamentos em toda a área de estudo (van Westen, 1997; Barella, 2016). Essas relações em função das áreas ou do número de pixels que elas ocupam podem ser expressas pela equação 3.2:

$$\mathbf{VI_{ij}} = \mathbf{ln}\left[\frac{\frac{S_{ij}}{N_{ij}}}{\frac{S}{N}}\right] = \left[\frac{\frac{\text{Área}\,(S \cap N_{ij})}{\text{Área}\,(N_{ij})}}{\frac{\text{Área}\,(S)}{\text{Área}\,(N)}}\right] = \mathbf{ln}\left[\frac{P(S \mid N_{ij})}{P(S)}\right] = \mathbf{ln}\,\frac{\mathbf{Densclas}}{\mathbf{Densmap}} = \mathbf{ln}\left[\frac{\frac{N_{pix}(S_i)}{N_{pix}(N_i)}}{\frac{\sum N_{pix}(S_i)}{\sum N_{pix}(N_i)}}\right] \quad (3.2)$$

Onde: P(S | Nij) – Probabilidade condicionada de ocorrência de um escorregamento em uma determinada classe de um dado parâmetro; P(S) - Probabilidade de ocorrência do movimento em toda a área de estudo Densclas – Densidade de escorregamento em cada classe de parâmetro; Densmap – Densidade de escorregamento em todo o mapa; Npix(Si) – Número de pixels, contendo escorregamentos, em uma determinada classe de parâmetro; Npix(Ni) – Número total de pixels de uma determinada classe de parâmetro.

De acordo com Barella (2016), o método do Valor Informativo pode ser analisado como sendo uma evolução algébrica do método *Likelihood Ratio*. Com a aplicação da função logarítmica, desenvolve-se amplitude numérica, fazendo com que os valores do índice de suscetibilidade variem de -∞ a +∞, e não mais de 0 a +∞ como pelo método de *Likelihood Ratio.* Tal fato contribui para o aumento da diferenciação das classes e favorece substancialmente a categorização da suscetibilidade ao fenômeno estudado. Assim, os valores positivos indicam correlação expressiva entre a presença da classe do parâmetro e a distribuição dos escorregamentos, quanto maior for a magnitude numérica dos valores de pesos encontrados. Já os valores negativos calculados para determinadas classes assinalam que se trata um fator não decisivo no desenvolvimento de escorregamentos (Yin & Yan, 1988 *apud* Zêzere, 2002).

O Valor Informativo final para cada unidade de terreno é fornecido pela soma dos valores determinados para todos os fatores empregados na elaboração do modelo, segunda a equação 3.3.

$$\mathbf{VI} = \sum_{\mathbf{i,j=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{VI_{ij}} \tag{3.3}$$

Para Zêzere (2002), esse método permite a quantificação por análise estatística indireta da suscetibilidade a escorregamento de um modo objetivo, por meio da ponderação, mesmo em região não afetadas por movimentos. Contudo, não avalia as correlações entre os parâmetros utilizados, o segundo esse autor é uma das maiores limitações dessa técnica.

É um método amplamente difundido e empregado em trabalhos científicos pelo mundo, e conforme preconiza a Resolução do Conselho de Ministros nº 81 (Portugal, 2012) é a metodologia oficial a ser adotada na demarcação de áreas de instabilidade de encostas na Reserva Ecológica Nacional. Entre os trabalhos, que utilizam esse método para obter índices de suscetibilidade a escorregamentos, pode-se citar Zêzere (2002), Çevik & Topal (2003), Piedade (2009), Bui *et al*., (2011) e Pereira et al. (2012). Recentemente, estes princípios vêm sendo adotados por instituições brasileiras, tais como o IPT e a CPRM, na pesquisa e avaliação de suscetibilidade a movimentos de massa.

3.4.2 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A qualidade dos modelos estatísticos de suscetibilidades a deslizamento não aumenta necessariamente com a utilização de mais mapas temáticos de fatores de predisposição a movimentos de massa (Zêzere *et al*. 2005), ou seja, a adição de parâmetros pode provocar a queda da qualidade do modelo anterior. Assim, executa-se a análise de sensibilidade com o propósito de se definir o grau de influência de cada um dos fatores utilizados na elaboração dos modelos de suscetibilidade (Piedade *et al.* 2010) e selecionar as variáveis mais adequadas e que forneçam a melhor resposta ao processo de deslizamento para a área de estudo.

A análise de sensibilidade ou análise sensitiva também permite hierarquizar as variáveis com o objetivo de obter arranjos mais robustos, aprimorando o desempenho dos mapas de suscetibilidade ao otimizar a quantidade de dados empregados, o que deixa o processamento descomplicado e menos moroso (Zêzere *et al*. 2005; Piedade *et al*. 2010).

Para tal avaliação, uma das ferramentas utilizadas é a Área Abaixo da Curva (AAC), que será tratada no item 3.4.3.1. Proposta inicialmente como método de validação de modelos estatísticos de suscetibilidade, a técnica foi adaptada para a análise de sensibilidade. Os diferentes parâmetros avaliados podem apresentar taxas de sucesso distintas, dadas pelo cálculo da AAC, demostrando grau de influência desigual para cada fator condicionante. Assim, os resultados obtidos são ordenados hierarquicamente, o que possibilita confrontar a relevância relativa de cada fator de predisposição no desencadeamento de escorregamentos (Zêzere *et al*. 2005; Piedade, 2009; Piedade *et al*. 2010).

A Área Abaixo da Curva também permite a análise do desempenho da distribuição das classes de cada fator, verificando-se a adequação da classificação empregada na previsão do movimento estudado. Contudo, para se chegar a um resultado por meio dessa avaliação, é essencial que apenas um fator independente seja acrescido a cada etapa (Barella, 2016).

Inicialmente introduzidos por Greenbaum *et al*. (1995), os índices *Accountability* (Acc) e *Reliability* (Rl) também são ferramentas empregadas na análise sensitiva dos fatores de predisposição. Utilizados por Blahut *et al*. (2010) na comparação de dois inventários de movimento de massa na área central dos Alpes italianos, esse autores consideram que ambos índices, apesar de divergentes, apresentam indicações significativas quanto a preponderância dos parâmetros sobre o processo analisado. Quanto maiores os valores de Acc e Rl, maior é a influência do tema no resultado final.

O índice *Accountability* é calculado pela soma das áreas (ou número de pixels) dos escorregamentos nas classes de parâmetros com uma densidade de escorregamentos maior que a densidade de escorregamentos em toda a área de estudo, dividida pela soma das áreas (do número de pixels) de todos os deslizamentos, multiplicado por 100, como mostra a equação 3.4 (Greenbaum *et al.* 1995; Blahut *et al*. 2010). Fundamenta-se no fato de que valores de densidade maiores que a média aumentam as probabilidades de se identificar o fenômeno investigado (Greenbaum *et al*., 1995), ou seja, o objetivo é obter a frequência de escorregamentos nas classes dos fatores que demonstram maior controle sobre o evento avaliado (Barella, 2016).

$$\mathbf{Acc_i = 100}.\left[\frac{\sum_{\mathbf{j=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{Área}\left(\mathbf{S}\cap\mathbf{N_{ij}}\right)_{(\mathbf{S}>\bar{\mathbf{S}})}}{\mathbf{Área}\ (\mathbf{S})}\right] \tag{3.4}$$

Onde: $\left(S \cap N_{ij}\right)_{(S>\bar{S})}$ = área ocupada pelos escorregamentos presentes na classe j (j=1,2,...,n), do mapa de parâmetro i; S = área ocupada por todas as cicatrizes cartografadas na área de estudo.

Assim, pode-se avaliar a quantidade de feições que estão localizadas dentro das classes mais relevantes, relativamente ao total de escorregamentos mapeados. Tal coeficiente pode ser influenciado pelo tamanho da classe, assim como pelo número de classes existentes (Barella, 2016).

Considerado, de modo geral, por Greenbaum *et al*. (1995) como uma técnica mais eficaz na identificação dos fatores mais influentes no desencadeamento do processo analisado, o índice de *Reliability* é calculado pela soma das áreas (ou número de pixels) dos escorregamentos nas classes de fatores com densidade maior que a média da densidade de escorregamento em toda a área, dividido pela áreas (ou número de pixels)

da classe e multiplicado por 100 (Equação 3.5). Portanto, avalia a relação dos movimentos que ocorrem nas classes que apresentam uma densidade de escorregamentos maior que a densidade da área de estudo, o que corresponde à densidade de deslizamentos localizados nas classes mais expressivas (Greenbaum *et al*., 1995). Dessa forma, se obtém a relação da extensão ocupada pelos escorregamentos nas classes significativas, ou seja, um valor de 5% indica que 95% da área da classe estão livres do processo analisado (Barella, 2016).

$$\mathbf{Rl_i = 100}.\left[\frac{\sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{Área}\left(\mathbf{S \cap N_{ij}}\right)_{\mathbf{(S>\bar{S})}}}{\sum_{\mathbf{j=1}}^{\mathbf{n}} \mathbf{Área}\left(\mathbf{N_{ij}}\right)_{\mathbf{(S>\bar{S})}}}\right] \quad (3.5)$$

Onde: $\left(S \cap N_{ij}\right)_{(S>\bar{S})}$ = área ocupada pelos escorregamentos presentes na classe j (j=1,2,...,n), do mapa de parâmetro i; $\left(N_{ij}\right)_{(S>\bar{S})}$ = área da classe j (j=1,2,...,n), do mapa de parâmetro i.

3.4.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS ESTATÍSTICOS DE SUSCETIBILIDADE

Os modelos estatísticos de suscetibilidade a movimentos de massa devem, imprescindivelmente, passar por algum processo de validação de seus resultados. Chung & Fabbri (2003) consideram que um modelo de previsão, qualquer que seja, sem avaliação de sua capacidade preditiva, não apresenta utilidade para a sociedade ou mesmo qualquer significado científico.

De acordo com Frattini *et al*. (2010), a classificação do terreno em graus de suscetibilidade a movimento de massa apresenta implicações econômicas e sociais. Por exemplo, áreas identificadas como de alta suscetibilidade a escorregamentos terão sua ocupação restringida e sofrerão desvalorização, enquanto aquelas áreas classificadas como baixa suscetibilidade serão ocupadas sem ressalvas, e poderão se valorizar economicamente. Entretanto, as consequências podem ser maiores no caso da classificação errônea do terreno, com gastos desnecessários em investigações e contenções, ou mesmo com prejuízos materiais e perdas de vidas em área consideradas estáveis.

Para Guzzetti *et al*. (2006), a grande limitação observada em diversos trabalhos de avaliação de suscetibilidade a movimento de massa, que discorrem em detalhes sobre os

métodos utilizados, é exatamente a ausência de informação/aplicação de técnicas de validação que atestem a qualidade do modelo produzido.

Guzzetti *et al*. (2006) e Frattini *et al*. (2010) afirmam que um processo de validação e aceitação apropriado de um modelo necessita determinar a qualidade da estimativa de suscetibilidade, a qual pode ser avaliada por meio: de seu grau de adequação, conceitual e matemática, em descrever o comportamento do processo; de sua capacidade de prever escorregamentos na área de estudo; e da confiabilidade e robustez diante das variações dos dados de entrada.

A qualidade do modelo de suscetibilidade a escorregamentos pode ser avaliada fazendo uso da mesma informação do inventário de deslizamentos utilizado na elaboração do modelo, ou com o emprego de dados de movimentos independentes não considerados na sua construção (Guzzetti *et al*., 2006; Chung & Fabbri, 2003). O primeiro possibilita avaliar o grau de correspondência entre as classes de suscetibilidade e a distribuição de ocorrências de escorregamentos; o desempenho dos parâmetros na construção do modelo – análise de sensibilidade; a aptidão do modelo de lidar com as variações nos dados de entrada; e determinar o erro associado à estimativa de suscetibilidade. Já o uso de informações independentes admite a determinação da capacidade preditiva do modelo. Dessa forma, com o objetivo de apresentar um nível aceitável de qualidade de um mapa de suscetibilidade, Guzzetti *et al*. (2006) sugerem uma categorização em razão dos procedimentos de validação empregados (Tabela 3.5).

Tabela 3.5: Critérios e níveis de qualidade para os modelos de suscetibilidade a escorregamentos de acordo com os procedimentos de validação adotados (Guzzetti *et al*., 2006).

Descrição	Nível
Sem informação. Ausência de qualquer teste para determinar a qualidade e a capacidade preditiva do modelo.	0
Avaliação do grau de ajuste do modelo. Os testes são executados considerando a mesma população de escorregamentos utilizada na elaboração do modelo.	1
Avaliação do erro associado à suscetibilidade em cada unidade do terreno. Os testes são executados considerando a mesma população de escorregamentos utilizada na elaboração do modelo.	2

Avaliação da capacidade preditiva do modelo. Os testes são executados considerando uma população de escorregamentos diferente das utilizadas na elaboração do modelo.	4

Para atender aos objetivos da execução de modelos de suscetibilidade a escorregamento – ser capaz de prever futuras movimentações – uma vez que não se pode esperar por rupturas de encostas para verificar a capacidade preditiva do modelo, Chung & Fabbri (2003) sugeriram técnicas de obtenção de conjuntos de escorregamentos independentes. Para tal, limita-se a utilização das feições de escorregamentos mapeadas e particiona-se o inventário de tal forma que um conjunto é empregado na modelagem e o restante na análise da qualidade de previsão do modelo.

O primeiro método assume uma partição temporal, onde se considera uma data limite, da qual o inventário será dividido em dois períodos de tempo distintos. Assim, é possível realizar uma estimativa da probabilidade de escorregamentos futuros para um dito período de tempo, por exemplo, para os próximos 30 anos, caso esse seja a janela de anos analisada (Chung & Fabbri, 2003). Para tanto, é imperativo que se tenham um mapa de escorregamentos onde se conheçam as datas e os períodos de ocorrências dos eventos. Esse tipo de inventário não é obtido facilmente, demandando grande quantidade de informação de vários eventos, o que não é trivial e consequentemente prejudica a ampla utilização dessa técnica. Esses autores afirmam que a partição temporal é o procedimento mais adequado, natural e convincente e recomendam fortemente sua aplicação sempre que for viável.

Admitindo-se que se conhece a distribuição de movimentação em toda a área de estudo, a segunda abordagem refere-se é a partição espacial em duas subáreas, uma para a modelagem e outra para a validação, cada qual constituída de uma porção do inventário. Com a aplicação desse método é possível expandir os resultados para áreas adjacentes e também para aquelas com características geológicas e geomorfológicas semelhantes (Chung & Fabbri, 2003). Para Barella (2016), essa abordagem é bastante questionável, uma vez que pode ocorrer uma variação considerável dos resultados, em decorrência do tipo de partição realizada. Recomenda-se a divisão do território em várias subáreas,

sendo que a resposta da validação seria o menor valor obtido, comparando-se as diversas análises executadas.

A partição aleatória, a última técnica sugerida por Chung & Fabbri (2003), assume que parte dos escorregamentos inventariados ainda não ocorreu. São selecionados aleatoriamente, sendo que a sua distribuição irregular tende a cobrir toda a área de estudo. É a ferramenta mais empregada devido a sua facilidade operacional e sua analogia com a partição temporal (Barella, 2016).

Com o objetivo de analisar e comparar os resultados de estudos de previsão de escorregamentos, a partição do inventário é essencial, caso contrário o modelo será avaliado de forma ineficiente, uma vez que não será testado quanto a sua capacidade de prever movimentos, finalidade para qual ele é desenvolvido (Chung & Fabbri, 1999).

Após a obtenção de dois conjuntos de dados de escorregamentos, elegem-se os métodos de avaliação da qualidade do modelo, para mensurarem tanto a sua adequabilidade quanto sua capacidade preditiva. Entre as abordagens vastamente empregadas na validação de modelos de suscetibilidade a escorregamentos em trabalhos internacionais, podem-se citar as Tabelas de Contingência, Curvas de Sucesso e Predição, Curvas ROC e Curvas de Custo (*e.g.* Chung & Fabbri, 2003; Brenning, 2005; Beguería, 2006; Guzzetti *et al*., 2006; Frattini *et al*., 2010; Blahut *et al*., 2010).

Nesse trabalho serão aplicados as Curvas de Sucesso e Predição, uma vez que são técnicas muito inteligíveis (Frattini *et al*., 2010) e por se tratar, possivelmente dos métodos mais utilizados na validação de modelos estatísticos de suscetibilidade (Barella, 2016).

3.4.3.1 Curvas de Sucesso e Predição

Propostas por Chung & Fabbri (1999), as Curvas de Sucesso e Predição são gráficos percentuais que apresentam a classificação da suscetibilidade da área de estudo em ordem decrescente no eixo das abscissas e a distribuição acumulada da área escorregada/predita no eixo das ordenadas. Brenning (2005) faz uma correspondência

ao termo Sensibilidade, da Tabela de Contingência, se referindo ao eixo y, que é a taxa de escorregamentos corretamente classificados (Beguería, 2006; Frattini *et al*., 2010).

A distinção entre as Curvas de Sucesso e Predição consiste no subconjunto do inventário que é utilizado. Quando o gráfico utiliza informações obtidas pelo conjunto do inventário empregado na elaboração do modelo, também denominado grupo de treino, a curva será qualificada como Curva de Sucesso, a qual pode avaliar a qualidade do modelo quanto a sua adequação e robustez. O conjunto do inventário que foi particionado e não foi utilizado na produção do modelo, também chamado de grupo de teste, fornece os mesmo dados produzindo um diagrama similar, a Curva de Predição. Entretanto, essa curva irá atestar quanto à capacidade do modelo de prever movimentos futuros (Chung & Fabbri, 1999; Brenning, 2005; e Sterlacchini *et al*., 2011).

A figura 3.6 apresenta um exemplo de Curva de Sucesso/Predição. O gráfico indica qual a percentagem da área de estudo, classificado de acordo com sua suscetibilidade a escorregamento, é exigida para explicar um dado percentual de movimentos no terreno. De acordo com o exemplo da curva, 60% dos escorregamentos ocorridos podem ser explicados por 10% da área de estudo com as maiores suscetibilidades a escorregamento. Os trabalhos de Chung & Fabbri (1999) e Blahut *et al*. (2010) indicam que quanto mais íngreme for a curva, melhores são a qualidade (Curva de Sucesso) ou a capacidade preditiva (Curva de Predição) do modelo, consequentemente, quanto maior for a porcentagem de escorregamentos elucidada pela menor porcentagem da área de estudo, mais eficiente será o modelo. Quanto mais afastada, na porção superior, da curva tracejada vermelha (Figura 3.6) melhor será a qualidade do modelo. Segundo Bi & Bennett (2003), essa linha indicaria o resultado de uma previsão aleatória, e deve-se desconsiderar a validade de curvas inferiores a ela, uma vez que demonstram uma qualidade inferior ao aleatório.

A Curva de Sucesso se refere à qualidade do modelo, medindo o seu grau de ajuste, enquanto que a Curva de Predição fornece informação sobre a capacidade do modelo de prever escorregamentos que ele desconhece, validando-o para a função que deve desempenhar. Uma vez que se assume o modelo como correto, é esperado que a Curva

de Sucesso seja melhor que a Curva de predição para uma dada área qualquer (Chung & Fabbri, 2003).

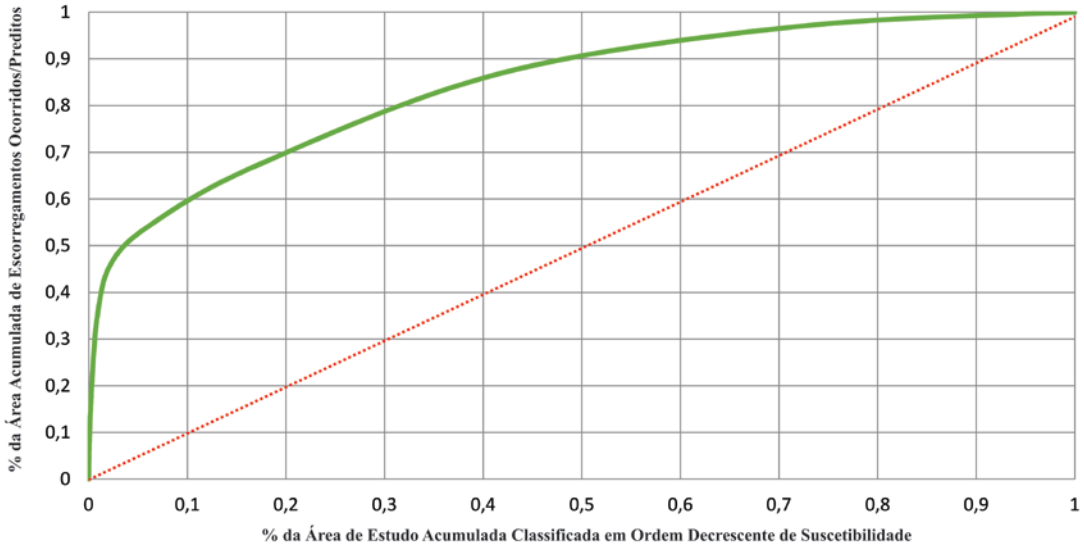

Figura 3.6: Exemplo de um gráfico de Curva de Sucesso ou de Predição (linha verde). A diferença entre as duas está na parcela do inventário de escorregamentos que é utilizada nos cálculos, na primeira consideram-se os escorregamentos ocorridos e a segunda, os escorregamentos preditos (que o modelo desconhece).

De acordo com Barella (2016), a correlação entre ambas as curvas ajuda na ratificação da qualidade das informações e dos métodos utilizados na modelagem. Quando adjacentes, pode-se assumir que os padrões espaciais entre as feições de escorregamentos presentes nos conjuntos de treino e teste foram preservados, além de se demostrar que há uma compatibilidade de características das cicatrizes e que a partição do inventário foi apropriada.

Uma das maiores restrições da aplicação das Curvas de Sucesso e Predição se refere ao fato de não incluírem uma avaliação dos custos decorrentes da classificação correta ou incorreta do terreno, além de apresentarem inconsistências teóricas e práticas quando aplicadas a modelos baseados em tamanho de pixels. Nesse caso, o número de células classificadas corretamente (verdadeiramente positivo) contribui tanto para o eixo x quanto para o eixo y, ou seja, um aumento das células verdadeiramente positivas causam mudanças nas curvas para cima (melhoria de desempenho) e para a direita do gráfico (piora de desempenho), sendo que o movimento para a direita do gráfico pode ocorrer proporcionalmente mais rápido, provocando uma perda de desempenho aparente

(Frattini *et al.*, 2010). Apesar de claramente se tratar de uma avaliação equivocada, uma vez que ele diminui a qualidade do modelo, muitas vezes, o método fornecerá uma informação de eficiência/predição inferior ao que realmente é. Dessa forma, são grandes as possibilidades de que o modelo tenham na realidade, resultados ligeiramente melhores que os calculados pelas Curvas de Sucesso e Predição.

A Área Abaixo da Curva (AAC) é um método quantitativo empregado para auxiliar na visualização da capacidade dos modelos de suscetibilidade e na comparação de diferentes gráficos (Garcia *et al.*, 2007). O cálculo dessa área é realizado pela utilização da equação 3.6, admitindo-se que uma curva é composta de inúmeros pequenos segmentos de reta. Segundo Beguería (2006), os valores podem variar entre 0 e 1, sendo que a qualidade do modelo será maior quanto mais próximo a 1 for o valor da AAC. A linha vermelha tracejada da figura 3.5 apresenta o valor de 0,5, sendo considerada como um limite a partir do qual nenhum modelo deve ser considerado (Bi & Bennett, 2003).

$$\mathbf{AAC} = \sum_{\mathbf{i=1}}^{\mathbf{n}} \left[(\mathbf{L_i} - \mathbf{L_{i+1}}) \times \frac{(\mathbf{A_i} + \mathbf{B_{i+1}})}{\mathbf{2}} \right] \quad (3.6)$$

Onde: (Li – Li+1) = Amplitude da classe do eixo das abscissas (altura do trapézio); Ai e Bi+1 = Valores do eixo das ordenadas correspondentes a Li e Li+1, respectivamente (bases do trapézio).

De acordo com Guzzetti (2005), a aplicação dos métodos de validação de um modelo de suscetibilidade não é garantia da avaliação de sua qualidade. Os valores obtidos devem ser comparados com determinados limites de aceitabilidade. Baseado em diversos trabalhos realizados na Itália, o autor propões faixas de classificação da qualidade do modelo por meio da Área Abaixo da Curva. O grau de ajuste do modelo entre 75 a 80% é considerado aceitável, sendo que entre 80 e 90% o modelo apresenta grau de ajuste muito satisfatório, e acima de 90% são valores extremamente altos de ajuste ao modelo, o que indica que o modelo tem uma correspondência muito alta com o inventário de escorregamento original. O autor afirma que nesses casos, o modelo apresenta um comportamento suspeito/duvidoso ou mesmo sem utilidade. Tal fato pode ocorrer quando os escorregamentos apresentam distribuição espacial trivial ou o número de unidades de terreno é muito pequeno com relação ao número total das classes de parâmetros utilizados na modelagem.

Os limiares das faixas dos graus de ajuste não são absolutos ou fixados e devem ser testados em outras áreas. A depender das características geomorfológicas e do grau de complexidade do local, devem ser sugeridos e adotados outros valores de aceitabilidade (Guzzetti, 2005; Guzzetti *et al*., 2006).

Blahut *et al*. (2010) afirmam que a capacidade do modelo de descrever a distribuição dos escorregamentos é maior quanto mais íngreme for a sua curva, e que isso depende da distribuição de feições do inventário utilizado. Quando uma grande parte da área de estudo está coberta por deslizamentos, é impossível se obter curvas íngremes.

Portanto, é de se esperar que quanto maior a área ocupada por feições de deslizamentos em relação à área total de estudo, menor será o valor da AAC. Assim, as adaptações aos limites sugeridos por Guzzetti (2005) também passam por essa relação, e que muitas vezes, pode classificar modelados oriundos de inventários mais completos como de qualidade inferior.

4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 LOCALIZAÇÃO

A área de estudo está inserida no município de Caeté, localizado na região central do estado de Minas Gerais. Corresponde a uma área de aproximadamente 392 km², um recorte da sobreposição da área municipal de Caeté com a área do Mapa Geológico da Folha Caeté (Baltazar *et al*., 2005), SE.23-Z-C-VI-4, na escala 1:25.000. A figura 4.1 apresenta sua localização espacial. Trata-se de um município da região metropolitana de Belo Horizonte, aproximadamente 57 km da capital. O acesso se dá pela BR-381, saída no sentido Vitória.

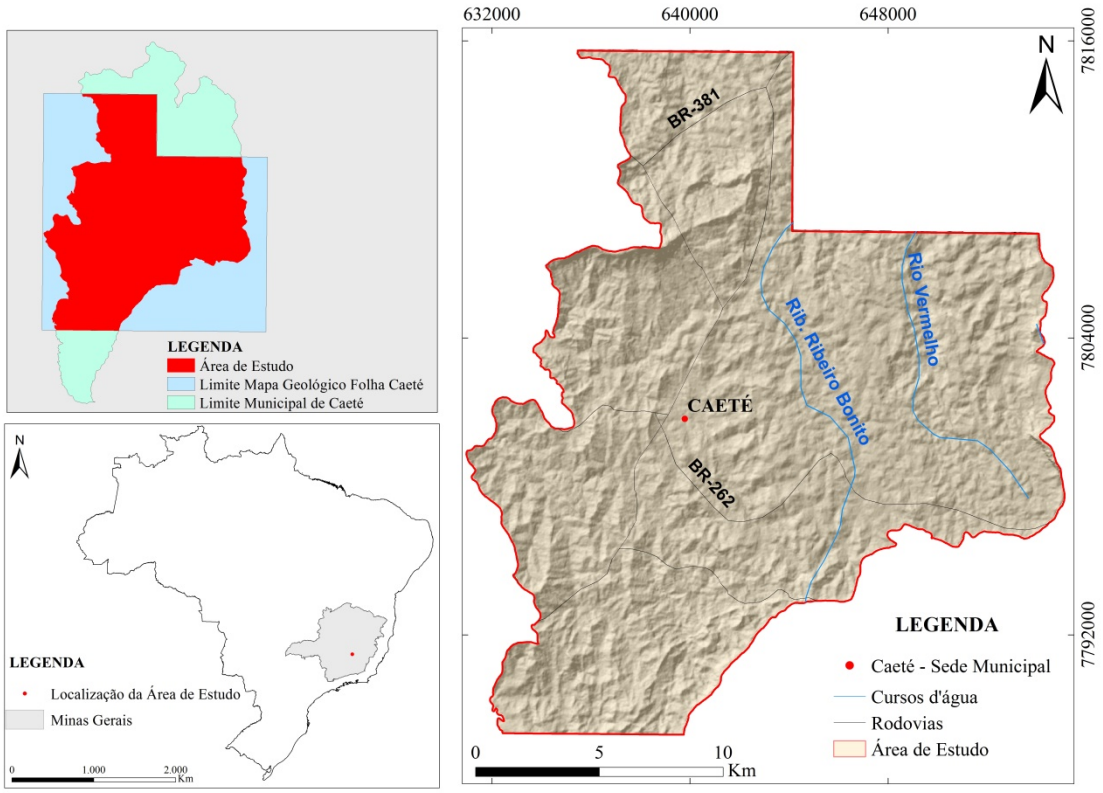

Figura 4.1: Mapa de localização da área de estudo.

4.2 GEOMORFOLOGIA

De modo geral, a área de estudo é composta de dois domínios principais: o domínio de morros e o domínio montanhoso. O primeiro se caracteriza por morros convexo-côncavo dissecados, com topos arredondados ou pontiagudos. Apresentam amplitudes que variam de 80 a 200 metros e inclinação das encostas entre 15-35º. O domínio

montanhoso distingue-se pela sua morfologia acidentada, com vertentes retilíneas a côncavas, escarpadas e de topos de cristas alinhadas, pontiagudas ou levemente arredondas. São representadas por alinhamentos serranos e maciços rochosos sem cobertura de solo ou com solo pouco espesso. Exibem amplitudes acima de 300 metros e inclinação entre 25-45º, com ocorrência de paredões rochosos subverticais (60-90º). Em ambos os domínios os processos mais frequentes são a morfogênese, erosões e de movimentos de massa. Há acúmulo de colúvio e depósito de tálus nas baixas vertentes (Machado & Silva, 2010). É notável que no domínio montanhoso predominam as rochas do Supergrupo Minas e Rio das Velhas, enquanto que o embasamento cristalino se localiza nas áreas mais baixas do domínio de morros.

A Serra da Piedade é a feição geomorfológica mais representativa da região. Seu pico está a 1746 metros de altitude. Segundo Bueno (1992), faz parte do conjunto denominado Serra do Curral, que se inicia nas proximidades do município de Itaúna, passa pela região metropolitana de Belo Horizonte e chega até o município de Caeté. Esse grande alinhamento mostra atributos similares, tais como geologia, estrutural e feições topográficas. O topo coberto por canga ferruginosa também é característica constante ao longo da Serra do Curral. Essa carapaça atua como proteção contra erosão.

4.3 CONTEXTO GEOLÓGICO

4.3.1 UNIDADES LITOLÓGICAS

A área de estudo está localizada na região norte do Quadrilátero Ferrífero, inserida no embasamento meridional do Cráton São Francisco, entidade geotectônica consolidada ao final da orogênese brasiliana – 1000-500 Ma (Alkmin & Marshak, 1998; Alkmin, 2004). Ocorrem rochas graníticas, metassedimentares e intrusivas de idades que variam de mesoarquena a mesoproterozóica, além dos depósitos de idade cenozóica, cuja relação estratigráfica é apresentada na figura 4.2.

A descrição das unidades litológicas presentes na área de estudo é baseada nos mapas geológicos e notas técnicas explicativas dos trabalhos de CPRM (2008 e 2010), Baltazar *et al*. (2005) e Lobato *et al*. (2005), sendo que a figura 4.3 apresenta o mapa litológico na escala 1:25.000 desses últimos autores.

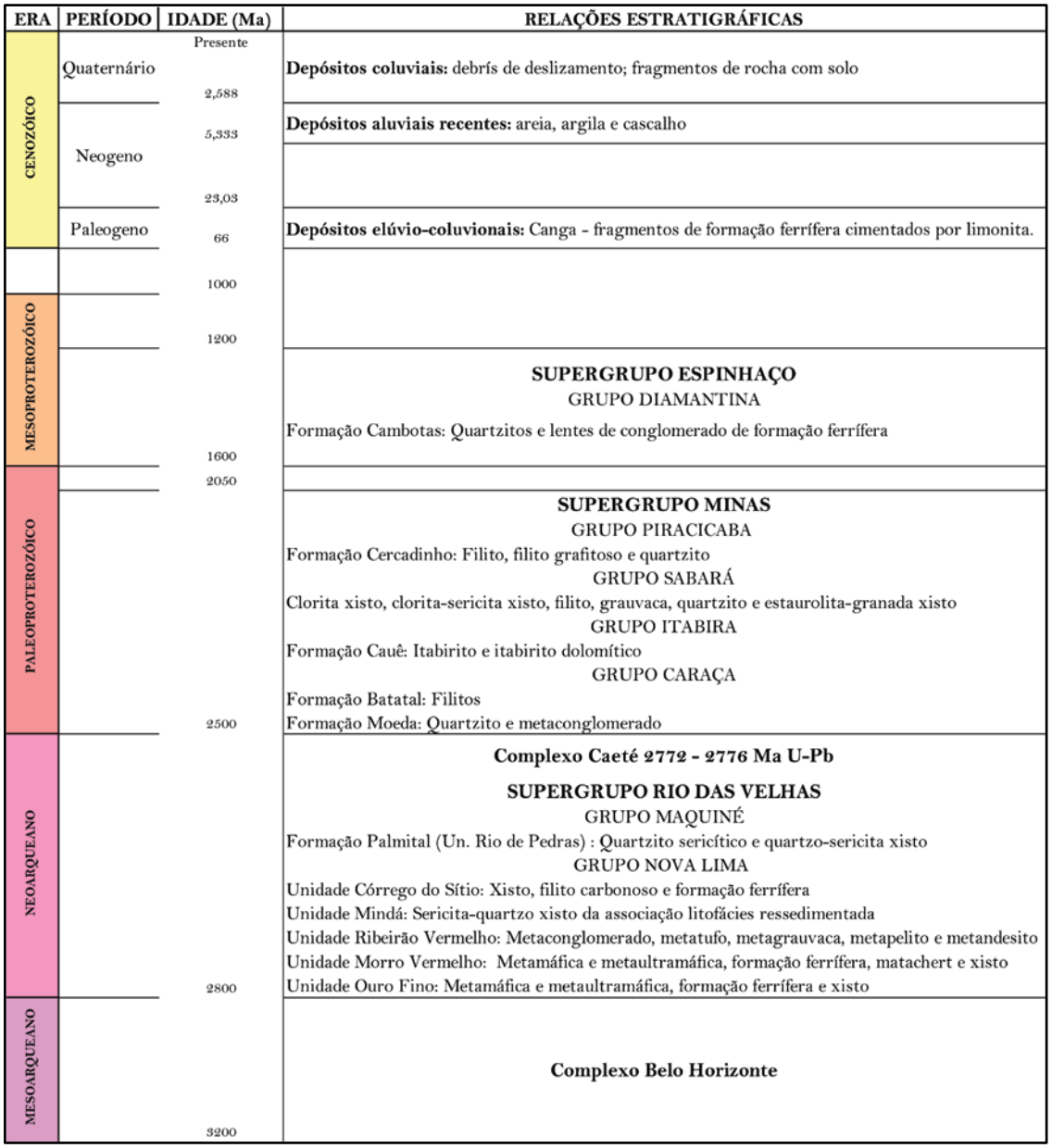

Figura 4.2: Coluna estratigráfica da área de estudo, adaptada de CPRM (2010) e Lobato *et al.* (2005).

Restrito a pequenas porções a noroeste e a leste da área de estudo, o Complexo Belo Horizonte é a unidade mais antiga e representa o embasamento cristalino das rochas da região. É constituído por rochas granito-gnáissicas migmatizadas, contento corpos granitoides intrusivos.

Dominando o oeste e sul da área de trabalho, o Supergrupo Rio das Velhas representa uma sequência de intercalação de rochas metamorfisadas de origem vulcânica, sedimentar química e sedimentar clástica, posicionada estratigraficamente acima do

Complexo Belo Horizonte. O Supergrupo é dividido nos Grupos Nova Lima e Maquiné, sendo que o primeiro predomina em extensão, com as rochas das unidades Ouro Fino e Morro Vermelho.

A unidade Ouro Fino é composta por um conjunto litológico de litofácies vulcânica máfica e ultramáfica, com ocorrência de metabasaltos, metaperidotito, matatufo básico, metavulcânica ácida, formação ferrífera, metachert e xisto carbonoso. Já a unidade Morro Vermelho corresponde à associação de rochas vulcanossedimentares químicas, com rochas metavulcânicas – metabasalto; metassedimentares epiclásticas – sericita-quartzo xisto; e formação ferrífera. Pertencentes à associação de litofácies vulcanoclásticas, as rochas da unidade Ribeirão Vermelho que ocorrem na área de estudo são metaconglomerado, metatufo, metagrauvaca, metapelito e metandesito. Nas unidades Mindá e Córrego do Sítio, inclusas na associação de litofácies ressedimentada, predominam mica-quartzo xistos e quartzo-carbonato-mica xistos, respectivamente, ambas com formação ferrífera subordinada.

O Grupo Maquiné, restrito a porção sudoeste da área de estudo, inclui rochas da Formação Palmital, a qual é constituída de quartzitos sericíticos e quartzo-sericita xistos com xisto carbonoso subordinado. Representam metaturbiditos proximais da associação de litofácies ressedimentada.

Na sequência estratigráfica, datando do final do Neoarqueano e ocupando grande parte da área norte e leste da área de estudo, encontra-se o Complexo Caeté, composto por gnaisse granítico e granodiorítico, granito foliado, biotita gnaisse e hornblenda gnaisse.

Com ocorrências restritas ao norte e sudeste da área de pesquisa, o Supergrupo Minas está subdividido em quatro grupos. O Grupo Caraça é composto por filitos cinza e prateados da Formação Batatal, e quartzitos, localmente conglomeráticos, com interestratificações de xisto e filito da Formação Moeda. Em sequência, tem-se o Grupo Itabira, constituído de itabiritos e itabiritos dolomíticos da Formação Cauê.

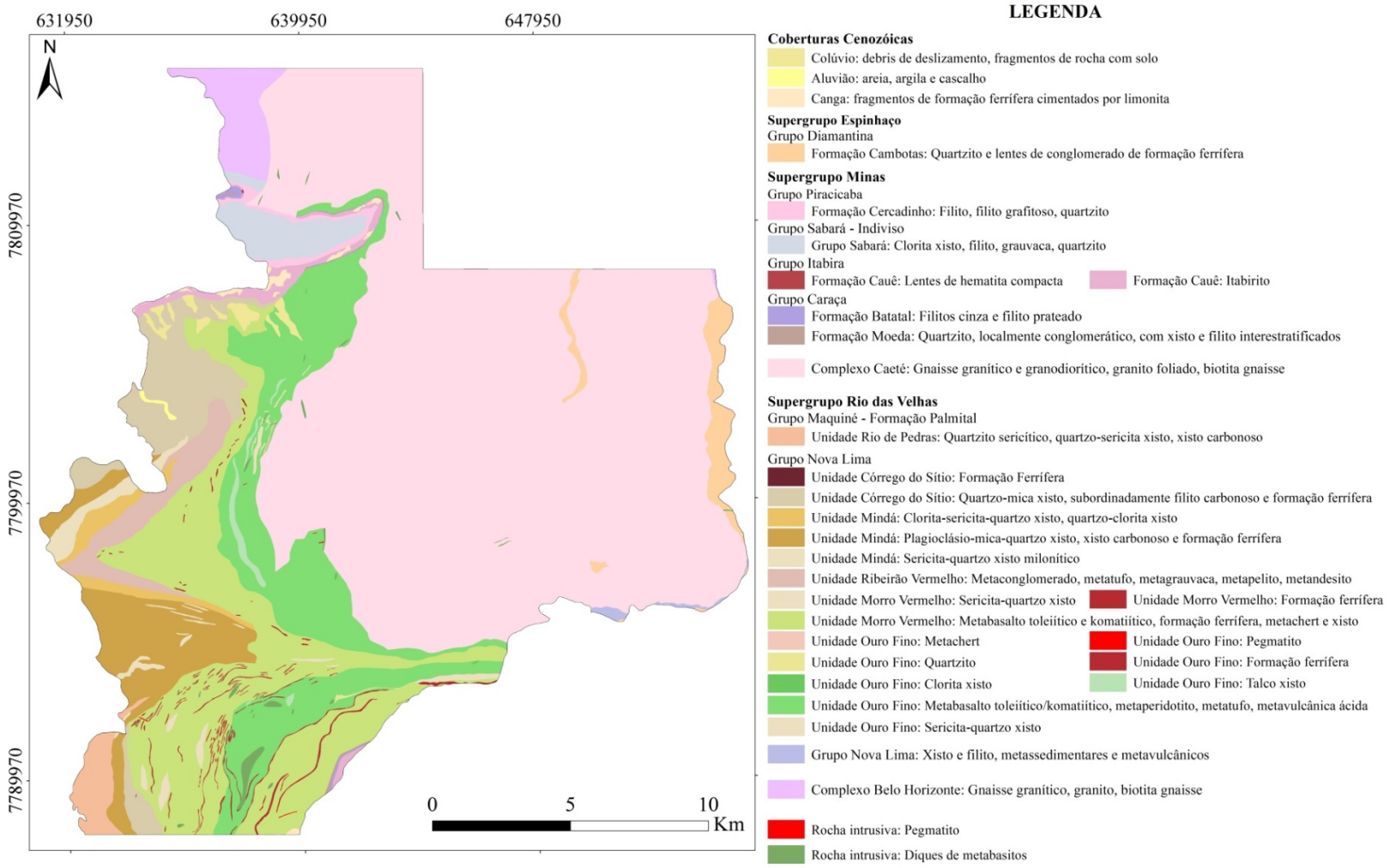

Figura 4.3: Mapa litológico da área de estudo, na escala 1:25.000, adaptado de Lobato *et al.* (2005).

Composto por clorita xisto, clorita-sericita xisto, filito, grauvaca, quartzito e estaurolita-granada xisto, o Grupo Sabará apresenta-se indiviso, estratigraficamente acima das rochas do Grupo Itabira. Em seguida têm-se as rochas da Formação Cercadinho, pertencente ao Grupo Piracicaba, com intercalações de filitos e quartzito característica dessa formação.

Por fim, as rochas da Formação Cambotas, pertencente ao Grupo Diamantina (Supergrupo Espinhaço) ocorrem em meio, e bordejando o Complexo Caeté, a leste da área de estudo. É constituída de quartzitos, com finas lentes conglomeráticas de formação ferrífera.

Caracterizados como rochas intrusivas de idade incerta, os diques de metadacito e os pegmatitos estão distribuídos principalmente na região central, de norte a sul, da área de estudo. Essas intrusões apresentam tamanhos que podem variar de poucos metros a alguns quilômetros de largura e comprimento.

Entre as unidades de idade cenozóica, têm-se os depósitos elúvio-coluviais, do período Paleógeno, constituídos de canga com capeamento limonítico, contendo fragmentos de formação ferrífera e hematita. Já as coberturas aluvias, compreendidas no período Neógeno, são constituídas por areia, argila e cascalho.

De extrema importância para o trabalho desenvolvido por essa dissertação, os depósitos coluviais, com idade entre o Pleistoceno e o Holoceno, são descritos por Baltazar *et al*. (2005) como debris de deslizamento, contendo fragmentos de rochas em meio a solo. Essa unidade atuou na validação de cicatrizes de escorregamentos identificadas durante a elaboração do inventário de movimentos de massa.

4.3.2 CONTEXTO ESTRUTURAL

Inúmeros autores discorrem sobre a evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero e seus vários eventos deformacionais. No trabalho de Baltazar & Silva (1996) descrevem-se três eventos deformacionais, de acordo com a avaliação das informações estruturais obtidas no conjunto de rochas do Supergrupo Rio das Velhas. O evento D1, com

esforços predominantemente compressional, com direção de norte para sul, que afetou unicamente a sequência Rio das Velhas e o embasamento granítico, representado na área de estudo pelo Complexo Belo Horizonte. Deste modo, apresenta idade arqueana e formou falhas de empurrão e dobras com vergências para sul e sudoeste. De idade transamazônica, o denominado evento D2, extensional, desempenhou papel na alocação de domos granito-gnáissicos, como por exemplo, o Complexo Caeté. E finalmente, o evento compressional D3, de idade brasiliana, com transporte tectônico de leste para oeste, que ocasionou dobras e falhas de direção geral norte-sul.

Conforme figura 4.4 de Baltazar & Zucchetti (2007), na área de estudo ocorrem uma dobra sinclinal invertida (Sinclinal Piedade) e falhas de empurrão de idade brasiliana, formadas no último evento tectônico desses autores (Falha das Cambotas e Sistema de Empurrão Córrego do Garimpo). O Sinclinal Piedade é uma estrutura formada durante o evento compressional que afetou as rochas do Supergrupo Minas. A falha das Cambotas juntamente com a falha de Fundão formam uma zona de cisalhamento de empurrão, de direção geral norte-sul, com orientação do transporte tectônico de leste para oeste. O Sistema de Empurrão Córrego do Garimpo são falhas de empurrão integradas com dobramentos, de direção geral norte-sul e vergência para oeste. Afetam a sequência de rochas quartzíticas da Formação Cambotas e os granitos do Complexo Caeté (Crocco-Rodrigues *et al*., 1989 *in* Baltazar *et al*., 2005).

Devido aos eventos deformacionais aos quais foram expostas, as rochas de toda a área de estudo apresentam-se com foliação, xistosidade e/ou bandamento bem marcados. Também por esse motivo, essas estruturas exibem direção bastante variável. Essas descontinuidades desempenham papel crucial dentre as características que definem a ocorrência de escorregamentos em rochas ou mesmo em solo residuais com estruturas reliquiares da rocha mãe.

Segundo as informações das estruturas das rochas – acamamento e foliação – contidas no mapa da Folha Caeté (Lobato *et al*., 2005), estas estão contidas entre as direções N-S e E-W, sendo que a direção ENE-WSW predominam sobre as demais (Figura 4.5). Exibem ângulos de mergulho que variam de sub-horizontal a vertical, prevalecendo valores entre 30° e 40°, sendo que essas estruturas apresentam sentido geral e ângulo de

mergulho no valor de 163/35 (Figura 4.6). Referente às fraturas, os poucos dados existentes, exibem uma variabilidade muito grande, apresentando uma concentração ligeiramente maior na direção NW-SE (Figura 4.7).

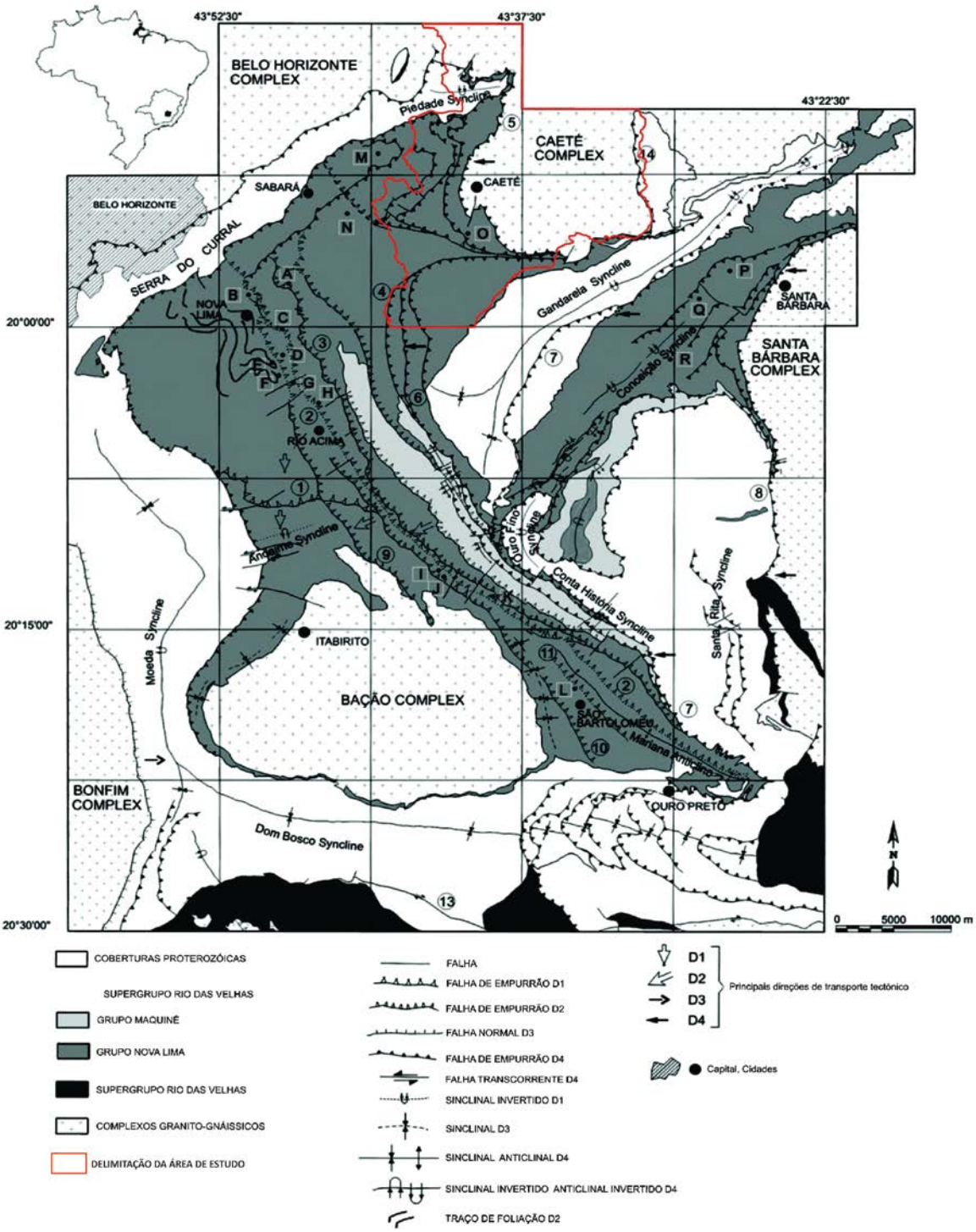

Figura 4.4: Contexto estrutural da área de estudo (em vermelho) inserida na região do Quadrilátero Ferrífero, modificado de Baltazar & Zucchetti (2007).

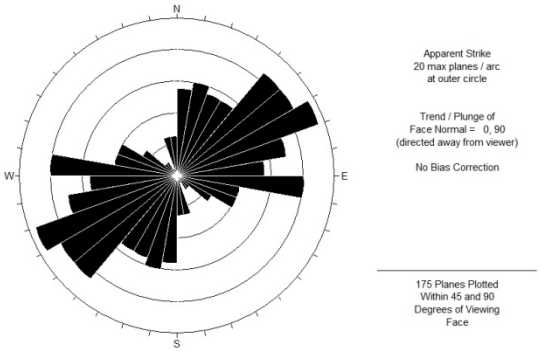

Figura 4.5: Diagrama de rosetas, mostrando as direções do acamamento e foliação das rochas na área de estudo, sendo que a direção predominante é ENE-WSW.

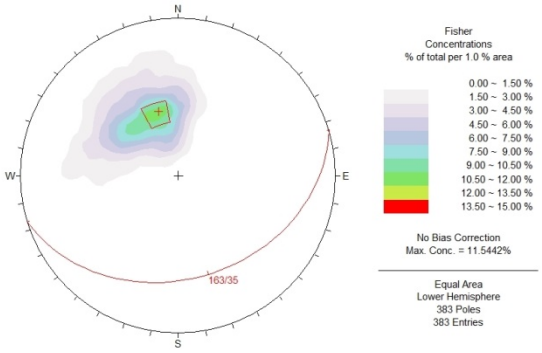

Figura 4.6: Estereograma com a concentração das medidas de acamamento e foliação, com a medida geral 163/35.

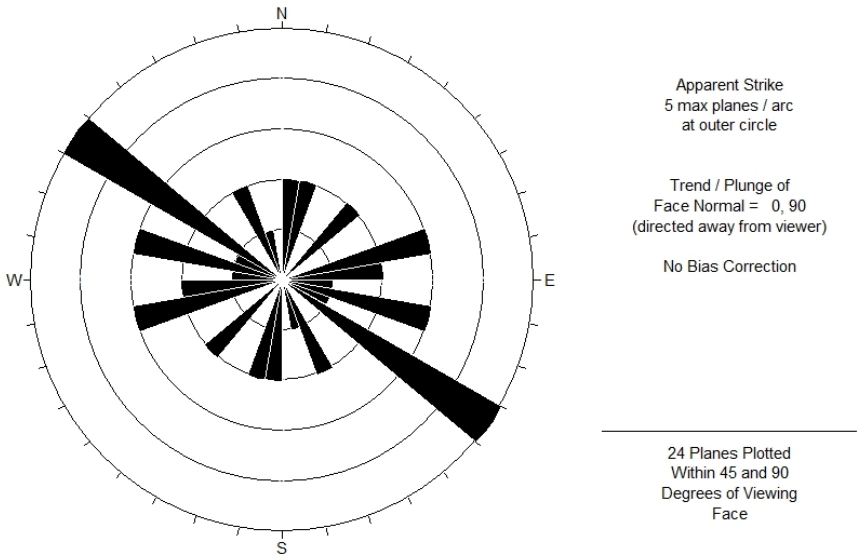

Figura 4.7: Diagrama de rosetas exibindo a distribuição das direções das fraturas na área de estudo.

4.4 CLIMA

O clima de grande parte do município pode ser definido com tropical semiúmido, dependente da altitude, caracterizado por verões úmidos e invernos secos (Bueno, 1992). O período chuvoso vai de outubro e março, com picos médios de até 300 mm de chuva, entre os meses de dezembro e janeiro, quando se precipita cerca da metade da pluviosidade total anual. O período seco está compreendido entre os meses de abril e setembro (INMET, s.d.). A figura 4.8 mostra o mapa de isoietas anuais média para a

área de estudo. A pluviosidade média anual varia entre 1580 a 1440 mm (Pinto *et al*., 2011), sendo que as maiores concentrações de chuva se encontram nas porções oeste e sul da área da interesse.

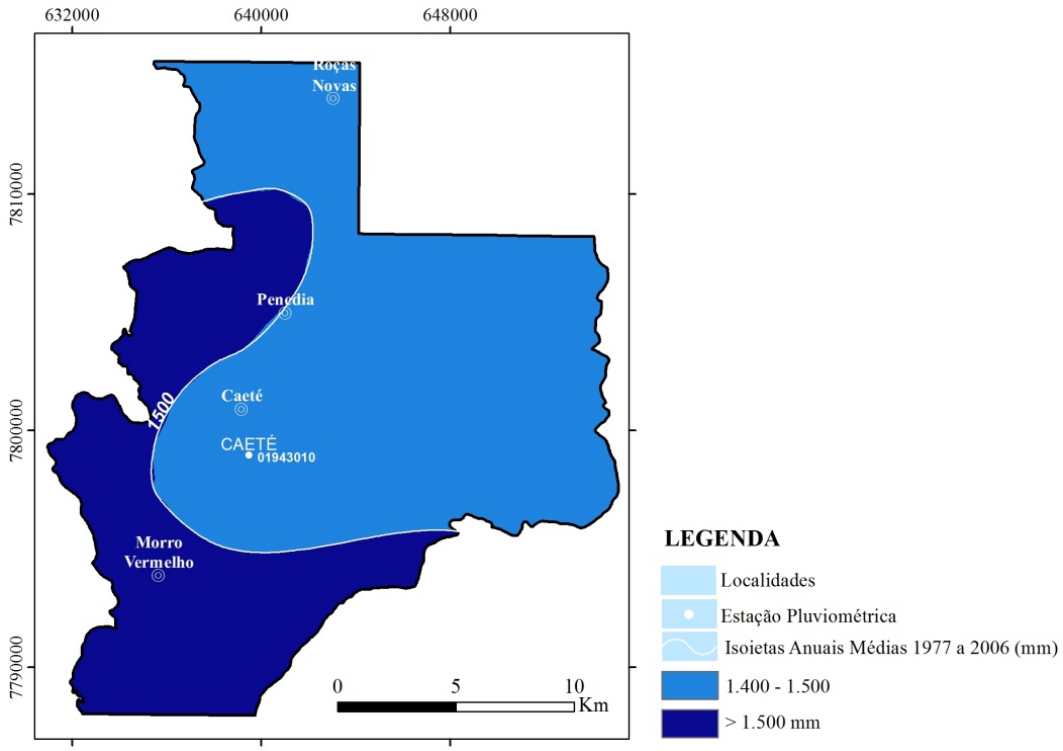

Figura 4.8: Mapa de isoietas anuais médias – 1977 a 2006. Adaptado de Pinto *et al*. 2011.

Segundo Bueno (1992), a cadeia montanhosa, constituída pela Serra da Piedade, que apresenta direção geral leste-oeste atua como um anteparo em relação a trajetória habitual das frentes polares provenientes do sul, o que acarreta a subida das massas de ar, que ao entrarem em contato com as camadas superiores da atmosfera, mais frias, provocam precipitações leves e de curta duração. Essa condição pode ocorrer em qualquer época do ano, sendo mais frequentes no inverno. São chuvas peculiares de regiões montanhosas, denominadas chuvas orogênicas. Já as chuvas de verão caracterizam-se por serem de alta intensidade e de curta duração. Entretanto, os períodos chuvosos podem durar vários dias, no caso de uma frente polar atingir a região, característica típica das chuvas de verão na região sudeste do Brasil.

As temperaturas médias anuais giraram por volta de 20ºC nas partes menos elevadas do município, não sendo inferiores a 12ºC. A incidência de radiação solar é 2400 horas anuais. A região da Serra da Piedade, localizada na porção norte do município apresenta

características de clima subtropical de altitude, com temperaturas médias inferiores a 18ºC nos meses mais frios, e a 22º C nos meses mais quentes. Durante as noites mais frias de inverno a temperatura absoluta pode chegar próxima a OºC (Bueno, 1992).

4.5 SOLOS

A área de estudo é composta basicamente por solos bem desenvolvidos – podzólicos – na área composta pelos terrenos granítico-gnáissicos, e por solos pouco desenvolvidos – cambissolo e cambissolo ferrífero – com predomínio de horizontes com rocha alterada nas demais porções da área (Machado & Silva, 2010). Também são distinguidas porções classificadas como afloramentos rochosos, identificados a leste da área, nas escarpas dos quartzitos da Formação Cambotas e solos litólicos nas regiões serranas ao sul e da Serra da Piedade (Figura 4.9).

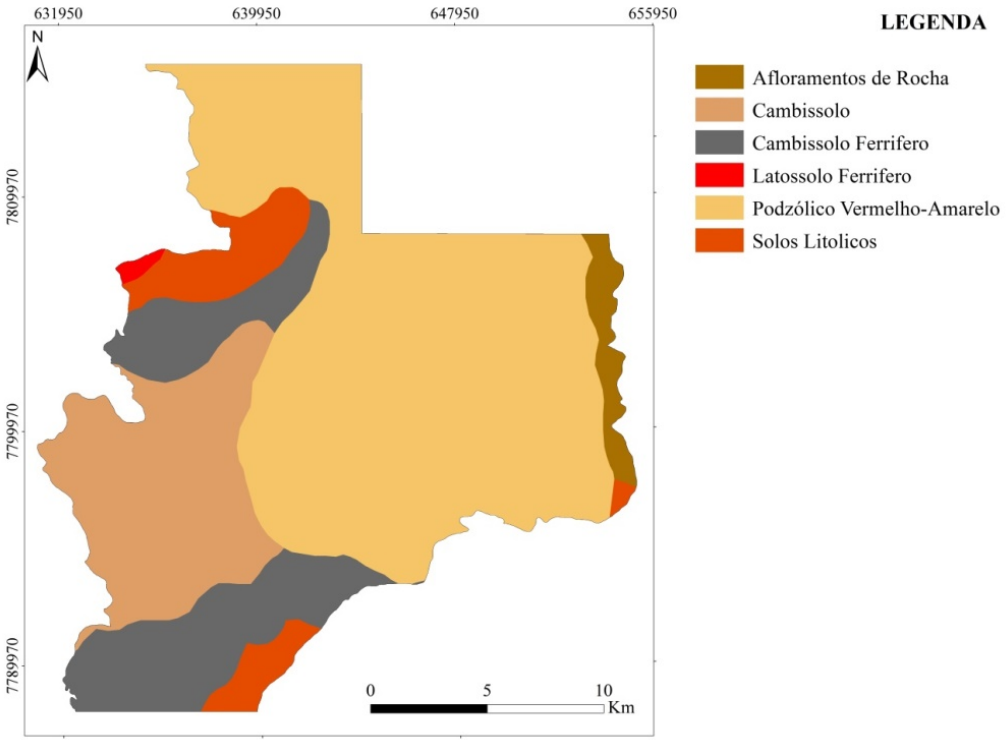

Figura 4.9: Mapa de solos da área de estudo, retirado e adaptado de Machado & Silva (2010).

4.6 USO E OCUPAÇÃO/VEGETAÇÃO

O município de Caeté está inserido nos biomas Cerrado e Mata Atlântica, sendo que a vegetação local original se diferencia conforme a altitude, podendo ser delimitadas três

tipos principais: campos rupestres, característicos dos topos das serras, associados às crostas lateríticas; ambiente de transição de médias altitudes, distinguidas por florestas de candeias; e o ambiente florestal de áreas deprimidas (Braga & Grandi, 1992). A vegetação nativa ainda está preservada principalmente no topo de morros e serras, e como mata ciliar das drenagens. A zona rural é ocupada, majoritariamente, por áreas de pastagem e plantações de eucaliptos. Também existem pequenas áreas de cultivo de hortaliças e árvores frutíferas.

Pouco mais de 3% da área de estudo está ocupada pela área urbana da sede municipal e dos distritos de Morro Vermelho, Penedia e Roças Novas, além de condomínios residenciais. As porções sul e sudeste possuem duas áreas ocupadas por estruturas da mineração de ferro – cavas, pilhas de estéril, áreas de beneficiamento (Figura 4.10).

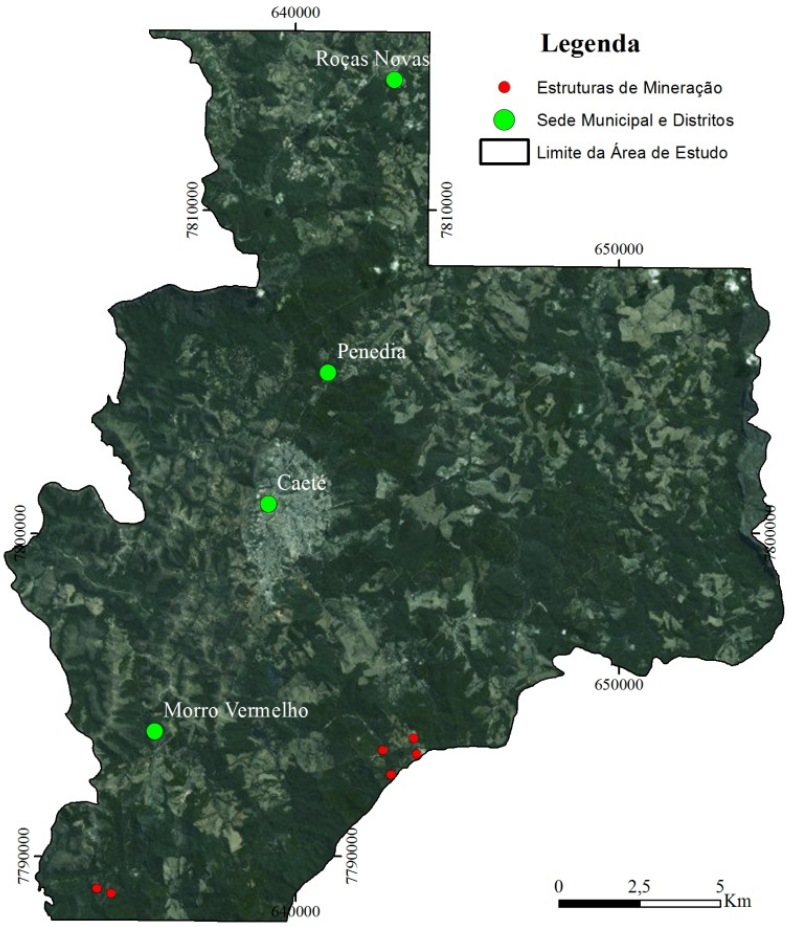

Figura 4.10: Localização das áreas urbanas e estrutura de mineração.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realizar a avaliação da influência das diferentes escalas do mapa geológico no mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos, esse trabalho foi executado segundo as etapas apresentadas no fluxograma da figura 5.1.

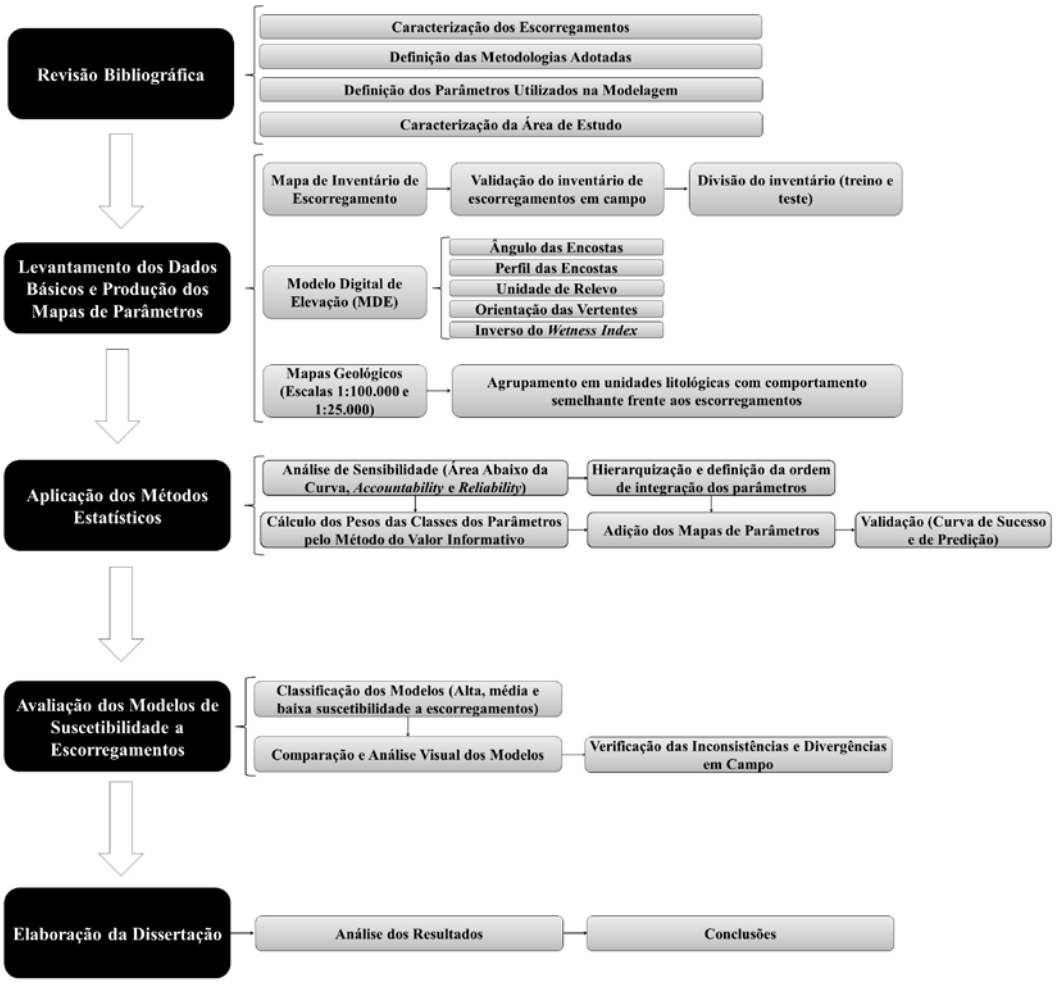

Figura 5.1: Etapas para a avaliação da influência das diferentes escalas do mapa geológico no mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos.

Como forma de organizar a execução do trabalho, este foi dividido em cinco etapas principais: (*i*) compilação de dados existentes, por meio da revisão bibliográfica dos aspectos que envolvem a temática, definição dos parâmetros e dos métodos para elaboração e validação dos modelos de suscetibilidade a escorregamento e caracterização da área de estudo; (*ii*) levantamento dos dados básicos necessários para

gerar os produtos derivados e seus mapas de classe (*e.g.* ângulo das encostas, perfil das encostas e orientação das vertentes) e produção do mapa de inventário de cicatrizes de escorregamentos; (*iii*) aplicação das metodologias estatísticas de elaboração e validação de modelos de suscetibilidade a escorregamentos, aplicando-se as diferentes escalas do parâmetro litologia; (*iv*) avaliação dos modelos de suscetibilidade a escorregamentos produzidos por meio da comparação entre eles com verificação de campo; (*v*) e, por fim, a análise dos resultados e elaboração da dissertação.

A revisão bibliográfica foi etapa fundamental para subsidiar todas as demais, principalmente para se conhecer e definir os métodos que serão adotados, suas aplicações e limitações. Os temas estudados foram apresentados no capítulo 2.

5.1 PRODUÇÃO DOS MAPAS DE PARÂMETROS

O estudo das referências bibliográficas (Soeters & van Westen, 1996; Mantovani *et al*., 1996; Guzzeti, 2005; Zêzere *et al*., 2005; van Westen *et al*., 2008; Piedade, 2009; Piedade *et al*., 2010; Chowdhury *et al*., 2012; Barella, 2016) permitiu selecionar os parâmetros utilizados na elaboração dos modelos de suscetibilidade a escorregamentos, que são eles: ângulo das encostas (inclinação), orientação das vertentes, perfil das encostas (curvatura – transversal e longitudinal), unidades de relevo, inverso do *Wetness Index* e unidades litológicas.

Como o objetivo do trabalho não é obter o modelo ideal para a área de estudo, e sim comparar os efeitos da escala do mapa geológico nos modelos de suscetibilidade a escorregamento, em função dos demais parâmetros com boa relação de custo-benefício de obtenção, alguns fatores amplamente adotados, tal como o uso e ocupação do solo, não foi utilizado. Apesar da notória influência desse parâmetro nos processos que desencadeiam movimentos de massa, optou-se por não empregar este fator, uma vez que o inventário de escorregamentos elaborado para a área inclui movimentos muito antigos, com idade estimada de centenas a milhares de anos. Confrontar essa fonte de informação com um mapa de uso e ocupação do solo atual, certamente implicaria em equívocos na avaliação das classes relevantes a ocorrência de deslizamentos.

A unidade de terreno adotada para a elaboração dos cartogramas utilizados na modelagem computacional foi o *pixel* com 5 metros de resolução. Assim, a menor unidade cartográfica de análise, adequada a individualização de informações equivale a uma célula quadrática de 25 m² de área. Isso facilita o processo de aquisição das informações, individualizando-as no interior da área das feições de escorregamentos.

Utilizado como dado básico para a obtenção de todos os parâmetros citados acima, o MDE empregado foi obtido pelo *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global*, um radar interferométrico, cujas informações estão disponibilizadas gratuitamente no *site Earth Explorer* do *United States Geological Survey* (USGS). Esse radar registrou imagens do globo terrestre entre os dias 11 e 20 de fevereiro do ano 2000 e apresenta resolução espacial horizontal de 30 metros (1 segundo de arco) e precisão vertical de 16 metros (USGS, 2016). A resolução espacial horizontal fornece modelos em uma escala de 1:60.000 (Brasil, 1984). As especificações originais da imagem são apresentadas na tabela 5.1.

Tabela 5.1: Especificações do Modelo Digital de Elevação utilizado para obtenção dos dados empregados no modelo de suscetibilidade a escorregamento.

Especificações da Imagem	
Projeção	Geográfica
Datum Horizontal	WGS84
Datum Vertical	Elipsóide EGM96 (Earth Gravitational Model 1996)
Unidade Vertical	Metros
Resolução Espacial	1 segundo de arco para cobertura global (~30 metros)
Tamanho do Raster	Malha de 1 grau
Comprimento da onda C	5,6 cm

Os parâmetros morfométricos do relevo, tais como ângulo e perfil das encostas e orientação das vertentes, foram derivados por meio da aplicação de ferramentas do programa ArcMap 10.2, do pacote ArcGIS da empresa ESRI, sobre o Modelo Digital de Elevação (MDE). Essas ferramentas, nessa versão do programa, se encontram em *3D Analyst Tools, Raster Surface*, respectivamente, *Slope, Curvature* e *Aspect*.

A classificação do cartograma de ângulo das encostas se deu por meio da avaliação do valor da Área Abaixo da Curva para três subdivisões entre os ângulos das encostas. A classificação escolhida foi de 5° em 5°, sendo que os valores entre 65° e 77° foram

agrupados em uma só classe, uma vez que não foram observadas ocorrências de deslizamentos nessa faixa de inclinação das encostas. Os resultados da análise da AAC para a classificação do mapa de ângulo das encostas são apresentados no item 6.3.

A classificação do mapa de orientação das vertentes foi realizada em função de faixas de azimutes, com amplitude 22,5°, representando os quatro sentidos geográficos fundamentais e seus intermediários. Também ocorre a classe que corresponde às porções planas do relevo, ou seja, onde não há encostas com nenhum sentido do seu máximo declive. Esses locais apresentam valor do *pixel* negativo (-1). Assim, esse parâmetro apresenta 9 classes, conforme os dados apresentados na tabela 5.2.

Tabela 5.2: Classificação do parâmetro orientação das vertentes em função de amplitudes de azimutes.

Amplitude do Azimute (°)	Classe de Orientação das Vertentes
337,5 – 22,5	Norte - 0°/360°
22,5 – 67,5	Nordeste - 45°
67,5 – 112,5	Leste - 90°
112,5 – 157,5	Sudeste - 135°
157,5 – 202,5	Sul - 180°
202,5 – 247,5	Sudoeste - 225°
247,5 – 292,5	Oeste - 270°
292,5 – 337,5	Noroeste - 315°
-1	Plano

O perfil das vertentes, referido como curvatura da encosta, foi preparado em função das formas de relevo descritas no trabalho de Dikau (1990), combinando-se o que o autor denomina de curvatura vertical ou longitudinal e curvatura horizontal ou transversal. Ambos os tipos de perfil das encostas podem assumir formas côncavas, convexas e lineares, resultando em 9 classes morfológicas (Figura 5.2). A combinação desses dois tipos de curvatura permite a compreensão mais precisa a respeito do fluxo da água em superfície (Kimerling *et al.*, 2011), ou seja, essa característica do relevo fornece informações quanto ao movimento da água em superfície e ao teor de umidade dos solos, fatores que influenciam na ocorrência de processos geodinâmicos de movimentos de massa.

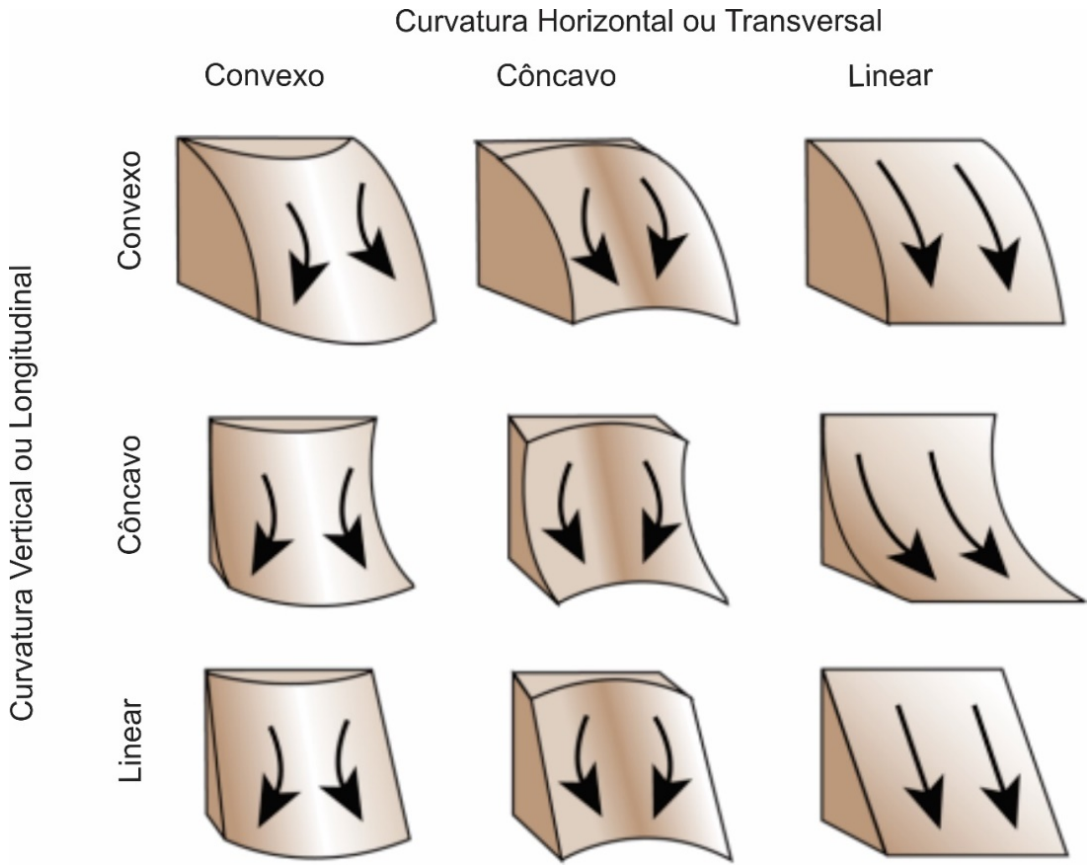

Figura 5.2: Combinações entre curvatura vertical (longitudinal) e horizontal (transversal) para determinação das diferentes formas do terreno. Modificado de Dikau (1990) e Kimerling *et al.* (2011).

De acordo com Kimerling *et al*. (2011), o perfil longitudinal mede a forma na direção paralela ao máximo declive da encosta, ou seja, perpendicular às curvas de nível. Essa geometria controla a velocidade de escoamento na superfície, e consequentemente o potencial erosivo do fluxo de água. Valores negativos indicam que a superfície, naquele ponto (*pixel*) é convexa, enquanto valores positivos constituem elementos côncavos na face do terreno. Os valores nulos representam uma superfície linear.

Por outro lado, o perfil transversal diz respeito à forma da vertente perpendicular a direção de máximo declive, paralela às curvas de nível. Sua configuração refere-se à convergência ou divergência do fluxo de água, em outras palavras, a concentração ou dissipação da água no terreno (Kimerling *et al*., 2011). Os valores negativos indicam que as células são côncavas e os valores positivos, a convexidade da superfície naquele ponto (*pixel*).

Ao contrário dos demais parâmetros, que foram gerados a partir do MDE com resolução espacial de 5 metros, o mapa de perfil das encostas foi inicialmente produzido com o mesmo MDE, mas agora com o *pixel* de 50 metros, posteriormente reamostrados para 5 metros para extrair as informações para o cálculo do Valor Informativo. Apesar da perda de resolução, dessa maneira os resultados da curvatura retratam a forma das encostas de maneira mais perceptível. Isso ocorre em decorrência de que resoluções espaciais menores produzem uma percepção visual mais nítida ao usuário (Pereira, 2009).

As unidades de relevo foram elaboradas a partir da relação das características da inclinação das encostas e amplitude, baseando-se nos padrões de relevo propostos por IPT (1981) e IPT/CPRM (2014), adaptando-se os limiares de inclinação e amplitude, de forma a melhor representar o relevo da região (Tabela 5.3).

Tabela 5.3: Critérios adotados na classificação das unidades de relevo. Adaptado de IPT (1981) e IPT/CPRM (2014).

Unidades de Padrão de Relevo	Inclinação (°)	Amplitude (m)
Colina	< 20	< 50
Morro com vertente suavizada	< 20	> 50
Morrote Baixo	> 20	< 50
Morro Baixo	> 20	50 - 90
Morro Alto	> 20	90 - 300
Serra/Relevo Montanhoso	> 20	> 300

Para a definição das áreas das unidades de relevo utilizou-se do artifício da delimitação de sub-bacias hidrográficas, contudo com o emprego do Modelo Digital de Elevação invertido, obtendo-se assim os limites territoriais com as características descritas na tabela acima. As regiões de planícies aluviais, por exemplo, não foram distinguidas e estão generalizadas dentro de outros domínios em função da escala de trabalho e dos objetivos da modelagem. Durante as campanhas de campo, foi possível fazer o reconhecimento geral da geomorfologia da região, e validar os resultados obtidos identificando as áreas com predomínio de determinados padrões de relevo (Figuras 5.3 a 5.8).

Figura 5.3: Vista da unidade de relevo colina, localizada na porção nordeste na área de estudo, onde predominam relevos suaves. Coordenadas UTM 648519 mE / 7805175 mS, fuso 23K.

Figura 5.4: Região com predomínio de colinas e morrotes. Coordenada UTM 643716 mE / 7806572 mS, fuso 23K.

Figura 5.5: Vista da região de domínio da unidade de relevo morros altos, localizada na porção norte na área de estudo. Coordenadas UTM 641201 mE / 7814654 mS, fuso 23K.

Figura 5.6: Vista da região de domínio da unidade de relevo morros altos, localizada na porção sudoeste na área de estudo. Coordenadas UTM 638238 mE / 7796301 mS, fuso 23K.

Figura 5.7: Vista da Serra das Cambotas, região escarpada com paredões de quartzitos. Coordenadas UTM 653044 mE / 7799179 mS, fuso 23K.

Figura 5.8: Vista da Serra da Piedade. Coordenadas UTM 636491 mE / 7803923 mS, fuso 23K.

O índice topográfico, ou índice topográfico de umidade (*Topographic Wetness Index - TWI*) é um parâmetro hidrogeomorfológico proposto por Beven & Kirkby (1979). Reflete as influências do relevo na distribuição espacial e extensão das áreas com maior umidade potencial em uma bacia hidrográfica, ou seja, onde ocorre concentração de água no solo. Trata-se de uma variável morfométrica que distingue matematicamente as feições de relevo e é obtido por meio do Modelo Digital de Elevação (Bressiani, 2016). É dado pela equação algébrica 5.1, que relaciona área de contribuição específica da bacia (a) com o ângulo de inclinação local da encosta (b).

$$\mathbf{TWI} = \mathbf{ln}\left(\frac{\mathbf{a}}{\mathbf{tan\ b}}\right) \tag{5.1}$$

Esse índice apresenta erros matemáticos, pela impossibilidade de divisão, em área planas, com inclinação igual a zero e para evitar essa limitação, utiliza-se a equação 5.2 inverso do *Wetness Index* (Barella, 2016). A ferramenta que calcula esse índice está disponível na ferramenta TauDEM – *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models* (Tarboton, 2016), disponível para o ambiente SIG do ArcGIS.

$$\mathbf{IWI} = \mathbf{ln}\left(\frac{\mathbf{tan\ b}}{\mathbf{a}}\right) \tag{5.2}$$

5.1.1 CLASSIFICAÇÃO DAS UNIDADES LITOLÓGICAS

Os mapas geológicos disponíveis para a área de estudo foram obtidos do banco de dados da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) – na escala de 1:100.000 – e da Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais (CODEMIG) – na escala de 1:25.000. Não foram encontradas escalas de maior detalhe que contemplasse toda a área de estudo.

A classificação desses mapas é baseada nas características litoestratigráficas das rochas, e obviamente não leva em consideração os aspectos geotécnicos dos litotipos. O trabalho de Parizzi *et al*. (2010) propõe um agrupamento das unidade litológicas da Região Metropolitana de Belo Horizonte em unidades geotécnicas para fins de uso e ocupação do território urbano. Este trabalho foi utilizado como uma referência para classificar as unidades litológicas da área de estudo, uma vez que ele analisa as mesmas unidades litoestratigráficas presentes na área e por agrupar estas unidades com bases em

suas características relacionadas a diversos fatores da ocupação humana, entre eles o comportamento das rochas frente aos escorregamentos.

Primeiramente, utilizaram-se as unidades geotécnicas de Parizzi *et al*. (2010) para agrupar as unidades litoestratigráficas do mapa geológico na escala 1:25.000, uma vez que continha mais unidades que o mapa na escala 1:100.000. As unidades litoestratigráficas que não apareciam no referido trabalho foram inseridas nas unidades que continham litotipos similares, ou foram individualizados. Por exemplo, lentes de pegmatito e metachert estão delimitadas na Folha Caeté (Lobato *et al*., 2005), e não aparecem nas unidades geotécnicas descritas, portanto se tornaram um agrupamento único e distinto dos demais.

Por fim, optou-se por realizar uma divisão de alguns agrupamentos com o intuito de: avaliar possíveis diferenças quanto ao comportamento a escorregamento de determinado litotipo em função da escala, como por exemplo, manter filitos e xistos em unidade diferentes, apesar de apresentarem comportamento geotécnico bastante similar; individualizar a formação ferrífera, uma vez que na escala de 1:25.000 essas lentes apresentam-se bem delimitadas; e separar os quartzitos dos metaconglomerados, metatufos e metagrauvacas devido as características desses litotipos na região de Caeté. As tabelas 5.4 e 5.5 mostram o agrupamento das unidades litoestratigráficas em unidades litológicas com comportamento semelhante frente aos escorregamentos, paras as escalas de 1:25.000 e 1:100.000, respectivamente.

Tabela 5.4: Relação das unidades litológicas presentes na Folha Caeté, na escala de 1:25.000, e os agrupamentos das unidades litológicas adotadas.

Unidade Litoestratigráfica	Litologias Principais	Unidade Geotécnica (Parizzi *et al*., 2010)	Agrupamento das Unidades Litológicas
Complexo Caeté	Gnaisse granítico	1	**1**
Complexo Belo Horizonte	Gnaisse granítico	1	
Formação Cercadinho - Gr. Piracicaba	Filito, Filito grafitoso	4	**2**
Formação Batatal - Gr. Caraça	Filitos	4	

Grupo Sabará	Clorita xisto, Clorita-sericita xisto	4	**3**
Gr. Nova Lima - Un. Ouro Fino	Talco xisto, Clorita xisto, Sericita-quartzo xisto	4	
Gr. Nova Lima - Un. Morro Vermelho	Sericita-quartzo xisto	4	
Gr. Nova Lima - Un. Mindá	Sericita-quartzo xisto milonítico, Clorita-sericita-quartzo xisto	4	
Gr. Nova Lima - Un. Córrego do Sítio	Quartzo-carbonato-mica xisto, Quartzo-mica xisto	4	
Formação Cauê - Gr. Itabira	Itabirito	3	**4**
Formação Cambotas - Sg. Espinhaço	Quartzito, Quartzito sericítico	6	**5**
Formação Moeda - Gr. Caraça	Quartzito	6	
Formação Palmital - Gr. Maquiné	Quartzito sericítico, Quartzo-sericita xisto	6	
Gr. Nova Lima - Un. Ouro Fino	Quartzito	6	
Gr. Nova Lima - Un. Ribeirão Vermelho	Metaconglomerado, metatufos, metagrauvacas	6	**6**
Gr. Nova Lima - Un. Ouro Fino	Metabasalto toleiítico e komatiítico, Metaperidotito, Metatufo	7	**7**
Gr. Nova Lima - Un. Morro Vermelho	Metabasalto toleiítico e komatiítico	7	
Rocha intrusiva	Dique de metadacito	-	
Gr. Nova Lima - Un. Ouro Fino	Formação Ferrífera	4	**8**
Gr. Nova Lima - Un. Morro Vermelho	Formação Ferrífera	4	
Gr. Nova Lima - Un. Córrego do Sítio	Formação Ferrífera	4	
Formação Cauê - Gr. Itabira	Hematita compacta	-	**9**

Depósitos coluviais	Debris de deslizamento, fragmentos de rocha com solo	8	**10**
Depósitos Elúvio-coluviais	Canga: fragmentos de formação ferrífera cimentados por limonita	8	**11**
Depósitos aluviais recentes	Areia, argila e cascalho	8	**12**
Rocha intrusiva	Pegmatito	-	**13**
Gr. Nova Lima - Un. Ouro Fino	Pegmatito	-	
Gr. Nova Lima - Un. Ouro Fino	Metachert	-	

Tabela 5.5: Relação das unidades litológicas presentes na Folha Belo Horizonte, na escala de 1:100.000, e os agrupamentos das unidades litológicas adotadas.

Unidade Litológica	Litologias Principais	Agrupamento das Unidades Litológicas
Complexo Caeté	Granito	**1**
Complexo Belo Horizonte	Gnaisse granítico	
Corpo Santa Paula	Sienito	
Formação Cercadinho - Gr. Piracicaba	Filito ferruginoso	**2**
Grupo Sabará	Clorita xisto	**3**
Grupo Nova Lima - Associação ressedimentada	Xisto	
Formação Cauê - Gr. Itabira	Itabirito	**4**
Grupo Maquiné - Associação costeira	Sericita quartzito	**5**
Formação Cambotas - Sg. Espinhaço	Mica quartzito	
Grupo Caraça	Quartzito	
Grupo Nova Lima - Associação vulcanoclástica	Metapiroclástica, Metagrauvacas vulcanogênica	**6**
Grupo Nova Lima - Associação química-pelítica	Metabasalto	**7**
Soleiras e Diques Máficos	Rochas máficas	
Grupo Nova Lima - Associação máfica-ultramáfica	Metabasalto toleiítico e komatiítico, metaperidotito	

5.2 MAPA DE INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTOS

Com base na hipótese, corroborada por trabalhos da comunidade científica, de que eventos geodinâmicos se sucedem na paisagem sob a influência predominante das mesmas condições que o desencadearam no passado (Varnes *et al*., 1984; Carrara *et al*., 1999), os mapas de inventários de escorregamentos apresentam grande utilidade para os estudos de zoneamento geotécnico de movimentos gravitacionais de massa. A etapa de mapeamento dos escorregamentos, ou inventário de cicatrizes, representa uma fase crucial para o desenvolvimento de qualquer metodologia estatística de suscetibilidade. A representação cartográfica dessas evidências irá indicar, por meio da densidade de probabilidade, quais as classes dos parâmetros selecionados apresentam maior predisposição de desencadear o processo analisado. Os erros cartográficos e de classificação gerados nessa fase do processo irão se propagar para toda a análise.

Portanto, é importante valer-se de diversas abordagens, cada qual com suas vantagens e desvantagens, com o intuito de se cadastrar a maior quantidade de feições de escorregamentos existentes na área de estudo, com a melhor qualidade dos dados quanto possível. Nesse trabalho foram adotadas quatro técnicas para levantamento e mapeamento das cicatrizes de deslizamentos: interpretação de imagens de satélite disponibilizadas pelo *Google Earth* e pelo programa ArcGIS; análise da superfície topográfica; dados de depósitos de tálus/coluvionares do mapa geológico; e mapeamento de campo para a verificação das feições demarcadas pelo emprego das demais técnicas e eventual delimitação de novas cicatrizes observadas.

O banco de dados do *Google Earth* possui imagens de alta resolução, provenientes de diversas distribuidoras, que são atualizadas/substituídas periodicamente, sem aviso prévio. São referenciadas espacialmente por coordenadas geográficas no sistema WGS84.

Inicialmente realizou-se a interpretação das imagens de satélite disponibilizadas no *Google Earth*, utilizando-se do recurso de imagens históricas. A imagem da área de estudo foi dividida em quadrantes de aproximadamente 4 km², percorridos e interpretados em uma escala de aproximadamente 1:5.000, dada pelo *zoom in* na

imagem analisada (Figura 5.9). O polígono referente à cicatriz era então vetorizado, de forma a incluir somente a área de depleção do movimento, excluindo-se a área de acumulação do material deslizado. Nesse caso, os modelos de suscetibilidade não são capazes de indicar as zonas de acumulação, ou área de atingimento do escorregamento, informação imprescindível em trabalhos detalhados de avaliação das consequências potenciais. Entretanto, também não incorre em erros no modelo devido à entrada de parâmetros de predisposição que não explicam a ocorrência do processo investigado.

Figura 5.9: Exemplo de como o recurso de imagem histórica do *Google Earth* facilita a identificação de feição de escorregamento. À esquerda, na imagem com data de 20/12/10, é possível distinguir indícios que possível movimento, entretanto somente na imagem à direita, datada de 09/06/15, é possível reconhecer que, de fato, se trata de uma cicatriz de escorregamento, validada em campo (Coordenadas UTM 636003 mE / 7789263 mS, fuso 23 K).

Dentre as principais vantagens da utilização das imagens do *Google Earth*, podem-se citar: custo de zero de obtenção; alta resolução para diversas áreas do globo terrestre, incluindo a área de estudo; disponibilidade de imagens de datas diferentes das quais se pode obter informações distintas; a delimitação georreferenciada do polígono pode ser feita facilmente no próprio programa e compatível com a plataforma SIG; dinâmica e praticidade no manuseio das imagens, inclusive com a utilização do recurso de visualização em três dimensões.

Apesar da existência de várias imagens, elas apresentam intervalo de tempo restrito, de maio de 2002 a julho de 2015, portanto não se obtém dados da época de ocorrência dos escorregamentos fora dessa janela de tempo. Para a área de estudo, não foi possível notar, por meio da análise das imagens históricas, eventos de escorregamentos ocorridos no referido período de tempo. As informações extraídas dessas imagens se baseiam nas assinaturas espectrais e geomorfológicas deixadas pela cicatriz dos movimentos ocorridos antes de maio de 2002, e não é possível determinar a data do evento.

Já a sua grande desvantagem é a precisão cartográfica de suas imagens e o deslocamento entre imagens de diferentes datas, e consequentemente entre dados vetoriais delimitados em imagens mais antigas. Tal fato ocorre devido ao registro das imagens serem processados sempre separadamente (Lopes & Nogueira, 2011).

Para minimizar ou mesmo eliminar os erros devido ao deslocamento, recorreu-se a alguns meios de verificar o desvio da imagem empregada e corrigir cartograficamente os polígonos vetorizados. A fim de averiguar a melhor imagem para a delimitação da cicatriz, utilizou-se de pontos e polígonos vetorizados em ambiente SIG, com o apoio da imagem disponibilizada no banco de dados do programa ArcMap, e comparou-se com as imagens disponível no *Google Earth*. Notou-se que, para a imagem mais recente (20/07/2015) o deslocamento era muitas vezes desprezível ou dentro da margem de erro para a escala do mapeamento (item 5.1). Então, a delimitação dos polígonos das cicatrizes foi efetuada na imagem mais recente, mesmo quando a feição era mais bem identificada em imagens mais antigas.

Durante os levantamentos de campo, buscou-se percorrer toda a área de estudo para realizar o reconhecimento geral de seus aspectos geomorfológicos e geológicos, além de verificar e validar a maior quantidade de cicatrizes fotointerpretadas possíveis. Os pontos de campo foram levantados com a utilização do GPSmap 62s da marca Garmin, em *Datum* UTM WGS84. Foram cadastrados 75 pontos ao longo das campanhas de campo, com descrição das características gerais dos aspectos relevantes a ocorrência de escorregamentos e das cicatrizes fotointerpretadas e observadas, além da avaliação dos resultados dos modelos produzidos para a área de estudo.

Além disso, alguns dos pontos de campo foram coletados em posições estratégicas ou de referência (cruzamentos de estradas, quinas de construções, etc) a fim de se comparar a localização geográfica do ponto com a imagem do *Google Earth* utilizada na demarcação dos polígonos de cicatrizes. Dessa maneira, verificou-se que os deslocamentos eram aceitáveis para a escala de trabalho.

Alguns trabalhos que fizeram uso de imagens do *Google Earth* sugerem métodos para avaliar a precisão cartográfica, a escala adequada para o uso e o erro planimétrico

admissível dessas imagens (*e.g*. Lopes & Nogueira, 2011; Alencar & Santos, 2013). Eles mostram que, apesar dos deslocamentos observados nas imagens do *Google Earth*, quando utilizadas com critérios de correção e validação, são bastante convenientes por todas as outras vantagens citadas.

A análise da superfície topográfica se deu após a avaliação do inventário em campo, para subsidiar a exclusão ou validação das feições, sobre as quais, mesmo após a verificação *in loco*, ainda permaneciam dúvidas quanto a sua origem. Essa técnica também foi utilizada com mais detalhe nas áreas de vegetação densa, onde muitas vezes não é possível obter informações por fotointerpretação, nem por levantamento de campo, devido ao difícil acesso.

Ficou evidente que, essa abordagem de mapeamento de escorregamentos limita-se a feições de determinada dimensão, tal que seja capaz de causar distorções visíveis nas curvas de nível, além de exigir treinamento e experiência do pesquisador para que essas deformações possam ser identificadas na topografia. A escala das curvas de nível também influencia na visibilidade das distorções, o que frequentemente limita sua utilização. Esse trabalho não obteve resultados expressivos com a técnica de análise de superfície topográfica, muito em função desses fatores citados.

Por fim, outra fonte de informação de onde se extraiu dados sobre escorregamentos foi o mapa geológico da Folha Caeté (Baltazar *et al*., 2005), onde uma das unidades quaternárias é caracterizada como "coluvião – *debris* de deslizamentos, fragmentos de rochas com solo". Assim, as feições acima desses depósitos, que apresentavam características dúbias quanto a sua origem, puderam ser identificadas como cicatrizes de escorregamento. Por se tratar de movimentos com idades de centenas a milhares de anos, já se apresentam obliterados pela ação do intemperismo, erosões e ocorrência de deslizamentos mais recentes. Sua conformação atual não representa com exatidão a sua forma quando da época do evento, entretanto julgou-se importante incluí-las no inventário, por caracterizarem a suscetibilidade a escorregamento da vertente sul da Serra da Piedade, onde esses depósitos são comuns e generalizados.

5.2.1 DIVISÃO DO INVENTÁRIO

Após a finalização do inventário e sua posterior validação, realizou-se a divisão do conjunto de dados em dois subconjuntos de cicatrizes, o primeiro denominado grupo de treino, com o qual o modelo foi elaborado, e o segundo grupo de teste, que foi utilizado na avaliação da capacidade preditiva do modelo. Essa ação foi realizada com a utilização da ferramenta contida no programa ArcMap "*Subset Features - Utilities - Geoestatistical Analyst Tools*". A aleatoriedade desse procedimento é importante para garantir que o modelo seja treinado e testado com toda variabilidade das características presentes na área de estudo, ou seja, deve haver uma homogeneidade nas representações entre os subconjuntos gerados (Barella, 2016). Após a divisão das feições, realizou-se uma análise visual da distribuição espacial dos polígonos, para verificar se ambos os grupos estavam divididos de modo uniforme em toda a área de estudo (Figura 5.10).

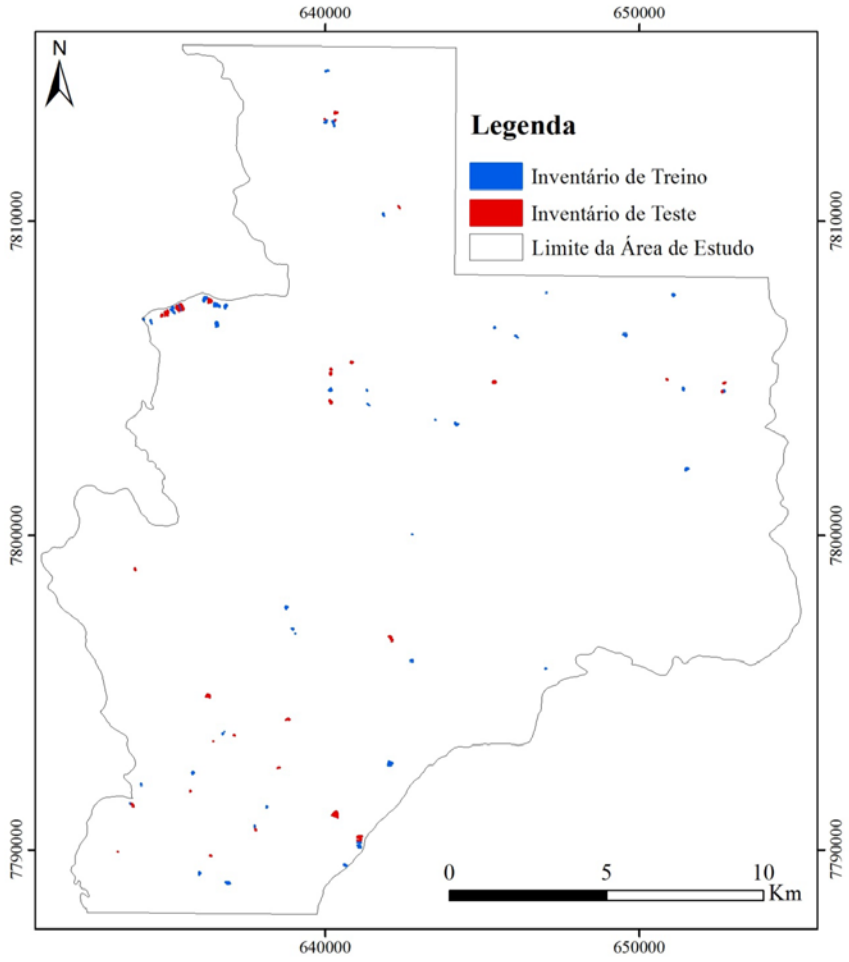

Figura 5.10: Mapa da distribuição das cicatrizes de escorregamentos na área de estudo, divididas no conjunto de treino e de teste.

Devido ao limitado número de cicatrizes de escorregamentos identificadas e delimitadas na área de estudo, optou-se por utilizar 60% dos dados para o grupo de treino e 40% para o grupo de teste. Dessa maneira, considera-se que o modelo será elaborado com uma boa quantidade de informação, sem o detrimento dos dados para a validação. Idealmente, quanto maior o inventário de escorregamentos, mais bem treinado o modelo será, o qual também terá uma melhor avaliação da sua capacidade de prever movimentos futuros. A abundância de dados no inventário é uma das maiores limitações para o emprego dos métodos estatísticos, uma vez que são intimamente dependentes da qualidade e da quantidade de informações que irão alimentar e treinar os modelos.

5.3 APLICAÇÃO DOS MÉTODOS ESTATÍSTICOS

De posse do inventário de escorregamentos, divididos nos subconjuntos de treino e teste, e dos mapas de parâmetros classificados, em formato *raster*, partiu-se para a etapa de modelagem computacional para obtenção dos índices de suscetibilidade a escorregamentos. Todo o processamento foi realizado no programa ArcGIS, sendo que os cálculos oriundos da aplicação das equações foram executados em planilhas no *Microsoft Excel*.

Inicialmente, realizou-se o levantamento da quantidade de *pixels* em cada classe de cada parâmetro empregado para toda a área de estudo, bem como para as áreas correspondentes aos locais onde ocorreram escorregamentos. Em outras palavras, utilizaram-se os polígonos vetoriais do subgrupo de treino do inventário de cicatrizes para extrair essa informação dos mapas de parâmetros.

As relações entre a quantidade de *pixels* de cada classe nas áreas de deslizamentos com a quantidade da área total são utilizadas na análise de sensibilidade dos parâmetros. Foram aplicados os métodos de Área Abaixo da Curva (AAC), *Accountability (Acc)* e *Reliability (Rl)*. Os valores obtidos foram utilizados para subsidiar a hierarquização dos parâmetros e fornecer a ordem de integração empregada para geração do modelo final, além de auxiliar na análise da relevância que cada fator apresenta nos processos de escorregamentos.

Nessa fase também foram obtidos os Valores Informativos para cada classe de um dado parâmetro. Eles indicam a magnitude dos pesos e o grau de importância que cada classe de cada fator representa no condicionamento dos deslizamentos. Esses índices foram posteriormente utilizados na etapa da soma algébrica dos mapas de parâmetros para obter os três modelos de suscetibilidade a para a área de estudo, os quais foram comparados entre si.

Os modelos produzidos apresentam uma ampla variação de Valores Informativos, que se referem ao grau de importância que a área correspondente ao *pixel* apresenta de sediar um escorregamento no futuro. Com o intuito de melhorar a visualização espacial dos dados e facilitar a leitura do modelo, é habitual realizar a classificação dos índices de Valor Informativo em classes de suscetibilidade a escorregamentos. Além disso, para que se possa realizar qualquer tipo de comparação e avaliação entre os resultados dos modelos produzidos, é fundamental que sejam classificados da mesma maneira.

Optou-se pela classificação em três classes de suscetibilidade, alta, média e baixa, uma vez que um número maior de classes implicaria em definir critérios claros para os valores limítrofes, por exemplo, para caracterizar o que diferencia a classe muito alta e da alta suscetibilidade. O método que emprega a análise da curva de predição, além de bastante simples, mostra-se eficaz no processo de classificação da suscetibilidade a escorregamento. A utilização da curva de predição é preferível em detrimento da curva de sucesso, uma vez que ela revela a capacidade de previsão do modelo gerado, ou seja, o quão bem o modelo consegue antever deslizamentos futuros. Assim, as classes definidas irão indicar as áreas com maior ou menor possibilidade de ocorrência de novos movimentos.

Para tanto, definiu-se uma classificação onde as classes de alta, média e baixa suscetibilidade a escorregamento hospedam, respectivamente, 80%, 15% e 5% dos movimentos que podem ocorrer na área de estudo, partindo do princípio que a alta suscetibilidade deve conter a ampla maioria dos deslizamentos, e a baixa suscetibilidade uma quantidade pouco significativa dos movimentos. No exemplo da figura 5.11, 80% dos escorregamentos futuros poderão ocorrer em 24% da área de estudo, a qual foi classificada como alta suscetibilidade a escorregamento. Já a área classificada como

média suscetibilidade, contempla 15% dos escorregamentos futuros e corresponde a 35% da área de estudo. O restante do território (41%) foi classificado como baixa suscetibilidade a escorregamento e contempla 5% dos deslizamentos que poderão ocorrer.

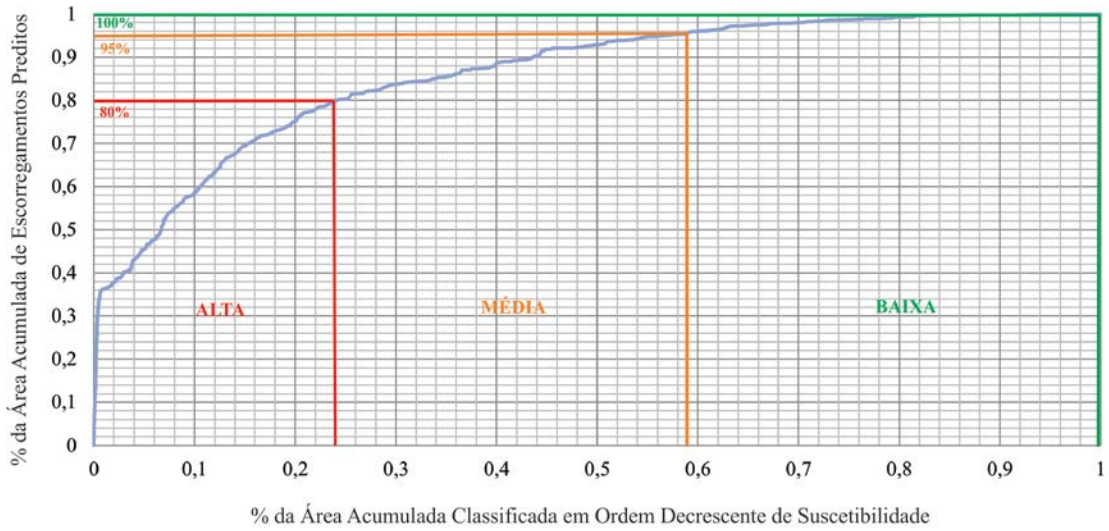

Figura 5.11: Exemplo de curva de predição utilizada na classificação dos modelos de suscetibilidade gerados para a área de estudo.

Posto que não existe uma padronização a respeito dessas faixas de porcentagem, mais importante que o porquê da definição desses valores, é que eles devem sempre ser explicitados nos trabalhos de suscetibilidade a movimentos de massa. Dentre os fatores que podem influenciar nessa decisão estão à qualidade e a precisão dos insumos básicos para o estudo, ou seja, do MDE e do mapa de inventário de cicatrizes. Assim, com o aumento ou a diminuição da qualidade e da precisão desses dados, essas faixas podem se tornar menos ou mais conservadoras.

Após a classificação dos modelos gerados, prosseguiu-se para a fase de validação e comparação entre seus desempenhos, recorrendo-se aos métodos de Curva de Sucesso e de Predição. Para tanto, realizou-se a interseção de ambos os modelos com os subconjuntos do inventário – treino e teste – chegando-se assim, à relação entre a ocorrência de escorregamentos e as classes de suscetibilidade.

6 ANÁLISE E DISCUSSÕES DOS RESULTADOS

Este item apresenta as observações feitas durante as atividades de campo, tanto no que se refere à elaboração e validação do inventário de escorregamentos quanto à verificação dos modelos de suscetibilidade produzidos para a área de trabalho. Também mostra os mapas temáticos produzidos utilizados na modelagem de suscetibilidade a escorregamentos e os resultados dos métodos estatísticos aplicados para a avaliação dos parâmetros e comparação dos modelos elaborados.

6.1 VALIDAÇÃO DO INVENTÁRIO DE ESCORREGAMENTO

Durante a atividade de campo foi possível acessar/visualizar e verificar 32 das 82 cicatrizes fotointerpretadas previamente. Em alguns casos, as feições foram mais bem observadas pela imagem do que em campo, devido ao tamanho, vegetação ou ponto de visada. Além da validação das cicatrizes de deslizamento delimitadas remotamente, o trabalho de campo permitiu identificar 11 novas feições de movimentos e eliminar uma feição fotointerpretada que, na realidade, não correspondia a um escorregamento, totalizando 92 cicatrizes cadastradas. Esse total foi emprego na elaboração e validação do modelo de suscetibilidade a escorregamento da área. As figuras 6.1 a 6.4[4] mostram algumas das feições fotointerpretadas e posteriormente validadas em campo.

Figura 6.1: Cicatriz de escorregamento à esquerda na imagem de satélite mostrando o polígono delimitado utilizado na modelagem e à direita em fotografia no campo com tracejado amarelo identificando a crista do movimento. Coordenadas UTM da feição 649542 mE/7806401 mS, fuso 23 K.

[4] Fonte das imagens de satélite: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and GIS user community.

Figura 6.2: Cicatriz de escorregamento à esquerda na imagem de satélite mostrando o polígono delimitado utilizado na modelagem e à direita em fotografia no campo com tracejado amarelo identificando a crista do movimento. Coordenadas UTM da feição 638767 mE/7797717 mS, fuso 23 K.

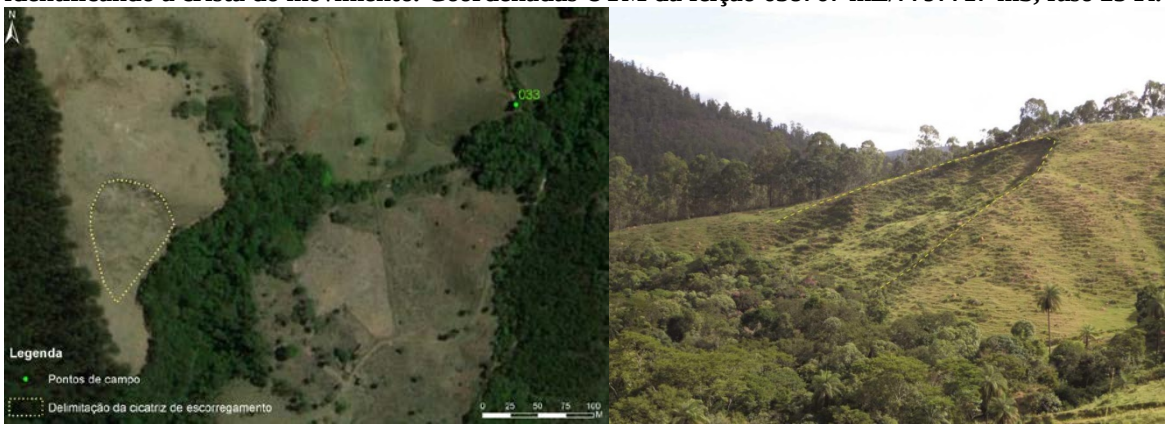

Figura 6.3: Cicatriz de escorregamento à esquerda na imagem de satélite mostrando o polígono delimitado utilizado na modelagem e à direita em fotografia no campo com tracejado amarelo identificando a crista do movimento. Coordenadas UTM da feição 636003 mE/7789263 mS, fuso 23 K.

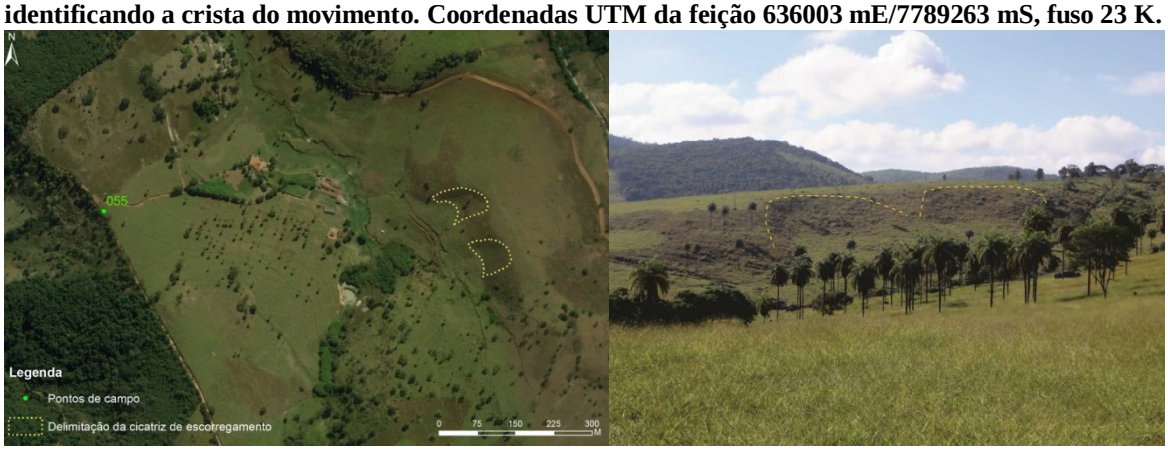

Figura 6.4: Cicatrizes de escorregamentos à esquerda na imagem de satélite mostrando os polígonos delimitados utilizados na modelagem e à direita em fotografia no campo com tracejado amarelo identificando as cristas dos movimentos. Coordenadas UTM da feição 642066 mE/7796779 mS, fuso 23K.

A figura 6.5 apresenta o escorregamento mais recente identificado em campo. Seu cadastro só foi possível por meio do levantamento *in loco*, uma vez que se encontra sob

vegetação densa, o que impossibilita sua visualização nas imagens de satélite. Além disso, as imagens disponíveis utilizadas no levantamento, até julho de 2015, pode não contemplar a data do evento.

Figura 6.5: À direita, escorregamento muito recente identificado em campo e sua localização na imagem de satélite, à esquerda, em área densamente vegetada sendo impossível sua visualização. Coordenadas UTM da feição 636438 mE/7793451 mS, fuso 23 K.

As feições delimitadas em decorrência dos depósitos de deslizamentos descritos do mapa geológico de Baltazar *et al*. (2005) puderam ser observadas a distância e estão localizadas a oeste da vertente voltada para sul da crista da Serra da Piedade (Figura 6.6). Por se tratar de feições muito antigas, possivelmente a morfologia retratada hoje é resultado de processos de movimentações sucessivas, incluindo a erosão do material. Na figura 6.7 podem-se observar algumas dessas feições e suas grandes dimensões na paisagem. Em decorrência desses fatos, as áreas dos polígonos desses escorregamentos apresentam tamanhos consideravelmente maiores quando comparado com outras cicatrizes cadastradas na área. Como os cálculos dos métodos empregados se baseiam na relação da área da cicatriz com as classes dos parâmetros de predisposição, o peso das características desse local pode ter sido superestimado. Entretanto, esses movimentos não devem ser desconsiderados, uma vez que representam a alta frequência de escorregamentos dessa área em particular, devido às altas declividades e a direção geral do mergulho da foliação relativamente favorável ao movimento, em função da orientação da vertente da serra nesses pontos.

Figura 6.6: Vista em três dimensões da Serra da Piedade, onde as feições de movimentos de massa podem ser observadas a esquerda da imagem (a oeste da crista da Serra da Piedade). Fonte: Imagem do *Google Earth*.

Figura 6.7: Feições de escorregamentos delimitadas no alto da Serra da Piedade (à esquerda), e vista em campo de algumas dessas feições (à direita).

Após a avaliação do inventário de cicatrizes de escorregamentos, atribuiu-se a cada feição um grau de certeza – variando de 1 a 5 – sendo 1 o maior grau de certeza, que avalia a confiabilidade da informação quanto a sua origem, classificação e a delimitação cartográfica do polígono. Os deslizamentos também foram classificados, quando possível, quanto ao seu tipo (translacional ou rotacional) e identificados, com uma estimativa simplificada, a respeito da possível idade do evento: antiga – centenas de anos; recente – várias décadas; e muito recente – última década. Ambas as

caracterizações possuem alto grau de subjetividade, feitas por meio da avaliação dos aspectos observados nas imagens e em campo. Complementarmente, quanto mais antiga a feição menor a certeza sobre sua real origem e sua classificação. Ainda assim, acredita-se que alguma informação sobre esses elementos, mesmo que abstrata, é melhor do que nenhuma informação. Contudo, é notório e necessário que, para a evolução da qualidade de qualquer mapa de zoneamento geológico-geotécnico, essas informações sejam cada vez mais completas e acuradas quanto possível. A tabela I (Apêndice) apresenta essas informações para cada feição delimitada. Do total dos escorregamentos inventariados (92 feições), 46% do total foram validados *in loco*. Quanto ao grau de certeza, 45% dos deslizamentos cadastrados receberam graus 1 e 2 e 29% graus 4 e 5. No que se refere à idade estimada, 31% foram tidas como antigas, com centenas a milhares de anos, 66% consideradas recentes, ou seja, ocorridas há algumas décadas e somente 3% como muito recentes, tendo sido desencadeadas nos últimos anos, as quais foram identificadas pelo mapeamento de campo.

Devido às idades dos movimentos e as modificações sofridas em decorrência da ação do tempo, somente 16% das feições identificados puderam ser classificadas quanto ao tipo de escorregamento, sendo que entre elas, 47% foram designadas como translacional, e o restante, 53% como rotacional. Uma das maiores limitações do inventário produzido é, sem dúvida, a incapacidade de se distinguir entre os tipos de deslizamentos, além de possuir poucas feições recentes, com maior grau de confiança na informação.

Outro ponto relevante quanto ao inventário, é a sua distribuição pela área de estudo. Primeiramente, para que ele possa considerar a diversidade de características do território, é importante que as feições estejam disseminadas por toda a região avaliada. Entretanto, é esperado que se tenha maior quantidade de movimentos naquelas porções do terreno com os atributos que os favorecem, exatamente o que os modelos de suscetibilidade buscam determinar. Contudo, a concentração de cicatrizes em determinado local também pode indicar eventos desencadeadores específicos, tal como pluviosidade intensa e prolongada, que tiveram sua ocorrência limitada espacialmente.

A despeito de apresentar uma densidade de escorregamentos de 0,11% da área total, ou seja, soma das áreas dos deslizamentos em relação à área total investigada, o inventário

produzido mostra-se relativamente bem distribuído ao longo do território. Todavia, não foram identificadas feições de movimentos de massa na porção sudeste do município, muito em função da área possuir cobertura vegetal densa e poucos acessos viários.

Apesar da concentração de escorregamentos em determinadas áreas, elas se encontram em locais com conjunto de características gerais distintas. O método estatístico aplicado é que tem a função de extrair os atributos que contribuem para a ocorrência de movimentos e extrapolar essa informação para as demais unidades do terreno semelhantes que não exibem cicatrizes de deslizamento.

O inventário final apresenta uma escala considerada de detalhe, pois foi produzido com imagens áreas com boa resolução espacial e em grande escala, cerca de 1:5.000, além do levantamento de campo. Por representar feições de movimentos delimitadas com base nas características morfológicas que são impressas no terreno, e por terem ocorridos ao longo de décadas, séculos ou mesmo milhares de anos, classifica-se o inventário como geomorfológico histórico, conforme definição de Guzzetti *et al*. (2012). Por esse motivo as idades dos escorregamentos foram estimadas em termos relativos – antigo, recente, muito recente.

6.2 MAPAS DE PARÂMETROS

Esse item apresenta os cartogramas produzidos e empregados na avaliação da suscetibilidade a escorregamentos e a relação da ocorrência espacial de suas classes. Mostra também, a relação entre a distribuição das feições de movimentos, do subconjunto de treino, com as classes de parâmetros, indicando a probabilidade condicionada de cada uma delas.

Os mapas de parâmetros exibem a distribuição espacial da classificação com a qual os modelos de suscetibilidade foram elaborados. Os gráficos mostram as probabilidades de ocorrência de: cada classe do parâmetro em relação à área de estudo total; cada classe dentro das cicatrizes de escorregamento em relação à área total escorregada; e, por fim, a probabilidade condicionada de um escorregamento acontecer dado a ocorrência de uma determinada classe. Essa ponderação é capaz de indicar em quais classes de

parâmetros os deslizamentos são mais frequentes, independente da área que ela ocupa em todo o território.

O ângulo das encostas varia entre 0° e 77,07° e foi classificado em faixas de 5° (Figura 6.8). Observa-se o predomínio das classes de valores entre 5° e 20° que cobrem 76% da área de estudo. Inclinações acima de 30° apresentam menor ocorrência, enquanto os valores acima de 40° estão restritos as proximidades da Serra da Piedade e aos paredões de quartzito da Formação Cambotas, pertencentes à porção meridional da Serra do Espinhaço.

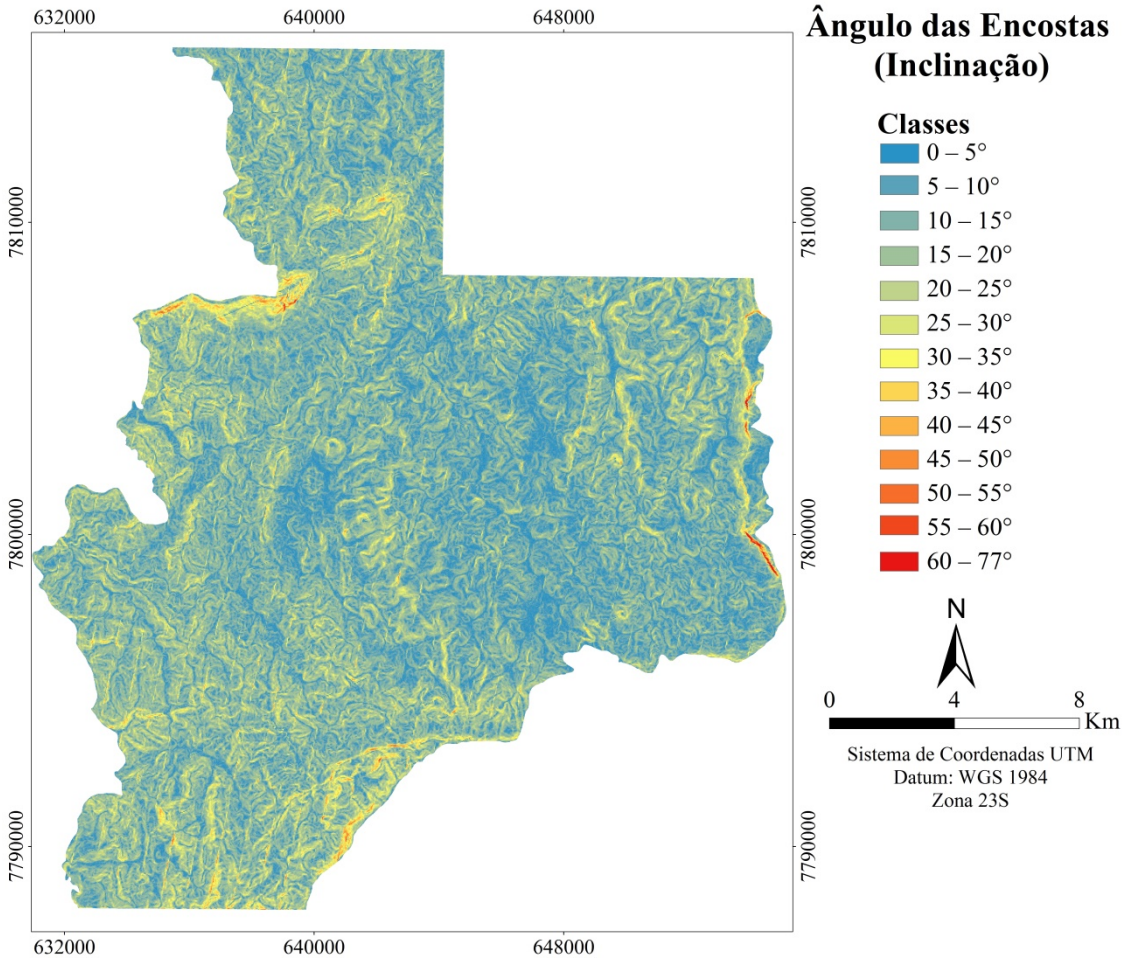

Figura 6.8: Mapa de ângulo das encostas para a área de estudo.

A avaliação das probabilidades das classes de ângulo das encostas mostra que vertentes com inclinações superiores a 25° são mais propensas a sofrerem com eventos de escorregamentos, sendo que na faixa entre 35° e 55°, as probabilidades são maiores. Ângulos entre 15° e 20°, apesar de hospedarem uma grande concentração de

deslizamentos, quando normalizada em relação à ocorrência territorial da classe, apresenta baixa probabilidade condicionada (Figura 6.9). A alta frequência de escorregamentos nessa faixa de inclinação, aliada ao fato de que, entre os movimentos classificados, pouco mais da metade foram identificados como do tipo rotacional, indicam que a área de estudo parece apresentar uma predisposição a ocorrência de escorregamentos desse tipo, os quais são comuns em terrenos com declividades mais suaves, tal como a referida faixa de ângulo.

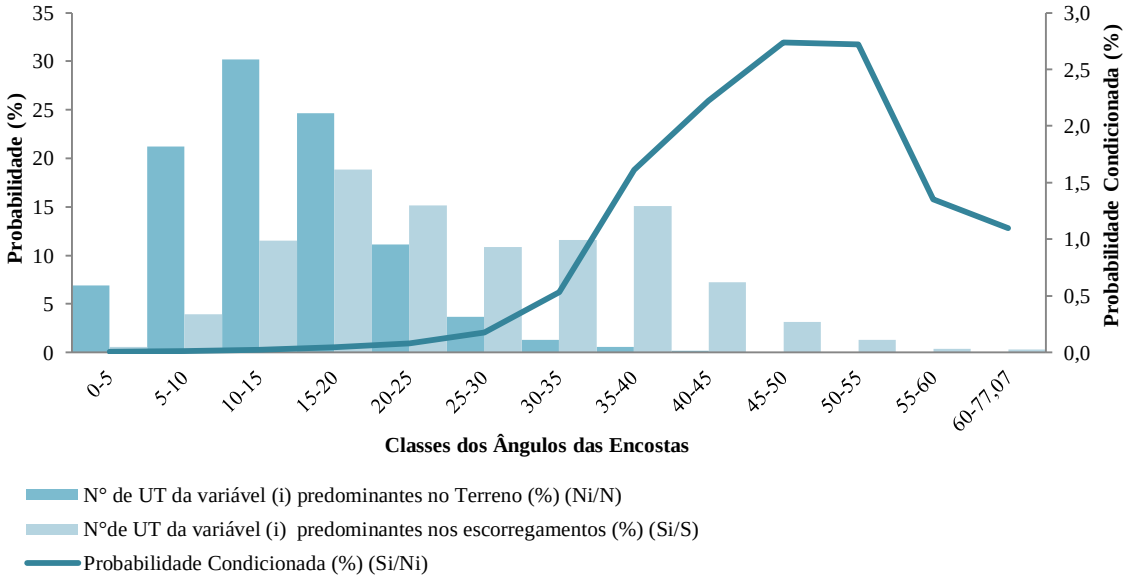

Figura 6.9: Gráfico com as probabilidades de ocorrência de escorregamentos, por classe do parâmetro ângulo das encostas.

O azimute da linha de máximo declive das encostas (0 a 360°) fornece a orientação das vertentes (Figuras 6.10). Esse parâmetro foi classificado nos pontos cardeais (N, S, E e W) e colaterais (NE, NW, SE e SW) com uma amplitude de 22,5° nos sentidos horário e anti-horário desses pontos. Ao contrário do ângulo das encostas, a distribuição espacial da orientação das vertentes não mostra predomínio de nenhuma direção, entretanto as áreas planas ocupam menos de 3% do território, enquanto as demais direções ocupam entre 10 e 15% da área total, cada.

As probabilidades condicionadas relativas às orientações das vertentes mostram que aquelas encostas com face mergulhando entre as direções sudeste, sul, sudoeste e oeste, são mais predispostas a serem atingidas pelos movimentos analisados, sendo que a direção sul apresenta maiores probabilidades (Figura 6.11).

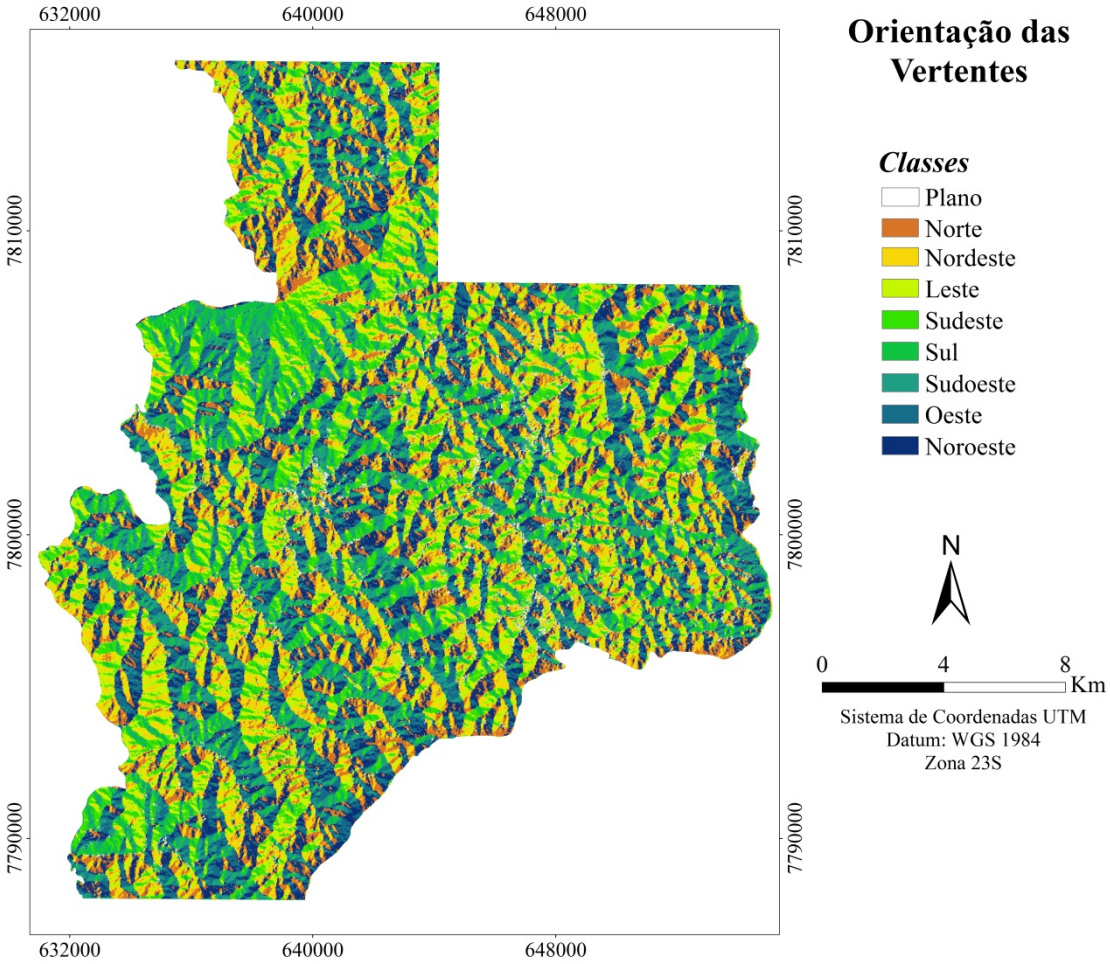

Figura 6.10: Mapa de orientação das vertentes para a área de estudo.

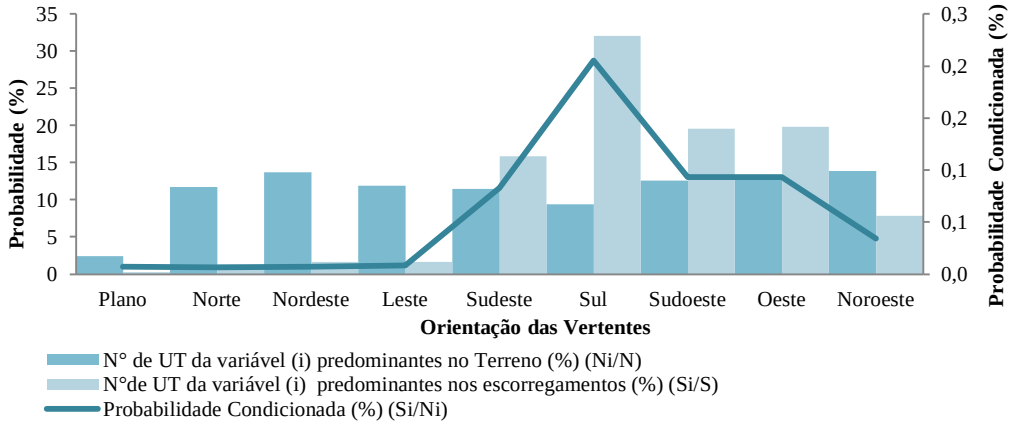

Figura 6.11: Gráfico com as probabilidades de ocorrência de escorregamentos, por classe do parâmetro orientação das vertentes.

No que diz respeito às direções sul e sudeste, uma possível interpretação refere-se ao sentido predominante do mergulho das estruturas das rochas da região –

foliação/bandamento composicional e acamamento. A análise dos dados estruturais contidos em Baltazar *et al*. (2005) mostra que a medida geral dessas estruturas é 163/35 (ver item 4.3.2), sendo que 43% das medidas de campo correspondem ao mergulho para sul e 35% para sudeste. Entretanto, esse fato pode ser circunstancial, e essa hipótese merece ser avaliada em detalhe por meio do levantamento dos dados estruturais em campo, especificamente onde há registro de ocorrência de escorregamentos. A caracterização do material deslizado, quando ainda presente no local, também merece atenção. É possível, eventualmente, observar estruturas incipientes no saprolito, em rochas bastante alteradas, ou mesmo em solos.

O predomínio de movimentos nas encostas voltadas para o sul também pode estar fundamentado no fato que as vertentes orientadas para o sul, no hemisfério sul, tendem a ser mais úmidas, devido a menor incidência de raios solares (Luiz, 2012). Um solo mais úmido, durante os períodos chuvosos, estará mais predisposto a sediar um escorregamento.

Relativo ao perfil das encostas (Figuras 6.12), sua classificação foi feita pela combinação dos perfis vertical e horizontal da encosta, cada qual podendo ser linear, côncavo ou convexo. Percebe-se a predominância do perfil vertical linear, somando pouco mais de 65% da cobertura da área, sendo que a combinação com o perfil horizontal linear predomina sobre a combinação com os perfis côncavos e convexos. O perfil vertical côncavo combinado com o perfil horizontal côncavo, da mesma forma que o perfil vertical convexo combinado com o perfil horizontal convexo, representa, cada um, por volta de 16% da curvatura das unidades de terreno da área. As demais combinações de perfil das vertentes (convexo-côncavo, convexo-linear, côncavo-linear e côncavo-convexo) não possuem representação significativa.

A análise do gráfico e das probabilidades condicionadas (Figura 6.13) indica que as combinações de perfis das vertentes convexo-côncavo e côncavo-convexo apresentam maior relevância em hospedar escorregamentos. Entretanto, essa proeminência observada no gráfico é influenciada pela pequena área que essas classes ocupam em todo o território em relação à área com ocorrência de escorregamento, que aleatoriamente incluiu um *pixel*, o qual provoca um impacto no cálculo da relação de

áreas, entretanto não apresenta significado no condicionamento dos escorregamentos da área de estudo.

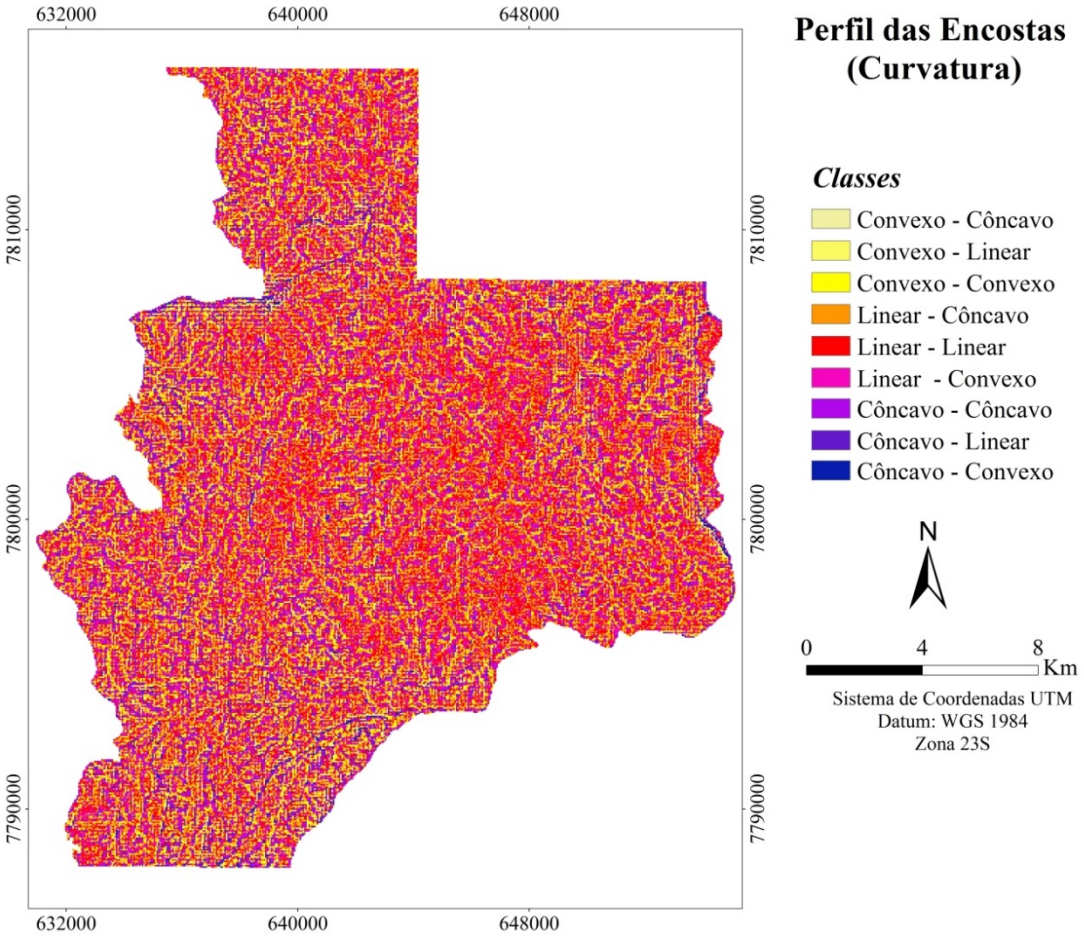

Figura 6.12: Mapa de perfil das encostas (curvatura) para a área de estudo.

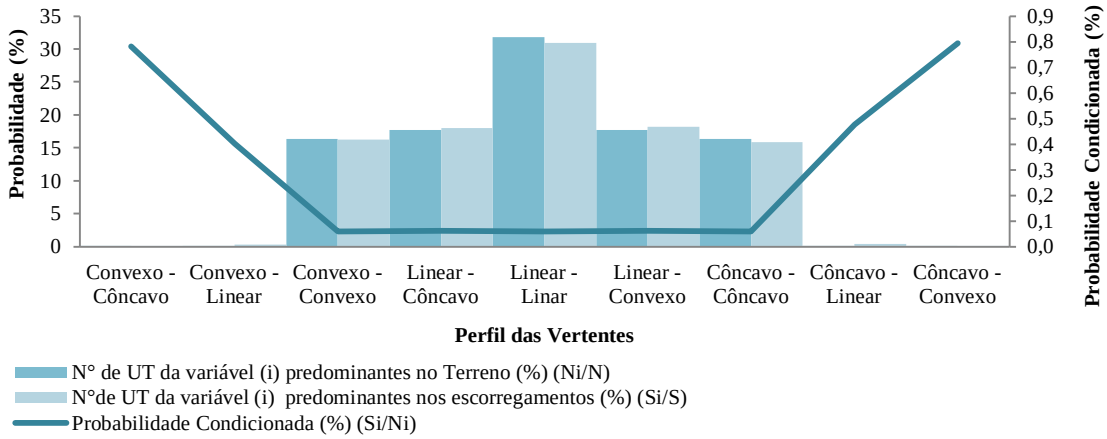

Figura 6.13: Gráfico com as probabilidades de ocorrência de escorregamentos, por classe do parâmetro perfil das vertentes.

As unidades litológicas do mapa geológico foram classificadas pelo agrupamento dos litotipos com características semelhantes quanto à capacidade hospedar escorregamentos, conforme descrito no item 5.1.1. Foram realizadas as classificações para duas escalas dos mapas litológicos utilizados, figuras 6.14 e 6.15, respectivamente nas escalas de 1:100.000 e 1:25.000.

O percentual de distribuição das três principais unidades não apresenta grandes discrepâncias para ambas as escalas, variando de 52 a 54% para os gnaisses graníticos, 24 a 27% para as rochas metamáficas e metaultramáficas, e por volta de 12% para os xistos. Os quartzitos e itabiritos estão restritos às cristas e escarpas serranas, apresentando baixa cobertura territorial.

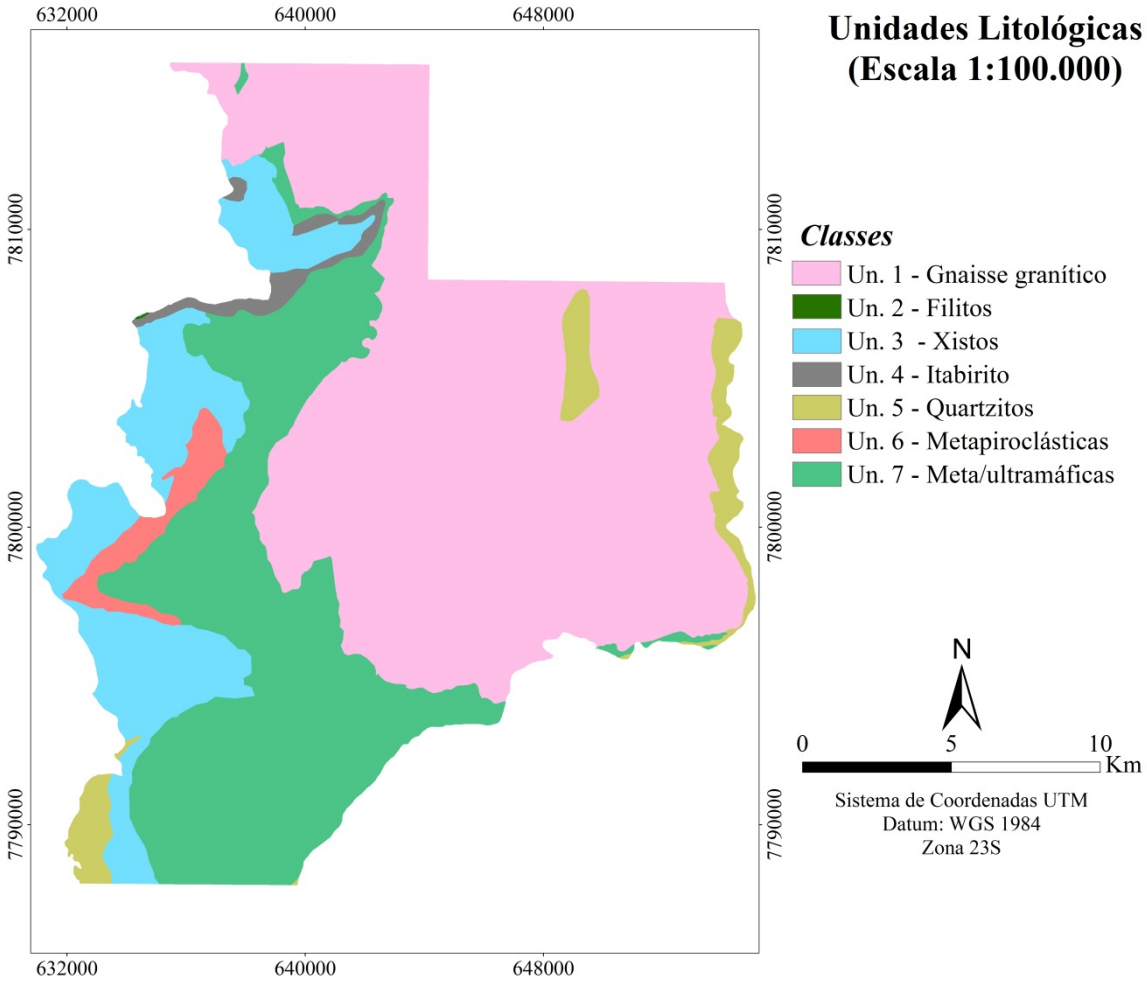

Figura 6.14: Mapa de unidades litológicas para a área de estudo, na escala 1:100.000.

Algumas unidades só são distinguíveis na escala 1:25.000, tais como canga, formação ferrífera e filitos, os quais, apesar de recobrirem menos de 1% da área cada um,

possuem concentrações de feições de escorregamentos significativas. Com isso, suas probabilidades condicionadas são consideráveis, visto que a canga ocupa os topos serranos, e as formações ferríferas se encontram em forma de grandes lentes disseminadas por toda a unidade de rochas metamáficas e metaultramáficas.

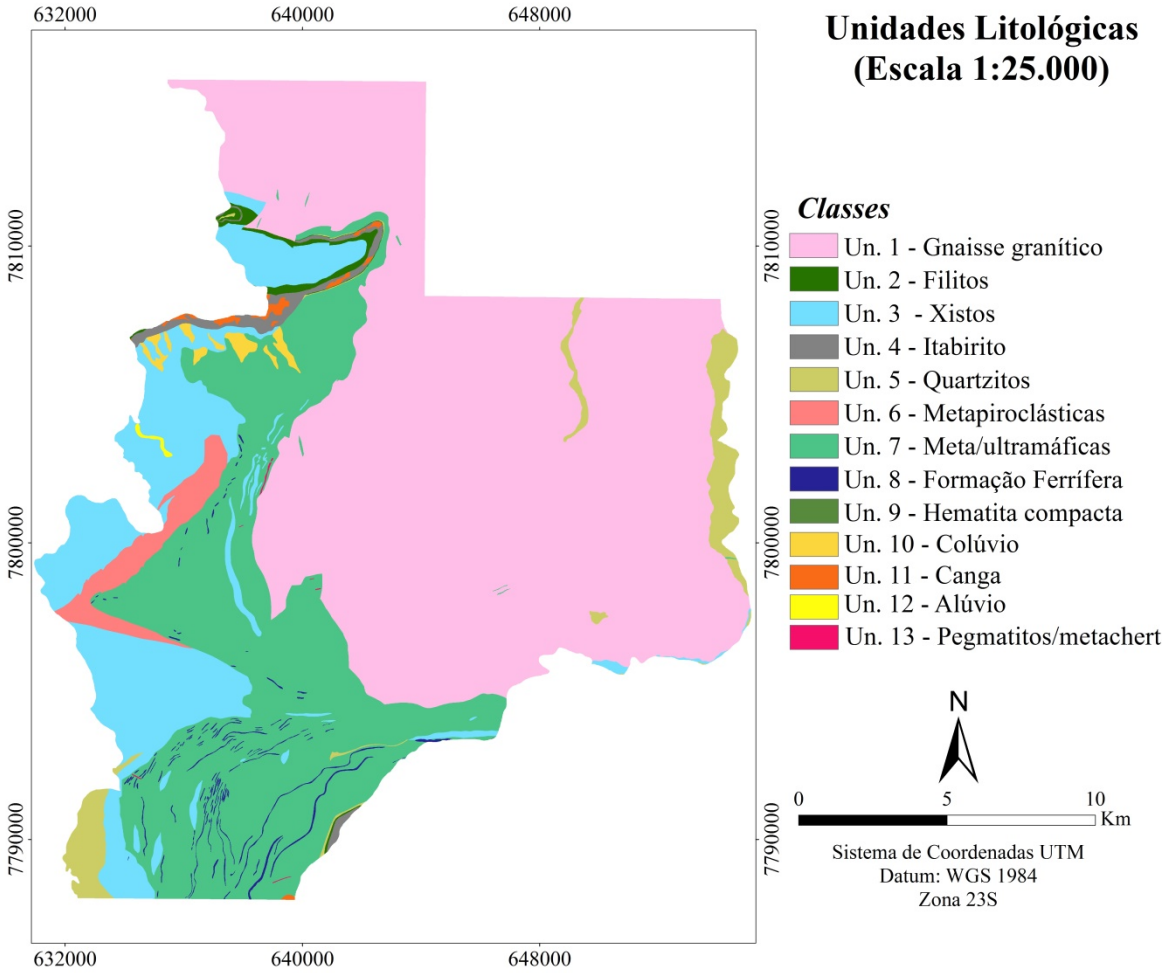

Figura 6.15: Mapa de unidades litológicas para a área de estudo, na escala 1:25.000.

Os gnaisses e as rochas metamáficas/metaultramáfica apresentam alta frequência de deslizamentos, entretanto não possuem probabilidades condicionadas expressivas. Já os itabiritos exibem altos valores de probabilidade condicionada, dada à ocupação restrita desse litotipo às regiões serranas, mais propícias à ocorrência de deslizamentos. Essas características são comuns a ambas as escalas (Figuras 6.16 e 6.17).

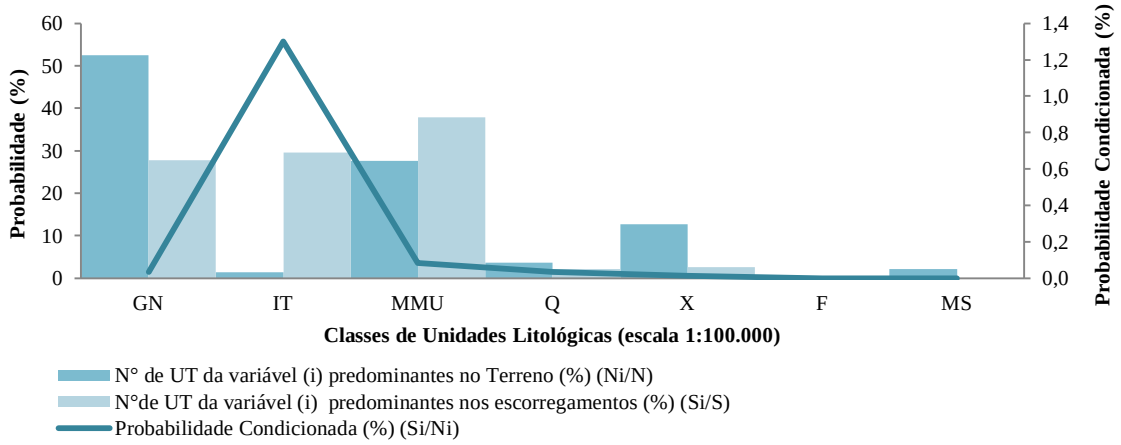

Figura 6.16: Gráfico com as probabilidades de ocorrência de escorregamentos, por classe do parâmetro unidades litológicas, na escala 1:100.000. GN – Gnaisse granítico; IT – Itabirito; MMU – Metamáfica e metaultramáficas; Q – Quartzito; X – Xisto; F – Filito; MS – Metassedimentares.

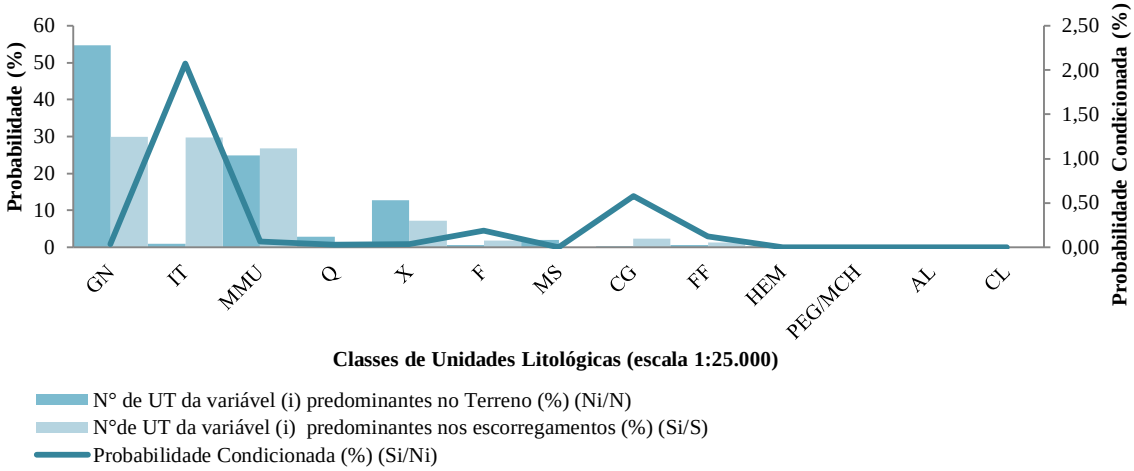

Figura 6.17: Gráfico com as probabilidades de ocorrência de escorregamentos, por classe do parâmetro unidades litológicas, na escala 1:25.000. CG – Canga; FF – Formação Ferrífera; PG/MCH – Pegmatito e Metachert; Q – Quartzito; MMU – Metamáfica e metaultramáficas; F – Filito; IT – Itabirito; GN – Gnaisse granítico; MS – Metassedimentares; AL - Aluvião; CL – Colúvio; X – Xisto; HEM – Hematita compacta.

O mapa de unidades de relevo (Figura 6.18), classificado de acordo com a metodologia exposta no item 5.1, apresenta predomínio de mais de 60% da área caracterizada como morros altos, distribuídos por praticamente toda a área. Em seguida, a unidade composta pelo domínio de morros baixos, recobrem aproximadamente 21% da área de estudo. Esta a unidade tem ocorrência mais marcante na região leste e sudeste do território. As demais unidades de relevo são menos frequentes, as quais ocorrem em pequenas áreas, porém disseminadas por todo o território.

O relevo serrano apresenta maior probabilidade condicionada de hospedar escorregamentos. Tal fato, além de ir ao encontro às observações gerais sobre

movimentos de massa, também pode ser explicado pela presença de grandes feições de deslizamentos delimitadas na meia encosta da Serra da Piedade. Apesar de representarem, de fato, escorregamentos, as áreas de seus polígonos estão, provavelmente, superdimensionadas devido à idade avançada das feições e ao desenvolvimento de outros processos de remoção de material, tal como erosão. Já o relevo com predomínio de morros altos exibe uma alta concentração de escorregamentos, entretanto essa alta concentração é proporcional a distribuição espacial da classe pelo território. As demais classes não apresentam concentrações relevantes de movimentações (Figura 6.19).

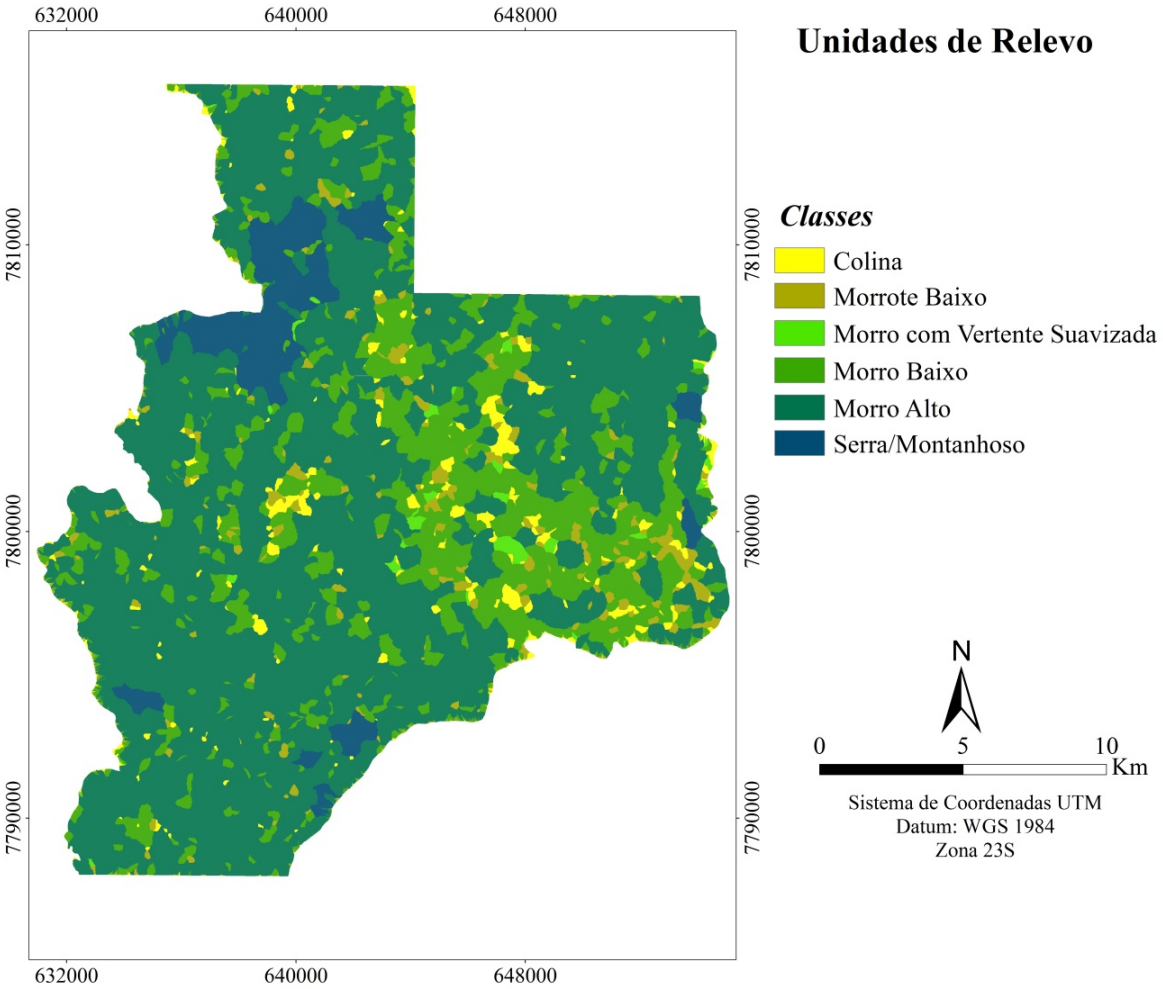

Figura 6.18: Mapa de unidades de relevo para a área de estudo.

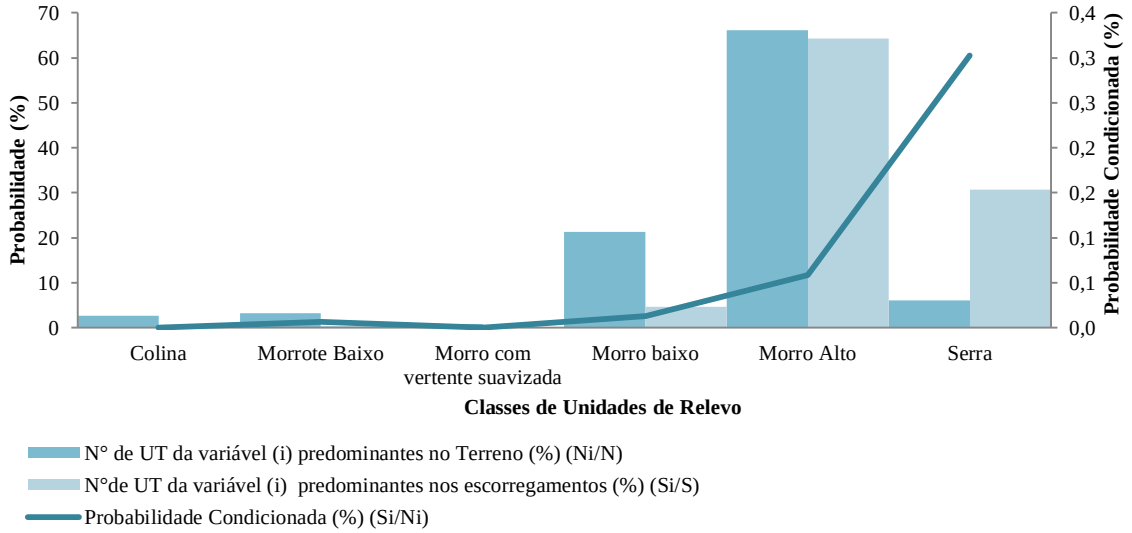

Figura 6.19: Gráfico com as probabilidades de ocorrência de escorregamentos, por classe do parâmetro unidades de relevo.

Por fim, o cartograma produzido por meio do cálculo do inverso do *Wetness Index* (IWI) ou índice topográfico de umidade (Figura 6.20) foi classificado em 7 categorias, sendo que o grau de saturação do solo aumenta com a redução do IWI. Assim sendo, as classes IWI=0 (0,14% da área) e 0 – 0,0001 (13,6% da área) representam as áreas planas, correspondendo aos canais das drenagens, bem como as planícies de inundação e terraços não identificáveis na escala. Podem também, eventualmente, refletir os topos planos de morro, devido a erros provenientes da resolução dos dados de elevação.

Com relação aos demais intervalos gerados, as classes >0,1 e 0,005 – 0,01 apresentam maior relevância na distribuição espacial, representando, respectivamente 42% e 22% da área de estudo. As outras três classes, 0,01 – 0,1; 0,001 – 0,005 e 0,0001 – 0,001 correspondem, nesta ordem a 11%, 9% e 1,28% do total da área de estudo.

Os valores acima de 0,005 apresentam grande concentração de deslizamentos, e a faixa de 0,01 a 0,1 possui probabilidades condicionadas maiores de sediar um movimento (Figura 6.21). Excluindo-se as regiões planas muito saturadas, o resultado obtido pela análise do inverso do *Wetness Index* indica que solos com grau de saturação intermediário são mais propensos à ocorrência de deslizamentos. As unidades de terreno entre 0,0001 e 0,005, apesar de mais saturadas, comumente correspondem a áreas menos íngremes, as quais apresentam menor tendência a desenvolver escorregamentos,

contudo podem ser predisposta a outros processos. Tal fato denota a interdependência entre os parâmetros empregados.

Para valores acima de >0,1, apesar da alta probabilidade de ocorrência de escorregamento, ela é proporcional à distribuição territorial da classe, o que leva a crer que não se trata de uma classe crucial na explicação dos escorregamentos. A alta probabilidade condicionada observada na classe IWI=0 se deve ao fato de sua baixa ocorrência espacial, e a ocorrência de parte da área dos polígonos de escorregamentos – crista do movimento – nos topos planos de morros, os quais são classificados com esse valor, conforme explicado anteriormente. Além disso, a delimitação das feições também pode incluir, eventualmente, áreas planas do pé da encosta.

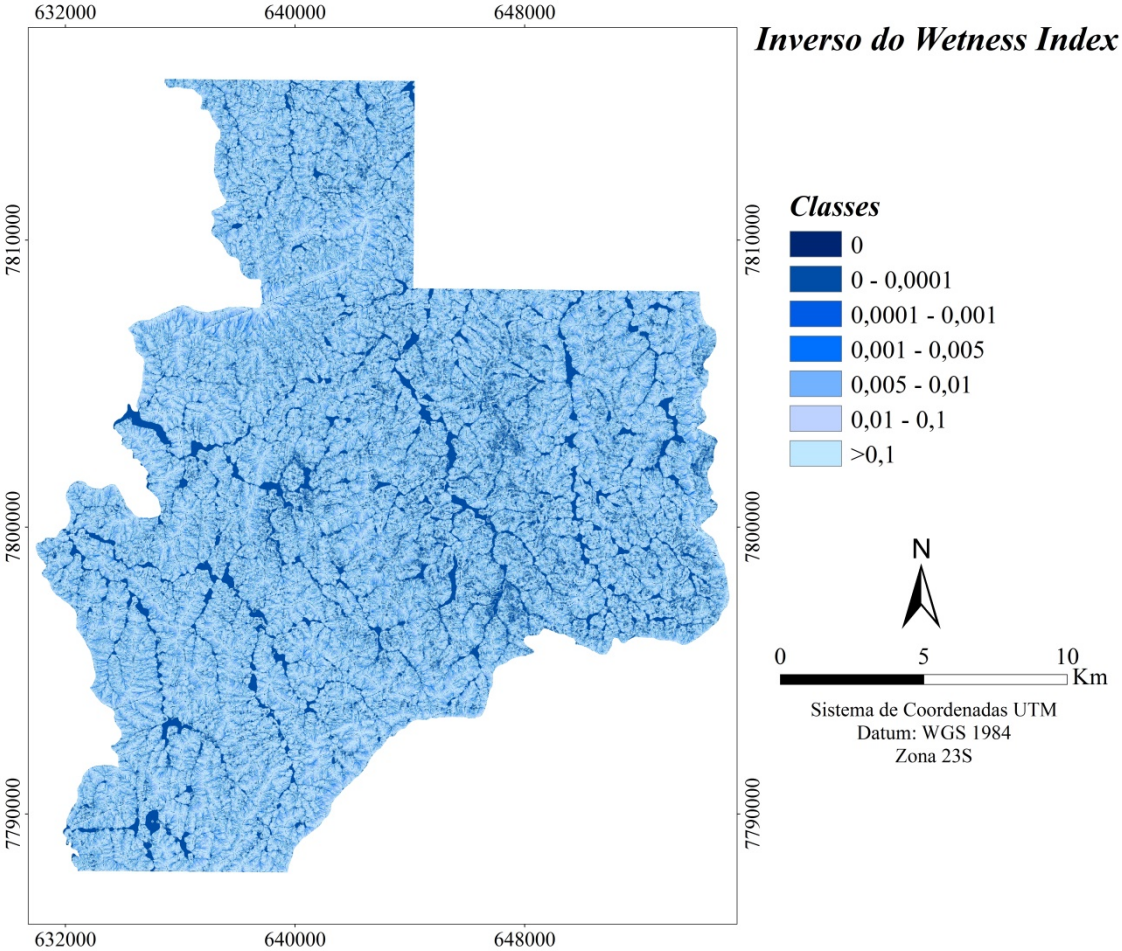

Figura 6.20: Mapa do inverso do índice de umidade para a área de estudo.

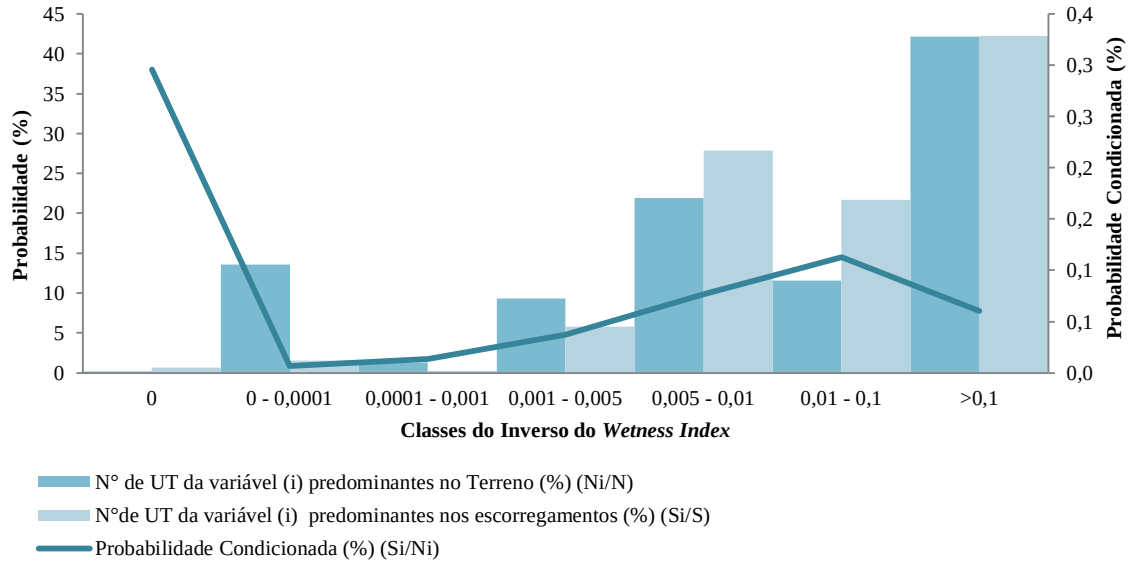

Figura 6.21: Gráfico com as probabilidades de ocorrência de escorregamentos, por classe do parâmetro inverso do *Wetness Index*.

6.3 RESULTADOS DOS MÉTODOS ESTATÍSTICOS

A integração dos parâmetros seguiu à ordem estabelecida pelos índices de Área Abaixo da Curva (AAC), *Accountability (Acc)* e *Reliability (Rl)*, apresentados na tabela 6.1. Esses índices demonstram a relevância de cada fator condicionante no desenvolvimento dos escorregamentos. Nota-se que para alguns parâmetros, existe uma grande discrepância na sequência de integração dos mapas temáticos empregados, o que pode ser justificado pela fundamentação matemática de cada técnica. Por exemplo, o parâmetro unidade de relevo apresenta importância que varia de 1 para o *Rl* e 7 para *Acc*, e da mesma forma o inverso do *Wetness Index* mostra grau de relevância 1 para *Acc* e 6 para *Rl* e AAC. Por outro lado, a unidade litológica na escala 1:100.000 foi o parâmetro que não teve variação no grau de importância. Independente da abordagem, a ordem de integração obtida foi sempre 3, o que sugere uma robustez do parâmetro em relação as três técnicas empregadas. Apesar da variação do índice de relevância de 1 para AAC, 2 para *Rl* e 4 para *Acc*, o ângulo das encostas encontra-se sempre entre os fatores mais significativos, deixando evidente a sua importância para o modelo de suscetibilidade a escorregamentos da área.

Como consequência das discrepâncias encontradas, os resultados obtidos em cada uma das três técnicas foram hierarquizados e a média calculada foi novamente ordenada do

menor ao maior valor, classificando-se assim os fatores quanto a sua relevância ao processo de escorregamentos.

O valor da média obtido para os parâmetros unidade de relevo e inverso do *Wetness Index* foi exatamente o mesmo. Nesse caso, priorizou-se o parâmetro com melhor resultado em duas das três técnicas empregadas. Além disso, as observações de campo indicaram que as diferenças no relevo, em uma mesma unidade litológica, apresenta grande influência na ocorrência de escorregamentos. O resultado final da ordem de integração pode ser visto na Tabela 6.1. O desempate entre os fatores orientação das vertentes e unidade litológica na escala 1:100.000 foi realizado em função do primeiro apresentar ordem de integração 2 nas técnicas Acc e AAC, portanto com maior relevância que o segundo parâmetro, com ordem 3 nas três técnicas aplicadas.

Tabela 6.1: Relevância dos fatores condicionantes de acordo com a ordem de integração – média dos valores de sensibilidade de cada parâmetro de acordo com os índices *Accountability (Acc)*, *Reliability (Rl)* e Área Abaixo da Curva (AAC).

Parâmetros Analisados	***Accountability (Acc)***	***Reliability (Rl)***	**AAC**
	%	***%***	
Ângulo das Encostas	65,10	0,23	0,816
Orientação das Vertentes	87,33	0,11	0,753
Unidade Litológica 1:100.000	67,52	0,14	0,746
Unidade Litológica 1:25.000	61,67	0,14	0,721
Unidade de Relevo	30,72	0,30	0,697
Inverso do *Wetness Index*	92,40	0,07	0,630
Perfil das Encostas	36,97	0,06	0,509

	Hierarquização dos Parâmetros				**Ordem de Integração**
	Accountability (Acc)	***Reliability (Rl)***	**AAC**	**Média**	
Ângulo das Encostas	4	2	1	2,33	1
Orientação das Vertentes	2	5	2	3,00	2
Unidade Litológica 1:100.000	3	3	3	3,00	3
Unidade Litológica 1:25.000	5	3	4	4,00	3
Unidade de Relevo	7	1	5	4,33	4
Inverso do *Wetness Index*	1	6	6	4,33	5
Perfil das Encostas	6	7	7	6,67	6

A técnica de Área Abaixo da Curva também foi utilizada para definir a classificação do mapa de ângulo das encostas. Para tanto, utilizou-se o inventário de escorregamento completo como forma de avaliar a influência das diferentes divisões de classes desse

mapa de parâmetro na probabilidade de ocorrência de movimentos. Esse cartograma foi inicialmente classificado de duas formas, a primeira sucinta, em 8 classes, e a segunda, discriminada em 15 classes. O resultado do cálculo da AAC de cada classificação foi de 0,786 para o cartograma com 8 classes e de 0,822 para o cartograma de 15 classes. Devido à diferença significativa entre elas, testou-se uma terceira classificação intermediária com 12 classes, da qual se obteve o valor de 0,804 para a AAC (Tabela 6.2). Com base nestes resultados, foi utilizado o mapa ângulo das encostas classificado de 5° em 5°, com a ressalva de que as classes acima de 65° foram incluídas na classe anterior, dado que não havia ocorrência de escorregamento nessas classes. A tabela 6.2 apresenta as faixas de inclinação das classes e o valor da Área Abaixo da Curva para cada uma das diferentes classificações dos mapas de ângulo das encostas.

Tabela 6.2: Avaliação das diferentes classificações do mapa de ângulo das encostas em função da Área Abaixo da Curva.

Classificação do Mapa de Ângulo das Encostas (°)	Valor da AAC
0-5; 5-15; 15-25; 25-35; 35-45; 45-55; 55-65; 65-77.	0,786
0-5; 5-10; 10-15; 15-20; 20-25; 25-30; 30-35; 35-40; 40-45; 45-50; 50-55; 55-60; 60-77 (60-65; 65-70;70-77).	0,822
0-10; 10-15; 15-20; 20-25; 25-30; 30-35; 35-40; 40-45; 45-50; 50-60; 60-70; 70-77.	0,804

A partir da definição da ordem de integração, procedeu-se para soma algébrica dos mapas na sequência indicada, estando os cartogramas classificados de acordo com os pesos fornecidos pelo método estatístico do Valor Informativo. A tabela 6.3 apresenta esses valores para cada classe de todos os parâmetros avaliados.

Tabela 6.3: Valor Informativo (V.I.) calculado para cada classe dos parâmetros empregados na modelagem de suscetibilidade a escorregamentos.

Parâmetro	Classe	V.I.	Classe	V.I.
Ângulo das Encostas (°)	0-5	-2,488	35-40	3,287
	5-10	-1,679	40-45	3,609
	10-15	-0,964	45-50	3,817
	15-20	-0,269	50-55	3,810
	20-25	0,308	55-60	3,111
	25-30	1,083	60-77,07	2,905
	30-35	2,181		
Orientação das	Plano (-1)	-2,183	Sul (157,5 - 202,5)	1,226
	Norte (0 - 22,5/337,5 -	-2,197	Sudoeste (202,5 -	0,440

Vertentes	360)		247,5)	
	Nordeste (22,5 - 67,5)	-2,134	Oeste (247,5 - 292,5)	0,435
	Leste (67,5 - 112,5)	-1,988	Noroeste (292,5 - 337,5)	-0,571
	Sudeste (112,5 - 157,5)	0,322		
Unidade Litológica 1:100.000	Gnaisse Granítico	-0,637	Xisto	-1,581
	Itabirito	3,072	Filito	-3,000
	Metamáfica/ultramáfica	0,316	Metassedimentares	-3,000
	Quartzito	-0,563		
Unidade Litológica 1:25.000	Canga	2,258	Gnaisse Granítico	-0,607
	Formação Ferrífera	0,731	Metassedimentares	-2,000
	Pegmatito e Metachert	-2,000	Aluvião	-2,000
	Quartzito	-0,703	Debris de Deslizamento	-2,000
	Metamáfica/ultramáfica	0,074	Xisto	-0,591
	Filito	1,150	Hematita Compacta	-2,000
	Itabirito	3,539		
Unidade de Relevo	Colina	-3,000	Morro baixo	-1,520
	Morrote Baixo	-2,231	Morro Alto	-0,028
	Morro com vertente suavizada	-3,000	Serra	1,615
Inverso do Wetness Index	0	1,592	0,005 - 0,01	0,238
	0 - 0,0001	-2,198	0,01 - 0,1	0,627
	0,0001 - 0,001	-1,495	>0,1	0,001
	0,001 - 0,005	-0,474		
Perfil das Encostas	Convexo - Côncavo	2,563	Linear - Convexo	0,026
	Convexo - Linear	1,899	Côncavo - Côncavo	-0,029
	Convexo - Convexo	-0,003	Côncavo - Linear	2,071
	Linear - Côncavo	0,017	Côncavo - Convexo	2,578
	Linear - Linar	-0,028		

Foram produzidos três modelos finais, aqui considerados como aqueles que integram todos os parâmetros empregados na análise de suscetibilidade a escorregamento. O primeiro utiliza a unidade litológica na escala 1:25.000, o segundo este parâmetro na escala 1:100.00 e o último, desconsiderando a litologia, com o intuito de verificar a relevância desse parâmetro com relação aos demais. A tabela 6.4 apresenta os parâmetros e sua ordem de integração para os modelos produzidos.

Tabela 6.4: Modelos elaborados e analisados e ordem de integração de parâmetros para cada um deles.

Modelo Final	Etapa	Parâmetros Empregados
Modelo I	1	Âng. das Encostas + Orientação das Vertentes
	2	Âng. das Encostas + Orientação das Vertentes + Un. Litológica (1:25.000)
	3	Âng. das Encostas + Orientação das Vertentes + Un. Litológica (1:25.000) + Un. de Relevo

	4	Âng. das Encostas + Orientação das Vertentes + Un. Litológica (1:25.000) + Un. de Relevo + Inverso do *Wetness Index*
	5	Âng. das Encostas + Orientação das Vertentes + Un. Litológica (1:25.000) + Un. de Relevo + Inverso do *Wetness Index* + Perfil das Encostas
Modelo II	1	Âng. das Encostas + Orientação das Vertentes
	2	Âng. das Encostas + Orientação das Vertentes + Un. Litológica (1:100.000)
	3	Âng. das Encostas + Orientação das Vertentes + Un. Litológica (1:100.000) + Un. de Relevo
	4	Âng. das Encostas + Orientação das Vertentes + Un. Litológica (1:100.000) + Un. de Relevo + Inverso do *Wetness Index*
	5	Âng. das Encostas + Orientação das Vertentes + Un. Litológica (1:100.000) + Un. de Relevo + Inverso do *Wetness Index* + Perfil das Encostas
Modelo III	1	Âng. das Encostas + Orientação das Vertentes
	2	Âng. das Encostas + Orientação das Vertentes + Un. de Relevo
	3	Âng. das Encostas + Orientação das Vertentes + Un. de Relevo + Inverso do *Wetness Index*
	4	Âng. das Encostas + Orientação das Vertentes + Un. de Relevo + Inverso do *Wetness Index* + Perfil das Encostas

A avaliação dos resultados dos métodos estatísticos foi realizada sobre os modelos finais gerados na última etapa de integração, ou seja, etapa 5 para os modelos finais I e II e etapa 4 para o modelo final III, os quais serão denominados somente modelos I, II e III daqui em diante. A tabela 6.5 e a figura 6.22 mostram os valores da área abaixo da curva para as Curvas de Sucesso e Curvas de Predição, referente a cada etapa da integração de parâmetros. Em uma análise preliminar, nota-se que os valores obtidos para o modelo I são relativamente menores para o grau de ajuste (Curva de Sucesso) e maiores para a previsibilidade (Curva de Predição) do que aqueles encontrados no modelo II. Já o modelo III apresentou os piores valores para a Curva de Sucesso e valores intermediários para a Curva de Predição.

Com relação ao grau de ajuste dos modelos aos movimentos identificados na área de estudo, os valores da área abaixo da Curva de Sucesso indicam que o modelo II apresenta um valor ligeiramente maior que o modelo I e relativamente maior que o modelo III (Figura 6.23). É interessante notar que, a adição de novos parâmetros aumenta a qualidade dos modelos até a etapa 3 do modelo I (ângulo das encostas, orientação das vertentes, unidade litológica e unidade de relevo) e até a etapa 2 dos modelos II (ângulo das encostas, orientação das vertentes e unidade litológica) e III (ângulo das encostas, orientação das vertentes e unidade de relevo). A partir daí, os valores das Curvas de Sucesso permanecem constantes com a integração dos demais parâmetros. O fator que agregou mais qualidade aos modelos da etapa 1 foi a unidade

litológica na escala de 1:100.000 (etapa 2 do modelo II). O incremento na Curva de Sucesso do modelo I, com a adição da unidade litológica na escala de 1:25.000 (etapa 2), foi bem semelhante àquele notado no modelo III, com a adição da unidade de relevo (etapa 2).

Tabela 6.5: Valores obtidos para a Curva de Sucesso e de Predição, referente aos modelos parciais, a cada integração de parâmetros, e aos modelos finais.

Modelo	Etapa	Curva de Sucesso	Curva de Predição
Modelo I	1	0,865	0,867
	2	0,869	0,870
	3	0,872	0,861
	4	0,872	0,860
	5	0,872	0,860
Modelo II	1	0,865	0,867
	2	0,874	0,859
	3	0,875	0,853
	4	0,875	0,855
	5	0,875	0,855
Modelo III	1	0,865	0,867
	2	0,868	0,859
	3	0,868	0,858
	4	0,868	0,858

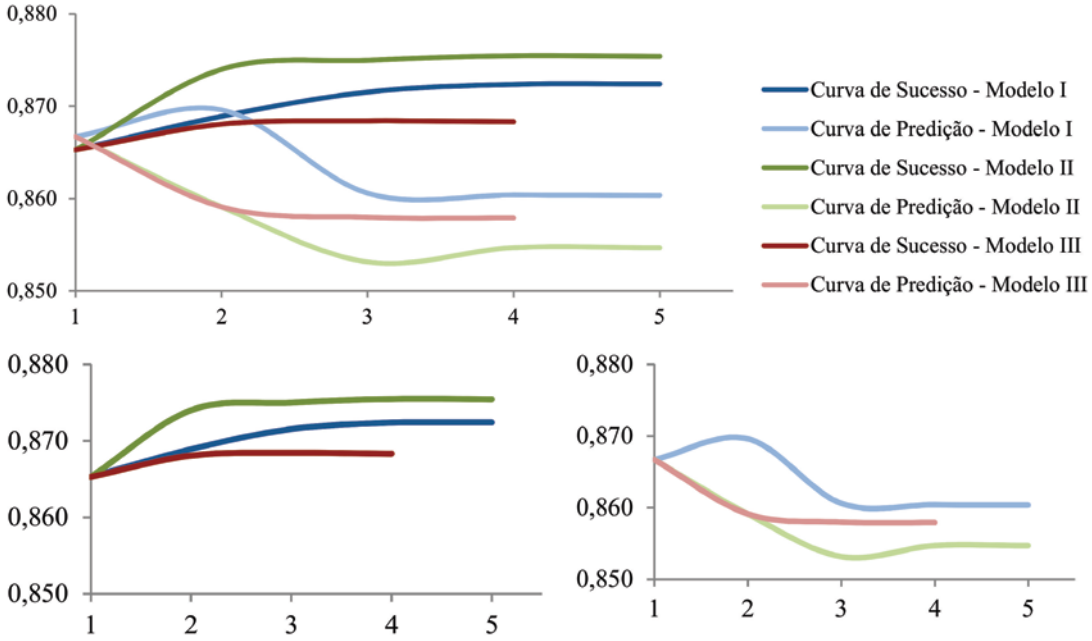

Figura 6.22: Valor da área abaixo da curva das Curvas de Sucesso e de Predição, para cada etapa de integração dos parâmetros, para cada um dos três modelos.

De acordo com esses resultados das Curvas de Sucesso dos três modelos, o emprego de somente dois parâmetros no modelo estatístico de suscetibilidade a escorregamentos para a área de estudo parece ser desaconselhável, visto que todos apresentaram qualidade inferior quando confrontado com um modelo que agrega três ou mais parâmetros.

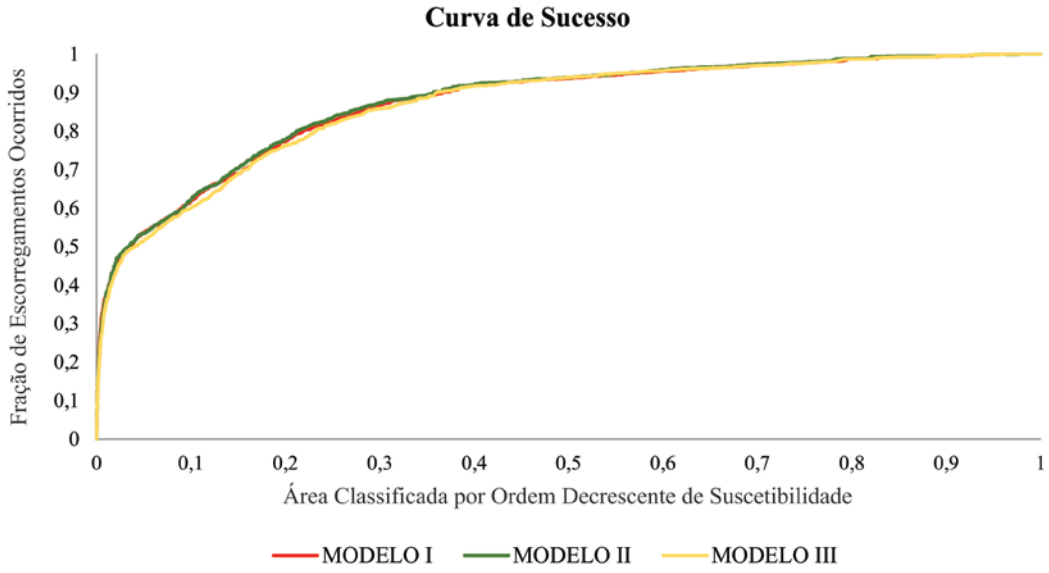

Figura 6.23: Representação gráfica da Curva de Sucesso para os três modelos produzidos.

No que diz respeito à capacidade de prever escorregamentos futuros (Figura 6.24), o modelo I apresenta resultado ligeiramente maior que o modelo III e relativamente maior que o modelo II. Ao contrário do que aconteceu com as Curvas de Sucesso dos modelos II e III, a integração de um novo fator ao modelo (etapa 2), respectivamente, unidade litológica na escala de 1:100.000 e unidade de relevo, provocou uma redução considerável de suas capacidades preditivas. O inverso ocorreu com o modelo I, o qual teve um aumento significativo de sua capacidade com a adição da unidade litológica na escala 1:25.000 (etapa 2), seguido por uma queda relevante após a integração da unidade de relevo ao modelo (etapa 3).

O fato dos valores de Curva de Predição dos modelos iniciais serem maiores que dos modelos finais, após a integração de todos os fatores, pode ser explicado por uma combinação de motivos, entre eles a partição do inventário de cicatrizes de escorregamentos. Ao realizar esse procedimento, é possível que o subconjunto separado para a execução do teste da capacidade preditiva contenha mais amostras de feições de

movimento que são melhores explicadas pelos dois primeiros fatores, para os casos dos modelos II e III, e pelos três primeiros fatores, para o modelo I. Aliado a isso, a não divisão do inventário em tipos específicos de movimento, translacional ou rotacional, também pode afetar essa avaliação, uma vez que são categorias de escorregamentos com características diferentes desencadeados por processos distintos. A interdependência dos parâmetros, tais como unidade litológica com unidade de relevo, também pode explicar esse comportamento.

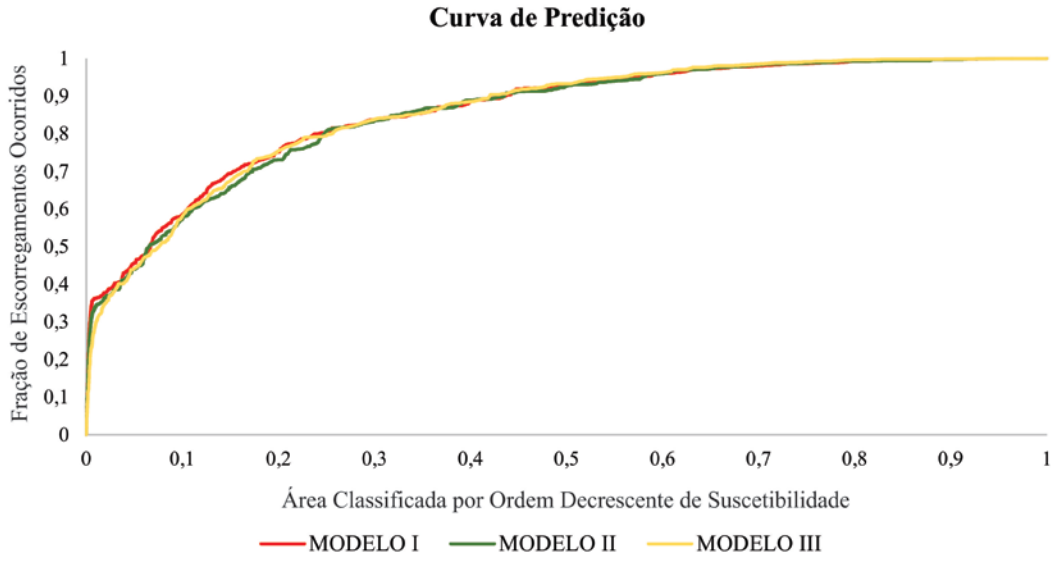

Figura 6.24: Representação gráfica da Curva de Predição para os três modelos produzidos.

De maneira geral, as diferenças entre os valores das Curvas de Sucesso e Curvas de Predição não são significativas, de modo a influenciar drasticamente a qualidade dos três modelos finais produzidos, sendo que ambos os modelos, em todas as etapas de integração encontram-se na faixa de valores muito satisfatório, de acordo com Guzzetti (2005). Apesar da qualidade observada no modelo III, a presença do parâmetro unidade litológica mostrou-se relevante para explicar a ocorrência de deslizamentos na área de estudo, sendo um fator que deve ser levado em consideração, quando possível.

Um modelo de suscetibilidade a escorregamento representativo para uma determinada área é aquele que apresenta valores altos e semelhantes para ambas as curvas de Sucesso e de Predição. Tal fato denota que um modelo exibe, ao mesmo tempo, altos graus de adequação e de capacidade preditiva. Dito isso, o modelo I em sua segunda etapa

(ângulo das encostas, orientação das vertentes e unidade litológica na escala 1:25.000) é o mais apropriado para explicar e prever deslizamentos na área de estudo.

Considerando-se que o mapa litológico na escala 1:25.000 é cartograficamente mais adequado a realidade, no que diz respeito à distribuição espacial das unidade litológicas, devido ao seu detalhamento, pode-se afirmar que aquelas cicatrizes de escorregamento que localizavam-se em litotipos diferentes nas duas escalas empregadas, foram erroneamente classificadas na escala 1:100.000. Esse fato carrega para o modelo informações incorretas quanto ao tipo de substrato rochoso em que determinado movimento se encontra.

O levantamento dessas feições, no inventário de treino, mostra que 24% da área das cicatrizes apresentaram discrepância quanto à classificação litológica, sendo que na quase totalidade das vezes o polígono que continha apenas um litotipo em uma escala, passou a conter duas ou mais na outra (Figura 6.25). Também houve casos em que a litologia mudou completamente (Figura 6.26), devido à melhoria na acurácia dos limites entre os litotipos, além é claro, da inclusão de unidades que não apareciam no mapa geológico de menor detalhe que se tornaram mapeáveis na escala 1:25.000 (Figura 6.27). Ainda que a diferença de classificação das unidades litológicas seja bastante considerável entre as duas escala do mapa litológico, no que se refere ao litotipo "itabirito", não houve nenhuma distinção na área total classificada com essa unidade. A perda da área de feições preenchidas por itabirito na escala 1:25.000 (Figura 6.26) foi compensada pelo ganho de área em outras cicatrizes (Figura 6.27).

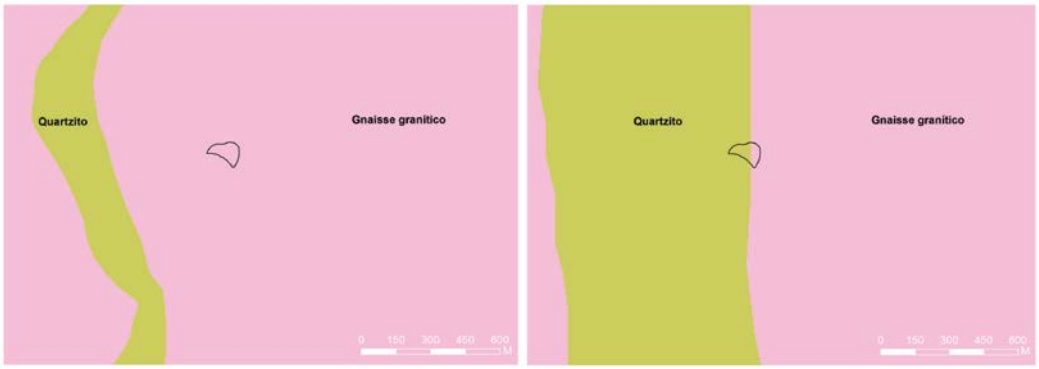

Figura 6.25: Polígono de cicatriz de escorregamento, contendo, no mapa litológico na escala 1:25.000, à esquerda, gnaisse granítico, e no mapa litológico na escala 1:100.000, à direita, gnaisse granítico e quartzito.

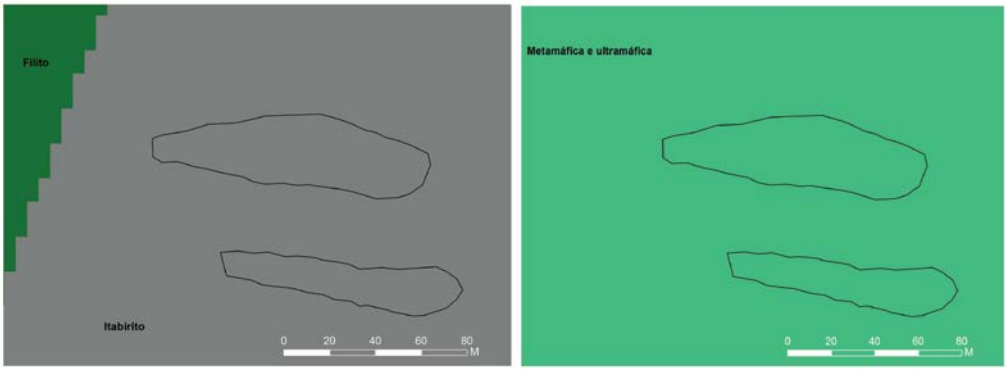

Figura 6.26: Polígono de cicatriz de escorregamento, contendo, no mapa litológico na escala 1:25.000, à esquerda, itabirito, e no mapa litológico na escala 1:100.000, à direita, outra litologia completamente distinta, rochas metamáficas e ultramáfica.

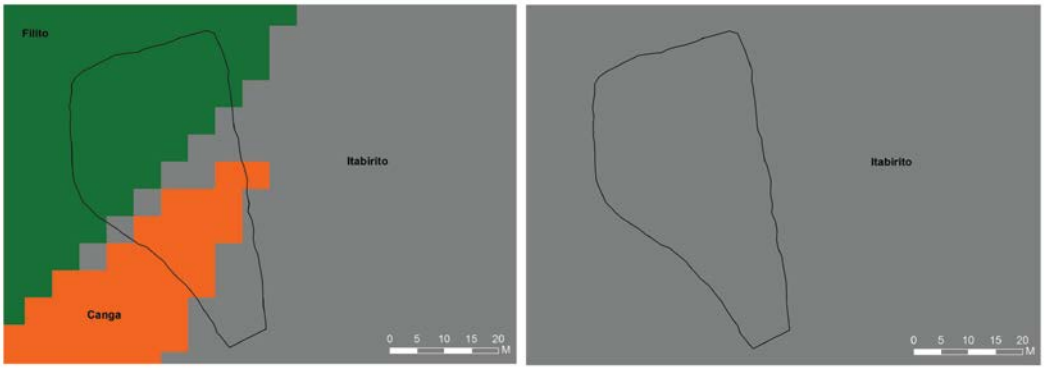

Figura 6.27: Polígono de cicatriz de escorregamento, no mapa litológico na escala 1:25.000, à esquerda, contendo itabirito e duas unidades litológicas – filito e canga - não encontradas no mapa litológico na escala 1:100.000, à direita, que contém somente o itabirito.

Além disso, a comparação entre os Valores Informativos, obtidos para as unidades litológicas existentes nas diferentes escalas, indica similaridade nos pesos calculados para as duas escalas (Figura 6.28). Tal fato denota que apesar do "erro" de classificação de 24% da área das cicatrizes referente aos litotipos, a relação entre as áreas deslizadas em cada litotipo com a área total de cada unidade litológica – o índice de suscetibilidade – não difere significativamente entre as diferente escalas.

A discrepância dos Valores Informativos observada no itabirito se deve ao fato que essa unidade ocupa uma área maior no mapa 1:100.000, contudo, ambas as escalas apresentam o mesmo peso relativo quando comparada com as demais unidades litológicas. Os Valores Informativos do xisto também se diferem pela diferença na área total ocupada pela unidade, sendo maior na escala 1:25.000. Entretanto, nesse caso o peso relativo dessa unidade em relação as demais não manteve uma uniformidade nas duas escalas avaliadas, o que provocou uma discrepância considerável na classificação

dos modelos final. O Valor Informativo calculado para a unidade de rochas metamáficas e metaultramáficas na escala 1:100.000 é quase cinco vezes maior que o Valor Informativo medido para a mesma unidade na escala de 1:25.000. Isso se deve, entre outros fatores, à classificação equivocada de cerca de 30% da área com essa unidade litológica, enquanto, na verdade, corresponde a outras unidades na escala de maior detalhe, a qual é considerada de maior acurácia em relação à primeira.

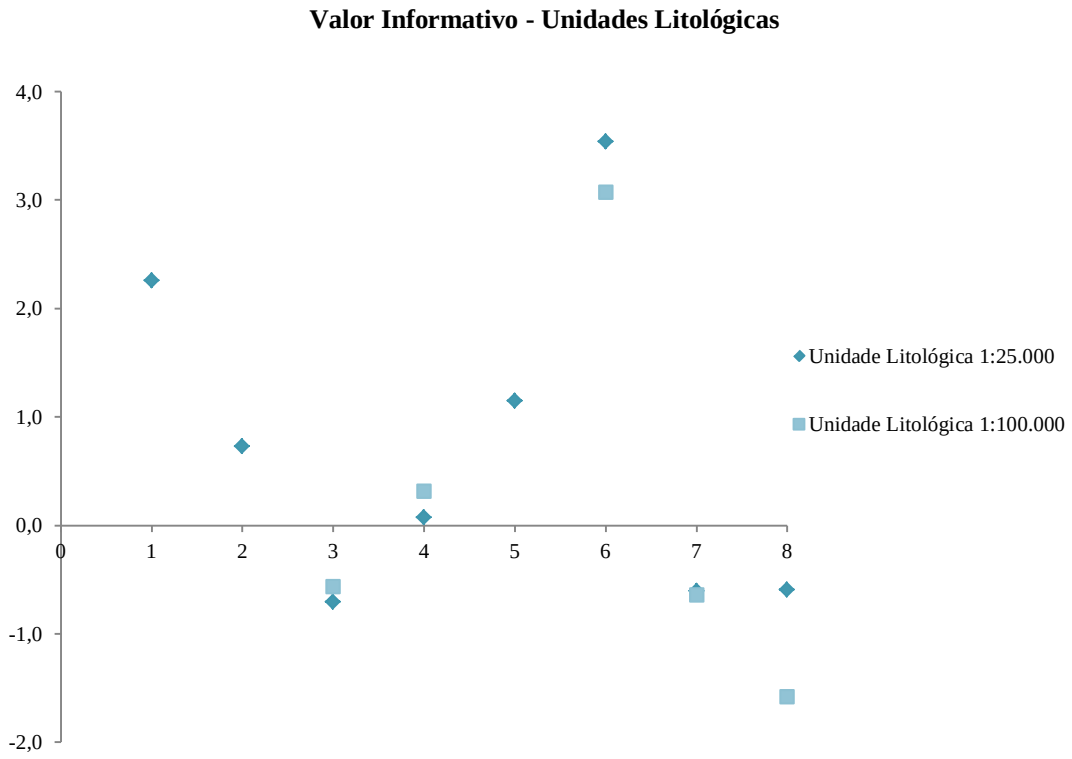

Figura 6.28: Relação entre os Valores Informativos obtidos para cada unidade litológica, para as diferentes escalas. 1 – Canga; 2 – Formação Ferrífera; 3 – Quartzito; 4 – Metamáfica e metaultramáficas; 5 – Filito; 6 – Itabirito; 7 – Gnaisse granítico; 8 – Xisto. As unidades 1, 2 e 5 são encontradas somente na escala 1:25.000.

Após a classificação dos três modelos em alta, média e baixa suscetibilidade a escorregamento, de acordo com as porcentagens citadas no capítulo 5, o modelo II apresenta maior diferença visual entre eles, com a menor área territorial ocupada pela classe de alta suscetibilidade. Os demais modelos mostram-se visualmente menos dispares, sendo que o modelo III exibe uma área maior de alta suscetibilidade, tratando-se do modelo mais conservador entre os três (Figuras 6.29 e 6.30). O modelo II aparenta possuir maiores áreas da classe de alta suscetibilidade, uma vez que ocorre a concentração desse grau de suscetibilidade em sua porção central, a qual corresponde à

unidade litológica de rochas metamáficas e metaultramáficas. Isso faz com que as áreas vermelhas saltem aos olhos nessa região e provoque uma falsa percepção de que esse modelo apresenta uma maior porção do seu território classificado como alta suscetibilidade.

Os três modelos possuem maiores áreas cobertas pela classe de baixa suscetibilidade a escorregamento, aproximadamente 43-44%, seguida pela média suscetibilidade, variando de 32 a 35% do território e, por fim, valores entre 21 e 23% da área de estudo estão cobertas pela alta suscetibilidade a escorregamentos (Figura 6.30). Apesar da pouca diferença percentual entre eles, as diferenças na distribuição espacial das classes é o que apresenta maior relevância na avaliação dos modelos.

A comparação e análise visual entre os três modelos finais permitiu distinguir três áreas onde as respostas dos modelos se diferem entre eles. A primeira e mais marcante é a região dentro da unidade litológica com predomínio de rochas metamáficas e metaultramáficas. O modelo II, neste domínio, se mostra muito conservador, com maiores áreas classificadas como alta e média suscetibilidade a escorregamento em relação aos outros dois modelos. Fato que merece atenção é o contato abrupto entre diferentes classes dentro e fora da abrangência dessa unidade litológica perfeitamente coincidente com o seu limite (Figura 6.31).

Desse modo, a classe de alta suscetibilidade a escorregamento no modelo II foi controlada pelas litologias mais relevantes, na escala de 1:100.000, que são elas: o itabirito e as rochas metamáficas e metaultramáficas. Esta última apresenta grande extensão territorial, que juntamente com o itabirito, deixaram muito bem delimitado uma área com predomínio de alta suscetibilidade a escorregamento coincidente com limite do domínio dessas unidades. Essa concordância nítida entre o resultado final e somente um dos parâmetros empregados no cálculo do índice de suscetibilidade, sendo esse fator somente o terceiro em relevância, provoca alguns questionamentos, uma vez que a mesma situação não foi explicitamente observada nos outros dois modelos.

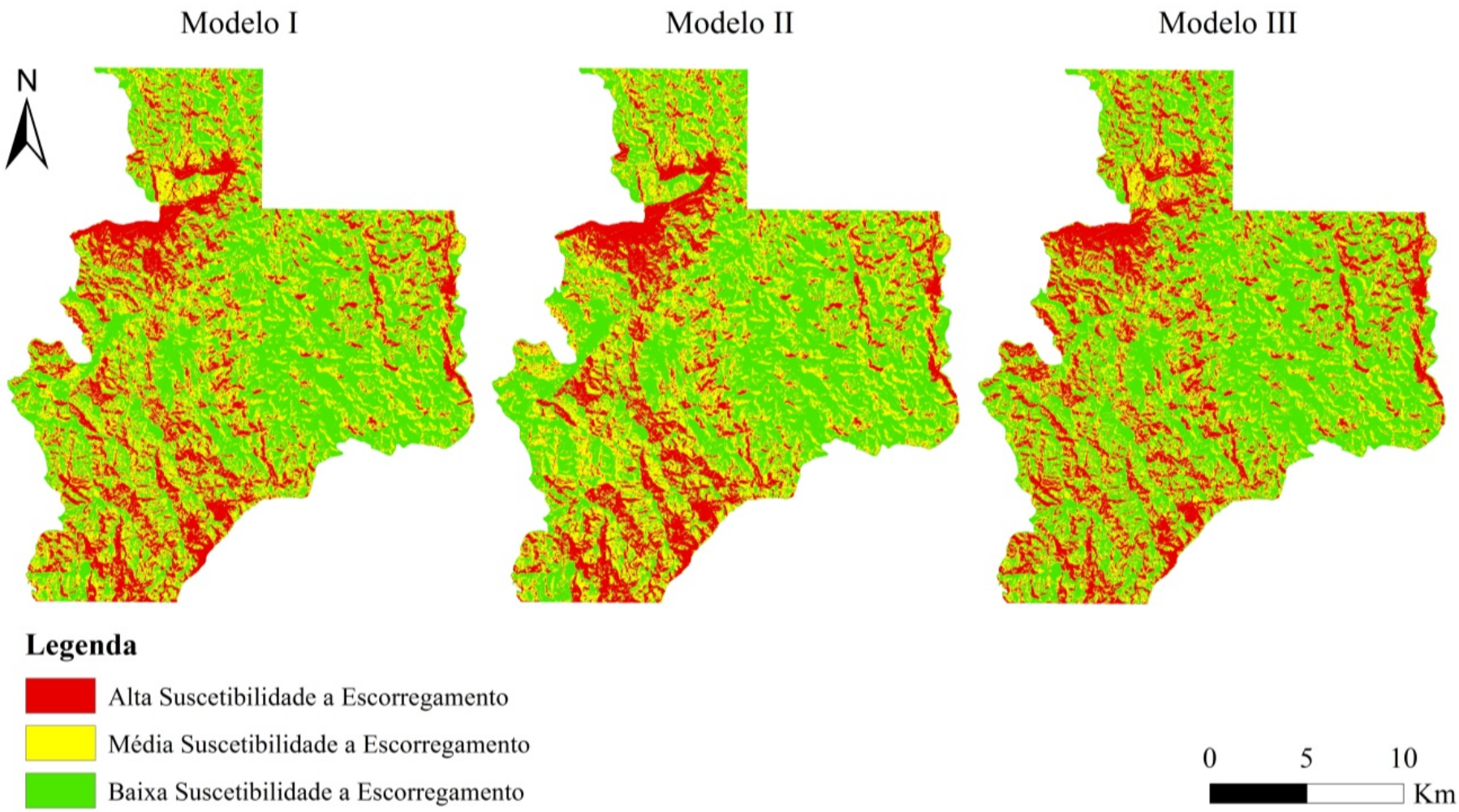

Figura 6.29: Comparação visual da classificação final dos três modelos de suscetibilidade a escorregamento: vermelho - alta suscetibilidade; amarelo - média suscetibilidade; e verde - baixa suscetibilidade.

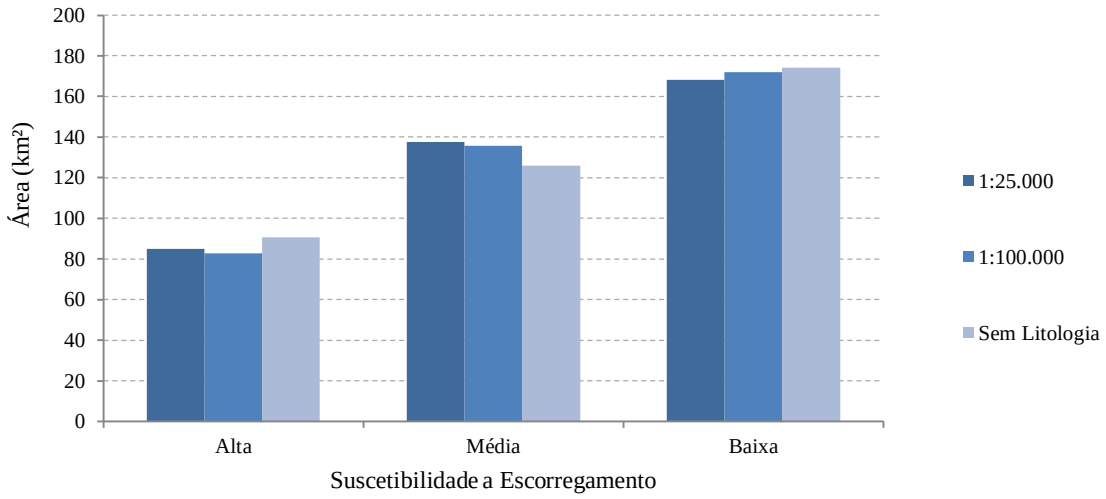

Figura 6.30: Gráfico com a distribuição em área das classes de suscetibilidade a escorregamento dos três modelos elaborados.

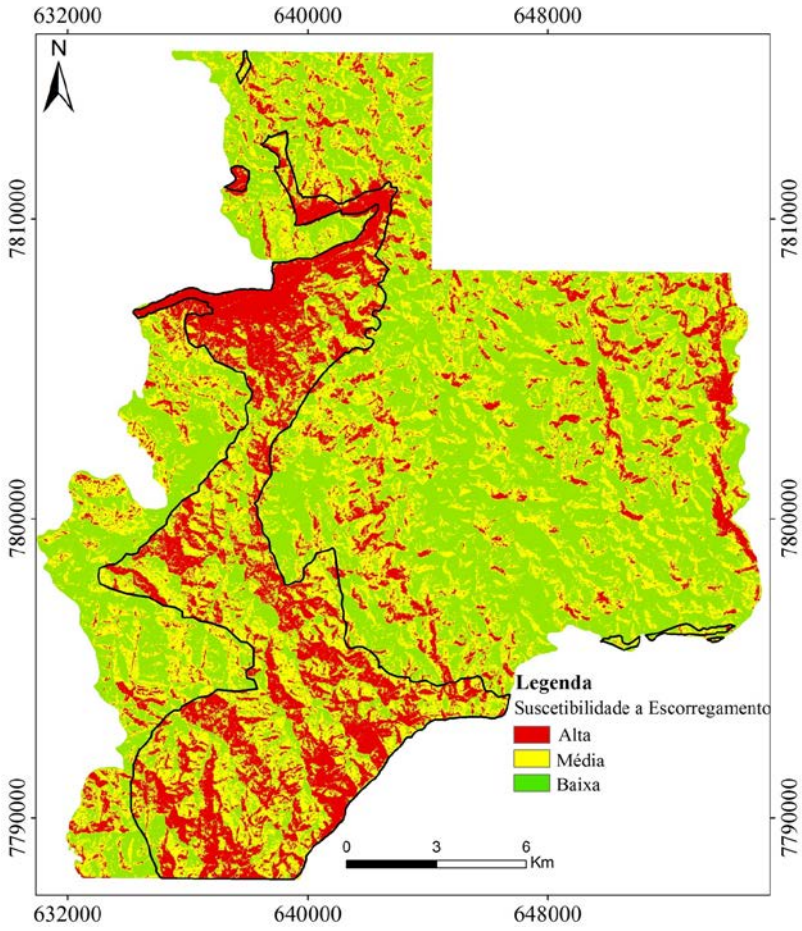

Figura 6.31: Modelo de suscetibilidade a escorregamento elaborado com a utilização do parâmetro unidade litológica na escala 1:100.000. A influência das litologias – delimitado em preto – com maiores Valores Informativos é bem marcante nesse modelo.

Ainda, relativamente à influência do parâmetro litologia nos resultados dos modelos, a região da Serra da Piedade – composta, próxima à sua crista, basicamente pelos itabiritos e, em suas vertentes, pelas rochas metamáficas/metaultramáficas – apresenta mais unidades de terreno classificadas como alta suscetibilidade a escorregamento nos modelos I e II do que no modelo III. Esse fato expressa a preponderância da unidade litológica na classificação final do modelo e a importância de incluí-la nas análises desse tipo.

Ao confrontar os modelos I e III, observa-se que, de modo geral, esse último classifica como alta suscetibilidade a escorregamento áreas que o primeiro modelo considera como média suscetibilidade. Embora menos frequente, também há ocorrência de áreas classificadas como baixa suscetibilidade pelo modelo I e média suscetibilidade pelo modelo III. A porção de território que esse fato é bastante evidente se encontra próximo ao limite oeste do município, que corresponde à segunda área com distinções bem marcadas entre os três modelos. Nesse local, nota-se que o parâmetro orientação das vertentes comanda a classificação do terreno com classes mais altas no modelo III do que no I (Figura 6.32). Conforme dito anteriormente, as classes de maior relevância desse fator são sudeste, sul, sudoeste e oeste, sendo as duas primeiras de maior importância.

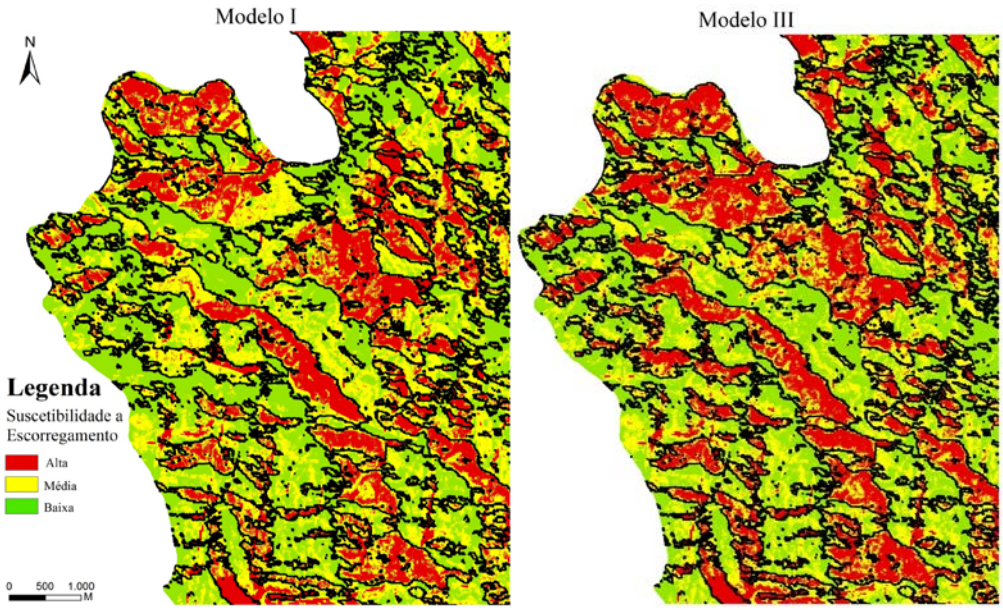

Figura 6.32: Comparação entre a classificação final dos modelos de suscetibilidade I e III. A influência das classes de orientação de vertentes – delimitado em preto – com maiores Valores Informativos é significativa no resultado do modelo III, quando comparado com o modelo I.

O terceiro domínio onde os modelos apresentam distinções corresponde às porções norte e leste do território, fora da unidade litológica de rochas metamáficas e metaultramáficas. Nesse domínio, os modelos I e II se mostram muito semelhantes, com pequenas diferenças no limite das classes de média para alta, sendo que o primeiro modelo exibe áreas maiores classificadas como alta suscetibilidade a deslizamento. Já o modelo III exibe limite similar entre baixa e média suscetibilidade, e se difere consideravelmente dos outros dois modelos na distribuição da área da classe de alta suscetibilidade, sendo bastante conservador na sua categorização de classes.

Ao se comparar as áreas ocupadas por unidades de terreno classificadas como alta, média e baixa suscetibilidade a escorregamento, a cada etapa do processo de integração dos parâmetros, percebe-se um aumento da área de média suscetibilidade aproximadamente na mesma proporção da diminuição da área de baixa suscetibilidade quando se acrescentou a litologia e em seguida a unidade de relevo. Isso ocorre tanto nos modelos I e II, que integram o parâmetro litologia, quanto no modelo III, que não utiliza esse fator. Portanto, essa tendência de variações nas classes parece não ter dependência com as unidades litológicas e sim, com um eventual aumento na qualidade do modelo.

A relação entre a área de alta suscetibilidade a escorregamento e a área total mapeada não apresenta variações consideráveis a cada etapa de integração de parâmetro. Exibe diminuição pouco significativa nos modelos I e II, e ligeiro aumento no modelo III ao se adicionar o fator unidade de relevo. Entretanto, a análise visual dos modelos mostra uma redistribuição das classes de alta suscetibilidade, com aumento concentrado nas regiões com predomínio de serras – unidade de relevo que apresenta maior índice de suscetibilidade para esse parâmetro.

A avaliação da classificação final dos três modelos permite distinguir, de modo geral, uma grande porção do território onde a concentração de unidades de terreno classificadas como alta suscetibilidade a escorregamentos é notória. Trata-se da área central e oeste da Serra da Piedade, onde se sobrepõem as classes com os mais altos índices de suscetibilidade de três fatores de grande relevância: a orientação das vertentes – sul, sudoeste e sudeste; a litologia – itabirito e rocha metamáficas/metaultramáfica; e a unidade de relevo – serra. A discriminação de unidades de terreno de média ou mesmo de baixa suscetibilidade, dentro

dessa grande área de alta suscetibilidade, pode ser conseguida por meio da melhora da qualidade e resolução do MDE utilizado para produzir as bases cartográficas, da atualização constante do inventário com a identificação de feições mais recentes, e também recorrendo ao detalhamento das unidades de relevo com o auxílio de fotointerpretação e do conhecimento técnico de especialistas geomorfólogos.

6.4 VALIDAÇÃO DOS MODELOS DE SUSCETIBILIDADE EM CAMPO

De modo geral, o modelo I mostra-se mais coerente com as observações de campo, representando, quase sempre, um meio termo entre os outros dois modelos no que se refere à distribuição espacial das classes alta, média e baixa. Levando em consideração que a avaliação da classificação final dos modelos e sua coerência com as características *in situ* apresenta certo grau de subjetividade, deu-se destaque para aquelas divergências significativas para escala de trabalho, e também às distinções que possam incorrer em consequências econômicas e sociais devido ao erro de classificação, tal como áreas classificadas como baixa suscetibilidade quando na realidade apresentam atributos que a classificaria como de alta suscetibilidade a escorregamento.

A verificação de campo não indicou, em nenhum dos modelos, inconsistências consideráveis no que se refere a erros graves de classificação – área de alta suscetibilidade classificada como baixa e vice-versa – dentro da precisão gráfica admissível. Entretanto, de modo geral, o modelo III mostrou incoerências em mais de 50% da área vistoriada em campo, considerando-se o ponto em si e adjacências observadas. Já os modelos I e II exibem aproximadamente 22% e 37% de inconsistências, respectivamente.

As unidades de terreno no interior e a oeste do domínio das rochas metamáficas e metaultramáficas apresentam com mais frequência, diferenças na classificação de suscetibilidade a escorregamento nos pontos visitados em campo e arredores. Os modelos que desempenham piores resultados são o II e III, exibindo aproximadamente 20% e 30% do território no interior e a oeste, respectivamente, do referido domínio litológico, com discordância entre a classificação e as características do terreno no ponto avaliado. Entretanto, essas divergências são relativas às diferenças entre o limite da classe de média

para alta suscetibilidade, portanto trata-se de um critério que depende do nível de conservadorismo que se pretende dar ao mapa final da área.

As demais porções do mapa, a norte e a leste do domínio das rochas metamáficas e metaultramáficas, mostram resultados mais coerentes com a realidade e menos divergentes entre os três modelos. As pequenas diferenças – muitas vezes desprezíveis na escala de trabalho – entre o limite da classe média para alta também são relativas ao grau de conservadorismo aplicado ao modelo. As figuras 6.33 a 6.36 mostram exemplos de áreas onde isso ocorre, com um detalhe das classes de suscetibilidade dos modelos I e III.

Figura 6.33: Vista do ponto 42, visada NE. Ver figura 6.34.

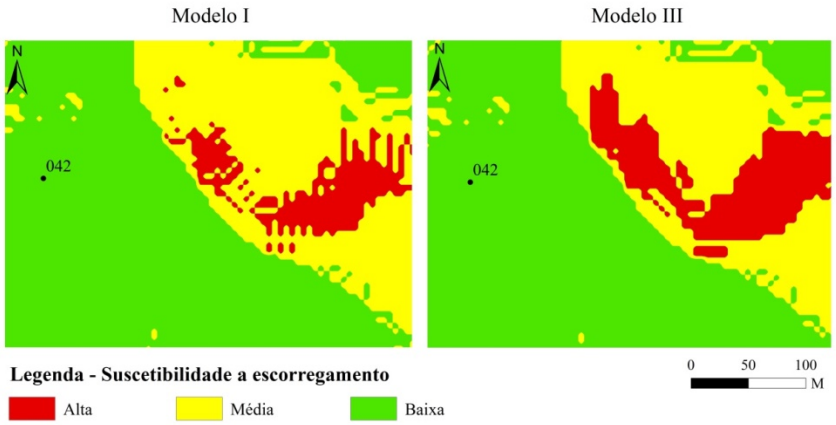

Figura 6.34: Resultados dos Modelos I, à esquerda, e III à direita, que mostram a diferença entre as classes média e alta, sendo o segundo modelo mais conservador.

Figura 6.35: Vista do ponto 43, visada ENE. Ver figura 6.36.

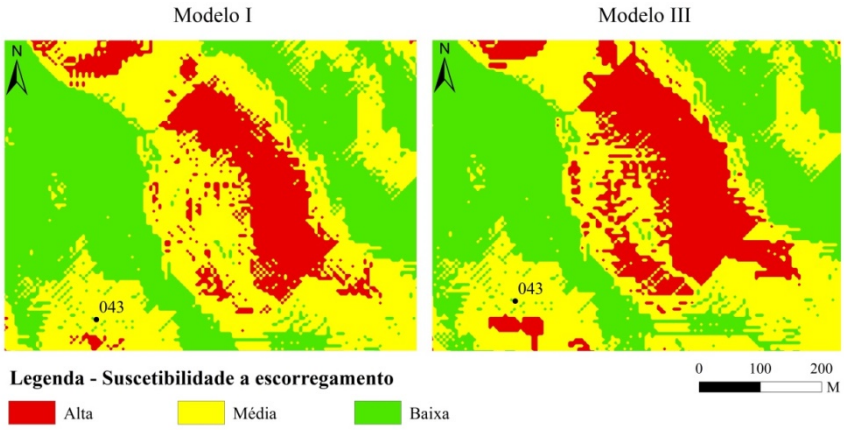

Figura 6.36: Resultados dos Modelos I, à esquerda, e III à direita, que mostram a diferença entre as classes média e alta, sendo o segundo modelo mais conservador.

Nota-se, via de regra, tanto pela análise visual dos modelos quanto pelas características do terreno avaliadas em campo, que os modelos I e II são bastante semelhantes nas porções leste e norte da área de estudo, sendo que o modelo III se difere nas áreas classificadas como alta suscetibilidade, mais abrangentes nesse último modelo (Figuras 6.34 e 6.36).

No que concerne às unidades de terreno no interior e a oeste do domínio das rochas metamáficas e metaultramáficas, os modelos I e III são mais semelhanças entre si, no que se refere aos limites das classes, do que com o modelo II, que a oeste, apresenta áreas restritas de alta suscetibilidade a escorregamento em comparação com demais (Figura 6.37). Esse fato pode ser explicado de acordo com os resultados obtidos para os índices de suscetibilidade e probabilidades condicionadas para o mapa litológico na escala 1:100.000. Para esta escala, um escorregamento tem probabilidade de ocorrência oito vezes maior na

unidade litológica “rochas metamáficas e metaultramáficas” do que na unidade litológica “xisto”, a qual é o litotipo predominante na região oeste da área de estudo.

O Valor Informativo calculado para as duas unidades também exprime a diferença dos pesos entre elas, correspondendo a 0,316 para as rochas metamáficas e metaultramáficas e -1,581 para o xisto – unidade menos relevante dentro desse parâmetro. A grande diferença entre esses valores, a qual não é observada no mapa de unidades litológicas na escala 1:25.000, se deve ao agrupamento de unidades litológicas na escala de 1:100.000 (itabirito, formação ferrífera e rocha metamáficas/metaultramáficas), devido ao grau de detalhamento do mapeamento (Figura 6.38). A relevância dos litotipos itabirito e formação ferrífera no mapa de unidade litológicas na escala de 1:25.000, a qual é bastante considerável nessa escala, foi transferida para somente uma unidade – rocha metamáficas/metaultramáficas – no mapa litológico na escala de 1:100.000.

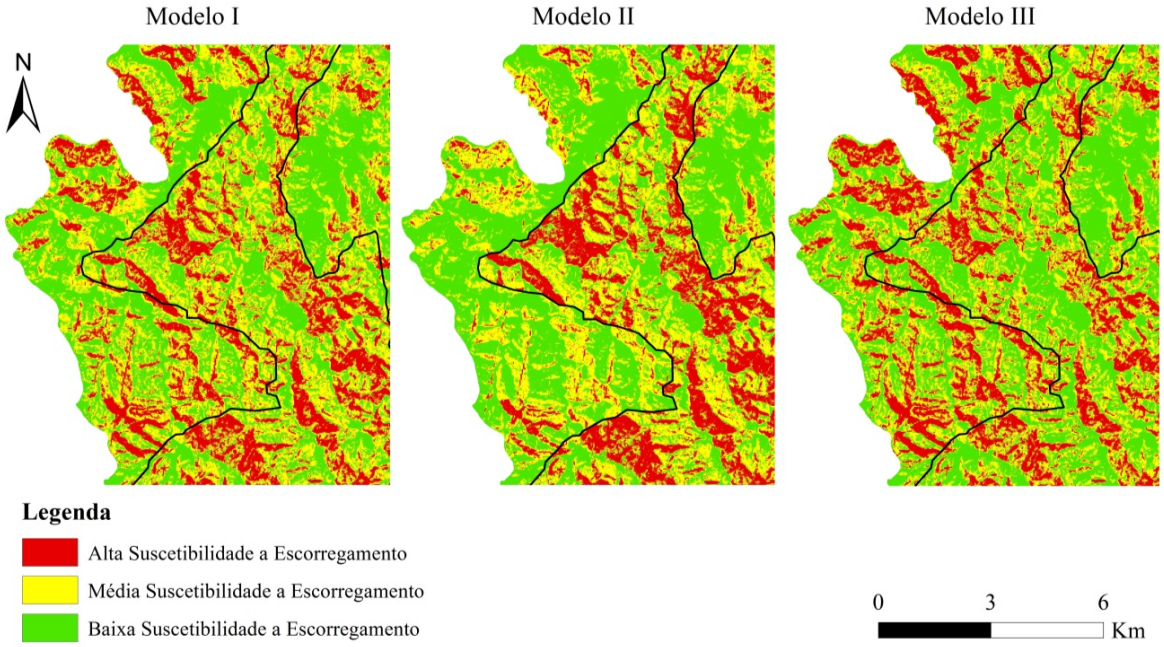

Figura 6.37: Comparação entre os três modelos elaborados, com detalhe na região oeste da área de estudo, no limite entre as unidades litológicas rocha metamáficas/ultramáfica e xisto.

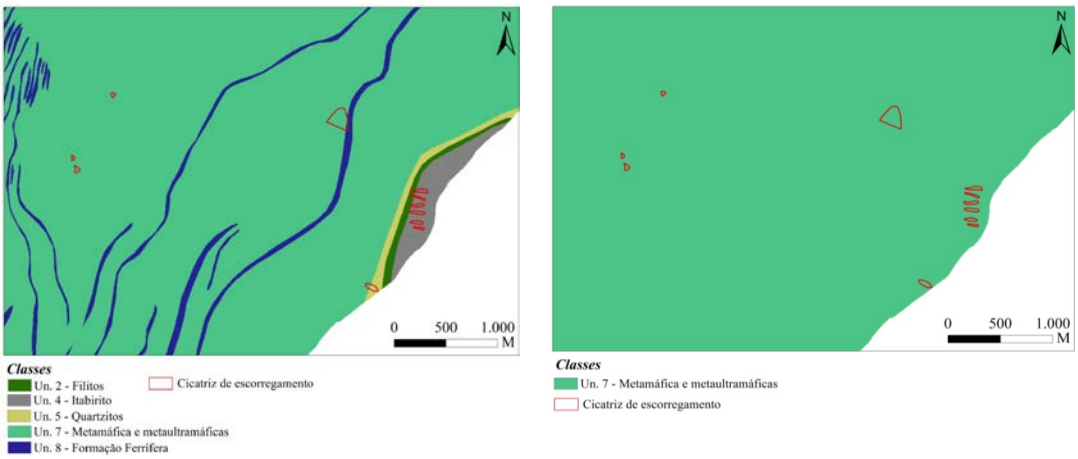

Figura 6.38: Agrupamento de unidades litológicas no mapa na escala de 1:100.000 (à direita) e a ocorrência de feições de escorregamentos em unidades litológicas diferentes (formação ferrífera e itabirito) no mapa litológico na escala de 1:25.000 (à esquerda).

Uma limitação, comum aos modelos produzidos, é a classificação de áreas com exposição rochosa como alta suscetibilidade a escorregamento. Tal fato poderia representar a realidade, se não fosse pelas características da rocha. Apresentam mergulho geral da foliação no sentido oposto ao da encosta (Figura 6.39a), e apesar de possuir outras descontinuidades, tais como fraturas, possibilitando a delimitação de blocos de rocha que podem se romper por cunha, ou simplesmente por queda ou tombamento (Figura 6.39b), os dados de entrada utilizados na modelagem não consideram esses fatores. Além disso, os modelos foram treinados para as características dos escorregamentos típicos em solo, translacionais ou rotacionais. Portanto esse resultado foi totalmente influenciado pela relevância das classes de parâmetros na qual a área com paredão rochoso está inserida, sendo elas altas declividades e orientação das vertentes para sudoeste e oeste. Esses fatores não são determinantes na explicação dos tipos de movimentos a que um maciço rochoso pode estar sujeito. A correção dessa classificação equivocada pode ser feita manualmente, nas áreas onde os grandes afloramentos rochosos forem observados, ou por meio da inserção de parâmetros que possam descaracterizar o tipo de escorregamento estudado nessas áreas. Exemplos seria o mapa de espessura dos solos – os quais são de difícil obtenção para áreas mais vastas – ou o mapa de solos em escala adequada, onde esses locais podem estar descritos como afloramento rochoso ou solo litólico.

Figura 6.39: Características do maciço rochoso no limite leste da área de estudo, classificado como alta suscetibilidade a escorregamentos. À esquerda (a), observa-se a foliação da rocha em sentido oposto ao da vertente, que varia de vertical para oeste/sudoeste. À direita (b), continuação do mesmo paredão de quartzito, exibindo família de fraturas verticais e horizontais, que em conjunto com a foliação podem delimitar blocos, os quais tem o potencial de se movimentar.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES

A carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa é uma importante ferramenta no estudo de identificação de áreas propensas ao desenvolvimento desses fenômenos naturais, bem como no processo de ordenamento territorial, a fim de se evitar as consequências socioeconômicas relacionadas. Tal instrumento pode orientar a direção da expansão urbana fundamentada nas limitações impostas pelas características do meio físico.

A possibilidade que uma determinada unidade de terreno possui em sediar um escorregamento pode ser obtida por diversos métodos, desde análises qualitativas até o uso de cálculos matemáticos mais complexos. Todas elas são formas de descrever a realidade, as quais devem ser compatíveis com a escala de mapeamento e com os objetivos do trabalho. Um modelo é uma simplificação da realidade, retratada por meio de seus elementos essenciais, ou seja, deve excluir o que não é relevante para a caracterização do fenômeno conforme a finalidade definida. Apesar de nenhum modelo ser a representação exata da realidade, eles devem ser adequados para atender plenamente as necessidades para as quais foram desenvolvidos. Portanto, a avaliação dos parâmetros relacionados ao condicionamento dos movimentos gravitacionais de massa e da qualidade do modelo produzido é indispensável para atestar a compatibilidade do produto com a sua função.

Os métodos de modelagem estatística têm se mostrado bastante adequados ao mapeamento sistemático em escala municipal, tanto no que se refere à qualidade da informação gerada, quanto ao custo-benefício de sua aplicação com relação ao tempo e aos recursos financeiros demandados. Umas das maiores restrições para a aplicação desses métodos de maneira satisfatória é a ausência das informações básicas em escala compatível, entre elas o mapeamento geológico. Uma vez que tal fator pode apresentar grande relevância no desencadeamento de diversos tipos de movimento de massa, omitir essa informação pode resultar em mapas de suscetibilidade pouco coerentes com a realidade. Outra grande limitação do emprego dos métodos estatístico é a necessidade de um inventário de escorregamentos.

Este trabalho avaliou a relevância de seis parâmetros no desenvolvimento de processos de escorregamento e a influência de duas escalas de mapas geológicos, 1:25.000 e 1:100.000. Utilizou-se somente a informação da litologia, a qual foi agrupada em unidades com o mesmo comportamento frente aos escorregamentos. Para tanto, foram produzidos três modelos e os resultados apresentados são oriundos da comparação entre eles. O modelo I foi elaborado com as unidades litológicas na escala 1:25.000, o modelo II com a escala de 1:100.000 e o modelo III sem a informação das unidades litológicas.

De modo geral, os modelos e os parâmetros avaliados apresentaram resultados coerentes com os esperados, de acordo com o conhecimento geral sobre a ocorrência de escorregamentos em áreas com geomorfologia e geologia semelhantes. Um exemplo disso é a grande predisposição das áreas compostas pelos itabiritos em sediar movimentos de massa.

De acordo com as técnicas de análise de sensibilidade, dos seis parâmetros avaliados, aqueles que melhor caracterizam os escorregamentos da área de estudo são: ângulo das encostas, orientação das vertentes e unidades litológicas. As unidades de relevo, apesar de não agregarem significativamente ao desempenho dos modelos, ainda assim representam uma informação importante para a explicação do fenômeno analisado. Já o inverso do *Wetness Index* não apresentou nenhuma influência nas curvas de validação – Sucesso e Predição – e mostrou pouca relevância no desencadeamento de deslizamentos. Para esses dois últimos parâmetros, principalmente para as unidades de relevo, é possível que uma melhora no detalhamento de suas classes faça com que sua integração ao modelo forneça resultados mais expressivos, demostrando sua maior influência no processo. Os dados de perfil das encostas não apresentaram importância na qualidade de nenhum dos três modelos. Além disso, tal parâmetro pode ser considerado irrelevante uma vez que seu valor de AAC (0,509) indica a aleatoriedade dos dados, os quais podem ser desconsiderados da análise.

A avaliação da qualidade, a análise visual e a validação de campo dos três modelos mostram que a utilização de mapas litológicos em escala menor que a pretendida, bem como a não utilização da litologia podem gerar modelos semelhantes àquele elaborado com esse mapa na escala adequada. Uma possível explicação para esse fato é a utilização de

outros parâmetros que apresentam certo grau de correlação com a geologia, como por exemplo, as unidades de relevo, portanto quando a informação dos domínios geomorfológicos é inserida aos modelos, fornece basicamente os mesmos padrões que eles já conhecem. Os três modelos produzidos, em todas as etapas de integração de parâmetros apresentaram resultados de qualidade muito bons, com valores das curvas de sucesso e predição acima de 0,850. Entretanto, é importante ressaltar que a pouca quantidade de escorregamentos identificados, ou seja, o baixo valor da relação entre as áreas com deslizamentos e a área total de estudo, tem influencia direta em todos os cálculos dos métodos de execução e validação utilizados.

O grau de ajuste dos modelos aos escorregamentos cadastrados na área de estudo, identificado pela Curva de Sucesso, indicou que modelo II teve uma melhora significativa em seu desempenho com a adição da informação de unidades litológicas na escala de 1:100.000. Já o modelo I teve um incremento de qualidade bastante tímido com a inserção dessa informação na escala 1:25.000, bem como o modelo III, quando a este último se acrescentou os dados das unidades de relevo. Consequentemente, o modelo final II apresentou maior valor de Curva de Sucesso que os modelos finais I e III.

Já os resultados encontrados para a Curva de Predição definem o modelo I como aquele com a melhor capacidade de prever escorregamentos futuros, inclusive com a melhora dessa capacidade ao se acrescentar os dados de unidade litológica (1:25.000). O modelo II sofreu uma queda em seu desempenho com a integração da unidade litológica (1:100.000), do mesmo modo que o modelo III com a adição das unidades de relevo.

Quanto mais detalhada a escala e a qualidade das informações que subsidiam os modelos estatísticos, mais precisos são os resultados produzidos. Dessa forma, é inquestionável que o Modelo I é o mais adequado para representar a suscetibilidade a escorregamentos para a área de estudo. Em vista disso, a avaliação da utilização do mapa litológico na escala 1:100.000 em modelos de suscetibilidade foi feita tendo como padrão os resultados do modelo I.

De acordo com os resultados dos métodos estatísticos de validação, a utilização de um mapa de unidades litológicas na escala de 1:100.000 não apresenta prejuízos na qualidade

do modelo final quando comparado com aquele na escala de 1:25.000. O valor da Curva de Sucesso do Modelo II é superior aos valores dessas curvas para os modelo I e III. Além disso, apesar da integração do mapa de unidade litológica na escala de 1:100.000 ter reduzido a capacidade preditiva do Modelo II (etapa 2), essa mesma redução foi observada com a adição do mapa de unidades de relevo ao Modelo III (etapa 2). A diminuição desses valores pode não ter relação direta com a qualidade desses modelos e ser explicada, entre outras razões, pela dependência condicional entre os parâmetros e a divisão do inventário, sendo que um grupo pode conter mais escorregamentos de um determinado tipo – rotacional – que o outro. Portanto, o emprego do mapa de unidades litológicas em escala de menor detalhe que a pretendida é importante para agregar informações imprescindíveis aos modelos de suscetibilidade, principalmente em locais onde a influência da geologia no condicionamento dos escorregamentos seja bem conhecida.

A análise visual geral do modelo II mostra uma delimitação muito marcada pela unidade litológica "rocha metamáficas e metaultramáficas". A primeira vista, esse fato é questionável e pode limitar os resultados desse modelo, visto que os outros dois não apresentaram o mesmo comportamento. Isso se deu devido a união, na escala 1:100.000, de litotipos relevantes para ocorrência de deslizamentos – canga, formação ferrífera e as rochas metamáficas/metaultramáfica – as quais são distinguíveis e individualizadas na escala 1:25.000. Consequentemente, o índice de suscetibilidade obtido para cada unidade na escala de detalhe foi transmitido para somente uma unidade – metamáficas/metaultramáficas – na menor escala. Para sanar as dúvidas sobre a real importância dessa unidade sobre os movimentos inventariados, recomenda-se um levantamento de campo detalhado de suas características geotécnicas e a identificação *in loco* da unidade litológica onde as feições cadastradas, de fato, se encontram.

É inegável a ampla influência que o inventário de escorregamentos carrega para o desenvolvimento dos modelos estatísticos de suscetibilidade. A localização e o tamanho das feições exerce controle direto nos pesos calculados para cada parâmetro. Consequentemente, a utilização sistemática dessa abordagem para o mapeamento de suscetibilidade pode ficar bastante prejudicada em locais onde os inventários não são satisfatórios ou mesmo inexistentes. Posto que os métodos estatísticos são procedimentos quantitativos muito simples de serem aplicados, abrir mão desse recurso poderia recair em

análises subjetivas. Assim, por mais reduzido que seja o mapa de escorregamentos, sua precisão e qualidade não devem ser negligenciadas, uma vez que suas informações, muitas vezes, são a única forma de se obter dados quantitativos a respeito da suscetibilidade a escorregamento de uma determinada região.

Uma técnica comumente empregada para contornar a ausência de cicatrizes de deslizamento em uma determinada área é a obtenção dos índices de suscetibilidade em uma dada área denominada "piloto", a qual apresenta características geológicas e geomorfológicas semelhantes a da área de interesse, com posterior aplicação desses índices na área de estudo. Tal método pode levar a generalizações equivocadas, quanto maior a complexidade geológico-geotécnica e geomorfológica do local, entretanto, em alguns casos, podem se mostrar coerentes com a realidade da área. Um trabalho que compare essas duas abordagens poderia indicar os prós e contras de cada uma delas.

A despeito dos resultados dos métodos estatísticos apresentarem bons índices para o modelo produzido com a unidade litológica em menor detalhe, eles carregam as limitações do inventário. Além disso, a comparação visual com o modelo elaborado com a escala adequada mostra-se contraditória, ora muito semelhante e coerente, ora muito incompatível, apesar de ambos serem capazes de prever, em maior ou menor grau, escorregamentos futuros. Devido a essa contradição entre a alta qualidade matemática do modelo II e suas diferenças visuais com o modelo I, é recomendável a aplicação de um estudo semelhante em outras áreas, onde existam mapeamentos geológicos em várias escalas – de detalhes e regional – e que possuam um inventário de escorregamento com um número de feições cadastradas mais abundantes e que possam ser melhores caracterizadas quanto ao seu tipo e idade.

Diante do exposto, para áreas que não possuam mapa geológico em escala de detalhe, sugere-se sempre comparar os resultados de modelos gerados com mapa de unidades litológicas em escala regional com um modelo que não utilize a litologia. É possível que quando não houver grandes discrepâncias entre as probabilidades condicionadas das unidades litológicas, o modelo com esse parâmetro possivelmente apresentará resultado e qualidade mais próximos de um modelo elaborado com a unidade litológica em escala adequada, do que aquele que não considera a litologia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alencar, C.M.S. & Santos, P.L.V.A.C. (2013). Precisão dos dados cartográficos na web através da imagem do Google Earth. Encontro Internacional Dados, Tecnologia e Informação, Marília, SP. Anais Eletrônicos...

Aleotti, P., & Chowdhury, R. (1999). Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. Bulletin of Engineering Geology and the environment, 58(1), 21-44.

Alkmim, F. F., & Marshak, S. (1998). Transamazonian orogeny in the Southern Sao Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrıfero.Precambrian Research, 90(1), 29-58.

Alkmim, F.F. (2004). O que faz de um cráton um cráton? O Crtáton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. In: Geologia do Continente Sul- Americano: Evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida. Mantesso-Neto *et al.* (org.), São Paulo: Editora Beca, p.17-35.

Andersson-Sk, Y., Falemo, S. & Tremblay, M. (2014). Development of methodology for quantitative landslide risk assessment - Example Göta river valley. Natural Science, 2014.

Augusto Filho, O. (1992), Caracterização Geológico-geotécnica voltada à Estabilização de Encostas: Uma proposta Metodológica. In: Conferência Brasileira Sobre Estabilidade de Encostas, Rio de Janeiro. ABMS-ABGE-PUCRJ, Vol. 2, p. 721-733.

Augusto Filho, O. (2001). Carta de Risco de Escorregamentos Quantificada em Ambiente de SIG como Subsídio para Planos de Seguro em Áreas Urbanas: um ensaio em Caraguatatuba (SP). Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Rio Claro.

Baltazar, O. F. & Silva, S. L., 1996. Projeto Rio das Velhas. Mapa geológico integrado do Supergrupo Rio das Velhas, em escala 1:100.000. DNPM/CPRM, Brasília.

Baltazar, O.F., Baars F.J., Lobato, L.M., Reis, L.B., Achtschin, A.B., Berni, G.V. & Silveira, V.D. (2005). Mapa Geológico Caeté Folha parcial SE.23-Z-C-VI-4, na Escala 1:50.000 com Nota Explicativa. In: Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração

e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Lobato *et al.* (2005) CODEMIG. Belo Horizonte.

Baltazar, O. F., & Zucchetti, M. (2007). Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: A review of the setting of gold deposits. Ore Geology Reviews, 32(3), 471-499.

Barella, C.F. (2016). Abordagens estatísticas aplicadas ao mapeamento de susceptibilidade a movimento de massa: análise de diferentes técnicas no contexto do Quadrilátero Ferrífero. Tese de Doutorado. Núcleo de Geotecnia da Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto. 253 p.

Barlow, J., Franklin, S., & Martin, Y. (2006). High spatial resolution satellite imagery, DEM derivatives, and image segmentation for the detection of mass wasting processes. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 72(6), 687-692.

Beguería, S. (2006). Validation and evaluation of predictive models in hazard assessment and risk management. Natural Hazards, 37(3), 315-329.

Beven, K. J., & Kirkby, M. J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology/Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant. Hydrological Sciences Journal,24(1), 43-69.

Bi, J. & Bennett, K. P. (2003). Regression error characteristic curves. In Twentieth international conference on machine learning (ICML-2003). Washington, DC.

Blahut, J., van Westen, C. J., & Sterlacchini, S. (2010). Analysis of landslide inventories for accurate prediction of debris-flow source areas.Geomorphology, 119(1), 36-51.

Braga, P.I. & Grandi, T.S.M. (1992). Botânica da Serra da Piedade. *In*: CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Serra da Piedade. Belo Horizonte: CEMIG, p. 98-111.

Brasil (1984). Decreto nº. 89.817, de 20 de junho de 1984. Dispõe sobre as instruções reguladoras das normas técnicas da cartografia nacional. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, 22 de junho de 1984.

Brasil (2012). Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil – PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil – SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil – CONPDEC; e dá outras providências. Diário Oficial da Republica Federativa do Brasil, Brasília, DF, 11p.

Brenning, A. (2005). Spatial prediction models for landslide hazards: review, comparison and evaluation. Natural Hazards and Earth System Science, 5(6), 853-862.

Bressiani, J.X. (2016). Delimitação de áreas variáveis de afluência em ambientes de microbacias urbanas através da comparação dos métodos TauDEM e HAND. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Federal de Uberlândia. 92p.

Bueno, M.E.T. (1992). Geografia da Serra da Piedade. *In*: CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Serra da Piedade. Belo Horizonte: CEMIG, p. 56-75.

Bui, D. T., Lofman, O., Revhaug, I., & Dick, O. (2011). Landslide susceptibility analysis in the Hoa Binh province of Vietnam using statistical index and logistic regression. Natural hazards, 59(3), 1413-1444.

Carrara, A., Guzzetti, F., Cardinali, M. & Reichenbach, P. (1999). Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. Natural Hazards, 20(2-3): 117-135.

CPRM (2008). Carta Geológica Folha SE.23-Z-C-VI – Belo Horizonte, escala 1:100.000.

CPRM (2010). Projeto Sete Lagoas-Abaeté, Estado de Minas Gerais: texto explicativo. Manoel Pedro Tuller, José Heleno Ribeiro, Nicola Signorelli, Wilson Luis Féboli, Júlio Murilo Martino Pinho, Orgs. - Belo Horizonte. 160p.

CEPED-UFSC (2012). Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2010: Volume Brasil. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres / Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 94 p.

Çevik, E., & Topal, T. (2003). GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). Environmental geology, 44(8), 949-962.

Chacón, J. e Irigaray, C. (2007). Mapas Previsores de Zonas Inestables Desarrollados en Sistemas de Información Geográfica (SIG). In: VI Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Ambiental – Uberlândia. 1140-1218p.

Chowdhury, R., Flentje, P. & Bhattacharya, G. (2012). Geotechnics in the 21st Century, uncertainties and other challenges, with particular references to landslides hazard and risk assessment. Journal of Life Cycle Reliability and Safety Engineering, 1(2), 27-43.

Chung, C. J. F., & Fabbri, A. G. (1999). Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. Photogrammetric engineering and remote sensing,65(12), 1389-1399.

Chung, C. J. F., & Fabbri, A. G. (2003). Validation of spatial prediction models for landslide hazard mapping. Natural Hazards, 30(3), 451-472.

Cruden, D. & Varnes, D.J. (1996). Landslide types and process. In: Turner, A., Schuster, R. (Eds.), Landslides: Investigation and Mitigation. Transportation Research Council, vol. 247, p. 26-75.

Dantas, C.E.O. (2009). Projeto Atlas Pluviométrico do Brasil, Estado de Minas Gerais. Isoietas Anuais Médias período 1977 a 2006. *In*: Machado, M.F. & Silva, S.F. (2010). Geodiversidade do Estado de Minas Gerais. Nota Técnica Explicativa/Organização. Belo Horizonte. CPRM, 131 p.

Dikau, R. (1990). Derivatives from detailed geoscientific maps using computer methods. Zeitschrift für Geomorphologie, 2(80), 45-55.

Fell, R., Corominas, J. Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E. & Savage, W. (2008). Guidelines for landslides susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. Engineering Geology, 102(3-4): 85-98.

Fernandes, N.F. & Amaral, C.P. (1996). Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra, A.J.T. e Cunha, S.B. (org.) Geomorfologia e Meio Ambiente. Bertrand, Rio de Janeiro. p. 123-194.

Fernandes, C.A.B.A. (2005). Gerenciamento de riscos em projetos: Como usar o Microsoft Excel para realizar simulações de Monte Carlo.

Florenzano, T.G. (2008). Sensoriamento Remoto para Geomorfologia. In: Florenzano, T.G. (org.). Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais. São Paulo: Oficina de Textos. Cap.2, p.31-71.

Frattini, P., Crosta, G., & Carrara, A. (2010). Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. Engineering Geology, 111(1), 62-72.

Galli, M., Ardizzone, F., Cardinali, M., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2008). Comparing landslide inventory maps. Geomorphology, 94(3), 268-289.

Garcia, R., & Zêzere, J. L. (2003). Avaliação de riscos geomorfológicos: Conceitos, Terminologia e Métodos de Análise. III Seminário Recursos Geológicos, Ambiente e Ordenamento do Território, p.299-308.

Garcia, R., Zêzere, J. L., & Oliveira, S. (2007). A importância do processo de classificação de dados na cartografia: um exemplo na cartografia de susceptibilidade a movimentos de vertente. Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos, 5, 265-279.

Glade, T., & Crozier, M. J. (2005). The nature of landslide hazard impact. In: Glade, T., Anderson, M., Crozier, M.J. Landslide hazard and risk. Wiley, Chichester, 43-74.

Greenbaum, D., Bowker, M. R., Dau, I., Dropsy, H., Greally, K. B., McDonald, A.J.W., Marsh, S.H., Northmore, K.J., O´Connor, E.A., Prasad, S. & Tragheim, D. G. (1995). Rapid methods of landslide hazard mapping: Fiji case study.

Guidicini, G. & Nieble, C.M. (1984). Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. São Paulo: 2a ed. Edgard Blücher, 194p.

Guzzetti, F., Carrara, A., Cardinali, M., & Reichenbach, P. (1999). Landslide hazard evaluation: an aid to a sustainable development. Geomorphology, 31, 181-216.

Guzzetti, F., Cardinali, M., Reichenbach, P., & Carrara, A. (2000). Comparing landslide maps: A case study in the upper Tiber River Basin, central Italy. Environmental management, 25(3), 247-263.

Guzzetti, F. (2005). Landslide hazard and risk assessment: Concepts, methods and tools for the detection and mapping of landslide, for landslide susceptibility zonation and hazard assessment, and for landslide risk evaluation. PhD Thesis, Mathematich-Naturwissenschaftlichen Fakultät, Univestität Bonn, Bonn, Germany, 373p.

Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ardizzone, F., Cardinali, M., & Galli, M. (2006). Estimating the quality of landslide susceptibility models. Geomorphology, 81(1), 166-184.

Guzzetti, F., Mondini, A. C., Cardinali, M., Fiorucci, F., Santangelo, M., & Chang, K. T. (2012). Landslide inventory maps: New tools for an old problem. Earth-Science Reviews, 112(1), 42-66.

Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). O Manual de Deslizamento – Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos. Virgínia: US Geological Suvey.

Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2014). The Varnes classification of landslide types, an update. Landslides, 11(2), 167-194.

Infanti Jr, N., & Fornasari Filho, N. (1998). Processos de dinâmica superficial. Geologia de engenharia, 9, 131-152.

INMET (s.d). Gráficos. Estação Belo Horizonte. Parâmetros mensais. Chuva Acumulada Mensal X Chuva Normal (Normal Climatológica 61-90). Disponível em: http://www.inmet.gov.br/sim/gera_graficos.php. Acesso em: 26 de julho de 2016.

IPT (1981). Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. Waldir Lopes Ponçano (coordenador). 94p.

IPT/CPRM (2014). Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: nota técnica explicativa / coordenação Omar Yazbek Bitar. - São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília, DF: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 42p.

Kimerling, A.J., Buckley, A.R., Muehrcke, P.C. & Muehrcke, J. O. (2011). Map Use: Reading, Analysis, Interpretation. 7ª edição. ESRI Press. 610p.

Lobato, L.M., Baltazar, O.F., Reis, L.B., Achtschin, A.B., Baars, F.J., Timbó, M.A., Berni, G.V., Mendonça, B.R.V. de & Ferreira, D.V. (2005). Projeto Geologia do Quadrilátero Ferrífero - Integração e Correção Cartográfica em SIG com Nota Explicativa. Belo Horizonte: CODEMIG, 2005.

Lopes, E.E. & Nogueira, R.E. (2011). Proposta metodológica para validação de imagens de alta resolução do Google Earth para produção de mapas. Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR, Curitiba, PR. INPE, 2308-2315p.

Lu, P., Stumpf, A., Kerle, N., & Casagli, N. (2011). Object-oriented change detection for landslide rapid mapping. IEEE Geoscience and remote sensing letters, 8(4), 701-705.

Luiz, G.C. (2012). Influência da relação solo-atmosfera no comportamento hidromecânico de solos tropicais não saturados: estudo de caso – Município de Goiânia/GO. Tese de Doutorado. Publicação G.TD-075/2012, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 246p.

Machado, M.F. & Silva, S.F. (2010). Geodiversidade do Estado de Minas Gerais. Nota Técnica Explicativa/Organização. Belo Horizonte. CPRM, 131 p.

Malamud, B. D., Turcotte, D. L., Guzzetti, F., & Reichenbach, P. (2004). Landslide inventories and their statistical properties. Earth Surface Processes and Landforms, 29(6), 687-711.

Mantovani, F., Soeters, R., & Van Westen, C. J. (1996). Remote sensing techniques for landslide studies and hazard zonation in Europe. Geomorphology, 15(3), 213-225.

Marcelino, E. V., Formaggio, A. R., & Maeda, E. E. (2009). Landslide inventory using image fusion techniques in Brazil. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 11(3), 181-191.

Martha, T. R., Kerle, N., Jetten, V., van Westen, C. J., & Kumar, K. V. (2010). Characterising spectral, spatial and morphometric properties of landslides for semi-automatic detection using object-oriented methods. Geomorphology,116(1), 24-36.

Nobre, A. D., Cuartas, L. A., Hodnett, M., Rennó, C. D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M. & Saleska, S. (2011). Height above the nearest drainage–a hydrologically relevant new terrain model. Journal of Hydrology, 404(1), 13-29.

Parizzi, M.G., Moura, A.C.M., Memória, E. & Magalhães, D.M. (2010). Mapa de Unidades Geotécnicas da Região Metropolitana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: RMBH. Disponível em: <http://www.rmbh.org.br/sites/default/files/Relat%C3%B3rio Geologia Potencial de Uso.pdf>, 2010.

Pereira, S.S. (2009). Perigosidade a Movimentos de Vertente na Região Norte de Portugal. Tese de Doutorado, Departamento de Geografia, Universidade do Porto, Porto, PT, 370p.

Pereira, S. D. S., Zêzere, J. L. G. M. D., & Bateira, C. (2012). Technical Note: Assessing predictive capacity and conditional independence of landslide predisposing factors for shallow landslide susceptibility models. Natural Hazards and Earth System Sciences, n. 12, p. 979-988.

Piedade, A.M.M. (2009). Modelação Espacial em Sistema de Informações Geográficas da Suscetibilidade a deslizamento da Área de Lousa-Loures. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Ciências Sociais e Humanas, Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, Portugal, 114 p.

Piedade, A., Zêzere, J. L., Garcia, R. A. C., & Oliveira, S. C. (2010). Análise sensitiva dos factores de predisposição à instabilidade geomorfológica na área a norte de Lisboa. In Actas/Proceedings of V Congresso Nacional de Geomorfologia (pp. 59-63).

Pinto, E.J. de A, Azambuja, A.M.S.de, Farias, J.A.M., Pickbrenner, K., Salgueiro, J.P. de B., Sousa, H.R. (Coords.) (2011). Atlas Pluviométrico do Brasil: isoietas mensais, isoietas trimestrais, isoietas anuais, meses mais secos, meses mais chuvosos, trimestres mais secos, trimestres mais chuvosos. Brasília: CPRM; Programa Geologia do Brasil; Levantamento da Geodiversidade; Sistema de Informação Geográfica – SIG – versão 2.0; 1 DVD, Escala 1:5.000.000.

Portugal (2012). Resolução do Conselho de Ministros nº 81/2012. Diário da República, 1ª série – Nº 192 - 3 de outubro de 2012, 25 p.

Pike, R. J. (1988). The geometric signature: quantifying landslide-terrain types from digital elevation models. Mathematical Geology, 20(5), 491-511.

Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas. (2007). Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, Nº 4, 432p., 1 CD-ROM.

Rogers, J. D. (1995). Identification of landforms susceptible to land slippage and methods of analysis, prepared for Causes and Identification of Urban Landslides, Association of Bay Area Governments Training Center, 161 p.

Ross, J. S. (1992). Registro cartográfico dos fatos geomorfológicos e a questão da taxonomia do relevo. Rev. Geografia. São Paulo, IG-USP, p. 17-29.

Slatton, K. C., Carter, W. E., Shrestha, R. L., & Dietrich, W. (2007). Airborne laser swath mapping: achieving the resolution and accuracy required for geosurficial research. Geophysical Research Letters, 34(23).

Soeters, R., & van Westen, C. J. (1996). Slope instability recognition, analysis and zonation. Landslides, investigation and mitigation. Transportation Research Board, National Research Council, Special Report, 247, 129-177.

Sterlacchini, S., Ballabio, C., Blahut, J., Masetti, M., & Sorichetta, A. (2011). Spatial agreement of predicted patterns in landslide susceptibility maps. Geomorphology, 125(1), 51-61.

Tarboton, D.G. (2016). Terrain Analysis Using Digital Elevation Model (TauDEM). Disponível em http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/. Acesso em 15 de setembro de 2016.

Tominaga, L. K. (2007). Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

Tominaga, L. K. (2015). Escorregamentos. In: Tominaga, L.K., Santoro, J., Amaral, R. (Orgs.), Desastres Naturais: conhecer para prevenir. São Paulo. Instituto Gelógico. Cap. 2, p.27-38.

USGS (2016). Disponível em: https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc; https://lta.cr.usgs.gov/srtm/mission_summary. Acesso em: 08 de setembro de 2016.

Varnes, D.J. (1978). Slope movement types and process. In: SCHUSTER & KRIZEK (eds.). Landslides: analysis and control. Transportation Research Board Special Report 176, National Academy of Sciences, Washington DC, p. 11-33.

Varnes, D.J. & IAEG Commission on Landslides and other Mass Movements. (1984). Landslides Hazard Zonation: Review of Principles and Practice. UNESCO Press, Paris. 56p.

van Westen, C.J. (1993). Application of Geographic Information Systems to Landslide Hazard Zonation. PhD Thesis, Technical University Delft, International Institute for Aerospace Survey and Earth Science, the Netherlands, 245p.

van Westen, C.J. (1997). Statistical landslide hazard analysis. ILWIS 2.1 for Windows application guide, C. van Westen, A.S. López, P.U. Cornejo & G.C. Ardanza (eds.), ITC Publication, Enschede, The Netherlands, p.73-84.

van Westen, C. J. (2000). The modelling of landslide hazards using GIS. Surveys in Geophysics, 21(2-3), 241-255.

van Westen, C. J., Van Asch, T. W., & Soeters, R. (2006). Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? Bulletin of Engineering geology and the Environment, 65(2), 167-184.

van Westen, C. J., Castellanos, E., & Kuriakose, S. L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: an overview. Engineering geology, 102(3), 112-131.

Wills, C. J., & McCrink, T. P. (2002). Comparing landslide inventories: The map depends on the method. Environmental & Engineering Geoscience, 8(4), 279-293.

WP/WLI - International Geotechnical Society's UNESCO Working Party on World Landslide Inventory (1995). A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. Bull. Inter. Assoc. Eng. Geol. 52-57:78.

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

Zêzere, J. L., Garcia, R. A. C., Oliveira, S., & Reis, E. (2005). Análise sensitiva na avaliação da susceptibilidade a deslizamentos na Região a Norte de Lisboa. X Colóquio Ib. de Geografia "A Geografia Ibérica no contexto europeu", Livro de Resumos, Évora, 221-222.

APÊNDICE

Tabela I – Informações das feições de escorregamentos identificadas e delimitadas na área de estudo. O grau de certeza 1 indica maior confiabilidade e 5 menor confiabilidade das informações. NI – Não identificado.

Id.	Tipo	Grau de Certeza	Área (km^2)	Idade Estimada	Fonte da Informação
1	NI	5	0,002092	Recente	Interpretação de imagem de satélite
2	NI	3	0,001310	Recente	Interpretação de imagem de satélite
3	NI	3	0,001332	Antiga	Interpretação de imagem de satélite
4	NI	3	0,004040	Antiga	Interpretação de imagem de satélite
5	Planar	2	0,000407	Muito recente	Interpretação de imagem de satélite
6	Rotacional	1	0,009537	Recente	Interpretação de imagem de satélite e validação em campo
7	NI	3	0,001031	Recente	Interpretação de imagem de satélite
8	NI	5	0,000924	Antiga	Interpretação de imagem de satélite
9	NI	5	0,000554	Antiga	Interpretação de imagem de satélite
10	NI	4	0,000945	Recente	Interpretação de imagem de satélite
11	Rotacional	1	0,007268	Recente	Interpretação de imagem de satélite e validação em campo
12	NI	3	0,027323	Recente	Interpretação de imagem de satélite
13	NI	5	0,015892	Recente	Interpretação de imagem de satélite
14	NI	5	0,002963	Recente	Interpretação de imagem de satélite
15	Rotacional	1	0,000761	Recente	Interpretação de imagem de satélite e validação em campo
16	NI	1	0,005034	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo
17	NI	1	0,009664	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em

					campo
18	NI	1	0,002332	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo
19	NI	1	0,007294	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo
20	NI	1	0,002728	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo
21	Planar	2	0,002316	Recente	Interpretação de imagem de satélite e validação em campo
22	Planar	2	0,000697	Recente	Interpretação de imagem de satélite e validação em campo
23	NI	3	0,002106	Antiga	Interpretação de imagem de satélite
24	NI	3	0,004222	Antiga	Interpretação de imagem de satélite
25	Planar	1	0,006502	Recente	Interpretação de imagem de satélite e validação em campo
26	NI	2	0,002156	Muito Recente	Interpretação de imagem de satélite e validação em campo
27	NI	1	0,011997	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo
28	NI	1	0,010566	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo
29	NI	1	0,011411	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo
30	NI	2	0,004223	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo
31	NI	2	0,001284	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo

32	NI	2	0,016680	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo
33	NI	2	0,007623	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo
34	NI	2	0,009640	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo
35	NI	5	0,002055	Antiga	Interpretação de imagem de satélite
36	NI	4	0,001618	Antiga	Interpretação de imagem de satélite
37	NI	2	0,004635	Recente	Interpretação de imagem de satélite
38	NI	3	0,002138	Recente	Interpretação de imagem de satélite e validação em campo
39	Rotacional	2	0,003726	Recente	Interpretação de imagem de satélite e validação em campo
40	NI	5	0,001815	Recente	Interpretação de imagem de satélite
41	NI	5	0,000905	Recente	Interpretação de imagem de satélite
42	NI	5	0,002421	Recente	Interpretação de imagem de satélite
43	Planar	3	0,003723	Recente	Interpretação de imagem de satélite
44	NI	3	0,002579	Recente	Interpretação de imagem de satélite
45	NI	3	0,002441	Recente	Interpretação de imagem de satélite
46	NI	3	0,001292	Recente	Interpretação de imagem de satélite
47	NI	3	0,001217	Recente	Interpretação de imagem de satélite
48	NI	4	0,002882	Recente	Interpretação de imagem de satélite
49	NI	3	0,002057	Recente	Interpretação de imagem de satélite
50	NI	4	0,003153	Recente	Interpretação de imagem de satélite
51	NI	4	0,001951	Recente	Interpretação de imagem de satélite
52	NI	4	0,000856	Recente	Interpretação de imagem de satélite

53	NI	3	0,006527	Recente	Interpretação de imagem de satélite
54	NI	3	0,008624	Recente	Interpretação de imagem de satélite
55	NI	3	0,001122	Recente	Interpretação de imagem de satélite
56	NI	5	0,008282	Recente	Interpretação de imagem de satélite
57	NI	4	0,004078	Recente	Interpretação de imagem de satélite
58	NI	4	0,003384	Recente	Interpretação de imagem de satélite
59	NI	1	0,014793	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo
60	NI	2	0,007445	Recente	Interpretação de imagem de satélite
61	NI	3	0,000821	Recente	Interpretação de imagem de satélite
62	NI	2	0,008320	Recente	Interpretação de imagem de satélite
63	NI	2	0,008147	Recente	Interpretação de imagem de satélite
64	NI	2	0,001611	Recente	Interpretação de imagem de satélite e validação em campo
65	NI	1	0,003837	Recente	Interpretação de imagem de satélite e validação em campo
66	Rotacional	2	0,011678	Recente	Interpretação de imagem de satélite e validação em campo
67	Rotacional	2	0,006278	Recente	Interpretação de imagem de satélite e validação em campo
68	NI	4	0,003591	Recente	Interpretação de imagem de satélite
69	NI	4	0,001214	Recente	Interpretação de imagem de satélite
70	NI	3	0,001274	Recente	Interpretação de imagem de satélite
71	NI	4	0,004004	Recente	Interpretação de imagem de satélite
72	NI	4	0,002060	Recente	Interpretação de imagem de satélite
73	NI	4	0,003152	Recente	Interpretação de imagem de satélite
74	NI	4	0,002849	Recente	Interpretação de imagem de satélite

75	NI	4	0,001593	Recente	Interpretação de imagem de satélite
76	NI	4	0,003547	Recente	Interpretação de imagem de satélite
77	NI	4	0,005089	Recente	Interpretação de imagem de satélite
78	NI	1	0,006373	Recente	Interpretação de imagem de satélite e validação em campo
79	NI	1	0,003595	Recente	Levantamento de campo
80	NI	2	0,000491	Recente	Levantamento de campo
81	NI	3	0,002263	Recente	Levantamento de campo e interpretação de imagem de satélite
82	NI	3	0,009967	Recente	Levantamento de campo e interpretação de imagem de satélite
83	NI	2	0,002324	Recente	Levantamento de campo e interpretação de imagem de satélite
84	NI	1	0,000238	Muito recente	Levantamento de campo
85	NI	1	0,004448	Recente	Levantamento de campo e interpretação de imagem de satélite
86	Rotacional	2	0,001451	Antiga	Levantamento de campo e interpretação de imagem de satélite
87	Rotacional	2	0,001722	Antiga	Levantamento de campo e interpretação de imagem de satélite
88	Planar	3	0,001898	Antiga	Levantamento de campo e interpretação de imagem de satélite
89	Planar	3	0,001263	Antiga	Levantamento de campo e interpretação de imagem de satélite
90	NI	2	0,013767	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo
91	NI	2	0,004035	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo
92	NI	2	0,003734	Antiga	Mapa geológico, interpretação de imagem de satélite e validação em campo