

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS  
DOUTORADO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

**WILLIAM DE OLIVEIRA SANT ANA**

**ANÁLISE COMPARATIVA E INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS PARA MAPEAMENTO  
DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A ESCORREGAMENTOS**

**CRICIÚMA**

**2021**

**WILLIAM DE OLIVEIRA SANT ANA**

**ANÁLISE COMPARATIVA E INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS PARA MAPEAMENTO  
DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A ESCORREGAMENTOS**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, como requisito para a obtenção do título de Doutor em Ciências Ambientais.

Orientador: Prof. Dr. Álvaro José Back  
Coorientador: Prof. Dr. Gean Paulo Michel  
(UFRGS)

**CRICIÚMA**

**2021**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S232a Sant Ana, William de Oliveira.

Análise comparativa e integração de métodos para mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos / William de Oliveira Sant Ana. - 2021.

243 p. ; il.

Tese (Doutorado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Criciúma, 2021.

Orientação: Álvaro José Back.

Coorientação: Gean Paulo Michel.

1. Deslizamentos (Geologia). 2. Mapeamento dos solos. 3. Fotogrametria. 4. Catástrofes naturais. I. Título.

CDD. 22. ed. 551.352

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101  
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC



UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE  
Pró-Reitoria Acadêmica  
Diretoria de Pesquisa e Pós-Graduação  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

---

## PARECER

Os membros da Comissão Examinadora homologada pelo Colegiado de Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais reuniram-se forma remota conforme RESOLUÇÃO N. 02/2020/PPGCA que estabelece procedimento para a Defesa de Dissertação e de Tese do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais por meio de videoconferência, para realizar a arguição da Tese de Doutorado apresentada pelo candidato **WILLIAM DE OLIVEIRA SANT ANA**, sob o título: “**ANÁLISE COMPARATIVA E INTEGRAÇÃO DE MÉTODOS PARA MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À ESCORREGAMENTOS**”, para obtenção do grau de **DOUTOR EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS** no Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais da Universidade do Extremo Sul Catarinense – UNESC. Após haver analisado o referido trabalho e arguida o candidato, os membros são de parecer pela “**APROVAÇÃO**” da Tese.

Criciúma/SC, 17 de fevereiro de 2021.

**Prof. Dr. Roberto Fabris Goerl**  
Primeiro Examinador

**Prof. Dr. Masato Kobiyama**  
Segundo Examinador

**Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig**  
Terceiro Examinador

**Prof. Dr. Carlyle Torres Bezerra de Menezes**  
Quarto Examinador

**Prof. Dr. Álvaro José Back**  
Presidente e Orientador



## **AGRADECIMENTOS**

Ao longo da realização deste trabalho, muitas pessoas colaboraram, de uma forma ou de outra, nas diferentes etapas dessa jornada. No entanto, tenho que agradecer de maneira especial alguns desses profissionais e amigos:

À minha família, em especial minha esposa, Saionara Martins Ugioni Sant Ana e minha filha, Catarina Ugioni Sant Ana, que me apoiaram, confortaram e compreenderam minhas ausências. Aos meus pais e irmãs que sempre acreditaram em meus sonhos e me apoiaram na realização dos mesmos. Essa conquista é de todos vocês.

Aos meus Professores orientadores, Dr. Álvaro José Back e Dr. Gean Paulo Michel, que me ofereceram atenção, compartilharam conhecimentos e me guiaram pelo caminho da prudência na pesquisa. A equipe de trabalho do Professor Gean, vinculada ao IPH – Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, notadamente a Franciele Zanandrea, Rossano Dalla Lana Michel e Anne Biehl, por todo carinho e prestatividade. Serei eternamente grato!

À SATC – Associação Beneficente da Indústria Carbonífera de Santa Catarina, empresa em que trabalho e que me possibilitou a busca pela pesquisa e aperfeiçoamento. Aos colegas de trabalho Jefferson de Faria, Mauro dos Santos Zavarize e Daniel Pazini Pezente, pelo interesse e auxílio em atividades deste trabalho, notadamente o apoio em campo.

Ao Prof. Dr. Nilzo Ivo Ladwig e à equipe do Laboratório de Pesquisa em Planejamento Territorial (LABPGT) da UNESC, pelos aconselhamentos, vivência e contribuição na pesquisa. Agradecimento especial para o amigo Danrlei de Conto, que me acompanhou ativamente desde o começo do trabalho.

Aos colegas do doutorado e, especialmente, aos Professores, pelas excelentes discussões e trabalhos de campo. À coordenação e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) da UNESC, pela atenção e profissionalismo.

“O todo somente pode ser conhecido através do conhecimento das partes e as partes somente podem ser conhecidas através do conhecimento do todo. Essas duas verdades são, porém, parciais.”

Milton Santos

## RESUMO

Movimentos de massa, especificamente escorregamentos translacionais rasos, podem resultar em consequências negativas aos ecossistemas e à sociedade. Estados e municípios brasileiros têm a obrigação legal de mapear as áreas de riscos de desastres, dimensionar e espacializar o risco implica em mapear adequadamente a suscetibilidade natural, com consenso metodológico. Este trabalho objetivou efetuar uma análise comparativa e combinação entre Análise Multicritério, pela Análise Hierárquica de Processos - AHP, e o modelo SHALSTAB – *Shallow Landsliding Stability Model*, para mapeamento de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais rasos em encostas naturais, na sub-bacia formada nas cabeceiras do rio Mãe Luzia, Treviso (SC). Fez-se um inventário de cicatrizes de escorregamentos, a partir de fotografias aéreas datadas de 1957 e 1978, as quais foram ortorretificadas para se estabelecer sobreposição acurada entre a distribuição espacial e a densidade das cicatrizes em relação a fatores predisponentes aos escorregamentos. As cicatrizes foram adotadas na própria construção dos modelos (estimativas e treinamento), bem como, para validar os resultados destes, inclusive, nos procedimentos de álgebra de mapas para Análise Multicritério, que também prescindiram de entrevistas com especialistas, para se estabelecer a hierarquia dos fatores. Para aplicação do SHALSTAB foram executadas atividades de campo, combinadas com ensaios laboratoriais para angariar dados de entrada. Verificou-se a capacidade discriminante e desempenho de cada modelo através dos Índices de Acerto (IA) e Índice de Erro (IE), pelos quais se construiu curvas ROC - *Receiver Operating Characteristic*, em que a área formada sob estas (*Area Under the Curve* – AUC) validou a capacidade discriminante de cada modelo. Pela aplicação da Análise Multicritério fez-se um modelo preditivo teórico de suscetibilidade aos escorregamentos, resultando na razoável AUC de 0,69. Complementarmente, foram integradas as estatísticas de densidades de escorregamentos efetuando-se modelagem de restituição dos eventos de 1957 (AUC 0,78) e de 1978 (AUC 0,80), as quais, validadas por grupo de cicatrizes, confirmou uma alta capacidade discriminante. Para o mapa de suscetibilidade, obtido pelo SHALSTAB, a AUC resultou em 0,66 e a classe incondicionalmente instável respondeu por 32,43% da área. Para superar a visão metodológica particionada criou-se três combinações destes modelos, por funções estatísticas e de álgebra de mapas em softwares de geoprocessamento em que buscou-se o melhor zoneamento da suscetibilidade aos escorregamentos: integração do resultado do modelo SHALSTAB com o obtido pelo modelo teórico AHP (AUC 0,72); integração do modelo teórico, com treinamento de 30% pelas cicatrizes do ano de 1978 (AUC 0,75); integração do modelo SHALSTAB com treinamento de 30% pelas cicatrizes do ano de 1978 (AUC 0,72). A integração destes métodos resultou em predições melhores que a análise particular de cada método, assim eles não precisam concorrer, mas compor uma solução integrada para resolução de problemáticas similares. Com a combinação, o melhor de cada modelo foi considerado: do SHALSTAB, a escala e os processos não tangíveis pela Análise Multicritério, e desta, a praticidade e menor dispêndio de recursos (campo e laboratório).

**Palavras-chave:** Movimentos de massa. Cicatrizes de escorregamentos. Álgebra de mapas. Modelo preditivo. Curvas ROC.

## ABSTRACT

Mass movements, specifically shallow translational slides, can have negative consequences for the environment and society. Brazilian states and municipalities are legally obliged to map areas at risk of natural disasters and determining the spatial dimensions of hazards requires correctly mapping natural susceptibility, with methodological consensus. This study aimed to conduct a comparative analysis and combination between multicriteria analysis (MCA), via the analytical hierarchy process (AHP), and the shallow landsliding stability model (SHALSTAB), in order to map areas susceptible to shallow translational landslides on natural slopes in the subbasin formed at the sources of Mãe Luzia river, in Treviso (SC). An inventory of landslide scars was conducted based on aerial photographs from 1957 to 1978, which were orthorectified to ensure accurate overlaying between the spatial distribution and density of the landslide scars in relation to factors indicating predisposition to slides. The scars were incorporated into model construction (estimates and training) and to validate the results, including map algebra for MCA, which also dispensed with the need to interview specialists to establish the hierarchy of the factors. In order to apply SHALSTAB, field activities were carried out and combined with laboratory tests to collect input data. The discrimination capacity of each model was assessed based on the hit and false alarm rates, which were used to construct receiver operating characteristic (ROC) curves. The area under the curves (AUC) validated the discrimination capacity of each model. Multicriteria analysis was applied to construct a theoretical predictive model for landslide susceptibility, resulting in a satisfactory AUC of 0.69. Additionally, the landslide density statistics were integrated in order to model restitution for events from 1957 (AUC 0.78) and 1978 (AUC 0.80), which were validated per scar group and confirmed high discrimination capacity. The AUC for the susceptibility map obtained by SHALSTAB was 0.66, and the unconditionally unstable class accounted for 32.43% of the area. In order to overcome the partitioned methodological perspective, three combinations of the models were created using statistical and map algebra functions in order to establish optimal zoning for landslide susceptibility: combining the result obtained by the SHALSTAB with that of the theoretical AHP (AUC 0.72); integrating the theoretical model with 30% training for the 1978 scars (AUC 0.75); integrating the SHALSTAB model with 30% training for the 1978 scars (AUC 0.72). Combining these methods resulted in better predictions than individual analysis, meaning that, instead of competing, the methods can provide an integrated solution to solve similar problems. Combination also allowed the best points of each model to be considered: for the SHALSTAB model, the scale and processes not available via MCA, and for the latter, practicality and lower (field and laboratory) costs.

**Keywords:** Mass movements. Landslide scars. Map algebra. Predictive model. ROC curves.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Danos e prejuízos totais por município (1995-2014).....	34
Figura 2 – Ilustração de um típico escorregamento translacional e suas toponímias identificadoras. ....	38
Figura 3 – Par de fotografias aéreas com representação do espaço-imagem, necessário para reconstrução tridimensional do espaço-objeto.....	39
Figura 4 – Exemplo de comparação par a par, com graus de importância. ....	48
Figura 5 - Aspecto das pranchas elaboradas para setorização de riscos geológicos, município de Vila Velha, Estado do Espírito Santo. ....	54
Figura 6 – Envoltória de resistência de Mohr-Coulomb.....	58
Figura 7 – Modelo de encosta infinita e elementos envolvidos na dinâmica de forças. W representa o peso do solo.....	59
Figura 8 – Representação do modelo hidrológico de estado uniforme. ....	61
Figura 9 – Razão $a/b$ em função da $\tan\theta$ (eixos em logaritmo). ....	65
Figura 10 – Ilustração esquemática do BST.....	68
Figura 11 - Localização da Área de Estudo. ....	71
Figura 12 - Aspecto fisiográfico e de processos geomorfológicos na área de estudo. ....	73
Figura 13 – Rede hidrográfica e sua hierarquia na área de estudo.....	74
Figura 14 – Fluxograma esquemático do trabalho. ....	78
Figura 15 – Exemplo da aplicação da escala fundamental de Saaty na comparação par-a-par de 2 dos fatores predisponentes aos escorregamentos. ....	85
Figura 16 – Etapas de aplicação da AHP.....	86
Figura 17 – Litologia na área de estudo. ....	90
Figura 18 - Hipsometria da área de estudo. ....	92
Figura 19 – Classes de declividade na sub-bacia. ....	93
Figura 20 – Tipos de solo na sub-bacia. ....	95
Figura 21 – Orientação de vertentes. ....	96
Figura 22 – Curvatura vertical (perfil) de vertentes. ....	97
Figura 23 – Curvatura das vertentes quanto à sua lateralidade. ....	98
Figura 24 – Feições de vertentes ou formas do terreno. ....	100
Figura 25 – Cobertura do solo para 1957 e 1978 na área de estudo. ....	101

Figura 26 – Dados de terreno, voo, imagens e de câmera, necessários para compor o projeto fotogramétrico. ....	103
Figura 27 – Procedimento de orientação interior (acima) e exterior (abaixo) da fotografia 18.486 (1978). ....	104
Figura 28 – Espacialização e tabela de coordenadas dos PC. ....	105
Figura 29 – Fototriangulação de par de fotografias aéreas na área de estudo (1978). ....	106
Figura 30 – Espacialização dos contornos das fotografias fototrianguladas e os pontos de controle do bloco de 1978 sobre <i>raster</i> do GoogleEarth®.....	107
Figura 31 – Anaglifo elaborado para interpretação das cicatrizes em visão estereoscópica. ....	108
Figura 32 – Detalhe da digitalização em tela, de polígono de cicatriz sobre anaglifo de 1978. ....	109
Figura 33 – Detalhe Análise do histograma de acurácia da extração automática do MDE e, abaixo, resultado gráfico (nuvem de pontos).....	110
Figura 34 – Detalhe da janela de edição de sementes ( <i>seeds editor</i> ) para fotografias de 1978. ....	112
Figura 35 – Nuvem de pontos pré (a) e pós (b) adição manual de sementes de pares de pontos homólogos. ....	112
Figura 36 – Interpolação realizada com a nuvem de pontos para o ano de 1978. ...	113
Figura 37 –Resultado da ortorretificação, na EFD E-Foto, para as cabeceiras do rio Mãe Luzia.....	114
Figura 38 – Projeção tridimensional após ortorretificação de fotografias aéreas de 1978. ....	115
Figura 39 –Etapas para obtenção de geometrias das cicatrizes de escorregamentos. Exemplo de recorte para o ano de 1978. ....	117
Figura 40 – Detalhes da extração da largura e comprimento de uma cicatriz. À direita, a tabela com atributos elencados (Apêndices C e D). ....	118
Figura 41 - Área de estudo e cicatrizes de escorregamentos no ano de 1957.....	119
Figura 42 - Área de estudo e cicatrizes de escorregamentos no ano de 1978.....	120
Figura 43 – Dispersão dos centroides de cicatrizes pela área de estudo e fora de locais com sombra. ....	121
Figura 44 – Histogramas com as características iniciais dos escorregamentos e suas estatísticas descritivas. ....	122

Figura 45 – Comparação de diferentes modelos de estimativas de volumes de escorregamentos em 1957.....	124
Figura 46 – Ajustes dos modelos centrais pela adoção da potência e sua aplicação para dados de 1957. ....	125
Figura 47 – Ajustes dos modelos centrais pela adoção da potência e sua aplicação para dados de 1978. ....	126
Figura 48 – Centroide das cicatrizes restituídas sobre os fatores predisponentes..	127
Figura 49 – Frequência absoluta de escorregamentos e hipsometria, declividades, feições e orientações das vertentes. ....	129
Figura 50 – Frequência de escorregamentos e litologias, tipos e cobertura do solo. .....	130
Figura 51 – Densidade (D), Densidade Normalizada (Dn) e padronizada (Z) das cicatrizes nas classes de hipsometria, declividade, litologia e formas do terreno. ..	133
Figura 52 – Densidade (D), Densidade Normalizada (Dn) e padronizada (Z) das cicatrizes nas classes de cobertura do solo, tipo do solo e orientação das vertentes. .....	134
Figura 53 – Unidades Geotécnicas e pontos de campo visitados para sua validação. .....	136
Figura 54 – Área de falha no MDT alinhada leste-oeste, ao centro da área de estudo. .....	138
Figura 55 – Perfil de vertente em área da articulação de folhas, com falha (a) e após corrigido (b) para o mesmo local. ....	139
Figura 56 – Atividade de campo de janeiro de 2018. ....	141
Figura 57 – Atividade de campo de maio de 2019. ....	142
Figura 58 – Atividade de campo datada de outubro de 2019. ....	144
Figura 59 – Envoltória de cisalhamento para a UG 1.....	145
Figura 60 – Envoltória de cisalhamento para a UG 2.....	146
Figura 61 – Envoltória de cisalhamento para a UG 3.....	147
Figura 62 – Resultado da aplicação do SHALSTAB na área de estudo com a sobreposição dos locais das cicatrizes de escorregamentos. ....	149
Figura 63 – Curvas ROC para o modelo SHALSTAB, validado pelos inventários de cicatrizes. ....	155
Figura 64 – Fatores predisponentes reclassificados pelos pesos teóricos.....	164
Figura 65 – Mapa final do modelo teórico. ....	165

Figura 66 – Histograma de frequências do modelo teórico. ....	166
Figura 67 – Curvas ROC para o modelo teórico validado pelos inventários de cicatrizes. ....	169
Figura 68 – Histograma de frequências do modelo restituído de 1957. ....	171
Figura 69 – Fatores predisponentes reclassificados pela densidade de escorregamentos (1957). ....	172
Figura 70 – Mapa final do modelo restituído para 1957. ....	174
Figura 71 – Histograma de frequências do modelo restituído de 1978. ....	175
Figura 72 – Fatores predisponentes reclassificados pela densidade de escorregamentos (1978). ....	176
Figura 73 – Mapa final do modelo restituído para 1978. ....	178
Figura 74 – Fatores predisponentes reclassificados para o modelo médio (1957 + 1978). ....	180
Figura 75 – Histograma de frequências do modelo médio. ....	181
Figura 76 – Mapa final do modelo médio dos eventos de 1957 e 1978. ....	183
Figura 77 – Curvas ROC para modelos de restituição obtidos pela AHP. ....	185
Figura 78 – Mapa final do modelo teórico AHP combinado com o SHALSTAB. ....	187
Figura 79 – Mapa final do modelo teórico AHP treinado por escorregamentos de 1978. ....	189
Figura 80 – Mapa final do modelo SHALSTAB treinado por escorregamentos de 1978. ....	191
Figura 81 – Curvas ROC para o modelo teórico AHP combinado com SHALSTAB. ....	192
Figura 82 – Curvas ROC para o modelo teórico treinado por escorregamentos de 1978. ....	193
Figura 83 – Curvas ROC para o modelo SHALSTAB treinado por escorregamentos de 1978. ....	194



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Sete classes de estabilidade segundo modelo SHALSTAB. ....	64
Tabela 2 – Classes de litologia conforme ilustrado na Figura 19. ....	91
Tabela 3 – Distribuição dos intervalos hipsométricos e sua quantificação. ....	92
Tabela 4 – Intervalos de declividade. ....	94
Tabela 5 – Tipos de solos e sua quantificação. ....	94
Tabela 6 – Porcentagem e área de cada classe de orientação de vertentes. ....	97
Tabela 7 – Porcentagem e área das classes de curvatura vertical. ....	98
Tabela 8 – Porcentagem e área das classes de curvatura horizontal. ....	99
Tabela 9 – Quantificação das diferentes classes de feição (formas) do terreno. ....	99
Tabela 10 – Quantificação da cobertura do solo para 1957 e 1978. ....	101
Tabela 11 – Aplicação de modelos de estimativas de volumes (V) a partir de áreas (A) para os escorregamentos de 1957. ....	123
Tabela 12 – Densidade normalizadas e pesos teóricos para cada classe temática dos fatores predisponentes aos escorregamentos. ....	132
Tabela 13 – Caracterização das unidades geotécnicas. ....	137
Tabela 14 – Tensão normal aplicada no BST e parâmetros obtidos para UG 1. ....	145
Tabela 15 – Tensão normal aplicada no BST e parâmetros obtidos para UG 2. ....	145
Tabela 16 – Tensão normal aplicada no BST e parâmetros obtidos para a UG 3. ....	146
Tabela 17 – Dados de entrada para o SHALSTAB. ....	147
Tabela 18 – Classes zoneadas para o SHALSTAB, área absoluta e percentual. ....	150
Tabela 19 – Quantitativos com áreas de sombra incidentes. ....	153
Tabela 20 – Índices de Acerto e de Erro para as classes do modelo Shalstab. ....	154
Tabela 21 – Cálculo da AUC a partir das curvas ROC de validação do modelo SHALSTAB. ....	156
Tabela 22 – Especialistas entrevistados para estabelecer a escala de importância dos fatores. ....	158
Tabela 23 – Matriz de comparação paritária de julgamentos. ....	159
Tabela 24 – Matriz de comparação transformada e com números inteiros. ....	159
Tabela 25 – Matriz de comparação normalizada. ....	160
Tabela 26 – Matriz normalizada e cálculo dos autovetores. ....	160
Tabela 27 – Cálculo da Razão de Consistência. ....	161
Tabela 28 – Cálculo da Razão de Consistência: obtenção do autovalor máximo. ....	161

Tabela 29 – Cálculo final do Índice de Consistência e Razão de Consistência. ....	161
Tabela 30 – Média dos autovetores para cada fator com base na opinião dos participantes. ....	162
Tabela 31 – Média dos autovetores cujos julgamentos apresentaram RC. ....	162
Tabela 32 – Quantificação das áreas das classes de suscetibilidade obtidas pelo modelo teórico. ....	167
Tabela 33 – Quantitativos das classes de suscetibilidade e áreas de sombra incidente – AHP Teórica. ....	168
Tabela 34 – Índices de Acerto e de Erro para as classes do modelo teórico. ....	168
Tabela 35 – Cálculo a AUC a partir das curvas ROC para o modelo teórico. ....	169
Tabela 36 – Quantificação das áreas das classes de suscetibilidade obtidas pelo modelo restituído de 1957. ....	173
Tabela 37 – Quantificação das áreas das classes de suscetibilidade obtidas pelo modelo restituído de 1978. ....	177
Tabela 38 – Quantificação das áreas das classes de suscetibilidade para o modelo médio das restituições. ....	182
Tabela 39 – Índices de Acerto e de Erro para as classes de suscetibilidade do modelo restituído de 1957. ....	184
Tabela 40 – Índices de Acerto e de Erro para as classes de suscetibilidade do modelo restituído de 1978. ....	184
Tabela 41 – Cálculo a AUC a partir das curvas ROC para os modelos de restituição. ....	185
Tabela 42 – Quantificação das classes de suscetibilidade aos escorregamentos para o modelo integrado SHALSTAB com o teórico. ....	188
Tabela 43 – Quantificação das classes de suscetibilidade para o modelo teórico com treinamento pelo modelo restituído de 1978. ....	190
Tabela 44 – Quantificação das classes de suscetibilidade para o modelo SHALSTAB com treinamento pelo modelo restituído de 1978. ....	190

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia  
ABMS - Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica  
AHP - Análise Hierárquica de Processos  
AUC – *Area Under the Curve*  
BHRA - Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá  
BST - *Borehole Shear Test*  
CE – *Curve Estimation*  
CEMADEN - Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais  
CENAD - Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres  
CENSINPAM - Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia  
CEPED - Centro de Estudos e Pesquisas em Engenharia e Defesa Civil  
COBRADE - Codificação e Classificação Brasileira de Desastres  
CPRM - Serviço Geológico do Brasil  
CRED - *Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*  
EFD - Estação Fotogramétrica Digital  
EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
EM-DAT - *Emergency Disaster Data Base*  
ESRI - *Environmental Systems Research Institute*  
EPAGRI - Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina  
FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo  
FS - Fator de Segurança  
GPDEN - Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais  
IA – Índice de Acerto  
IAEG - *International Association for Engineering Geology and the Environment*  
IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística  
IE – Índice de Erro  
INMET - Instituto Nacional de Meteorologia  
IPH - Instituto de Pesquisas Hidráulicas  
IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas  
ISD - Índice de Suscetibilidade à Deslizamentos  
ISRM - *International Society for Rock Mechanics*  
ISSMGE - *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*

JTC - *Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes*

MCA – *Multicriteria Analysis*

MDS - Modelo Digital de Superfície

MDT - Modelo Digital do Terreno

MEEI - Modelo de Estabilidade de Encosta Infinita

MHEU - Modelo Hidrológico de Estado Uniforme

MI - Ministério da Integração Nacional

MTCI - Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações

MunichRe - *Munich Reinsurance Company*

PLGB - Programa de Levantamentos Geológicos Básicos

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

PNPDC - Política Nacional de Proteção de Defesa Civil

PPA - Plano Plurianual do Ministério do Planejamento

RMSE – *Root Mean Squared Error*

ROC - *Receiver operating characteristic*

SAGA - *System for Automated Geoscientific Analyses*

SDS/SC - Secretaria de Desenvolvimento Sustentável do Estado de Santa Catarina

SHALSTAB - *Shallow Landsliding Stability Model*

SIG - Sistema de Informações Geográficas

UFPR - Universidade Federal do Paraná

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

UHT - Unidade Homogênea de Terreno

UNISDR – *United Nation Office for Disaster Risk Reduction*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>25</b>
1.1 OBJETIVOS .....	31
1.1.1 Objetivo geral .....	31
1.1.2 Objetivos específicos.....	31
<b>2 MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>32</b>
2.1 DESASTRES NATURAIS.....	32
2.1.1 Desastres naturais e implicações no desenvolvimento .....	32
2.1.2 Classificação dos desastres .....	35
2.1.3 Movimentos de massa .....	36
2.2 FOTOGRAMETRIA E RESTITUIÇÃO DE CICATRIZES DE ESCORREGAMENTOS .....	39
2.2.1 Estação Fotogramétrica Digital: projeto E-Foto .....	42
2.3. MAPEAMENTO DE ESCORREGAMENTOS .....	43
2.3.1 Métodos heurísticos.....	44
2.3.2 Método estatístico .....	52
2.3.3 Análise determinística .....	57
2.3.4 Integração de métodos para mapeamento da suscetibilidade aos escorregamentos .....	68
<b>3 ÁREA DE ESTUDO .....</b>	<b>70</b>
3.1 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA .....	75
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>78</b>
4.1 ELABORAÇÃO DA BASE CARTOGRÁFICA E DO SIG .....	79
4.1.1 Questão da escala .....	79
4.1.2 Obtenção dos níveis básicos de informação.....	79
4.2 INVENTÁRIO DE CICATRIZES DE ESCORREGAMENTOS .....	82
4.3 METODOLOGIAS PARA MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE AOS ESCORREGAMENTOS .....	84
4.3.1 Análise multicritério .....	84
4.3.2 Análise determinística .....	87
4.3.3 Quantificação e validação dos métodos empregados .....	88
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>90</b>
5.1 BASE DE DADOS ESPACIAIS .....	90

5.2 INVENTÁRIO DE CICATRIZES DE ESCORREGAMENTOS .....	101
5.2.1 Uso da EFD para restituição das cicatrizes .....	101
5.2.2 Inventário de Cicatrizes .....	115
5.2.3 Cicatrizes incidentes em cada fator.....	126
5.3 MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE À ESCORREGAMENTOS POR MEIO DO MODELO SHALSTAB .....	135
5.3.1 Etapas iniciais em escritório .....	135
5.3.2 Atividades de campo e resultados de ensaios .....	140
5.3.3 Aplicação e resultado .....	148
5.3.4 Validação do modelo SHALSTAB .....	152
5.4 MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE À ESCORREGAMENTOS PELA ANÁLISE MULTICRITÉRIO.....	157
5.4.1 Aplicação do modelo teórico .....	163
5.4.1.1 Validação do modelo teórico .....	167
5.4.2 Aplicação dos modelos restituídos .....	170
5.4.2.1 Validação dos modelos restituídos .....	183
5.5 INTEGRAÇÃO DE MODELOS .....	185
5.5.1 Modelo SHALSTAB com o modelo teórico AHP .....	186
5.5.2 Modelo teórico com treinamento pelo modelo de 1978 .....	188
5.5.3 Modelo SHALSTAB com treinamento pelo modelo de 1978 .....	190
5.5.4 Validação dos modelos integrados .....	192
6 CONCLUSÕES .....	196
REFERÊNCIAS.....	202
APÊNDICE(S) .....	217
ANEXO(S).....	241

## 1 INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa em encostas, fenômenos majoritariamente naturais, contudo, podem resultar em riscos em várias partes do mundo acarretando consequências negativas para os ecossistemas naturais e para a sociedade (VAN DEN EECKHAUT *et al.*, 2012). Um exemplo dá-se na região Sul Brasileira, periodicamente afetada por estes fenômenos extremos (SAITO *et al.*, 2009).

Eventos de movimentos de massa, fluxos de detritos e inundações em Santa Catarina já provocaram, e tendem a continuar, uma série de desastres com prejuízos socioeconômicos e ambientais. No sul do estado, num passado recente, ocorreram episódios de grande magnitude, como no ano de 1974 (ASSUNÇÃO, 2014; MATEUS, 2016), que atingiu o município de Tubarão, ou em 1995 (PELLERIN *et al.*, 1997), que ficou concentrado na Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá - BHRA. Outro exemplo notório deu-se no ano de 2008, no Vale do Itajaí (LUDWIG; MATTEDI, 2016), com proeminentes perdas materiais e imateriais.

Um dos fatores determinantes para ocorrência de movimentos de massa em Santa Catarina é o relevo (PAULINO, 2013), constituído por áreas declivosas. Adicionalmente, para o estado aponta-se como tendência o aumento dos índices pluviométricos (CAMPOS *et al.*, 2006), verificada localmente pela análise de dados históricos da estação meteorológica de Urussanga, referência para o sul do estado, que apresenta tendência de aumento de chuvas (SANT ANA; BACK, 2019), o que pode aumentar a saturação dos solos e propiciar maior incidência de movimentos de massa.

Segundo Ludwig e Mattedi (2016), percebe-se, a nível mundial, que nas últimas décadas tem aumentado o número de ocorrências de desastres, o que pode indicar dois distintos processos: a intensificação das ocorrências, ou mesmo a maior capacidade de registro. Em 2015 foi publicado o Atlas Mundial de Risco de Desastres e, para o Brasil, a principal base de dados disponível é o Atlas Brasileiro de Desastres Naturais (CEPED-UFSC, 2013). Estas duas publicações recentes reforçam a importância de se compreender os fenômenos naturais para correta análise de risco.

De acordo com Tominaga *et al.* (2012), um fenômeno natural passa a ser considerado desastre a partir do momento que atinge áreas habitadas, provocando danos, comprometendo o funcionamento de uma comunidade ou sociedade, com

reflexos negativos para economia, perdas humanas, ambientais, provações para celeridade política, em grande extensão. Em algumas situações o impacto é tão pronunciado que excederá a capacidade de autossuperação dos atingidos.

Goerl (2012) coloca que o risco ofertado por um desastre é função de perigo e vulnerabilidade, com diversas definições para risco, perigo e vulnerabilidade, no entanto, é geralmente aceito que perigo está associado aos fenômenos naturais com potencial de causar danos a uma comunidade exposta. Segundo Tominaga *et al.* (2012, p. 149), define-se risco “como a probabilidade de consequências prejudiciais, ou danos esperados (...) resultantes da interação entre perigos naturais ou induzidos pela ação humana e as condições de vulnerabilidade”. Conforme Rebelo (2003, p. 11):

“A ideia de risco tem acompanhado desde sempre o homem. No princípio, os riscos eram exclusivamente naturais; a pouco e pouco, além desses apareceram outros como consequência das suas próprias atividades, tendo ou não componente natural. Hoje, os riscos são já de toda a ordem, desde os naturais aos socioeconômicos ou aos tecnológicos e, frequentemente é impossível analisá-los em separado, pois constituem-se em verdadeiros complexos de risco.”

De acordo com Brasil (2012), Artigos 7º e 8º da Lei 12.608/12, que institui a Política Nacional de Proteção de Defesa Civil (PNPDC), estados e municípios brasileiros têm o dever de identificar e mapear as áreas de riscos de desastres. Conforme Michel e Kobiyama (2016a), esta exigência obriga a comunidade brasileira a apropriar-se do conceito de risco, saber identificá-lo, bem como mapeá-lo, visando a aplicação de medidas preventivas, estruturais e não estruturais.

Na sociedade de risco, descrita por Ulrich Beck (MENDES, 2015), o grau de percepção dos riscos varia de acordo com o tipo de comunidade e as experiências e histórias pessoais, sendo influenciado pelo nível de conhecimento ou de acesso à informação. Dimensionar e espacializar o risco implica, antes de tudo, em mapear adequadamente a suscetibilidade natural (SILVEIRA *et al.*, 2014), que pode ser a causa deflagradora de perigo, componente da análise de risco. Quanto mais preciso for o produto cartográfico resultante da interpretação fisiográfica, melhor será a combinação com diagnóstico de vulnerabilidade, nas diferentes propostas existentes de complexos de risco (REBELO, 2003).

No mapeamento de suscetibilidade natural, a partir dos anos 70 do século passado, iniciou-se a produção de diferentes tipos de mapas, objetivando, ao fim, a definição de limiares de perigo e riscos para uma área. De combinações inicialmente



qualitativas, estes produtos cartográficos passaram, aos poucos, a considerar frequências e estimativas de eventos, tornando-os produtos quantitativos. Estes mapeamentos realizados foram incorporados como estratégia de reconhecimento de território, principalmente, informando restrições geotécnicas (FELL *et al.*, 2008). Leroi *et al.* (2005) e Fell *et al.* (2008) apontam que estes estudos, da suscetibilidade natural, com ênfase para escorregamentos/estabilidade de encostas, são uma demanda de elevada importância, principalmente pelo papel que exercem em ações de planejamento e gestão ambiental, territorial e de riscos.

Silveira *et al.* (2014) enfatizam que mapear a suscetibilidade natural envolve técnicas de viés preditivo, que objetivam definir eventos potencialmente perigosos, bem como, as condições espaciais e temporais de sua ocorrência. Entretanto, ainda se está diante de uma falta de critérios consensuais, que estejam pré-estabelecidos e sejam adotados de forma padronizada, como o melhor método para mapeamentos de suscetibilidade.

Os mapeamentos de risco no Brasil são predominantemente realizados a partir de avaliações qualitativas, com base em opinião técnica de especialistas e vivências de técnicos municipais e moradores das áreas mapeadas. De acordo com Faria e Augusto Filho (2013a), sempre se realizam avaliações comparativas, de forma a apresentar um produto final ponderado e em linguagem acessível, entretanto, sempre se efetuando combinações qualitativas, cujas matrizes, mapas e seus limiares se enquadram como métodos heurísticos. Uma mesma área de estudo, analisada por uma ótica, pode ser classificada como altamente propensa para movimentos de massa, por exemplo, ao passo, que, por outro método, poderá apresentar resposta diferente.

Pourghasemi *et al.* (2018) compararam três diferentes mapas de suscetibilidade à escorregamentos para uma região montanhosa na Coreia do Sul, sendo estes obtidos a partir de diferentes algoritmos, que combinaram 17 fatores condicionantes. Os autores mencionam que incertezas nos dados de entrada colocam em xeque quais as vantagens/restrições que cada metodologia de mapeamento de suscetibilidade natural pode oferecer para uma mesma área, bem como, se há possibilidade de orientar dados de entrada, para que de fato, haja um estudo aplicado, de resposta confiável num recorte espacial.

Salienta-se que é reconhecido o uso de opinião de especialistas como uma medida de probabilidade subjetiva para avaliação de riscos à escorregamentos,

contudo, para dirimir esta subjetividade, nesta área do conhecimento, a Análise Multicritério oferece um viés analítico com resultados quantitativos, a partir de dados qualitativos, a exemplo da modelagem pela Análise Hierárquica de Processos – AHP (SAATY, 1977, 1991, 2008). Complementarmente, uma abordagem determinística pode ser efetuada por modelos fisicamente embasados (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994), em que resultados de ensaios de campo, de laboratório e registros de cicatrizes de escorregamentos, oportunizam a aplicação de modelos de estabilidade de encostas, a exemplo do SHALSTAB - *Shallow Landsliding Stability Model* (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998).

Desta forma, as pesquisas relacionadas à desastres proporcionados por movimentos de massa em encostas ainda não se esgotaram (VAN DEN EECKHAUT *et al.*, 2012), sendo crescente e urgente a demanda para identificação, calibração (SORBINO *et al.*, 2010) e validação em campo do zoneamento espacial destes locais de ocorrência, bem como, análises comparativas de métodos. De acordo com Azevedo *et al.* (2015), estes esforços vão ao encontro de colaborar com o gerenciamento e planejamento do espaço, para minimizar consequências adversas.

Adicionalmente, como recurso ao mapeamento de eventos pretéritos de escorregamentos em encostas, fotografias aéreas antigas constituem um importante acervo para estudos em Cartografia, Geografia, Ciências Ambientais e áreas correlatas, ofertando um fiel retrato das condições espaciais numa determinada data (BRITO *et al.*, 2006), com um nível de detalhe passível de se tornarem informações componentes de um mapa temático. Niethammer *et al.* (2012) analisaram a geometria, disposição e evolução de uma cicatriz de escorregamento na França utilizando-se de imagens aéreas ortorretificadas. Os autores concluíram que podem ser obtidas ricas informações de escorregamentos com este ferramental. Importante ressaltar, que para serem úteis, conforme Del Soldato *et al.* (2018), estas fotografias devem ser georreferenciadas e, se possível, ortorretificadas.

Diante desta problemática, de desastres naturais recorrentes em Santa Catarina, e da importância na identificação de cicatrizes de escorregamentos para mapeamentos preditivos mais precisos, este trabalho objetiva efetuar uma análise comparativa e combinação entre Análise Multicritério, pela AHP, com o modelo SHALSTAB, para mapeamento de áreas suscetíveis à escorregamentos translacionais rasos. A área de estudo é majoritária de encostas naturais florestadas, na sub-bacia formada pelas cabeceiras do rio Mãe Luzia (22,39 km<sup>2</sup>), dentro da

Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá - BHRA, localizada no município de Treviso, Estado de Santa Catarina.

As encostas naturais nesta sub-bacia apresentam registros de centenas de cicatrizes de escorregamentos, datadas em contextos temporais distintos, registradas por voos aerofotogramétricos de 1957 e 1978. Associando-se as características fisiográficas como: variada litologia, alta declividade, feições e orientação de vertentes, solo raso, com alta pluviosidade, pode-se afirmar que esta área é suscetível à futuros escorregamentos, destacando-se translacionais de contato solo-rocha. Conhecer o histórico destes movimentos de massa neste local é um passo importante para efetuar estudo comparativo de diferentes métodos de mapeamento e verificar a magnitude dos processos geomorfológicos. A importância em se mapear a suscetibilidade natural e a ocorrência de escorregamentos nesta sub-bacia é reforçada pelas hipóteses de que:

- Existem diferentes metodologias que podem ser integradas para executar mapeamento da suscetibilidade para escorregamentos;
- Movimentos de massa, mesmo recorrentes na área de estudo, não são conhecidos em sua geomorfometria, magnitude e consequências indiretas, ou seja, no futuro poderão comprometer ecológico, social e ambientalmente a bacia e os elementos expostos à jusante;
- Construindo-se um inventário de cicatrizes de escorregamentos na área de estudo será possível restituir diferentes contextos temporais como instrumento para realizar, calibrar e validar diferentes aplicações metodológicas;
- Pela sobreposição de mapas obtidos pelos diferentes métodos será possível identificar setores das encostas que possuem muito alta suscetibilidade aos escorregamentos, bem como, os que ainda poderão acontecer.

Com base nas hipóteses iniciais, o diagnóstico fisiográfico e aplicação das duas metodologias, individualmente ou combinadas, para uma mesma área propícia à escorregamentos, ofertará respostas confiáveis, individualmente e de maneira integrada, quanto à eficácia de cada método.

Por fim, esta pesquisa está estruturada em seis capítulos. O primeiro capítulo é introdutório, apresenta o tema, sua problemática, importância e os objetivos. O segundo capítulo aborda o marco teórico, os aspectos conceituais dos desastres naturais, com ênfase aos escorregamentos, bem como, são detalhados os procedimentos de restituição em fotografias aéreas antigas e na adoção de metodologias para mapeamento de escorregamentos. O terceiro capítulo identifica e descreve a área de estudo, com sua caracterização fisiográfica. No quarto capítulo a metodologia empregada no trabalho explana o tipo da pesquisa, a proveniência dos dados secundários, os procedimentos para obter-se o inventário de cicatrizes de escorregamentos e aplicar as metodologias para mapeamento da suscetibilidade à escorregamentos, pela Análise Multicritério (AHP) e SHALSTAB. O quinto capítulo é de resultados, pela aplicação, comparação, integração e validação dos métodos propostos para entender os escorregamentos na área de estudo. O sexto capítulo apresenta as considerações finais e recomendações do trabalho.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral do trabalho é efetuar uma análise comparativa e de integração entre Análise Multicritério e o modelo SHALSTAB para mapeamento de áreas suscetíveis à escorregamentos translacionais rasos.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar geometricamente os escorregamentos possibilitando posteriores validações probabilísticas, de suas densidades sobre classes temáticas de fatores predisponentes;
- Propor uma etapa quantitativa de ponderação de pesos de classes de fatores predisponentes aos escorregamentos, a ser incorporada nos procedimentos da Análise Multicritério, a partir de informações do inventário de cicatrizes;
- Aplicar Análise Multicritério e modelo determinístico para mapear a suscetibilidade aos escorregamentos;
- Caracterizar as diferentes escalas de suscetibilidade e seu zoneamento espacial identificados pela aplicação de cada modelo, validando-os por índices de acerto e de erro e análise de sensibilidade/especificidade.

## 2 MARCO TEÓRICO

### 2.1 DESASTRES NATURAIS

Os desastres naturais ocorrem no âmbito da relação homem/natureza, evoluindo de uma total aceitação fatalista para uma visão deturpada de dominação das forças naturais. E ao longo desta oscilação extrema de interpretação da relação homem natureza, a cada ano, tem se observado que mesmo fenômenos naturais de recorrência previsível tendem a surpreender os mais preparados.

De acordo com Ludwig e Mattedi (2016), foi em 1945 que surgiram os primeiros trabalhos sobre “*hazards*”, de autoria de Gilbert White, para estudos de enchentes nos Estados Unidos, enfatizando o ponto de vista da Geografia, na qual relacionava a probabilidade de ocorrer um evento físico (*hazard*) que fosse prejudicial para a sociedade.

Conforme Marcelino (2008), em interpretação do Glossário da Defesa Civil Nacional, os desastres naturais caracterizam-se por impactar de maneira adversa e com intensidade um sistema social ou ecossistema vulnerável, o que acarreta em danos e prejuízos, que excederão a capacidade da comunidade ou sociedade atingida em reorganizar-se, conviver com o impacto decorrido. Complementarmente, um desastre somente será classificado como tal, mediante a ocorrência de pelo menos um dos seguintes critérios (SCHEUREN *et al.*, 2008; TOMINAGA *et al.*, 2012):

- 10 ou mais óbitos;
- 100 ou mais pessoas afetadas;
- Declaração de estado de emergência;
- Pedido de auxílio internacional.

#### 2.1.1 Desastres naturais e implicações no desenvolvimento

De acordo com Ludwig e Mattedi (2016), as regiões brasileiras apresentam percentuais distintos conforme as tipologias de desastres mais recorrentes, sendo a região Sul do país a mais impactada, predominando aqueles vinculados aos extremos pluviométricos. Ludwig e Mattedi (2016) mencionam que,

em relação ao Brasil, o Sul concentra 98% dos registros de tornados, 86,7% das geadas, 88,3% do granizo, 77,4% dos vendavais e 39% das enxurradas.

O CEPED-UFSC (2013) e o Atlas de Desastres Naturais do estado de Santa Catarina (2014) reforçam que o Estado de Santa Catarina reúne uma grande quantidade e diversidade de eventos. Os registros são os mais variados, desde as estiagens até as grandes inundações, colocando o Estado com um ingrato destaque neste quesito, uma vez que fenômenos naturais extremos incorrem em prejuízos sociais, econômicos e ambientais.

Ludwig e Mattedi (2016) enunciaram que em nível mundial, desde 1900, mais de 62 milhões de pessoas já vieram a óbito em decorrência de desastres, o que equivale ao número de pessoas mortas nas duas grandes guerras. Os autores afirmam que há evidência que os desastres impactam além das economias, ocasionando perdas sociais de desenvolvimento. Ainda de acordo com Ludwig e Mattedi (2016), os problemas do desenvolvimento podem deflagrar desastres e os desastres retardam o desenvolvimento, ou seja, pode se tornar um círculo vicioso impeditivo do progresso.

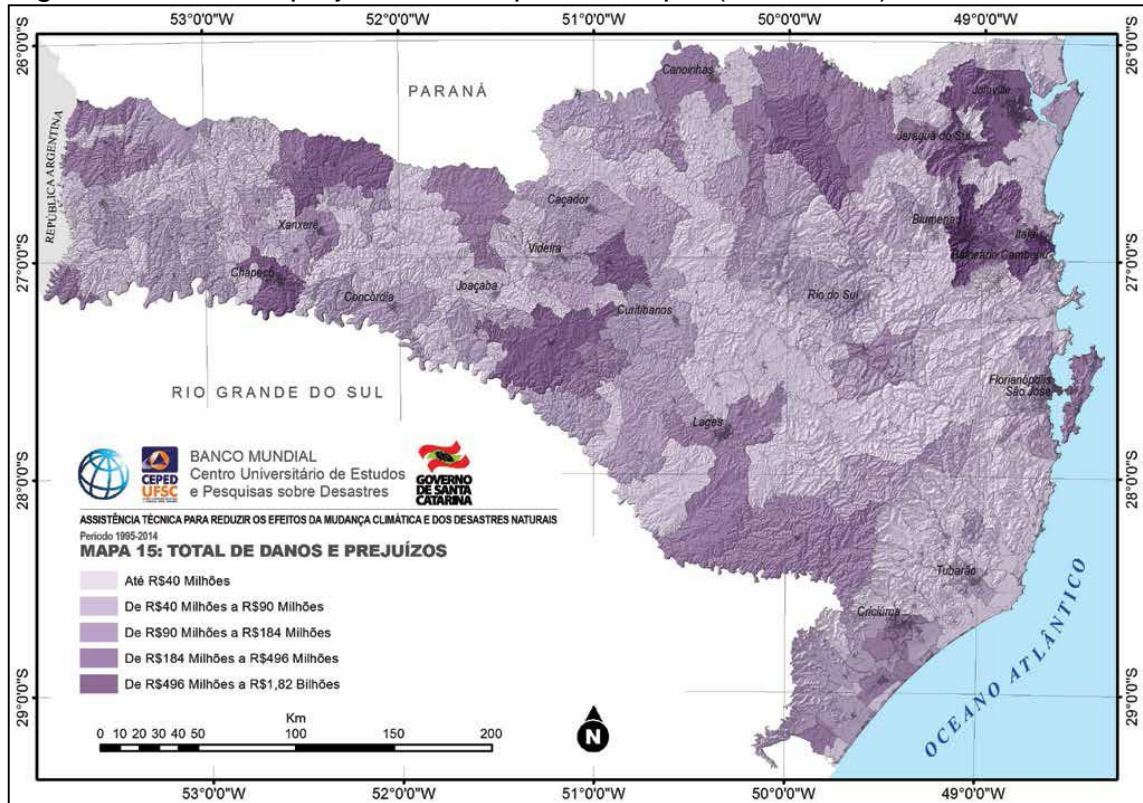
A título de exemplificação dos custos sociais de um desastre, de acordo com CEPED-UFSC (2016), particularmente para o Estado de Santa Catarina, a Figura 1 expressa o total de prejuízos e danos por cada município atingido pelas inundações e movimentos de massa de novembro de 2008 (concentrado em municípios do Vale do Itajaí, como Blumenau e Ilhota). As perdas foram calculadas pelo Banco Mundial em R\$ 4.75 bilhões, o que na época representava 2,67% do PIB do Estado. “Os setores sociais (habitação, saúde, educação e cultura) foram os mais afetados, com perdas e danos estimados em R\$ 1,74 bilhão, sendo que, apenas no setor habitacional, os custos associados foram de R\$ 1,4 bilhão (CEPED-UFSC, 2016, p. 9).

Sendo assim, nos últimos anos está ocorrendo uma convergência de estudos para a questão do desenvolvimento e desastres. De acordo com Ludwig e Mattedi (2016) existem duas formas de interpretar os efeitos dos desastres no desenvolvimento de um lugar:

1º - A já conhecida produção de efeitos negativos, sendo que o capital a ser aplicado nestas regiões proverá de outras localidades, que ficam com menos recursos;

2º - Produz efeitos positivos na reconstrução, já que injetam capital de fonte externa, possibilitando reestruturar os parques produtivos e inovar tecnologicamente.

Figura 1 – Danos e prejuízos totais por município (1995-2014).



Fonte: CEPED – UFSC (2016).

Fato notório é que em países que dispõem de recursos pode até haver resultados positivos de remanejamento de finanças e planejamento, melhor organização e preparo para suportar posteriores eventos naturais. Entretanto, nos países pobres, com padrão e desenvolvimento que já potencializa desastres e cria vulnerabilidades, são os efeitos negativos que geralmente ocorrem.

Os autores Ludwig e Mattedi (2016, p.35) já ressaltavam que:

“(…) se o padrão de desenvolvimento for sustentável, o desenvolvimento irá reduzir a vulnerabilidade, e os impactos dos desastres irão produzir oportunidades para o desenvolvimento. Por outro lado, se o padrão for insustentável, o desenvolvimento irá intensificar as vulnerabilidades, e os impactos dos desastres irão retardar o desenvolvimento da região.”

Em países considerados ricos, ou de alta renda, por exemplo, o cômputo geral da perda anual média com os desastres é de apenas 1,45% do gasto social. Por outro lado, nos países pobres, a perda anual média é 22% do gasto social, o



que demonstra a incapacidade de alguns territórios lidarem com esta problemática, entrando numa caótica espiral. Por isso, os desastres não devem ser entendidos somente como acontecimentos que afetam o desenvolvimento de uma região, mas também, como uma resultante do desenvolvimento regional (LUDWIG; MATTEDI, 2016).

### **2.1.2 Classificação dos desastres**

A classificação dos desastres, ou suas tipologias, é comumente organizada em relação à origem e à intensidade, esta última dependendo, em muito, do grau de vulnerabilidade do sistema receptor afetado. A classificação quanto à intensidade é importante para facilitar resposta e recuperação para uma área atingida, dispondo recursos, de acordo com um nível de intensidade, variável de I a II: I – suportável e superável com os recursos do município, com aportes estaduais e federais, sendo decretada situação de emergência; II – não suportáveis e superáveis pelos governos locais, necessitando de mobilização especial, em alguns casos, de ajuda internacional, sendo decretada situação de calamidade pública (INSTRUÇÃO NORMATIVA nº 1, 2012).

De acordo com Tominaga *et al.* (2012, p. 149), define-se risco “como a probabilidade de consequências prejudiciais, ou danos esperados (...) resultantes da interação entre perigos naturais ou induzidos pela ação humana e as condições de vulnerabilidade”. Segundo Marcelino (2008), perigo consiste num evento, natural ou antrópico, potencialmente danoso, ao passo que perigo natural são os provenientes somente de processos naturais da biosfera.

Sendo assim, o perigo pode resultar na possibilidade de risco, e estes podem ter origem tecnológica, social e natural. O risco tecnológico, também designado de humano, ou antropogênico, está associado a intervenção antrópica com acidentes tecnológicos ou industriais, a exemplo da instalação de torre de telefonia móvel e as consequências para saúde pública (TOMINAGA *et al.*, 2012). O risco social está vinculado a vulnerabilidade social, relacionada às condições de uma população, a exemplo de seu nível instrucional e de sua renda, bem como suas infraestruturas disponíveis e capacidade de suportar um desastre. Por sua vez, os riscos naturais subdividem-se em físicos e biológicos (REBELO, 2003).

Conforme Tominaga *et al.* (2012), os riscos físicos ainda se subdividem em atmosféricos, hidrológicos e geológicos, sendo estes últimos separáveis em endógenos (terremotos, vulcanismo) e exógenos, a exemplo de movimentos de massa. Nesta classificação os autores não especificam se a massa que desce a encosta é úmida ou seca, contudo, enquadram o fenômeno como risco geológico.

Uma outra via ressalta que os desastres hidrológicos são caracterizados principalmente pelos movimentos de massa úmida e inundações, sendo desencadeados e potencializados pela movimentação da água superficial e subterrânea, apresentando recorrência e crescente número de afetados nas últimas décadas, não só no Brasil, mas no mundo (MICHEL; KOBİYAMA, 2016a).

A fonte seguida internacionalmente para classificação quanto à origem dos desastres trata-se do EM-DAT (*Emergency Disaster Data Base*), uma iniciativa de integrar os principais bancos de dados de desastres (*Centre for Research on the Epidemiology of Disasters* - CRED e *Munich Reinsurance Company* - MunichRe) que desde o ano de 2008 classificou os desastres em dois grupos: naturais e tecnológicos (SCHEUREN *et al.*, 2008). Os naturais foram divididos em seis subgrupos: climatológicos, geofísicos, biológicos, meteorológicos, extraterrenos e hidrológicos, e estes em doze outros subgrupos. Fato notório na unificação da classificação consistiu na separação dos movimentos de massa em dois tipos: úmidos e secos. O primeiro está relacionado com condicionantes na presença de água, ou seja, meteorológicos e hidrológicos, enquanto o segundo com eventos geofísicos. Contudo, independentemente da origem, estes movimentos de massa são chamados de escorregamentos.

O Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (*United Nations Office for Disaster Risk Reduction* – UNISDR, 2009) adotou a nova classificação, visto que o EM-DAT é o principal banco de dados utilizado pela ONU (KOBİYAMA; MICHEL; GOERL, 2012; MICHEL; KOBİYAMA, 2016a). No Brasil, os movimentos de massa continuam sendo classificados como fenômenos geológicos, pela Codificação e Classificação Brasileira de Desastres (COBRADE), contradizendo o CRED (internacional) (KOBİYAMA *et al.*, 2010; KOBİYAMA *et al.*, 2006).

### **2.1.3 Movimentos de massa**

De maneira genérica, um movimento de massa numa encosta pode ser de diferentes tipologias, a exemplo das quedas, tombamentos de rochas, escorregamentos translacionais, rotacionais e fluxo de detritos. A fisiografia de um local, sua área fonte, são os fatores predisponentes, que em sua combinação formam o mecanismo de iniciação e gatilho ambiental de cada local.

A atual conjunção de interpretações de diversos autores permite afirmar que movimentos de massa consistem na movimentação combinada ou não, de solo, manto de intemperismo, vegetação e rochas, pela vertente, sob ação direta da gravidade, facilitada por água ou degelo, que contribuem para maior fluidez dos solos. De acordo com Leinz e Leonardos (1971), movimentos de massa são designados de movimentos de encostas, devido à várias causas, comumente estruturais do maciço rochoso. Caso este movimento seja relacionado somente a descida do solo, os autores conceituam como escorregamento de terra, e este diferencia-se do rastejo pela velocidade da ocorrência.

Rice *et al.* (1969) apresentaram que o escorregamento do solo seria resultado de uma falha de fricção ao longo de uma superfície de cisalhamento, essencialmente paralela da superfície topográfica, local este que as tensões acumuladas excederão as de resistência. A parte despreendida do solo desloca-se para baixo, sob ação gravitacional e ocorrência de chuvas, expondo o substrato do solo, ou mesmo parte deste, formando um depósito de material, essencialmente desorganizado, acumulado na base de uma encosta. Ainda conforme Rice *et al.* (1969), esta zona de cisalhamento pode ocorrer na linha de concentração máxima das raízes pouco profundas, entre uma camada coluvial e a rocha-matriz, numa interface de argila, ou de paleopavimentos. As condições mais favoráveis ocorrerão em declividades acentuadas, em solos sem coesão, em períodos de forte chuva e sem proteção vegetal.

De acordo com Highland e Brobowsky (2008) o mais aceito é que as tipologias do movimento de massa se subdividam pelo processo dinâmico, geometria e material deslocado, resultando, assim, em 4 tipos possíveis: rastejo, escorregamentos, quedas, corridas e fluxos. Conforme Highland e Brobowsky (2008, p. XV)

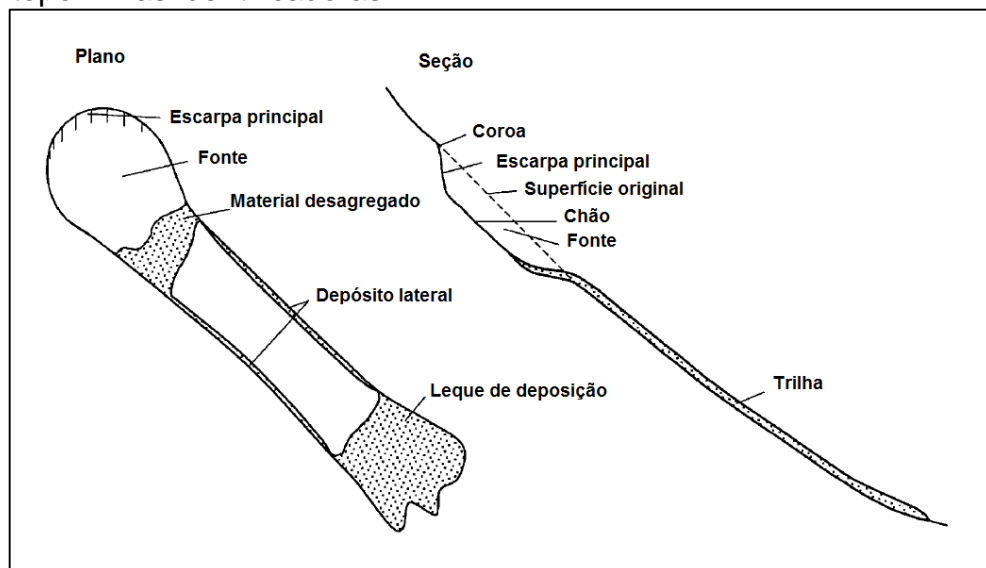
“O rastejo corresponde ao “creep” da nomenclatura inglesa. Os escorregamentos correspondem aos “slides”. Os escorregamentos classificam-se em planar, circular e em cunha. As quedas correspondem a “falls” da literatura inglesa. No Brasil, além da queda de blocos, ainda se

insere nessa categoria o rolamento de matacão e o tombamento. Na literatura inglesa distingue-se duas categorias: a queda e o tombamento. As corridas ou escoamentos ou fluxos correspondem a “flows” da literatura inglesa. As corridas podem assumir três categorias: de terra, de lama e de detritos.”

Conforme Tominaga *et al.* (2012), os rastejos caracterizam-se por apresentar velocidades baixas, decrescentes com a profundidade, e de geometria indefinida. Os escorregamentos apresentam velocidade média a alta, com poucos planos de deslocamento e subdivididos em planares (translacionais), rotacionais e em cunha. As quedas caracterizam-se pelo movimento de queda livre, geralmente de blocos rochosos em alta velocidade, com rolamento de matacão e tombamento de placas. As corridas de lama e detritos apresentam-se com alta viscosidade e velocidade média a alta, próximo aos cursos de drenagem natural, congregando diferentes proporções de detritos, madeira, rochas, solo e água misturados.

Uma vez finalizado o escorregamento, a área fonte e a trilha (caminho) ficam evidentes nas encostas, como cicatrizes. Dai e Lee (2002) descreveram que os escorregamentos de terra teriam características comuns, como: uma área de origem, definida por uma superfície de ruptura, o chão e a área fonte; a trilha de escorregamento, onde predomina o transporte; e o leque de deposição. A visão em plano e perfil típica de um escorregamento translacional pode ser acompanhada na Figura 2.

Figura 2 – Ilustração de um típico escorregamento translacional e suas toponímias identificadoras.



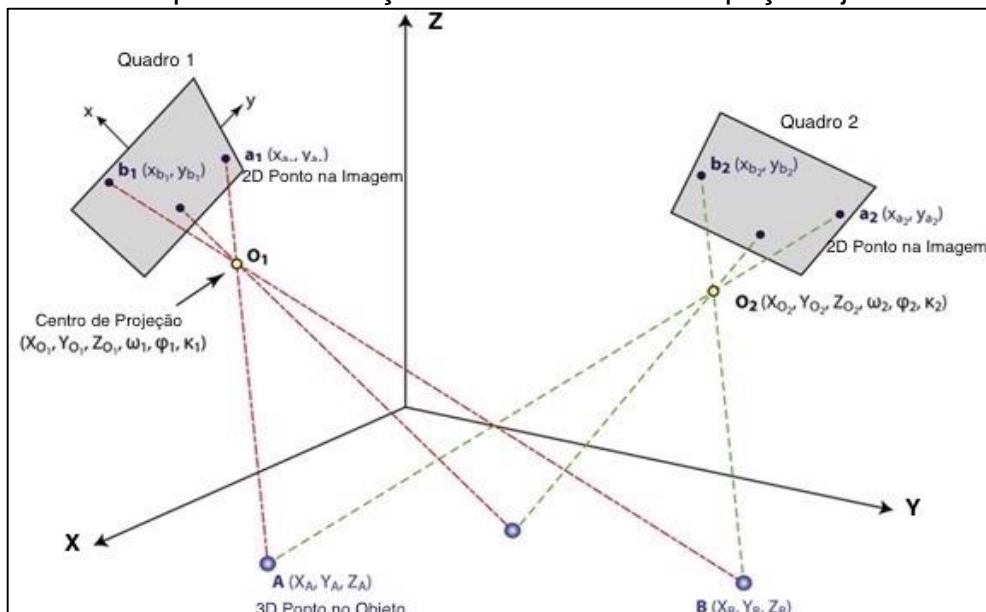
Fonte: Adaptado de Dai e Lee (2002).

Como pode ser visto, quaisquer classificações das categorias de movimentos de massa apresentarão limitações conceituais, tendo em vista que geólogos, geógrafos, engenheiros e outros profissionais sempre se apoiam em definições específicas, dada a diversidade de disciplinas associadas aos estudos destes fenômenos.

## 2.2 FOTOGRAMETRIA E RESTITUIÇÃO DE CICATRIZES DE ESCORREGAMENTOS

A Fotogrametria é uma ciência e técnica que permitem obter informação de um objeto, por meio de imagens adquiridas por sensores, sem o contato direto entre sensor e objeto. Brito e Coelho Filho (2007) já enfatizavam que o principal produto de saída dos estudos fotogramétricos era de transformar estas fotografias aéreas com tomada em perspectiva central, a partir de um sensor aerotransportado, em perspectiva ortogonal, através do processo de ortorretificação, por meio de fototriangulação. Esse procedimento irá prescindir de dados do terreno, para projetar tridimensionalmente a partir de uma informação original cartesiana. Seu objetivo principal, conforme Brito e Coelho Filho (2007, p.16) é a “reconstrução de um espaço tridimensional, chamado de espaço-objeto, a partir de um conjunto de imagens bidimensionais, chamado de espaço-imagem”, Figura 3.

Figura 3 – Par de fotografias aéreas com representação do espaço-imagem, necessário para reconstrução tridimensional do espaço-objeto.



Fonte: Adaptado de Verhoeven *et al.* (2010) e Doneus *et al.* (2016).

O desenvolvimento da Fotogrametria no Brasil acompanhou outros países, com poucos anos de diferença, ou até mesmo foi pioneiro em algumas linhas. A Fotogrametria, apesar de se basear em princípios geométricos simples (interseção de retas) e visão estereoscópica, para medições nas fotografias serem precisas, envolveram no passado uma tecnologia sofisticada em ótica, mecânica e, atualmente (SILVA, 2015), utiliza métodos digitais avançados.

A partir do emprego do conhecimento em Fotogrametria, fotografias aéreas antigas constituem um importante acervo para estudos e um fiel retrato das condições espaciais numa determinada data (BRITO *et al.*, 2006), com um nível de detalhe passível de fornecerem informações componentes de um mapa temático. Essas fotografias são úteis para rápido reconhecimento, posicionamento e definição da precisão tridimensional de coordenadas na superfície (KAREL *et al.*, 2013), ou seja, um recurso para prospectar informações métricas, atualizar base de dados (WILLNEFF; POON, 2006), de maneira confiável (NIETHAMMER *et al.*, 2012), inclusive de movimentos de massa.

Entretanto, para estas fotografias serem úteis, conforme destacam Del Soldato *et al.* (2018), estas devem ser georreferenciadas e, se possível, também ortorretificadas. Georreferenciar consiste em colimar pontos comuns em mapas e/ou fotos com pontos de controle e de verificação em campo (ONIGA; BREABAN; STATESCU, 2018), estabelecendo uma relação entre imagens e sistemas de coordenadas de objetos (VERHOEVEN *et al.*, 2010), sendo um pré-requisito necessário para qualquer tipo de mapeamento e integração de dados.

Uma vez georreferenciada, uma fotografia aérea fornece dados para uma gama de aplicações, como o planejamento territorial (VERYKOKOU; IOANNIDIS, 2016), análise de mudanças paisagísticas (FARAJI *et al.*, 2016), movimentos de massa em encostas (NIETHAMMER *et al.*, 2012; DEL SOLDATO *et al.*, 2018), dentre outros. O georreferenciamento, conforme Brovelli e Minghini (2012), permite integrar diretamente a cartografia histórica com todos os produtos atuais referenciados espacialmente. Contudo, Olsen e Stuedlein (2010) afirmam que mensurações de distâncias, ângulos, geometrias e alinhamento de feições, tomadas de fotografias aéreas, mesmo georreferenciadas, sempre apresentarão distorções.

Rocchini e Di Rita (2005) estudaram a influência do relevo na correção geométrica de fotografias aéreas, comparando os métodos de retificação sobre diferentes tipos de terrenos, dos mais planos aos mais montanhosos. Os autores

objetivaram verificar os resíduos nos eixos X e Y, concluindo que o georreferenciamento e suas funções polinomiais são eficientes em áreas planas, aumentando o erro em áreas acidentadas, na qual a ortorretificação garantiu maior qualidade.

Imagens ortorretificadas possuem qualidade geométrica superior (DONEUS *et al.*, 2013, 2016) e apresentam-se em perspectiva ortogonal (WILLNEFF; POON, 2006), uma vez que vão além de correção planimétrica. Uma imagem ortorretificada não está somente georreferenciada planimetricamente, mas também quanto a sua altimetria e em perspectiva ortogonal, teoricamente, os erros de posição devem ser mínimos. Na ortorretificação existem desafios comuns e até adicionais ao georreferenciamento (LADD *et al.*, 2006), como: habilidades fotogramétricas (*expertise*), informações calibradas da câmera e um Modelo Digital de Superfície (MDS) preciso e de alta resolução. Estes procedimentos podem ser executados num computador comum, com *software* específico para estes procedimentos, sendo que este conjunto desempenhará o papel de uma Estação Fotogramétrica Digital (EFD).

Fato comum é que o georreferenciamento e a ortorretificação prescindem da escolha de Pontos de Controle (PC) de campo, o que constitui o maior gargalo das metodologias (VERHOEVEN *et al.*, 2010), mas pode dirimir dificuldades no emprego de fotografias aéreas antigas. Oniga, Breaban e Statescu (2018) afirmam que o uso de maior número de PC aumentará a precisão e diminuirá a Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE), sendo este uma medida da diferença entre as coordenadas do PC e das coordenadas de saída de uma imagem, para o mesmo ponto (MORAD; CHALMERS; O'REGAN, 1996), após a imagem ter passado por uma transformação.

Para Olsen e Stuedlein (2010), se georreferenciadas e ortorretificadas, fotografias aéreas antigas ofertarão representação tridimensional de cicatrizes de escorregamentos, não identificadas numa análise planar, na qual pode-se obter geometrias, como comprimento, largura e área dos escorregamentos, remanescendo o desafio de se estimar os volumes destes.

Restituir a quantidade pretérita de material que desceu uma encosta, ou seja, o volume remobilizado de um escorregamento, é uma tarefa difícil, cara e desafiadora (HADIAN-AMRI *et al.*, 2014), especialmente numa área com grande número de cicatrizes, que podem se sobrepor e conjugar. Geralmente, utiliza-se da

diferença entre a superfície original e pós-evento deflagrador de escorregamentos, nos locais de áreas fonte de material. Para isso se faz necessária restituição sobre Modelo Digital do Terreno (MDT) extremamente preciso, a exemplo de levantamentos à laser. Contudo, de maneira mais pragmática, vários pesquisadores em todo o mundo já propuseram relações entre área dos escorregamentos e seus volumes, sendo estes obtidos a partir de modelos preditivos.

Ghazipour e Simpson (2016) realizaram estudos no Irã, a partir de um inventário composto por 335 cicatrizes de escorregamentos, obtendo um modelo de regressão, cuja relação de área e volume apresentou um coeficiente de determinação de 0,96. Hadian-Amri *et al.* (2014), também no Irã, utilizaram de seu inventário de cicatrizes e afirmaram que os volumes preditos estão em conformidade com os observados, ou seja, que não havia diferença estatisticamente significativa.

Na análise de modelos de regressão propostos para cálculo de volumes de escorregamentos, outros autores, de longa data, já propuseram aplicações similares para outras condições fisiográficas de contorno, a exemplo de Simonett (1967) em Papua Nova Guiné, Martin *et al.* (2002) no Canadá, Ten Brink *et al.* (2006) em Porto Rico, Imaizumi e Sidle (2007) no Japão, Guzzetti *et al.* (2009) na Itália, dentre outros.

### **2.2.1 Estação Fotogramétrica Digital: projeto E-Foto**

Os maiores desafios em projetos que se utilizam de fotografias aéreas antigas são (DONEUS *et al.*, 2013): i) se estabelecer pontos de controle, ii) possuir *software* especializado, iii) ter experiência e habilidades fotogramétricas. Como resultado, milhões de fotografias estão atualmente armazenadas em arquivos que, muitas vezes, permitem apenas um acesso geométrico limitado das imagens. O mapeamento detalhado só pode ser usado quando as fotografias são georreferenciadas, ortorretificadas, interpretadas e mapeadas. Ladd *et al.* (2006) já diagnosticavam esta necessidade, em seu trabalho já constava a idealização de uma plataforma computacional educacional para georreferenciamento, ortorretificação e mosaicagem de imagens aéreas.

De acordo com Brito e Coelho Filho (2007), para ser passível de reportar uma informação com acurácia e precisão, com medições geometricamente confiáveis, conforme escala de interesse de estudo, imagens aéreas devem ser



submetidas a uma série de operações numa EFD, com emprego de técnicas fotogramétricas que envolverão a orientação interna da foto, ressecção espacial, fototriangulação, montagem de estereopar, extração e interpolação do Modelo Digital de Elevação (MDS), para então, ao fim, obter-se uma imagem ortorretificada.

Uma EFD e programas de Fotogrametria digital são mais práticos e versáteis (BRITO; COELHO FILHO, 2007) do que os restituidores analógicos ou analíticos. Um exemplo desta praticidade é o Projeto E-Foto (BADOLATO; AGUIAR, 2010), que oferece um conjunto simples de programas, congregando numa única estação de trabalho os objetivos do autoaprendizado e do *software* livre. Conforme Ribeiro *et al.* (2018) e Tramontina *et al.* (2017), o objetivo deste projeto é ofertar ambiente de aprendizado dos princípios de Fotogrametria, reunir os dados num *e-book*, além de disponibilizar código fonte. De acordo com Brito e Coelho Filho (2007), essa prática permitirá o aperfeiçoamento e até desenvolvimento recorrente de novos módulos.

## 2.3 MAPEAMENTO DE ESCORREGAMENTOS

Em decorrência da problemática dos escorregamentos, visando diminuir ou atenuar suas consequências ecológicas e/ou socioeconômicas, deve ser realizada uma investigação e documentação de informações, seja com enfoque pontual, com ações locais de correção, a exemplo de um talude instável, seja pelo enfoque abrangente de um mapeamento de áreas suscetíveis aos escorregamentos, com um viés preventivo (MARCELINO, 2003).

Desde os anos setenta do século passado começaram a emergir vários tipos de “mapas” de suscetibilidade, perigo e riscos para escorregamentos (FELL *et al.*, 2008) e os produtos gerados passaram a incorporar uma frequência estimada de eventos, inicialmente em combinações mais qualitativas do que quantitativas. De qualquer forma, estes mapeamentos expeditos foram, aos poucos, sendo introduzidos como política de reconhecimento de territórios, principalmente informando restrições geotécnicas.

Estas estratégias metodológicas de integração de informações espaciais, visando um mapa final, ou resultante, partem, basicamente, de 3 grupos de métodos distintos de mapeamento de áreas de suscetibilidade para escorregamentos: heurísticos, estatísticos e determinísticos.

### 2.3.1 Métodos heurísticos

Os métodos heurísticos são estratégias mais subjetivas, tendo em vista que para executá-las o especialista externaliza o tipo e/ou grau de risco com base em trabalhos de observação em campo e na geomorfologia local. Os métodos heurísticos se baseiam na opinião especializada de quem está efetuando a análise, considerando duas estratégias no seu mapeamento: o mapeamento dos escorregamentos e os aspectos geomorfológicos (MARCELINO, 2003). Os métodos heurísticos subdividem-se em dois tipos principais, a análise geomorfológica e o mapa por combinação qualitativa:

- Na análise geomorfológica a suscetibilidade natural é determinada diretamente pelo profissional encarregado pelos estudos, com ênfase na sua experiência, raciocínio e analogias (FELL *et al.*, 2008). Estas regras de decisão são difíceis de formular, variam de pessoa para pessoa e de lugar para lugar, portanto, muito questionadas e criticadas (SOETERS; VAN WESTEN, 1996).

- No mapa de combinação qualitativa o responsável especialista pondera valores a uma série de parâmetros de entrada (mapas base) e, às vezes, às classes individualizadas destes níveis de informação, que então serão somadas e quantificadas (FELL *et al.*, 2008). Estas estratégias são aplicações correntes e usuais, entretanto, com o constante desafio de se ponderar adequadamente os parâmetros de entrada (fatores). É exemplo da combinação qualitativa a Análise Multicritério pelo emprego da Análise Hierárquica de Processos – AHP (SOETERS; VAN WESTEN, 1996).

- Análise Multicritério

Na análise de suscetibilidade à escorregamentos existem limitações de métodos, a exemplo de abordagens determinísticas, que prescindem de dados geotécnicos e hidrogeomorfológicos, com inerentes custos e difícil execução, ou mesmo, de métodos estatísticos, que demandam inventário completo de movimentos de massa. Uma avaliação preliminar e de maior agilidade da suscetibilidade pode ser aplicada utilizando-se de informações existentes, adaptadas, ou provenientes de dados iniciais, a partir de abordagens heurísticas, por

meio das técnicas de avaliação multicritério (*MCA – Multicriteria Analysis*) (HE *et al.*, 2011; BRITO *et al.*, 2017).

Análises multicritérios consistem em ferramentas matemáticas que oportunizam comparar cenários, ou alternativas, com base em critérios variados, objetivando a ponderação e orientação na tomada de decisão. Estas análises requerem uma série de procedimentos iniciais para que se viabilizem, a exemplo da padronização em escala de valores comuns, uma vez que os critérios componentes da análise podem estar representados em diferentes unidades, ou mesmo, basear-se na opinião de especialistas, ofertando clareza e reduzindo-se a subjetividade (CORSEUIL, 2006; HE *et al.*, 2011).

A aplicabilidade e interação de Análises Multicritério, com a análise espacial, num ambiente de Sistema de Informações Geográficas, conforme Corseuil (2006), representam um ganho na sobreposição de mapas que objetivem um resultado combinado de natureza relativa, excluindo-se as restritivas, uma resposta adequada para as regras de tomada de decisão que permeiam as relações entre dados primários de entrada e dados cruzados, ou de saídas. Na aplicação da Análise Multicritério para dados espaciais é essencial que seja realizada a padronização dos fatores. Este procedimento é possível por meio a aplicação de uma escala numérica comum, em que, segundo Rodrigues (2013), um conjunto de dados original é reclassificado numa escala normalizada, entendendo-se que os limites entre classes de representação da paisagem não são rígidos, mas sim, contínuos e graduais.

O segundo passo, talvez o mais complexo e importante, trata-se de elencar um método de determinação de pesos e comparar diferentes fatores. Dentre as métricas disponíveis, conforme Komac (2006), a AHP, desde o princípio de idealização realizado por Saaty (1977), vem sendo empregada em diversos estudos de casos em estudos de suscetibilidade ambiental e escorregamentos, que resultem em mapas combinados, com respostas ponderadas de análises da paisagem (ROSAS E SILVA, 2007; MAGALHÃES *et al.*, 2011).

A AHP foi idealizada e aplicada por Saaty (1977; 2008) e trata-se de uma técnica do estudo de sistemas, através da comparação pareada, em que os critérios componentes de uma análise são comparados de dois a dois atribuindo-se um valor de julgamento resultante do relacionamento entre eles, de acordo com uma escala pré-estabelecida, a escala Fundamental de Saaty, que varia de 1/9 a 9, composta

por nove pontos, que define o grau de importância, conforme o Quadro 1 (CORSEUIL, 2006; ROSAS E SILVA, 2007).

Quadro 1 – Escala de avaliação contínua para comparação pareada dos critérios.

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extremamente	Fortemente	Muito	Pouco	Igual	Pouco	Muito	Fortemente	Extremamente
Menos Importante					Mais Importante			

Fonte: Adaptado de Corseuil (2006).

De acordo com Brito *et al.* (2017), os critérios são comparados aos pares, ou seja, do menos ao mais importante, decompondo problemas complexos em comparações mais simples para tomada de decisão. Segundo Faria e Augusto Filho (2013a), durante etapa de discussão e julgamento, sempre se considera o conhecimento prévio e experiência de especialistas, contemplando os diferentes pontos de vista para estimar magnitudes relativas de comparação, minimizando falhas (Quadro 2).

Quadro 2 – Escala de comparação de critérios (Explicação verbal).

Valores	Significados
1	Igual importância: os dois critérios contribuem de forma igualmente para o objetivo pretendido.
3	Pouco (Moderadamente) mais importante: um critério é levemente mais importante que o outro.
5	Muito mais importante: Experiência e julgamento favorecem fortemente um dos critérios em relação ao outro.
7	Fortemente mais importante: um dos critérios apresenta dominância e é predominantemente mais importante que outro.
9	Extremamente mais importante: sem dúvida, com grau de certeza elevado, um dos critérios é absolutamente predominante para o objetivo.
Valores recíprocos	Se um critério i possui um dos valores anteriores quando comparado com o critério j, então o critério j possui um valor recíproco quando comparado com o critério i.
2, 3, 4, 6 e 8	Valores importantes, mas intermediários no julgamento, para adequar ponderações.

Fonte: Adaptado de Corseuil (2006) e Faria e Augusto Filho (2013a).

Desta forma, como já mencionado por Magalhães *et al.* (2011), o objetivo inicial do método AHP consiste em estabelecer uma escala de importância entre fatores analisados e, posteriormente, organizá-los numa matriz, para que sejam relacionados, pareados, podendo refletir de fato, se há uma hierarquia de importância de um fator sobre outro (s). Rosas E Silva (2007) colocam que na

análise dos elementos dessa hierarquia é feito o questionamento: com que peso fatores isolados de hierarquia baixa influenciarão o fator máximo? Os pesos relativos obtidos destacarão as prioridades e diferenças entre os critérios analisados, ou seja, a AHP trata-se de uma estruturação multicritérios de definição de hierarquias.

Acerca de benefícios do método, sendo os julgamentos das comparações par a par oriundos da intuição e experiência, também em dados físicos, a AHP é capaz de considerar aspectos qualitativos e também quantitativos (alcançáveis ou intangíveis) de um problema que prescinde de tomada de decisão. Quando um participante questionado efetuar um julgamento pobre em comparação, ou mesmo incerto, o método se encarrega de realizar comparações redundantes para melhorar sua validade, sendo a tolerância destas inconsistências um retrato da realidade, não uma limitação metodológica (SAATY, 1991). Rosas E Silva (2007) afirmam que é importante reconhecer algumas limitações, a exemplo de ambientes desfavoráveis, em que a aplicação reflète a simplificação excessiva.

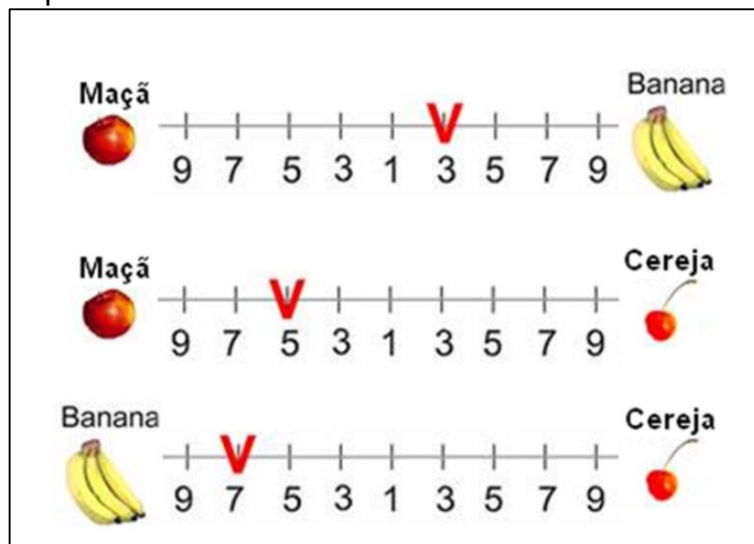
É reconhecido que o método AHP considera a participação de problemas menores numa decisão global e, ao mesmo tempo, divide o problema geral em partes menores, buscando compreendê-las isoladamente, num intuito maior de obter-se a visão sistêmica. É mais acessível abordar problemas complexos ao decompô-lo em partes menores, solucionando individualmente os desafios, um a um, para depois somá-los e representar uma solução integrada do escopo inicial almejado (ROSAS E SILVA, 2007).

Neste âmbito, de compreender as partes antes do todo, Saaty (1991) enuncia a importância de se estruturar adequadamente hierarquias e atribuir pesos aos elementos desta hierarquia, construindo-se um modelo adequado da realidade. Para efetivação de julgamentos adequados, conforme Rosas E Silva (2007), estes deverão expressas numericamente a relação entre dois elementos (Quadro 2), representando os elementos comparados com eles mesmos numa matriz quadrada.

Para ilustrar didaticamente os princípios de construção desta matriz e aplicação simplificada do método AHP, Teknomo (2006), bem como Faria e Augusto Filho (2013b), exemplificam a comparação par a par com três tipos de frutas: banana, maçã e cereja (Figura 4). Neste exemplo, relacionando com a escala de importância atribuída aos critérios, Quadro 2, os julgamentos subjetivos resultam numa matriz quadrada 3 por 3 ( $n = 3$ ), Quadro 3, em que se vê uma preferência

moderada pela banana em relação à maçã, uma forte preferência da maçã em relação à cereja, assim como, muito forte da banana em relação à cereja.

Figura 4 – Exemplo de comparação par a par, com graus de importância.



Fonte: Adaptado de Teknomo (2006).

Após esta etapa de julgamentos da importância de um critério (fator) sobre o outro, neste exemplo feito com frutas, é estruturada a matriz de comparação, que de acordo com Faria e Augusto Filho (2013b), se o valor de julgamento estiver situado à esquerda do número 1, deverá ser inserido o “valor atual atribuído”, caso contrário, deve ser adicionado o valor recíproco, a exemplo da estruturação matricial, aqui apresentada para ilustrar este exemplo, no Quadro 3:

Quadro 3 – Representação da Matriz de comparação paritária de julgamentos, conforme Figura 1.

<b>Critérios</b>	<b>Maçã</b>	<b>Banana</b>	<b>Cereja</b>
<b>Maçã</b>	1	1/3	5
<b>Banana</b>	3	1	7
<b>Cereja</b>	1/5	1/7	1

Fonte: Faria e Augusto Filho (2013).

Ainda com base na matriz de exemplos, a posição diagonal será sempre 1, uma vez que o elemento é igualmente importante a ele mesmo. Quanto aos elementos preenchidos fora da diagonal, estes são resultados dos julgamentos da intensidade de importância da escala de comparações do método. Nas comparações inversas, ou seja, o setor esquerdo inferior da matriz, coloca-se os

valores recíprocos da parte superior direita da mesma. Assim, para o exemplo deve ser lido que banana é 3 vezes mais dominante que maçã e 7 vezes mais dominante que cereja.

O cálculo do autovetor, de acordo com Saaty (1991), consiste em dividir a soma de cada linha pela soma dos elementos da matriz, ou seja, normalizando-se os resultados. Brito *et al.* (2017) afirmam que estando montada a matriz de comparação pareada, cada variável terá seu peso calculado pelo autovetor principal da matriz, conforme apresentado na Equação (1):

$$A_w = \lambda_{\max} \quad (1)$$

onde: A é a matriz de comparação par a par; w é o vetor de pesos pretendidos; e  $\lambda_{\max}$  é o máximo autovalor da matriz A.

Teknomo (2006) sintetiza as etapas deste processo:

1 – Soma-se o total dos elementos de cada coluna da matriz paritária, conforme Quadro 4:

Quadro 4 – Matriz de comparação transformada.

<b>Critérios</b>	<b>Maçã</b>	<b>Banana</b>	<b>Cereja</b>
<b>Maçã</b>	1	1/3	5
<b>Banana</b>	3	1	7
<b>Cereja</b>	1/5	1/7	1
<b>Soma (<math>\omega</math>)</b>	21/5	31/21	13

Fonte: Faria e Augusto Filho (2013).

2 – A normalização relativa dos pesos ocorre pela divisão de cada elemento da matriz pela soma obtida na respectiva coluna, resultando na soma igual a unidade (Quadro 5):

Quadro 5 – Matriz de comparação normalizada.

<b>Critérios</b>	<b>Maçã</b>	<b>Banana</b>	<b>Cereja</b>
<b>Maça</b>	5/21	7/31	5/13
<b>Banana</b>	15/21	21/31	7/13
<b>Cereja</b>	1/21	3/31	1/13
<b>Soma</b>	1	1	1

Fonte: Faria e Augusto Filho (2013).

3 – É efetuada a média aritmética de cada linha da matriz, obtendo-se o autovetor (Quadro 6):

Quadro 6 – Autovetor normalizado.

<b>Critérios</b>	<b>Maçã</b>	<b>Banana</b>	<b>Cereja</b>	<b>Soma das linhas</b>	<b>Autovetor - <math>T</math> (%)</b>
<b>Maça</b>	5/21	7/31	5/13	0,8485	28,28
<b>Banana</b>	15/21	21/31	7/13	1,9302	64,34
<b>Cereja</b>	1/21	3/31	1/13	0,2213	7,38
<b>Soma</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>100</b>

Fonte: Faria e Augusto Filho (2013).

O resultado do autovetor fornece a hierarquia, ou ordem de prioridade, dos três critérios que foram comparados, mostrando os pesos computados da importância de cada um na análise, sendo que o critério banana responde por 64,34%, a maçã 28,28% e a cereja apenas 7,38%.

Uma vez obtida a matriz de autovetores, Corseuil (2006) enuncia que o método AHP apresenta como vantagem a possibilidade de determinar a consistência dos pesos que foram atribuídos a cada um dos critérios da análise, ou seja, validar, ponderando de acordo com uma Razão de Consistência (RC). Komac (2006) e Akgun (2011) afirmam que a RC é a probabilidade que os valores dos julgamentos tenham sido aleatórios, não podendo ser maior que 0,1 (10% de inconsistência), senão, implicará em reavaliação, ou mesmo, rejeição dos pesos atribuídos.

Brito *et al.* (2017) chamam a RC de grau de consistência (*Consistency Ratio* – CR), que é indicativo da probabilidade de os valores da matriz tenham sido idealizados ao acaso. Faria e Augusto Filho (2013b) denominam esta análise de sensibilidade como indicativa do relacionamento lógico dos julgamentos, cuja qualidade e coerência será determinada pelo cálculo do autovalor máximo.

Faria e Augusto Filho (2013b) citam que o autovalor máximo ( $\lambda_{\text{máx}} = T.\omega$ ) é produto do autovetor normalizado -  $T$  (Quadro 6) pela soma das colunas da matriz de comparações para cada critério -  $\omega$  (Quadro 4). Uma matriz recíproca positiva prescinde de um autovalor máximo igual ao número de linhas ou colunas de uma matriz paritária  $n$  (ordem da matriz). O objetivo final é que o resultado do autovalor máximo se aproxime do valor indicativo de  $n$ , indicando resultados coerentes.

Saaty (2008) apresenta que após o cálculo do autovalor máximo adota-se o seguinte procedimento:



a) Cálculo do Índice de Consistência (IC), indicando o quanto o autovalor está afastado de um valor teórico esperado  $n$ , sendo expresso como  $\lambda_{\text{máx}} - n$ . Esta diferença é verificada em relação a  $(n - 1)$ , ou os graus de liberdade. Assim, o IC é dado pela Equação (2):

$$IC = (\lambda_{\text{máx}} - n) / (n - 1) \quad (2)$$

b) Cálculo da RC, comparando-se o IC com o Índice de Consistência Aleatória (CA), para ser verificada a coerência do grau de consistência. Faria e Augusto Filho (2013b, p.23) explicam que:

“O índice de consistência aleatória (CA) representa o valor que seria obtido em uma matriz de comparações paritárias de ordem  $n$  em que não fossem realizados julgamentos lógicos, preenchendo-se os elementos com valores aleatórios. Saaty calculou o índice de consistência aleatória para uma amostra de 500 matrizes recíprocas positivas, de ordem de até 11 por 11, geradas aleatoriamente.”

Os valores de CA obtidos por Saaty (1990) nos seus 500 experimentos modelo servem como referência para matrizes de até 11ª ordem. Saaty (1991) complementou os valores de CA até matrizes de 15 ordem, conforme Quadro 7:

Quadro 7 – Ordem de uma matriz e respectiva Consistência Aleatória (CA).

$n$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
CA	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51	1,48	1,56	1,57	1,59

Fonte: Saaty (1991); Rosas E Silva (2007).

Com todos os elementos necessários para cálculo da Razão de Consistência (RC), pode-se averiguar o grau de violação dos julgamentos do decisor (Equação 3):

$$Rc = IC / CA \quad (3)$$

Sendo que:

IC – Índice de Consistência

CA – Índice de Consistência Aleatória, ou Índice Randômico (IR).

A título de exemplo, a RC para a matriz de comparação paritária de julgamentos (Quadro 3), Faria e Augusto Filho (2013b) exprimem uma RC de 8,53%

(<10%), ou seja, os pesos atribuídos aos critérios utilizados como exemplo (tipos de frutas) estão adequados.

### **2.3.2 Método estatístico**

O Serviço Geológico do Brasil, antiga Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), atua na geração de informações do meio ambiente físico, contribuindo para confecção e disponibilização de bases cartográficas, de conhecida utilidade no ordenamento e gestão territorial, bem como otimização de investimentos e orientação de setores públicos e privados. Dentre os principais objetivos do “Programa Informações Para Gestão Territorial”, instituído desde 1991, estão a produção, aquisição, processamento de informações básicas do meio físico, promovendo o desenvolvimento de investigações metodológicas que visem a padronização e qualidade dos estudos desenvolvidos no âmbito da Geologia aplicada, inclusive, para riscos geológicos (CPRM, 2018a).

O Governo Federal possui o Programa Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais (PNGRRDN), da qual o CPRM faz parte, tendo a atribuição de mapear e classificar as áreas de risco geológico, principalmente relacionados aos movimentos de massa, que entre 2012 e 2015 (Plano Plurianual do Ministério do Planejamento-PPA) listou os 821 municípios prioritários para execução destes estudos (Ação Emergencial de Reconhecimento) (BRASIL, 2012a; BRASIL, 2012b; AGÊNCIA FAPESP, 2015).

Estas informações de riscos geológicos levantados foram encaminhadas para Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações e Comunicações (MTCI), objetivando auxiliar na implantação de sistemas de alertas meteorológicos, também sendo direcionadas para o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres – CENAD (Ministério da Integração Nacional - MI), que tem canal aberto para as Defesas Civas, ou seja, para prevenir e ofertar resposta aos desastres naturais (CPRM, 2018b).

De fato, conforme CPRM (2018b), a ação emergencial de reconhecimentos visava o rápido levantamento de alto e muito alto grau de risco natural, para movimentos de massa e processos hidrológicos. Como o mapeamento realizado ocorreu no contexto da análise de risco, as vulnerabilidades foram

consideradas, ou seja, o foco dos levantamentos deu-se em áreas mormente habitadas e/ou com potencial de perda de vidas, econômicas, ambientais, trabalho este que resultou em produtos cartográficos simplificados, com a setorização para riscos geológicos (Figura 5) em escala de projeto variável entre 1:1.000 e 1:3.000.

Ainda se menciona como um documento cartográfico complementar ao Programa Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres (PPA 2012-15), conforme CPRM (2018c), as Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações, construídas com referências e diretrizes pautadas em associações técnicas e científicas internacionais de Geologia (Fell *et al.*, 2008) e Engenharia, validadas pela Associação Brasileira de Geologia de Engenharia-ABGE.

De acordo com o CPRM (2018c), até início de 2018, no âmbito da Bacia Hidrográfica do rio Mãe Luzia, os municípios de Araranguá, Criciúma, Forquilha e Maracajá já apresentam as cartas disponíveis, auxiliando na interpretação de áreas suscetíveis a inundações, enquanto na alta bacia do rio Mãe Luzia, os municípios de Siderópolis e Treviso, que estão mais suscetíveis aos movimentos gravitacionais de massa, ainda não contavam com o trabalho de elaboração das cartas.

Figura 5 - Aspecto das pranchas elaboradas para setorização de riscos geológicos, município de Vila Velha, Estado do Espírito Santo.



Fonte: CPRM (2018b).

A correta interpretação destas cartas de suscetibilidade geotécnica prescinde do conhecimento prévio de sua nota explicativa, na qual são detalhados os métodos para mapeamento que foram empregados, sendo estes desenvolvidos na parceria entre o Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, Universidade Federal do Paraná – UFPR, Centro Gestor e Operacional do Sistema de Proteção da Amazônia - CENSIPAM, e o Instituto de Geografia e Estatística - IBGE (IPT, 2014; CPRM, 2018b).

De acordo com o IPT (2014, p. 08) o guia orientativo para elaboração das cartas de suscetibilidade, conforme pressupostos compilados inicialmente por Fell *et al.* (2008), teve por base os trabalhos elaborados pelo

“Comitê Técnico de Deslizamentos e Taludes Construídos (*Joint Technical Committee on Landslides and Engineered Slopes* - JTC-1), formado pelas associações técnico-científicas internacionais das áreas de geologia de engenharia e ambiental e de engenharia geotécnica (*International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* - ISSMGE; *International Association for Engineering Geology and the Environment* – IAEG; e *International Society for Rock Mechanics* – ISRM).”

Este guia orientativo foi traduzido para o português pela ABGE e pela Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica (ABMS).

Todos estes referenciais teóricos afirmam que o zoneamento pretendido para as cartas apresenta o nível básico de informação, auxiliando para alcançar o objetivo de se formar bases tecnológicas para aprimorar os procedimentos e processo de mapeamento de áreas suscetíveis à inundações e escorregamentos, oportunizando suprir a carência de informações, tendo em vista a escala de representação e referência do trabalho, estipulada em 1:25.000, ou seja, um mapeamento semirregional de detalhe. Assim, o uso das cartas é enfatizado para fins informativos e consultivos, não para escala de projeto executivo de obras, que prescindem de grande detalhe (IPT, 2014).

Uma etapa muito importante no feitiço do mapa de suscetibilidade para escorregamentos, a ser usado em campo, é a interpretação e digitalização de cicatrizes de escorregamentos, sobre uma base cartográfica de alta resolução espacial, geralmente uma ortofoto (IPT, 2014). A partir dos polígonos digitalizados pode-se averiguar a densidade de cicatrizes sobre classes específicas de cada nível de informação temática, ou fator predisponente, conforme as Equações (4), (5) e (6) (IPT, 2014, p. 16):

$$D = Ad/At \quad (4)$$

Onde:

D = densidade de cicatrizes em cada classe do fator predisponente;

Ad = área afetada por deslizamentos na classe;

At = área total da classe.

“(…) Na sequência, para que a intensidade do evento mapeado não tenha influência nos resultados, cada valor é dividido pela densidade média de deslizamentos na área de estudo (Dt). Esse índice é denominado *Dn* (densidade normalizada):

$$Dn = D/Dt \quad (5)$$

A Densidade normalizada (*Dn*) determina a contribuição dos parâmetros na distribuição dos deslizamentos ocorridos. Em seguida, o Índice de Suscetibilidade a Deslizamentos (ISD) de cada parâmetro é calculado (...), que consiste no cálculo do logaritmo natural de *Dn* (IPT, 2014, p.16).”

$$ISD = \ln(Dn) \quad (6)$$

Uma vez estando definidos os valores do ISD, pode-se aplicar o valor resultante de sua média de suscetibilidade ao deslizamento, obtida numa área piloto, geralmente pré-selecionada por apresentar cicatrizes, para uma extensão de espaço mais abrangente, que apresente similaridades no padrão de relevo, geologia e nas declividades. Estas áreas de generalização por similaridade são designadas de Unidade Homogênea de Terreno – UHT, e guardam grande semelhança de suas unidades morfoesculturais.

Na etapa de zoneamento das classes de suscetibilidade, o mapa resultante para movimentos gravitacionais de encosta apresentará três diferentes classes espaciais: a alta, a média e a baixa suscetibilidade. De acordo com Fell *et al.* (2008), na determinação e individualização destas 3 classes objetiva-se incluir o máximo de registros de escorregamentos (cicatrizes) nas classes mais altas, isto por menor unidade de espaço possível, ou seja, alta frequência e magnitude. Composto o pré-mapa de áreas suscetíveis, a próxima etapa é a sua validação no campo, preferencialmente, comparando-se no terreno com os eventos de deflagração de movimentos gravitacionais de massa, através da verificação das cicatrizes.

### 2.3.3 Análise determinística

Uma metodologia consagrada para se trabalhar com mapeamento de suscetibilidade trata-se da modelagem matemático-determinística. Esta é baseada em princípios da mecânica dos solos, considera informações detalhadas de uma encosta, para subsidiar um modelo de estabilidade, busca atenuar a subjetividade, com a estratégia de se adotar valores absolutos para o grau de risco, pelo cálculo de um fator de segurança (MARCELINO, 2003).

Fell *et al.* (2008) reforçam que os métodos determinísticos se baseiam em dados de entrada de ensaios físicos do solo, geotecnia, hidrostática, profundidade, geometria, etc. para se aplicar um cálculo de fator de segurança da encosta e sua relativa estabilidade. O mapa resultante detalhará um fator médio por zona, com limites definidos conforme faixas de segurança, a exemplo de instável ou não instável. Neste método podem ser incorporados modelo hidrológico, contudo, sua limitação reside em simplificar diferentes unidades geológico-geomorfológicas, bem como em angariar dados em campo.

Com este desafio de se definir classes ou unidades geotécnicas similares, para que a interpretação pontual seja extrapolada zonalmente em mapa, bem como, de se efetuar uma adequada caracterização geológico-geotécnica, Silva (2006) já apontava estes pressupostos como etapas iniciais fundamentais para se estudar as condições de estabilidade de uma encosta. Estes dados de entrada são a base para modelagem física dos processos, oportunizando conhecer mecanismos de escorregamentos.

Conforme Silva (2006), contribuem para esta aquisição de dados:

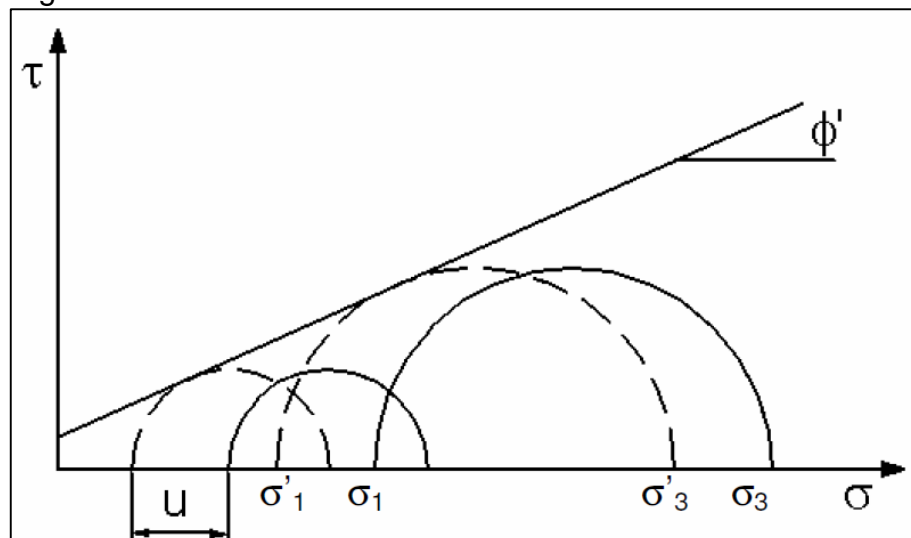
- Investigação em imagens aéreas;
- Dados de topografia, de geomorfologia, geralmente de um Modelo Digital de Terreno ou de Elevação;
- Capacidade de processamento e armazenamento de informações em Sistema de Informações Geográficas (SIG);
- Reconhecimento de campo, seja por terra ou aéreo, obtendo-se fotografias;
- Métodos diretos e indiretos de estimativa de parâmetros em campo;
- Instrumentação e coleta de amostras para ensaios em laboratório.

Atualmente, pela difusão do conhecimento e emprego deste método, vem se adotando considerações de um estado de equilíbrio limite, onde se admite que as forças que tendem a favorecer a ruptura de uma encosta são equilibradas pelas forças de resistência. Estas interpretações que versam sobre o equilíbrio limite conjugam um modelo hidrológico, que possibilita a compreensão de fluxos d'água no terreno, com um Modelo de Estabilidade de Encosta Infinita - MEEI (SILVA, 2006; MICHEL, KOBIYAMA, GOERL, 2012).

Uma encosta consiste, de fato, numa massa de solo submetida a três campos de força distintos (envoltória de resistência de Mohr-Coulomb): o peso dos materiais do substrato; forças de percolação d'água e forças de resistência ao cisalhamento (RAMOS *et al.*, 2002). Na conjugação destas forças fica evidente que as duas primeiras se somam e tendem a desestabilizar a encosta, enquanto a última atua para impedir a movimentação.

Silva (2006) apresenta que a envoltória de Mohr-Coulomb se dá em termos de tensões normais e de tensões cisalhantes, desenvolvidas no plano da ruptura da encosta, Figura 6.

Figura 6 – Envoltória de resistência de Mohr-Coulomb.



Fonte: Silva (2006).

No episódio de um escorregamento numa encosta, o plano de ruptura do substrato ocorrerá quando as forças desestruturantes suplantarem as estruturantes, sendo a relação destas forças expressa pelo Fator de Segurança (*FS*). Na análise dos escorregamentos classificáveis como translacionais rasos, os mais recorrentes



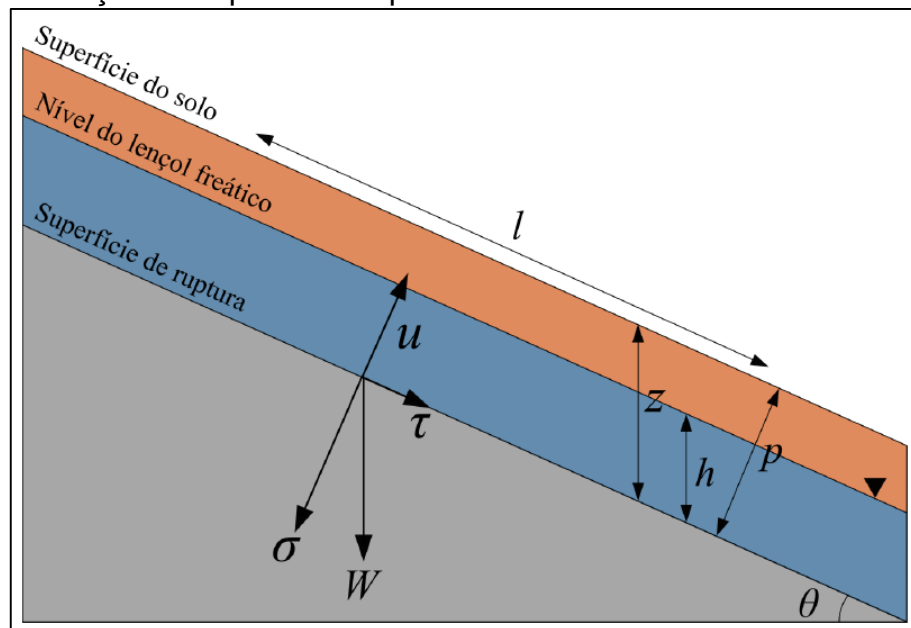
nas áreas montanhosas e declivosas do país, é corrente se adotar o MEEI (MICHEL; KOBIYAMA; GOERL, 2012).

O MEEI torna-se aplicável em locais em que o comprimento da vertente, do divisor ao fundo do talvegue, é pronunciadamente maior que a profundidade do solo, comparando componentes desestabilizadores, a exemplo da gravidade, com estabilizadores, num plano falho, paralelo à superfície (MICHEL; KOBIYAMA; GOERL, 2012).

O MEEI toma por base a Lei de Mohr-Coulomb, no momento em que as forças se anulam. Conforme a reunião das interpretações conjuntas de Silva (2006) e Michel, Kobiyama e Goerl (2012), esta dinâmica de forças é dada pela Equação (7) e os elementos envolvidos podem ser vistos na Figura 7:

$$\tau = c + (\sigma - u)\tan\varphi \quad (7)$$

Figura 7 – Modelo de encosta infinita e elementos envolvidos na dinâmica de forças. W representa o peso do solo.



Fonte: Michel (2015).

Leia-se:

- $\tau$  = resistência ao cisalhamento ( $\text{N/m}^2$ );
- $c$  = intercepto de coesão efetiva ( $\text{N/m}^2$ );
- $\sigma$  = tensão normal no plano de ruptura ( $\text{N/m}^2$ );
- $u$  = pressão neutra da água ( $\text{N/m}^2$ );

$\sigma - u = \sigma' =$  tensão efetiva no plano de ruptura ( $\text{N/m}^2$ );  
 $\varphi =$  ângulo de atrito interno do solo (graus).

A Equação (7) foi empregada por Selby (1993) em encostas infinitas (comprimento maior que a espessura do solo). De acordo com Michel, Kobiyama e Goerl (2012) e Michel (2015) o modelo de encosta descrito por Selby (1993) considerou a tensão cisalhante como um componente de peso do solo paralela à encosta, enquanto a poro-pressão ( $u$ ) atua no alívio de peso perpendicular à encosta ( $\sigma$ ). Sendo assim, o MEEI apresentado por Selby (1993) é detalhado na Equação (8) (Michel; Kobiyama; Goerl, 2012):

$$\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta = c_r + c_s + (\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos^2\theta - \rho_w \cdot g \cdot h \cdot \cos^2\theta) \cdot \tan\varphi \quad (8)$$

Leia-se:

$\rho_s$  = Densidade do solo úmido ( $\text{kg/m}^3$ );  
 $z$  = Profundidade do solo (m);  
 $\theta$  = Declividade da encosta ( $^\circ$ );  
 $\rho_w$  = Densidade da água ( $\text{kg/m}^3$ );  
 $h$  = Altura da camada de água (m);  
 $c_r$  = Coesão das raízes ( $\text{N/m}^2$ );  
 $c_s$  = Coesão do solo ( $\text{N/m}^2$ )

Michel, Kobiyama e Goerl (2012) explicam que o lado direito da Equação 8 representa as forças estruturantes do solo, o esquerdo as forças que o desestabilizam, sendo possível obter-se o FS do MEEI pelo quociente do lado direito pelo esquerdo. Assim, há uma equalização das forças opostas e o FS será igual a 1; na qual  $\text{FS} < 1$  a encosta é suscetível a escorregamento e,  $\text{FS} > 1$ , seria uma encosta estável, em teoria. De acordo com Selby (1993) e Michel (2015), a transição entre estes limiares não é absoluta, abrupta, mas sim, uma probabilidade gradacional.

A interpretação da Equação (8) e da afirmação de que o FS é a divisão das forças estabilizadoras pelas cisalhantes, permite afirmar que mais água neste sistema contribui para redução das tensões, ou seja, favorece a ruptura. Assim, os fatores hidrológicos, como as chuvas, são determinantes para compreender a

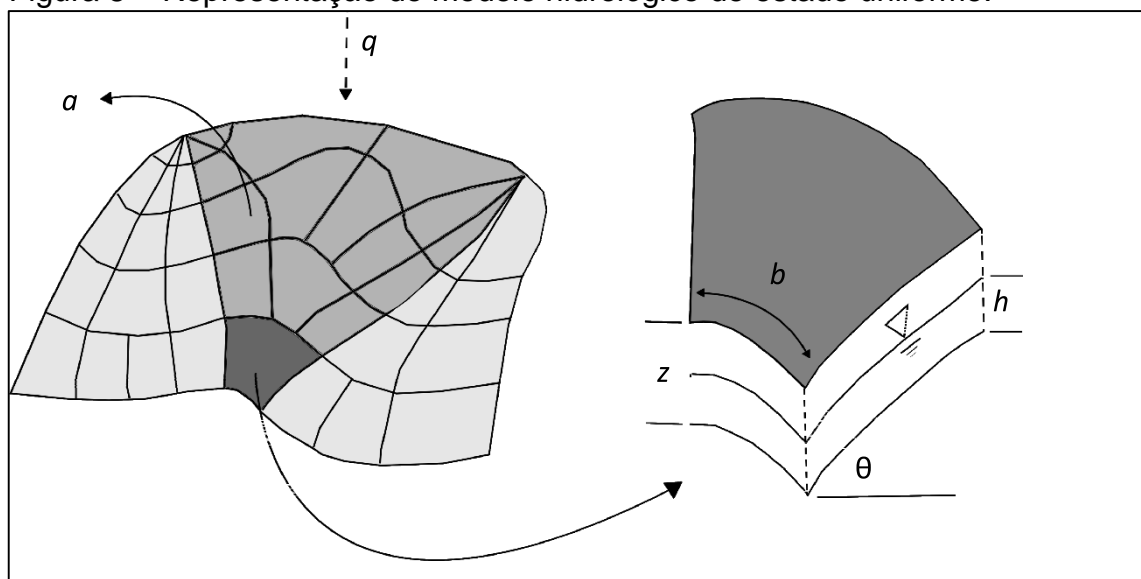
estabilidade de uma encosta, o que reforça a necessidade de que seja considerado um modelo hidrológico combinado ao de estabilidade de encosta.

Ramos *et al.* (2002) mencionam que no Brasil a água como principal agente deflagrador de movimentos de massa em encostas, coincidindo com períodos chuvosos. Esta ação pode se dar de diferentes formas, a exemplo do aumento do grau de saturação do terreno, ou o aumento do peso específico do solo, importantes condicionantes de instabilização. Contudo, existem desafios na interpretação do teor de umidade, ou seja, no comportamento hidrológico de uma encosta, dado à natureza tridimensional do solo.

Beven e Kirkby (1979) afirmaram que o padrão de saturação do solo num determinado local é determinado, em grande parte, pela topografia, no entendimento da razão conjugada entre a área drenada e comprimento, em divisão pela declividade. Em adição, O'Loughlin (1986) propôs que a topografia de encostas, e de sua área de contribuição, seja computada combinadamente com parâmetros de geometria e drenagem, oportunizando a determinação aproximada da saturação do solo, ou altura da coluna da água.

O Modelo Hidrológico de Estado Uniforme - MHEU (Figura 8) é uma composição das contribuições de Beven e Kirkby (1979) e O'Loughlin (1986), que associado ao MEEI, propiciará a modelagem de estabilidade.

Figura 8 – Representação do modelo hidrológico de estado uniforme.



Fonte: Michel, Kobiyama e Goerl (2012). Modificado de Montgomery e Dietrich (1994).

O modelo hidrológico subdivide a área de contribuição, pela intersecção das curvas de nível por linhas de fluxo perpendiculares, em relação às curvas, permitindo a determinação do fluxo por cada uma destas unidades menores, denominadas elementos topográficos (SILVA, 2006).

Conforme Michel, Kobiyama e Goerl (2012), para as variáveis apresentadas na Figura 8, leia-se:

$a$  = Área de contribuição montante ( $m^2$ );

$b$  = Comprimento de contorno do limite inferior de cada elemento (m);

$q$  = Taxa de recarga uniforme (m/d);

$h$  = Altura da camada de água, ou nível piezométrico (m).

O'Loughlin (1986), propôs que a umidade consiste na parcela saturada do solo, num dado estado uniforme de recarga. De acordo com Guidicini e Iwasa (1976) e Silva (2006), a zona de saturação ocorre quando o fluxo montante excede a capacidade do substrato em transmitir este fluxo, alterando o equilíbrio hidrológico, que consiste no somatório de água que entra e sai de um ponto. Esta relação entre a água que entra num sistema, sob a forma de recarga uniforme, e a que sai pela camada saturada, permite determinar o nível de saturação do solo, visível pelas Equações (9) e (10).

$$W = \frac{q \cdot a}{b \cdot T \cdot \sin \theta} = \frac{h}{z} \quad (9)$$

$$\therefore T = K_s \cdot z \cdot \cos \theta \quad (10)$$

Leia-se:

$W$  = Umidade do solo (m/m);

$T$  = Transmissividade do solo ( $m^2/d$ );

$K_s$  = Condutividade hidráulica saturada, conforme Michel, Kobiyama e Goerl (2012), constante ao longo do perfil do solo.

## - O modelo SHALSTAB

É um modelo geotécnico/hidrológico, com embasamento físico e distribuído espacialmente, que pode contribuir na predição de locais de incidência para escorregamentos, é o SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*) (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998). O modelo SHALSTAB consiste num programa computacional que integra um modelo de estabilidade de talude/encosta infinita com um modelo hidrológico de estado uniforme (MICHEL, 2013, 2015). Silva (2006) já apresentava que por este método admite-se um fluxo em regime permanente, sendo que o usuário/pesquisador adiciona a variação espacial das propriedades dos solos, como a profundidade, a massa específica, coesão e ângulo de atrito interno.

Este modelo matemático é utilizado para determinar áreas de uma encosta que estão sujeitas a sofrer com escorregamentos translacionais, ou rasos. Mesmo com aplicabilidade comprovada este modelo também apresenta limitações, a exemplo da dificuldade de efetuar predições para áreas com afloramentos rochosos, falésias, áreas de nível hidrostático muito profundas, ou mesmo, nos locais em que há grande espessamento do solo (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; RAMOS *et al.*, 2002).

A resolução da Equação (8), que mostra o quanto de espessura do solo se encontra saturada, é possível obter-se o grau de saturação necessário para desestabilização de uma encosta, isso em função da razão  $h/z$ , visível na Equação (11):

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi}\right) + \frac{c}{\cos^2\theta \cdot \tan\varphi \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \quad (11)$$

A resolução da Equação (11) resultará em duas condições extremas previstas pelo modelo: incondicionalmente instável ou incondicionalmente estável. No primeiro caso, pela ausência de coluna de água, solo seco ou  $h/z$  igual a zero, a declividade da encosta se sobressai sobre os parâmetros de resistência, como o ângulo de atrito (Equação 12). No segundo caso  $h/z$  expressa que a relação entre os parâmetros de resistência sobrepuja a declividade da encosta, mesmo com solo saturado, Equação 13 (AZEVEDO *et al.*, 2015).

$$\tan\theta \geq \tan\varphi + \frac{c}{\cos^2\theta \cdot \rho_s \cdot g \cdot z} \quad (12)$$

$$\tan\theta \leq \tan\varphi \cdot \left(1 - \frac{\rho_w}{\rho_s}\right) + \frac{c}{\cos^2\theta \cdot \rho_s \cdot g \cdot z} \quad (13)$$

De acordo com Michel, Kobiyama e Goerl (2012), um solo parcialmente saturado propicia que ocorram outras cinco condições, além das duas incondicionais mencionadas, totalizando as sete classes de estabilidade, propostas por Dietrich e Montgomery (1998). Para isso, pode-se igualar as Equações (9) e (11), acoplando os modelos de estabilidade de encosta infinita com o hidrológico, em função das variáveis hidrológicas  $q$  e  $T$ , obtendo-se formulação final adotada pelo SHALSTAB (Equação 14).

$$\frac{q}{T} = \frac{b}{a} \cdot \sin\theta \cdot \left\{ \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan\varphi}\right) + \frac{c}{\cos^2\theta \cdot \tan\varphi \cdot \rho_w \cdot g \cdot z} \right\} \quad (14)$$

Como parâmetros de entrada, o modelo prescinde de  $c$ ,  $\varphi$ ,  $\rho_s$  e  $z$ . Também se faz necessário um MDT de boa qualidade, para obtenção das variáveis  $a$ ,  $b$  e  $\theta$  (MICHEL; KOBİYAMA; GOERL, 2012). Conforme Reginatto *et al.* (2012), a relação  $q/T$ , razão entre a recarga (chuva) e a transmissividade do solo, ou seja, um parâmetro livre, é indicativa da estabilidade de uma área, sendo empregada para caracterizar uma área de estudo, nas 7 classes de suscetibilidade para escorregamentos translacionais rasos, propostas por Dietrich e Montgomery (1998), mostrados na Tabela 1:

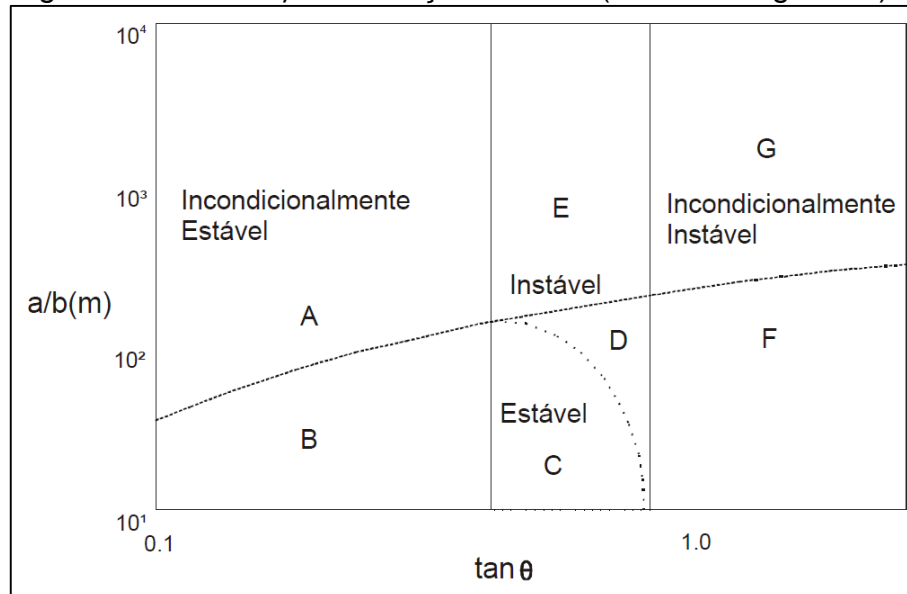
Tabela 1 – Sete classes de estabilidade segundo modelo SHALSTAB.

<b>Classes de Estabilidade</b>	<b>Qualificação</b>
Instabilidade crônica	Incondicionalmente instável
$\log q/T < -3,1$	Muito instável
$-3,1 < \log q/T < -2,8$	Medianamente instável
$-2,8 < \log q/T < -2,5$	Pouco instável
$-2,5 < \log q/T < -2,2$	Pouco estável
$\log q/T > -2,2$	Medianamente estável
Estável	Incondicionalmente estável

Fonte: Gerente *et al.* (2013).

De acordo com Ramos *et al.* (2002) e Silva (2006), com base nestas 7 classes de estabilidade, apresentadas na Tabela 1, podem ser descritas suas associações entre a razão  $a/b$  e declividade, conforme Figura 9, em que a linha tracejada representa o limite de saturação e a pontilhada, é definida a partir dos valores obtidos pela Equação 14:

Figura 9 – Razão  $a/b$  em função da  $\tan\theta$  (eixos em logaritmo).



Fonte: Ramos *et al.* (2002).

Pela Figura 9 ficam visíveis as 7 classes adotadas pelo SHALSTAB:

- A – Incondicionalmente estável e saturado;
- B - Incondicionalmente estável e não saturado;
- C - Estável e não saturado;
- D - Instável e não saturado;
- E - Instável e saturado;
- F - Incondicionalmente instável e não saturado e
- G - Incondicionalmente instável e saturado.

A aplicação do modelo SHALSTAB necessita de parâmetros de entrada. Um modelo digital do terreno é importante para se obter informações de declividade das encostas, bem como, de áreas de contribuição, inclusive, nos contornos formados nas perpendiculares com as curvas de nível, como já apresentado no modelo hidrológico.

Contudo, outros parâmetros, como a coesão, a condutividade hidráulica, a profundidade, a densidade e o ângulo de atrito interno, devem ser levantados em campo, ou mesmo, obtidos indiretamente através do relacionamento de outros parâmetros, e até, balizados por limiares de literatura. De acordo com Mota e Kobiyama (2011), a coleta de amostras deformadas e indeformadas de solo se faz necessária, sendo as primeiras úteis para averiguar densidade, efetuar análise granulométrica (NBR-7181), enquanto as amostras não deformadas permitem obter-se os parâmetros hidráulicos da condutividade e da porosidade.

Mota e Kobiyama (2011) também apresentam a possibilidade de empregar-se funções de pedotransferência, em que, através da entrada de dados granulométricos, pode-se obter outros parâmetros, que prescindiriam de esforços de campo/laboratório. Para isso, devem ser utilizados parâmetros das equações de Van Genuchten.

Em estudos geomorfológicos e hidrológicos se faz necessário conhecer com certa exatidão a profundidade do solo, pois além de ser o corpo tridimensional fonte da matéria disponibilizada num escorregamento, a quantidade de solo controla outros parâmetros hidrogeomorfológicos, como a transmissividade, altura da coluna d'água, por exemplo (MICHEL; KOBIYAMA, 2015). Por outro lado, mesmo que seja considerado junto com a declividade um dos parâmetros de entrada mais importantes para um modelo de determinação de estabilidade de encostas (Michel, 2015), este parâmetro é de difícil estimativa. Adicionalmente, há certa dificuldade de padronizar-se, ou integrar conceitos sobre propriedades, gênese e evolução do solo, uma vez que esta temática é estudada concomitantemente por diferentes ciências.

Mesmo com desafios amostrais, Michel (2015) enfatiza a importância de realizar uma correta investigação da distribuição espacial da profundidade do solo, uma vez que, análises de sensibilidade realizadas por outros autores, indicam que este parâmetro altera significativamente os resultados de estabilidade de uma encosta, dada sua grande variabilidade espacial. Para se determinar a profundidade de um solo, ou se utiliza de métodos de campo: de referência (uso de pás, trados e penetrômetros, entre outros), ou se adotam métodos geofísicos. Por outro lado, uma estimativa baseada numa formulação matemática é plausível numa região montanhosa, de alta declividade (MICHEL; KOBIYAMA, 2016b).

Para a aplicação de método de referência de sondagem via trado, Michel (2015) sugere a subdivisão de uma área em zonas homogêneas, com uniformidade,



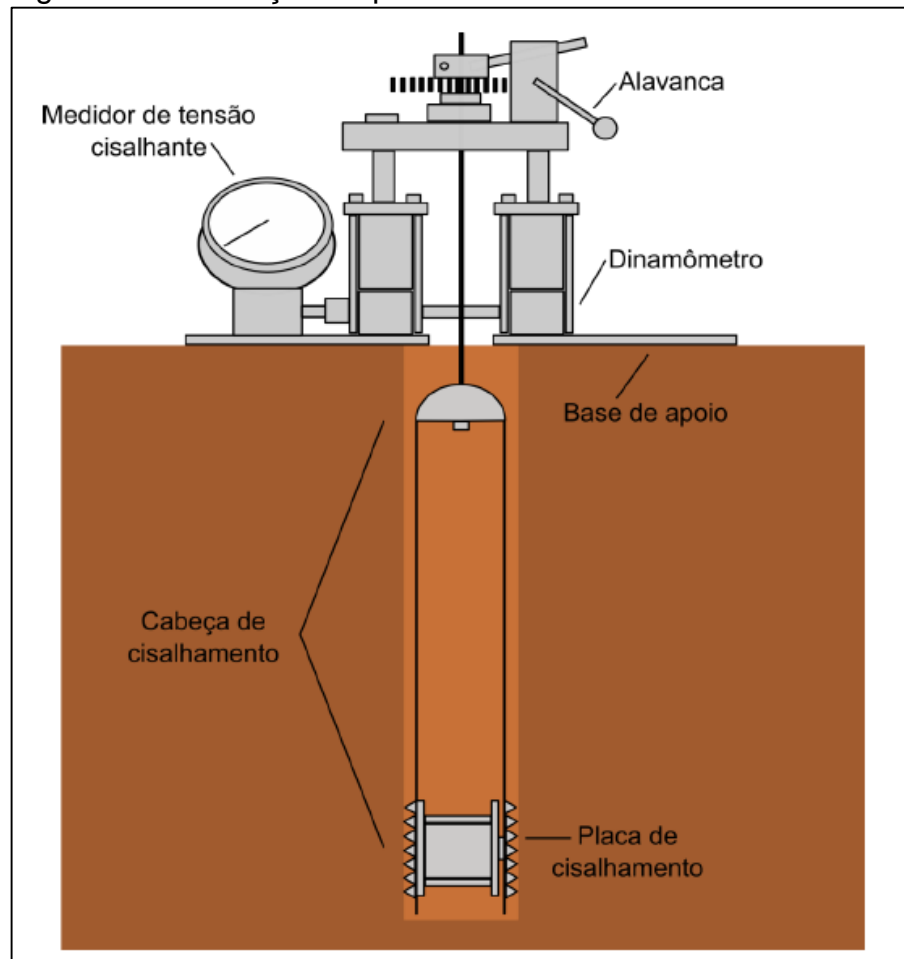
que congreguem características similares de declividade, uso do solo, classes de solo, ou mesmo litologias, por exemplo. Estas unidades podem ser determinadas por sobreposição e cruzamento destas informações primárias, podendo se determinar unidades geotécnicas.

Uma outra constatação importante, apontada para o parâmetro profundidade do solo por Michel (2015), é que na análise de estabilidade de encostas é comum os modelos adotarem um único valor que define a profundidade do solo de toda uma área de estudo. Desta forma, as discontinuidades, limites, profundidades distintas são desconsideradas, podendo incorrer em superestimativa, ou subestimativa, de áreas classificadas como instáveis e propensas para escorregamentos.

Outros dois parâmetros são necessários para aplicação do modelo de estabilidade de encostas SHALSTAB: a coesão ( $c$ ) e o ângulo de atrito interno do solo ( $\varphi$ ). Estes parâmetros geotécnicos podem ser obtidos diretamente através de um ensaio de campo com o *Borehole Shear Test* (BST), simples e eficiente, por ocasionar menor distúrbio ao solo amostrado. Este teste é reconhecidamente aplicável, dispensando a necessidade de ensaios laboratoriais complexos e lentos, bem como estimativas empíricas (BECHTUM, 2012).

Este teste de cisalhamento, realizado a partir de um furo de sondagem, é propiciado por um aparelho (Figura 10) concebido na década de 60 pelo Doutor Richard Handy e seus colaboradores na Universidade de Iowa, em que são aplicadas tensões específicas em intervalos de tempo cronometrados, pressionando o componente metálico do aparelho, contra as paredes de solo aparentes no interior do furo. Este teste é aplicável para investigações cuja temática é a de escorregamentos de encostas, que prescindem de uma precisa determinação da resistência ao cisalhamento *in situ* (BECHTUM, 2012; IN SITU SOIL TEST, 2018).

Figura 10 – Ilustração esquemática do BST.



Fonte: Michel (2015, p. 102, adaptado de Bechtum, 2012).

#### 2.3.4 Integração de métodos para mapeamento da suscetibilidade aos escorregamentos

Os estudos de estabilidade de encostas, de acordo com Leroi *et al.* (2005) e Fell *et al.* (2008) sempre seguiram diretrizes semelhantes, mesmo em diferentes países e, para proposições de diferentes autores, observa-se a atenção a um padrão em suas pesquisas:

- 1 – Deve sempre ser dada atenção ao local que já apresentou histórico de escorregamento(s);
- 2 – Também devem ser enfatizados locais que não possuam registros, mas que suas condições topográficas são sugestivas que evento possa ocorrer;
- 3 – Da mesma forma, atenta-se para áreas em que a feição geomorfológica e a litologia sejam indicativas de escorregamentos futuros;

4 – Deve estar atento para locais que passam por intervenções, como obras de infraestrutura de estabilização de encostas, tendo em vista que estas obras podem falhar em sua concepção inicial;

5 – Por fim, devem ser observados impactos diretos sobre florestas, rede hidrográfica, como os incêndios, desmatamentos e manejo inadequado do solo. Estas condições também favorecem a deflagração de escorregamentos.

Além do padrão de similaridade dos estudos inventariados e analisados por Leroi *et al.* (2005) e Fell *et al.* (2008), outro apontamento importante elencado pelos autores foi a “questão da escala”. Segundo os mesmos autores, para obter-se um mapa final com zoneamento e qualidade de representação adequados, não poderão ser utilizados mapas base em escalas menores, a exemplo de se munir de mapas de escala 1:25.000 para almejar um mapa resultante de 1:5.000. Para evitar a disseminação de informações imprecisas, e as consequências adversas que podem resultar destas, é praxe que as bases cartográficas devam estar em escala maior que o produto final.

Desde a década de noventa, Soeters e Van Westen (1996) já afirmavam que um conjunto de informações espaciais, representada como ponto, linha ou polígono, reunidas em banco de dados como arquivos vetoriais, ou mesmo um *raster*, poderiam ser conciliadas na produção de um mapa de saída. A função, ou métrica matemática-estatística que estaria por trás da informação espacial poderia ser de muitas naturezas, como a regressão linear, múltipla ou mesmo análise discriminante, contudo, com o objetivo de efetuarem uma modelagem quali-quantitativa.

Recentemente, esforços de integração de diferentes modelos de suscetibilidade aos escorregamentos vêm apresentando resultados promissores. Nunes *et al.* (2016) conjugaram a Análise Multicritério com o Modelo SHALSTAB e, em minúcias, o estudo iniciou pelo feitio da modelagem determinística para três diferentes tipos de solo. Este mapa de saída das classes de estabilidade passou a ser considerado como um dos fatores predisponentes inseridos na Análise Multicritério. Antes disso, este mapa final do modelo SHALSTAB foi reclassificado com pesos que o tornassem pareáveis com os demais fatores inseridos na análise.

Ainda de acordo com Nunes *et al.* (2016), na formulação final da Análise Multicritério o resultado do modelo SHALSTAB respondeu por 54,62% da resposta do modelo proposto, o uso e ocupação da terra 23,23%, a distância das vias 13,77%

e a forma das vertentes 8,38%. Assim, a modelagem determinística contribuiu com um nível de informação do modelo, respondendo por mais de 50% deste, sendo combinada com demais fatores na Análise Multicritério.

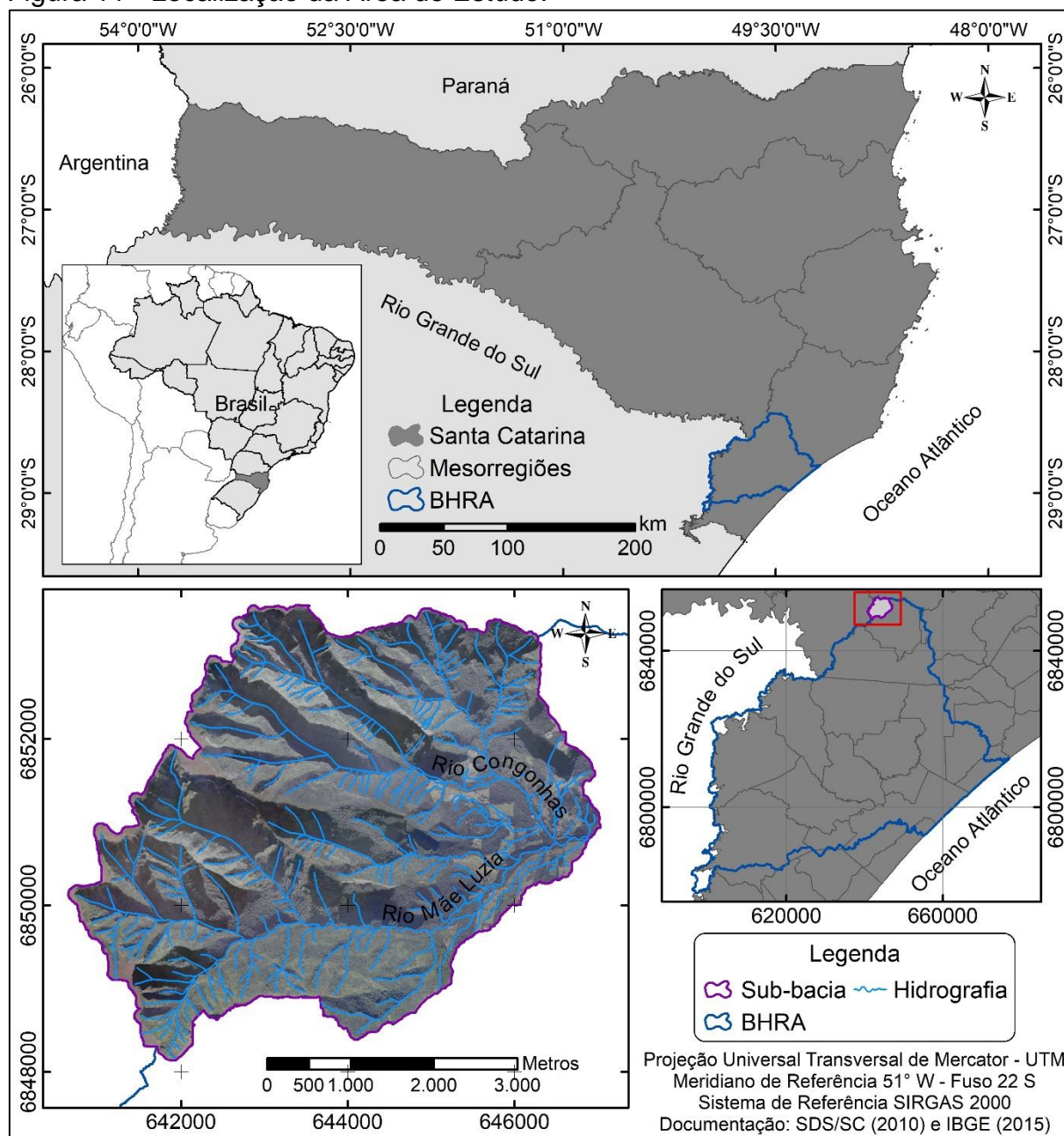
Por não considerar modificações de caráter antrópico, o modelo SHALSTAB, segundo Nunes *et al.* (2016), individualmente apresenta resultados menos precisos do que a resposta integrada com a Análise Multicritério. A integração permitiu mapear áreas suscetíveis de maneira mais coerente com a realidade, uma vez que os fatores naturais foram considerados pela análise determinística, enquanto ações antrópicas puderam ser computadas a partir de fatores inseridos na Análise Multicritério, a exemplo do uso e ocupação da terra.

Pradhan e Kim (2016) também compararam a Análise Multicritério com o SHALSTAB, para determinar a suscetibilidade aos escorregamentos no nordeste da Coreia. A análise de sensibilidade indicou que se os modelos forem combinados resultarão em maior precisão, se comparados com os resultados individuais de cada modelo. A diferença para os estudos de Nunes *et al.* (2016) é que o resultado do modelo SHALSTAB não entra como um fator na Análise Multicritério, mas sim, os resultados de ambos os métodos são integrados por álgebra de mapas.

### **3 ÁREA DE ESTUDO**

A sub-bacia formada pelas cabeceiras do rio Mãe Luzia localiza-se na Bacia do rio Araranguá (BHRA), município de Treviso, no sul do Estado de Santa Catarina, Figura 11.

Figura 11 - Localização da Área de Estudo.



De acordo com Krebs (2004), a BHRA é de vertente atlântica/exorréica, possui cerca de 3.300 km<sup>2</sup>. A área desta sub-bacia possui 22,39 km<sup>2</sup>, à montante das comunidades rurais de Brasília/Guanabara, inseridas no município de Treviso, estado de Santa Catarina. No local predominam solos rasos, associados com afloramentos de rochas vulcânicas (basaltos) que recobrem a Bacia Sedimentar do Paraná, contexto geológico da área. Nas partes menos íngremes e na base da escarpa ocorrem cambissolos, geralmente produto da pedogênese ocorrida sobre depósitos de tálus. Nos locais de maiores declividades os solos tendem a ser rasos,

ainda que capazes de sustentar uma vegetação de Floresta Ombrófila Densa, submontana e montana (Piazza *et al.*, 2016), dado o clima subtropical úmido.

No segmento montante ao núcleo urbano do município de Treviso, o leito do rio Mãe Luzia enquadra-se como alto curso, exibindo um padrão mais retilíneo, orientado de oeste para leste, que segundo Krebs (2004) deve-se ao aumento do gradiente do canal, na ordem de 0,107 m/m, que denota uma grande capacidade de transporte sedimentar. Mesmo assim, próximo de rupturas de declive, que sustentam diferentes níveis de base local (BROOKFIELD, 2004), é observada grande quantidade de seixos e blocos, ou seja, processos de sedimentação aluvial junto a calha do rio principal (ORFEO, 1996), até mesmo no sopé de suas cabeceiras, situadas na Serra Geral, que de fato é a escarpa do Planalto Sul Brasileiro (DUARTE, 1995).

A Figura 12 é uma combinação de fotografias que apresenta os principais aspectos físicos da área. As Figuras 12-a e 12-b tratam-se de uma tomada fotográfica a partir da borda do planalto em direção a parte baixa da área de estudo, enfatizando a amplitude altimétrica, contudo, enquanto a primeira foi uma captura fotográfica convencional a segunda foi realizada a partir de aeronave remotamente pilotada, o popular drone. A Figura 12-c apresenta o relevo escarpado da área, com destaque para uma cicatriz de escorregamento, 12-d, que ocorrem frequentemente no local, mesmo que nos últimos anos apresentem baixa magnitude. A Figura 12-e mostra o trabalho de reconhecimento realizado na área de estudo e, partir deste ponto, foi visualizado o acentuado processo de ocupação de pequenos sítios na parte baixa da sub-bacia, um adensamento populacional, mesmo que pendular, Figura 12-f. Pelas Figuras 12-g e 12-h, vê-se, respectivamente, os vales naturais declivosos e florestados à montante das áreas antropizadas, bem como, as variadas feições das vertentes, com suas concavidades e convexidades dado os processos atuantes e condicionamento litológico-estrutural.

Quanto à hidrografia, para melhor compreensão da rede de drenagem na área de estudo, bem como sua hierarquia, a ordem dos cursos d'água segundo Strahler (BACK, 2014), é apresentada a Figura 13, sobrepondo a hidrografia classificada por sua ordem, no relevo sombreado.



Figura 12 - Aspecto fisiográfico e de processos geomorfológicos na área de estudo.

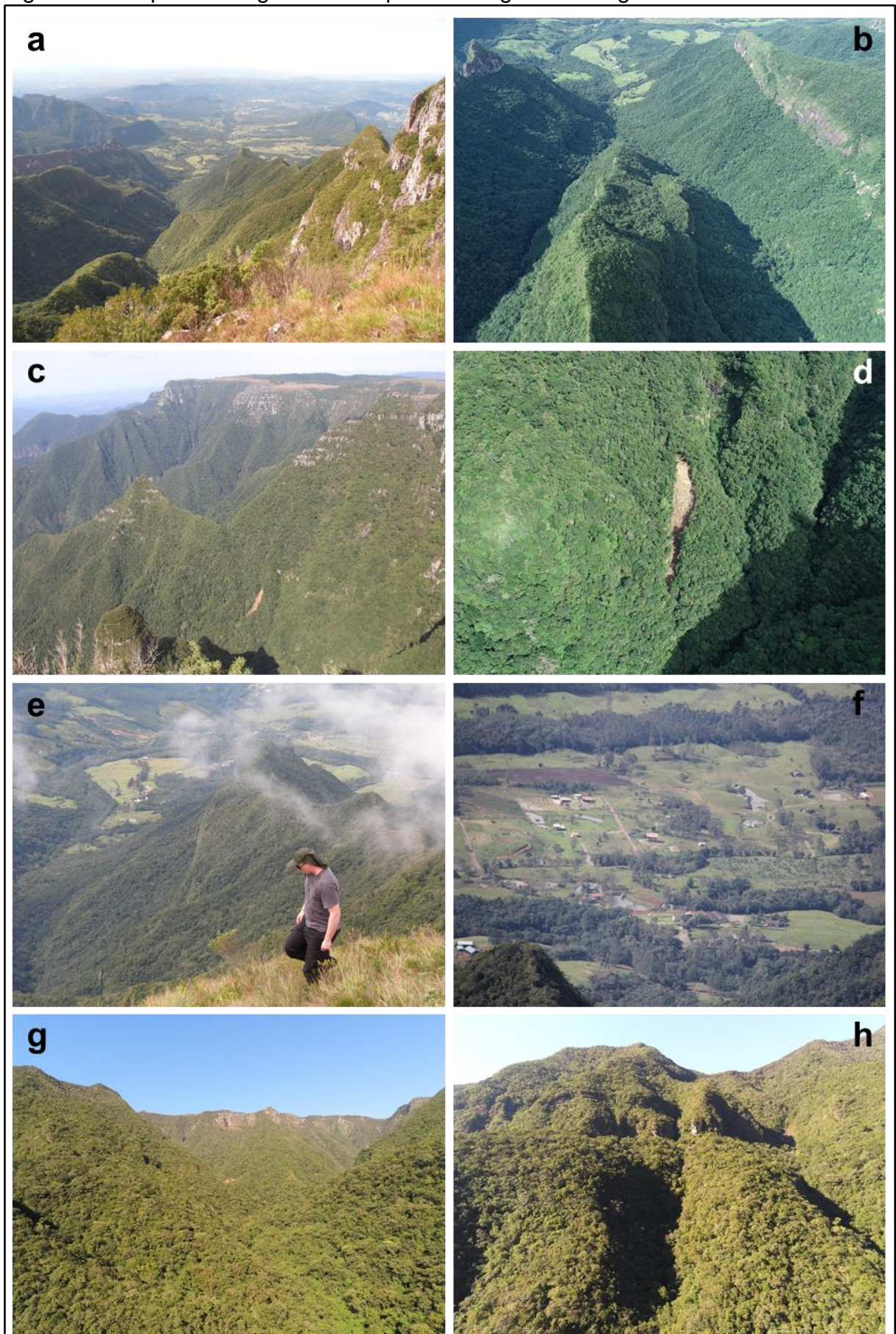
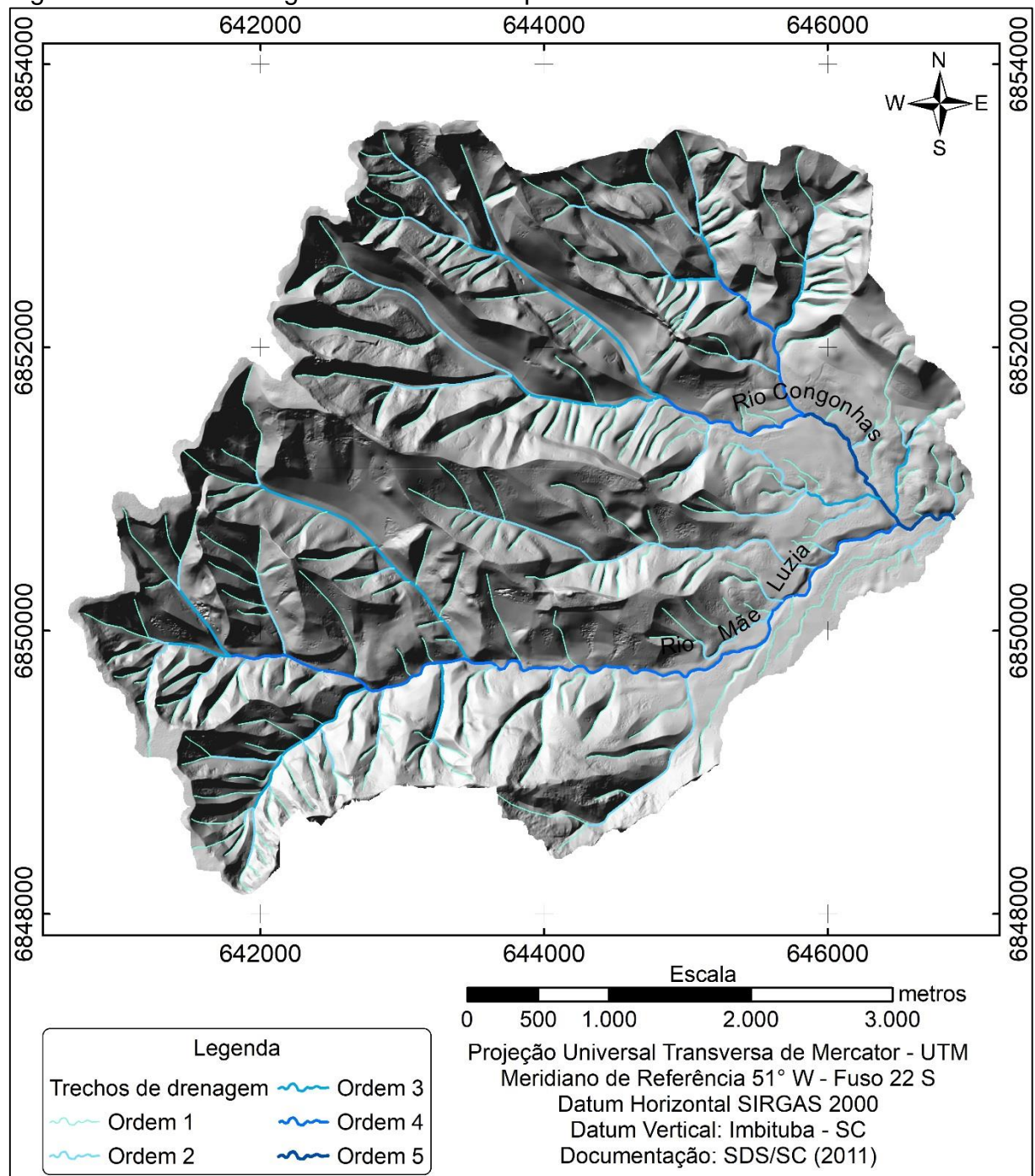




Figura 13 – Rede hidrográfica e sua hierarquia na área de estudo.



Pela Figura 13 é possível verificar que o rio Mãe Luzia (ponto exutório no extremo leste da sub-bacia) é de 5ª ordem. Percebe-se também, que a rede de drenagem está praticamente subdividida em dois grupos principais, um advindo da metade sul da área, num afluente de 4ª ordem (que recebe a toponímia de rio Mãe Luzia), e a metade norte, com rio principal chamado Congonhas, de 5ª ordem e fluxo de noroeste para sudeste. O local exato do ponto exutório desta sub-bacia foi definido após a junção destes dois rios de hierarquia maior, em ponto com vale



encaixado, na qual, aproveitando-se da geomorfologia favorável, foi edificada uma ponte que conecta propriedades rurais da comunidade de Guanabara.

### 3.1 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA

De acordo com o sistema de classificação global dos tipos climáticos, proposto por Köppen-Geiger (AYOADE, 1996), a conjugação da atuação sazonal das diferentes massas de ar, acrescida de fatores, como latitude, altitude e maritimidade/continentalidade, condiciona 2 subtipos climáticos principais relacionados ao Estado de Santa Catarina, ou seja, o clima temperado chuvoso, úmido em todas as estações, com verão quente, Cfa e, o clima temperado chuvoso, úmido em todas as estações, com verões brandos, Cfb (ALVARES, 2013).

“[...] O sul de Santa Catarina apresenta clima quente no verão e ameno no inverno, com chuvas bem distribuídas durante o ano. O clima é Subtropical Úmido com Verão Quente, pelo sistema de Köppen, recebendo a simbologia Cfa. A temperatura média anual varia de 17 a 20°C, com a temperatura média das máximas variando de 23 a 27°C, e a média das mínimas variando de 13 a 17°C. A altitude e a sua distância com o Oceano Atlântico são os fatores que determinam essas variações espaciais de temperatura, já que existe pouca variação de latitude dentro da região.” (Sônego, 2002, p. 102).

Segundo Monteiro e Furtado (1996), predominam no Estado de Santa Catarina, durante o verão, massas de ar com centros de origens tropicais e equatoriais, ou seja, com estas características, a exemplo das massas de ar Equatorial Continental (mEc), Tropical Atlântica (mTa) e, eventualmente, Tropical Continental (mTc). No inverno, a passagem da Frente Polar Atlântica (FPA) precede a chegada da Massa Polar Atlântica (mPa), que, respectivamente, ocasionam chuvas frontais e declínio da temperatura e da umidade, deslocando as massas tropicais para o centro e o norte do país.

Menciona-se, também, a influência da orografia na formação e distribuição de chuvas, mais comum entre os meses de setembro e março, tendo em vista a circulação atmosférica de ventos de direção nordeste, úmidos, alimentados pela Massa Tropical Atlântica que está posicionada sobre o Atlântico Sul. Estes ventos se defrontam com a escarpa da Serra Geral e formam chuvas orográficas. Há também que ser registrada as chuvas convectivas, típicas dos meses mais quentes do ano.

De acordo com Sônego (2002, p. 102), o sul catarinense apresenta maior precipitação quando perto da Serra Geral:

“[...] os maiores valores são observados nas encostas da Serra Geral, diferença esta causada pelas chuvas de verão que são mais frequentes e intensas nas encostas da Serra Geral do que na orla. Isto se deve ao fato de que, ao encontrar a Serra Geral, o ar úmido é forçado a se elevar causando a formação de nuvens geradoras de temporais de final de tarde de verão.”

De acordo com Marengo (2014), observa-se que no Brasil está havendo acentuação de chuvas no verão, bem como aumento de frequência de chuvas fortes no inverno, isto para o Sul e o Sudeste. A previsão executada por modelos rodados em supercomputadores sugere tendências de aumento de chuva nestas regiões e, se aumenta a disponibilidade hídrica, mesmo que irregularmente distribuída, incertezas adicionais redundam, como de que forma proceder nas medidas de adaptação e mitigação.

Diante desta problemática, analisar o comportamento das chuvas é de grande importância para o entendimento da dinâmica ambiental, bem como reflexos aos setores produtivos da sociedade e do planejamento e resiliência desta. Alguns estudos realizados nas séries de precipitação da região Sul do Brasil identificaram tendências (HAYLOCK *et al.*, 2006). Campos *et al.* (2006) encontraram um aumento dos totais anuais de precipitação no período entre 1911 e 2006 no Estado de Santa Catarina. Minuzzi e Caramori (2011) estudaram dados de 21 estações pluviométricas do Paraná, onde observaram aumento da quantidade de chuva, principalmente no verão. Pinheiro, Graciano e Severo (2013) analisando dados Sul do Brasil observaram aumento de chuvas em 17 das 18 estações analisadas.

Para o Sul de Santa Catarina, Pezente (2017) efetuou uma análise temporal do comportamento de chuvas anuais, entre 1950 e 2016, procurando classificar os anos em secos, chuvosos ou normais. Denski e Back (2015) averiguaram tendências de elementos climatológicos com foco na evapotranspiração. Em comum, ambos os estudos realizados se utilizaram de dados fornecidos pela Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina – EPAGRI e pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET, que operam estações no município de Urussanga. De fato, esta possui a série mais longa e confiável para estudos do clima sul catarinense.

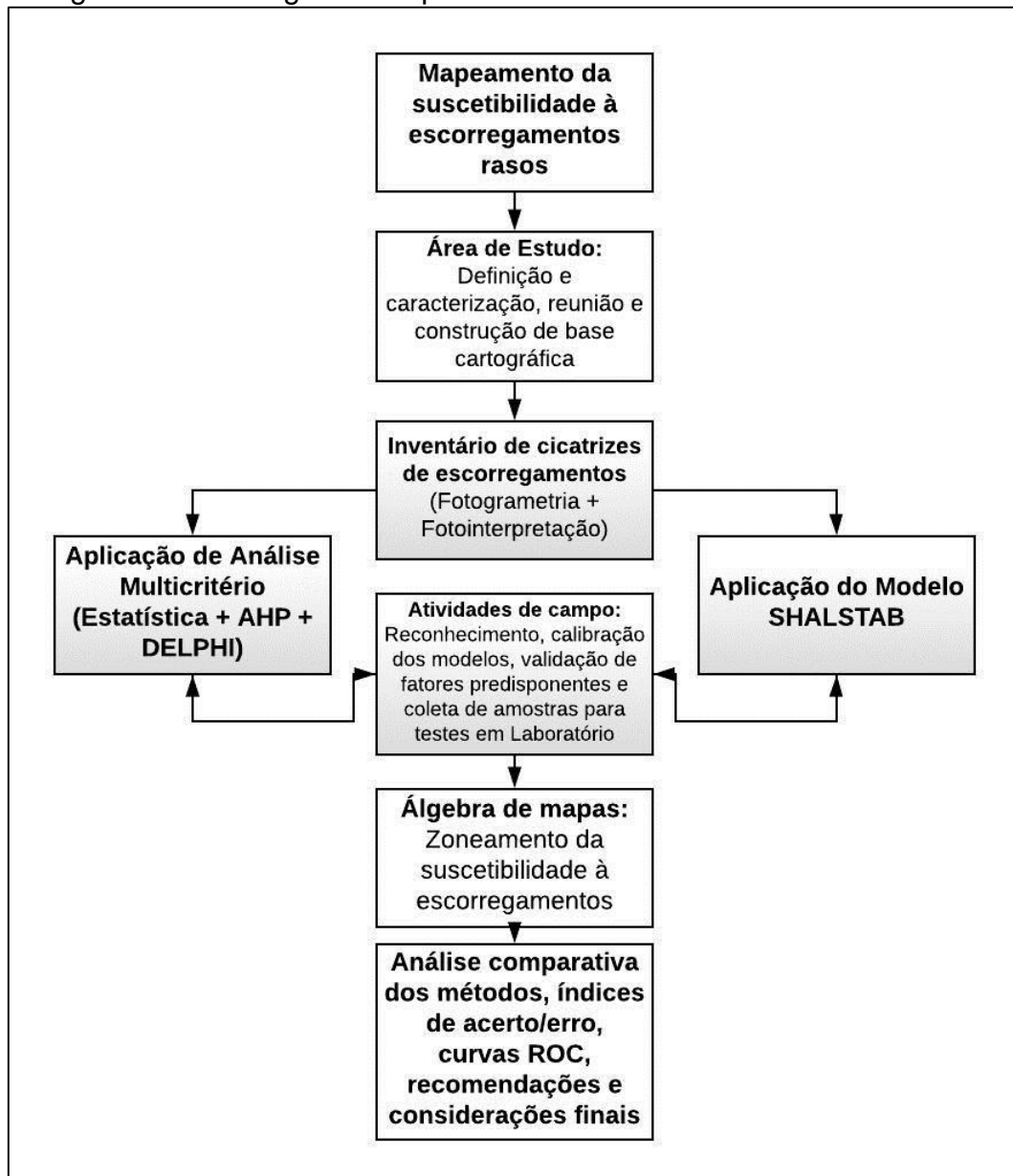
Pelo observado, as chuvas locais já se apresentam com desvios positivos na região, dado ao fator orográfico e convectivo dos meses mais quentes, ou seja, quaisquer tendências de aumento da precipitação pluviométrica impactariam diretamente as relações socioeconômico-ambientais que estão fortemente atreladas ao ciclo hidrológico. Complementa-se que tangenciando todo o sul catarinense há a escarpa de bordo de Planalto Sul Brasileiro, uma área de elevada altimetria e declividades, favorável para escorregamentos.

#### 4 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, foi adotada a recomendação conforme Marcelino (2008), em que os desastres naturais são desencadeados por combinações complexas que necessitam ser integradas por meio de dados que sejam coletados, inventariados, compilados, pareados, analisados, constituindo uma robusta base cartográfica e cruzados no ambiente de SIG.

Neste intuito, os procedimentos adotados para o desenvolvimento do trabalho estão apresentados resumidamente na Figura 14 e serão detalhados neste capítulo:

Figura 14 – Fluxograma esquemático do trabalho.



## 4.1 ELABORAÇÃO DA BASE CARTOGRÁFICA E DO SIG

Esta etapa consistiu em compatibilizar em escala as informações geofísicas da sub-bacia hidrográfica, já existentes em outros trabalhos, que contribuíram para montar uma base de dados de fatores predisponentes aos escorregamentos. Também, em elaborar bases cartográficas temáticas, a partir de um Modelo Digital do Terreno - MDT (Rede Hidrográfica, Declividade, Hipsometria, Orientação e Feição das Vertentes). Ao fim, compreendeu converter, reclassificar e inserir atributos nas camadas que compuseram o banco de dados geográfico em um ambiente SIG.

### 4.1.1 Questão da escala

A primeira etapa desta proposição se referiu a escolha da adequada escala de trabalho. De acordo com as considerações elencadas por Menin (2013), as escalas de estudo podem ser regionais (1:100.000 e 1:250.000) de semi-detálhe (1:25.000 e 1:50.000) e de detalhe (1:10.000 ou maior). Para esta proposição, a escala elencada para representação final de produtos cartográficos foi a de detalhe (>1.45.000), que serviu adequadamente para compatibilizar os planos de informação obtidos de bases cartográficas, bem como aqueles que foram levantados sobre o MDT, ou imagens aéreas, e validados em campo.

### 4.1.2 Obtenção dos níveis básicos de informação

Para diagnóstico da suscetibilidade natural à escorregamentos na área de estudo, com base em Roodposhti *et al.* (2019) e Deng, Li e Tan (2017), foram considerados sete níveis de informação, tratados no estudo como fatores predisponentes aos escorregamentos. É importante mencionar que foram considerados apenas como fatores predisponentes aqueles que constituem níveis básicos de informação, ou são variáveis independentes (SILALAH; ARIFIANTI; HIDAYAT, 2019). Assim, fatores que implicassem em associações de duas ou mais informações básicas, a exemplo de índices topográficos, que são variáveis dependentes, foram evitados. Segundo Pourghasemi *et al.* (2018), com este

cuidado evitou-se a sobreposição de informação numa análise combinada, a multicolinearidade.

Assim, os fatores considerados de nível de informação básica foram os seguintes:

- Declividade e Hipsometria: obtidas com o MDT, feito a partir de base planialtimétrica da Secretaria de Desenvolvimento Sustentável (SDS, 2011), que possui resolução espacial de 1m x 1m. Muitos autores consideram a declividade como o fator principal dos escorregamentos (DAI; LEE, 2002) e neste estudo fez-se o emprego de seis classes distintas para declividade - EMBRAPA (RAMALHO-FILHO; BEEK, 1995). A hipsometria consiste num outro importante fator predisponente, uma vez que escorregamentos tendem a ocorrer em locais mais altos, aonde ocorrem importantes processos geológicos e geomórficos (POURGHASEMI *et al.*, 2018). Neste trabalho os intervalos de hipsometria foram baseados nos estudos de Dai e Lee (2002), executados para escorregamentos em Hong-Kong, citados por diversos outros autores.

- Orientação das vertentes: obtida com o MDT (SDS, 2011). Foram consideradas as vertentes voltadas com face para os pontos cardeais e colaterais, além das planas (total de 9 orientações), de acordo com os estudos já aplicados por diversos autores, a exemplo de Akgun (2012) e, em território estadual, por Paulino (2013). De acordo com Pourghasemi *et al.* (2018), o aspecto das vertentes controla o recebimento de luz solar, ventos locais e precipitação.

- Feições ou curvaturas das vertentes: considerando-se que as vertentes podem ser classificadas verticalmente (perfil) como côncavas, convexas ou retilíneas, e, horizontalmente (plano) como convergentes, divergentes ou planares, seguiu-se com o proposto por Torres (2014) e ESRI (2018), de que as diferentes associações determinam vertentes de distintos graus de risco para escorregamentos. Para obter-se estes níveis de informação também se utilizou do MDT (SDS, 2011).






- Geologia: foram consultados mapas geológicos elaborados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) através do Programa de Levantamentos Geológicos Básicos (PLGB), apresentado por Krebs (2004), executados em todo território nacional. Sabe-se que a escala deste mapa é de 1:100.000, portanto fez-se adequação de escala (>1:5.000), com este detalhamento executado a partir de interpretação de imagens aéreas (visão estereoscópica para fotogeologia),

complementada pela opinião de especialistas e trabalho de campo. Para geologia foi angariada informação litológica e não de lineamentos estruturais.

- Tipos de solo: para esta temática foi realizada reclassificação do mapa de solos, que tomou como base os mapas de solos da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA (1998; 1999) e da Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina, EPAGRI (1999). Assim como para litologias, foi necessária adequação para escala de detalhe, a partir de interpretação de imagens, consulta com especialistas e trabalhos de campo.

- Cobertura do solo: a cobertura do solo, que trata apenas dos aspectos físicos e naturais da paisagem, foi realizada por interpretação e digitalização das classes, sobre a ortofoto cor natural da base cartográfica (SDS, 2011). A digitalização da cobertura do solo (Quadro 8) seguiu as recomendações temáticas do Manual Técnico de Uso da Terra (IBGE, 2013), sendo elencadas as classes de:

Quadro 8 – Classes de cobertura do solo.

Floresta	
Pastagem	
Vegetação herbáceo-arbustiva	
Lavoura temporária	
Edificações	

Além disso, um outro fator predisponente e gatilho para os escorregamentos são as chuvas. Entretanto, dado sua variabilidade têmporo-espacial, e inexistência de estação meteorológica próxima da área de estudo, estas informações não serão passíveis de integração, pela Análise Multicritério, com os outros fatores predisponentes para verificação da suscetibilidade aos escorregamentos.

Por outro lado, a aplicação do SHALSTAB congrega informações hidrológicas pelo MHEU. Além disso, como dados de entrada, a aplicação deste modelo, além de considerar a declividade e áreas de contribuição advindas do MDT, contemplou resultados de testes realizados em campo e ensaios de laboratório. É importante mencionar que todas as informações espaciais tiveram como ponto de partida, para angariar informações secundárias de cartografia temática, a mesma base cartográfica (SDS, 2011), adotando-se o mesmo Sistema de Coordenadas, Projeção UTM, e o *Datum*, SIRGAS 2000, Fuso 22 S.

#### 4.2 INVENTÁRIO DE CICATRIZES DE ESCORREGAMENTOS

O inventário foi executado a partir de fotografias aéreas antigas assumindo-se o pressuposto de que o mapeamento de cicatrizes de escorregamentos pretéritas auxiliou no estudo atual (STARK; GUZZETTI, 2009). Assim, assumiu-se em locais de unidades geotécnicas já afetadas por eventos de movimentos de massa haveria tendência de novas ocorrências (FELL *et al.*, 2008).

O uso de fotografias aéreas antigas como componente de um SIG requereu que as mesmas fossem escanerizadas em alta resolução, com metadados (KAREL *et al.*, 2013), e que para estas fotos fosse atribuída uma referência espacial. Para a área de estudo, como imagens base dos contextos temporais escolhidos foram usadas fotografias aéreas de números 952, 954, 958 e 959, para o ano de 1957, e 18.486, 18.487, 18.488, 23.049, 23.051 e 23.073, para 1978, ambos os voos na escala 1:25.000, obtidas pela empresa “Serviços Aerofotogramétricos Cruzeiro do Sul S.A.”

Todas as fotografias aéreas foram escanerizadas em 600 *dpi* (formato *.tiff*), posteriormente, ortorretificadas na EFD E-Foto, sobre a base cartográfica (SDS, 2011), no *Datum* horizontal SIRGAS 2000, Sistema de Projeção UTM, Meridiano



Central 51º, Fuso 22 Sul. A versão utilizada no E-Foto foi a 2016.06.425, de junho de 2016, a última disponível.

Na EFD, a etapa inicial de operacionalização foi de gerenciamento de projetos, responsável pela criação, manutenção e integridade dos dados de entrada (BADOLATO; AGUIAR, 2010), como amplitudes da área, localização, dados de câmera e certificados de calibração. A segunda etapa foi de proceder com a orientação interior, ou seja, o referenciamento da imagem em relação à câmera (TRAMONTINA *et al.*, 2017), utilizando-se das marcas fiduciais. A terceira etapa, a orientação exterior, foi executada para cada uma das imagens em relação ao referencial do espaço-objeto (SILVEIRA *et al.*, 2011), obtendo-se coordenadas deste. Em seguida foi realizada a fototriangulação, para ajustamento das coordenadas dos centros de perspectiva e dos ângulos de altitude do sensor, no momento da aquisição de cada uma das imagens, que compõem um bloco fotogramétrico (RIBEIRO *et al.*, 2018), obtendo-se as coordenadas tridimensionais no espaço objeto (terreno), a partir do espaço imagem.

Estes três módulos iniciais do E-Foto permitiram posicionar adequadamente o espaço-imagem em relação ao espaço-objeto, pré-requisito para execução de outros módulos, como a restituição tridimensional, que possibilitou representar a superfície do terreno num modelo estereoscópico. Já os módulos subsequentes desta EFD tiveram como finalidade extrair o MDS de um conjunto de imagens (SILVEIRA *et al.*, 2011), ou seja, o modelo de uma parte da superfície do terreno. Por fim, o módulo de ortorretificação (TRAMONTINA *et al.*, 2017) apresentou como saída uma ortofoto, ou ortoimagem, (extensão *.Geotiff*).

Assim como em Faraji *et al.* (2016), neste trabalho foi adotada uma forma de ortorretificar as fotografias aéreas sem a necessidade direta de se estabelecer Pontos de Controle – PC, em campo. Para isso foi necessária boa imagem matricial de base cartográfica (SDS, 2011), conhecida, aceita e validada. Outro aspecto importante, assim como Brooks *et al.* (2008) e Del Soldato *et al.* (2018), foi buscar um RMSE (*Root Mean Square Error*) aproximado de 5 *pixels* para a ortofoto resultante da associação do conjunto de fotografias aéreas de cada data.

Somente após a execução de todas estas etapas na EFD que as geometrias (área, perímetro, comprimento, largura, orientação) das cicatrizes de escorregamentos foram obtidas pela digitalização em tela, escala fixa 1:500, com uso do módulo *Stereoplotter* do E-Foto (TRAMONTINA *et al.*, 2017), sendo então,

exportadas em formato *.shp* para o ArcGis® 10.1.2 (ESRI, 2013), onde foram novamente reavaliadas sobre a ortofoto obtida no E-Foto. Assim como Fiorillo *et al.* (2019), os escorregamentos foram representados por polígonos sem uma identificação específica das áreas de origem, transporte e deposição.

Para estimar os volumes dos escorregamentos restituídos para os anos de 1957 e 1978 aplicou-se os modelos de regressão propostos por outros autores, a exemplo de Simonett (1967), Martin *et al.* (2002), Ten Brink *et al.* (2006), Imaizumi e Sidle (2007), Guzzetti *et al.* (2009) e Ghazipour e Simpson (2016). Assim, para os anos de 1957 e 1978, aplicou-se o modelo dos referidos trabalhos consultados, atribuindo-se valores “X”, variável independente, as áreas (m<sup>2</sup>) das cicatrizes interpretadas em visão estereoscópica e ratificadas sobre o *raster* ortorretificado pela EFD para a área de estudo.

O inventário de cicatrizes de escorregamentos permitiu a aplicação de uma posterior técnica estatística, de se efetuar observações que considerassem a relação da abrangência de escorregamentos do passado sobre cada fator predisponente de análise atual (FELL *et al.*, 2008; STARK, GUZZETTI, 2009). Com as cicatrizes digitalizadas foi finalizado este inventário, que consistiu em estabelecer a densidade normalizada (Dn) de cicatrizes de escorregamentos, levando-se em consideração a área afetada e a área total das classes de cada fator predisponente, (IPT, 2014) contribuindo para aplicação da Análise Multicritério e validação da modelagem determinística.

## 4.3 METODOLOGIAS PARA MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE AOS ESCORREGAMENTOS

### 4.3.1 Análise multicritério

Foi empregada a AHP (SAATY, 1977; 1991), que vem sendo usada em diversos estudos de suscetibilidade à escorregamentos (KOMAC, 2006; NGUYEN, LIU, 2019). De acordo com Brito *et al.* (2017), as variáveis foram comparadas aos pares, na Escala Fundamental de Saaty, que varia de 1/9 a 9, ou seja, do menos ao mais importante, decompondo problemas complexos em comparações mais simples para tomada de decisão.



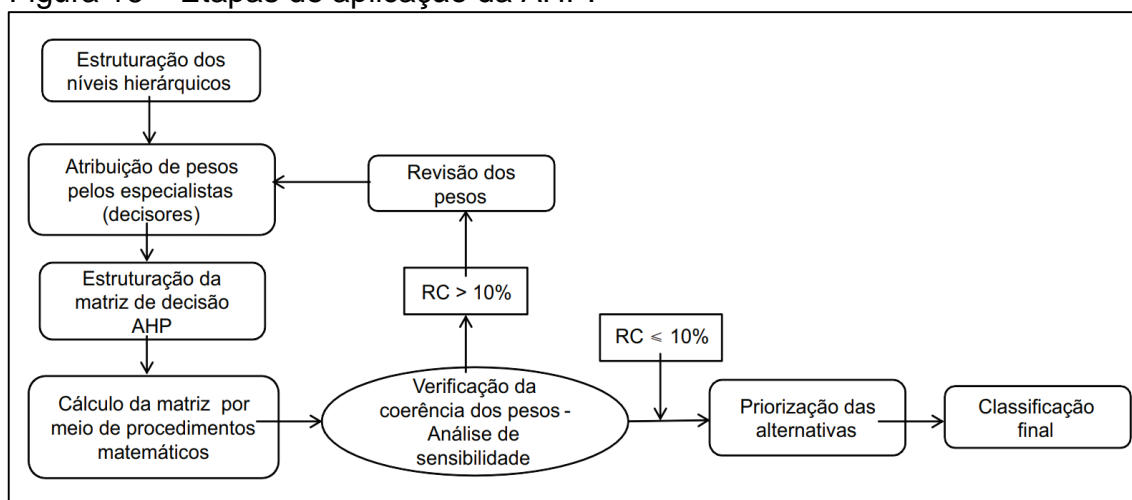
relativos obtidos destacaram as prioridades e diferenças entre os critérios analisados, ou seja, a AHP tratou-se de uma estruturação multicritérios de definição de hierarquias.

Em seguida, foi determinada a consistência dos pesos que foram atribuídos a cada um dos critérios da análise, ou seja, validou-se, ponderando de acordo com uma Razão de Consistência (RC). De acordo com Corseuil (2006), esta RC se trata de uma análise de sensibilidade, indicativa do relacionamento lógico dos julgamentos, cuja qualidade e coerência foi determinada pelo cálculo do autovalor máximo.

Os resultados da aplicação deste método foram considerados para atribuir pesos hierárquicos numa álgebra de mapas. Assim como os estudos de Akgun (2011), pelo uso de uma calculadora *raster*, foram cruzados os mapas básicos, para se obter um mapa teórico, ou hipotético, de suscetibilidade aos escorregamentos. Este mapa foi organizado de modo a apresentar 5 diferentes classes espaciais para suscetibilidade: muito alta até a muito baixa (BAHRAMI *et al.*, 2019), de modo a propiciar a padronização para quantificação das classes e comparação dentre diferentes mapas resultantes.

As etapas de aplicabilidade deste método, conforme Teknomo (2006), Faria e Augusto Filho (2013a), no âmbito de uma análise multicritério, foram executadas conforme a Figura 16.

Figura 16 – Etapas de aplicação da AHP.



Fonte: Faria e Augusto Filho (2013a).

Além da aplicação hipotética, ou teórica, de se utilizar a hierarquia de fatores com base na opinião de especialistas, combinada com pesos teóricos das classes de cada fator predisponente, a análise multicritério foi subsidiada pelo raciocínio probabilístico de emprego destes pesos às classes, integrando as estatísticas de densidade normalizada de escorregamentos por fatores (IPT, 2014), a exemplo de Zhang *et al.* (2012) e Nguyen e Liu (2019). Esta iniciativa de afastar a análise multicritério da subjetividade, aproximando-a do método estatístico Hadian-Amri *et al.* (2014), somente foi possível através da integração do inventário de dados históricos das cicatrizes de escorregamentos, suas quantificações e geometrias.

Com base nas estatísticas de densidade normalizada de escorregamentos pretéritos para cada classe de cada fator, foi restituído um modelo ideal para o evento registrado pelas fotografias aéreas de 1957, outro para 1978 e, por fim, um modelo médio combinado, considerando-se a restituição de 1957 + 1978. Estes três mapas finais resultantes refletiram à restituição de eventos passados, ou da combinação destes, sendo quantificados, comparados, inclusive, com um modelo teórico, de suscetibilidade aos escorregamentos para esta área de estudo.

#### **4.3.2 Análise determinística**

O emprego desta metodologia seguiu princípios da mecânica dos solos, considerando informações detalhadas de uma encosta, para subsidiar um MEEI, acoplando-o num MHEU, a exemplo do trabalho de Michel *et al.* (2012). Com isso, buscou-se atenuar a subjetividade remanescente na Análise Multicritério, mesmo que esta estivesse subsidiada pelo método estatístico, com a estratégia de se adotar valores absolutos para o grau de risco, pelo cálculo de um Fator de Segurança - FS.

Segundo os preceitos de Fell *et al.* (2008) e Michel *et al.* (2012), foram angariados dados de entrada como etapa inicial: imagens aéreas e informações extraídas do MDT da SDS (2011), com resolução espacial de 1 m, e do MDT proveniente do imageamento do satélite *Alos Palsar* (ASF, 2020), com resolução de 12,5 m. O uso dos MDT é importante para se obter informações de declividade das encostas, bem como, de áreas de contribuição de escoamento. Na preparação destes MDT se fez necessária operacionalização de ferramentas para análise de *raster*, que foram executadas com o *System for Automated Geoscientific Analyses* –

SAGA 2.3.2® (SAGA, 2020), já devidamente integrado às ferramentas do *software* livre *QuantumGis*® - QGis.

Além disso, através do ensaio de campo, foi determinada a profundidade e, com uso do *Borehole Shear Test* (BST), foi obtida a coesão, bem como, o ângulo de atrito interno do solo (BECHTUM, 2012). Uma vez de posse dos dados de entrada para modelagem, a exemplo do trabalho de Michel *et al.* (2012), foi adotada ferramenta de *software* na aplicação do SHALSTAB®, desenvolvido pela Universidade de Berkeley na Califórnia (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998).

Com a popularização de *softwares* que trabalham com informação geográfica, a rotina do programa passou a ser aplicada como um executável, inclusive com código fonte aberto para aprimoramentos (RAMOS *et al.*, 2002), sendo que a aplicabilidade deste modelo se deu por plugin específico no ambiente do *QuantumGis*®. O mapa resultante detalhou um fator médio por zona, com limites definidos conforme faixas de segurança, a exemplo de instável ou não instável.

#### 4.3.3 Quantificação e validação dos métodos empregados

A aplicação e inerente adaptação/calibração de cada um dos métodos empregados para mapeamento da suscetibilidade à escorregamentos permitiu chegar-se a conclusões textuais descritivas. Entretanto, somente a partir do emprego de um SIG foi possível obter-se um resultado de viés prescritivo e preditivo (BERRY, 1993), a partir da combinação entre os mapas resultantes (análise multicritério balizada pelo método estatístico, e modelagem determinística), sendo quantificável em área suas divergências/similaridades zonais.

Em seguida foi verificado se as áreas instáveis dos mapas coincidiam espacialmente com as cicatrizes de escorregamento que foram restituídas. Quanto maior foi esta coincidência, maior a capacidade discriminante e desempenho do modelo idealizado. Para isso, pelos índices propostos por Sorbino *et al.* (2010), denominados Índices de Acerto (IA), Equação (15), e Índice de Erro (IE), Equação (16), foi verificado o quanto da área definida como instável em cada modelo coincidiu com as cicatrizes (Área Dentro), e quanto da área definida como instável ficou fora das cicatrizes pretéritas (Área Fora). Também foi considerado como área instável o total de cicatrizes mapeadas e área estável a diferença entre a área total de estudo em relação a área ocupada pelas cicatrizes restituídas.

$$IA = \left( \frac{\text{Área Dentro}}{\text{Área Instável}} \right) * 100 \quad (15)$$

$$IE = \left( \frac{\text{Área Fora}}{\text{Área Estável}} \right) * 100 \quad (16)$$

Por fim, o objetivo foi de verificar se os modelos idealizados para escorregamentos estão identificando falsos positivos, ou seja, áreas que nunca irão escorregar, mas estão classificados como tal, ou ainda, falsos negativos. Para essa validação foi adotada como métrica de desempenho da predição dos modelos as Curvas ROC - *Receiver Operating Characteristic* (PORTAL ACTION, 2020). A curva definiu se os modelos tiveram sensibilidade e especificidade, sendo ideal que a curva construída se aproxime do canto superior esquerdo do gráfico cartesiano formado para cada modelo.

Silalahi, Arifianti e Hidayat (2019) afirmam que a validação de cálculos mostra quão bem o modelo pode prever eventos futuros desconhecidos. Para esta aplicação, os resultados dos cálculos de IA e IE foram plotados como uma curva no espaço bidimensional, sendo  $IA = Y$  e  $IE = X$ , definido como espaço ROC, capaz de classificar a validade do modelo para predição, ou mesmo, para restituição de eventos ocorridos. Conforme Deng, Li e Tan (2017) a área formada sob a curva (*Area Under the Curve – AUC*), calculada a partir da curva ROC, valida a precisão de um modelo de escorregamento em dois aspectos: habilidade de previsão e ajuste do modelo.

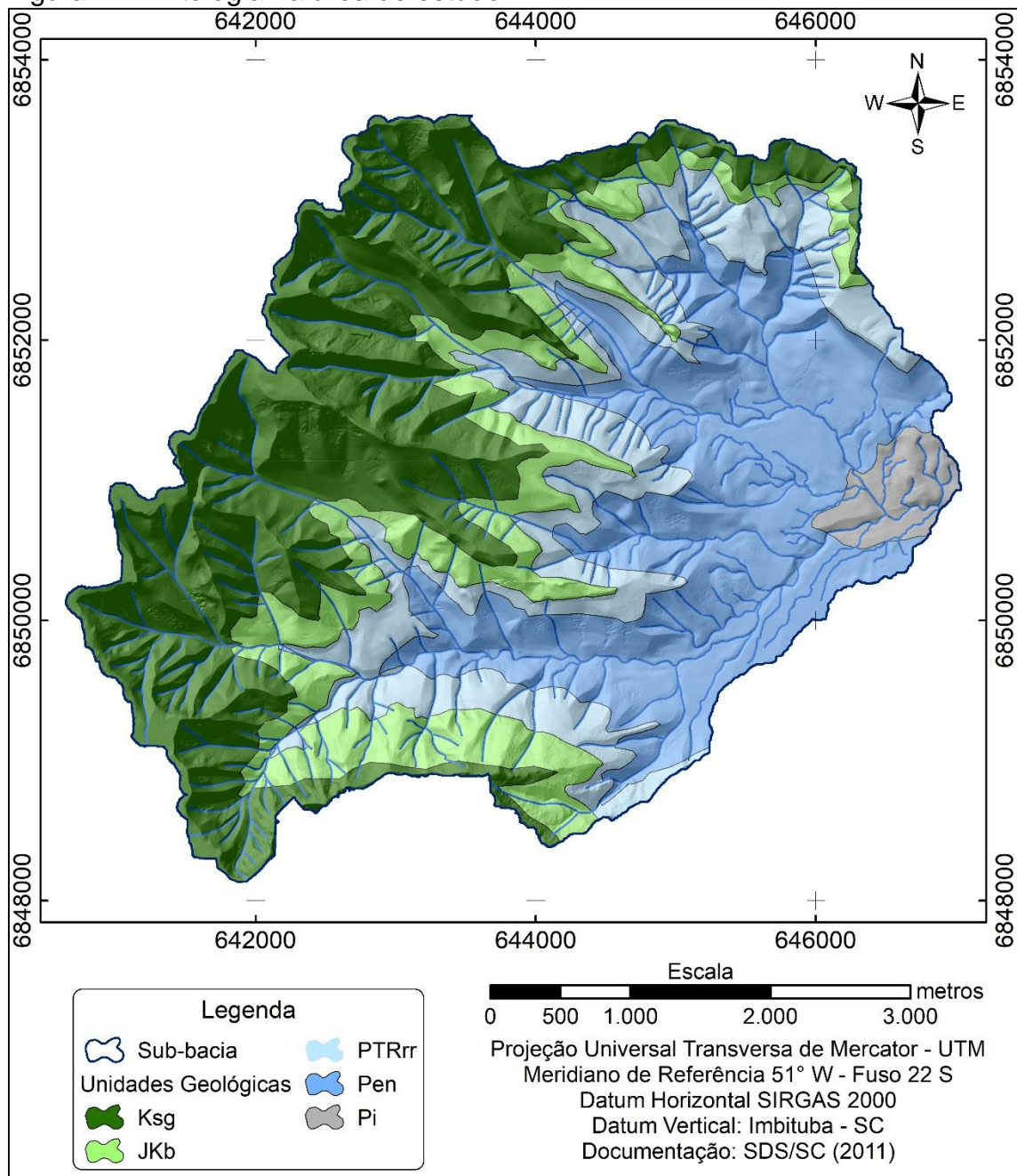
Vakhshoori e Zare (2018), em seus estudos, também utilizaram como ferramenta de validação as curvas ROC, calculando a AUC e concluíram que um modelo ideal tem um valor de AUC próximo a 1,0 (predição perfeita), enquanto um modelo de predição aleatória tem um valor de AUC próximo de 0,5.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 BASE DE DADOS ESPACIAIS

Quanto à geologia, as informações que foram interpretadas podem ser vistas na Figura 17, retratando uma realidade já detalhada pela Coluna White.

Figura 17 – Litologia na área de estudo.





Na confluência dos rios Mãe Luzia e Congonhas, extremo leste da área de estudo, as cotas mais baixas são suportadas pela Formação Irati – Pi, representada por folhelhos escuros. Circundando e litologicamente sotoposta à Pi está a Formação Estrada Nova – Pen, com rochas sedimentares de ambientes genéticos distintos, predominando folhelhos e margas calcárias, o substrato de grande parte da área povoada e antropizada.

Acima da ‘Pen’ apresenta-se a Formação Rio do Rasto - PTRrr, em seguida, a Formação Botucatu - JKb, que ocupam menores áreas na sub-bacia, entretanto propiciam condicionamento estrutural do relevo, pela presença de arenitos com erosão diferencial. Por fim, capeando as demais rochas, e ocupando mais de 1/3 da área de estudo, encontram-se as rochas extrusivas vulcânicas da Formação Serra Geral - Ksg. O quadro completo de quanto em área absoluta cada classe de litologia ocupa, bem como percentual, pode ser acompanhado na Tabela 2.

Tabela 2 – Classes de litologia conforme ilustrado na Figura 19.

<b>Formações</b>	<b>Área</b>	
	<b>(ha)</b>	<b>(%)</b>
Formação Serra Geral - Ksg	853,35	38,11
Formação Botucatu - JKb	339,49	15,16
Formação Rio do Rasto - PTRrr	370,04	16,53
Formação Estrada Nova - Pen	622,71	27,81
Formação Irati - Pi	53,65	2,40
<b>Total</b>	<b>2239,23</b>	<b>100,00</b>

Acerca da hipsometria, Figura 18 e Tabela 3, as cabeceiras do rio Mãe Luzia drenam um anfiteatro da escarpa e pequenos setores no topo do planalto, cujo levantamento processou-se, provavelmente, do final do Cretáceo e ao longo do terciário, produzindo altitudes superiores a 1350 m. Concomitante ao soerguimento houve progressivo recuo da escarpa, o que propiciou se estabelecer uma extensa baixada litorânea, aflorando rochas sedimentares de idade que datam do Gondwana.

Figura 18 - Hipsometria da área de estudo.

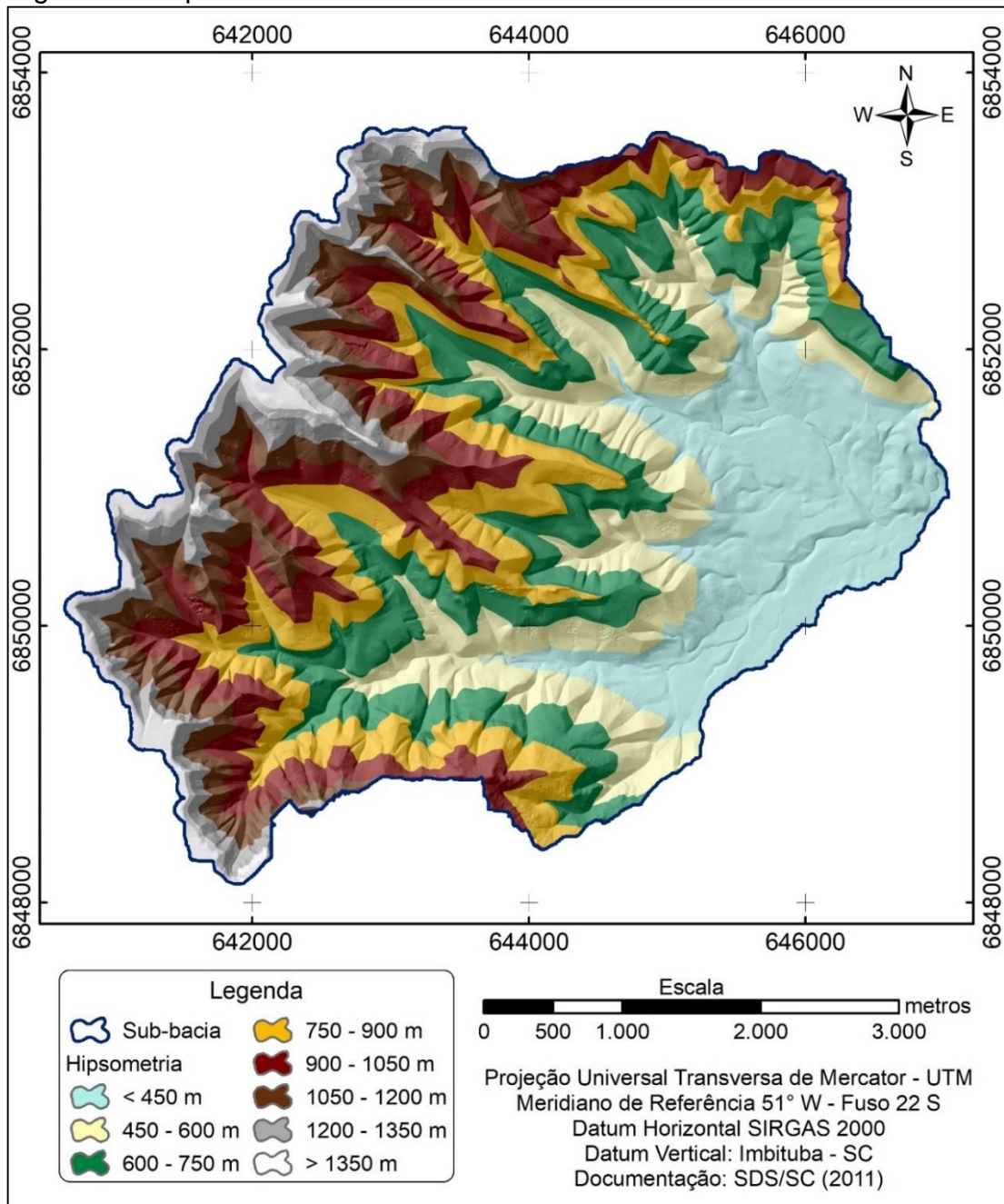


Tabela 3 – Distribuição dos intervalos hipsométricos e sua quantificação.

Hipsometria	Área	
(m)	(ha)	(%)
< 450	384,35	17,16
450 - 600	331,37	14,80
600 - 750	399,79	17,85
750 - 900	356,13	15,90
900 - 1050	317,3	14,17
1050 - 1200	204,72	9,14
1200 - 1350	131,84	5,89
> 1350	113,73	5,08
<b>Total</b>	<b>2239,23</b>	<b>100,00</b>

O condicionamento litológico e estrutural, aliado à amplitude altimétrica condiciona declividades acentuadas para a área, como pode ser visto na Figura 19 e na sua quantificação, a Tabela 4. É notório ressaltar que a área é extremamente declivosa, com 60,5 % desta > 75 % de declividade.

Figura 19 – Classes de declividade na sub-bacia.

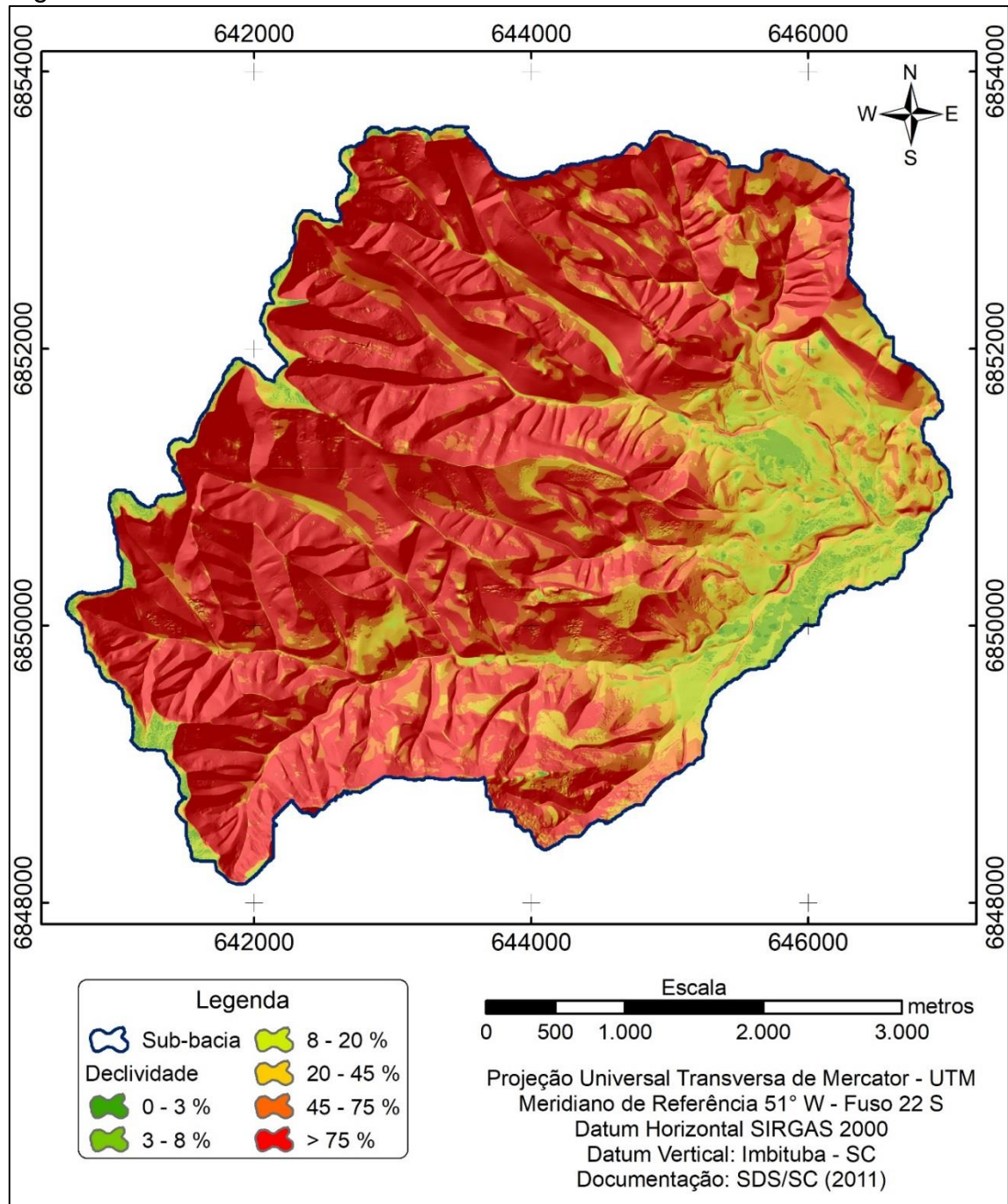


Tabela 4 – Intervalos de declividade.

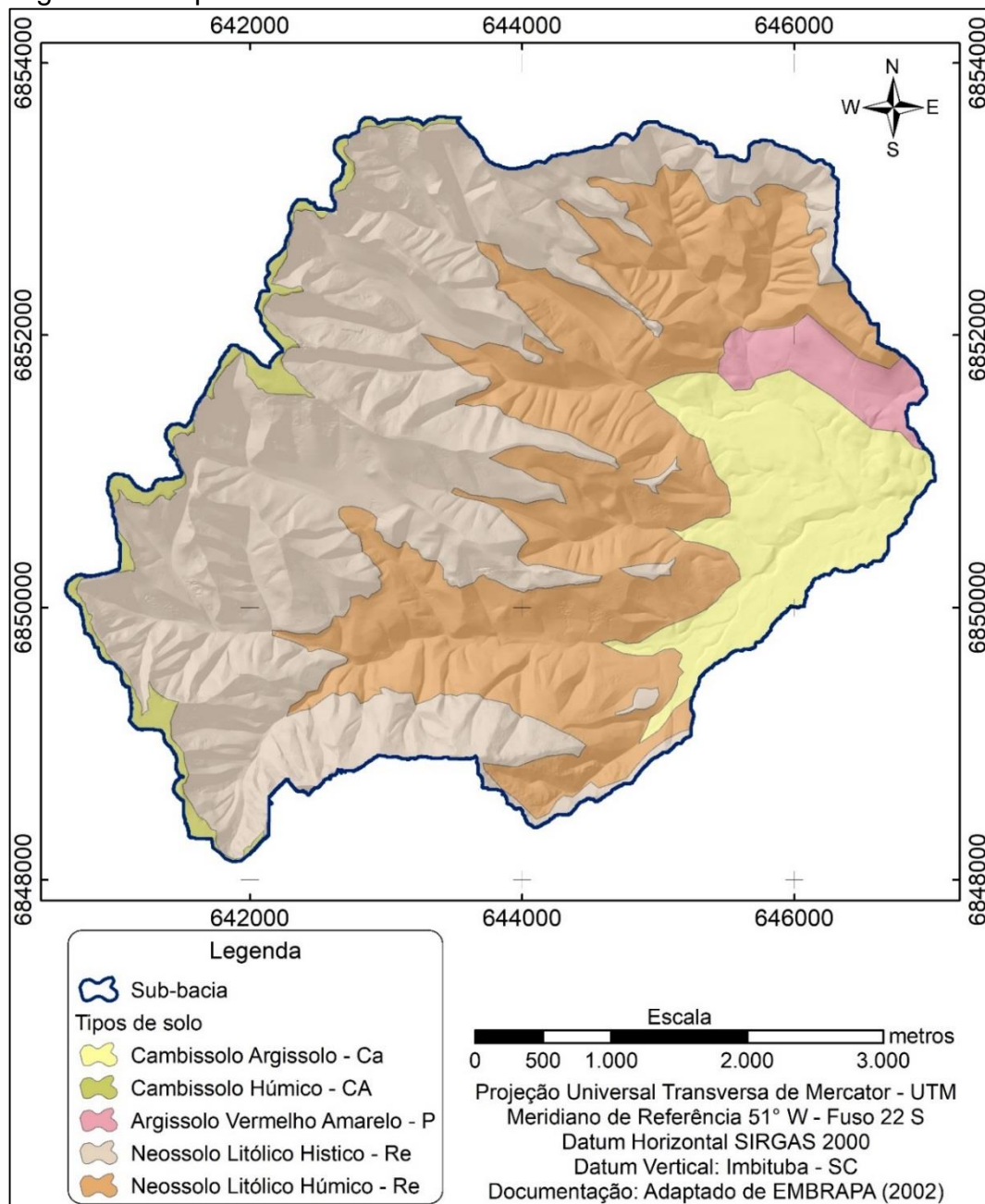
<b>Declividade</b>	<b>Área</b>	
<b>(%)</b>	<b>(ha)</b>	<b>(%)</b>
0 - 3	11,8	0,5
3 - 8	60,2	2,7
28 - 20	150,3	6,7
20 - 45	251,4	11,2
45 - 75	410,8	18,3
> 75	1354,7	60,5
<b>Total</b>	<b>2239,23</b>	<b>100,00</b>

Quanto aos solos, Figura 20, nos terrenos escarpados de alta declividade se desenvolvem solos pedregosos e de baixa profundidade, o Neossolo Litólico Hístico - Re, cuja superfície de descontinuidade dá-se com a rocha imediatamente subjacente. Também na escarpa, contudo em cotas inferiores, uma subclasse do Re apresenta horizonte A bem desenvolvido, dada a biomassa existente na forma florestal, bem como a carregada de montante, sendo então conhecida como Neossolo Litólico Húmico. Cambissolos ocorrem em áreas de relevo menos acidentado, sendo mais argilosos na parte baixa da bacia, ou húmicos na borda de planalto, nas cotas mais elevadas à oeste da área de estudo. A quantificação absoluta e em percentual dos diferentes tipos de solos mapeados é visualizada na Tabela 5.

Tabela 5 – Tipos de solos e sua quantificação.

<b>Tipos de solos</b>	<b>Área</b>	
	<b>(ha)</b>	<b>(%)</b>
Cambissolo Argissolo - Ca	252,60	11,28
Cambissolo Húmico - CA	60,81	2,71
Argissolo Vermelho Amarelo - P	62,54	2,79
Neossolo Litólico Hístico - Re	1110,74	49,60
Neossolo Litólico Húmico - Re	752,52	33,60
<b>Total</b>	<b>2239,23</b>	<b>100,00</b>

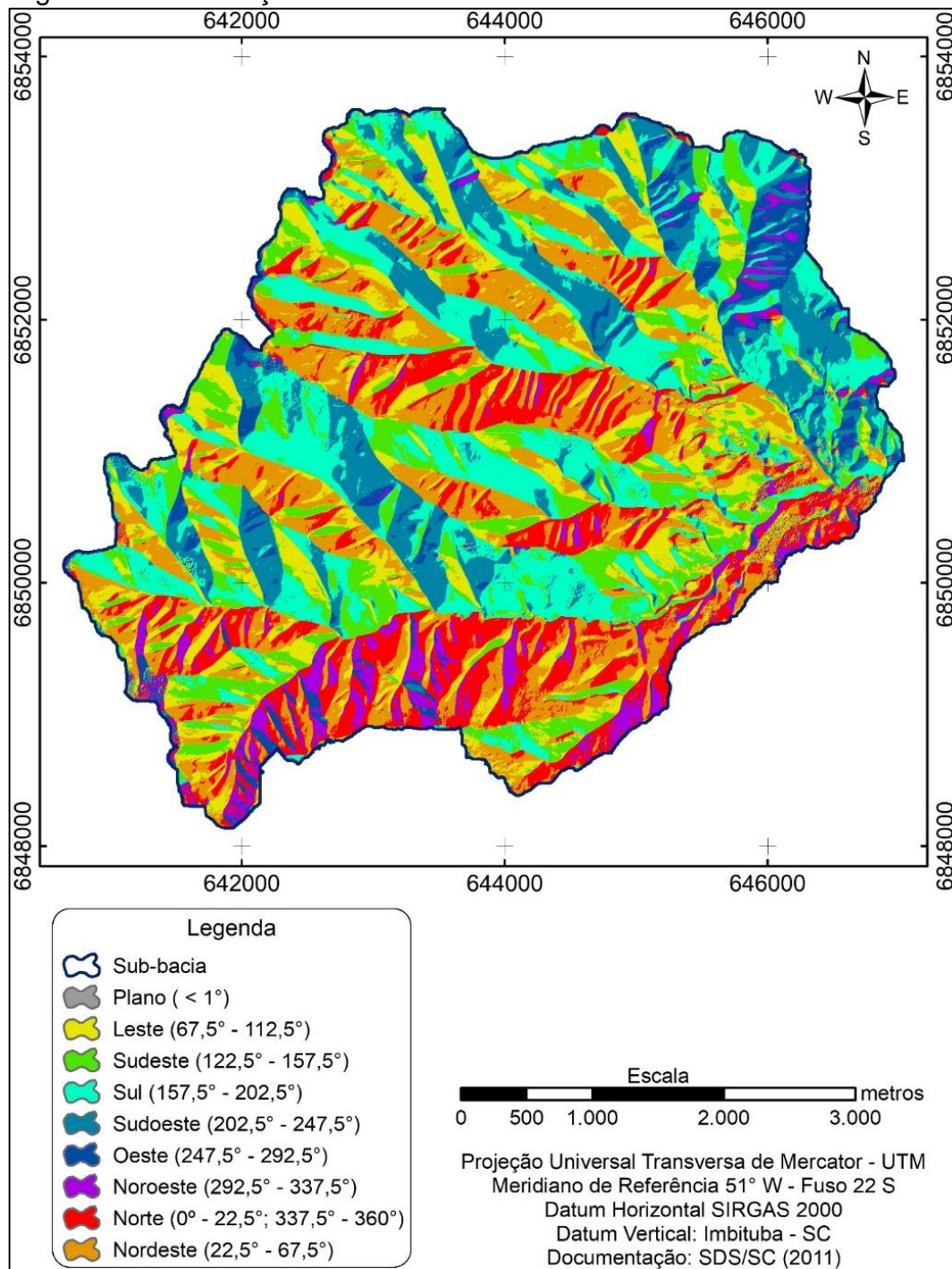
Figura 20 – Tipos de solo na sub-bacia.



Outra importante informação descritora da área de estudo é a distribuição da orientação de vertentes, conforme suas 9 categorias (Figura 21) indicativa da manutenção de umidade (sul) ou maior insolação nas encostas (norte), em locais situados ao sul da Linha do Equador. Como a área de estudo é declivosa e voltada para leste e sudeste, vertentes planas e de orientação à oeste representam pequeno percentual do total (Tabela 6), enquanto as voltadas para nordeste e sul são as mais expressivas, uma vez que os vales se orientam, preferencialmente para sudeste.



Figura 21 – Orientação de vertentes.



A geomorfologia de uma encosta, ou vertente, no seu táxon descritor de feição, exprime que as curvaturas podem ser classificadas verticalmente (perfil) como côncavas, convexas ou lineares. Para área de estudo esta classificação pode ser acompanhada na Figura 22 e a quantificação na Tabela 7, que exprime um equilíbrio em área das 3 classes.

Tabela 6 – Porcentagem e área de cada classe de orientação de vertentes.

Orientação de Vertentes	Área	
	ha	%
Plano ( < 1°)	6,0	0,3
Norte (0° - 22,5°; 337,5° - 360°)	293,5	13,1
Nordeste (22,5° - 67,5°)	442,3	19,8
Leste (67,5° - 112,5°)	314,6	14,1
Sudeste (122,5° - 157,5°)	288,0	12,9
Sul (157,5° - 202,5°)	426,9	19,1
Sudoeste (202,5° - 247,5°)	273,2	12,2
Oeste (247,5° - 292,5°)	91,9	4,1
Noroeste (292,5° - 337,5°)	108,7	4,9
<b>Total</b>	<b>2239,23</b>	<b>100,00</b>

Figura 22 – Curvatura vertical (perfil) de vertentes.

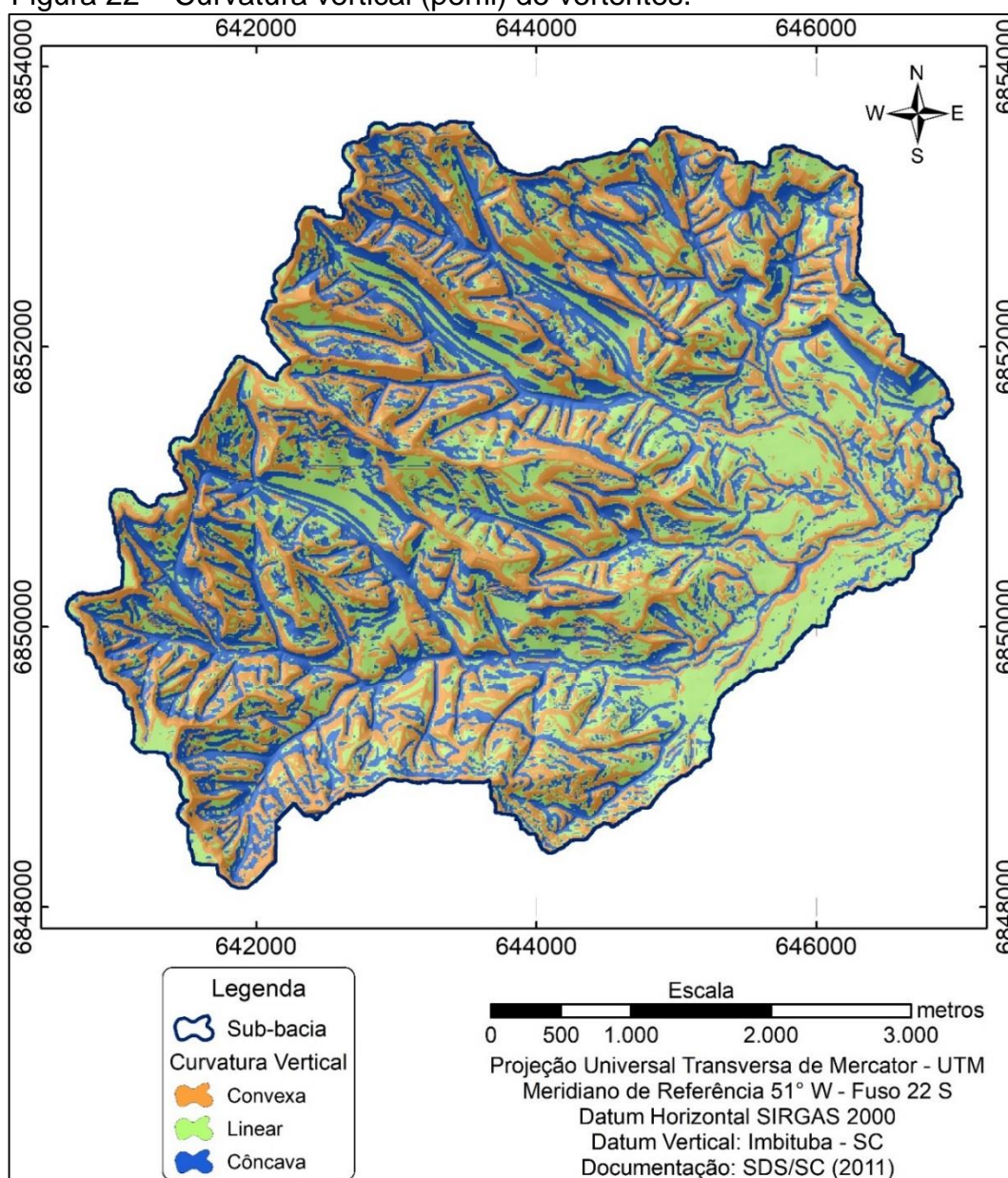




Tabela 7 – Porcentagem e área das classes de curvatura vertical.

Classes	Área	
	ha	%
Convexa	782,24	34,93
Linear	696,89	31,12
Côncava	760,09	33,94
<b>Total</b>	<b>2239,23</b>	<b>100,00</b>

Em relação a lateralidade, ou plano horizontal, as vertentes podem ser classificadas como convergentes, divergentes ou planares (Figura 23 e Tabela 8).

Figura 23 – Curvatura das vertentes quanto à sua lateralidade.

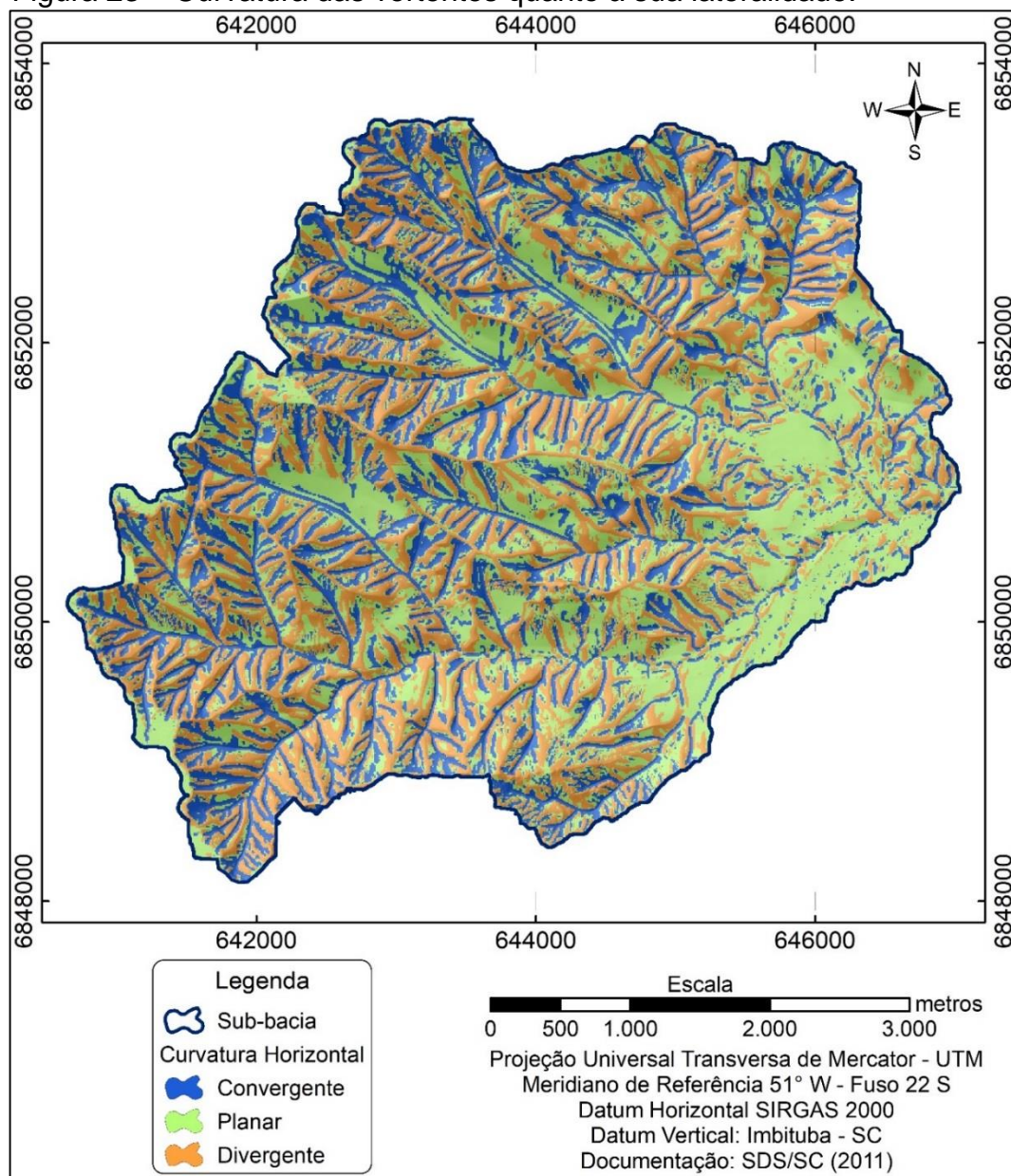




Tabela 8 – Porcentagem e área das classes de curvatura horizontal.

Classes	Área	
	ha	%
Convergente	657,79	29,38
Planar	769,36	34,36
Divergente	812,07	36,27
<b>Total</b>	<b>2239,23</b>	<b>100,00</b>

A associação das 3 classes de curvatura vertical, com as 3 classes de curvatura horizontal, resultou nas 9 classes de feições de vertentes, que traduzem a morfologia da área (Figura 24). Nos estudos de suscetibilidade à escorregamentos translacionais rasos são as curvaturas côncavas que disponibilizam maior quantidade de material para movimentos de massa, ao passo que são as curvaturas convergentes que concentram maior quantidade de água no solo. Logo, a combinação “côncava-convergente” é a mais propícia a deflagrar escorregamentos, enquanto a combinação “convexa-divergente” apresenta as menores possibilidades.

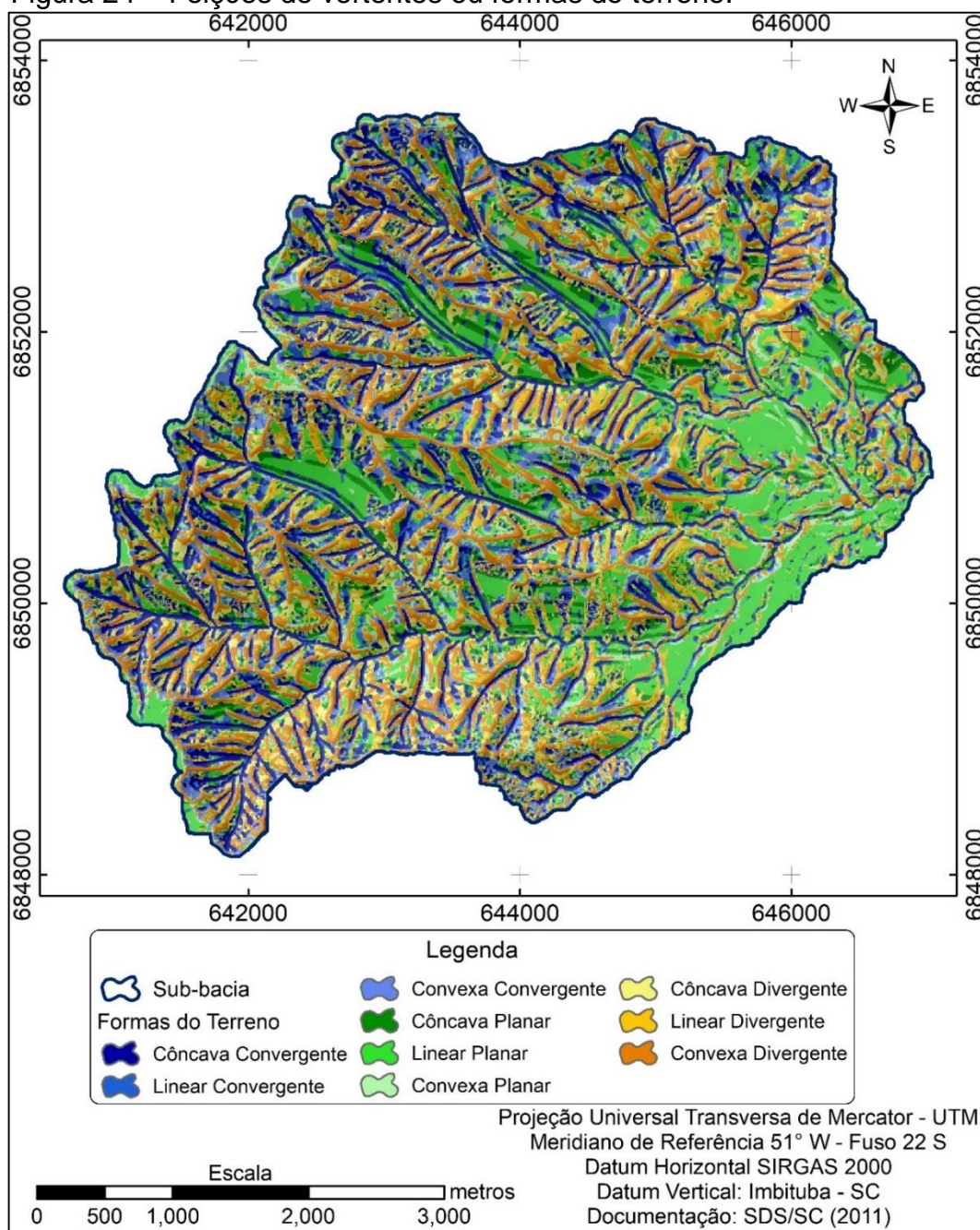
Maiores detalhes, quanto às quantificações em área e percentual, das classes de feições de vertentes, obtidas no mapeamento da área de estudo, podem ser acompanhados da Tabela 9.

Tabela 9 – Quantificação das diferentes classes de feição (formas) do terreno.

9 Classes	Área final	
	ha	%
Côncava/Convergente	397,55	17,75
Linear/Convergente	124,93	5,58
Convexa/Convergente	135,30	6,04
Côncava/Planar	198,89	8,88
Linear/Planar	373,47	16,68
Convexa/Planar	196,99	8,80
Côncava/Divergente	163,63	7,31
Linear/Divergente	198,48	8,86
Convexa/Divergente	449,95	20,09
<b>Total</b>	<b>2239,23</b>	<b>100,00</b>

Por fim, o fator predisponente levantado para área de estudo que está sujeito às alterações temporais, dado o fator antrópico, trata-se da cobertura do solo. Para contornar essa questão para aplicação de modelos com diferentes datas, procedeu-se com a adoção da cobertura do solo mapeada sobre fotografias aéreas de 1957 e outra para 1978, conforme pareado na Figura 25 e quantificado pela Tabela 10.

Figura 24 – Feições de vertentes ou formas do terreno.



De maneira generalista os números indicam que a cobertura do solo manteve as proporcionalidades de ocupação por classe nos dois períodos analisados, mesmo que haja tendência ao aumento das áreas florestadas, em detrimento de lavouras e pastagem.

Figura 25 – Cobertura do solo para 1957 e 1978 na área de estudo.

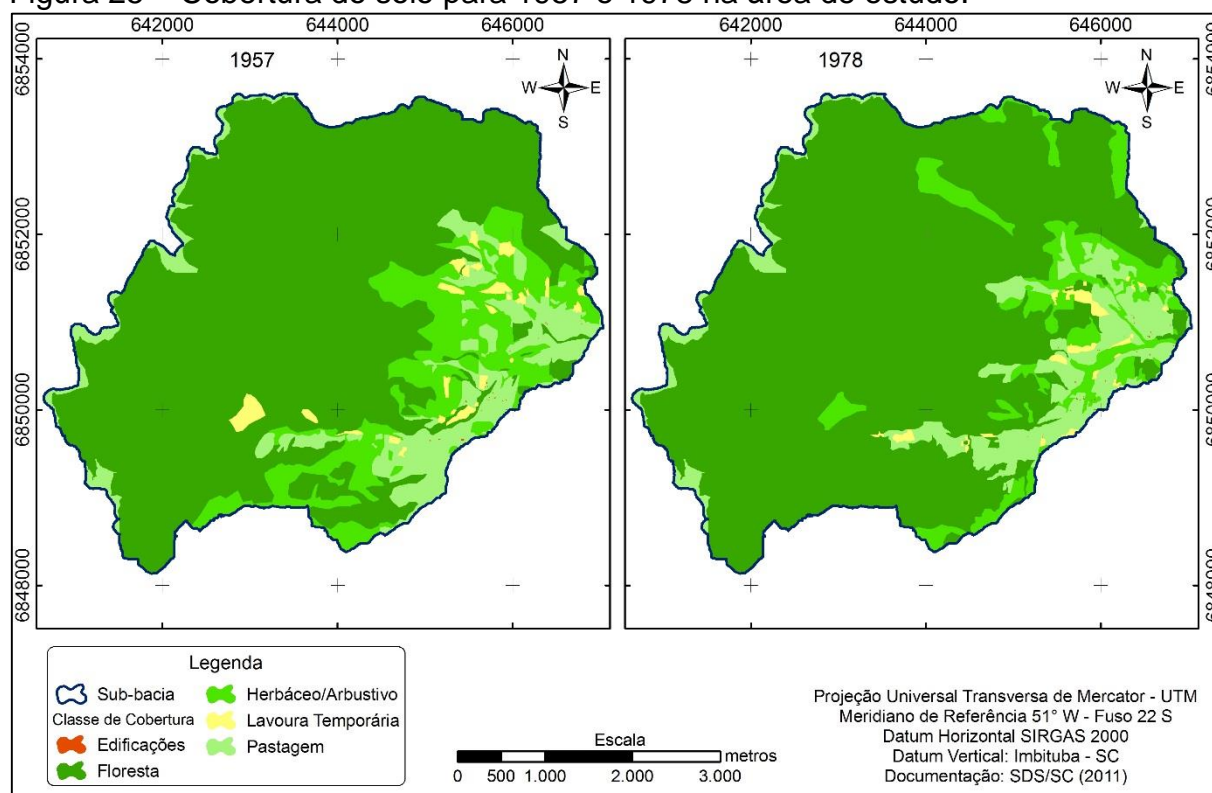


Tabela 10 – Quantificação da cobertura do solo para 1957 e 1978.

9 Classes	Área 1957		Área 1978	
	ha	%	ha	%
Edificações	0,328	0,01	0,349	0,02
Florestal	1639,47	73,22	1773,67	79,21
Herbáceo Arbustivo	308,39	13,77	203,30	9,08
Lavoura Temporária	37,72	1,68	20,76	0,93
Pastagem	253,31	11,31	241,14	10,77
<b>Total</b>	<b>2239,23</b>	<b>100,00</b>	<b>2239,23</b>	<b>100,00</b>

## 5.2 INVENTÁRIO DE CICATRIZES DE ESCORREGAMENTOS

### 5.2.1 Uso da EFD para restituição das cicatrizes

Para posicionar e dimensionar adequadamente as cicatrizes de escorregamentos fez-se o uso de técnicas de Fotogrametria, visando georreferenciar e ortorretificar as fotografias aéreas antigas elencadas, conforme descrito nos materiais e métodos deste trabalho. Os procedimentos se demonstraram úteis e complementares, contudo, a natureza fisiográfica da área de estudo, com cotas variáveis de 275 m a 1487 m, uma amplitude de 1212 m, desde o início dos

procedimentos, se apresentou como um desafio na busca pela qualidade em se extrair informações destas fotografias aéreas antigas.

As fotografias de números 952, 953, 954 (datadas de 1957) e 18.486, 18.487, 18.488 (de 1978) formaram 2 trios (blocos), na mesma faixa de voo, cuja superposição das mesmas recobria os registros de cicatrizes de escorregamentos na área em estudo. Todos os módulos disponíveis na EFD foram realizados para as fotografias de 1957, bem como para 1978, objetivando, ao fim, uma ortoimagem (extensão *.geotiff*), passível de fornecer geometrias acuradas das cicatrizes antigas.

O estágio inicial de operacionalização da EFD consistiu no gerenciamento de projeto (Figura 26), responsável pela criação, manutenção e integridade dos dados de entrada (BADOLATO; AGUIAR, 2010), adicionando-se as informações deste estudo, como: terreno, localização, pontos de controle com as coordenadas e altimetria, dados do voo e certificados de calibração da câmera (Anexo A).

A segunda etapa foi de proceder com a orientação interior, ou seja, realizou-se o referenciamento da imagem em relação à câmera, utilizando-se das marcas fiduciais presentes nas fotografias (Figura 27). Para efetuar-se a terceira etapa, da ressecção espacial, esteve-se diante do desafio de promover a orientação exterior de cada uma das seis fotografias aéreas em relação ao referencial do espaço-objeto, obtendo-se coordenadas deste, sendo que, foram utilizados os pontos de controle, previamente definidos sobre a base cartográfica.

Em terrenos irregulares, os esforços de georreferenciar e ortorretificar, mesmo com muitos pontos de controle, não responderão plenamente. Gobbi *et al.* (2018) restituíram 100 fotografias aéreas antigas (23 x 23 cm), datadas de 1954, que recobriam a Região de Trentino, Itália. Os autores utilizaram-se de escanerização em 600 *dpi*, o que conferia resolução espacial, de 2,1 m/pixel, admitindo RMSE de até 6,8, equivalente à 15 m. Deslocamentos maiores foram eliminados e, ainda, recomendou-se de 15 a 20 pontos de controle, distribuídos homogeneamente, como suficientes para retificar cada imagem. Mesmo assim, os autores afirmam ser esta uma situação hipotética, uma vez que, em locais de altimetria elevada, de paisagens naturais, é difícil se encontrar correspondência entre pontos homólogos que se perpetuaram do passado até o presente.

Figura 26 – Dados de terreno, voo, imagens e de câmera, necessários para compor o projeto fotogramétrico.

**efoto[Project Manager]**

Project Execute Help

Open Project: C:\William ...\foto\_mae\_luzia\_1978.epp

**Project Header**

- Terrain
- Sensor
- Flight
- Images
  - 18486
  - 18487
  - 18488
- Points

**Terrain**

Max Altitude 1487.000 m GRS WGS84

Min Altitude 275.000 m CPS UTM

Mean Altitude 881.000 m UTM Fuse 22

Approximate geographic coordinates of center project area

Latitude 28°27'34.42000" Southern Hemisphere

Longitude 49°31'19.50000" West of Greenwich

**Image**

Image Id 18486 Select Image View Image Resolution 600 dpi

Ground Coordinates of exposure station centre (optical center of sensor)

Type Not Considered Standard Deviations Not Available

E<sub>0</sub> 0.000 m StDev Not Available

N<sub>0</sub> 0.000 m StDev Not Available

H<sub>0</sub> 0.000 m StDev Not Available

Inertial Navigation System data (in Decimal Degrees)

Type Not Considered Standard Deviations Not Available

Omega 0 StDev Not Available

Phi 0 StDev Not Available

Kappa 0 StDev Not Available

Metadata

File Path ...\\...\\fotos

File Name 18486.jpg

Height 5449 px Width 5446 px

IO Parameters

a0: -114.4731 a1: 0.0423

b0: 114.9145 b1: -0.0001

EO Parameters (Spatial Resection)

ω: 0.7216° φ: -0.3647°

**Sensor**

Platform aerial

Energy Source natural

**Flight**

Flight Information

Flight Id Folha 45

Producer's Name Aerofoto Cruzeiro do Sul SC

Description Cobertura Aerofotogramétrica do Estado de Santa Catarina

Date of Flight Execution 01/01/1978

Flight Parameters

Nominal Flight Altitude Above Sea Level (m) 2500.00

Nominal Scale 1:25000

Longitudinal Overlap (%) 60.00

**Points**

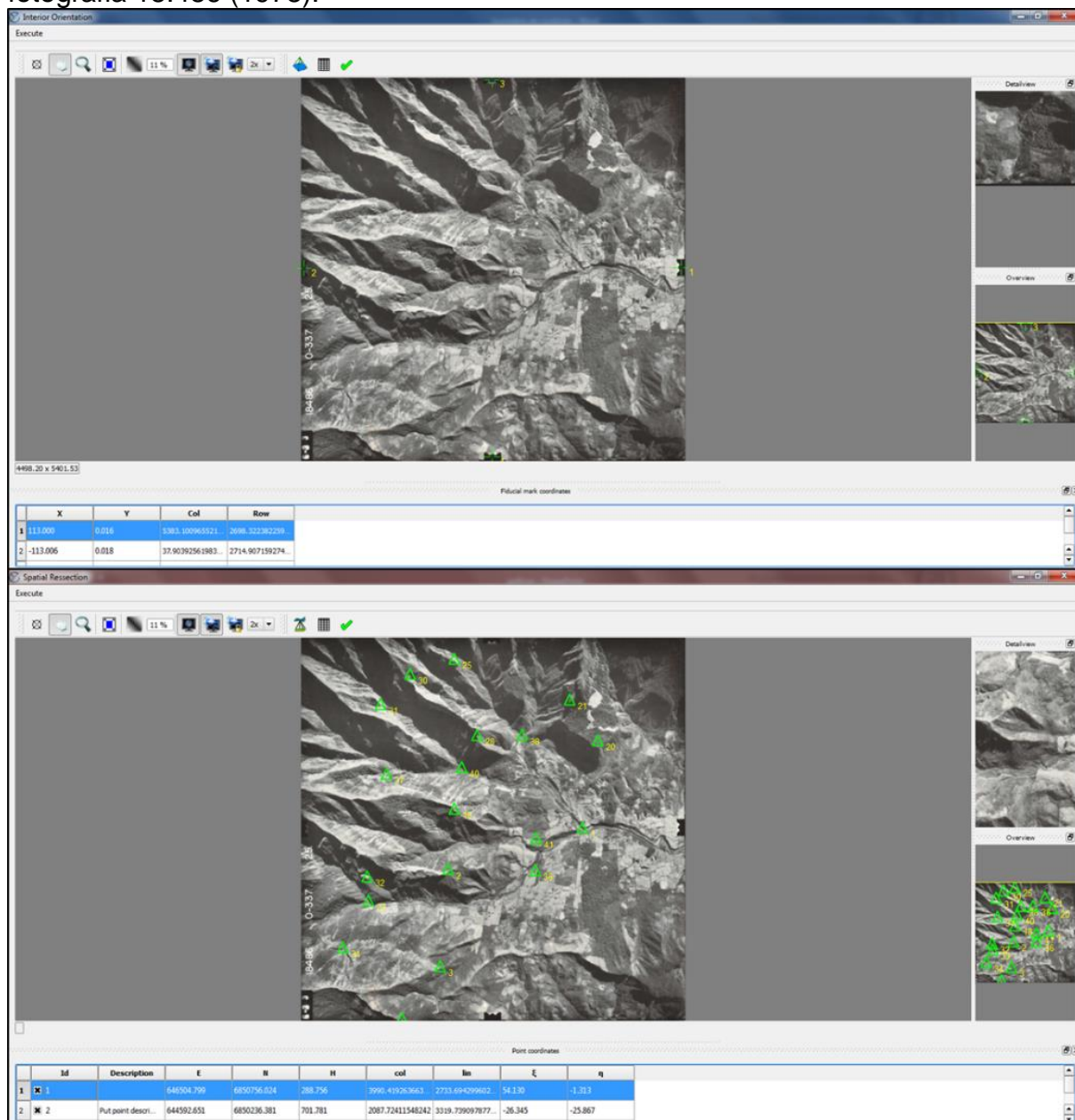
Point Id	Type	E	N	H
1	control	646504.799	6850756.024	288.756
2	control	644592.651	6850236.381	701.781
3	control	644476.737	6848979.608	695.493
4	control	642408.132	6849107.435	861.492
5	control	642105.669	6848366.909	1394.517

Os estudos de Wang e Ellis (2005) comparam ortorretificação de fotografias aéreas obtidas durante a Segunda Guerra Mundial em território chinês.



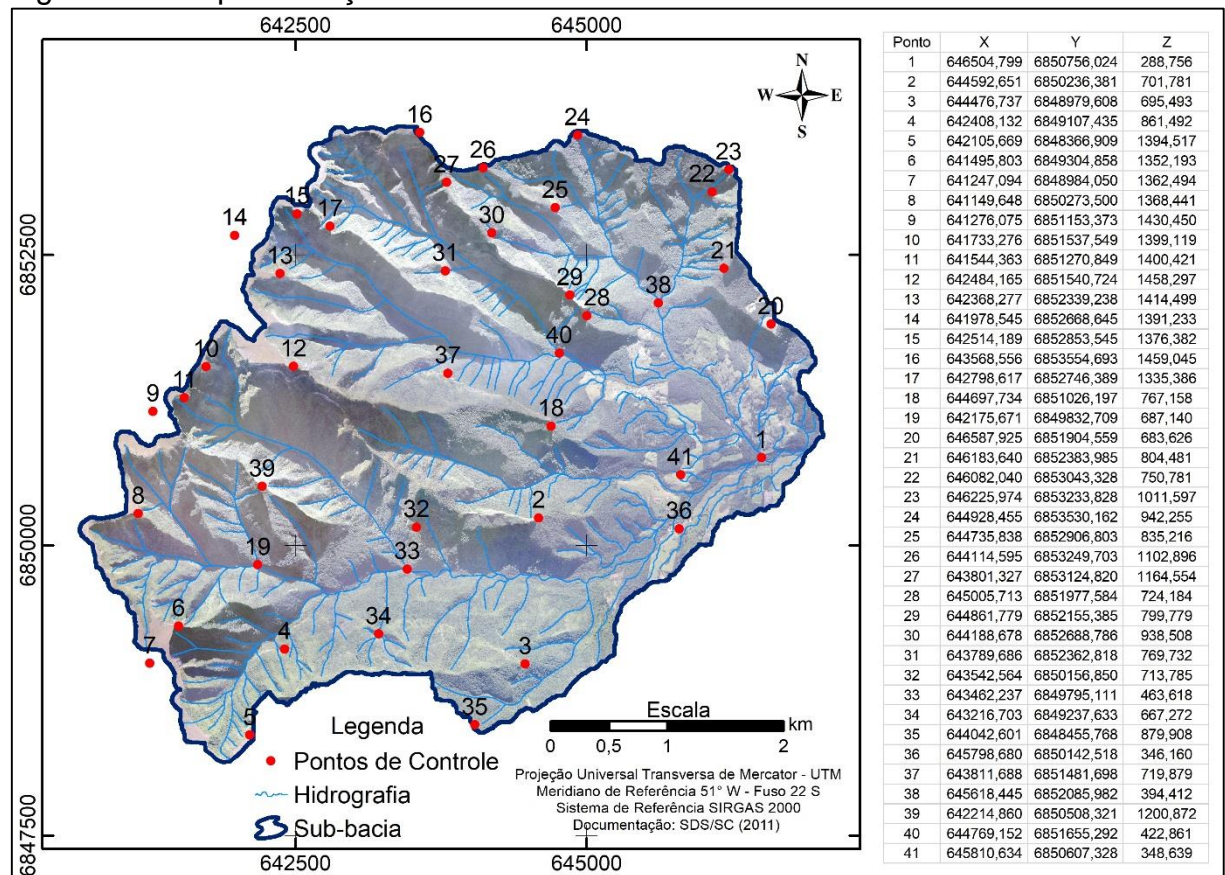
Foi demonstrado que na Província de Gaoyi, de terreno predominantemente plano, o aumento do número de pontos de controle, de 7 para 25, praticamente não teve efeito na precisão, sendo o RMSE máximo 50% menor do que em Dianbai, uma região de relevo acidentado. Isso indica que, para áreas mais planas, menos pontos de controle são necessários para dirimir maior RMSE, se comparado com paisagens montanhosas. Assim, conforme Wang e Ellis (2005) e Gobbi *et al.* (2018), 15 a 20 pontos de controle são necessários para obter-se precisão em regiões montanhosas.

Figura 27 – Procedimento de orientação interior (acima) e exterior (abaixo) da fotografia 18.486 (1978).



Para atingir o recomendado pelos autores supracitados, nesta pesquisa foram definidos 41 pontos de controle, Figura 28 e, salvo alguns PC alocados em pontes, capela e edificações particulares, a grande soma foi posicionada sobre feições geomorfológicas salientes, ex. cruzamento de rios com controle estrutural, dada a paisagem natural da área, ou seja, únicas referências para colimação entre a foto antiga e a base recente. As informações dos PC foram bem distribuídas pela imagem, em locais de variadas cotas, para que esta disposição fornecesse medida de qualidade para os procedimentos que encaminhassem à ortorretificação, mesmo enfrentando-se as dificuldades elencadas por Gobbi *et al.* (2018).

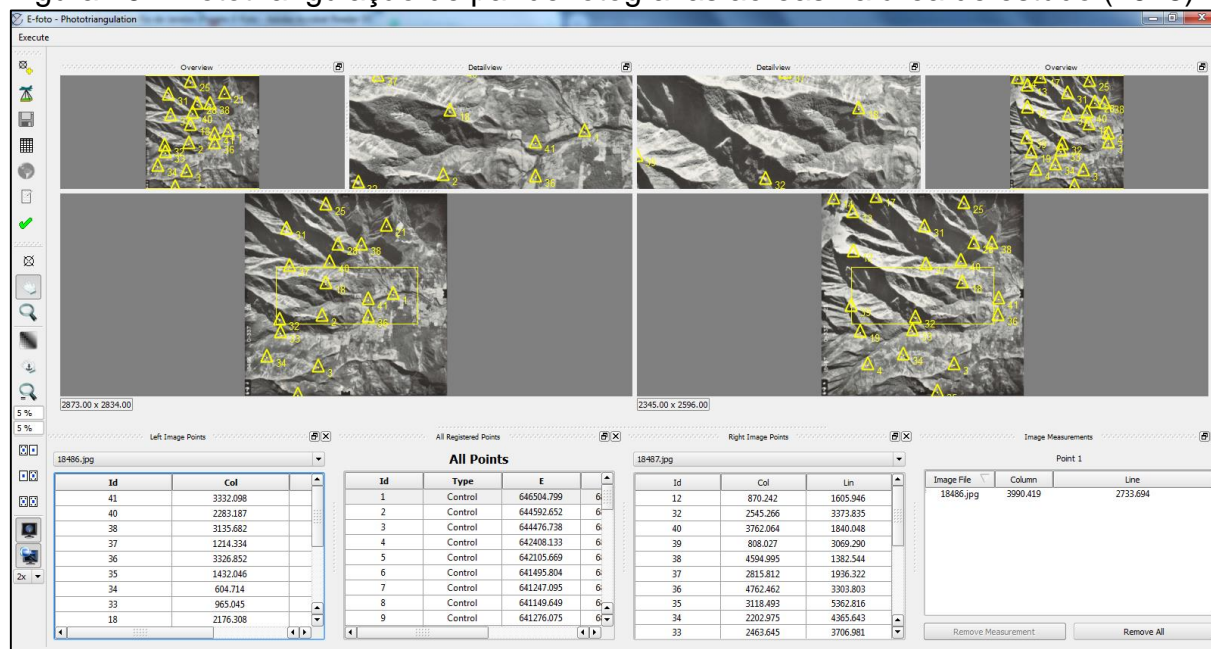
Figura 28 – Espacialização e tabela de coordenadas dos PC.



Em seguida, procedeu-se com a fototriangulação, para ajustamento das coordenadas dos centros de perspectiva e dos ângulos de altitude do sensor, no momento da aquisição de cada uma das imagens que compõem um bloco fotogramétrico, almejando-se a obtenção de coordenadas tridimensionais no espaço-objeto (terreno), a partir do espaço-imagem. Exemplo segue apresentado na

Figura 29, em que as fotografias 18.486 e 18.487, de 1978, apresentaram os PC, incidentes simultaneamente em ambas, ajustados para linhas e colunas (*pixels*).

Figura 29 – Fototriangulação de par de fotografias aéreas na área de estudo (1978).



Os resultados obtidos ficaram um pouco acima do que preconiza o estado da arte, entretanto, considerou-se excelente no âmbito desta área de estudo. Isto porque, para 1978, o RMSE foi de apenas 13,89 m, relativamente aceitável, dado o desafio para se montar um projeto fotogramétrico nestas condições de relevo. Para o conjunto de fotografias aéreas de 1957 o RMSE obtido foi de 17,13 m, também aceitável, adicionando-se o fato de serem imagens obtidas há mais de 60 anos.

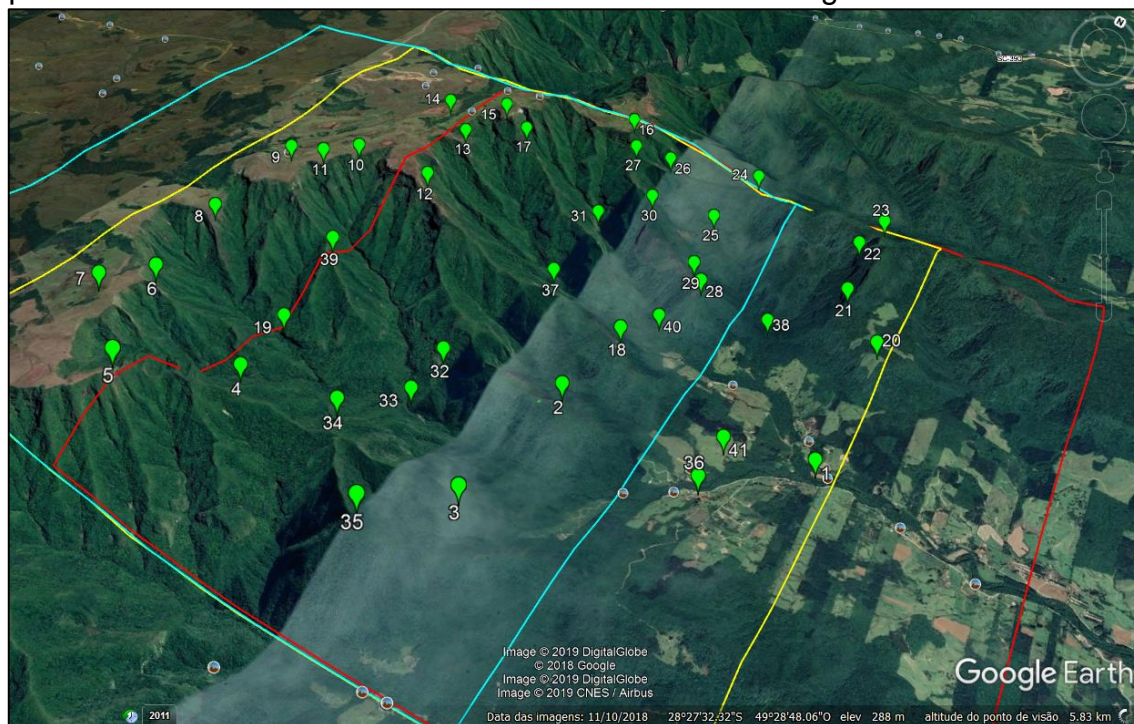
A título de comparação adicional, na região montanhosa do vulcão Etna, com área de 25 km<sup>2</sup>, amplitudes altimétricas de até 1492 m e média de declividade de 13,5 graus, os autores Rocchini e Di Rita (2005) ortorretificaram fotografias aéreas antigas, calculando-se o RMSE, passo-a-passo, com eliminação de desvios acentuados, obtendo RMSE próximo à 10 m para área montanhosa. Enquanto isso, o georreferenciamento ofertou erros de até 60 m.

Após concluída a fototriangulação, de cada bloco para cada intervalo temporal, foi gerado o arquivo (.kml) da composição fototriangulada, para visualizar o procedimento realizado no E-Foto. Na Figura 30 é possível verificar que o bloco de fotos de 1978, com respectivos perímetros da projeção ortogonal de cada imagem, bem como, os PC que, também forneceram o componente altimétrico. O relatório



completo das fototriangulações para 1957 e 1978, executados para esta pesquisa com a EFD, seguem apresentados, respectivamente, nos Apêndices A e B.

Figura 30 – Espacialização dos contornos das fotografias fototrianguladas e os pontos de controle do bloco de 1978 sobre *raster* do GoogleEarth®.

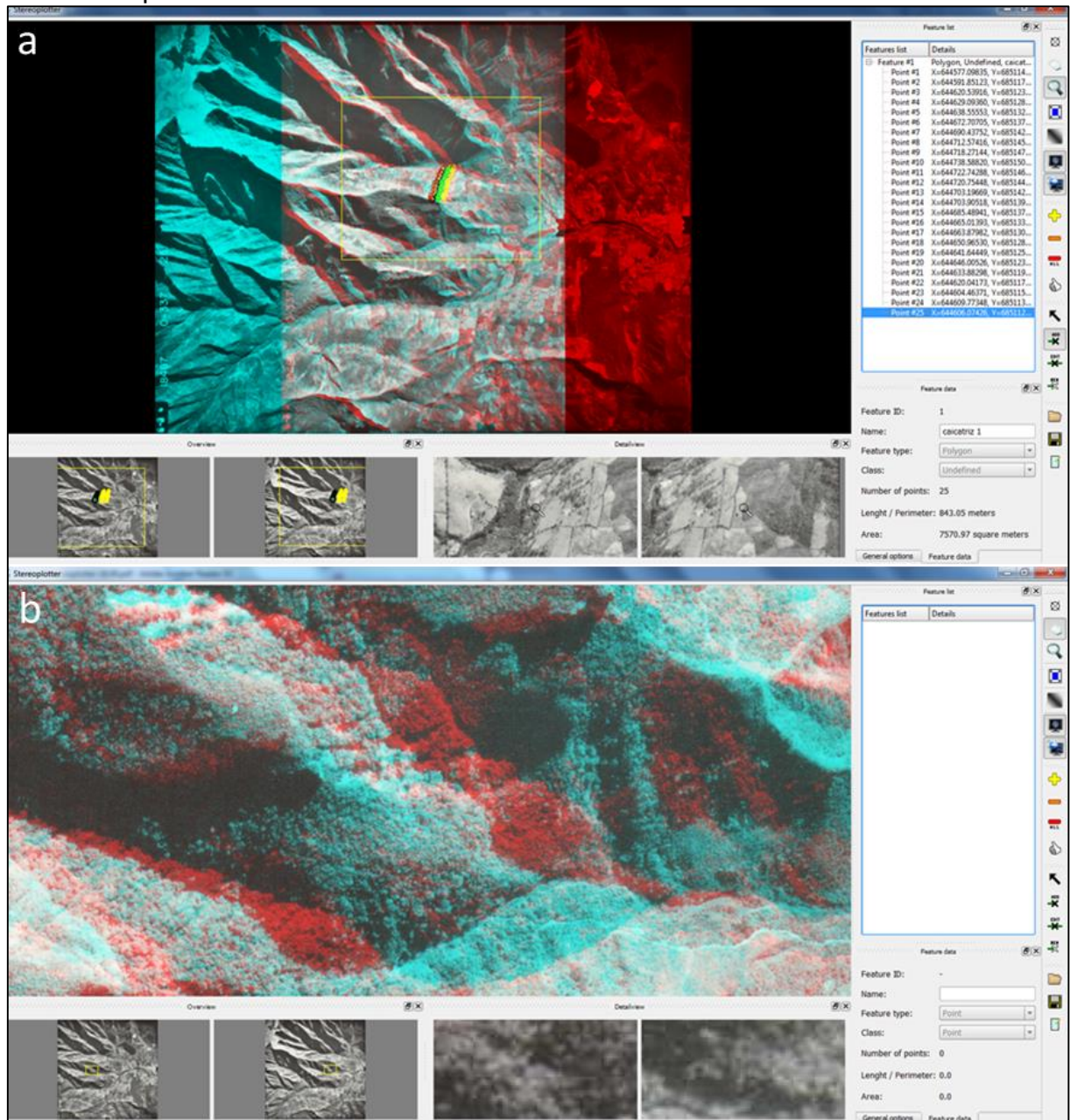


Uma vez efetuada a fototriangulação, com os valores de parâmetros de orientação interior e exterior calculados e salvos, foi possível proceder com a restituição fotogramétrica tridimensional da área de estudo, utilizando-se do Módulo *Estereoplotter*, da EFD E-Foto. Esta operação resultou na representação de modelo estereoscópico das feições dos objetos naturais e/ou artificiais da superfície do terreno. Cada par de imagens de um bloco (trio), para cada intervalo temporal (1957 e 1978), foi tratado de modo a gerar um anaglifo (Figura 31-a), oportunizando a visão estereoscópica através de um par de óculos anaglifo (passivo, vermelho e ciano).

Para restituição das cicatrizes de escorregamentos, as imagens foram representadas em diferentes bandas de cores, ciano e o verde numa das imagens e o vermelho noutra, dependendo do interesse de se ver o relevo natural, ou invertido. A faixa central de sobreposição das fotografias tratadas ofertou a visão estereoscópica (Figura 31-b), na qual, foram restituídas as geometrias das cicatrizes

de movimentos de massa, editando-se polígonos no formato *.shp*, com o uso do mencionado óculos anaglifo (Figura 32).

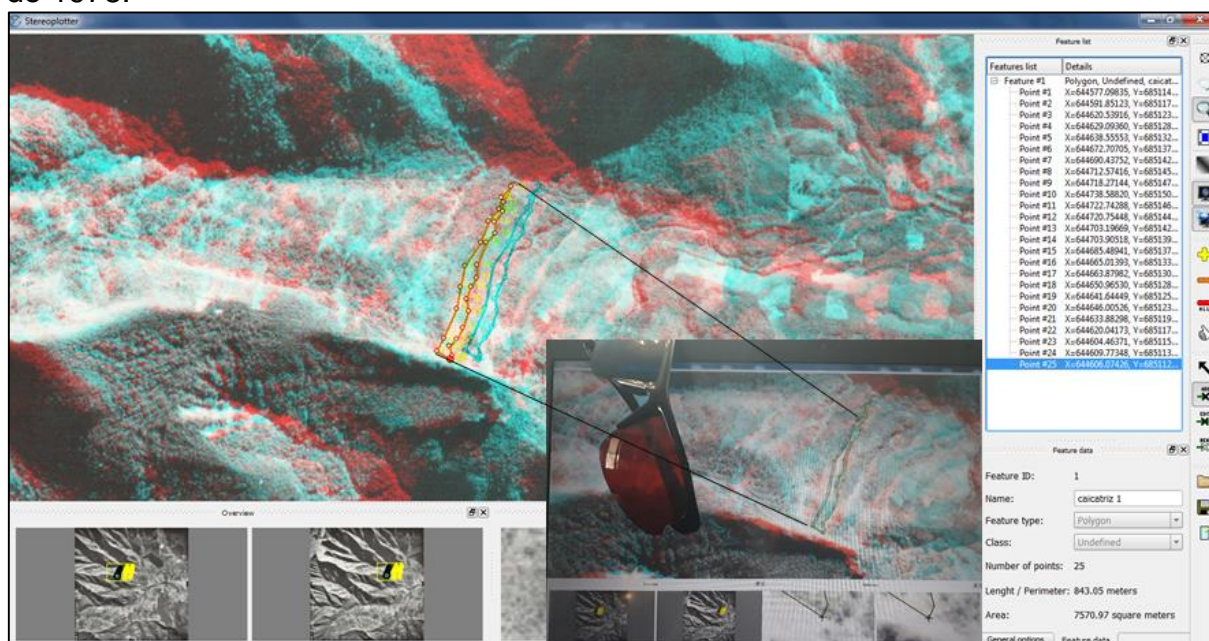
Figura 31 – Anaglifo elaborado para interpretação das cicatrizes em visão estereoscópica.



Estes três módulos iniciais do E-Foto permitiram posicionar adequadamente o espaço-imagem em relação ao espaço-objeto, além de representar a superfície do terreno num modelo estereoscópico. Contudo, foram aplicados os módulos subsequentes desta EFD, com o objetivo gerar uma ortofoto, ou ortoimagem.



Figura 32 – Detalhe da digitalização em tela, de polígono de cicatriz sobre anaglifo de 1978.

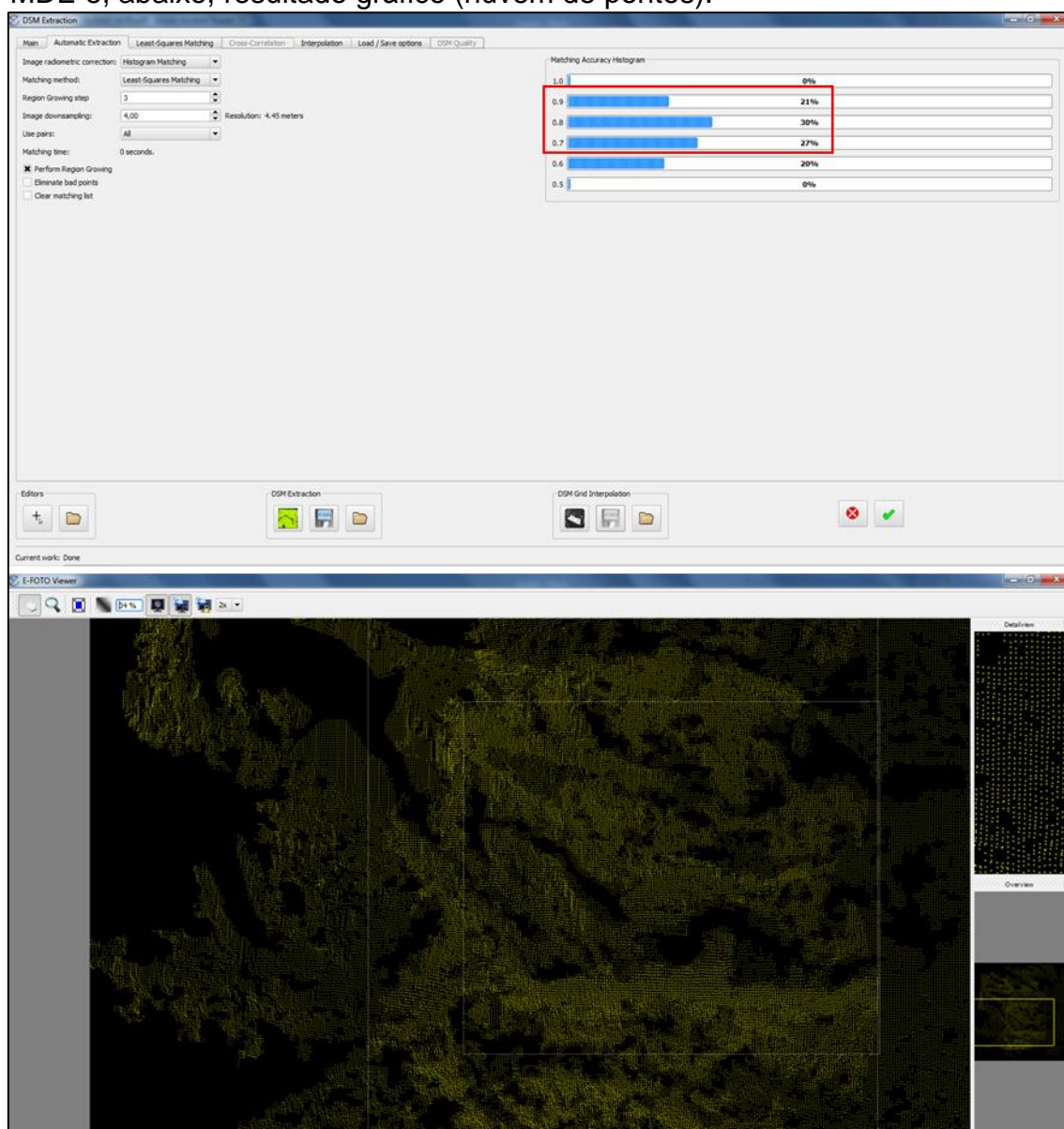


Com base no modelo digital de elevação, no âmbito do E-Foto designado modelo da superfície do terreno, a ortofoto foi importante como base matricial para elaboração de leiautes finais para os produtos cartográficos deste trabalho. Além disso, a ortofoto formada a partir dos blocos de fotografias de 1957, e outra ortofoto para a data de 1978, propiciou adicioná-la em *software* de geoprocessamento, como uma camada componente do SIG estruturado nesta pesquisa, permitindo, inclusive, pareamento espacial com outras informações temáticas e refinamento de mapas base de fatores predisponentes aos escorregamentos.

Como mencionado, para gerar uma ortofoto em cada data investigada, precedeu-se da elaboração de um Modelo Digital de Elevação (MDE) pretérito. De início, o módulo de extração disponibilizado pelo E-Foto, identificou, automaticamente, pontos homólogos e suas coordenadas para cada par estereoscópico, sendo 3 fotografias para cada data, ou seja, 2 pares por intervalo temporal. Em seguida, foi realizada uma interpolação desses pontos e se obteve uma grade regular, após algumas correções, a exemplo: da eliminação manual de pontos ruins; redução da resolução geométrica (para otimizar o processamento); correção dos níveis de cinza; escolha do método para realizar a medição dos pares de pontos homólogos; delimitação da região de busca e iteração da informação em cada *pixel*, dentre outros procedimentos.

Finalizada a extração do MDE, foi verificado a acurácia da extração automática, através de um histograma de correlações (Figura 33), com a máxima de que mais próximo do valor 1 (quadro em vermelho), melhor a qualidade do produto.

Figura 33 – Detalhe Análise do histograma de acurácia da extração automática do MDE e, abaixo, resultado gráfico (nuvem de pontos).



Com a maioria dos casos resultando entre 0,7 e 0,8, uma forte correlação, pôde-se aceitar o histograma gerado e projetar a nuvem de pontos resultante da extração. Como visualizado pela nuvem de pontos da Figura 33, alguns locais apresentaram “buracos” na colimação de pontos homólogos, sendo estas zonas em preto regiões da área de estudo em que não se obteve correlação entre as fotografias aéreas. Além das áreas sem correlação, Gobbi *et al.* (2018) mencionam

que um problema surge em áreas com grandes declives, uma vez que nestes locais o MDT atua como uma função descontínua e o algoritmo não é capaz de ajustar precisamente a fotografia ao modelo do terreno, causando deformação imagem retificada, como se fosse um estiramento.

Para sanar a existência de áreas sem pares homólogos na nuvem de pontos, além daquelas com estiramento, foram lançadas novas sementes (*seeds*), através do menu de edição para esta correção, em que, manualmente, procedeu-se com identificação em tela e apontamento de pontos homólogos em fotografias distintas, nos locais em que o algoritmo de extração automática não conseguiu atuar, Figura 34. Ao total, foram adicionadas 252 sementes no bloco de fotografias de 1957 e 156 sementes no bloco de 1978, buscando preencher estas deficiências.

Tomando como exemplo a Figura 34, as hachuras em vermelho representaram as zonas homólogas identificadas pela EFD, contudo, efetuando-se a aproximação de cada imagem foi possível verificar as falhas e inserir-se as cruzetas em amarelo (sementes), a exemplo da referida figura, em que a base de uma cicatriz de escorregamento (ponto 88) serviu de ponto homólogo entre as fotos. Finalizada esta etapa de adição manual das sementes, novamente foi carregada a nuvem de pontos resultantes da extração do MDE.

Pareando a nuvem de pontos pré e pós adição das sementes foi possível verificar o preenchimento de pontos homólogos em algumas áreas, antes descobertas, a exemplo dos círculos adicionados na Figura 35. Esta atividade de adicionar manualmente sementes em áreas de “sombra” na nuvem de pontos, para assessorar a EFD, se demonstrou uma das mais trabalhosas, no desenvolvimento de todo este trabalho.



Figura 34 – Detalhe da janela de edição de sementes (*seeds editor*) para fotografias de 1978.

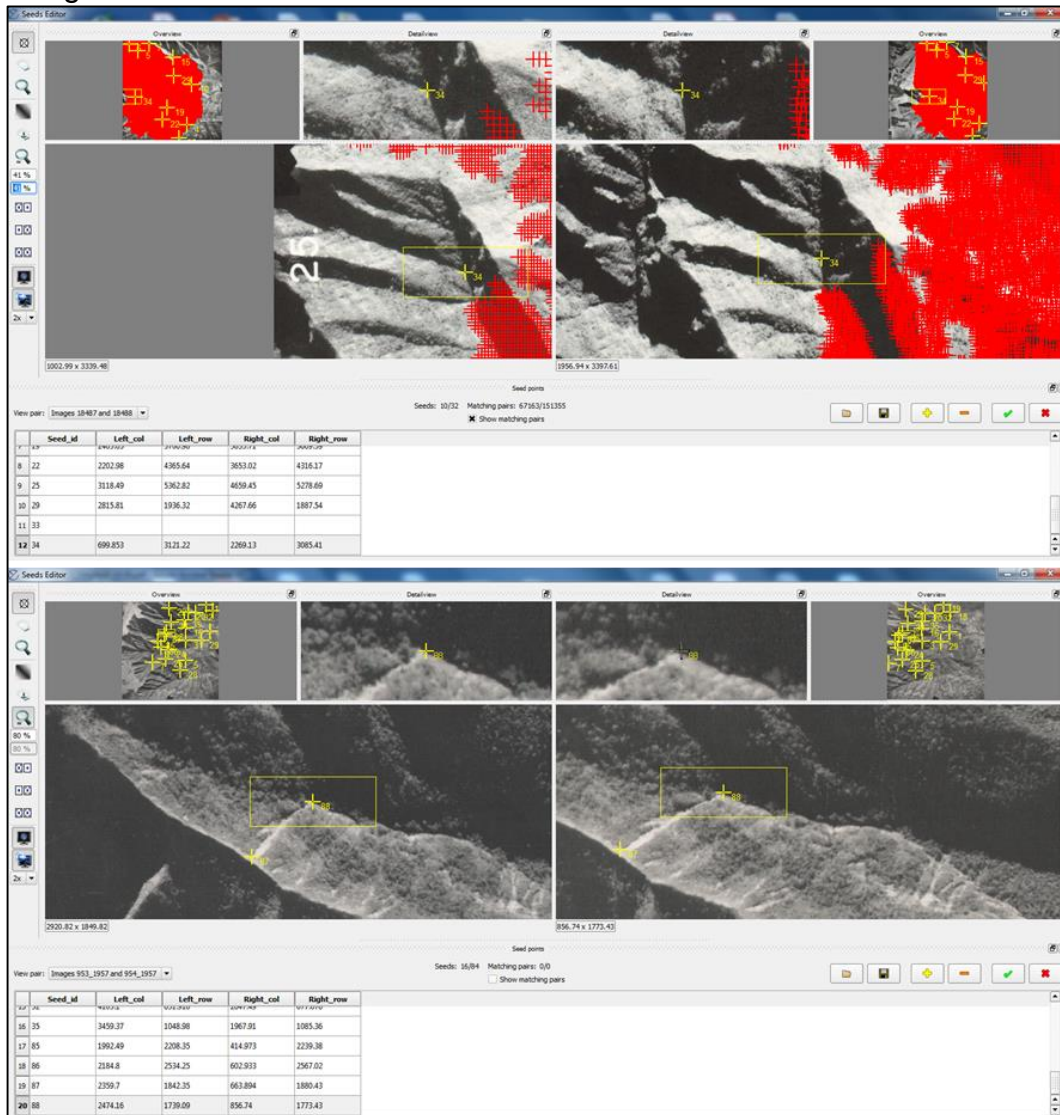
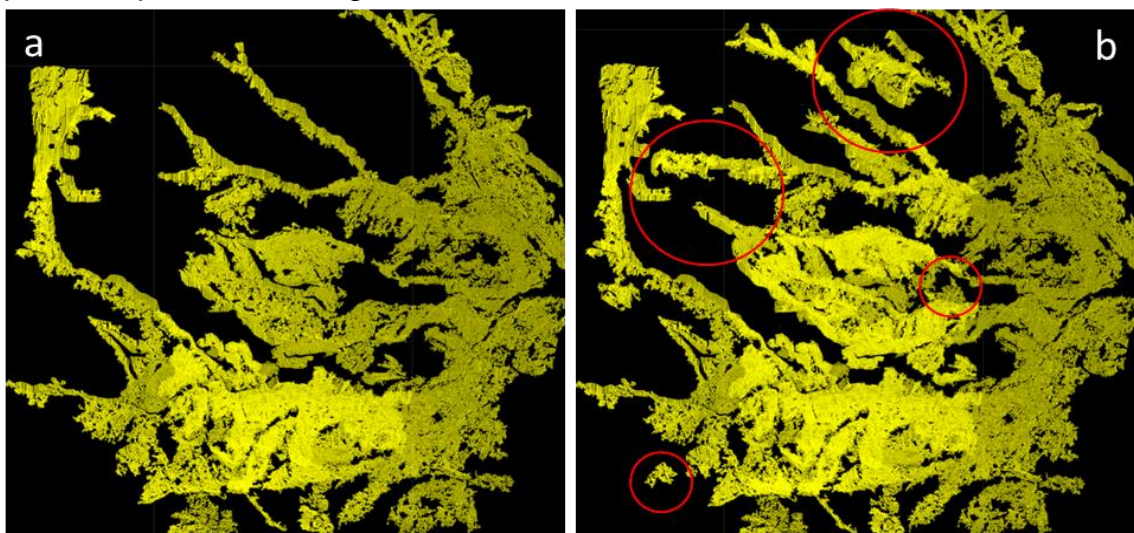
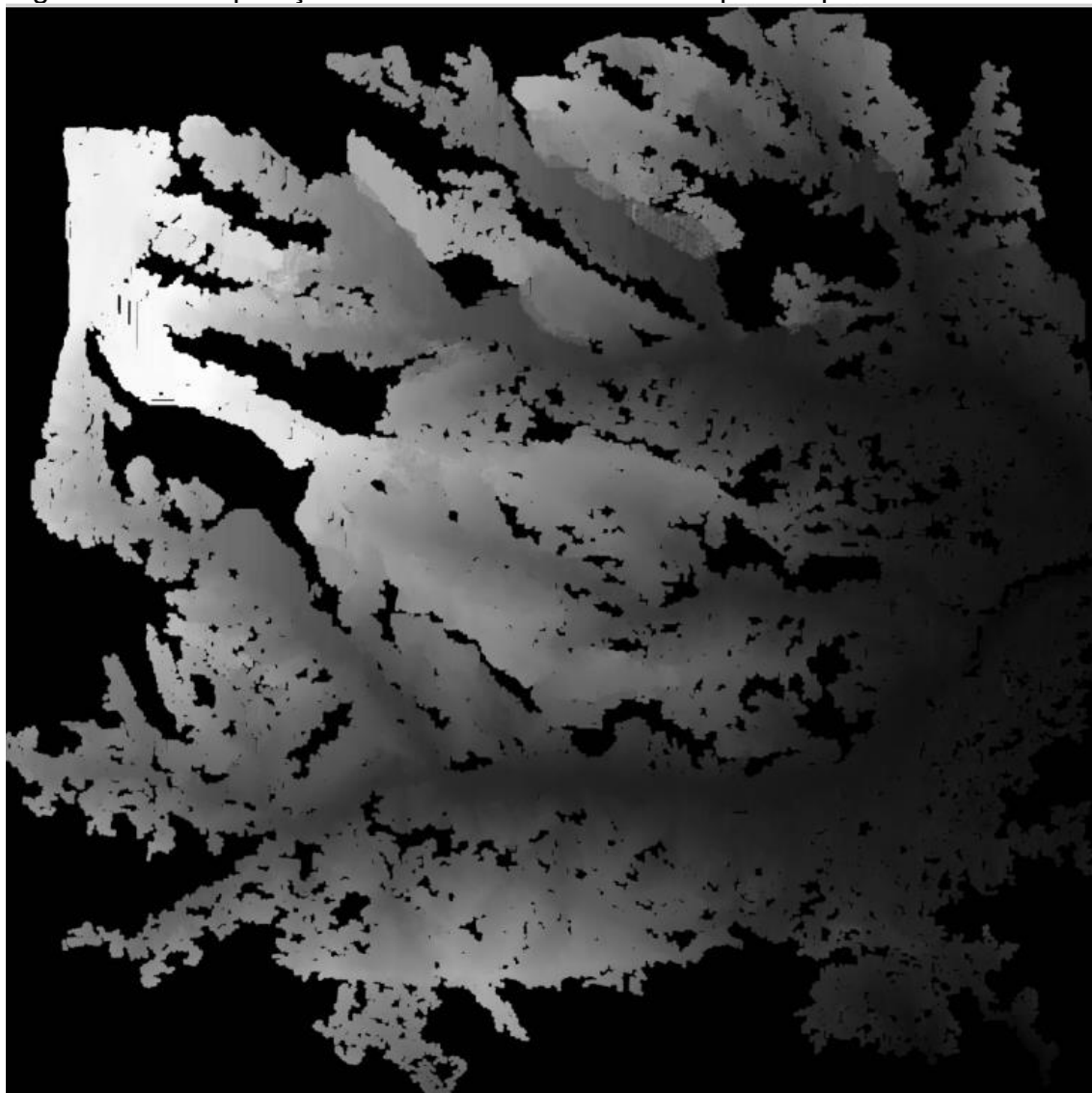


Figura 35 – Nuvem de pontos pré (a) e pós (b) adição manual de sementes de pares de pontos homólogos.



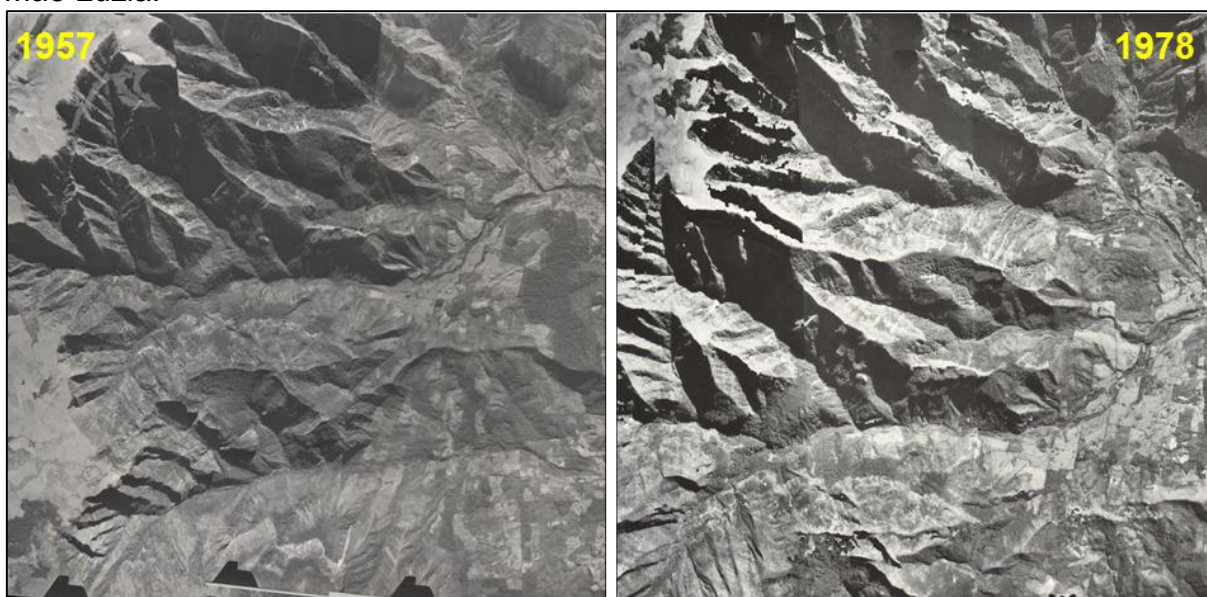
Uma vez terminada a etapa de adição de sementes, ciente de que os ‘buracos’ remanescentes são impossíveis de serem solucionados, uma vez que constituem áreas de sombra nas fotografias antigas, procedeu-se com a interpolação dos pontos da nuvem (Figura 36), pelo método das médias móveis e resolução de 1 m para o ‘Grid’. Olsen e Stuedlein (2010) já haviam relatado sobre as zonas de sombra, formadas nas áreas não iluminadas em fundos de vale, em que implicaria em desafios para obtenção de informações. Após a extração do MDE, pôde-se testar a qualidade do mesmo, sendo comparados os valores de altimetria de cada PC com sua respectiva cota no MDE obtido.

Figura 36 – Interpolação realizada com a nuvem de pontos para o ano de 1978.



Por fim, o módulo de ortorretificação prescindiu do arquivo de extração e interpolação do MDE (extensão *.dsm*), executado na etapa anterior. Conforme orientação do tutorial do E-Foto (2019), realizou-se a interpolação da imagem final pelo método '*bicubic*'. Na Figura 37 é apresentada como saída uma ortoimagem (extensão *.geotiff*), que passou pelo processo de ortorretificação, elaborada para 1957 e outra para 1978, na área de estudo, constituindo a fase final de uso da EFD.

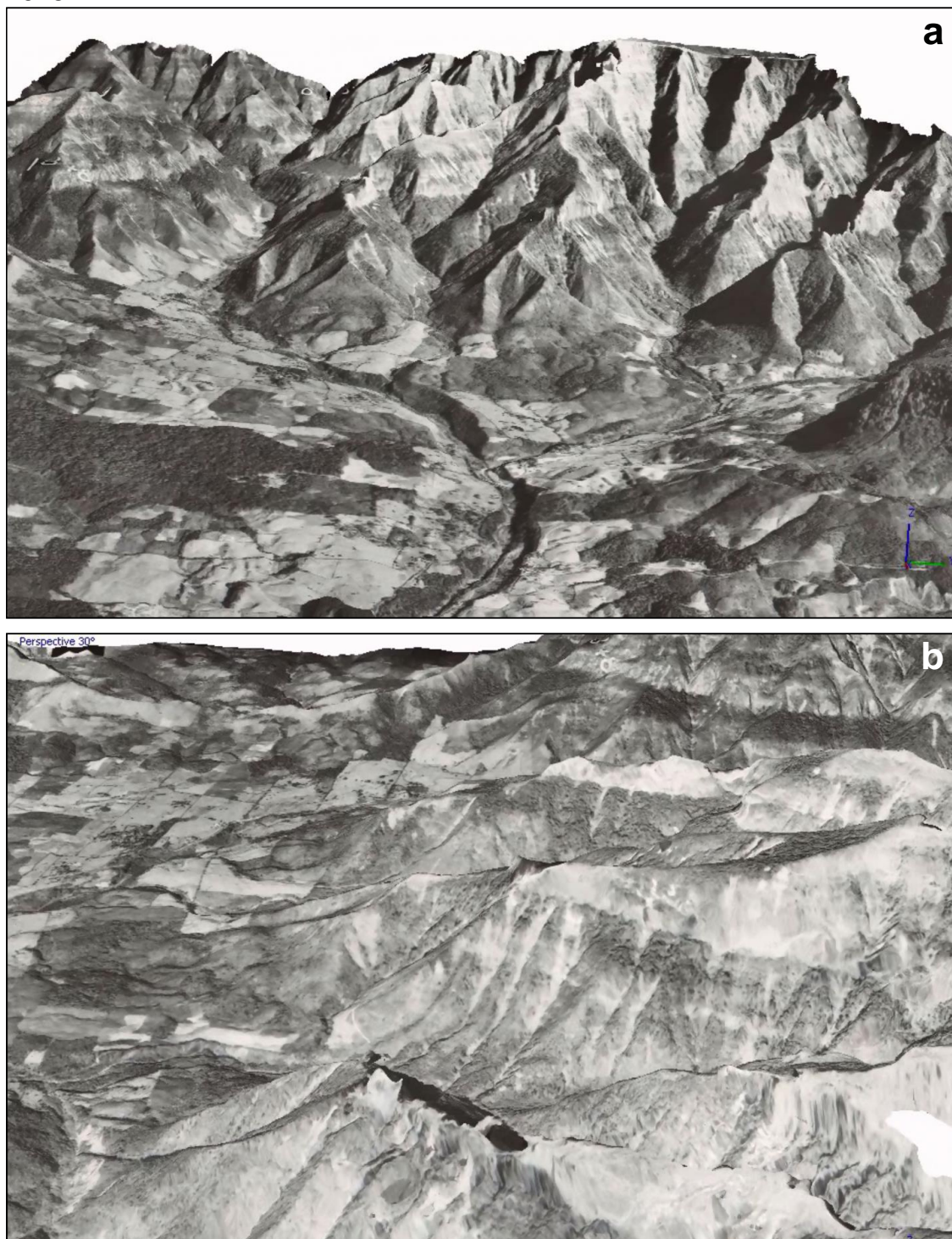
Figura 37 –Resultado da ortorretificação, na EFD E-Foto, para as cabeceiras do rio Mãe Luzia.



Já na Figura 38, projetou-se tridimensionalmente esta ortoimagem, sem exagero vertical, possibilitando ricas informações acerca do relevo e das cicatrizes de escorregamento, sendo este exemplo apresentado para o bloco de imagens de 1978. Na Figura 38-a vê-se a área de estudo a partir da confluência dos rios Mãe Luzia e Congonhas, e na Figura 38-b são vistas as vertentes voltadas para nordeste, com vários registros de escorregamentos.



Figura 38 – Projeção tridimensional após ortorretificação de fotografias aéreas de 1978.



### 5.2.2 Inventário de Cicatrizes

O inventário de cicatrizes de escorregamentos foi baseado em contexto temporal pretérito, de 1957 e de 1978, cujas fotografias aéreas, suas escalas, fontes e base cartográfica para ortorretificação já foram detalhadas. Todo o esforço em se

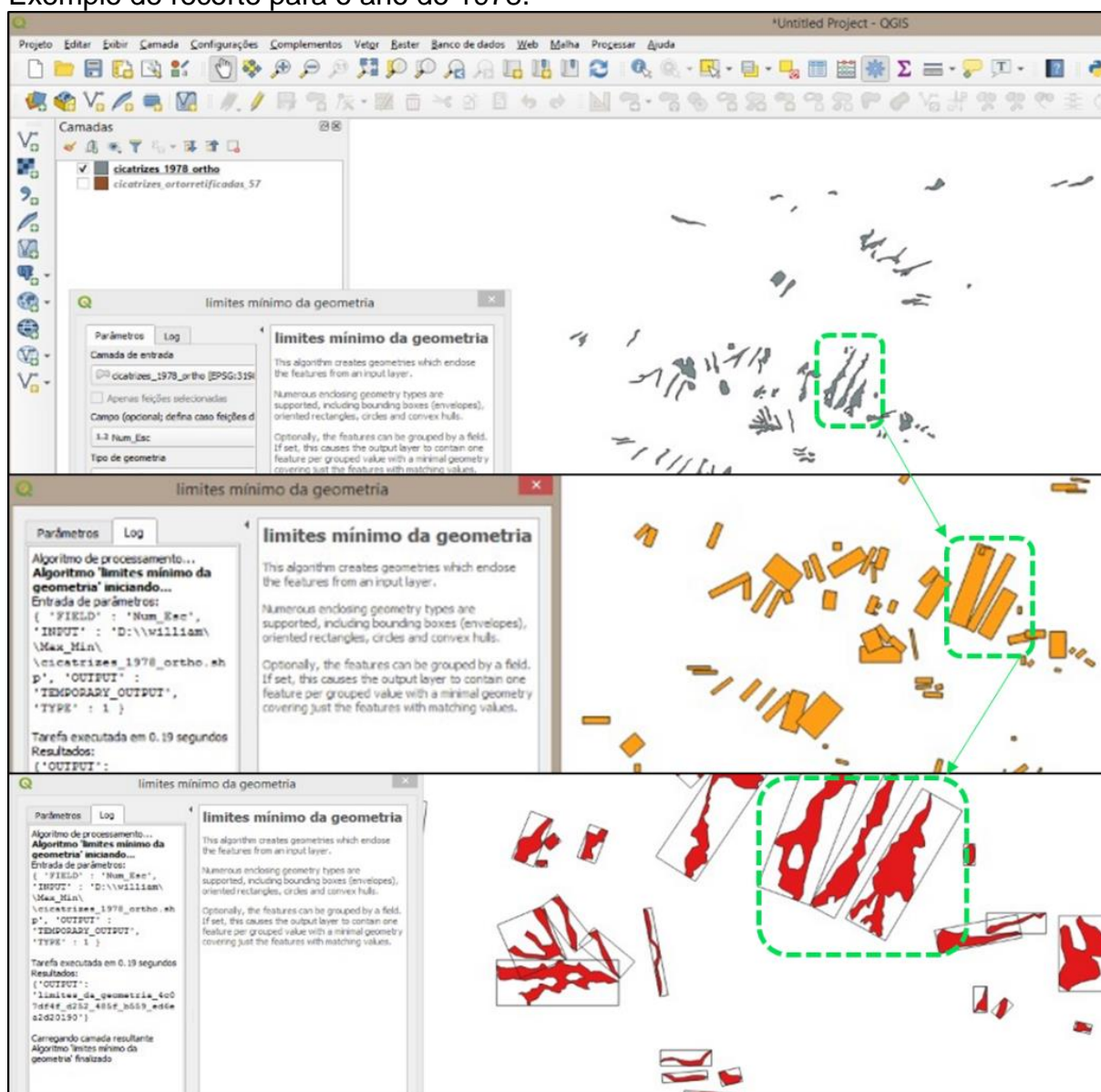
proceder em operacionalizar a EFD para a ortorretificação dos blocos de fotografias aéreas de 1957 e 1978, que recobrissem a área de estudo, justificou-se pela necessidade de aumentar a acurácia posicional das cicatrizes.

Adicionalmente, na literatura consultada, Zhu *et al.* (2008) e Niethammer *et al.* (2012), já alertavam que locais com maiores amplitudes altimétricas apresentam enorme desafio em se obter georreferenciamento de alta qualidade, que o caminho deveria ser pela ortorretificação, desde que esta fosse factível. Na área de estudo, pela ortorretificação houve correção ortométrica, notadamente no fundo dos vales, verificou-se que a edição de cicatrizes de escorregamentos sobre a ortoimagem apresentou a devida correção de rotação, translação e altimetria, um posicionamento espacial melhor acurado, ponderado pelos 41 PC. Desta forma, com as garantias de se extrair informações da ortoimagem, pôde-se executar o inventário de cicatrizes.

Foi pelo inventário de cicatrizes que se pôde estabelecer correlações entre fatores deflagradores e/ou predisponentes dos escorregamentos, com a distribuição de cicatrizes antigas. Ao se estabelecer estas relações de frequências de escorregamentos por classes temáticas de cada fator, assumiu-se que o passado é a chave para que se compreenda os escorregamentos futuros. O inventário permitiu a aplicação de técnica estatística, de se efetuar a relação da abrangência de escorregamentos do passado (1957 e 1978) sobre cada fator, ou nível de informação inicial. Em outras palavras, as classes temáticas dos fatores, que serão trabalhadas em cada metodologia para averiguar a suscetibilidade aos escorregamentos, receberam pesos distintos, que obedeceram à razão entre porcentagem de ocorrência e porcentagem de área movimentada, quanto maior o valor deste quociente, maior o peso atribuído as áreas que apresentaram suscetibilidade aos escorregamentos. Este detalhamento está apresentado subsequentemente.

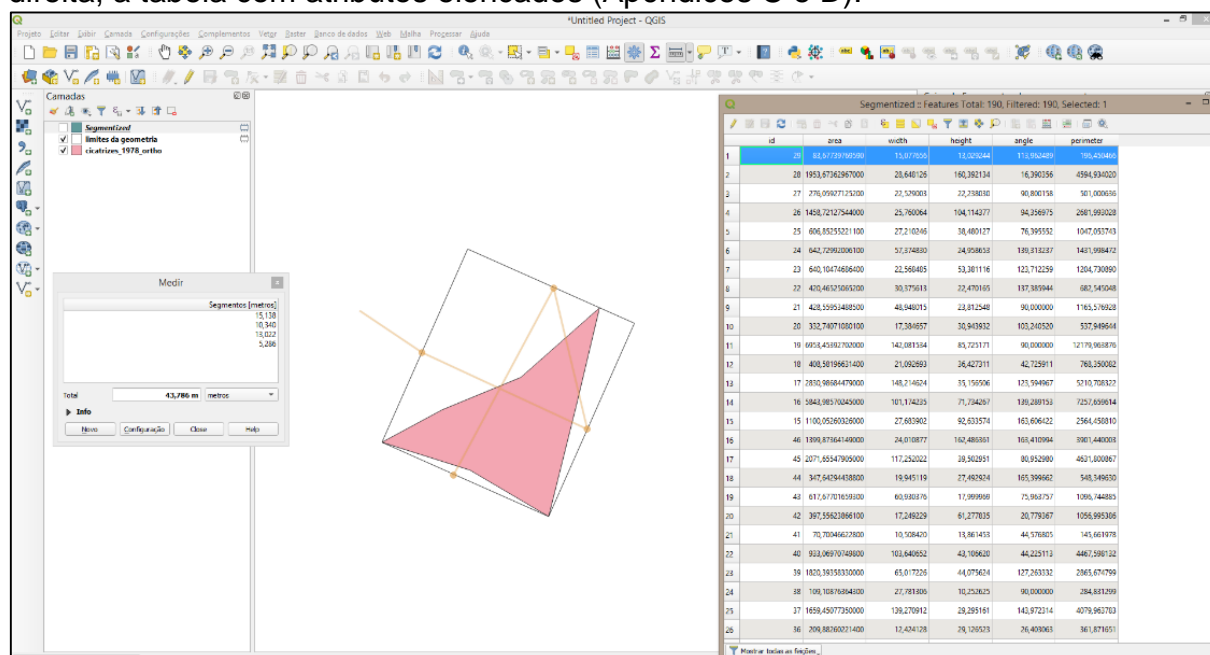
Uma vez editadas as cicatrizes de escorregamentos, com visão estereoscópica ou validadas diretamente na ortoimagem, as feições em formato *.shp*, foram carregadas no *software* livre QGIS®, na qual, pelo algoritmo de limites mínimos de geometria (mínimo retângulo orientado), Figura 39, pôde-se extrair o comprimento e largura de cada cicatriz (em seu eixo maior).

Figura 39 –Etapas para obtenção de geometrias das cicatrizes de escorregamentos. Exemplo de recorte para o ano de 1978.



Já pela Figura 40, vê-se o exemplo de obtenção de geometrias de cada cicatriz, além de quadro com o cômputo de outras geometrias, como a área, perímetro e ângulo de orientação do eixo maior, para cada uma das cicatrizes. Os inventários completos resultaram em 337 cicatrizes restituídas para 1957 e 190 para 1978 (total de 527).

Figura 40 – Detalhes da extração da largura e comprimento de uma cicatriz. À direita, a tabela com atributos elencados (Apêndices C e D).



Através da Figura 41 podem ser visualizadas as cicatrizes de escorregamentos mapeadas nas encostas da sub-bacia em estudo, cuja base matricial é a ortofoto de 1957, onde foram mapeadas 337 cicatrizes, totalizando 27,43 hectares. Da mesma forma, a Figura 42 retrata o inventário executado para o ano de 1978, com 190 cicatrizes mapeadas, totalizando 25,83 hectares da área de estudo. Vale ressaltar que a imagem base de ambas as figuras constitui a respectiva ortoimagem formada por bloco de fotografias aéreas de cada data.

Mesmo antes da realização de uma análise estatística exploratória de dados do inventário, ficou evidente que o registro efetuado para 1978 teve aproximadamente a metade da quantidade de cicatrizes, contudo, área aproximada ao evento registrado em 1957. Além disso, espacializando o centroide de cada polígono identificador das cicatrizes, pôde-se verificar que o registro de 1957 apresenta grande dispersão de cicatrizes pela área de estudo, inclusive em cotas mais elevadas, se comparado ao registro de 1978 (Figura 43).



Figura 41 - Área de estudo e cicatrizes de escorregamentos no ano de 1957.

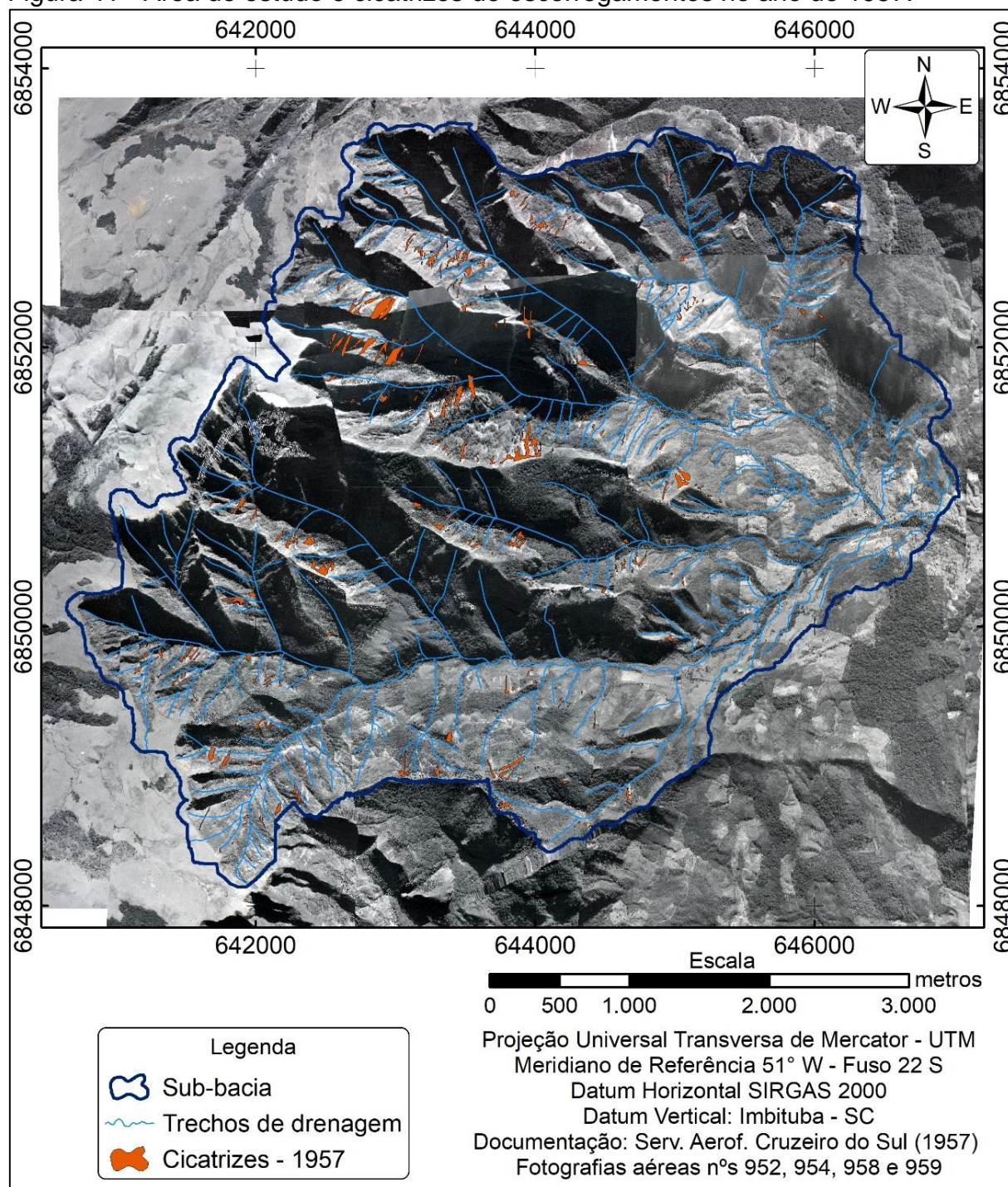
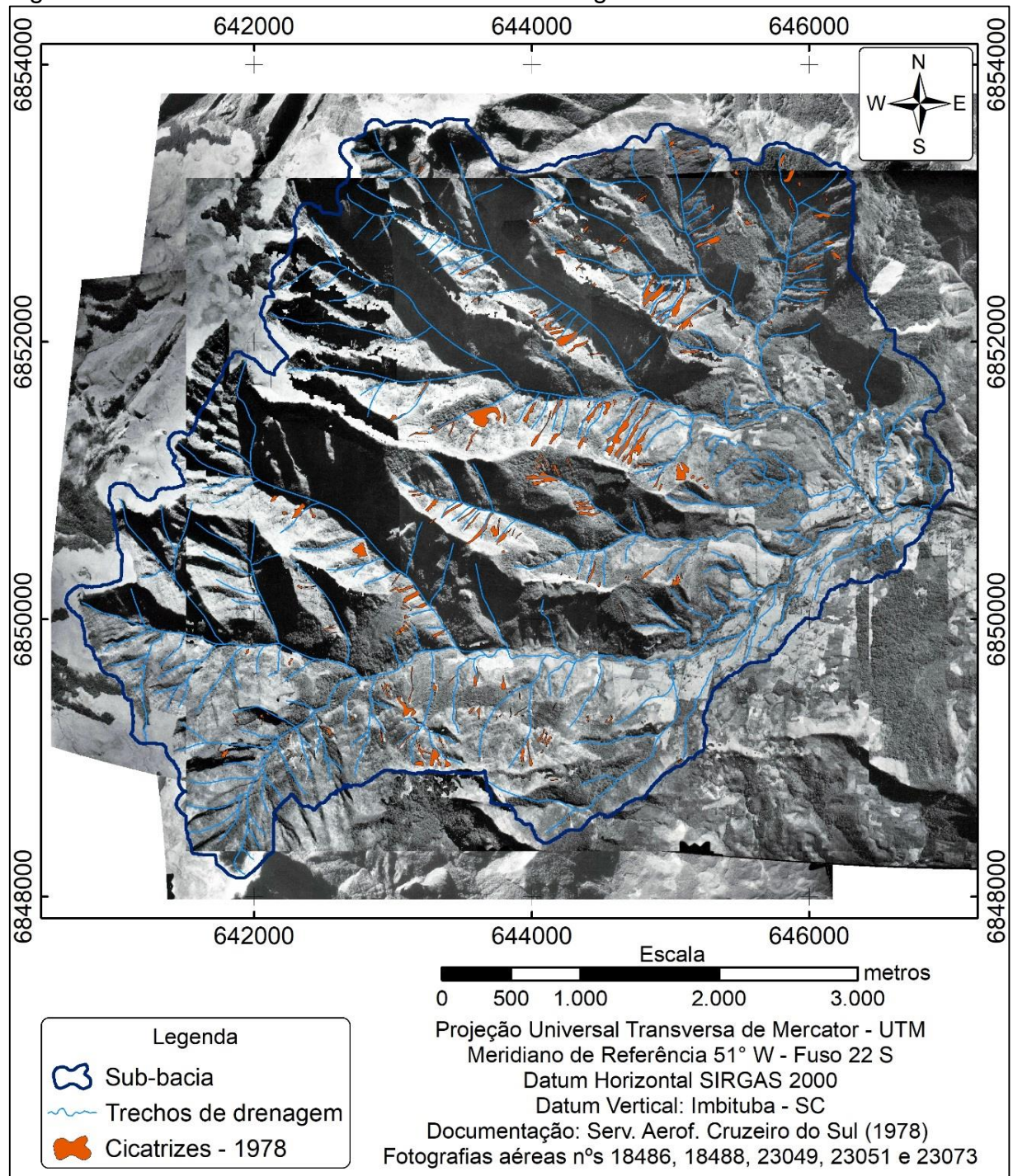




Figura 42 - Área de estudo e cicatrizes de escorregamentos no ano de 1978.

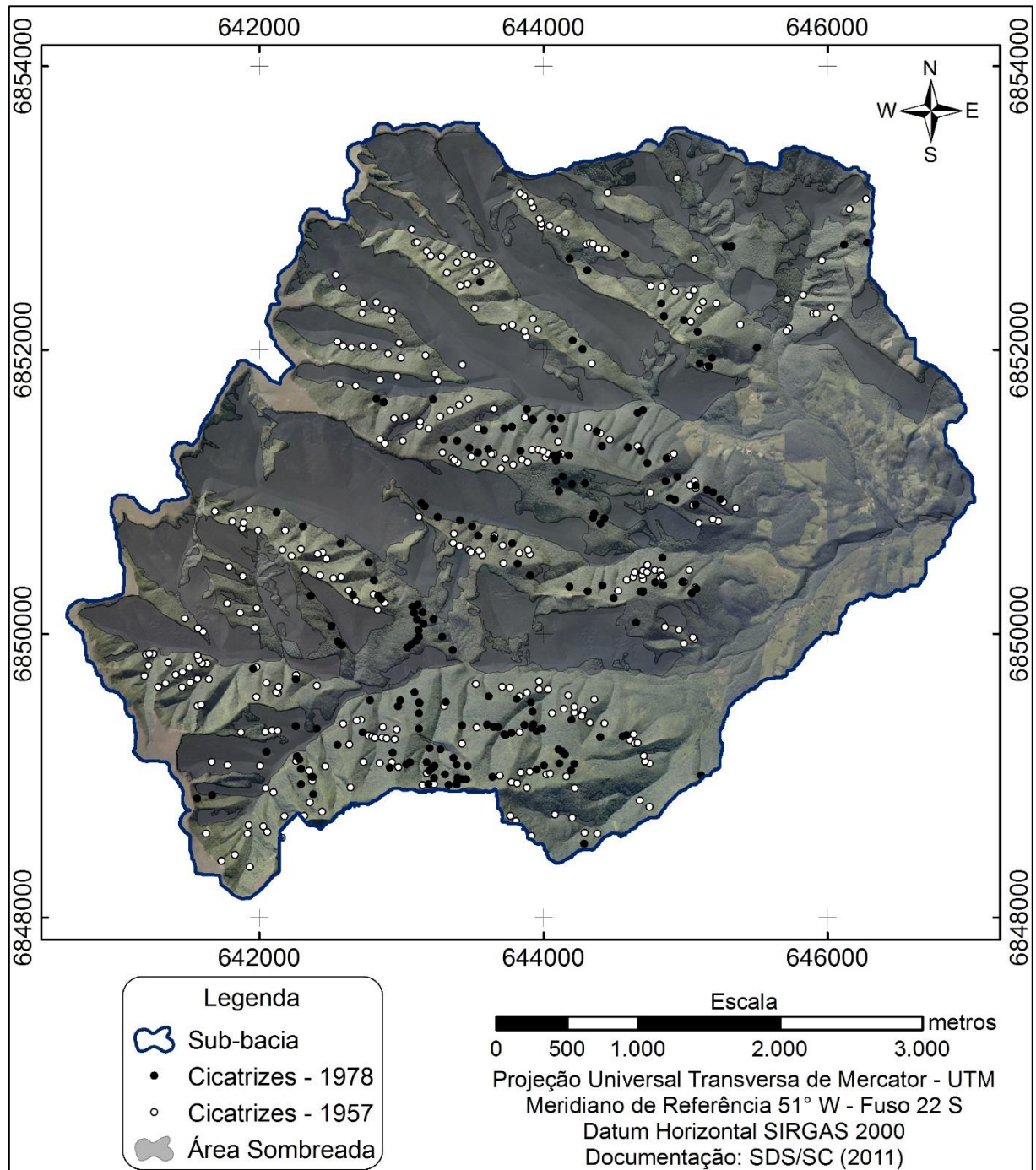


Outra importante informação da Figura 43 é a constatação de que não puderam ser interpretados diversos vales da área de estudo, locais estes que estiveram sempre sombreados, seja pela orto-imagem de 1957, 1978, ou ainda, pela ortoimagem da base cartográfica (2011). Como o percentual de sombra equivale em média a 32,8% da área total, remanescendo 1.504,23 hectares imageados, estimou-se que para 1957, com 27,43 ha de escorregamentos, estes representaram 1,82 %



da área de estudo, enquanto, para 1978, com 25,83 ha, significou 1,72% da área imageada que de fato foi movimentada.

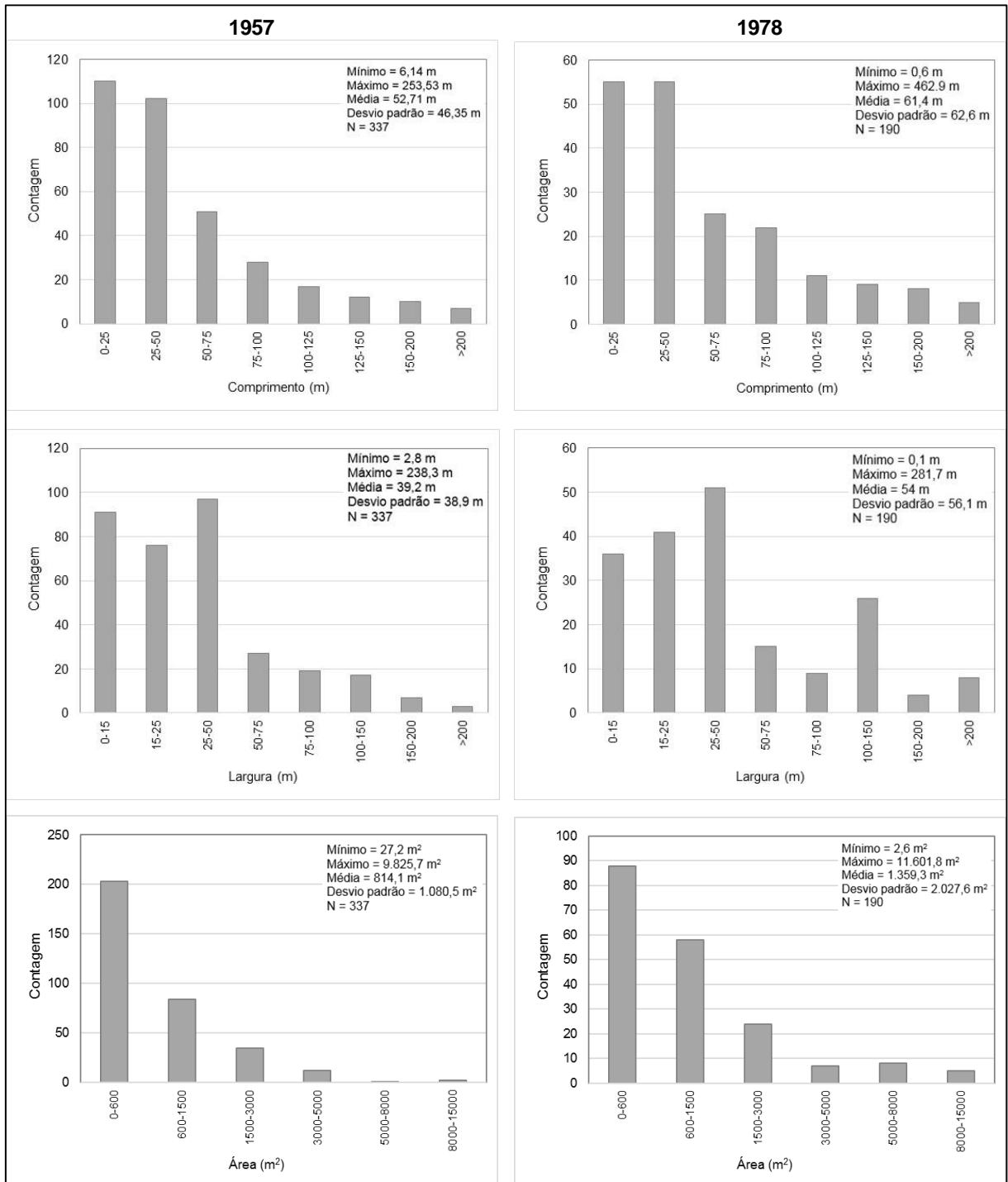
Figura 43 – Dispersão dos centroides de cicatrizes pela área de estudo e fora de locais com sombra.



Em complemento, para visualização dos registros restituídos, fez-se representação gráfica sintética, que comparasse as estatísticas das geometrias das cicatrizes de escorregamentos, pareando as datas inventariadas. Os gráficos

construídos a partir do inventário completo dos eventos de 1957 e 1978, para as geometrias de comprimento, largura e área das cicatrizes, com intervalos sugeridos por Dai e Lee (2002), podem ser visualizados pela Figura 44.

Figura 44 – Histogramas com as características iniciais dos escorregamentos e suas estatísticas descritivas.





De fato, para o ano de 1978 as cicatrizes são maiores, com alguns *outliers* de comprimento e largura, o que resulta em maior área. Com as geometrias dos escorregamentos componentes do inventário de cicatrizes, utilizou-se das áreas para aplicá-las nos modelos idealizados pelos relatados autores enunciados nos procedimentos metodológicos. A Tabela 11 apresenta os autores consultados, número de cicatrizes enumeradas nos respectivos estudos (N), modelo proposto para determinação de volumes (V) a partir das áreas (A).

Como resultado, a coluna à direita da Tabela 11 exprime o volume total (m<sup>3</sup>) das 337 cicatrizes inventariadas, a partir da aplicação de cada modelo individualizado. Na última linha da tabela adiciona-se o modelo médio, obtido a partir da interpolação dos modelos de referência, estimando-se em 581.856,5 m<sup>3</sup> de material que escorregou nas cabeceiras do rio Mãe Luzia.

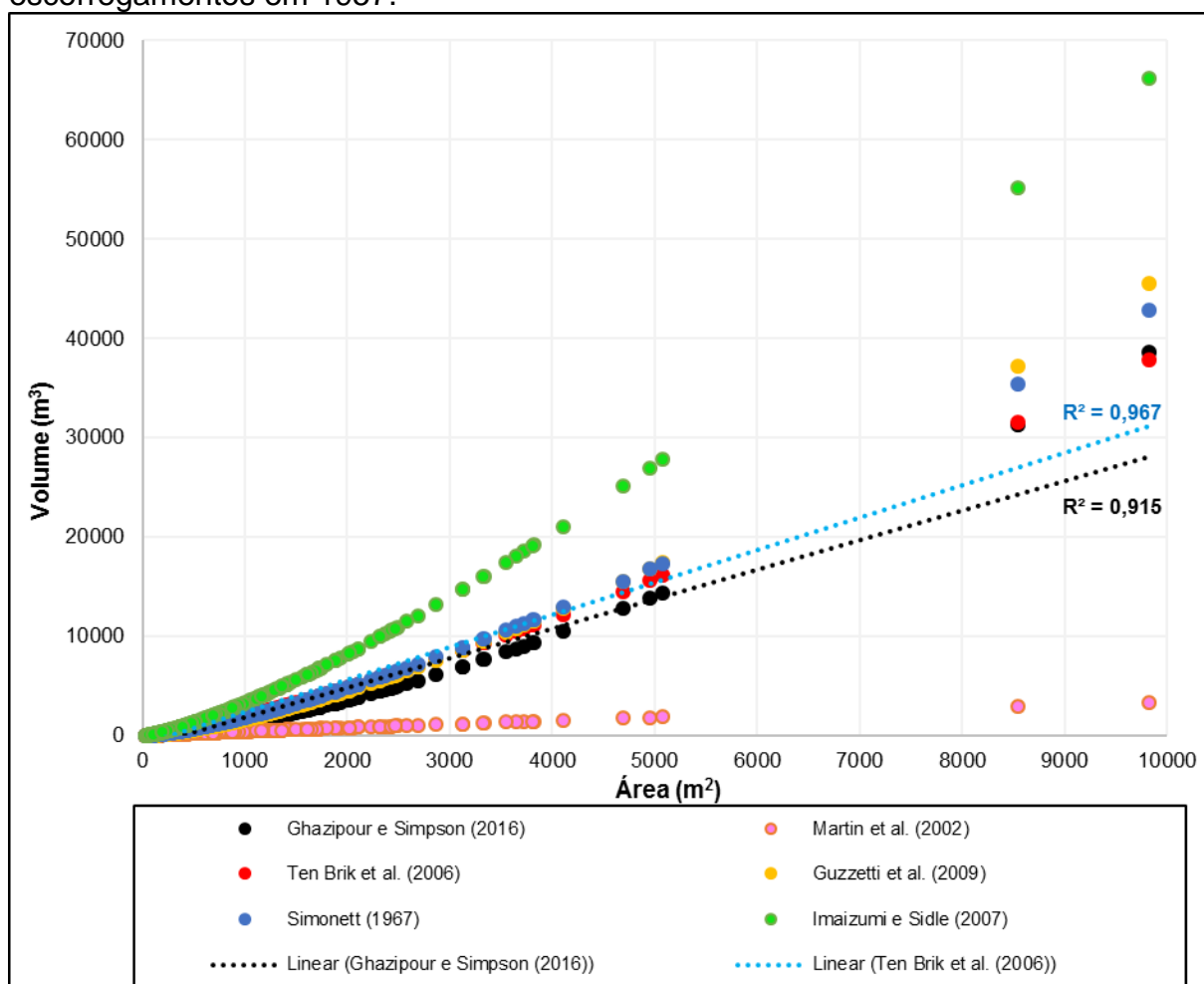
Tabela 11 – Aplicação de modelos de estimativas de volumes (V) a partir de áreas (A) para os escorregamentos de 1957.

<b>Autor (es)</b>	<b>N</b>	<b>Modelo proposto</b>	<b>(m<sup>3</sup>)</b>
Ghazipour e Simpson (2016)	335	$V = 0,042 \times A^{1,491}$	466.983
Ten Brik <i>et al.</i> (2006)	160	$V = 0,263 \times A^{1,292}$	626.459
Guzzetti <i>et al.</i> (2009)	677	$V = 0,074 \times A^{1,45}$	587.019
Simonett (1967)	207	$V = 0,1479 \times A^{1,368}$	626.609
Imaizumi e Sidle (2007)	51	$V = 0,39 \times A^{1,31}$	1.064.203
Martin <i>et al.</i> (2002)	615	$V = 1,0359 \times A^{0,88}$	119.866
<b>Modelo Médio</b>	<b>337</b>	$V = 0,105 \times A^{1,4007}$	<b>581.856,5</b>

Fonte: Adaptado de Guzzetti *et al.* (2009), Ghazipour e Simpson (2016).

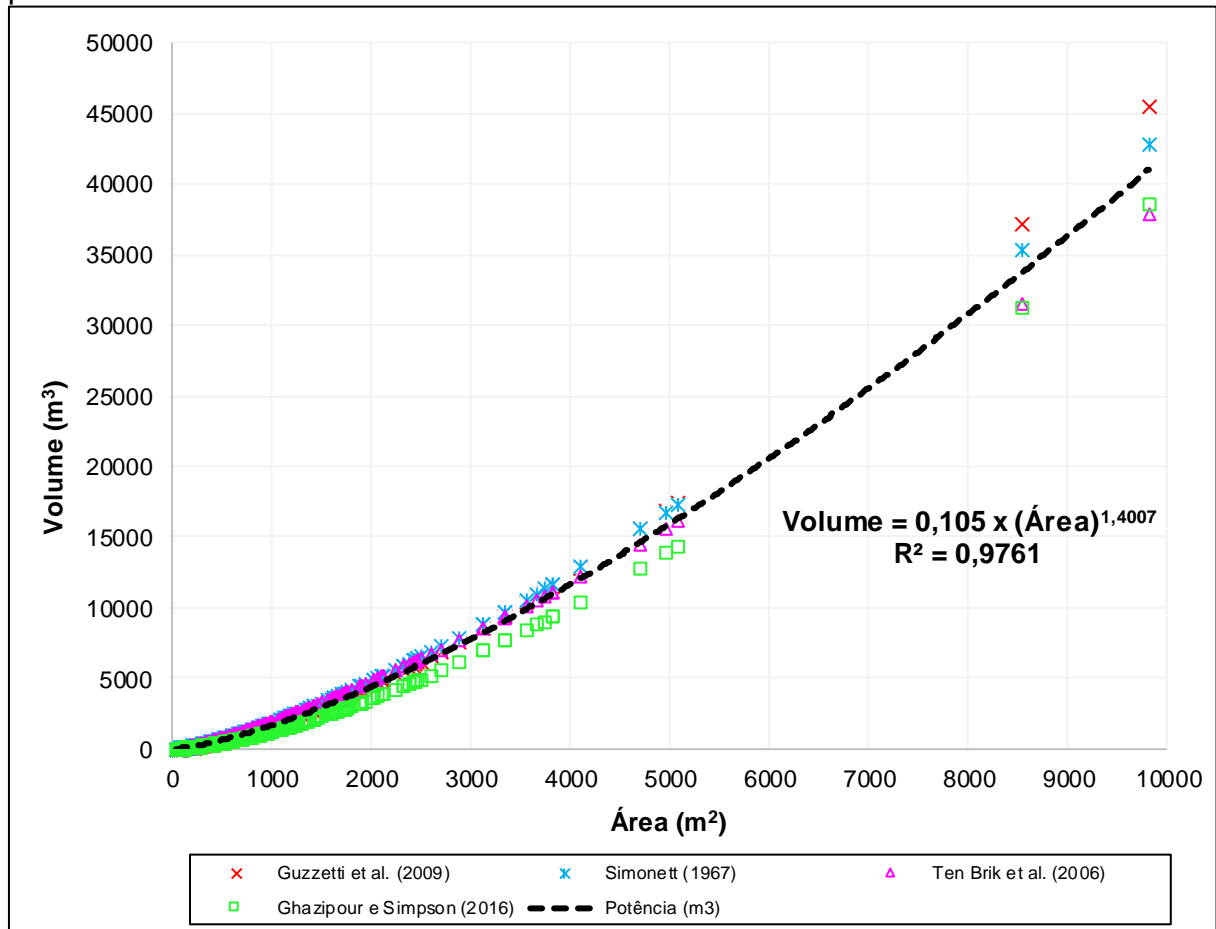
Inserindo-se as áreas dos 337 escorregamentos mapeados pré-1957 no modelo de Martin *et al.* (2002) observou-se que o mesmo subdimensionou os volumes, enquanto o modelo que foi aplicado por Imaizumi e Sidle (2007) ofereceu como resposta justamente o oposto, supervalorizando os volumes. Se por um lado estes dois modelos levaram a séries extremas, por outro, a visualização da Figura 45 exprime que os 4 modelos centrais não possuem comportamento linear para escorregamentos com áreas acima de 5.000 m<sup>2</sup>, a exemplo das 2 retas propositalmente apresentadas, junto aos coeficientes de determinação.

Figura 45 – Comparação de diferentes modelos de estimativas de volumes de escorregamentos em 1957.



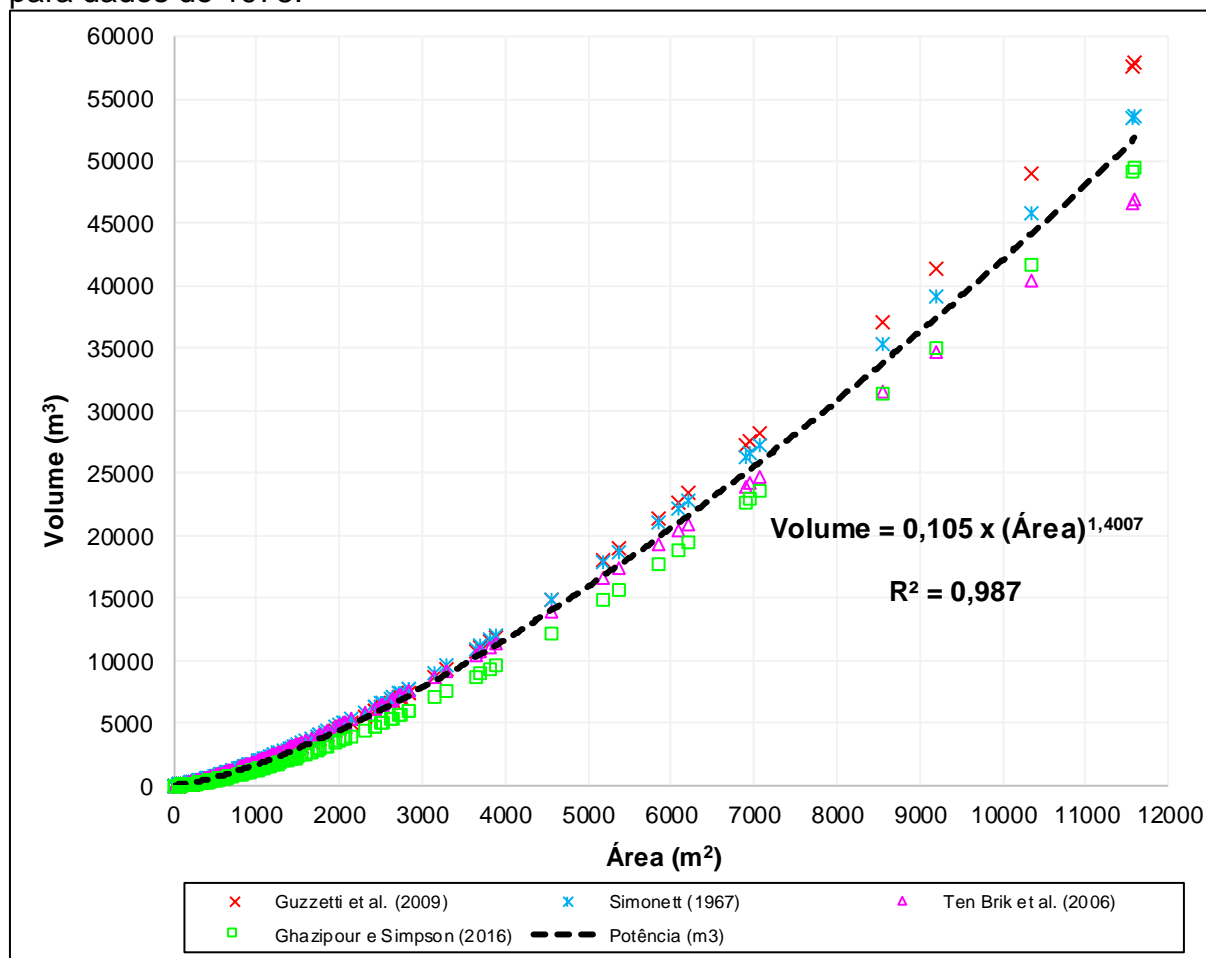
Pela observação dos resultados expressos na Figura 45, adotou-se a potência para ajustar as séries obtidas pelos modelos de tendências centrais aos dados locais, como Ten Brik *et al.* (2006), Ghazipour e Simpson (2016), Simonett (1967) e Guzzetti *et al.* (2009), Figura 46. Nesta figura, a curva de potência, sua equação [ $Volume = 0,105 \times (Área)^{1,4007}$ ] e coeficiente de determinação, exprimiram uma interpolação adequada, cuja aplicação estimou o total dos escorregamentos, no evento registrado pré-1957, em 570.858,028 m³, ou seja, 10.998,47 m³ a menos que a média das aplicações apresentadas na Tabela 11, uma correção de 1,89 %.

Figura 46 – Ajustes dos modelos centrais pela adoção da potência e sua aplicação para dados de 1957.



O mesmo procedimento foi realizado para os 190 escorregamentos interpretados para 1978, sendo obtido um total de 710.711,5 m³, se feita a média dentre todos os modelos. Entretanto, eliminando-se os modelos *outliers* e ajustando para uma linha de tendência central de potência dos 4 melhores modelos, Figura 47, obteve-se, como valores ajustados, 706.005,7 m³ de material remobilizado nas áreas fontes das cicatrizes de escorregamentos.

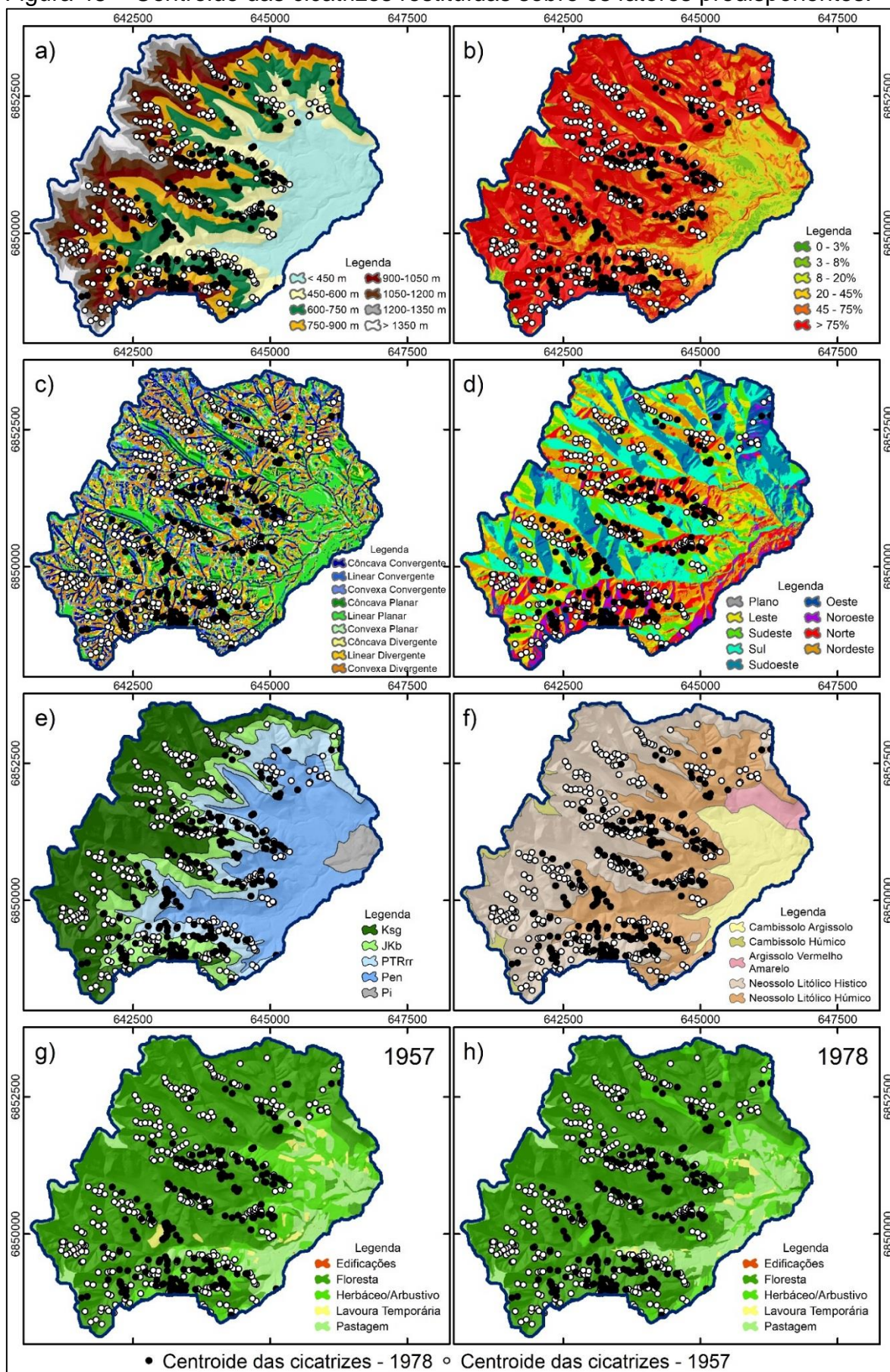
Figura 47 – Ajustes dos modelos centrais pela adoção da potência e sua aplicação para dados de 1978.



### 5.2.3 Cicatrizes incidentes em cada fator

Uma vez conhecidas as magnitudes dos registros, pelas descrições das geometrias e quantitativos dos escorregamentos, a etapa que seguiu foi de correlacionar os fatores predisponentes com o local dos escorregamentos (Figura 48). Nesta etapa, os polígonos das cicatrizes editadas sobre as ortofotos foram sobrepostos aos mapas base, de hipsometria (Figura 48-a), declividade (Figura 48-b), formas do terreno (Figura 48-c), orientação das vertentes (Figura 48-d), litologias (Figura 48-e), tipos de solo (Figura 48-f) e cobertura do solo (Figura 48-g e h) da área de estudo. Desta forma, conseguiu-se extrair a frequência de escorregamentos para cada categoria de cada fator predisponente. Para fins de representação cartográfica utilizou-se apenas do centroide de cada cicatriz, mesmo tendo sido considerada sua área absoluta para fins de obtenção das frequências.

Figura 48 – Centroide das cicatrizes restituídas sobre os fatores predisponentes.



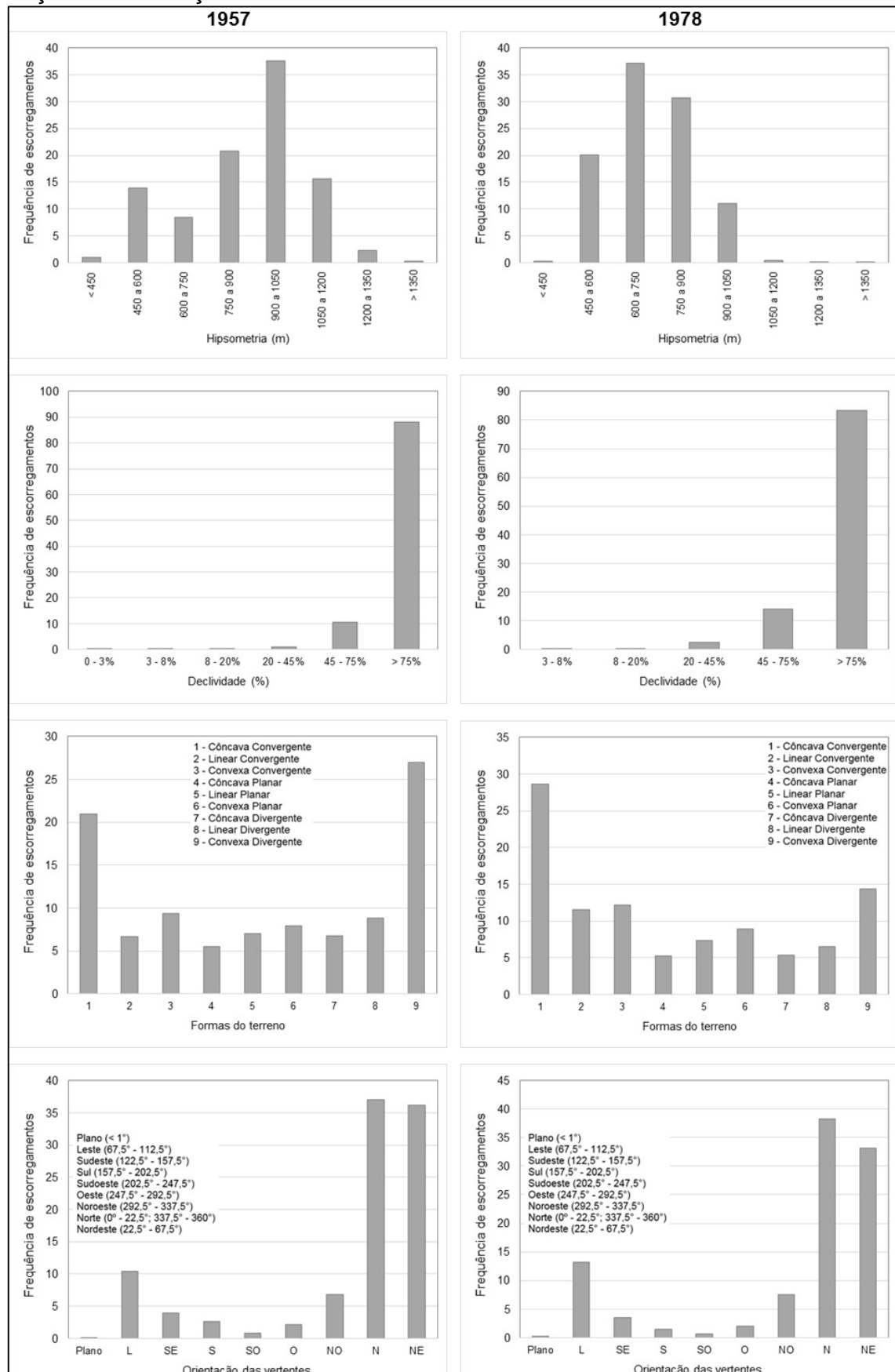


Nos estudos de Fiorillo *et al.* (2019) concluiu-se que a maior parte das encostas que escorregaram estiveram relacionadas às chuvas em cotas elevadas, sendo este o gatilho para escorregamentos, que evoluíram para fluxos, ao passo que os escorregamentos secundários em áreas mais baixas, pela erosão do talvegue, induzida por fluxos de detritos que vinham de áreas mais altas, ou seja, rebaixando o nível de base local. Neste trabalho, para 1957, aproximadamente 60% das cicatrizes mapeadas posicionaram-se entre 750 e 1050 m de altitude (Figura 49). Para 1978 cerca de 65% as cicatrizes foram localizadas entre as cotas de 600 e 900 m, ou seja, 1978 representou evento (s) concentrado em cotas topográficas inferiores ao registro anterior, constatações também enunciadas para outros estudos, como de Fiorillo *et al.* (2019).

Com relação às declividades, ambos os registros apresentaram cicatrizes em vertentes extremamente íngremes ( $>75\%$ ), mesmo que em 1978 sejam encontradas cicatrizes em declividades um pouco inferiores. Quanto às formas das encostas, duas classes destas sobrepujaram as demais: côncava-convergente (1) e convexa divergente (9), Figura 49. Teoricamente, as encostas anotadas como '1' tem maior suscetibilidade para escorregarem, pela morfologia e ação da água. Examinando-se os resultados, fica claro que ambos os eventos movimentaram material de feições interfluviais mais elevadas para fundos de vales, em níveis de base locais (represamento de material na encosta), e os eventos restituídos em 1957 podem ter remobilizado material fonte dos interflúvios (9) para os talwegues em cotas inferiores, na qual predominaram os registros de 1978.

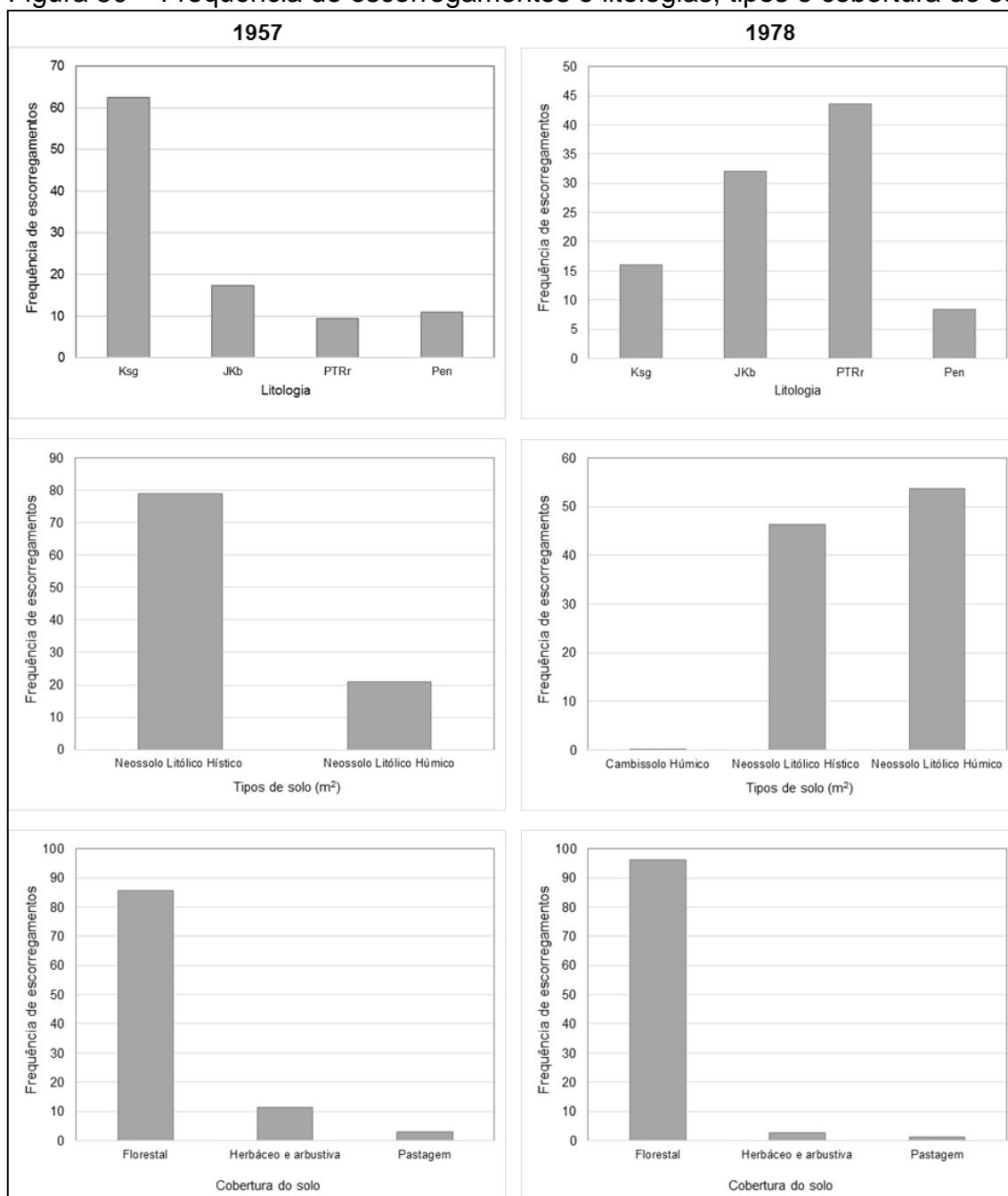
No que se refere as orientações das vertentes, estas determinam a retenção de umidade e da vegetação, que podem influenciar os escorregamentos. O exame dos dados inventariados denota uma contradição teórica para a Latitude de estudo, uma vez que a hipótese de estado da arte é que locais voltados para sul, de menor insolação, mantêm níveis maiores de umidade. Na área de estudo as cicatrizes dos eventos analisados se posicionam, em sua maioria, com face orientada para norte e nordeste, justamente os locais de maior insolação. Para esta observação já se detalhou anteriormente que as fotografias aéreas base para o inventário apresentam zonas de sombra, justamente nas encostas voltadas para sul, não sendo possível a análise destas. É bem provável que, se passível de interpretação, estes locais apresentassem a mesma proporção de escorregamentos interpretados em vertentes de outras orientações, ou até mais.

Figura 49 – Frequência absoluta de escorregamentos e hipsometria, declividades, feições e orientações das vertentes.



Observando-se a Figura 50, as cicatrizes de escorregamentos de 1957 estão mormente relacionadas aos basaltos da Formação Serra Geral (Ksg), e em proporção muito menor, de arenitos da Formação Botucatu (JKb), Formação Rio do Rasto (PTRr) e folhelhos da Formação Estrada Nova (Pen), a porção mais basal dos escorregamentos. Já o evento de 1978 esteve litologicamente atrelado à PTRr e JKb.

Figura 50 – Frequência de escorregamentos e litologias, tipos e cobertura do solo.





Estas constatações de frequências denotam que não há uma natureza litológica mais suscetível ao escorregamento na área de estudo, podendo estes ocorrerem nas mais diversas geologias, uma vez que seus solos residuais sobrejacentes são de neossolos litólicos, comumente associados aos depósitos de tálus. Também, se faz interessante mencionar que aproximadamente 90% dos escorregamentos de 1957 ocorreram em escarpas florestadas, em 1978, quase 100%. Esta discussão coloca em questão se a floresta é fator que soma para estabilizar (ação das raízes) ou movimentar (peso) a encosta, sendo que aqui já estar-se-ia estabelecendo uma relação entre fatores, algo que será melhor explicado com a aplicação da análise multicritério e modelo fisicamente embasado.

A principal recomendação deste item é que o histórico de cicatrizes de escorregamento deva ser realizado e analisado, na tentativa de contribuir para os estudos sobre suscetibilidade natural e induzida aos movimentos de massa, desde que haja aferição do posicionamento espacial do evento, subsidiando a quantificação adequada de geometrias. As restituições multitemporais forneceram recursos para se compreender e comparar eventos registrados em diferentes datas, contribuindo para a posterior definição de “pesos” de classes dos fatores para a aplicação das metodologias subsequentes.

#### - Densidade das cicatrizes sobre os fatores

Assim como o trabalho de Nguyen e Liu (2019), a posterior aplicação da análise multicritério, ao invés de se basear inteiramente na opinião de especialistas, foi consubstanciada estatisticamente (IPT, 2014), pela densidade de escorregamentos nas classes temáticas de cada fator. A densidade ( $D$ ) é a razão entre a área escorregada em cada classe pela área total da classe, sendo a densidade normalizada ( $D_n$ ) corrigida pela média da série. A transformação da  $D_n$  em número adimensional ( $Z$ ) dá-se pela padronização, que considera também os desvios padrão de cada série.

A Tabela 12 detalha os fatores, suas classes e áreas, quantitativo dos eventos de 1957 e de 1978, bem como, aponta a  $D_n$  para cada classe temática de cada fator, número este que será empregado a *posteriori*, no modelo preditivo e de restituição de escorregamentos da análise multicritério. Para melhor visualização das densidades apresentadas na tabela, podem ser acompanhadas as Figuras 51 e

52, na qual os valores de densidades estão projetados no eixo da ordenadas e as classes nas abscissas. Também foi realizada uma média das densidades de cada classe por fator, com base nas restituições de 1957 e de 1978, cujo objetivo foi de obter-se coeficientes capazes de demonstrar uma integração dos escorregamentos pretéritos. Adicionalmente, postulou-se uma escala hipotética (teórica) de pesos às classes, variáveis de 0 a 1 e distribuídos de maneira equidistante pelo número de classes de cada fator. Assim, a Tabela 12 conjuga atributos às classes dos fatores, sejam eles restituídos em cicatrizes de escorregamentos, ou teóricos, o que permitiu aplicação de modelos de restituição e de predição aos escorregamentos.

Tabela 12 – Densidade normalizadas e pesos teóricos para cada classe temática dos fatores predisponentes aos escorregamentos.

Fator	Classe	Área da classe (ha)	Escorregamentos (ha)		(Dn)			Pesos teóricos
			1957	1978	1957	1978	média 57-78	
Hipsometria (m)	< 450	384,348	0,267	0,087	0,060	0,025	0,042	0,125
	450 a 600	331,371	3,823	5,174	0,994	1,738	1,366	0,250
	600 a 750	399,789	2,336	9,580	0,503	2,667	1,585	0,375
	750 a 900	356,128	5,700	7,918	1,379	2,475	1,927	0,500
	900 a 1050	317,304	10,307	2,850	2,799	1,000	1,899	0,625
	1050 a 1200	204,718	4,295	0,097	1,808	0,053	0,930	0,750
	1200 a 1350	131,839	0,611	0,032	0,399	0,027	0,213	0,875
	> 1350	113,736	0,075	0,015	0,057	0,015	0,036	1,000
Declividade	0 - 3	11,840	0,003	0,000	0,048	0	0,048	0,167
	3 - 8	60,150	0,008	0,000	0,029	0,001	0,015	0,333
	8 - 20	150,310	0,039	0,058	0,058	0,069	0,064	0,500
	20 - 45	251,442	0,282	0,659	0,252	0,475	0,363	0,667
	45 - 75	410,795	2,901	3,598	1,591	1,587	1,589	0,833
	> 75	1354,698	24,182	21,438	4,022	2,868	3,445	1,000
Litologia	Ksg	853,344	17,133	4,112	1,756	0,306	1,031	1,000
	JKb	339,487	4,730	8,261	1,218	1,546	1,382	0,800
	PTRr	370,041	2,570	11,234	0,607	1,929	1,268	0,600
	Pen	622,716	2,981	2,145	0,419	0,219	0,319	0,400
	Pi	53,648	0	0	0	0	0,000	0,200
Formas do terreno	Côncava Convergente	397,559	5,757	7,392	1,165	1,466	1,316	1,000
	Linear Convergente	124,935	1,828	2,965	1,177	1,872	1,525	0,889
	Convexa Convergente	135,302	2,574	3,145	1,530	1,833	1,682	0,778
	Côncava Planar	198,897	1,520	1,362	0,615	0,540	0,578	0,667
	Linear Planar	373,475	1,919	1,891	0,414	0,399	0,406	0,556
	Convexa Planar	196,997	2,165	2,304	0,884	0,922	0,903	0,444
	Côncava Divergente	163,635	1,848	1,364	0,909	0,658	0,783	0,333
	Linear Divergente	198,485	2,428	1,668	0,984	0,663	0,823	0,222
	Convexa Divergente	449,951	7,392	3,692	1,322	0,647	0,984	0,111
Cobertura do solo		1957 1978	x	x	x	x	x	x
	Edificações	0,328 0,349	0	0	0	0	0,000	1,000
	Florestal	1689,964 1773,673	23,475	24,769	1,487	2,256	1,871	0,200
	Herbáceo Arbustivo	308,395 203,303	3,133	0,690	1,088	0,548	0,818	0,400
	Lavoura Temporária	37,722 20,763	0	0	0	0	0,000	0,800
Tipos de solo	Pastagem	202,826 241,147	0,805	0,293	0,425	0,196	0,311	0,600
	Cambissolo Argissolo - Ca	252,606	0	0	0	0	0,000	0,400
	Cambissolo Húmico - CA	60,812	0	0,003	0	0,006	0,003	0,200
	Argissolo Vermelho Amarelo - P	62,546	0	0	0	0	0,000	0,600
	Neossolo Litólico Hístico - Re	1110,747	21,643	11,932	1,435	1,105	1,270	1,000
Orientação das vertentes	Neossolo Litólico Húmico - Re	752,524	5,771	13,817	0,565	1,889	1,227	0,800
	Plano (< 1°)	6,040	0,025	0,074	0,366	1,058	0,712	0,111
	Norte (0° - 22,5°; 337,5° - 360°)	293,488	10,168	9,896	3,120	2,914	3,017	0,222
	Nordeste (22,5° - 67,5°)	442,341	9,918	8,546	2,019	1,669	1,844	0,333
	Leste (67,5° - 112,5°)	314,635	2,847	3,396	0,815	0,933	0,874	0,444
	Sudeste (122,5° - 157,5°)	287,992	1,092	0,893	0,341	0,268	0,305	0,778
	Sul (157,5° - 202,5°)	426,934	0,718	0,398	0,152	0,080	0,116	1,000
	Sudoeste (202,5° - 247,5°)	273,233	0,226	0,168	0,074	0,053	0,064	0,889
	Oeste (247,5° - 292,5°)	91,865	0,577	0,507	0,566	0,477	0,522	0,667
	Noroeste (292,5° - 337,5°)	108,747	1,866	1,948	1,545	1,548	1,547	0,556

Figura 51 – Densidade (D), Densidade Normalizada (Dn) e padronizada (Z) das cicatrizes nas classes de hipsometria, declividade, litologia e formas do terreno.

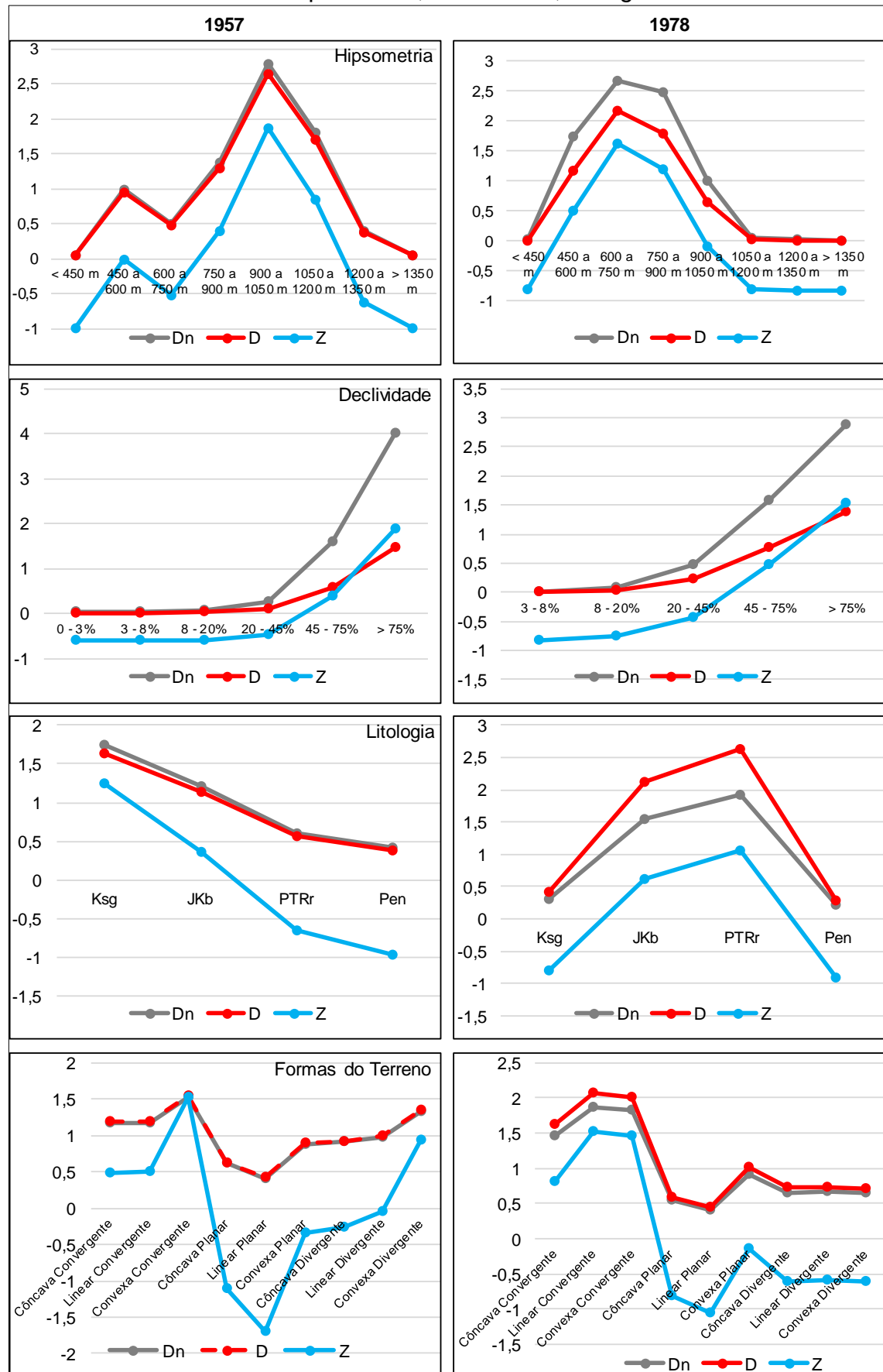
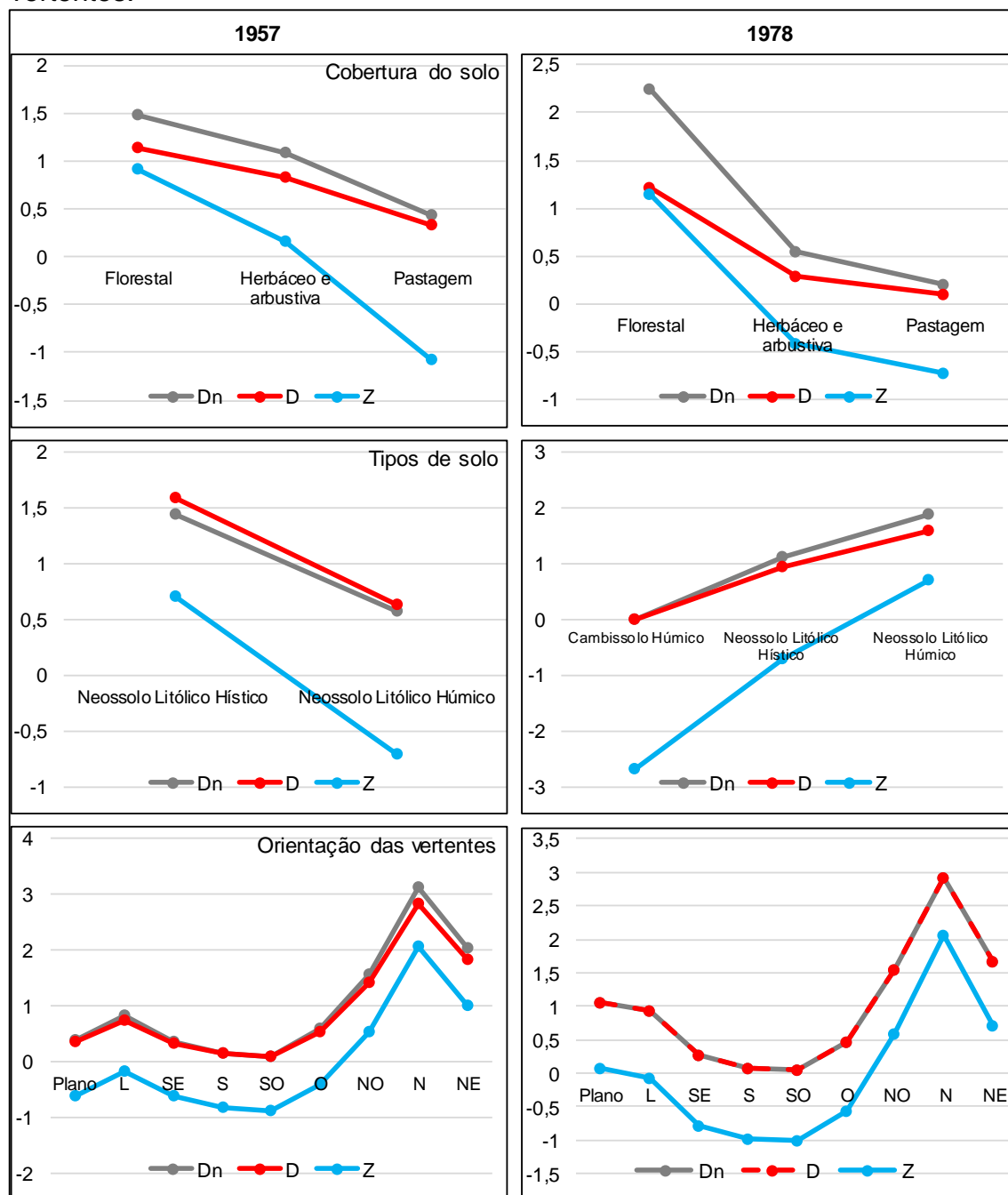


Figura 52 – Densidade (D), Densidade Normalizada (Dn) e padronizada (Z) das cicatrizes nas classes de cobertura do solo, tipo do solo e orientação das vertentes.



A modelagem de suscetibilidade aos escorregamentos efetuada por Deng, Li e Tan (2017), por exemplo, também considerou inventário de cicatrizes, ao total de 169, que foram divididas em dois conjuntos de dados, sendo o maior, equivalente a 70 %, adotado na própria construção do modelo (estimativas) e o restante, 30 % do inventário, para validar o modelo obtido.

Vakhshoori e Zare (2018) estudaram bacia hidrográfica no norte do Irã com reconhecida recorrência de escorregamentos. Os autores inventariaram os escorregamentos e particionaram aleatoriamente o cômputo total em 3 frações distintas, sendo parte utilizada para treinamento do modelo, ou seja, incorporada em sua construção e outra, para teste, ou validação a posteriori. As frações propostas para treinamento/validação foram, respectivamente: 50/50, 60/40 e 70/30, verificando-se que, em todas as combinações, a ênfase sempre consistiu em utilizar mais da metade dos escorregamentos para compor um modelo, ou seja, restituir.

Vakhshoori e Zare (2018) relataram que ao utilizar-se menos escorregamentos para treinar o modelo estar-se-ia caminhando para mais segurança e consistência, ou seja, o resultado final apontaria, de fato, capacidade de predição de eventos. Ao encontro desta constatação, modelos com maior número de dados destinados à validação estariam submetidos a maior análise de desempenho.

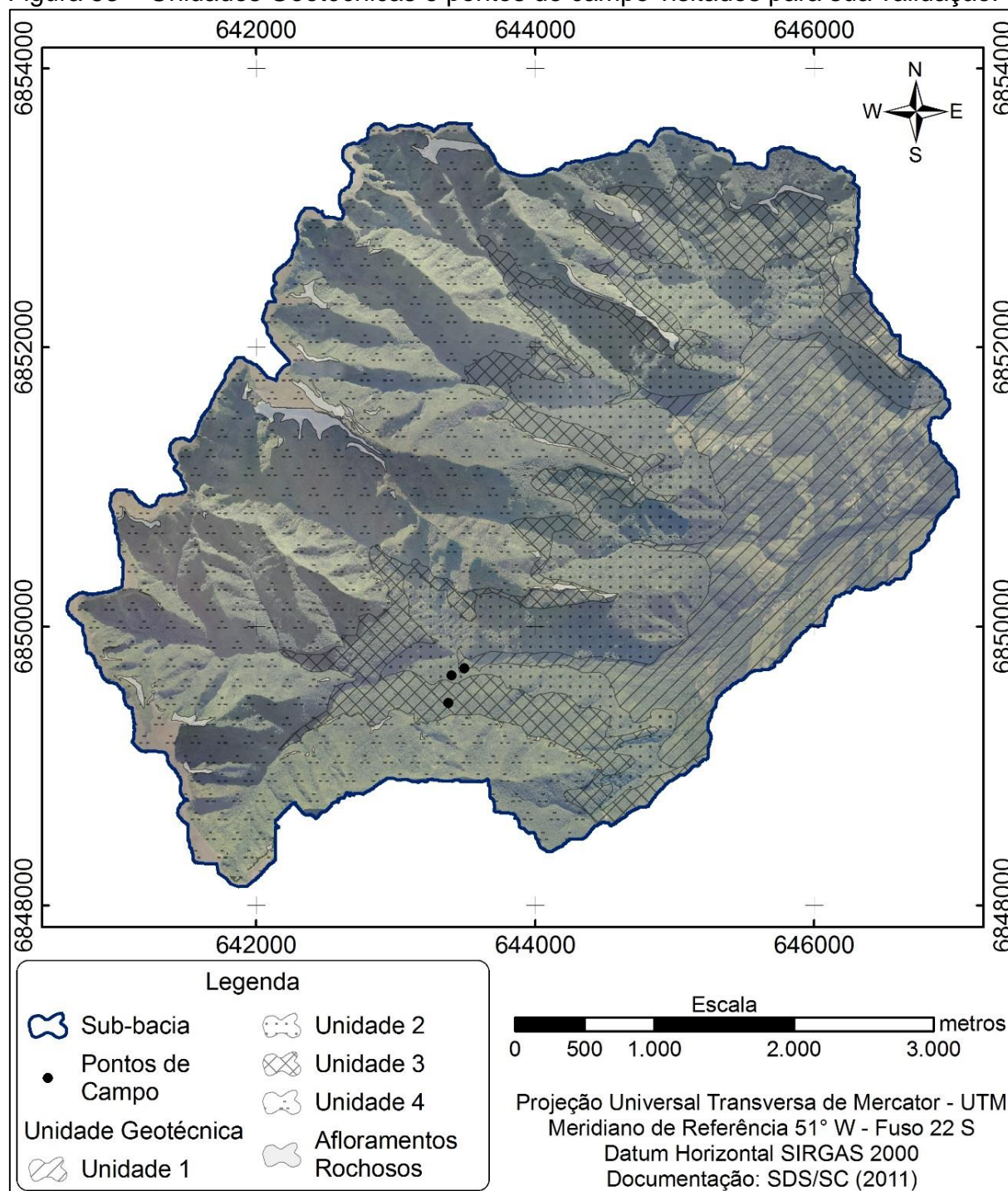
Uma vez de posse das densidades de escorregamentos sobre cada classe de cada fator, da média destas densidades e de sua resposta teórica, pôde-se dar início a aplicação de Análise Multicritério, combinada ao método estatístico. Antes disso, independentemente do cômputo da opinião de especialistas, associada aos pesos obtidos para classes de cada fator, fez-se a modelagem fisicamente embasada, pelo modelo SHALSTAB.

### 5.3 MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE À ESCORREGAMENTOS POR MEIO DO MODELO SHALSTAB

#### 5.3.1 Etapas iniciais em escritório

Inicialmente, a aplicação do modelo fisicamente embasado prescindiu de etapas de reconhecimento prévio, em escritório, da natureza física da área de estudo, para definição de Unidades Geotécnicas (UG). Esta definição consistiu numa associação de características dos fatores físicos: litologia, tipos de solo, hipsometria e declividade, Figura 53. A combinação desses fatores, após análise multicamada em SIG, possibilitou a determinação de sub-regiões na área, que reúnem características comuns em seu interior, teoricamente, comportamento geomecânico semelhante, distinguindo-se das outras unidades.

Figura 53 – Unidades Geotécnicas e pontos de campo visitados para sua validação.



A importância em se definir as UG orientou a definição de pontos que foram visitados em campo, para coleta de amostras deformadas e indeformadas de solo (granulometria, massa específica, condutividade hidráulica), verificação da profundidade, da coesão, bem como, do ângulo de atrito interno do solo. Os trabalhos de campo validaram 3 das 4 UG propostas para a área de estudo, Figura 53, em que suas respectivas análises granulométricas, efetuadas por analisador à

laser, Apêndice C, corroboraram em demonstrar diferentes naturezas texturais para os substratos coletados da área.

Acerca das unidades definidas e validadas, na Tabela 13, seguem suas principais características: a UG 1, porção exutória desta sub-bacia de estudo, constitui-se de terrenos majoritariamente planos, de solos profundos, sendo fortemente antropizada; na UG 2 as declividades aumentam acentuadamente, há manto de intemperismo profundo, ora residual, ora alóctone, a cobertura vegetal é de floresta nativa; a UG 3 constitui um desmembramento do terço superior da UG 2, na qual as litologias de arenitos sustentam pequenos patamares estruturais em cotas de 700 a 800 m; em relação à UG 4, mesmo sendo a maior em área e representando fielmente a escarpa florestada, pelas condições de acessibilidade, não foi possível executar trabalhos para coleta de amostras nestes locais e a solução a este desafio segue apresentada ao longo deste capítulo. Por fim, os afloramentos rochosos corresponderam à um zoneamento à parte, sem disponibilidade de material de manto de intemperismo passível de escorregar.

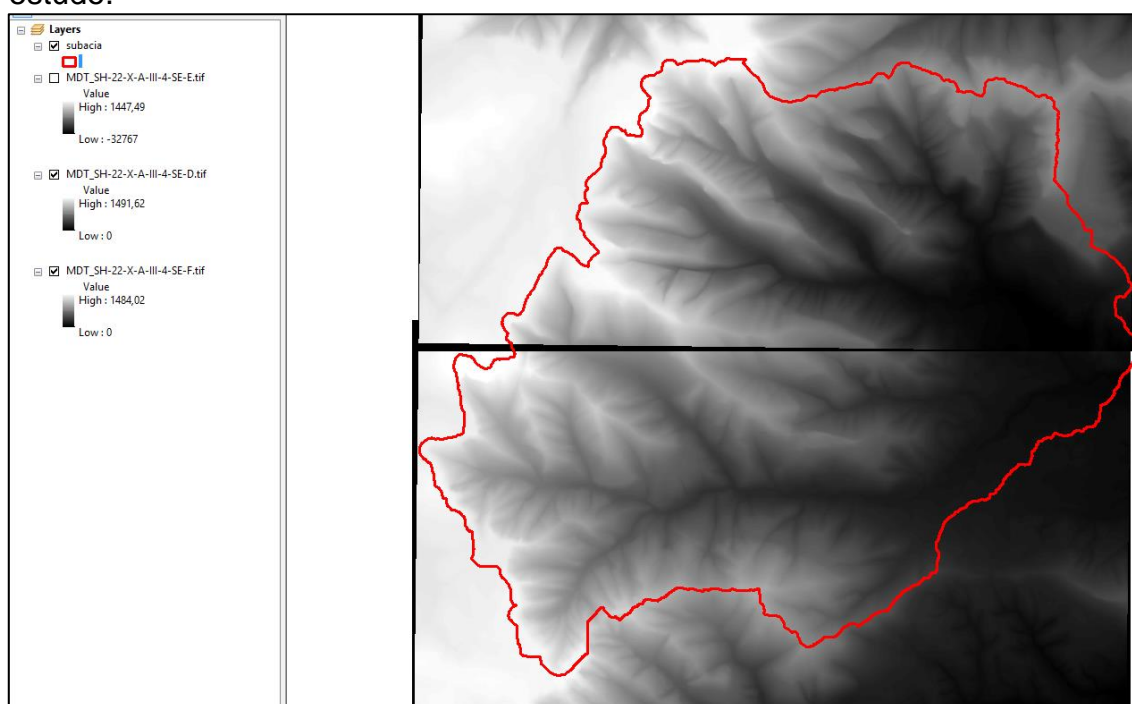
Tabela 13 – Caracterização das unidades geotécnicas.

<b>Unidade Geotécnica - UG</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Litologia dominante</b>	<b>Tipos de solos</b>	<b>Processos geodinâmicos</b>
<b>1</b>	338,5	Pi, Pen	Cambissolo Argissolo, Argissolo Vermelho Amarelo, Cambissolo Litólico Húmico	Incomum, possíveis fluxos de detritos associados aos vales.
<b>2</b>	603,16	Pen, PTRrr	Neossolo Litólico Húmico	Escorregamentos translacionais (comum), fluxos de detritos.
<b>3</b>	136,14	PTRrr	Neossolo Litólico Húmico	Escorregamentos translacionais pouco comum), dados à menores declividades
<b>4</b>	1.126,08	Ksg, JKb	Cambissolo Húmico, Neossolo Litólico Hístico	Escorregamentos translacionais (muito comum), Fluxo de detritos, quedas e tombamentos de blocos.
<b>Afloramentos rochosos</b>	35,2	Ksg, JKb	Não ocorrem	tombamentos de blocos



Após a compartimentação da área em UG, a aplicação do modelo SHALSTAB prescindiu da utilização de informações extraídas do MDT (SDS, 2011), com resolução espacial e altimétrica de 1 m e, adicionalmente, por MDT proveniente do imageamento do satélite Alos Palsar® (ASF, 2020), com resolução espacial de 12,5 m. Esta comparação entre os MDT foi necessária para contribuir na solução de uma falha encontrada no MDT da SDS/SC, problema este que secciona leste-oeste, exatamente o meio da área de estudo (Figura 54).

Figura 54 – Área de falha no MDT alinhada leste-oeste, ao centro da área de estudo.



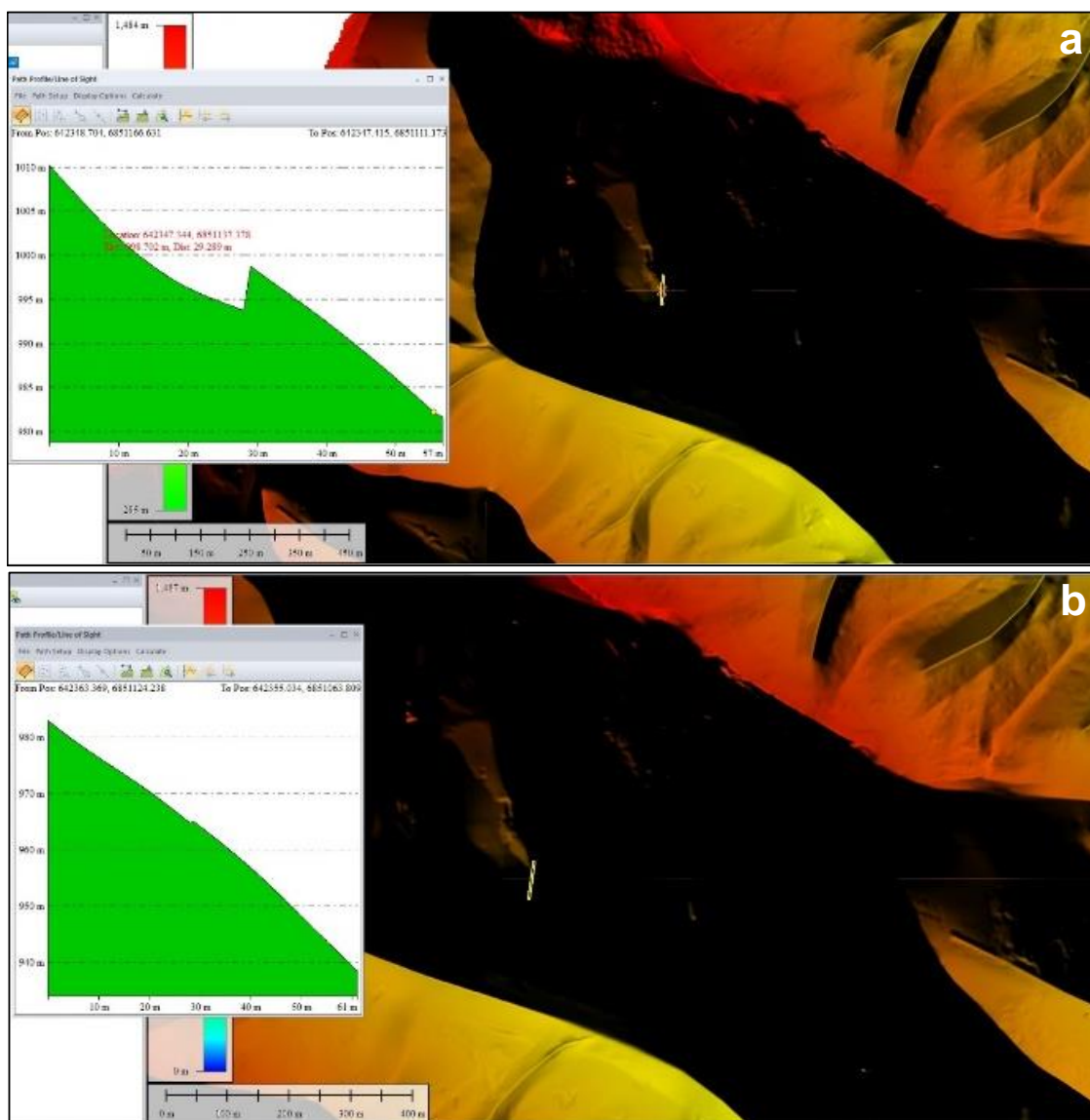
Este erro trata-se de falha na articulação de folhas que compõem esse MDT, dando origem à cotas errôneas, em que os mesmos *pixels*, em bordas dessas folhas que se articulam, e que deveriam possuir o mesmos atributos altimétricos “Z”, têm diferenças de até 20 m. Esta constatação comprometeu a aplicação do MHEU, componente do SHALSTAB, porque ora esta falha aparece como um pronunciado declive, ora uma barreira em meio às vertentes, prejudicando a obtenção de informações básicas, como a declividade, ou ainda, dados hidrológicos.

Um exemplo dá-se na obtenção das áreas de contribuição específica, ou de fluxo – “*catchment área*”, notadamente, quando estas falhas ficam mascaradas em área de sombra do *raster* do MDT. Como estratégia de correção, foi recortado uma faixa do “*raster*” da base cartográfica de referência (SDS, 2011)

complementando-a por nuvem de pontos construída a partir do MDT das folhas originais SH-22-X-A-III-4 (desdobramentos SE-D, SE-E e SE-F) e do MDT da folha SH-22-X-B-I-3 (desdobramentos SO-C e SO-E) disponibilizadas no sítio do SIGSC (2020).

O exemplo desta correção está apresentado na Figura 55, na qual é visualizado que, mascarado numa pequena seção em área de sombra do MDT, e que aparentemente não influenciaria negativamente na modelagem do SHALSTAB, apresentava-se um perfil com concavidade e barreira em meio à vertente íngreme, Figura 55-a. Após sua correção, a suavização passou a não comprometer a obtenção de informações hidrológicas a partir do MDT, Figura 55-b.

Figura 55 – Perfil de vertente em área da articulação de folhas, com falha (a) e após corrigido (b) para o mesmo local.



Uma vez ajustado o MDT, utilizando-se de ferramentas do QGis®, nos *scripts* de usuário, a exemplo do SAGA® e do TauDEM®, pôde-se extrair as declividades, remover as depressões do terreno, para então obter-se as áreas de contribuição específica. Em paralelo, havia a necessidade de obter-se outros parâmetros de entrada para executar o modelo de estabilidade de encostas, utilizando-se de informações de campo, ou de ensaios laboratoriais executados com as amostras coletadas previamente.

### 5.3.2 Atividades de campo e resultados de ensaios

As atividades de campo idealizadas para reconhecimento, descrição das características locais e, principalmente, coleta de amostras e feitiço de ensaios *in situ*, ocorreram em 3 diferentes momentos, com equipes e estratégias específicas e complementares em atendimento à objetivos distintos desse trabalho. No dia 13 de janeiro de 2018 fez-se a primeira incursão de campo, a partir da localidade rural de Guanabara, em Treviso, seguindo-se a montante por antiga trilha que atravessava por inúmeras vezes o leito do rio Mãe Luzia (Figura 56-a e b).

O caminho era inutilizado há décadas e, para reabri-lo, contou-se com apoio de 2 moradores locais e houve necessidade se caminhar no leito do rio por 6 km, até o ponto em que se optou por subir a encosta para alcançar as unidades geotécnicas mais altas, alcançando-se cotas de 700 m em meio à floresta (Figura 56-c). No percurso não foram encontrados sinais de escorregamentos recentes, entretanto, os depósitos coluviais e evidências de escorregamentos antigos se faziam presentes.

Quando se chegou nos pontos planejados, para realização de ensaios via BST (Figura 56-d), nas respectivas UG, deparou-se com problema técnico no equipamento, ou seja, se tornava imprescindível um retrabalho nestes locais. Contudo, outras mensurações e coletas foram realizadas, a exemplo da verificação da profundidade do solo (Figura 56-e), com mais de 1,5 m nas UG, e da coleta de amostras indeformadas (Figura 56-f) para ensaios laboratoriais e obtenção da massa específica e permeabilidade de cada amostra descritora das respectivas UG.



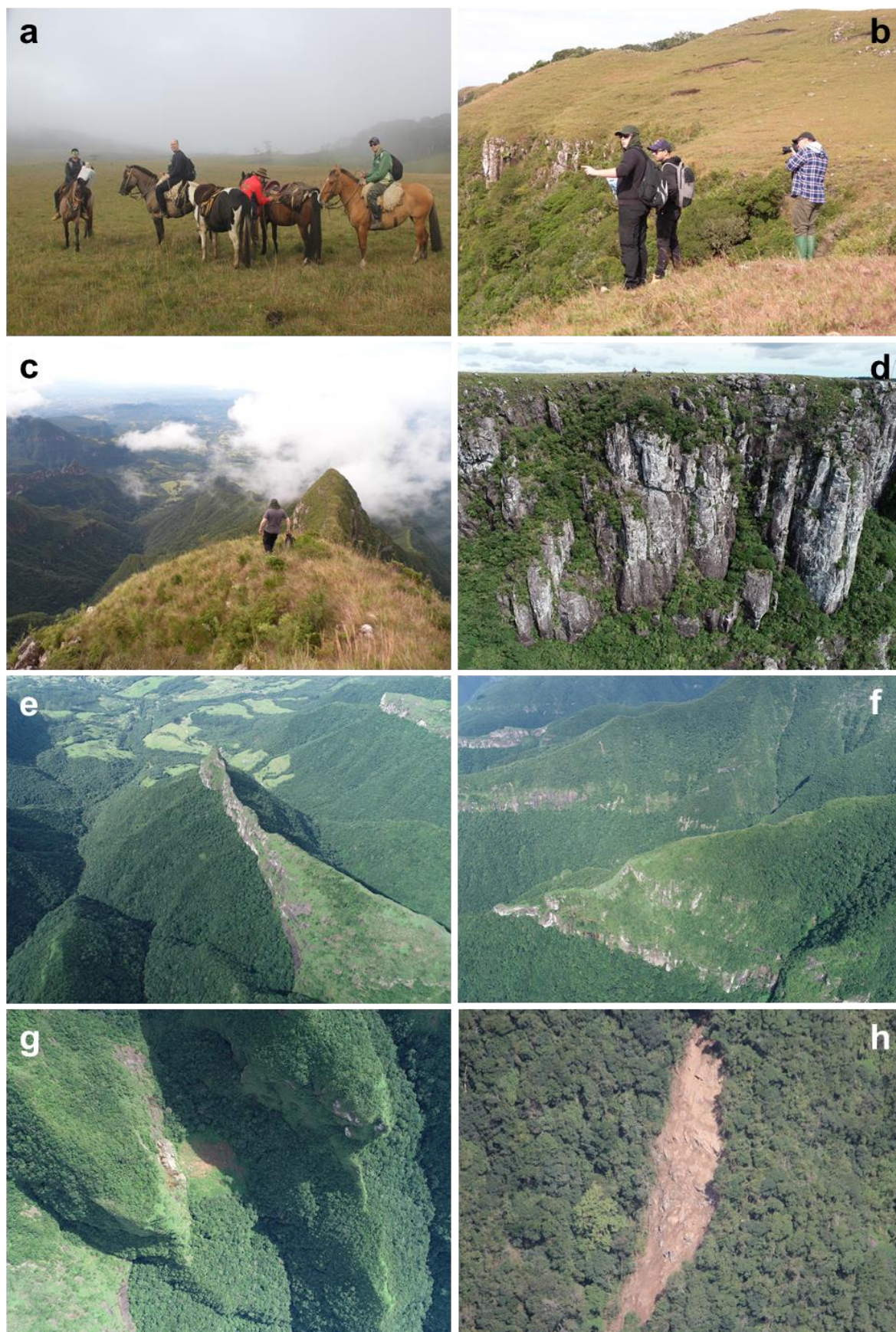
Figura 56 – Atividade de campo de janeiro de 2018.



Se a primeira abordagem em campo visava reconhecer a área de estudo a partir da sua porção exutória e de áreas rurais, seguindo-se por trilha até aos terrenos escarpados da área de estudo, na atividade de campo do dia 04 de maio de 2019 previa-se o oposto, ou seja, chegar ao bordo de planalto, junto a parte de cumeada, à oeste da área de estudo. Para isso, cavalgou-se por 7 km (Figura 57-a) e finalizou-se o trajeto com trilha, chegando-se ao bordo de planalto acima da área de estudo, local este em que foram tomadas fotografias para investigar novos escorregamentos (Figura 57-b).



Figura 57 – Atividade de campo de maio de 2019.



Como forma de conhecer melhor a área, caminhou-se pelo perímetro desta, obtendo-se vista privilegiada de toda a área de estudo Figura 57-c. A partir deste ponto foi realizado reconhecimento das escarpas utilizando-se de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT). As fotografias obtidas pelo VANT, revelaram que a parte mais elevada da escarpa possui declividades acentuadíssimas, inexistência de manto de intemperismo (Figura 57-d), ou seja, local em que a ocorrência de escorregamentos é limitada, contudo, outros movimentos de massa poderão ocorrer, a exemplo, dos tombamentos de blocos.

Pelas Figuras 57-e e 57-f vê-se os espigões e esporões sustentados estruturalmente pelas litologias de basalto e arenitos, reconhecidamente áreas fonte de material intemperizado, ao passo que na Figura 57-g pode ser visto um escorregamento em área de sombra, não visível pela parte baixa da área de estudo, mas sim, pelo bordo do planalto. Na Figura 57-h um típico escorregamento translacional raso, recente, evidenciou que, mesmo em menor frequência e magnitude, os processos são dinâmicos na área de estudo. Esta atividade de campo proporcionou um conhecimento proveniente de um novo ângulo de visão acerca da área de estudo.

A terceira atividade de campo ocorreu entre 11 e 13/10/2019, sendo o dia 12/10/2019 dedicado integralmente a repetir a trilha da primeira atividade de campo, realizando os ensaios e reconhecimentos não executados na primeira incursão. Nesse dia utilizou-se de um drone (Figura 58-a) para efetuar-se um voo a partir do vale do rio Mãe Luzia e complementar o reconhecimento local, Figura 58-b.

Chegando-se aos pontos definidos como descritores de cada UG utilizou-se do BST (Figura 58-c, d, e) para efetuar o teste *in situ* de cisalhamento, aplicando-se uma tensão normal inicial, obtendo-se a envoltória de cisalhamento e, indiretamente, o ângulo de atrito interno, bem como, coesão. Complementarmente, se na primeira atividade de campo foram coletadas amostras para análise granulométrica via peneiramento, nesta terceira etapa coletou-se solo para inserir num analisador à laser (Figura 58-f), com resultados apresentados no Apêndice C.



Figura 58 – Atividade de campo datada de outubro de 2019.



Quanto aos resultados dos ensaios, enfatiza-se aqueles provenientes da aplicação do BST, para a UG 1 seguem apresentados na Tabela 14, com a Tensão Normal aplicada (variável descritora) e a cisalhante resultante. Pela construção da regressão linear entre as variáveis, pôde-se obter o intercepto da reta no eixo y, ou coeficiente linear, indicativo da coesão do solo ( $\sigma$ ), além do ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), pelo arco-tangente da inclinação da reta, multiplicado por 180 graus e dividido por Pi ( $\pi$ ). Também é apresentado o Coeficiente de Determinação ( $R^2$ ), quadrado da

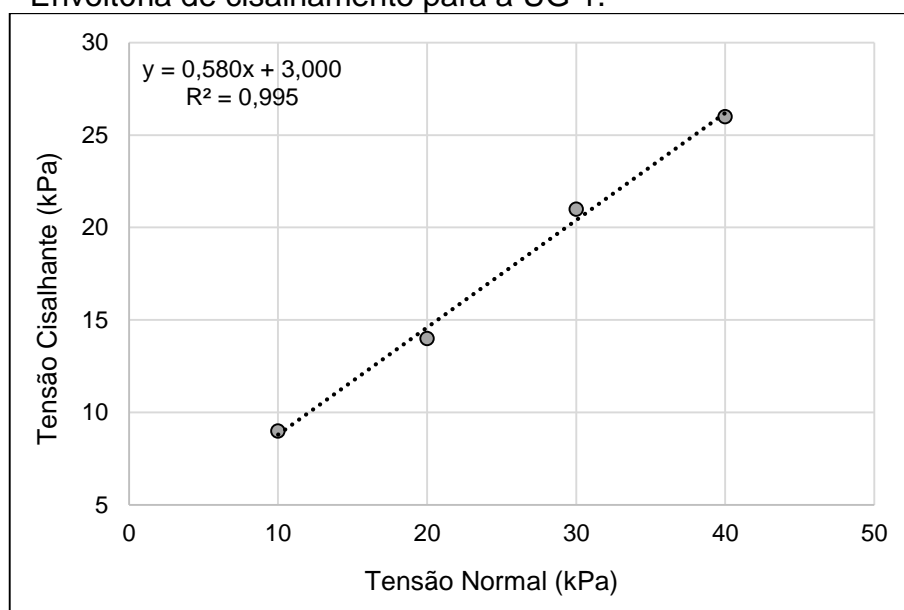


correlação, que exprime o grau de explicação de y por x, melhor visualizado na Figura 59.

Tabela 14 – Tensão normal aplicada no BST e parâmetros obtidos para UG 1.

Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	$\phi$	$\sigma$	$R^2$
10	9	30,11	3,0	0,995
20	14			
30	21			
40	26			

Figura 59 – Envolvória de cisalhamento para a UG 1.



Os mesmos procedimentos foram adotados para as UG 2 e 3, obtendo-se os parâmetros de entrada necessários a aplicação da modelagem, passíveis de visualização pela Tabela 15 e Figura 60, para UG2, e Tabela 16 e Figura 61, para UG 3.

Tabela 15 – Tensão normal aplicada no BST e parâmetros obtidos para UG 2.

Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	$\phi$	$\sigma$	$R^2$
50	40	34,86	8,9	0,964
65	55			
80	70			
120	90			

Figura 60 – Envoltória de cisalhamento para a UG 2.

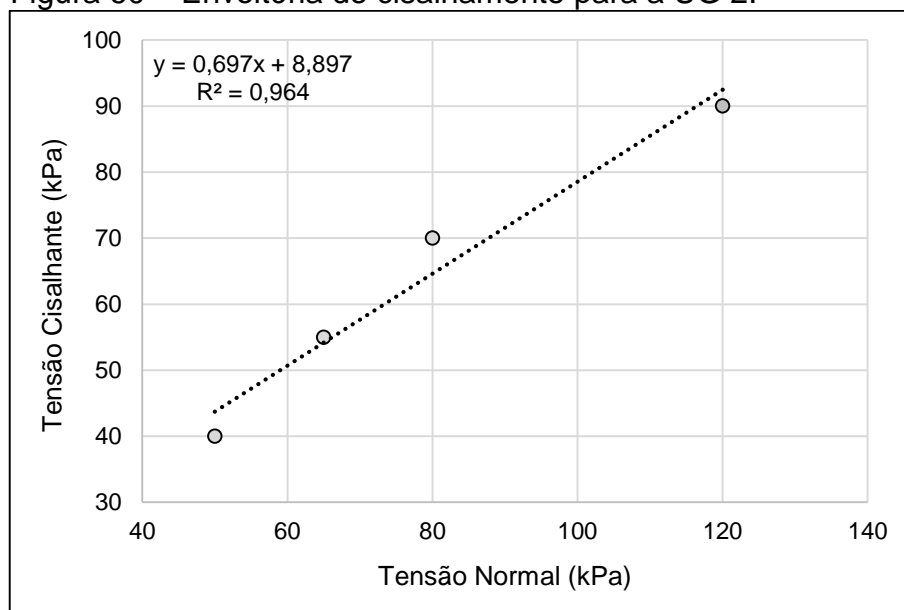
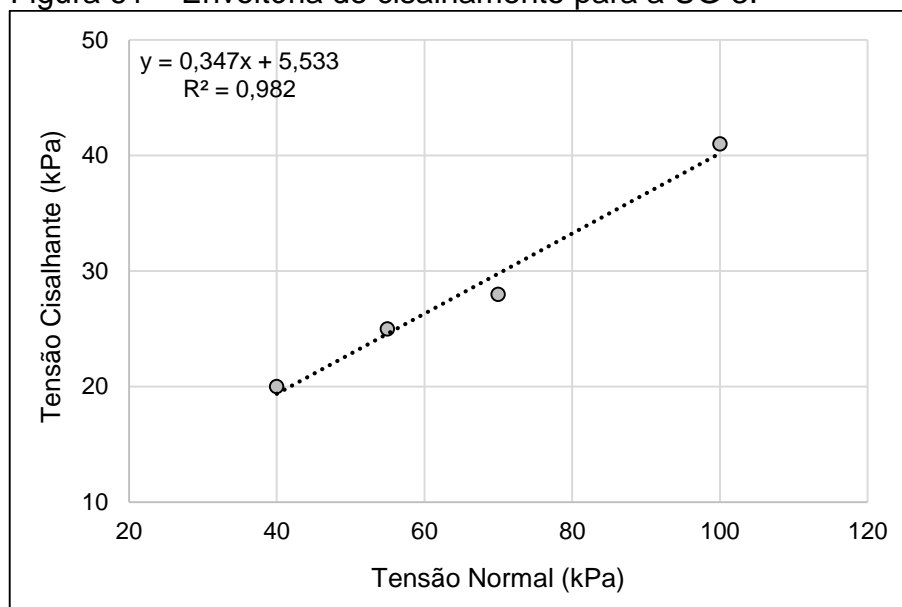


Tabela 16 – Tensão normal aplicada no BST e parâmetros obtidos para a UG 3.

Tensão normal (kPa)	Tensão cisalhante (kPa)	$\phi$	$\sigma$	$R^2$
40	20	19,12	5,53	0,982
55	25			
70	28			
100	41			

Enfatiza-se que para a UG 2 e UG 3, ainda em campo, foi necessário refazer o procedimento com o BST, uma vez que, partindo-se das tensões normais aplicadas não era plausível aceitar-se os resultados obtidos, os mesmos apresentavam baixo ajuste da reta e consequente  $R^2$  insatisfatório. Para cada uma destas UG foram realizados 4 ensaios, sendo selecionado àquele que estava de acordo com os critérios estabelecidos no gabarito do teste.

Figura 61 – Envoltória de cisalhamento para a UG 3.



Para massa específica do solo foram adotados dados de Michel, *et al.* (2012). Para a UG 4 a complementação de informações não levantadas, ou passíveis de levantamento, foi a de utilizar-se as médias obtidas, para as demais UG amostradas. Uma vez com todos os parâmetros de entrada para a aplicação da modelagem com viés determinístico, reuniu-se as informações na Tabela 17 para subsidiar a aplicação do SHALSTAB.

Também é importante explicar que, pela divisão dos volumes modelados para as cicatrizes pelas suas áreas restituídas em ortoimagem, pôde-se atestar uma profundidade média de 1,49 m para os escorregamentos de ambas os registros. Assim, este resultado corroborou a profundidade adotada para cada unidade geotécnica.

Tabela 17 – Dados de entrada para o SHALSTAB.

Unidades Geotécnicas	Coesão solo ( $\sigma$ )	Ângulo de atrito interno ( $\phi$ )	Profundidade (z)	Massa específica do solo ( $\rho_s$ )	Coesão das raízes (cr)	Sobrepeso das árvores (sw)
1	3 kPa	30,11°	>1,5 m	1815 kg/m <sup>3</sup>	0	0
2	8,9 kPa	34,86 °	>1,5 m	1815 kg/m <sup>3</sup>	0	0
3	5,53 kPa	19,12 °	>1,5 m	1815 kg/m <sup>3</sup>	0	0
4	5,81 kPa	28,03	1,35 m	1815 kg/m <sup>3</sup>	0	0
Afloramento	-	-	0,01	-	0	0

### 5.3.3 Aplicação e resultado

A aplicação do SHALSTAB deu-se no *software* de geoprocessamento QGis®, um programa gratuito, de uso difundido e que permitiu ativar extensões, ou mesmo adicionar versões customizadas destas, pela linguagem de programação *Python*®. A versão utilizada do modelo de estabilidade de encostas foi a aprimorada pela equipe do Grupo de Pesquisa em Desastres Naturais-GPDEN, do Instituto de Pesquisas Hidráulicas – IPH (UFRGS), que adicionou, em 2019, dados de vegetação ao modelo original, a exemplo da coesão de raízes e sobrecarga da vegetação. Sendo livre e editável, o modelo designado de “estabilidade de encostas completo” é disponibilizado através dos *scripts* do usuário, na caixa de ferramentas de processamento.

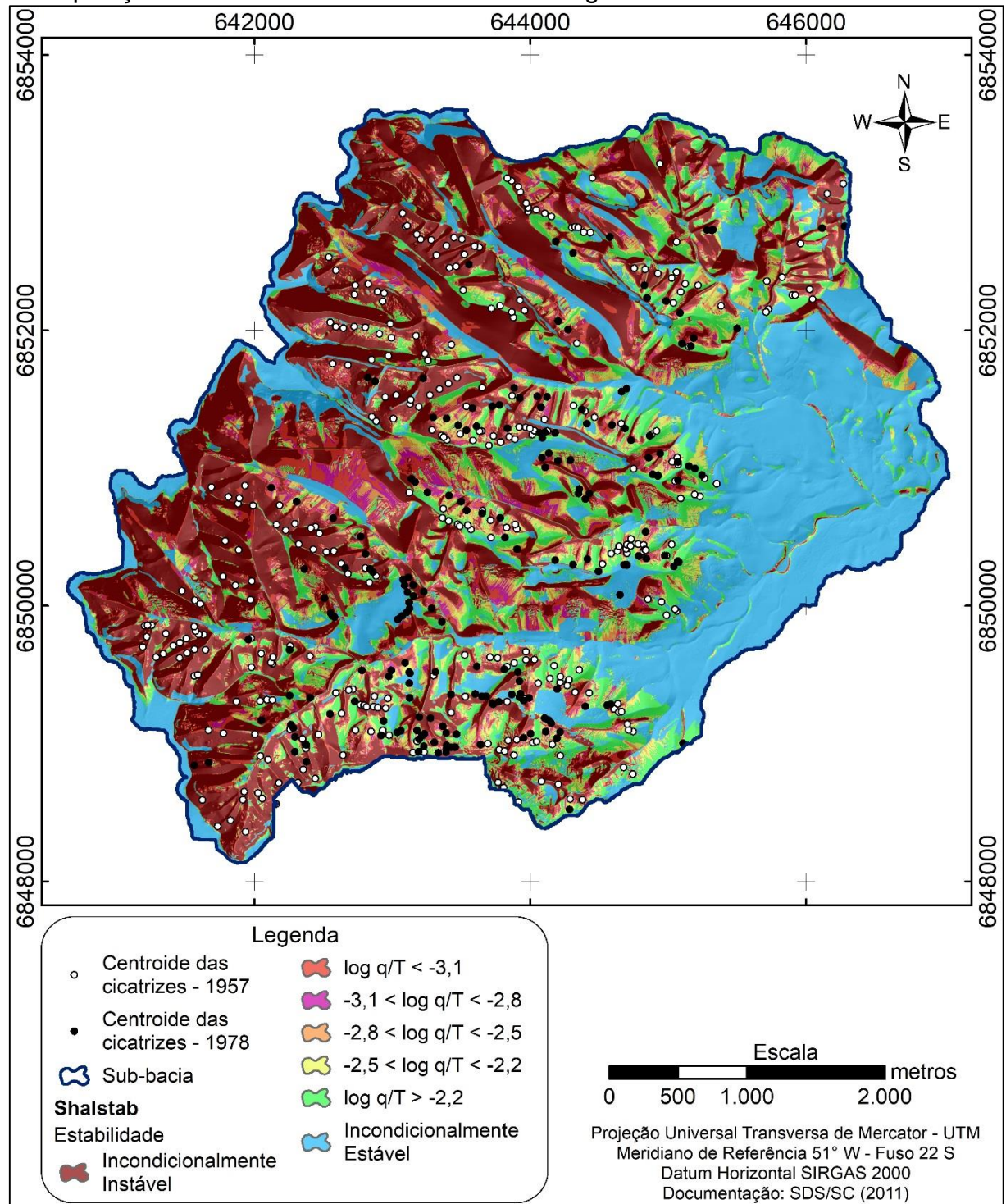
Como os dados de entrada, utilizou-se os parâmetros apresentados na Tabela 17, devidamente convertidos para arquivos matriciais, com os respectivos atributos e mesma resolução espacial do MDT, a qual forneceu outros dados de entrada, como já mencionado, a declividade e as áreas de contribuição específica. Com todas as informações prévias o modelo foi executado, (Equação 14), resultando num *raster* de saída (Figura 62), com representação das 7 classes de estabilidade de encostas para a área de estudo.

As 7 classes de estabilidade, variam de incondicionalmente estável e saturado até incondicionalmente instável e saturado, resultantes da razão de  $a/b$  em função da  $\tan\theta$ . Interpretando a Figura 62, a cor bordô traduz uma encosta altamente declivosa e saturada, ou seja, que já escorregou, ou em parte, pelo fato das forças cisalhantes suplantarem em muito às de coesão. Em vermelho ( $\log q/T < -3,1$ ), estão representadas encostas igualmente instáveis, contudo, não saturadas, o que obviamente as qualifica imediatamente abaixo das crônicas na escala de suscetibilidade aos escorregamentos proposta por este modelo.

Nesta sequência lógica, as encostas representadas em rosa são instáveis, saturadas, entretanto, menos declivosas, o que as qualifica como medianamente instáveis ( $-3,1 < \log q/T < -2,8$ ). Representadas na cor laranja ( $-2,8 < \log q/T < -2,5$ ) as encostas pouco instáveis diferem daquelas em rosa por não estarem saturadas. Em amarelo ( $-2,5 < \log q/T < -2,2$ ) estão os locais estáveis e não saturados, ainda de declividades moderadas. Em verde ( $\log q/T > -2,2$ ) e azul representou-se as encostas incondicionalmente estáveis não saturadas e saturadas,

respectivamente, pouco declivosas, o que confere a cor verde a alcinha de medianamente estáveis e a azul de incondicionalmente estáveis.

Figura 62 – Resultado da aplicação do SHALSTAB na área de estudo com a sobreposição dos locais das cicatrizes de escorregamentos.



É visualizado que todas as classes de estabilidade ocorrem na área de estudo, entretanto, a classe incondicionalmente instável ocupa 725,12 hectares, o

que equivale a 32,43%. Adicionalmente, a classe incondicionalmente estável responde por 646 hectares, ou 28,89% da área total. Então é observado que mais de 60 % da área de estudo divide-se entre duas classes de estabilidade. A Tabela 18 apresenta as classes de estabilidade, suas áreas absolutas, percentuais, bem como o quanto destas classes foram modeladas para áreas sombreadas nas imagens que se dispõe na área de estudo.

Tabela 18 – Classes zoneadas para o SHALSTAB, área absoluta e percentual.

Classe	Total hectares	%	Sombra (ha)	Total visível (ha)
Incondicionalmente Instável	725,12	32,43	347,62	377,49
$\log q/T < -3,1$	203,26	9,09	97,50	105,76
$-3,1 < \log q/T < -2,8$	87,86	3,93	47,76	40,10
$-2,8 < \log q/T < -2,5$	130,16	5,82	55,76	74,40
$-2,5 < \log q/T < -2,2$	157,45	7,04	46,14	111,31
$\log q/T > -2,2$	286,30	12,80	45,08	241,23
Incondicionalmente Estável	646	28,89	94,52	551,47
<b>Total</b>	<b>2236,14</b>	<b>100,00</b>	<b>734,38</b>	<b>1501,77</b>

A análise conjunta da Figura 62 e da Tabela 18 confirma que a natureza fisiográfica da área controla a modelagem das classes de estabilidade, pela dominância de locais incondicionais aos escorregamentos, ou incondicionais à estabilidade. Inicialmente, explicar-se-á a natureza das áreas com encostas estáveis segundo este modelo, e que ocorrem em 4 compartimentos distintos no interior da área de estudo:

1 – Terrenos com cotas altimétricas inferiores, em sua maioria coincidentes com a UG 1, nitidamente à leste na Figura 66, constituindo a planície local, área densamente ocupada por pequenas propriedades;

2 – Bordo do planalto, área de baixa declividade em cotas elevadas, no extremo oeste da área de estudo;

3 – Patamares estruturais, situados em cotas altimétricas intermediárias na área de estudo, representados pela já descrita UG 3;

4 – Afloramentos rochosos, diferente das três situações anteriores em que a baixa declividade conferiu estabilidade ao terreno, neste caso, foi a ausência de substrato friável passível de escorregar.

Em relação às áreas instáveis, sabe-se que o grande objetivo de um modelo é prever um acontecimento, neste caso, classificou-se 32,43% da área de



estudo como crônica aos escorregamentos. Estes locais, representados na cor bordô da Figura 66, são calculados matematicamente pelo modelo, contudo, fisicamente é natural que em algum evento pretérito já tenham escorregado, pela associação de terrenos altamente declivosos, grande área de contribuição, ou seja, são vertentes extensas, além de solos razoavelmente profundos ( $> 1,5\text{m}$ ) para estes ambientes. Além disso, muitos locais ao centro da área de estudo foram assim classificados por estarem vinculados à uma morfologia côncava, de concentração de fluxos de água na meia encosta, ou seja, vertentes côncavas-convergentes. Explicando-se estas duas classes majoritárias e incondicionais para de estabilidade e instabilidade, viu-se que as demais constituem transições gradacionais entre as classes dominantes, com as classes entre  $\log q/T < -3,1 < -2,2$ , locais em que há material disponível associado à probabilidade física de ocorrerem novos escorregamentos.

Como mais de um terço da área foi classificada como incondicionalmente instável, espera-se que haja coincidência espacial das cicatrizes restituídas dentro deste zoneamento. Além disso, é de se esperar que novos eventos de escorregamentos ocorram nestes locais e, preferencialmente, nos intervalos inferiores, inclusive, com grande frequência, pela predominância das forças cisalhantes. Aliás, a floresta pode ser o fator de desempate, que sustenta estas encostas, mesmo mediante tendência de escorregarem, mas admite-se que suas variáveis de coesão de raízes e sobrecarga não foram incluídas nesta avaliação.

Pela visualização da Figura 62 pode-se afirmar que o modelo poderá contribuir para a predição de áreas de uma encosta que estão sujeitas a sofrer com escorregamentos, contudo, também apresentará limitações para locação destas áreas. Esta constatação reforçou a importância da proposição de um objetivo específico deste trabalho, de utilizar-se do inventário com o posicionamento acurado de antigas cicatrizes de escorregamentos para calibrar/validar o modelo de estabilidade de encostas.

Por fim, a análise da Figura 62 permitiu a comparação, por acuidade visual, entre os eventos e as classes de estabilidade subpostas. Assim, os centroides das cicatrizes de escorregamentos restituídas para 1957 e 1978 também foram representados sobre o *raster* final obtido pela aplicação do modelo SHALSTAB. Contudo, só a validação visual não foi suficiente, mesmo que, aparentemente, a grande soma das cicatrizes restituídas coincida com áreas

passíveis de escorregar no futuro, há a necessidade de verificar a sensibilidade e especificidade do modelo. Isso somente será possível pela aplicação de estatísticas de acerto e erro, comparando o que foi restituído no passado (cicatrices), com o predito (modelo).

#### **5.3.4 Validação do modelo SHALSTAB**

A validação do desempenho foi realizada pela quantificação da coincidência espacial das antigas cicatrices com as áreas modeladas como instáveis, ou de alta e muito alta suscetibilidade aos escorregamentos. Quanto maior esta coincidência, maior a capacidade discriminante e eficácia dos modelos executados.

Complementarmente, também é fator de validação a constatação da menor intersecção de cicatrices inventariadas e classes modeladas como baixa e muito suscetibilidade aos escorregamentos. A verificação das intersecções do posicionamento das cicatrices componentes do inventário com os modelos preditivos e reconstitutivos deu-se pela aplicabilidade do Índice de Acerto (IA), e Índice de Erro (IE), como mencionado no capítulo dos procedimentos metodológicos.

Contudo, antes que estes índices fossem aplicados, se fez necessária dedução da área absoluta de sombra do total de cada classe de suscetibilidade. Isso porque os modelos obtidos zoneiam o total da área de estudo dentre todas as classes de suscetibilidade, já o inventário de cicatrices só pôde ser elaborado sobre as áreas fora das sombras. Assim, entende-se como factível somente validar modelagem executada fora de área de sombra, uma vez que não existem cicatrices mapeadas em área de sombra, não podendo validá-las diretamente.

A primeira etapa consistiu em deduzir as áreas de sombras de cada classe de suscetibilidade, objetivando validar as vertentes que contavam com prévio inventário de cicatrices. A Tabela 19 traz um exemplo da dedução das áreas de sombra para o mapa final do modelo SHALSTAB. Nesta tabela são apresentadas as áreas absolutas ocupadas por cada classe, acompanhada de seu percentual. Neste sentido, ganha notoriedade as áreas mapeadas como incondicionalmente instáveis, com 32,43 % da área de estudo enquadrada nesta classe.

Tabela 19 – Quantitativos com áreas de sombra incidentes.

Classe	Área (ha)	%	Sombra (ha)	Área - sombra (ha)	%
Incondicionalmente Instável	725,12	32,43	347,62	377,49	25,14
$\log q/T < -3,4$	153,49	6,86	69,14	84,35	5,62
$-3,4 < \log q/T < -3,3$	13,05	0,58	7,30	5,76	0,38
$-3,3 < \log q/T < -3,2$	16,51	0,74	9,44	7,07	0,47
$-3,2 < \log q/T < -3,1$	20,20	0,90	11,61	8,58	0,57
$-3,1 < \log q/T < -3,0$	24,29	1,09	13,58	10,71	0,71
$-3,0 < \log q/T < -2,9$	29,37	1,31	16,24	13,12	0,87
$-2,9 < \log q/T < -2,8$	34,20	1,53	17,94	16,26	1,08
$-2,8 < \log q/T < -2,7$	38,97	1,74	18,73	20,24	1,35
$-2,7 < \log q/T < -2,6$	43,42	1,94	18,73	24,69	1,64
$-2,6 < \log q/T < -2,5$	47,78	2,14	18,30	29,48	1,96
$-2,5 < \log q/T < -2,4$	51,76	2,31	17,34	34,42	2,29
$-2,4 < \log q/T < -2,3$	53,33	2,38	15,60	37,73	2,51
$-2,3 < \log q/T < -2,2$	52,37	2,34	13,21	39,16	2,61
$\log q/T > -2,2$	286,30	12,80	45,08	241,23	16,06
Incondicionalmente Estável	646,00	28,89	94,52	551,47	36,72
<b>Total</b>	<b>2236,14</b>	<b>100</b>	<b>734,38</b>	<b>1501,77</b>	<b>100</b>

Entretanto, estas áreas são reconhecidamente muito declivosas e de grande amplitude altimétrica, ou seja, possuem vales profundos que não foram imageados, ou seja, do total de 725,12 hectares, há 347,62 hectares de sombra. Retirando-se as áreas de sombra superpostas ao modelo gerado, esta classe de suscetibilidade passa a representar 25,14% da área de estudo. O contrário ocorre em áreas de relevo menos acidentado, por exemplo, a classe de incondicionalmente estável, proporcionalmente com menos sombra, passa de 28,89 % para 36,72 % do total da área de estudo, quando deduzidas as sombras.

Sendo assim, utilizou-se das informações da área absoluta diminuída das sombras incidentes, para os cálculos de IA e IE das classes de suscetibilidade do modelo. Diante do fato de ter-se inventário de cicatrizes para 1957 e para 1978, pôde-se comparar o mapa final modelado com os dois inventários e a sua combinação. Um exemplo destas estatísticas de acerto e erro é apresentado na Tabela 20, em que se calculou o IA e IE do *raster* final do modelo SHALSTAB, utilizando-se das cicatrizes de 1957, de 1978 e o total destas.

Seguindo o enunciado por Sorbino *et al.* (2010), a melhor relação IA/IE descreve melhor o fenômeno. Já Dietrich *et al.* (2001) apontam que a melhor explicação se dá quando as cicatrizes de escorregamentos coincidem com as classes instáveis, ou de alta suscetibilidade aos escorregamentos, e estas representam pequena porcentagem do total da área de estudo. Pela Tabela 20, a validação efetuada da classe representada na primeira linha, pelas cicatrizes de 1957, resulta numa razão IA/IE de 2,04, enquanto, pelas cicatrizes de 1978, o valor

da razão é 1,12 já pela combinação o resultado é de 1,61. Considerando a razão obtida entre IA/IE, e as premissas dos autores supracitados, pôde-se concluir que o inventário de cicatrizes de 1957 é o que melhor valida a classe de incondicionalmente instável no modelo gerado, diferentemente daquele de 1978, que valida melhor as demais classes de suscetibilidade.

Tabela 20 – Índices de Acerto e de Erro para as classes do modelo Shalstab.

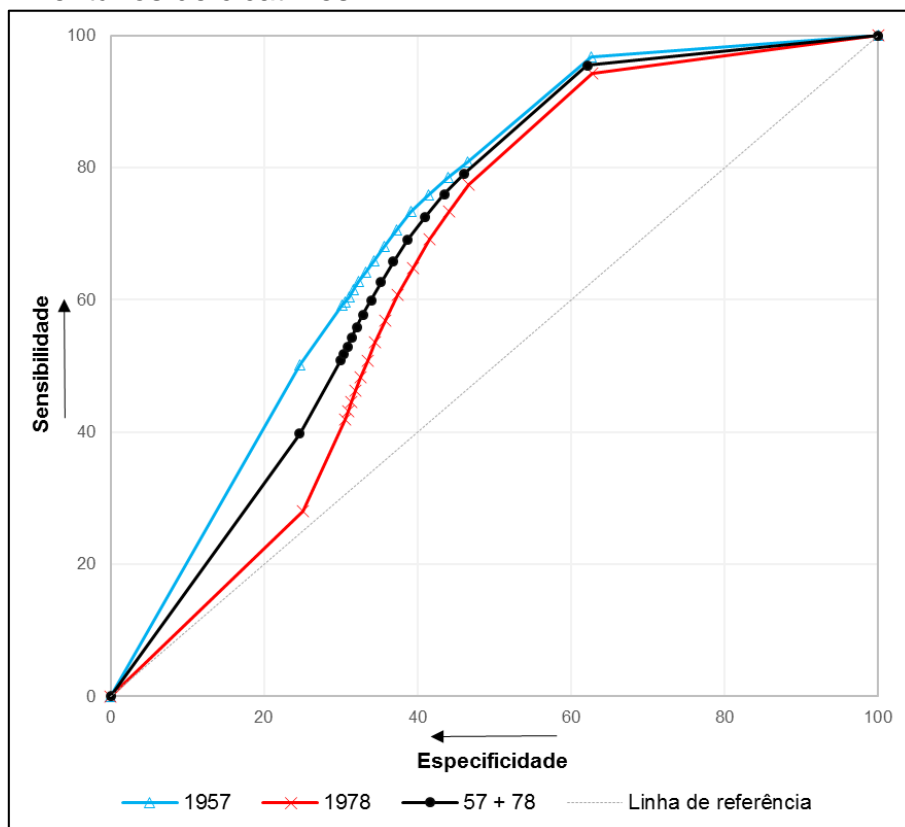
Classe	Cicatrizes 1957			Cicatrizes 1978			Total de cicatrizes		
	IA	IE	IA/IE	IA	IE	IA/IE	IA	IE	IA/IE
Incondicionalmente Instável	50,24	24,67	2,04	28,06	25,09	1,12	39,74	24,61	1,61
$\log q/T < -3,4$	8,90	5,56	1,60	13,86	5,47	2,53	11,21	5,42	2,07
$-3,4 < \log q/T < -3,3$	0,60	0,38	1,58	1,24	0,37	3,35	0,90	0,36	2,50
$-3,3 < \log q/T < -3,2$	0,77	0,47	1,64	1,41	0,45	3,13	1,07	0,45	2,38
$-3,2 < \log q/T < -3,1$	1,06	0,56	1,89	1,72	0,55	3,13	1,36	0,54	2,52
$-3,1 < \log q/T < -3,0$	1,21	0,70	1,73	2,09	0,69	3,03	1,61	0,68	2,37
$-3,0 < \log q/T < -2,9$	1,40	0,86	1,63	2,46	0,85	2,89	1,88	0,84	2,24
$-2,9 < \log q/T < -2,8$	1,74	1,07	1,63	2,76	1,05	2,63	2,21	1,04	2,13
$-2,8 < \log q/T < -2,7$	2,13	1,33	1,60	3,35	1,31	2,56	2,70	1,30	2,08
$-2,7 < \log q/T < -2,6$	2,52	1,63	1,55	3,87	1,60	2,42	3,15	1,59	1,98
$-2,6 < \log q/T < -2,5$	2,75	1,95	1,41	4,04	1,93	2,09	3,36	1,91	1,76
$-2,5 < \log q/T < -2,4$	2,60	2,29	1,14	4,26	2,26	1,88	3,40	2,25	1,51
$-2,4 < \log q/T < -2,3$	2,62	2,51	1,04	4,27	2,48	1,72	3,41	2,48	1,38
$-2,3 < \log q/T < -2,2$	2,37	2,61	0,91	4,04	2,58	1,57	3,17	2,59	1,22
$\log q/T > -2,2$	15,88	16,07	0,99	16,78	16,05	1,05	16,32	16,05	1,02
Incondicionalmente Estável	3,21	37,34	0,09	5,79	37,26	0,16	4,53	37,88	0,12
<b>Total</b>	100	100		100	100		100	100	

A análise de IA e IE para cada classe, fornece respostas pelo cálculo de sua razão, contudo, se inserida numa visualização gráfica oferta uma resposta sintética. Para essa verificação gráfica foi adotada como métrica de desempenho da predição dos modelos as curvas ROC - *Receiver Operating Characteristic*. A curva define se o modelo tem sensibilidade e especificidade e, para esta aplicação, os resultados cumulativos dos cálculos de IA e IE de cada classe do modelo, Tabela 20, foram plotados no espaço bidimensional, sendo IA = Y e IE = X, definido como espaço ROC, Figura 63. É fato que enquanto a sensibilidade cresce com o eixo das ordenadas, pelo maior acerto do modelo em predizer verdadeiros positivos, a especificidade decresce em direção à zero no eixo das abcissas, discriminando adequadamente os verdadeiros negativos.

Através da Figura 63 vê-se nos pontos de cada série a representação bidimensional dos pares IA x IE da Tabela 20. A interpretação das curvas evidencia

que todas estão acima da linha de referência do espaço ROC, assim, o mapa final obtido pela modelagem com uso do SHALSTAB é validado pelas cicatrizes de escorregamentos dos inventários. Ao inflexionar para o canto superior esquerdo do espaço ROC a curva formada pela ligação dos pontos da série de 1957 indica melhor a discriminação de locais, na área de estudo, como verdadeiros positivos (maior sensibilidade) e verdadeiros negativos (maior especificidade) aos escorregamentos. Assim, é constatado que o inventário de cicatrizes de 1957 é mais qualificado para validar o modelo preditivo executado por via determinística.

Figura 63 – Curvas ROC para o modelo SHALSTAB, validado pelos inventários de cicatrizes.



No espaço ROC, que varia de 0 a 1, quanto mais próximo de 1 melhor é o desempenho do modelo avaliado neste classificador binário, que seria perfeitamente sensível e específico com esta pontuação. A área sob a curva – AUC, é uma medida de probabilidade de que o classificador tenha escolhido aleatoriamente uma instância positiva com valor mais alto que uma negativa. Resultados acima de 0,5 indicam classificações positivas maiores que negativas. De acordo com a Figura 83 é possível calcular a AUC para cada série, usando-se da média de um número de

aproximações trapezoidais, Tabela 21, como já feito por Hadian-Amri *et al.* (2014) para suas estimações de curvas.

O cálculo da AUC para o modelo de estabilidade de encostas SHALSTAB, validado pelas cicatrizes de escorregamentos de 1957, totalizou 0,66 e, com o uso de cicatrizes de 1978, obteve-se 0,62, confirmando numericamente a visualização já averiguada pela Figura 63, de que há maior AUC utilizando-se da validação pelas cicatrizes de 1957. O resultado de AUC 0,66 indica um modelo razoável, sendo esta a melhor performance encontrada pelo emprego do SHALSTAB para a área de estudo. A título de exemplo, Silalahi, Arifianti e Hidayat (2019) obtiveram em seus estudos em território indonésio valor da AUC para o modelo de predição de 0,873. Segundo os autores, o resultado deste trabalho para o SHALSTAB mostrou que o modelo é razoável, porque o valor de AUC obtido excede o limite mínimo de 0,6.

Tabela 21 – Cálculo da AUC a partir das curvas ROC de validação do modelo SHALSTAB.

1957			1978			1957 + 1978		
Y	X	Área	Y	X	Área	Y	X	Área
0	0		0	0		0	0	
50,24	24,67	619,73	28,06	25,09	351,95	39,74	24,61	488,98
59,14	30,23	303,84	41,91	30,56	191,49	50,95	30,03	245,55
59,74	30,61	22,55	43,16	30,93	15,67	51,85	30,39	18,75
60,50	31,07	27,96	44,57	31,38	19,92	52,91	30,84	23,53
61,56	31,63	34,34	46,29	31,93	25,05	54,27	31,38	29,11
62,77	32,34	43,77	48,38	32,62	32,63	55,88	32,06	37,52
64,17	33,20	54,85	50,84	33,47	41,98	57,76	32,90	47,60
65,91	34,27	69,64	53,60	34,52	55,03	59,97	33,94	61,36
68,04	35,61	89,29	56,95	35,83	72,57	62,67	35,24	79,67
70,57	37,23	112,79	60,82	37,44	94,51	65,82	36,83	102,13
73,32	39,18	140,15	64,86	39,37	121,07	69,18	38,75	129,10
75,91	41,47	170,58	69,12	41,62	151,23	72,58	41,00	159,60
78,54	43,98	193,87	73,39	44,11	176,85	75,99	43,48	184,25
80,91	46,59	208,24	77,43	46,69	194,75	79,15	46,07	200,71
96,79	62,66	1427,46	94,21	62,74	1377,43	95,47	62,12	1401,71
100	100	3674,40	100	100	3618,24	100	100	3702,28
Soma		6573,7	Soma		6188,41	Soma		6422,8
<b>AUC</b>		<b>0,66</b>	<b>AUC</b>		<b>0,62</b>	<b>AUC</b>		<b>0,64</b>

É conhecido que o modelo SHALSTAB apresenta maior flexibilidade e capacidade de inserção de condições de contorno, melhorando sua performance na medida em que se dispõe de maior quantidade de resultados de campo e de laboratório. Complementarmente, este modelo representa processos não tangíveis por análises multicritérios, a exemplo da integração com o MHEU e, principalmente,



resulta em mapas de melhor escala, podendo-se avançar de reconhecimentos generalistas de uma área de estudo para especificidade de uma encosta, por exemplo.

Entretanto, contrariando a expectativa inicial de ter-se obtidos valores de AUC 0,7, ou superiores, verificou-se que isto somente poderá ser alcançado com estudos complementares nas unidades geotécnicas definidas, com maiores esforços de ensaios de campo em trabalhos posteriores. Um modelo robusto necessita de condições de contorno iniciais melhor acuradas, a qualidade da informação de saída é proporcional ao esforço que se faz no aporte inicial. Para este estudo, os problemas de campo na primeira incursão, que impossibilitaram ensaios *in situ*, combinada com as dificuldades de acessar os locais (ausência de trilhas e distâncias) comprometeram a qualidade do modelo final, contudo, demonstraram seu potencial, que poderá ser aprimorada por estudos subsequentes.

#### 5.4 MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE À ESCORREGAMENTOS PELA ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Uma vez estabelecidas as densidades normalizadas ( $D_n$ ) de cada classe de cada fator predisponente, a partir do inventário de cicatrizes (Tabela 12), a análise multicritério foi aplicada pela combinação deste viés estatístico de pesos normalizados das classes dos fatores com a AHP. Como já mencionado no item 4.5.1, a AHP trata-se de uma estruturação multicritérios, de definição de hierarquias dos fatores predisponentes elencados para averiguar a suscetibilidade aos escorregamentos.

Esta hierarquização prescinde que os fatores sejam comparados aos pares, na Escala Fundamental de Saaty, decompondo um sistema complexo, entendendo-o por partes. Essa comparação não pode ser aleatória, da mesma forma, deve haver coerência nas comparações, fruto de uma bagagem técnica, vivência e conhecimento do que se está valorando. Da mesma forma, uma hierarquização de fatores que reúna diferentes conhecimentos prévios contemplará diferentes pontos de vista, estimando-se médias de magnitudes de dominância de fatores, minimizando desvios e falhas de julgamento.

Mediante o já detalhado ao longo do trabalho, e aqui brevemente recapitulado, elencou-se grupo de especialistas de diferentes instituições de ensino

e/ou pesquisa, reconhecidamente com pesquisas desenvolvidas na área de escorregamentos em encostas, para que os mesmos respondessem individualmente a importância de fatores determinantes para esta tipologia de movimento de massa. A escolha dos respectivos especialistas deu-se por indicação de outros profissionais, complementada pela busca em *websites* de instituições que apresentavam a relação do seu quadro técnico vinculado com a problemática dos escorregamentos.

A Tabela 22 apresenta o número de entrevistados, suas formações e as instituições a qual estão vinculados, de um total de 20 solicitações para participação, das quais 8 foram atendidas. Cada entrevistado recebeu um instrumento para participar, com o escopo da pesquisa, contexto, instruções para participação, fatores pareados para assinalar, juntamente com o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido – TCLE. Um modelo de questionário aplicado a um dos especialistas está apresentado no Apêndice D e o TCLE na sequência, no Apêndices E.

Tabela 22 – Especialistas entrevistados para estabelecer a escala de importância dos fatores.

Entrevistado	Formação	Instituição
1	Geólogo, Dr.	CPRM
2	Eng. Ambiental, Dr.	UFRGS
3	Geólogo, Dr.	UNICAMP
4	Geólogo, Dr.	CEMADEN
5	Cientista Florestal, Dr.	UFRGS
6	Engenheiro Civil, Dr.	UFSC
7	Geógrafo, Dr.	UFSC
8	Engenheiro Civil, Dr.	CEMADEN

Após o recebimento das respostas de cada especialista, com os julgamentos da importância de um fator sobre outro, de pontos de vista inicialmente subjetivos, montou-se uma matriz quadrada de comparação paritária de julgamentos ( $n=7$ ) para cada um dos entrevistados. A intenção foi de, a partir da matriz de comparação, buscar a transformação e normalização da mesma, para obtenção dos autovetores, ou seja, da hierarquia do conjunto de fatores. Todo o procedimento de aplicação da metodologia da AHP, a partir da resposta inicial de um especialista, segue detalhado no Apêndice F.

De maneira ilustrativa, é apresentado e explicado o passo-a-passo de aplicação do método a partir das respostas de um destes participantes, escolhido

aleatoriamente. Inicialmente, examinando-se as respostas assinaladas no questionário respondido, foi montada a matriz de comparação, Tabela 23.

Tabela 23 – Matriz de comparação paritária de julgamentos.

Parâmetros	Declividade	Hipsometria	Litologia	Tipo de solo	Formas do terreno	Cobertura do solo	Orientação das vertentes
<b>Declividade</b>	1	7	5	1/3	1	1/3	5
<b>Hipsometria</b>	1/7	1	1/7	1/7	1/9	1/9	1
<b>Litologia</b>	1/5	7	1	1/3	1/5	1/5	5
<b>Tipo de solo</b>	3	7	3	1	3	1/5	7
<b>Formas do terreno</b>	1	9	5	1/3	1	1	7
<b>Cobertura do solo</b>	1	9	5	1/3	1	1	7
<b>Orientação das vertentes</b>	1/7	1	1/5	1/7	1/7	1/7	1

Na sequência desta exemplificação, a matriz de comparação foi transformada para números inteiros, para facilitar as operações, bem como, acrescida uma linha com as somas de cada coluna ( $\omega$ ), Tabela 24. Em seguida, normalizou-se a matriz transformada, pela divisão de cada elemento da matriz pela soma obtida na respectiva coluna, resultando na soma igual a unidade 1 (Tabela 25).

Tabela 24 – Matriz de comparação transformada e com números inteiros.

Parâmetros	Declividade	Hipsometria	Litologia	Tipo de solo	Formas do terreno	Cobertura do solo	Orientação das vertentes
<b>Declividade</b>	1	7	5	0,33	1	0,33	5
<b>Hipsometria</b>	0,14	1	0,14	0,14	0,11	0,11	1
<b>Litologia</b>	0,2	7	1	0,33	0,2	0,2	5
<b>Tipo de solo</b>	3	7	3	1	3	0,2	7
<b>Formas do terreno</b>	1	9	5	0,33	1	1	7
<b>Cobertura do solo</b>	1	9	5	0,33	1	1	7
<b>Orientação das vertentes</b>	0,14	1	0,2	0,14	0,14	0,14	1
<b>SOMA (<math>\omega</math>)</b>	6,49	41	19,34	2,62	6,45	2,99	33

Uma vez estando normalizada, a obtenção do autovetor de cada fator componente da matriz dá-se pela média aritmética de cada linha, sendo este normalizado representado em percentual (Tabela 26). O resultado do autovetor (pesos) forneceu a hierarquia, ou ordem de prioridade, dos 7 fatores que foram

comparados, mostrando a importância de cada um na análise do especialista exemplificado, sendo que o critério declividade respondeu por 16,12 %, a hipsometria 2,76 %, a litologia 9 %, o tipo de solo 27,34 %, as formas do terreno 20,88 %, cobertura do solo 20,88 %, orientação das vertentes 3,02 %. O cômputo dos 7 fatores predisponentes aos escorregamentos totalizou 100 %.

Tabela 25 – Matriz de comparação normalizada.

Parâmetros	Declividade	Hipsometria	Litologia	Tipo de solo	Formas do terreno	Cobertura do solo	Orientação das vertentes
Declividade	0,15	0,17	0,26	0,13	0,15	0,11	0,15
Hipsometria	0,02	0,02	0,01	0,05	0,02	0,04	0,03
Litologia	0,03	0,17	0,05	0,13	0,03	0,07	0,15
Tipo de solo	0,46	0,17	0,16	0,38	0,46	0,07	0,21
Formas do terreno	0,15	0,22	0,26	0,13	0,15	0,33	0,21
Cobertura do solo	0,15	0,22	0,26	0,13	0,15	0,33	0,21
Orientação das vertentes	0,02	0,02	0,01	0,05	0,02	0,05	0,03
SOMA	1	1	1	1	1	1	1

Tabela 26 – Matriz normalizada e cálculo dos autovetores.

Parâmetros	Declividade	Hipsometria	Litologia	Tipo de solo	Formas do terreno	Cobertura do solo	Orientação das vertentes	Pesos (médias)	Somas	T - Autovetor normalizado %
Declividade	0,15	0,17	0,26	0,13	0,15	0,11	0,15	<b>0,161</b>	1,13	16,12
Hipsometria	0,02	0,02	0,01	0,05	0,02	0,04	0,03	<b>0,028</b>	0,19	2,76
Litologia	0,03	0,17	0,05	0,13	0,03	0,07	0,15	<b>0,090</b>	0,63	9,00
Tipo de solo	0,46	0,17	0,16	0,38	0,46	0,07	0,21	<b>0,273</b>	1,91	27,34
Formas do terreno	0,15	0,22	0,26	0,13	0,15	0,33	0,21	<b>0,209</b>	1,46	20,88
Cobertura do solo	0,15	0,22	0,26	0,13	0,15	0,33	0,21	<b>0,209</b>	1,46	20,88
Orientação das vertentes	0,02	0,02	0,01	0,05	0,02	0,05	0,03	<b>0,030</b>	0,21	3,02
SOMA	1	1	1	1	1	1	1	<b>1</b>	7	100

A princípio, pela hierarquia obtida, poder-se-ia aplicar a álgebra de mapas, multiplicando o autovetor de cada fator pelas densidades normalizadas das classes respectivas de cada fator, obtendo-se modelos restituídos (Tabela 12). Ocorre que a simples obtenção dos autovetores não significa que cada um dos critérios da análise esteja ponderando de acordo com uma Razão de Consistência (RC), obtida pela divisão entre o Índice de Consistência pela Consistência Aleatória. Diante disso, executou-se a análise de sensibilidade do método, indicativa do relacionamento lógico dos julgamentos.

Para o cálculo da RC utilizou-se da matriz de comparação transformada normalizada pelos autovetores anteriormente obtidos, Tabela 27. Em seguida,

efetuou-se a soma de cada linha e a dividiu pelos autovetores (pesos) já obtidos anteriormente. Por fim, somando-se os resultados da coluna (soma/prioridade), e dividindo o resultado pelo número de fatores, obteve-se o autovalor máximo ( $\lambda_{\text{máx}}$ ), Tabela 28.

Tabela 27 – Cálculo da Razão de Consistência.

Parâmetros	Declividade	Hipsometria	Litologia	Tipo de solo	Formas do terreno	Cobertura do solo	Orientação das vertentes
Declividade	0,16	0,19	0,45	0,09	0,21	0,07	0,15
Hipsometria	0,02	0,03	0,01	0,04	0,02	0,02	0,03
Litologia	0,03	0,19	0,09	0,09	0,04	0,04	0,15
Tipo de solo	0,48	0,19	0,27	0,27	0,63	0,04	0,21
Formas do terreno	0,16	0,25	0,45	0,09	0,21	0,21	0,21
Cobertura do solo	0,16	0,25	0,45	0,09	0,21	0,21	0,21
Orientação das vertentes	0,02	0,03	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03
Pesos (prioridade)	0,161	0,028	0,090	0,273	0,209	0,209	0,030

Tabela 28 – Cálculo da Razão de Consistência: obtenção do autovalor máximo.

Parâmetros	Somas dos pesos	Pesos	Soma/Prioridade	Autovalor Max %
Declividade	1,32	0,161	8,22	
Hipsometria	0,18	0,028	6,50	
Litologia	0,64	0,09	7,12	
Tipo de solo	2,10	0,273	7,68	
Formas do terreno	1,58	0,209	7,57	
Cobertura do solo	1,58	0,209	7,57	
Orientação das vertentes	0,20	0,030	6,54	
Pesos (prioridade)			51,19	<b>7,31</b>

Com o autovalor máximo empregou-se o cálculo do Índice de Consistência (Tabela 29), dividindo-o pela consistência aleatória, resultando numa RC de 3,94 %, ou seja, < 10 % e válida.

Tabela 29 – Cálculo final do Índice de Consistência e Razão de Consistência.

Índice de Consistência=	0,052	
Consistência aleatória (n=7)	1,32	
		%
RC = IC / Ca	0,039	<b>3,94</b>

Os mesmos procedimentos foram executados para todos os especialistas que responderam à pesquisa. Em seguida os especialistas apresentados na Tabela 22 receberam aleatoriamente a alcunha de “A a H”. As hierarquias estabelecidas

entre os fatores foram organizadas em cada coluna, sendo apresentada a RC dos julgamentos de cada entrevistado. Como pode ser visto na Tabela 30, os resultados obtidos para os especialistas “E” e “H” não lograram consistência, mesmo sendo consultados mais que uma vez, como parte do método Delphi. Se utilizados estes dados, a RC média registrava 14,236 %, acima do preconizado como aceitável na literatura. Desta forma, a alternativa foi retirar os pesos obtidos pela participação destes, pela justificada ausência da RC, compondo uma média dos autovetores obtidos pelas respostas dos demais participantes, Tabela 31.

Tabela 30 – Média dos autovetores para cada fator com base na opinião dos participantes.

Fatores	A	B	C	D	E	F	G	H	Média
Declividade	0,161	0,363	0,462	0,415	0,345	0,170	0,315	0,427	<b>0,332</b>
Hipsometria	0,028	0,030	0,143	0,032	0,020	0,056	0,032	0,037	<b>0,047</b>
Litologia	0,090	0,165	0,033	0,158	0,201	0,028	0,315	0,071	<b>0,133</b>
Tipo de solo	0,273	0,183	0,070	0,095	0,201	0,475	0,125	0,141	<b>0,196</b>
Formas do terreno	0,209	0,167	0,142	0,205	0,106	0,050	0,081	0,231	<b>0,149</b>
Cobertura do solo	0,209	0,034	0,040	0,064	0,108	0,137	0,108	0,071	<b>0,096</b>
Orientação das vertentes	0,030	0,058	0,110	0,031	0,020	0,083	0,025	0,022	<b>0,047</b>
<b>RC</b>	3,941	9,425	5,443	9,945	<u>36,760</u>	1,776	<u>41,290</u>	5,309	<b><u>14,236</u></b>

Tabela 31 – Média dos autovetores cujos julgamentos apresentaram RC.

Fatores	A	B	C	D	F	H	Média
Declividade	0,161	0,363	0,462	0,415	0,170	0,427	<b>0,333</b>
Hipsometria	0,028	0,030	0,143	0,032	0,056	0,037	<b>0,054</b>
Litologia	0,090	0,165	0,033	0,158	0,028	0,071	<b>0,091</b>
Tipo de solo	0,273	0,183	0,070	0,095	0,475	0,141	<b>0,206</b>
Formas do terreno	0,209	0,167	0,142	0,205	0,050	0,231	<b>0,167</b>
Cobertura do solo	0,209	0,034	0,040	0,064	0,137	0,071	<b>0,092</b>
Orientação das vertentes	0,030	0,058	0,110	0,031	0,083	0,022	<b>0,056</b>
<b>Razão de Consistência</b>	3,941	9,425	5,443	9,945	1,776	5,309	<b>5,973</b>

Com RC de apenas 5,973 %, ou seja, validado, utilizou-se as médias dos autovetores de cada fator predisponente aos escorregamentos para compor os coeficientes multiplicadores de cada classe de cada fator. Estes resultados foram associados na forma de uma equação, passível de ser inserida numa calculadora *raster* de *software* de geoprocessamento (Equação 17), para efetuar a álgebra de mapas.



$$(0,333 * "Declividade") + (0,054 * "Hipsometria") + (0,091 * "Litologia") + (0,206 * "Tipo de Solo") + (0,167 * "Formas do terreno") + (0,092 * "Cobertura do solo") + (0,056 * "Orientação das vertentes") \quad (17)$$

#### 5.4.1 Aplicação do modelo teórico

Pela conjugação da Equação (17) com os valores atribuídos para cada classe dos fatores predisponentes, Tabela 12, pôde-se dar início à modelagem preditiva e de restituição para os escorregamentos. Pelas densidades normalizadas da incidência de escorregamentos nas classes atribuiu-se pesos à estas, o que foi dado de entrada para modelagem de restituição dos escorregamentos registrados nas fotografias aéreas de 1957 e 1978, a ser apresentado no item subsequente. Entretanto, antes desta etapa, postulou-se pesos teóricos para efetuar-se uma modelagem dissociada de inventário de cicatrizes, ou seja, para prognóstico, ou de referência para autores que não possuem inventários de cicatrizes.

Para se obter um mapa hipotético de suscetibilidade aos escorregamentos na área de estudo, o primeiro passo consistiu em atribuir pesos teóricos às classes de cada fator predisponente, em seguida, reclassificar o dado matricial com a inserção destes atributos. Exemplo da etapa de reclassificação dos mapas base dos fatores é apresentado na Figura 64-a, em que a Hipsometria, com 8 classes, recebeu pesos equidistantes de 0,125 (no intervalo de 0 a 1) gradualmente mais altos, conforme cotas mais elevadas, ou ainda, na Figura 64-b, em que declividades mais altas receberam maiores pesos, ou seja, foi atribuída maior chance de escorregamentos em locais altos e declivosos. A relação dos pesos teóricos atribuído às classes também foi acrescida na Tabela 12.

Ainda pela Figura 64, de “c” até “g”, os demais fatores também foram reclassificados, seguindo a coerência teórica de que escorregamentos na área de estudo ocorrem majoritariamente em terrenos côncavos, voltados para o sul, sobre neossolos residuais de basaltos e locais não florestados. Com os mapas dos fatores reclassificados por pesos teóricos, utilizando-se da hierarquia apresentada pela Equação (15), foi obtido o mapa final do modelo teórico, preditivo aos escorregamentos na área de estudo, Figura 65.

Figura 64 – Fatores predisponentes reclassificados pelos pesos teóricos.

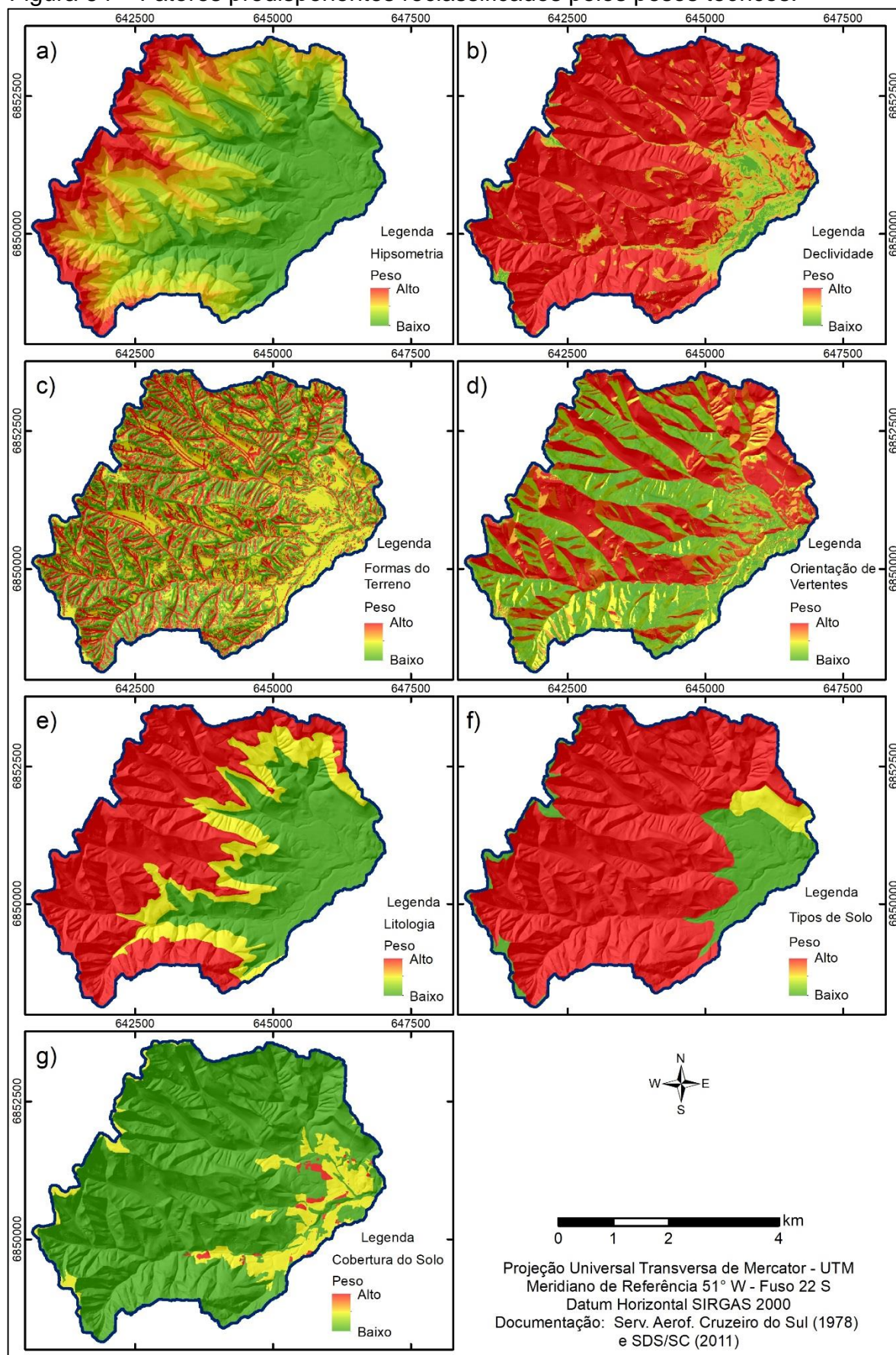
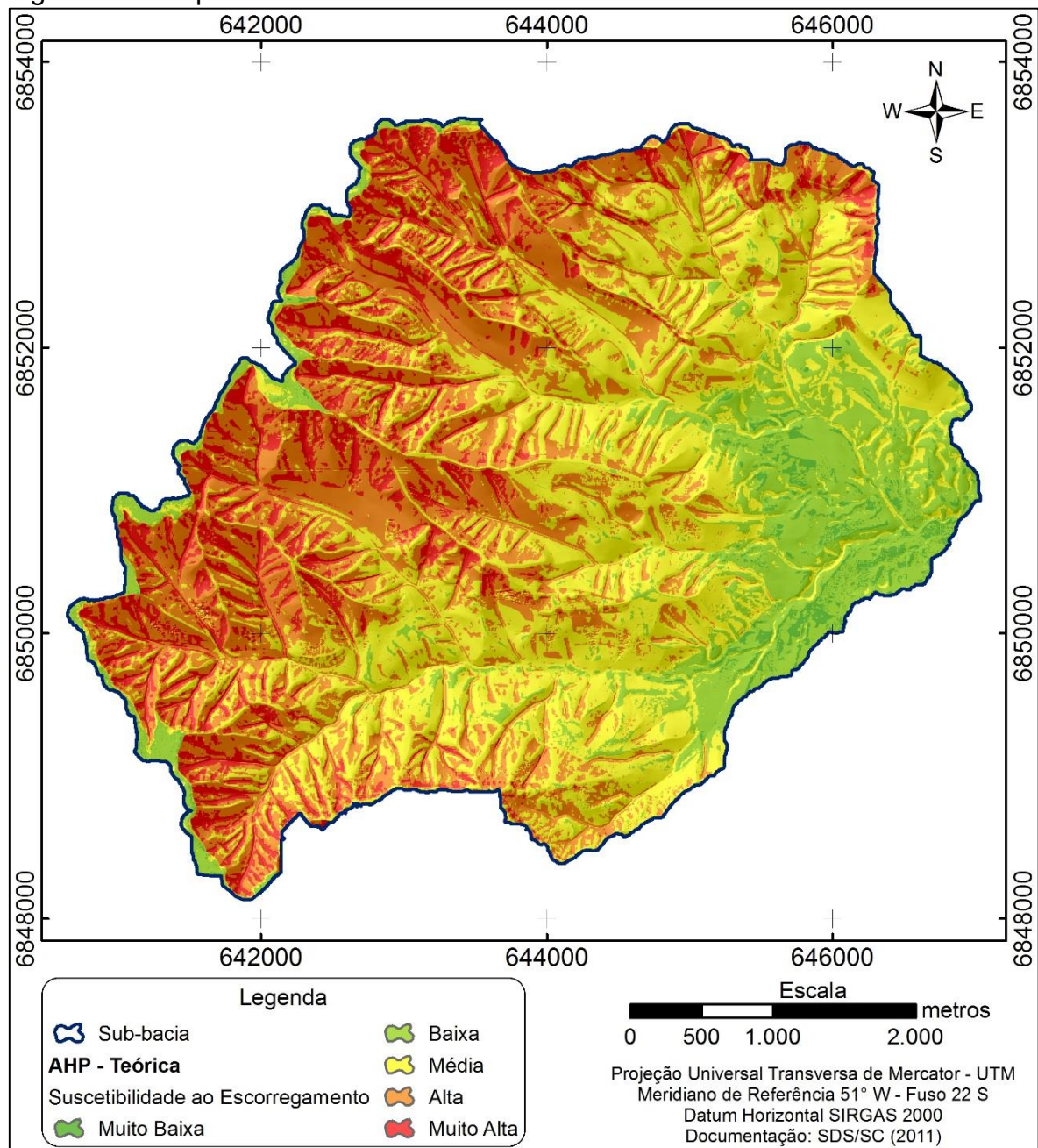


Figura 65 – Mapa final do modelo teórico.

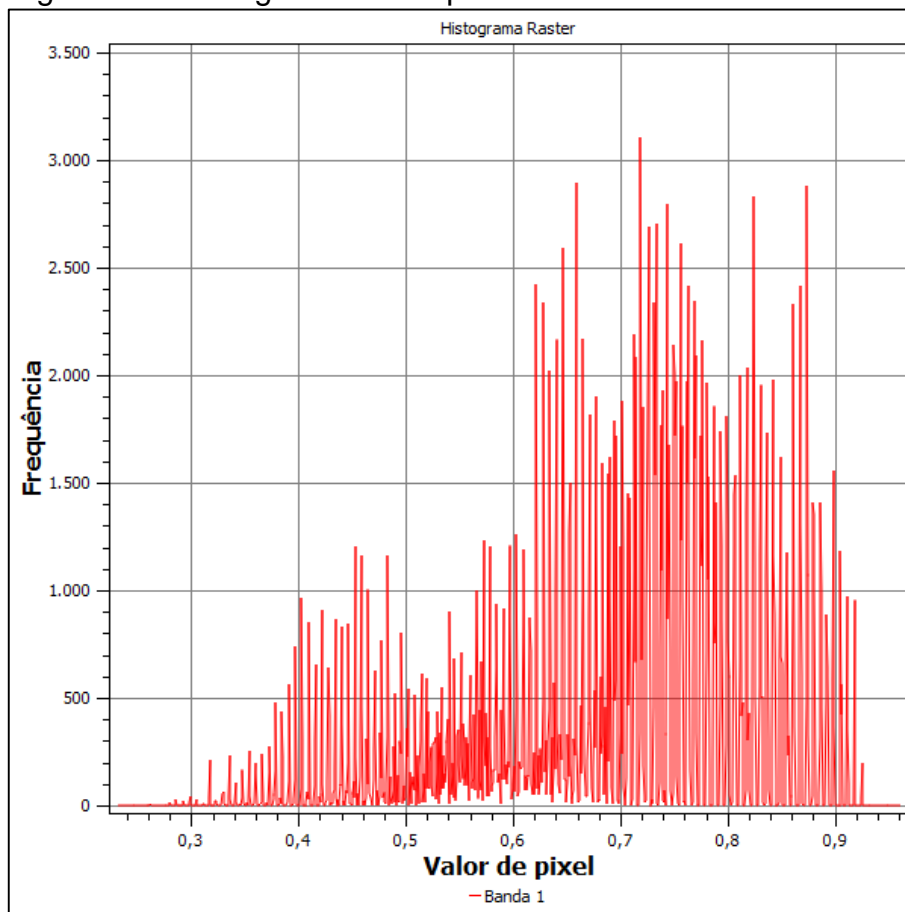


Os 4 intervalos, para individualização das 5 classes de suscetibilidade aos escorregamentos, apresentados na Figura 65, foram definidos pelo histograma de frequências dos *pixels* valorados entre 0 e 1, Figura 66. A visualização geral desta figura sugere uma curva assimétrica à direita, ou seja, maiores frequências com *pixels* com altos valores. As linhas de corte foram estabelecidas no momento das oscilações destas frequências, geralmente na base entre uma subcurva e a próxima à direita, em que um maior valor indica aumento na suscetibilidade aos escorregamentos. Cada 'quebra' define por similaridade um agrupamento de *pixels*



de uma classe de suscetibilidade e as linhas de corte *standard* (intervalos iguais) das propriedades do *raster*, obtido pelo QGIS®, foram definidas em 0.403, 0.568, 0.733 e 0.845.

Figura 66 – Histograma de frequências do modelo teórico.



Acerca das respostas visuais obtidas pelo modelo teórico (Figura 65), as mesmas responderam às hipóteses iniciais, a saber: que a planície apresentaria principalmente as classes de baixa e muito baixa suscetibilidade aos escorregamentos, assim como o bordo de planalto, à oeste da área de estudo; que os divisores de águas, mesmo em cotas elevadas, enquadraram-se na classe média, pela associação da morfologia convexa e dissipação de águas, ao contrário dos fundos dos vales; que as cabeceiras de drenagem em altas declividades concentram os locais com suscetibilidade muito alta aos escorregamentos e, que as morfologias côncavas e escoamento d'água convergente, classificam fundo de vales em classes de suscetibilidade mais elevadas que os terrenos circundantes.

A quantificação das 5 classes teoricamente obtidas, Tabela 32, demonstra que apenas 42,12 hectares possuem muito baixa suscetibilidade, enquanto 281,2 hectares muito alta. Com 37,64 % da área total, a classe média é a predominante, contudo, com 33,4 %, ou 747,78 hectares, a classe de suscetibilidade alta, como a segunda mais frequente, desloca o balanço das áreas, sugerindo uma área de estudo em que há mais áreas propensas a escorregar, como pôde ser verificado pela interpretação conjunta entre o histograma de frequências e o cômputo das classes, Tabela 32.

Tabela 32 – Quantificação das áreas das classes de suscetibilidade obtidas pelo modelo teórico.

<b>Classe</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>%</b>
<b>Muito Baixa</b>	42,1227	1,88
<b>Baixa</b>	324,7812	14,51
<b>Média</b>	842,6659	37,64
<b>Alta</b>	747,7796	33,40
<b>Muito Alta</b>	281,2035	12,56
<b>Soma</b>	<b>2238,5529</b>	<b>100</b>

As considerações iniciais resultantes da aplicação do modelo teórico indicam que um modelo pode contribuir para a predição de áreas de uma encosta que estão sujeitas a sofrer com escorregamentos, contudo, também apresentará limitações para locação destas áreas. Esta constatação reforça a importância da proposição deste trabalho, de se realizar o posicionamento acurado de antigas cicatrizes de escorregamentos que poderão validar o modelo teórico, ou mesmo, apresentar espacialmente locais de maior propensão aos escorregamentos, pela restituição de eventos pretéritos, através de modelagens orientadas por estatísticas de escorregamentos.

#### 5.4.1.1 Validação do modelo teórico

Para validação do modelo teórico obtido pela análise multicritério, assim como procedido para validação do modelo SHALSTAB, fez-se o cômputo das áreas de sombra incidentes em cada classe temática de suscetibilidade modelada, deduzindo-as dos totais, Tabela 33. As classes de muito baixa e baixa suscetibilidade aos escorregamentos, com poucas cicatrizes coincidentes,

aumentaram na participação total da área de estudo, enquanto a classe de muito alta suscetibilidade, por exemplo, reduziu de 281,2 hectares absolutos (12,6%) para 106,31 (7,07%).

Extraídas as zonas de sombra incidentes em cada classe, utilizando-se da coincidência espacial das cicatrizes inventariadas, foi verificado o IA e IE das classes de suscetibilidade do modelo teórico, Tabela 34. A ausência do IA na classe de muito baixa suscetibilidade é um bom indicador de que o modelo zoneou adequadamente estes locais na área de estudo como estáveis, ao passo de que uma maior razão do IA/IE nas classes de alta suscetibilidade indica modelo mais assertivo.

Tabela 33 – Quantitativos das classes de suscetibilidade e áreas de sombra incidente – AHP Teórica.

Classe	Área (ha)	%	Sombra (ha)	Área - sombra (ha)	%
Muito Baixa	42,1	1,9	0,22	41,9	2,79
Baixa	324,8	14,5	11,3	313,44	20,84
Média	842,7	37,6	190,38	652,3	43,37
Alta	747,8	33,4	357,59	390,19	25,94
Muito Alta	281,2	12,6	174,89	106,31	7,07
<b>Total</b>	<b>2238,6</b>	<b>100</b>	<b>734,4</b>	<b>1504</b>	<b>100</b>

Tabela 34 – Índices de Acerto e de Erro para as classes do modelo teórico.

Classe	Cicatrizes 1957		Cicatrizes 1978		Total de cicatrizes	
	IA	IE	IA	IE	IA	IE
Muito Baixa	0,0	2,8	0	2,8	0	2,9
Baixa	1,5	21,2	1,4	21,17	1,46	21,53
Média	38,4	43,5	41,6	43,39	39,76	43,50
Alta	42,9	25,6	49,3	25,53	46,13	25,22
Muito Alta	17,2	6,9	7,7	7,05	12,64	6,87
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Utilizando-se dos índices de acerto cumulativos da validação efetuada pelas cicatrizes de 1957, de 1978, e a soma de ambos, também foi construído um gráfico para representação das três curvas no espaço ROC, Figura 67, propiciando o cálculo da AUC, Tabela 35.

O modelo obtido a partir de pesos teóricos atribuídos às classes dos diferentes fatores predisponentes, combinando com a hierarquia dos fatores definida pela participação dos especialistas, posteriormente validado pelas cicatrizes de



escorregamentos, também se demonstrou representativo. Mesmo dissociado de reconhecimento de campo, ensaios *in loco*, coletas de amostras ou demais investigações de caráter determinístico, o resultado de AUC 0,69, obtido pela validação das cicatrizes de 1957, por exemplo, o colocou em patamar similar do modelo SHALSTAB, consideradas as aplicações adotadas para este estudo.

Figura 67 – Curvas ROC para o modelo teórico validado pelos inventários de cicatrizes.

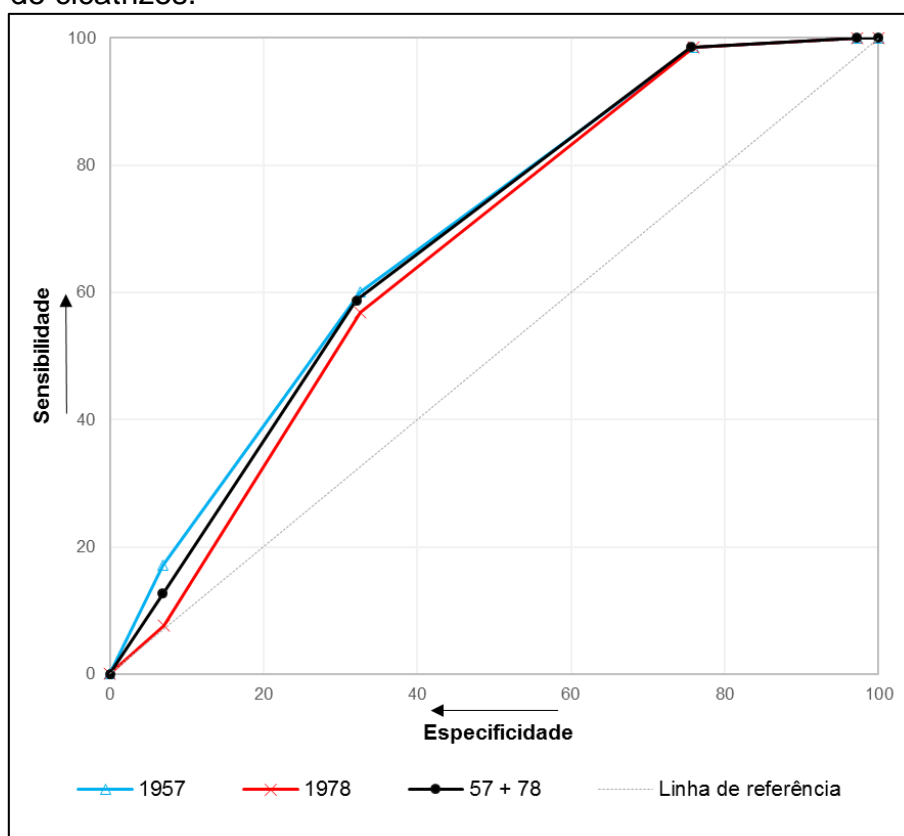


Tabela 35 – Cálculo a AUC a partir das curvas ROC para o modelo teórico.

1957			1978			1957 + 1978		
Y	X	Área	Y	X	Área	Y	X	Área
0	0		0	0		0	0	
17,17	6,88	59,09	7,66	7,06	27,03	12,64	6,87	43,4
60,09	32,51	990,04	56,93	32,59	824,61	58,77	32,08	900,35
98,48	75,97	3445,68	98,56	75,99	3373,84	98,54	75,58	3421,20
100	97,16	2103,59	100	97,17	2102,39	100	97,11	2137,75
100	100	283,75	100	100,00	283,43	100	100	288,59
Soma		6882,15	Soma		6611,29	Soma		6791,29
AUC		0,69	AUC		0,66	AUC		0,68

Outros autores já compararam diferentes modelos de suscetibilidade à escorregamentos a partir da obtenção da AUC no espaço ROC. Pourghasemi *et al.* (2018), por exemplo, construíram curvas ROC para índices de assertividade e erro,

validando por inventário de cicatrizes. Ao compararem a AUC para os modelos distintos, obtiveram valores de 0,7 a 0,85, concluindo que todos os modelos performaram bem, sendo o melhor aquele com maior AUC, sendo úteis para planejamento territorial e mitigação de riscos.

Aqui não está intencionando minimizar o modelo SHALSTAB, que oferta outras vantagens, a exemplo da maior escala e da consideração de áreas de contribuição específica, o que permite investigações de maior detalhe, desde que contem com mais dados de entrada. Mas há de ser considerada a importância de se obterem resultados satisfatórios para este modelo teórico, rápido de ser obtido por profissionais que, por alguma razão acesso, segurança, autorização..., não poderão proceder com incursões numa área de estudo, não possuem inventário de cicatrizes para validar a suscetibilidade à escorregamentos num local, ou ainda, que necessitam de um reconhecimento expedito, um mapa pré-campo, mesmo que escala generalista.

Enquanto o SHALSTAB oferta mais recursos de precisão e melhorias contínuas, se feitos os aportes em quantidade e qualidade necessários, a modelagem por análise multicritério é mais simples, rápida, atinge resultados satisfatórios, mas não oferta escala de detalhe de projeto, sendo mais indicado para análises em escala regional.

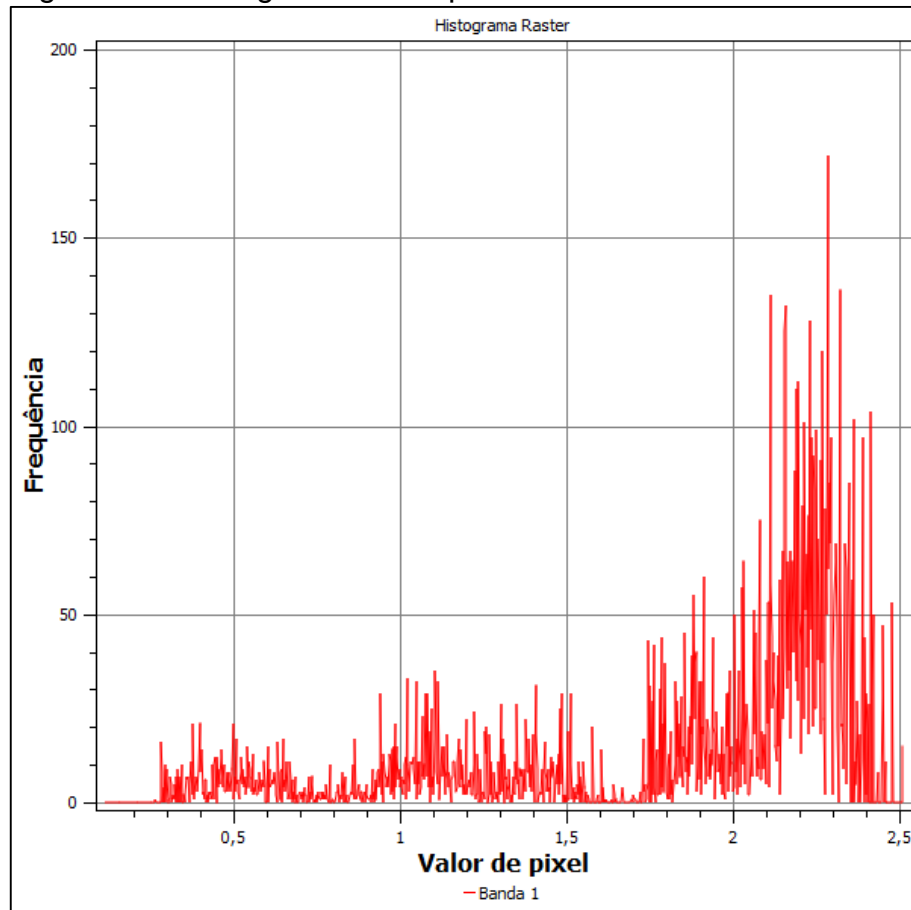
#### 5.4.2 Aplicação dos modelos restituídos

Além da aplicação hipotética de se utilizar a hierarquia de fatores com base na opinião de especialistas, combinada com pesos teóricos das classes de cada fator predisponente, a análise multicritério integrou as estatísticas de densidades de escorregamentos nas classes. Assim, a modelagem aqui realizada não é de caráter preditivo, mas de restituição, através das cicatrizes de escorregamentos, o que auxilia na validação de outros métodos, ou mesmo, na interpretação de eventos pretéritos e sua comparação para locais de condições físicas do terreno relativamente similares.

Vakhshoori e Zare (2018) já aplicaram padrão de restituição espacial de escorregamentos a partir de um certo intervalo temporal que concentrava registro de eventos de movimentos de massa. A aplicação desta pesquisa é similar e associou, inicialmente, os mapas reclassificados pelas densidades de escorregamentos

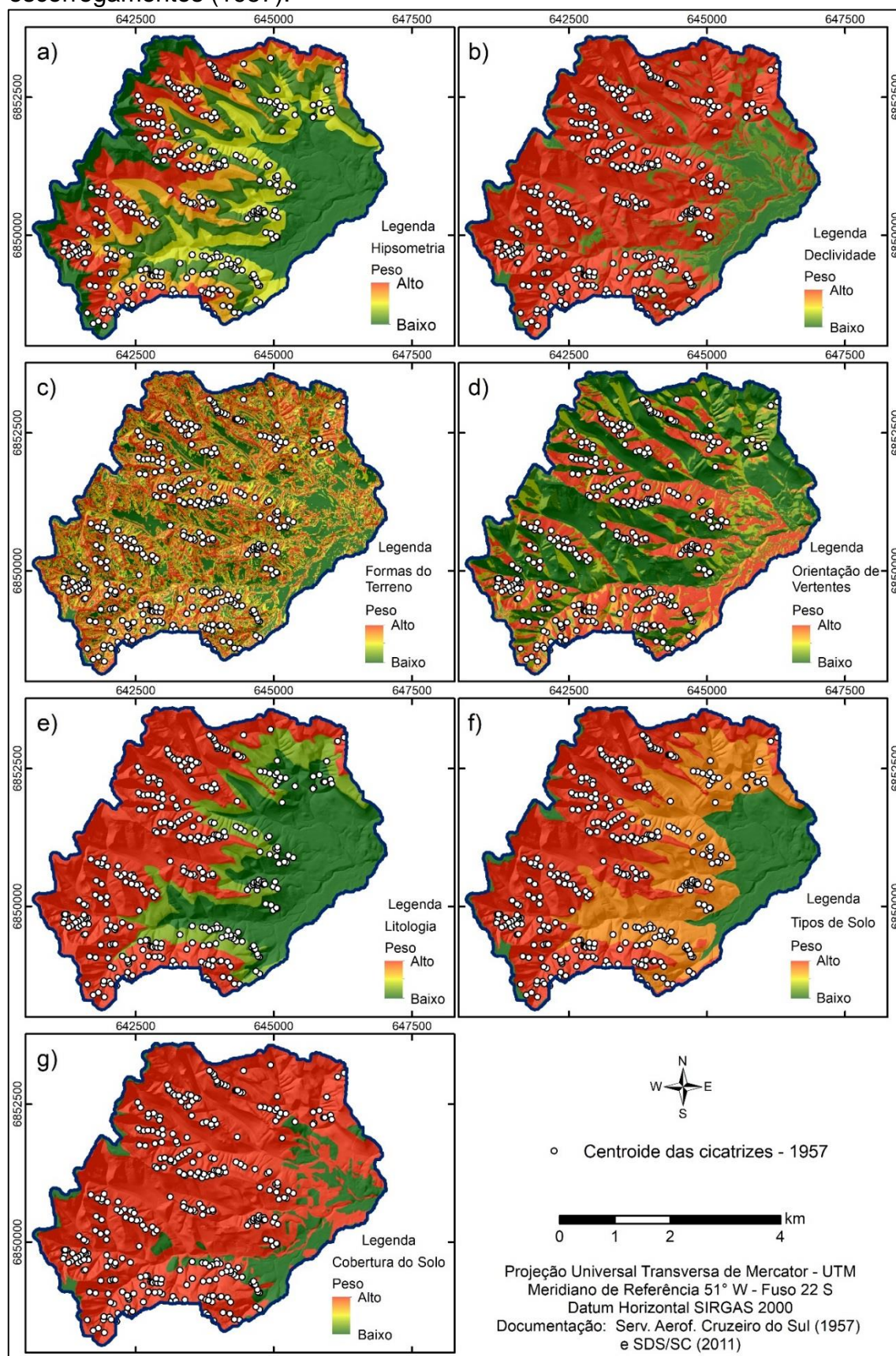
(1957), e o peso dos fatores seguiu a hierarquia estabelecida na Equação (17). Os intervalos das classes foram definidos manualmente pela interpretação do histograma de frequências do *raster* resultante, Figura 68, com linhas de corte nos valores de *pixels* definidos em 0.8, 1.72, 1.97 e 2.3 (intervalos iguais).

Figura 68 – Histograma de frequências do modelo restituído de 1957.



Os fatores predisponentes reclassificados pela densidade de escorregamentos, podem ser visualizados na Figura 69.

Figura 69 – Fatores predisponentes reclassificados pela densidade de escorregamentos (1957).



É importante mencionar que não é apenas a localização da cicatriz de escorregamento que orienta o peso recebido por determinada classe de cada fator, reclassificada individualmente de baixa a alta suscetibilidade. O considerado no cálculo é a área incidente, contudo, para representação optou-se por demonstrar somente o ponto central da cicatriz, não seu polígono, sendo este melhor visualizado no mapa final de suscetibilidade aos escorregamentos (Figura 70), com base na associação dos fatores reclassificados da Figura 69 e hierarquizados pelos pesos da Equação (17).

A Figura 70 reforça duas constatações já realizadas anteriormente na modelagem preditiva, de que a parte antropizada da sub-bacia, a planície próxima da confluência dos rios Mãe Luzia e Congonhas, possui baixa suscetibilidade aos escorregamentos, assim como o bordo de planalto à esquerda da área, não sendo identificadas cicatrizes de eventos antigos nestas áreas. Da mesma forma, a classe média apresenta poucas cicatrizes, estando estas muito concentradas nas classes alta e, principalmente, muito alta.

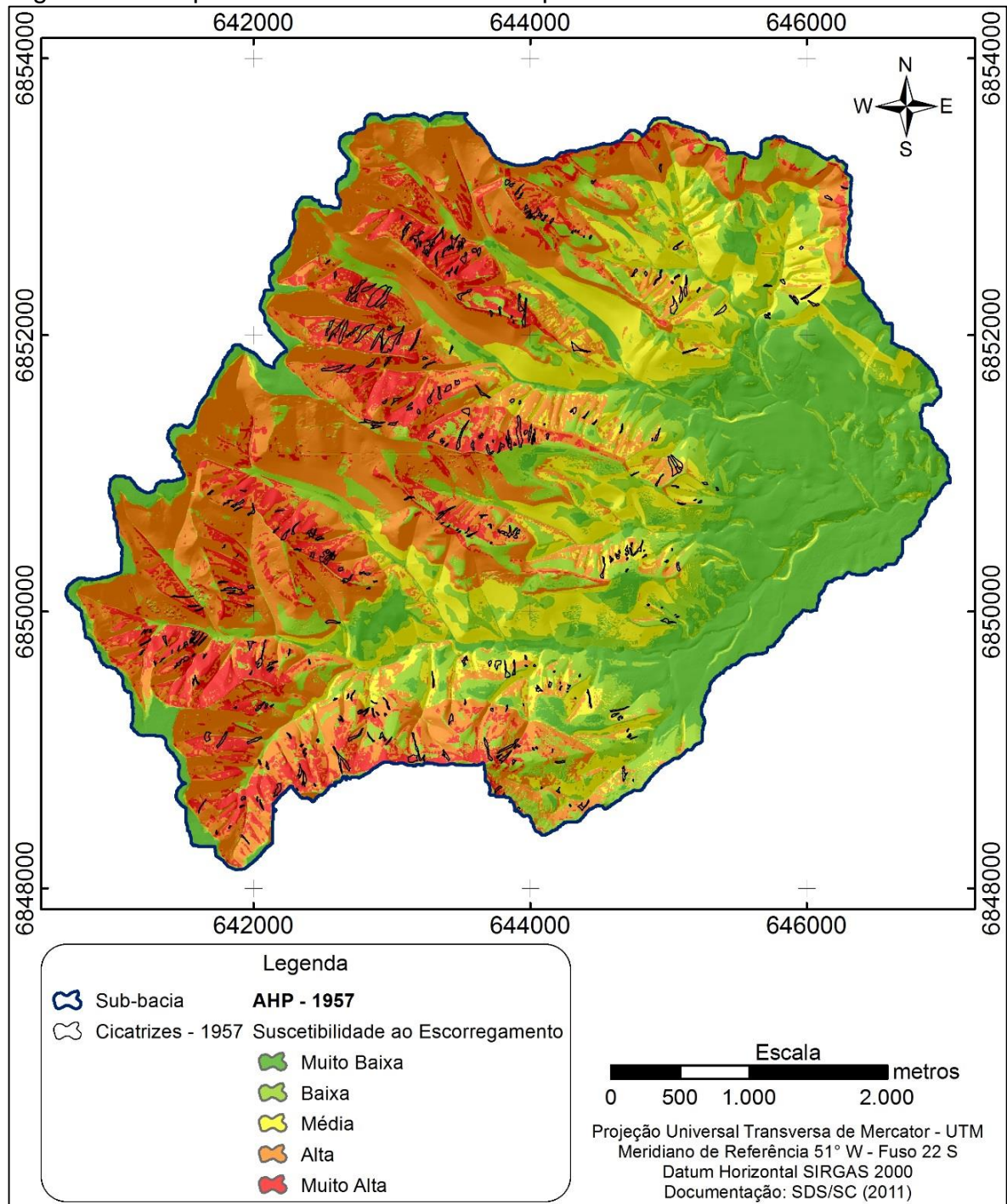
Acerca dos quantitativos das classes restituídas para 1957, Tabela 36, cerca de 40 % da área está em local de muito baixa e baixa suscetibilidade, um resultado significativo para o relevo movimentado daquele contexto espacial. Já a classe de muito alta suscetibilidade reuniu apenas 257,9 hectares, ou 11,5 % da área de estudo, entretanto, com muitas cicatrizes incidentes, o que corrobora o bom resultado visual de coincidência de cicatrizes em classes de maior suscetibilidade, Figura 70.

Tabela 36 – Quantificação das áreas das classes de suscetibilidade obtidas pelo modelo restituído de 1957.

<b>Classe</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>%</b>
Muito Baixa	454,1	20,3
Baixa	439,1	19,6
Média	316,3	14,1
Alta	771,4	34,5
Muito Alta	257,9	11,5
<b>Soma</b>	<b>2238,7</b>	<b>100</b>



Figura 70 – Mapa final do modelo restituído para 1957.

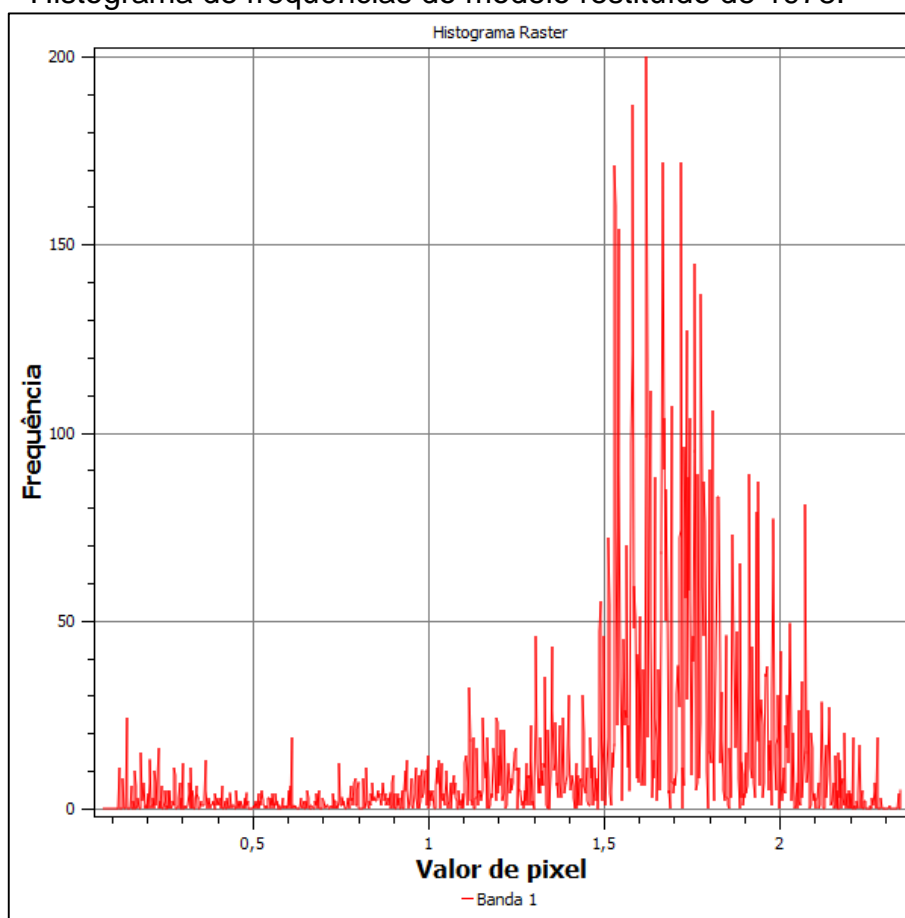


Estas coincidências espaciais entre as maiores cicatrizes e a classe de muito alta suscetibilidade reforça, visualmente, que o modelo de restituição respondeu adequadamente ao seu propósito: de que ao considerar densidades de cicatrizes como dado de entrada poder-se-ia restituir o evento que ocorreu no passado. Assim, é bem provável que todas as áreas zoneadas em vermelho naquele contexto estavam saturadas e instáveis.



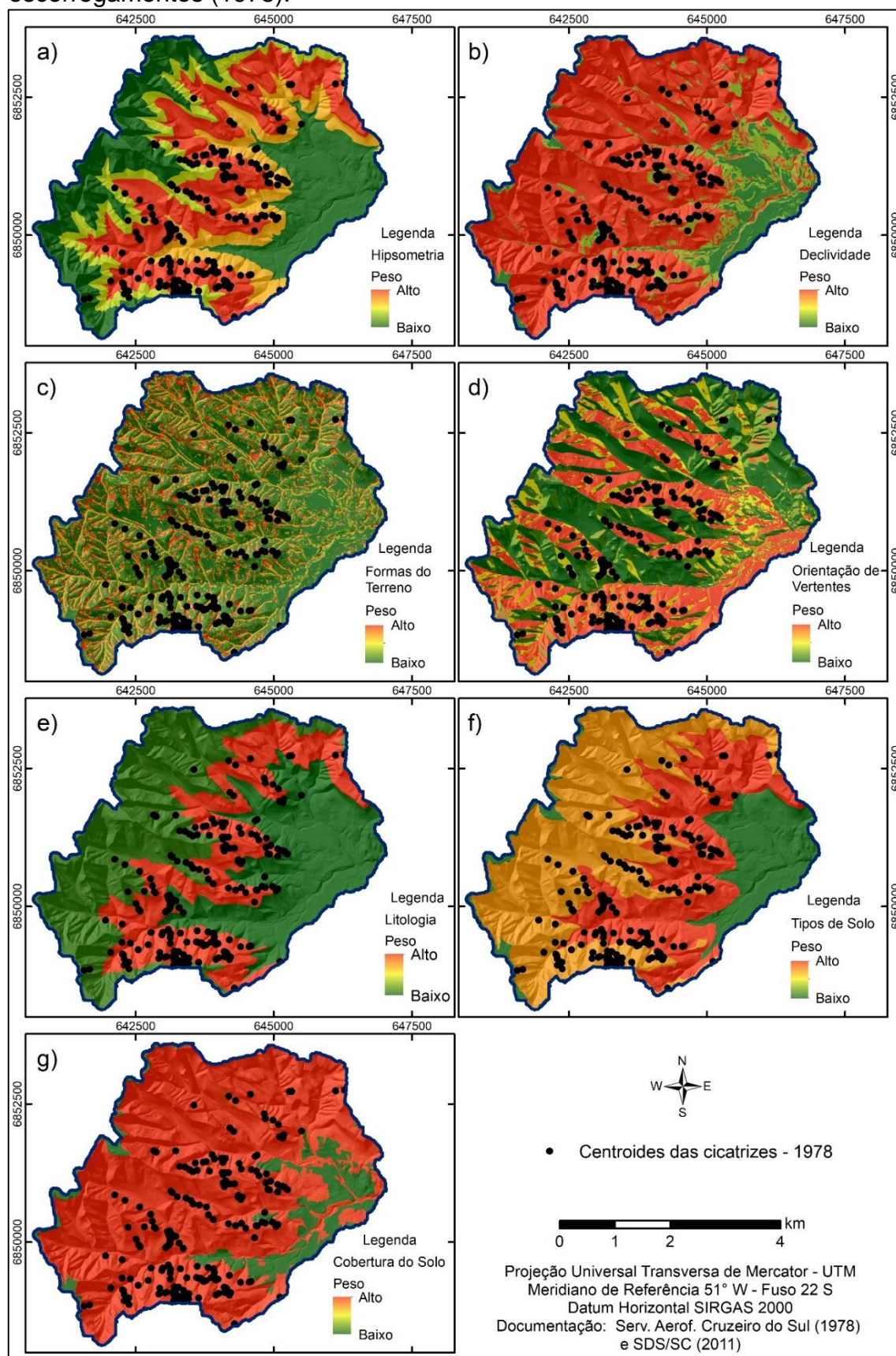
A exemplo do modelo restituído para 1957, fez-se a aplicação para 1978, a partir dos mapas de fatores predisponentes reclassificados pelas densidades de escorregamentos registrados nesta data. A hierarquia dentre os fatores seguiu o estabelecido pela Equação 17, oriunda da já explicitada participação e julgamentos de especialistas. No mapa resultante, foram definidos os intervalos das classes de suscetibilidade, a saber: 1.11, 1.482, 1.722 e 2.0 (intervalos iguais), pela interpretação do histograma de frequências, Figura 71.

Figura 71 – Histograma de frequências do modelo restituído de 1978.



A Figura 72 apresenta os fatores predisponentes reclassificados, com os valores disponibilizados na Tabela 12, oriundos da restituição e quantificação de cicatrizes ortorretificadas datadas em 1978.

Figura 72 – Fatores predisponentes reclassificados pela densidade de escorregamentos (1978).



Em relação ao evento de 1957, é perceptível que as cicatrizes de 1978 apresentam-se em menor número e estão concentradas ao centro da área de estudo. Este agrupamento fica ainda mais evidente quando se examinam os fatores individualizados, a exemplo da hipsometria (Figura 72-a), ou mesmo da litologia e tipos de solo, em que a reclassificação indicou como de alta propensão aos escorregamentos classes diferentes do verificado para 1957. Estas características combinadas resultaram no mapa final para o evento restituído de 1978 (Figura 73).

Pela Figura 73 vê-se apenas uma similaridade com a modelagem preditiva teórica, também coincidente com a modelagem de restituição de 1957, a de que a parte antropizada, assim como o bordo do planalto, à oeste, demonstraram-se de baixa e muito baixa suscetibilidade à escorregamentos. Assim, conclui-se, como o já esperado para áreas de relevo plano, que estes locais, independentemente se examinados por modelos obtidos a partir de pesos teóricos ou considerando históricos de cicatrizes de escorregamentos, raramente apresentarão movimentos de massa. Já os locais classificados como de média suscetibilidade, em amarelo, refletem as áreas de alta declividade, cotas elevadas, neossolos, fatores estes que tenderiam a maior instabilidade da encosta e que foram retratados na modelagem de 1957. Ocorre que, para 1978, praticamente inexistem registros de cicatrizes nesta classe de suscetibilidade média, ficando estas cicatrizes concentradas nas classes de alta e, principalmente, muito alta suscetibilidade aos escorregamentos, posicionadas na meia encosta.

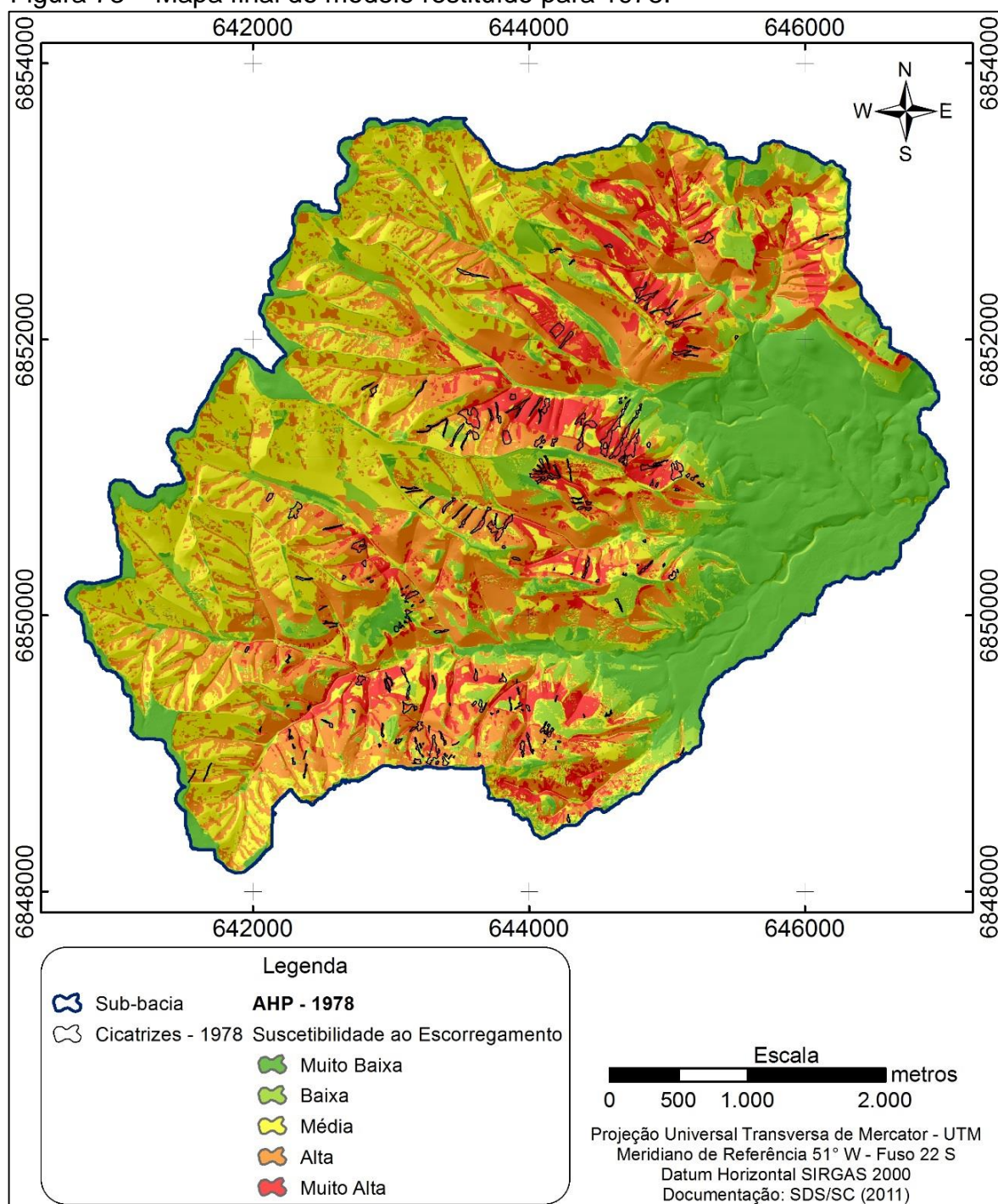
O quantitativo das classes de suscetibilidade, Tabela 37, apresenta 145,8 hectares como de muito alta propensão aos escorregamentos, ou seja, apenas 6,5% da área. A Figura 73 evidencia-se coincidência de cicatrizes com o zoneamento restituído. Esta assertividade será avaliada em item específico, sobre a validação dos modelos.

Tabela 37 – Quantificação das áreas das classes de suscetibilidade obtidas pelo modelo restituído de 1978.

<b>Classe</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>%</b>
Muito Baixa	469,6	21
Baixa	288,3	12,9
Média	612,2	27,3
Alta	722,5	32,3
Muito Alta	145,8	6,5
<b>Soma</b>	<b>2238,6</b>	<b>100</b>



Figura 73 – Mapa final do modelo restituído para 1978.



Se comparadas as Figuras 70 e 73, vê-se claramente que os eventos registrados para 1957 diferem em muito daqueles registrados nas fotografias de 1978, ou seja, ocorreram em setores distintos das vertentes. Os locais de maior interesse nos mapas finais dos modelos são aqueles zoneados em laranja e vermelho, que concentraram eventos pretéritos, onde foi verificado que a projeção das cicatrizes nos mapas não coincidiu, tampouco evidenciou que o material

carreado pré-1957 tenha sido barrado, voltando a ser remobilizado num segundo momento (pré-1978).

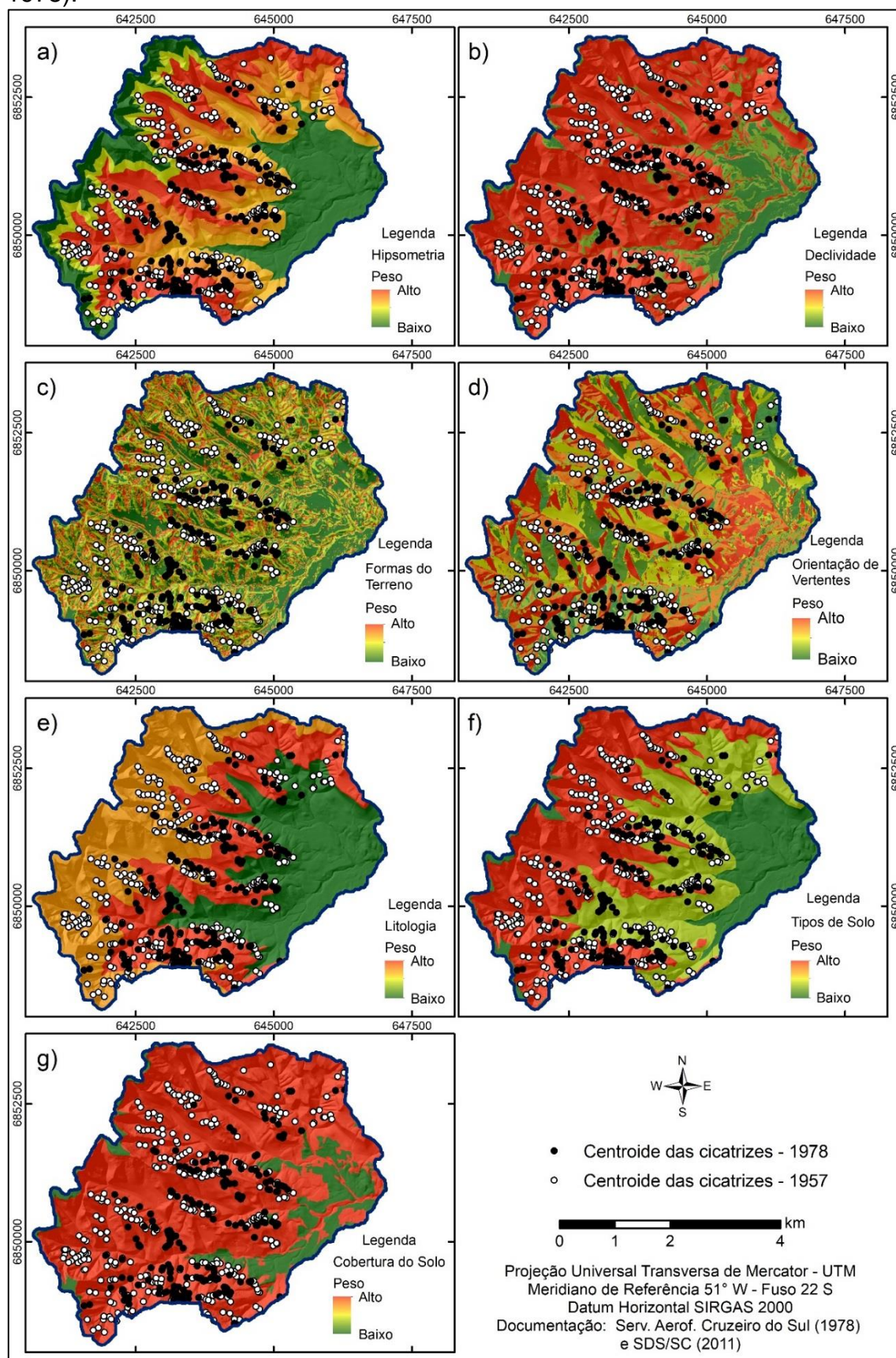
Pela recorrência de um evento de alta magnitude em menos de 20 anos (57-78), constata-se que esse intervalo temporal não é o suficiente para que haja formação de manto de intemperismo passível de escorregar. Isso é visível porque as áreas fonte são distintas nos eventos restituídos, ou seja, um episódio pluvial intenso significa escorregamentos em locais há muito sem registros de escorregamentos, ou ainda que não escorregaram, para o local não há recorrência espacial em apenas duas décadas.

Adicionalmente, realizou-se um modelo médio dos registros de 1957 e 1978. Isto porque, individualmente um modelo restituído para esta área de estudo não é eficaz, individualmente, para predizer áreas que escorregarão no futuro, mesmo que expliquem bem o ocorrido no passado e sirvam de treinamento para modelos preditivos. Assim, integrou-se os modelos de restituição, numa modelagem média, considerando as diferentes combinações e particularidades, de forma a contribuir para um conhecimento integrado do histórico de escorregamentos da área de estudo.

Para esta combinação os fatores predisponentes foram reclassificados um a um, pela densidade normalizada dos escorregamentos, incidentes nas classes, efetuando-se a média simples dos eventos de cada registro. Os quantitativos seguem apresentados na já referida Tabela 12, e a projeção dos centroides dos escorregamentos restituídos sobre os 7 fatores reclassificados estão na Figura 75.

Na Figura 74-a vê-se que, pela representação das cicatrizes restituídas nas duas datas, existem locais de ocorrência comum nas encostas, em cotas inferiores ao evento registrado em 1957, mas superiores ao registro de 1978. Em 74-e e 74-f, respectivamente litologia e tipo de solo, também apresentam este comportamento, dado o controle estratigráfico da fisiografia local. Em comum, o fato dos escorregamentos ocorrerem sempre nas áreas florestadas, de alta declividade, côncavas e voltadas para o norte. Este aspecto, de orientação ao norte, é fruto da incapacidade de se mapear as áreas voltadas para sul, por estarem sombreadas nas tomadas fotográficas, inclusive, na própria ortofoto da base cartográfica atual (SDS, 2011).

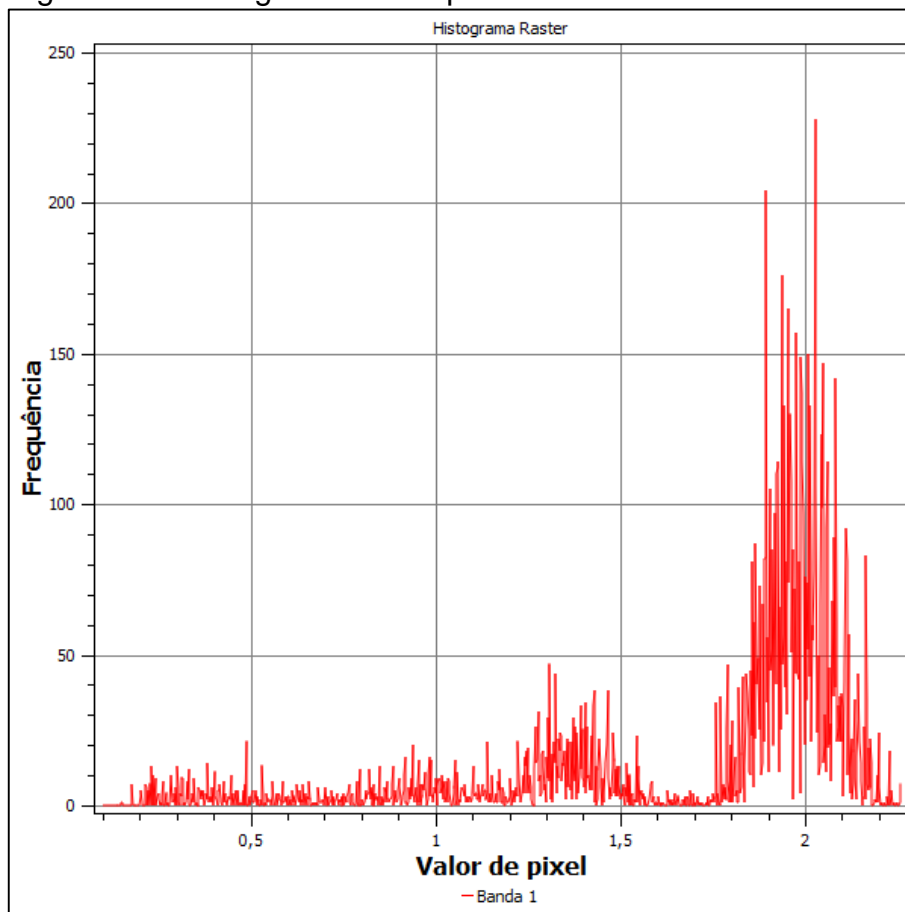
Figura 74 – Fatores predisponentes reclassificados para o modelo médio (1957 + 1978).





Em relação ao histograma de frequências, obtidos pela reclassificação e cruzamentos dos geocampos atributos dos *pixels*, para o modelo médio, Figura 75, foi possível estabelecer 4 linhas de corte, nos valores de 0.68, 1.11, 1.88 e 2.025.

Figura 75 – Histograma de frequências do modelo médio.



A resposta visual do modelo médio manteve a planície e o bordo de planalto como áreas de baixa e muito baixa suscetibilidade aos escorregamentos. A grande soma das cicatrizes ficou englobada nas classes de alta e muito alta suscetibilidade, o que sugere uma boa modelagem, tendo em vista que a sobreposição das cicatrizes nestas classes as validam visualmente.

Em linhas gerais, o modelo médio não pode ser similar à 1957 ou 1978, porque responderia parcialmente a esses, sendo sua soma. Assim, se assemelha mais ao modelo teórico do que em relação aos modelos restituídos. Isso já era esperado, uma vez que o modelo de 1957 divergiu espacialmente de 1978, notadamente nas áreas de alta suscetibilidade. De fato, tanto o modelo médio quanto o teórico classificam gradacionalmente as encostas, enquanto 1957 há

predominância por alta suscetibilidade em locais mais altos, em 1978 de cotas intermediárias.

Contudo, também existem diferenças entre o mapa resultante do modelo médio em relação ao teórico. A primeira é que há maior quantidade de áreas de alta suscetibilidade, demonstrando que o modelo teórico está subestimando a propensão aos escorregamentos, dada a análise de restituição. A segunda diferença é que, ao incluir o modelo de restituição de 1978, o modelo médio apresenta vertentes passíveis de escorregamento em cotas mais baixas, resultando numa transição linear de 500 metros, a partir da planície, e para oeste (escarpas), em que uma área de baixa suscetibilidade à escorregamentos atinge média, alta e muito alta suscetibilidade (Figura 76).

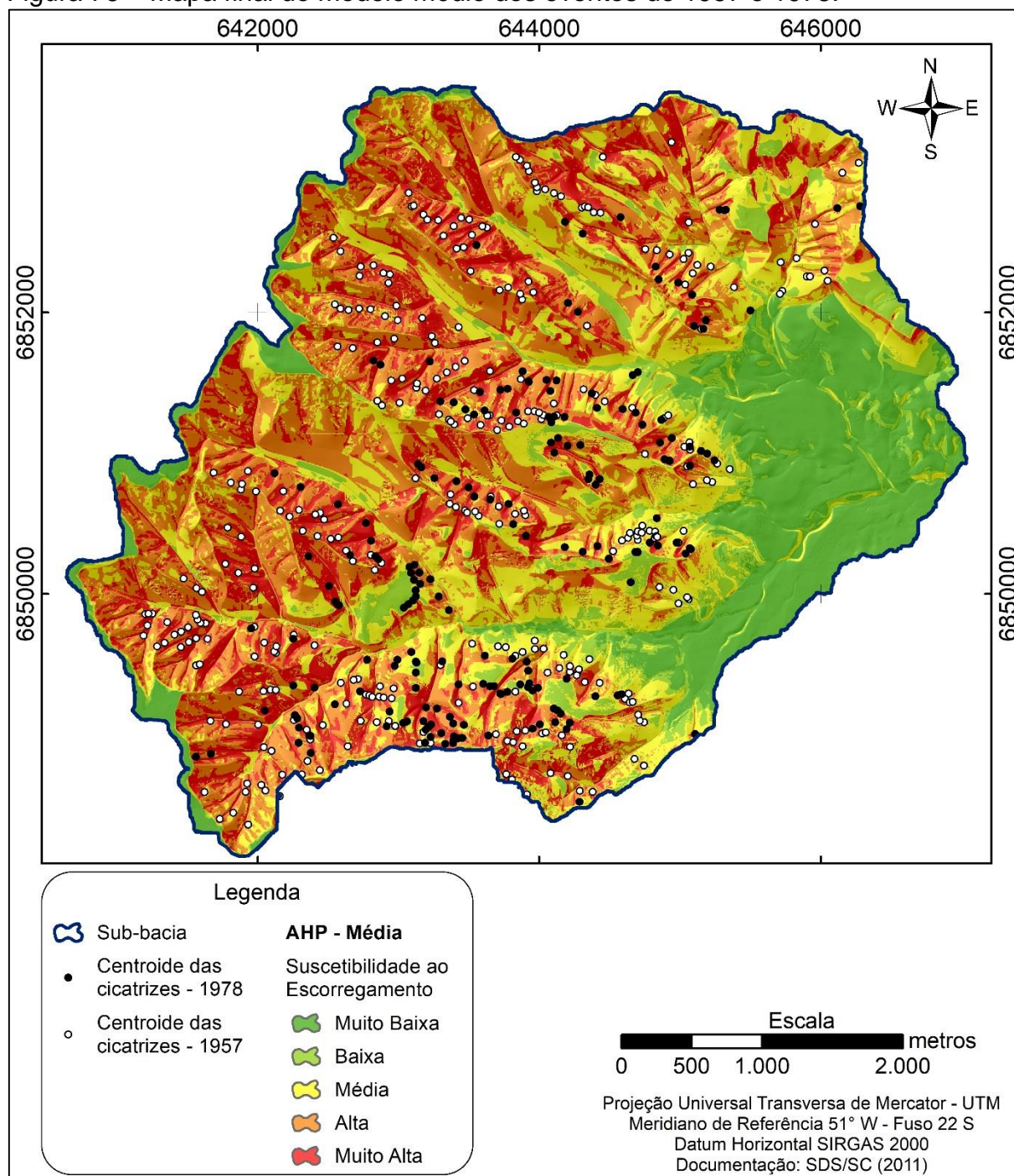
O cômputo de áreas, Tabela 38, obtido pela quantificação das classes no *raster* resultante, resume bem o propósito de integração dos modelos de restituição. Somadas as classes de suscetibilidade alta (31,4 %) e muito alta (19,8 %), o modelo médio informa que mais de 50 % da área está reunida nas classes de maior suscetibilidade aos escorregamentos, ante os aproximados 39 % de 1978 e 46 % de 1957.

Tabela 38 – Quantificação das áreas das classes de suscetibilidade para o modelo médio das restituições.

Classe	Área (ha)	%
Muito Baixa	340,2	15,2
Baixa	189,6	8,5
Média	563,9	25,2
Alta	702,2	31,4
Muito Alta	442,7	19,8
<b>Soma</b>	<b>2238,6</b>	<b>100</b>

De fato, a integração vista pela Figura 76 resultou em maior coincidência espacial entre as zonas e as cicatrizes antigas, contudo, poder-se-á estar inserindo falsos positivos, ou seja, locais que não são suscetíveis a escorregar, mas foram classificados como tal. Este esclarecimento somente será possível pelos cálculos dos índices de acerto e de erro de cada modelo restituído, utilizando as cicatrizes para a validação.

Figura 76 – Mapa final do modelo médio dos eventos de 1957 e 1978.



#### 5.4.2.1 Validação dos modelos restituídos

Feitas as considerações sobre os modelos preditivos aos escorregamentos na área de estudo, seguiu-se com a validação dos modelos restituídos, salientando-se, de antemão, que já era esperado maior sensibilidade e especificidade destes modelos, uma vez que as próprias estatísticas de incidência

dos escorregamentos foram dados de entrada para espacialização das classes de suscetibilidade.

As Tabelas 39 e 40 apresentam a dedução das áreas de sombra para os mapas finais dos modelos de restituição de 1957 e 1978, respectivamente.

Tabela 39 – Índices de Acerto e de Erro para as classes de suscetibilidade do modelo restituído de 1957.

Classe	Área (ha)	%	Sombra (ha)	Área - sombra (ha)	%	Cicatrizes (m <sup>2</sup> )	IA	IE
Muito Baixa	454,1	20,3	34,1	420	27,9	1.293	0,5	28,4
Baixa	439,1	19,6	122,1	317	21,1	31.135	11,4	21,3
Média	316,3	14,1	140,6	175,6	11,7	22.954	8,4	11,7
Alta	771,4	34,5	380,4	390,9	26,0	90.544	33,0	25,9
Muito Alta	257,9	11,5	57,1	200,7	13,3	128.184	46,8	12,7
<b>Total</b>	<b>2238,7</b>	<b>100</b>	<b>734,4</b>	<b>1504,2</b>	<b>100</b>	<b>274.110</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Tabela 40 – Índices de Acerto e de Erro para as classes de suscetibilidade do modelo restituído de 1978.

Classe	Área (ha)	%	Sombra (ha)	Área - sombra (ha)	%	Cicatrizes (m <sup>2</sup> )	IA	IE
Muito Baixa	469,6	21	36,1	433,6	28,8	3.143	1,2	29,3
Baixa	288,3	12,9	81,5	206,8	13,8	14.614	5,7	13,9
Média	612,2	27,3	292,9	319,4	21,2	29.588	11,5	21,4
Alta	722,5	32,3	295,1	427,4	28,4	105.612	41	28,2
Muito Alta	145,8	6,5	28,8	117	7,8	104.552	40,6	7,2
<b>Total</b>	<b>2238,6</b>	<b>100</b>	<b>734,4</b>	<b>1504,1</b>	<b>100</b>	<b>257.509</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

Também é apresentado nestas tabelas os IA e IE obtidos para cada modelo. Com os dados cumulativos dos IA e IE calculados pela intersecção das respectivas cicatrizes sobre as classes de suscetibilidade, pôde-se representar as curvas ROC para os modelos de restituição obtidos pela análise multicritério, Figura 77. O pronunciado afastamento das curvas obtidas em relação à linha de referência, com a inflexão para o canto superior esquerdo do espaço ROC exprime modelos sensíveis e específicos.

O modelo de 1978 apresenta AUC 0,8 e o de 1957 0,78, Tabela 41, o que significa dizer que 80% das áreas modeladas como de alta suscetibilidade aos escorregamentos foram restituídas adequadamente. Esta constatação, da boa restituição realizada com o uso de estatísticas de incidência de cicatrizes como parâmetro de entrada para modelagem, valida um esforço duplo deste trabalho: de efetuar-se modelos de restituição que representassem fielmente eventos passados, na tentativa de entendê-los; de possuir-se um inventário de cicatrizes qualificado

para validar os modelos preditivos, como já apresentado para os modelos SHALSTAB e a proposição teórica.

Figura 77 – Curvas ROC para modelos de restituição obtidos pela AHP.

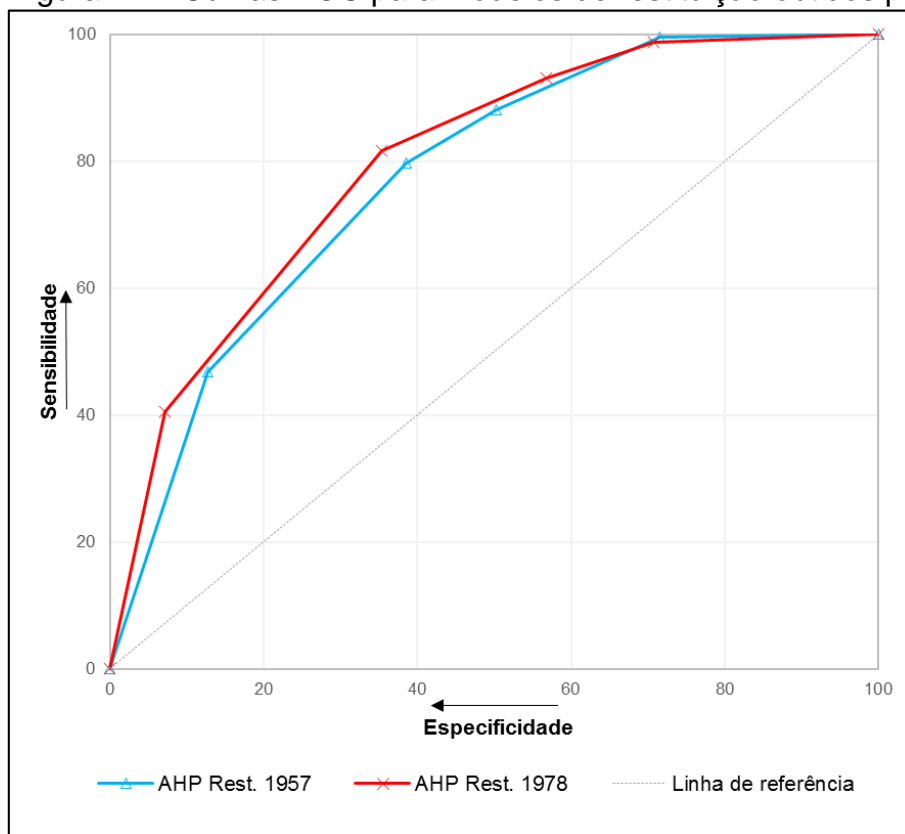


Tabela 41 – Cálculo a AUC a partir das curvas ROC para os modelos de restituição.

1957			1978		
Y	X	Área	Y	X	Área
0	0		0	0	
46,76	12,72	297,48	40,60	7,21	146,31
79,80	38,58	1636,30	81,61	35,40	1722,85
88,17	50,32	985,76	93,10	56,80	1869,77
99,5	71,6	1994,5	98,8	70,7	1332,7
100	100	2836	100	100	2913
Soma		7750,26	Soma		7984,29
<b>AUC</b>		<b>0,78</b>	<b>AUC</b>		<b>0,80</b>

## 5.5 INTEGRAÇÃO DE MODELOS

Na tentativa de entender as combinações de diferentes modelos, métodos para estudos de escorregamentos, Vakhshoori e Zare (2018) sugerem que seja criada uma fusão destes modelos, ou seja, que um único mapa seja criado por funções estatísticas e de álgebra de mapas e que apresente o melhor zoneamento

da suscetibilidade aos escorregamentos. Segundo os autores citados, integrar modelos distintos explica espacialmente o que não se conseguiria numa análise particionada, além disso, sugerem que estudos semelhantes sejam realizados em diferentes escalas e que integrem outros métodos.

Aqui se faz interessante reforçar que neste trabalho foram realizados dois modelos de restituição, de 1957 e de 1978. O objetivo, além da já apresentada restituição de eventos passados, foi de se obter elementos para servir como dados de entrada, ou 'treinamento', em combinações com modelos preditivos, como o teórico ou SHALSTAB. Isso significa dizer que é utilizado de um percentual de cicatrizes já inventariadas como 'orientativa' do posicionamento espacial, dando subsídios para melhor performar estes modelos de combinação de diferentes métodos.

Diante deste desafio, de conjugar os modelos elaborados na pesquisa, para que o todo explique mais que a soma das partes, neste trabalho fez-se uma série de combinações com os resultados que já se havia obtido, das quais, 3 produtos demonstraram-se promissores e serão aqui detalhados:

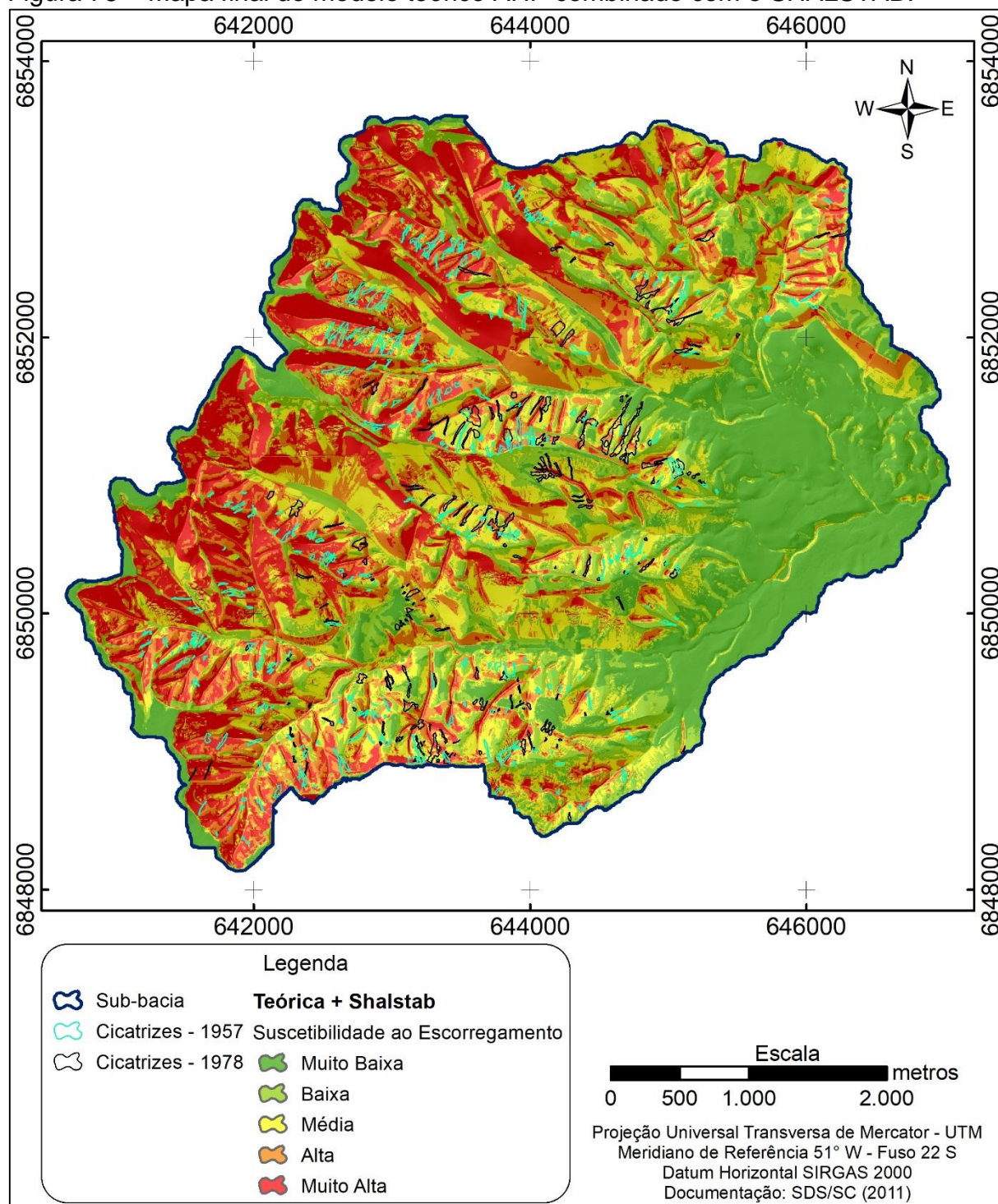
- 1 - Integração do resultado do modelo SHALSTAB com o obtido pelo modelo teórico AHP;
- 2 – Integração do modelo teórico obtido pela AHP, com treinamento pelo modelo restituído pela AHP, para o ano de 1978;
- 3 – Integração do modelo SHALSTAB com treinamento pelo modelo restituído pela AHP, para o ano de 1978.

#### **5.5.1 Modelo SHALSTAB com o modelo teórico AHP**

Este modelo resultou na integração do mapa final da modelagem teórica com o executado pelo SHALSTAB, ou seja, trata-se de uma modelo inteiramente preditivo, sem uso de parte do inventário restituído para treinamento. Para manter a proporcionalidade de 50% de contribuição de cada método no cômputo do modelo integrado, o *raster* final obtido pelo SHALSTAB foi normalizado, com valores das classes estabelecidos entre 0 e 1, podendo, então, ser pareado com o mapa final obtido pela atribuição dos pesos teóricos. O resultado desta combinação pode ser visualizado na Figura 78.



Figura 78 – Mapa final do modelo teórico AHP combinado com o SHALSTAB.



Na Figura 78 apresenta-se as classes de suscetibilidade aos escorregamentos, sobrepondo as cicatrizes de escorregamentos de 1957 e de 1978. Percebe-se que há maior coincidência entre o modelo preditivo e o já ocorrido em 1957, contudo, estas constatações visuais da capacidade discriminante somente

serão validadas pelo cômputo da AUC, construídas pelos IA e IE, apresentados em capítulo subsequente.

O quadro de áreas, Tabela 42, evidencia um equilíbrio de áreas zoneadas entre as classes de muito alta (27,0%) e de muito baixa (26,6%) suscetibilidade aos escorregamentos, assim como alta suscetibilidade aos escorregamentos (17,9%) e baixa (18,3%). Esta capacidade discriminante, como já dito anteriormente, será investigada com análise da curva ROC desta combinação.

Tabela 42 – Quantificação das classes de suscetibilidade aos escorregamentos para o modelo integrado SHALSTAB com o teórico.

Classe	Área (ha)	%
Muito Baixa	594,8	26,6
Baixa	409,4	18,3
Média	226,0	10,1
Alta	401,2	17,9
Muito Alta	604,8	27,0
<b>Soma</b>	<b>2236,1</b>	<b>100</b>

### 5.5.2 Modelo teórico com treinamento pelo modelo de 1978

Esta combinação reúne o modelo teórico (preditivo), respondendo por 70%, com treinamento de 30%, a partir das cicatrizes de 1978, que se apresentou como o modelo de restituição com maior capacidade discriminante. Desta forma esta integração congrega modelos executados integralmente pela AHP, sem adição de resultados de ensaios de campo.

Vakhshoori e Zare (2018) recomendam no feitiço de modelos integrados a proporção de 70% para dados de predição e 30% para dados de treinamento. Deng, Li e Tan (2017) efetuaram considerações similares, ou seja, utilizar-se de menor proporção do inventário para compor o modelo. Com base nestas recomendações, o produto final desta integração pode ser visualizado na Figura 79, já a Tabela 43 apresenta as áreas de cada classe de suscetibilidade, distribuídas por quartis, conforme estudos dos autores supracitados.

Figura 79 – Mapa final do modelo teórico AHP treinado por escorregamentos de 1978.

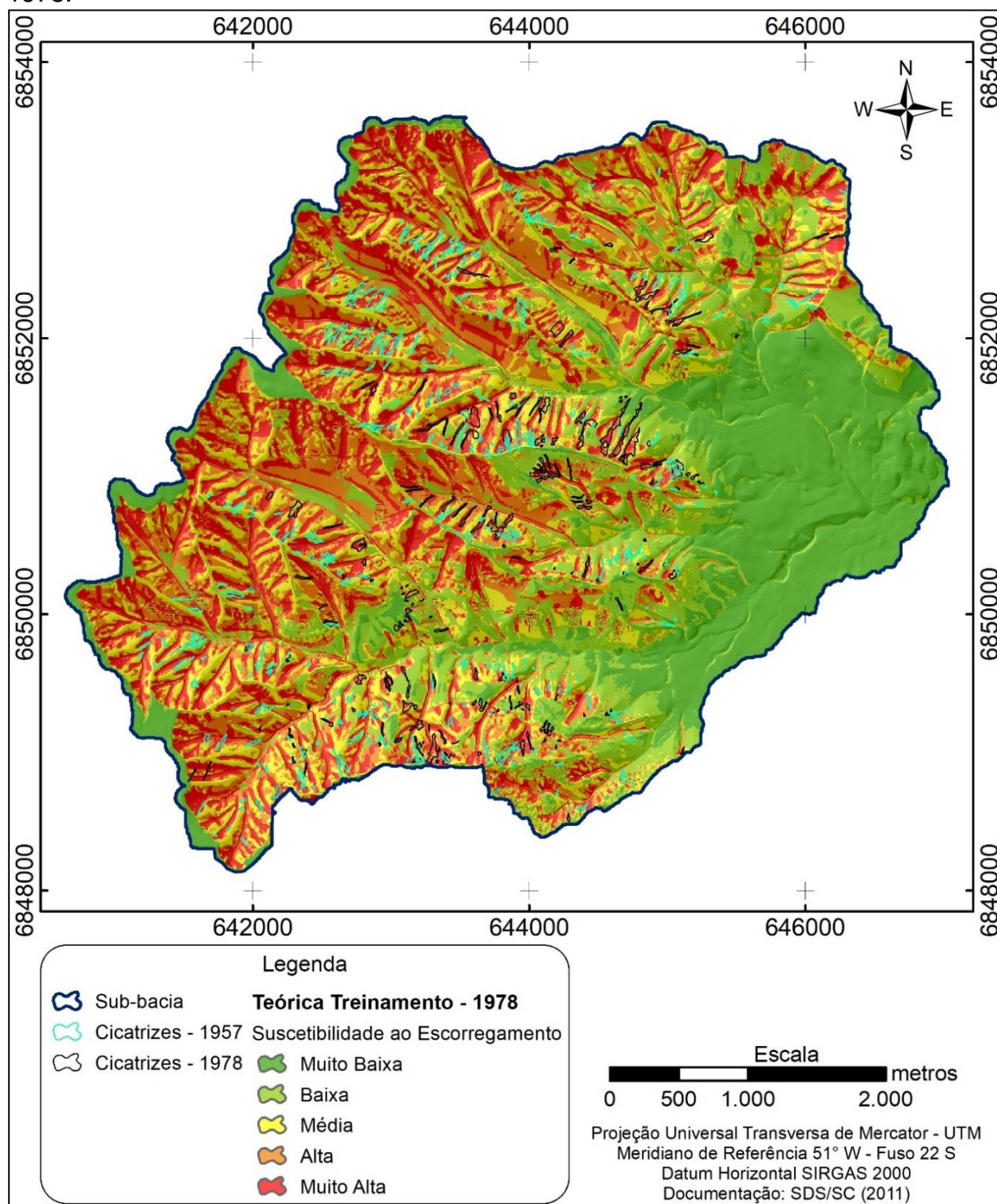




Tabela 43 – Quantificação das classes de suscetibilidade para o modelo teórico com treinamento pelo modelo restituído de 1978.

Classe	Área (ha)	%
Muito Baixa	456,7	20,4
Baixa	439,9	19,7
Média	444,4	19,9
Alta	446,0	19,9
Muito Alta	451,5	20,2
<b>Soma</b>	<b>2238,6</b>	<b>100,0</b>

### 5.5.3 Modelo SHALSTAB com treinamento pelo modelo de 1978

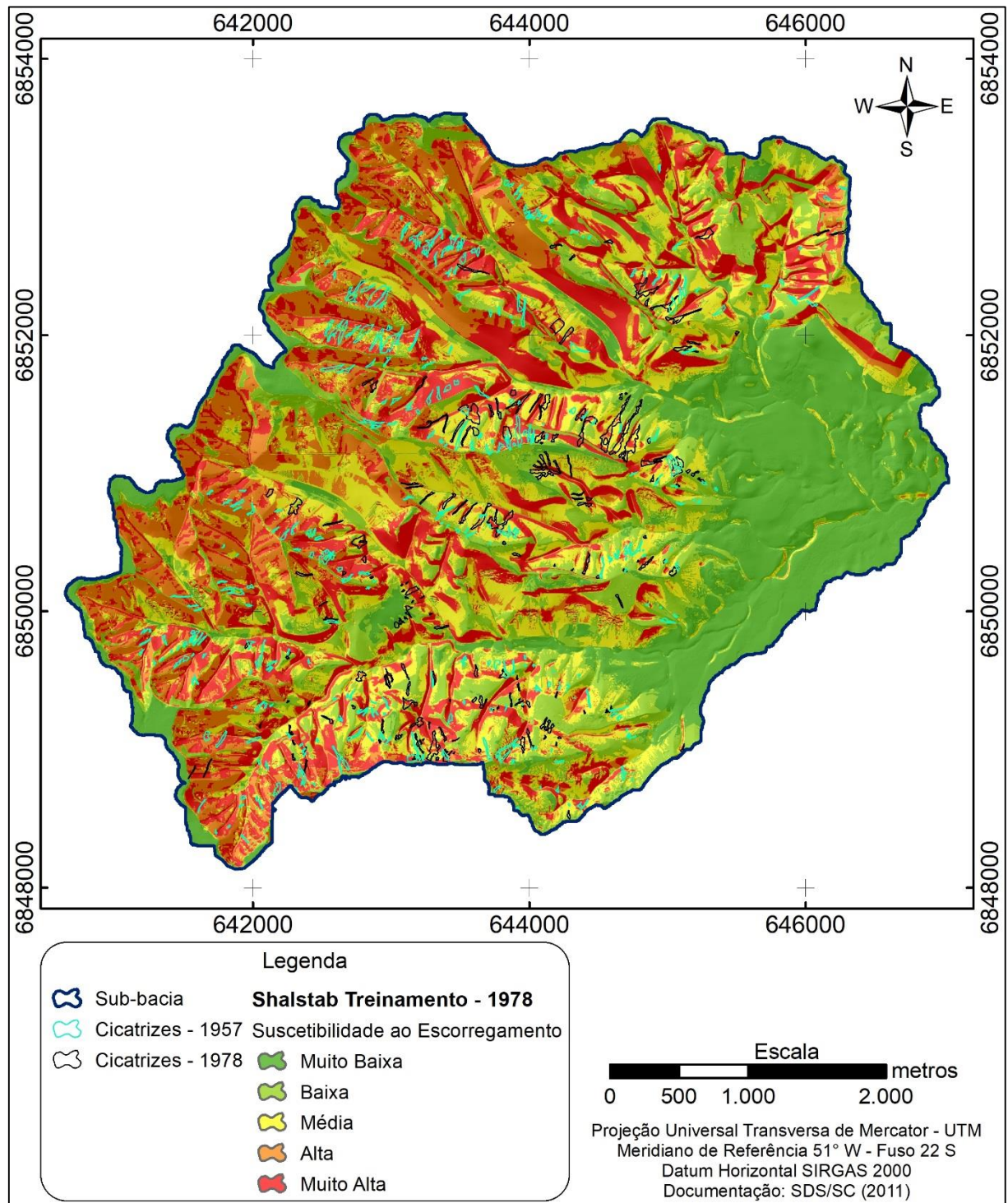
Esta integração consistiu em combinar o *raster* final resultante da aplicação do modelo SHALSTAB, respondendo por 70%, com treinamento pelas cicatrizes de escorregamentos de 1978, equivalente à 30%. Este escopo de integração de modelos e seus treinamentos vão ao encontro das recomendações de Silalahi, Arifianti e Hidayat (2019) enfatizando que as diversas combinações poderão prever melhor eventos desconhecidos. Adicionalmente, replicam para a área de estudo deste trabalho os mesmos esforços de Pourghasemi *et al.* (2018) e Vakshoori e Zare (2018), ao comparar-se combinações de diferentes mapas finais obtidos por modelos, variando as frações propostas para treinamento.

A Tabela 44 apresenta a quantificação das áreas absolutas e seu equivalente percentual para as classes de suscetibilidade aos escorregamentos, obtidas a partir desta integração de modelos. Assim, dividiu-se as frequências dos *pixels* resultantes da álgebra de mapas em quartis, ou seja, o objetivo da adoção desta estratégia não foi verificar o quanto uma classe sobrepõe em área uma outra, mas sim, em que local da subárea de estudo se distribuem e, ainda, se há coincidência espacial com as cicatrizes de escorregamentos do inventário realizado, Figura 80.

Tabela 44 – Quantificação das classes de suscetibilidade para o modelo SHALSTAB com treinamento pelo modelo restituído de 1978.

Classe	Área (ha)	%
Muito Baixa	451,0	20,5
Baixa	455,1	19,2
Média	441,4	19,7
Alta	429,6	20,4
Muito Alta	459,0	20,2
<b>Soma</b>	<b>2236,1</b>	<b>100,0</b>

Figura 80 – Mapa final do modelo SHALSTAB treinado por escorregamentos de 1978.



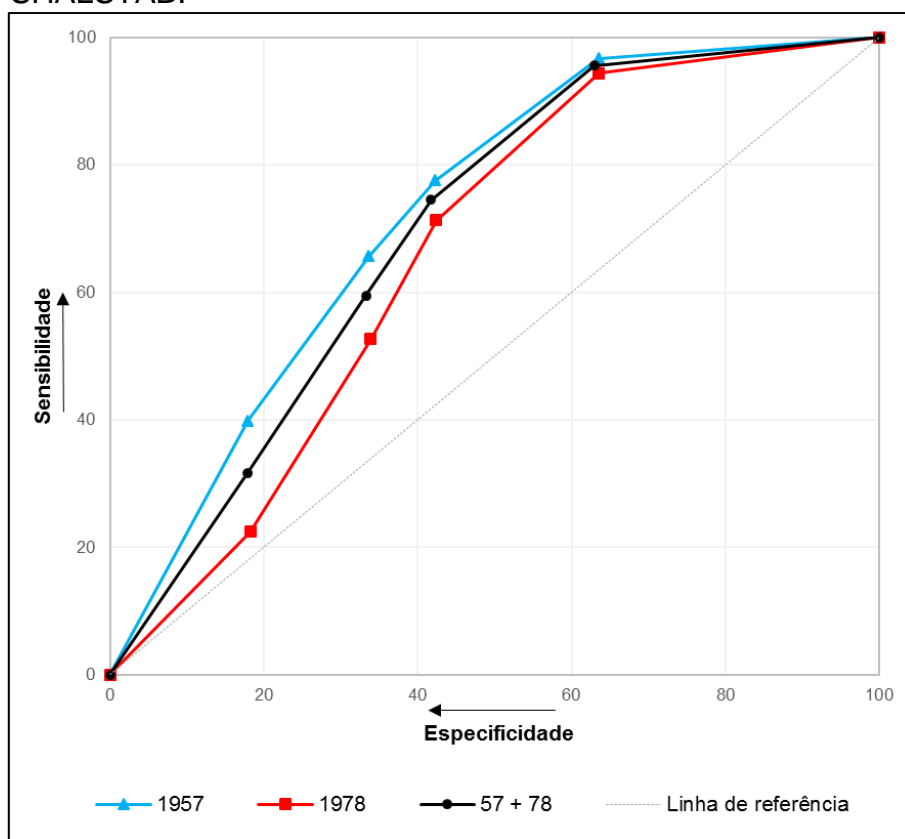
É fato que, após estas 3 combinações, obteve-se diferentes respostas espaciais para as classes de suscetibilidade aos escorregamentos, variando a coincidência espacial entre o predito e o já ocorrido (cicatrizes). Entretanto, o simples exame da quantificação de áreas não exprimirá a capacidade discriminante de cada um dos modelos fusionados, tampouco, a análise de seus mapas finais, que

somente darão uma orientação generalista da resposta obtida, se fazendo necessário a validação destes resultados, por uma análise de sensibilidade e especificidade.

#### 5.5.4 Validação dos modelos integrados

Para validar as combinações de diferentes modelos foram executados os mesmos procedimentos adotados para os modelos de predição e de restituição: cálculo de índices de acerto e de erro, construção de curvas ROC e obtenção da AUC. A partir do resultado da integração do modelo SHALSTAB com o obtido pelo modelo teórico AHP obteve-se a curva representada na Figura 81.

Figura 81 – Curvas ROC para o modelo teórico AHP combinado com SHALSTAB.



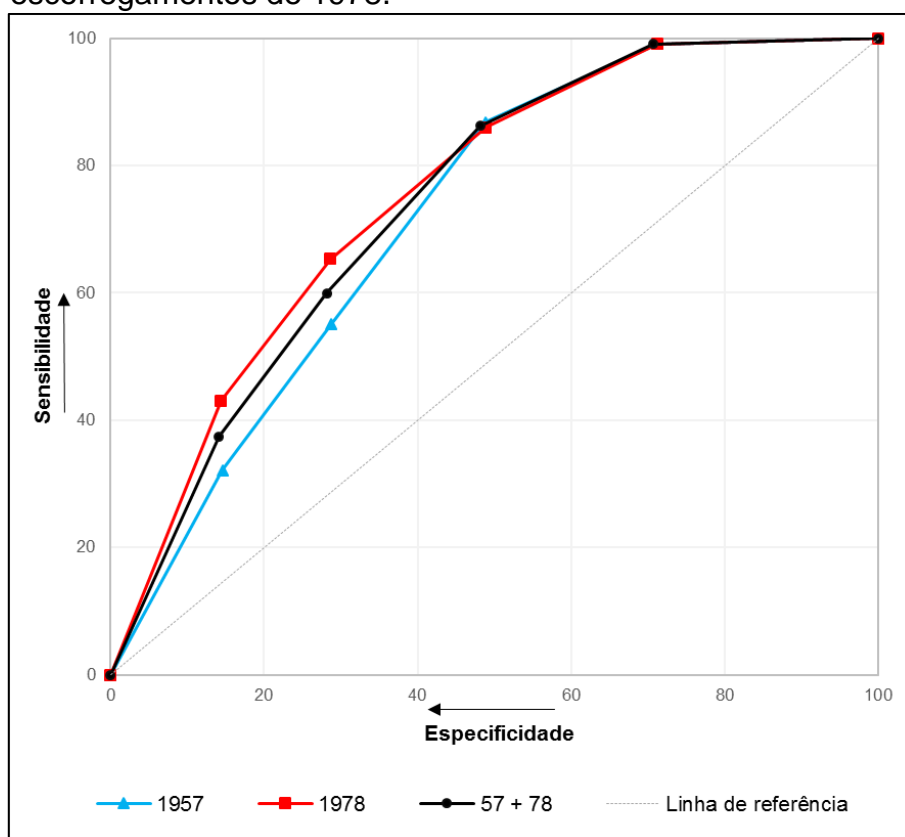
Examinando-se a Figura 81 vê-se que as cicatrizes do inventário de 1957 validaram melhor este modelo fusionado. O resultado da AUC para esta data foi de 0,72, para 1978 obteve-se 0,66 e, considerando-se os dois inventários para validar, a AUC resultante apontou 0,70. Fato notório é que há aumento da AUC se



fusionados SHALSTAB e AHP Teórica, se comparado às observações individuais de cada modelo. Assim, se a integração destes métodos resulta em previsões melhores que a análise individual de cada método conclui-se que eles não precisam 'concorrer', mas sim, compor uma solução integrada para resolução de problemáticas similares.

A segunda idealização de integração, que reuniu o modelo teórico obtido pela AHP (70%), treinado a partir de cicatrizes de escorregamento de 1978 (30%), resultou num mapa final que também foi cruzado com a posição espacial de antigas cicatrizes de escorregamentos, resultando na validação expressa pela Figura 82. Nesta combinação, a AUC utilizando-se das cicatrizes de 1978 resulta em 0,75, já com uso das cicatrizes de 1957 obteve-se 0,72, e o uso de todo o inventário de cicatrizes para validar este mapa apontou AUC 0,74.

Figura 82 – Curvas ROC para o modelo teórico treinado por escorregamentos de 1978.

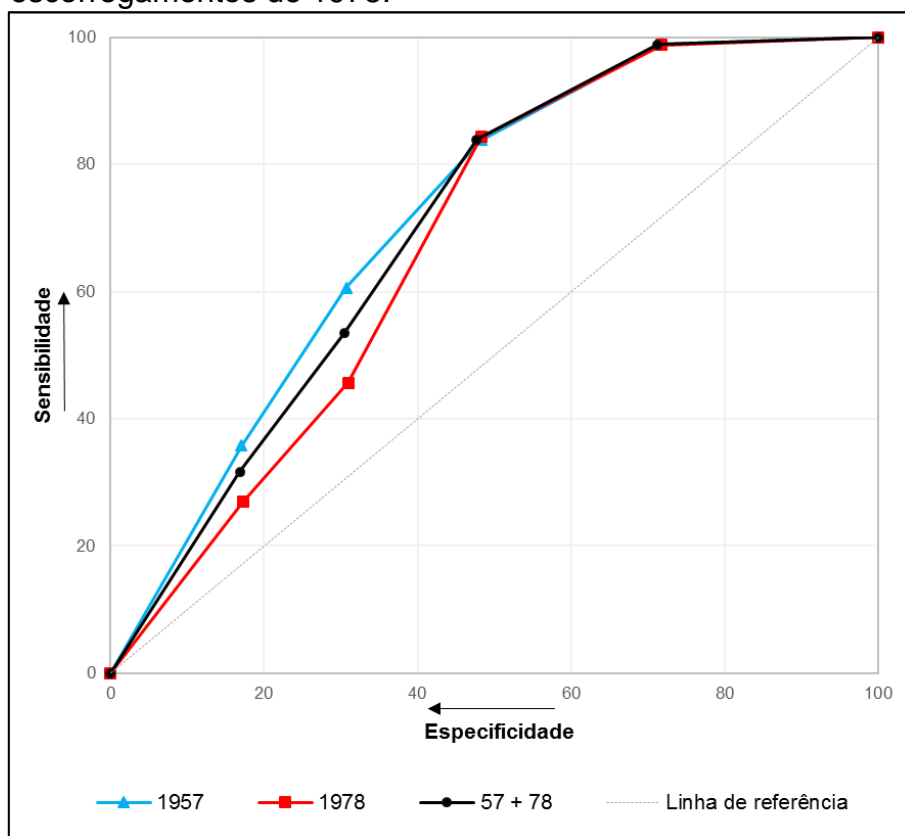


A validação da predição espacial dos modelos de suscetibilidade aos escorregamentos, efetuada por Deng, Li e Tan (2017) demonstrou AUC entre 0,773 e 0,807 para dados de treinamento, enquanto o conjunto de dados de validação resultou em valores entre 0,76 e 0,782. Os autores sugerem que valores de AUC

entre 0,7 e 0,9 indicam uma boa capacidade discriminante. Utilizando-se como referência os autores supracitados, os resultados deste trabalho apresentaram AUC similares para modelos de treinamento (a exemplo da restituição executada para 1978), ou mesmo, para validação, como foi o caso desta proposta de integração da AHP obtida por pesos teóricos com treinamento pelas cicatrizes de 1978.

Em relação à integração do mapa final obtido pelo SHALSTAB, treinado pelo modelo restituído para o ano de 1978, os resultados também se demonstraram promissores, com AUC variando de 0,68 (1978), 0,70 (todo o inventário) até 0,72 (1957), Figura 83. Esta constatação reforça mais uma vez que integrar diferentes métodos melhora a resposta espacial nos mapas de predição aos escorregamentos futuros.

Figura 83 – Curvas ROC para o modelo SHALSTAB treinado por escorregamentos de 1978.



É interessante mencionar que o mapa final desta integração, em grande parte oriunda do SHALSTAB, foi melhor validado pelo o inventário de cicatrizes de 1957. Entretanto, a classe incondicionalmente instável do mapa final do SHALSTAB é calculada matematicamente, mas não ocorrerá fisicamente no terreno, uma vez

que indica locais muito íngremes e ausência de solo. Assim, o modelo assemelha-se espacialmente à locais que não apresentam potencial fonte de escorregamentos futuros, uma vez que, em sua maioria já ocorreram pré-1957. Assim, mesmo com uma similaridade espacial um pouco inferior, 0,68 de AUC, treinar o modelo pelas cicatrizes de 1978 parece fisicamente coerente, porque estes locais ainda guardam manto de intemperismo espesso, ou seja, são locais de maior atenção.

Por fim, uma consideração se faz importante após a validação dos três modelos integrados: embora seja um bom indicador da confiabilidade geral de um mapa/modelo de suscetibilidade à escorregamentos e indicado sua aplicação, as curvas ROC não podem revelar as inerentes incertezas existentes nos distintos padrões de previsão espacial. Em outras palavras, dois modelos para a mesma área poderão apresentar mesmo valor de AUC, mas suas classes, ou zoneamentos, poderão divergir em vários pontos, sendo possível que um modelo com menor AUC ser mais sensível e específico para um local dentro de uma ampla área de estudo.

Esta constatação é só uma recomendação do cuidado em se concluir precocemente sobre padrões de predição espacial de diferentes modelos, com base apenas no cômputo da AUC. Mais estudos e a continuidade dos existentes sempre abrem novos pontos de vista.

## 6 CONCLUSÕES

As considerações finais deste trabalho estão organizadas de modo a responder em etapas cada um dos objetivos específicos, apresentando-se, ao final, o parecer acerca do objetivo geral da pesquisa. Antes disso, se fará necessário ressaltar algumas particularidades da execução deste trabalho na área de estudo elencada, bem como os desafios encontrados, para que sirva de referência.

Inicialmente, a escolha da área de estudo foi motivada por se tratar de ambiente fisicamente correlato à diversos outros locais que apresentavam a problemática dos movimentos de massa que, pelas condições das escarpas do bordo de planalto sul brasileiro e a tipologia de escorregamentos translacionais, os mesmos seriam recorrentes. Esta hipótese foi assertiva na medida em que foram investigadas fotografias aéreas antigas das cabeceiras do rio Mãe Luzia, ou seja, existiram movimentos de massa de grande magnitude, com frequência que ainda se pode, em pormenores, estudar, que qualificam o local como sítio para investigação.

Da motivação inicial caminhou-se para busca e compatibilização de estudos pretéritos no local, inclusive de bases cartográficas. Esta etapa, de fato, configurou um desafio, uma vez que se deparou com uma lacuna de conhecimento para esta sub-bacia investigada, bem como, para as vizinhas. O local não havia sido estudado sob esta ótica e haviam apenas partes de mapas regionais, em escalas incompatíveis aos objetivos elencados na pesquisa. Aqui se estava diante do caminho natural de todos que almejam estudar as minúcias da paisagem de um local: a ausência de bases cartográficas, ou de padrões que possibilitassem a organização de um Sistema de Informações Geográficas.

A falta de estudos correlatos para o local resultou na idealização de fatores predisponentes aos escorregamentos, sendo que outros foram adaptações de fontes secundárias, com aumento da escala, a exemplo dos fatores tipos de solo, litologia, alguns foram levantamentos autóctones desta pesquisa, como o diagnóstico da cobertura do solo, enquanto os demais fatores foram obtidos a partir de base cartográfica disponibilizada pelo Estado, a saber: orientação da vertentes, formas do terreno, hipsometria e declividade.

Não são todos os locais que se escolhe para estudar que possuem dados secundários passíveis de adaptação, seja de escala, de incorporação de classes temáticas em mapas. Sendo assim, uma recomendação para outros pesquisadores

em Ciências Ambientais é de que, ao se escolher uma área de estudo, motivados pela problemática, comprovação de hipóteses, retorno para sociedade, deve-se estar atento ao desafio de se angariar insumos para realização da pesquisa.

A reunião de uma base cartográfica local foi de extrema importância para a estruturação de um SIG, para efetuar-se comparações pareadas entre fatores e evoluir para modelos preditivos e reconstituintes dos escorregamentos, na lógica de sistemas. Entretanto, ciente da importância metodológica e na validação de métodos propostos neste trabalho, primeiramente, realizou-se o inventário de cicatrizes de escorregamentos.

Computar as cicatrizes de escorregamentos pretéritos não significava apenas digitalizar feições interpretadas em fotografias aéreas georreferenciadas. Isto porque a área de estudo possui a singularidade de expressiva amplitude altimétrica e declividades acentuadas. Se fazia necessária uma segurança maior de acurácia posicional e, neste sentido, a escolha da EFD E-Foto se demonstrou extremamente útil no processo de ortorretificação. Como *software* livre e tutoriais disponíveis aos usuários, desde que haja um nível de conhecimento correlato deste emprego técnico e dados dos voos antigos, pode-se utilizar-se deste recurso para ortorretificar blocos de fotografias aéreas, o que é aplicável para pequenas áreas de estudo.

O inventário de cicatrizes permitiu conhecer a quantidade, dimensões dos escorregamentos e, até mesmo, por associações de métodos, inferir os volumes de material que escorregou nos intervalos temporais analisados. Concluiu-se que houve boa explicação do cômputo dos volumes a partir das áreas, inclusive, foi constatado que as séries obtidas com emprego das informações da área de estudo, seria interessante réplica investigativa para outra área de estudo, para ratificação deste padrão, de obtenção de volumes a partir de áreas dos escorregamentos.

De fato, o inventário de cicatrizes ortorretificadas, bem conjugado com fatores, ponderado por pesos, ofertou as respostas necessárias para restituir e prever locais passíveis de escorregamentos. A associação de estatísticas de posicionamento das cicatrizes numa lógica de álgebra de mapas foi um produto deste trabalho, que se recomenda continuidade em outros estudos, que tenham esta orientação de se investigar grande quantidade de cicatrizes numa área de estudo.

Ainda abordando o assunto do emprego das fotografias aéreas antigas na interpretação de cicatrizes de escorregamentos, é usual em áreas montanhosas que

mais pesquisadores se deparem com muita área de sombra, o que dificultará, por vezes, impedirá a visualização e registro de feições. A experiência deste trabalho demonstrou que se faz necessário computar a zona de sombra, para que depois, esta seja deduzida de cálculos de calibração de modelos, contudo, os modelos de zoneamento preditivos aos escorregamentos devem estender as interpretações para estes locais.

E as contribuições dos inventários de cicatrizes não se encerraram em somente informar sobre a magnitude e geometria dos escorregamentos. A maior contribuição consistiu em obter-se as estatísticas de incidência das cicatrizes em classes temáticas de fatores predisponentes aos escorregamentos, uma importância dupla: para obter-se densidades normalizadas e conjugá-las em Análise Multicritério, de forma que possibilitaram restituir eventos passados; ou para validar e mesmo treinar os modelos preditivos aos escorregamentos, através de estatísticas de acerto e de erro, pela coincidência espacial das cicatrizes com zoneamentos idealizados.

Assim, considera-se que tenha se atingido este objetivo específico de ponderação de pesos de classes de fatores, pela incidência de escorregamentos antigos, bem como, utilizados as suas posições de ocorrência nas vertentes no conjunto de uma Análise Multicritério. Ao se estabelecer estas relações de densidade de escorregamentos por classes temáticas de cada fator, assumiu-se que o passado é a chave para que se compreenda os escorregamentos futuros. As restituições multitemporais forneceram recursos para se compreender e comparar eventos de diferentes datas, bem como empregar e validar diferentes métodos de mapeamento da suscetibilidade aos escorregamentos.

Em relação aos métodos empregados, inicialmente serão consideradas as repostas obtidas pela Análise Multicritério, que nesta pesquisa estruturou-se pela AHP. A coerência das comparações par a par dos fatores elencados só pôde ser realizada dada a bagagem técnica, vivência e disponibilidade do grupo de especialistas, que responderam o questionário idealizado na pesquisa. Este ponto de partida deixou de ser subjetivo, foi quantificado e a razão de consistência atestada, sendo os resultados associados na forma de uma equação, que definiu a hierarquia dos fatores predisponentes aos escorregamentos.

A equação apresentada é uma contribuição para trabalhos que possam ser desenvolvidos na área de estudo, ou mesmo, em bacias hidrográficas vizinhas, por apresentarem similaridades fisiográficas. Assim, outros autores poderão partir de



discussões sobre cicatrizes de escorregamentos, incidência destas nas classes de cada fator, modelos de predição, dentre outros assuntos que não a entrevista de especialistas, se assim preferirem.

Outra contribuição, além da hierarquia de fatores, deu-se na aplicação da modelagem a partir de pesos teóricos, o que pode inspirar ou servir de referência para estudos que não contam com inventários de cicatrizes (pela indisponibilidade de bases cartográficas). O mapa resultante deste modelo ofertou um razoável prognóstico da suscetibilidade aos escorregamentos na área de estudo, sendo um excelente mapa base para iniciar discussões e levantar-se hipóteses num local a que se queira iniciar uma investigação pormenorizada.

Já os modelos de restituição executados com base nos inventários de 1957 e 1978 responderam bem ao duplo propósito a que serviam, de simultaneamente restituir eventos passados, ou ainda, de servir para treinamento de modelos preditivos. É interessante considerar a falta de sincronia espacial entre os modelos restituídos levantou uma série de discussões sobre processos hidrogeomorfológicos, não aprofundados neste trabalho, mas que poderiam evoluir em outras pesquisas.

Se as cicatrizes de escorregamentos inventariadas em 1978 não coincidiam com os setores das encostas que escorregaram pré-1957, pôde-se concluir, preliminarmente, que pelo registro de um evento de alta magnitude em cerca de 20 anos (57-78), estes não são suficientes para formação de manto friável passível de escorregar nos mesmos locais anteriores. Assim, com o gatilho de precipitações intensas haverá escorregamentos em locais zoneados como de alta e muito alta suscetibilidade aos escorregamentos, preferencialmente fora dos polígonos das cicatrizes já inventariadas. Esse intervalo temporal não é o suficiente para que haja formação de manto de intemperismo passível de escorregar. Isso é visível porque as áreas fonte são distintas nos eventos restituídos, ou seja, um episódio pluvial intenso significou escorregamentos em locais há muito sem registros de escorregamentos, ou ainda, que não escorregaram. Não houve recorrência espacial em apenas duas décadas.

Já aplicação do modelo SHALSTAB, para mapear a suscetibilidade aos escorregamentos, prescindiu da combinação de informações extraídas de MDT, de ensaios *in situ* e de laboratório. Aqui se faz uma recomendação para trabalhos similares no território catarinense, que se utilizam da base cartográfica

disponibilizada pela Secretaria de Desenvolvimento Sustentável. Cada pesquisador deve ficar atento se na sua área de estudo há articulação de folhas que compõem o MDT, uma vez que nestes locais há tendência de quebras topográficas acentuadas que, se não corrigidas, comprometerão a aplicação do MHEU e, por conseguinte, do SHALSTAB.

A aplicação do modelo fisicamente embasado na área de estudo se demonstrou promissora, entretanto, ao final desta pesquisa, percebeu-se que mais esforços de campo se faziam necessários, como já justificado nos resultados. Outra constatação importante dá-se acerca da classe incondicionalmente instável, que foi a mais representativa em área, contudo, quem fizer o uso deste trabalho como referência deve estar atento ao fato de que a classe é matematicamente calculada, mas fisicamente improvável, ou seja, já escorregou em algum momento ou não possui solo para escorregar. O foco da predição deve estar nas classes de suscetibilidade imediatas à classe incondicionalmente instável.

Em relação à validação dos modelos aplicados, pelos Índices de Acerto e Erro, ou seja, peça coincidência espacial de antigas cicatrizes com o zoneamento obtido nas diferentes aplicações, esta ofertou subsídios para averiguar o desempenho de cada modelo, pela análise de sensibilidade/especificidade, possível pelas curvas ROC. A Análise Multicritério executada pela AHP e o modelo SHALSTAB, bem como, suas combinações, resultaram em curvas acima da linha de referência do espaço ROC, representando boa capacidade discriminante.

A interpretação da AUC é usualmente adotada para qualificar o resultado de um mapa de suscetibilidade e efetuar comparação dentre estes e, neste trabalho, foi verificado que a curva ROC é um excelente recurso para comparar a previsibilidade destes mapas finais. Entretanto, esta ferramenta somente oferta uma visão geral da especificidade e sensibilidade de um modelo, não sendo confiável para predição de locais específicos dentro destes. Assim, recomenda-se o uso deste ferramental, desde que o pesquisador esteja ciente de seus recursos e limitações.

Por fim, convergindo para o objetivo geral do trabalho, de se comparar a Análise Multicritério e modelo SHALSTAB, quanto a sua capacidade discriminante para mapear suscetibilidade aos escorregamentos, ao longo da pesquisa, percebeu-se simplicidade em apenas comparar métodos, o que empobrece quaisquer estudos. A construção do conhecimento está em abrir caminhos para estudos subsequentes,

não encerrar discussões baseadas em índices e métricas de validação que colocariam em conflito métodos que oferecem possibilidades complementares.

Neste intuito, para não incorrer no erro de apenas julgar os resultados de cada método pelo cômputo da AUC, acatando a sugestão de estudos correlatos e atuais que estão acontecendo pelo mundo, esta pesquisa evoluiu para a integração, combinação, ou ainda, fusão de modelos. A explicação que se consegue pelas combinações levou ao conhecimento de particularidades espaciais que não seriam alcançadas numa análise particionada. Um exemplo nesta pesquisa deu-se quanto se integrou o modelo obtido pelos pesos teóricos (multicritério) com o resultado do modelo SHALTAB, uma vez que a validação da integração mostrou sensibilidade e especificidade maior que a análise de cada modelo individualizado.

Os exemplos de integração, adotando-se percentual do modelo de restituição para treinar o teórico, e mesmo o modelo SHALSTAB, também elevaram a capacidade discriminante dos modelos finais. Conclui-se assim, que fazer ciência não consiste em conflitar métodos, ou eleger o mais adequado, mas em integrar, desde que os resultados sejam superiores aos dados de entrada. São estes desafios que conjugam diferentes pontos de vista que convergem para horizontes mais amplos e possibilitam o avanço de uma pesquisa. E neste trabalho conseguiu-se este êxito da integração da Análise Multicritério, pela AHP, com o modelo SHALTAB, para elaborar mapa preditivo à escorregamentos numa área piloto. Com isso, espera-se que o melhor de cada modelo seja considerado: do SHALSTAB, a escala e os processos não tangíveis por análises multicritérios; da análise multicritério, a praticidade e menor dispêndio de recursos (campo e laboratório).

## REFERÊNCIAS

- ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo: Análise Granulométrica. RJ. 1984. 13p.
- ASF - ALASKA SATELLITE FACILITY. **Alos Palsar**. Disponível em: <https://search.asf.alaska.edu/#/> Acesso: 14 jan. 2020.
- AGÊNCIA FAPESP. **INPE desenvolve metodologia para mapear risco de deslizamento de terra**. Notícia de 27/05/2015. Disponível em: <[http://agencia.fapesp.br/print/inpe\\_desenvolve\\_metodologia\\_para\\_mapear\\_risco\\_de\\_deslizamento\\_de\\_terra/20888/](http://agencia.fapesp.br/print/inpe_desenvolve_metodologia_para_mapear_risco_de_deslizamento_de_terra/20888/)> Acesso: 05 abr. 2018.
- AKGUN, A. A comparison of landslide susceptibility maps produced by logistic regression, multi-criteria decision, and likelihood ratio methods: a case study at İzmir, Turkey. **Landslides**, v. 9, p. 93–106, 2012.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- AROF, A. Md. The application of a combined Delphi-AHP Method in Maritime Transport Research: a review. **Asian Social Science**, v.11, n.23, p. 73-82, 2015.
- ASSUNÇÃO, V. K. Enchente de 1974 como drama social: relações entre percepção de risco, conflito e gentrificação. **Ambiente & Sociedade**, v. XVII, n. 4, p. 195-212, 2014.
- ATLAS DE DESASTRES NATURAIS DO ESTADO DE SANTA CATARINA: período de 1980 a 2010/HERRMANN, M. L. P. (org.). 2. ed. atualizada e revisada. Florianópolis: IHGSC/Cadernos Geográficos, 2014.
- AYOADE, J. O. **Introdução à climatologia para os Trópicos**. São Paulo: Difel. 1996.
- AZEVEDO, G. F.; CARVAJAL, H. E. M.; SOUZA, N. M. Avaliação determinística e probabilística da susceptibilidade a ocorrência de deslizamentos pela aplicação do modelo SHALSTAB. In: XVII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR (João Pessoa-PB: 2015), João Pessoa, INPE, **Anais...**, 2015. (CD-rom).
- BACK, A. J. **Bacias Hidrográficas**: Classificação e caracterização física (com o programa HidroBacias para cálculos). Florianópolis: Epagri, 2014.
- BADOLATO, I. S.; AGUIAR, R. A. **A Integração do Software E-FOTO em um Ambiente de Desenvolvimento XP**. UERJ, Rio de Janeiro, 2010.
- BAHRAMI, S.; RAHIMZADEH, B.; KHALEGHI, S. Analyzing the effects of tectonic and lithology on the occurrence of landslide along Zagros ophiolitic suture: a case

study of Sarv-Abad, Kurdistan, Iran. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v.79, p. 1619-1637, 2019.

BECHTUM, T. **Automation and further development of the borehole shear test** (2012). Graduate Theses and Dissertations. Iowa State University Digital Repository. Disponível em: <http://lib.dr.iastate.edu/etd/12886> Acesso em: 18 jul. 2018.

BERRY, J. K. Cartographic Modelling: The Analytical Capabilities of GIS. In: GOODCHILD, M.; PARKS, B. O.; STEYAERT, L. T. (eds.) **Environmental Modelling With GIS**. New York: Oxford University Press, 1993.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Bulletin of Hydrological Sciences**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.

BRASIL. **11º Relatório de Monitoramento dos Indicadores Ambientais**. Processo nº. 2000.72.04.002543-9. Justiça Federal. 1ª Vara Federal de Criciúma, SC. Criciúma, 2018. 308 p.

BRASIL. Governo Federal do Brasil (National Plan Risk Management and Disaster Response Federal Government of Brazil). Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres, 2012a. Disponível em: [file:///C:/Users/william.santana/Downloads/120808\\_Plano\\_Nac\\_Risco\\_2.pdf](file:///C:/Users/william.santana/Downloads/120808_Plano_Nac_Risco_2.pdf). Acesso em: 18 de abr. 2018.

BRASIL. Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nos 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, 11 abr. 2012b.

BRITO, J. L. N. S.; COELHO FILHO, L. C. T. **Fotogrametria digital**. 2ª edição. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007.

BRITO, M. M. de; WEBER, E. J.; PASSUELO, A. Avaliação multicritério aplicada ao mapeamento a suscetibilidade a escorregamentos: o caso do Bairro Cascata, Porto Alegre, RS. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 3, p. 735 – 749, 2017.

BROOKFIELD, M. E. The evolution of the great river systems of southern Asia during the Cenozoic India-Asia collision: Rivers draining southwards. **Geomorphology**, v.22, p. 285-312, 1998.

BROOKS, C.; WIENERT, M.; SPAETE, L.; DOBSON, R. Georeferencing of Scanned Historical FSA Aerial Photographs for Extraction of Wetlands Boundaries and Other Information for the Michigan NRCS. **MichiganTech Research Institute (MTRI)**, v.1, p.1-9, 2008.

BROVELLI, M. A.; MINGHINI, M. Georeferencing old maps: a polynomial-based approach for Como historical cadastres. **e-Perimetron**, v. 7, n. 3, p. 97–110, 2012.

CAMPOS, C.; ALVES, R.; BRAGA, H. J. Mudanças climáticas atuais e seus impactos no Estado de Santa Catarina. **Agropecuária Catarinense**, v.19, p.31-35, 2006.

CEPED-UFSC - Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. Universidade Federal de Santa Catarina. **Atlas Brasileiro de Desastres Naturais 1991 a 2012**: volume Brasil. Florianópolis, 2013. Disponível em: <http://150.162.127.14:8080/atlas/Brasil%20Rev%202.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2018.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo: Edgard Blücher, 1980.

CORSEUIL, C. W. Universidade Estadual Paulista. **Técnicas de Geoprocessamento e de análise de multicritérios na adequação de uso das terras**. 2006. 101 p. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2006.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Apresentação**. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Apresentacao-37> Acesso: 05 abr. 2018a.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Setorização de Riscos Geológicos**. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geologia-de-Engenharia-e-Riscos-Geologicos/Setorizacao-de-Riscos-Geologicos-4138.html> Acesso: 05 abr. 2018b.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações**. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Geologia-de-Engenharia-e-Riscos-Geologicos/Cartas-de-Suscetibilidade-a-Movimentos-Gravitacionais-de-Massa-e-Inundacoes-3507.html> Acesso: 05 abr. 2018c.

CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Biblioteca de padrões de relevo**: Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação. (Org. Marcelo Eduardo Dantas). Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/16589> > Acesso: 06 abr. 2018d.

DAI, F. C.; LEE, C. F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. **Geomorphology**, v. 42, p. 213-228, 2002.

DE BANO, L. F. The role of fire and soil heating on water repellency in Wildland environments: a review. **Journal of Hydrology**, v. 231–232, p. 195–206, 2000.

DENSKI, A. P. N.; BACK, A. J. Tendência Climatológica nos Elementos Meteorológicos e na Evapotranspiração de Referência de Urussanga-SC. **Revista Brasileira de Climatologia**, v.17 (n.1), p. 262-275, jul/dez. 2015.



DEL SOLDATO, M.; RIQUELME, A.; BIANCHINI, S.; TOMÀS, R.; DI MARTIRE, D.; DE VITA, P.; MORETTI, S.; CALCATERRA, D. Multisource data integration to investigate one century of evolution for the Agnone landslide (Molise, southern Italy). **Landslides**, v. 15, p. 2113–2128, 2018.

DENG, X.; LI, L.; TAN, Y. Validation of spacial prediction models for landslides susceptibility by considering structural similarity. **International Journal of Geo-Information**, v. 6, n. 103, p. 1-16, 2017.

DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. **SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential**. NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), Technical Report, 29 p. 1998.

DIETRICH, W. E.; BELLUGI D.; REAL DE ASUA R. Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management. In: **Land Use and Watersheds: Human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas**/ WIGMOSTA M. S.; BURGESS S. J. (orgs). Amer. Geoph. Union, Water Science and Application 2, 2001, p.195-227.

DONEUS, M.; VERHOEVEN, G.; KAREL, W.; BRIESE, C.; PFEIFER, N.; RESSI, C. Towards an automated georeferencing and orthorectification of archaeological aerial photographs. 2013. Disponível em: <<https://www.researchgate.net/publication/241703710>> Acesso em: 01 Maio, 2019.

DONEUS, M.; WIESER, M.; VERHOEVEN, G.; KAREL, W.; FERA, M. PFEIFER, N. Automated Archiving of Archaeological Aerial Images. **Remote Sensing**, v. 209, n. 8, p.1-22, 2016.

DUARTE, G. M. **Depósitos Cenozóicos Costeiros e a Morfologia do Extremo Sul de Santa Catarina**. Vol. 01. Tese de Doutorado. São Paulo: USP, 1995.

E-FOTO: Uma Estação Fotogramétrica Digital Educacional Livre. Disponível em: <<http://www.efoto.eng.uerj.br/>> Acesso em: 26 de fevereiro de 2019.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado de Santa Catarina**. Escala 1:250.000, 1998.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, Embrapa, 1999.

EPAGRI - EMPRESA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA E EXTENSÃO RURAL DE SANTA CATARINA. **Zoneamento Agroecológico e Socioeconômico do Estado de Santa Catarina**. 1999. CD-ROM.

ESRI. ArcGIS Desktop: Release 10.2. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2013.

ESRI. **Curvature Function.** Disponível em: <<http://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/manage-data/raster-and-images/curvature-function.htm>> Acesso 27 Ago. 2018.

FARAJI, M. R.; QI, X.; JENSEN, A. Computer vision–based orthorectification and georeferencing of aerial image sets. **Journal of Applied Remote Sensing**. v. 10, n. 3, 2016. Disponível em: <<https://www.spiedigitallibrary.org/journals/Journal-of-Applied-Remote-Sensing>>. Acesso em: 22 Mar. 2019

FARIA, D. G. M.; AUGUSTO FILHO, O. Aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP) no Mapeamento de Perigo de Escorregamentos Em Áreas Urbanas. **Revista do Instituto Geológico**, v.34, n. 1, p. 23-44, 2013a.

FARIA, D. G. M.; AUGUSTO FILHO, O. Mapeamento de perigo de escorregamentos em encostas urbanas precárias brasileiras com a aplicação do método AHP. **Geotecnia**, n. 129, p. 17-42, 2013b.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W. Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning, **Engineering Geology**, v. 102, p. 99-111, 2008.

FIORILLO, F.; GUERRIERO, L.; CAPOBIANCO, L.; PAGNOZZI, M.; REVELLINO, P.; RUSSO, F.; GUADAGNO, F. M. Inventory of Vietri-Maiori landslides induced by the storm of October 1954 (southern Italy). **Journal of Maps**, v. 15, n. 2, p. 530-537, 2019.

GERENTE, J.; LUIZ, E. L.; DAL SANTO, M. A. Utilização do SHALSTAB como ferramenta para o diagnóstico preliminar da suscetibilidade a deslizamentos rasos no baixo vale do rio Luís Alves – SC. **Ambiência Guarapuava**, v. 10, n. 1, p. 333-350, 2014.

GHAZIPOUR, N.; SIMPSON, G. Size distribution and controls of landslides in the Zagros mountain belt (Iran). **Special Paper of the Geological Society of America**, v. 525, p.1-22, 2016.

GOBBI, S.; MAIMERI, G.; TATTONI, C.; CANTIANI, M. G.; ROCCHINI, D.; LA PORTA, N.; CIOLLI, M.; ZATELLI, P. Orthorectification of a large dataset of historical aerial images: procedure and precision assessment in an open source environment. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XLII-4/W8, 2018. FOSS4G 2018 – Academic Track, 29–31 August 2018, Dar es Salaam, Tanzania.

GOERL, R. F. **Estudo de inundações em Rio Negrinho – SC sob a ótica dos desastres naturais**. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Geografia, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y., **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido**. IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas: São Paulo, 1976.

GUZZETTI, F.; ARDIZZONE, F.; CARDINALI, M.; ROSSI, M.; VALIGI, D. Landslide volumes and landslide mobilization rates in Umbria, central Italy. **Earth and Planetary Science Letters**, v. 279, p. 222–229, 2009.

HADIAN-AMRI, M.; SOLAIMANI, K.; KAVIAN, A.; AFZAL, P.; GLADE, T. Curve Estimation Modeling Between Area and Volume of Landslides in Tajan River Basin, North of Iran. **EcoPersia**, v. 2, n. 3, p. 651-665, 2014.

HAYLOCK, M. R.; PETERSON, T. C.; ALVES, L. M.; AMBRIZZI, T.; ANUNCIAÇÃO, Y. M. T.; BAEZ, J.; BARROS, V. R.; BERLATO, M. A. M.; BIDEGAIN, M. A. M.; CORONEL, G.; CORRADI, V.; GARCIA, V. J.; GRIMM, A. M.; KAROLY, D.; MARENGO, J. A.; MARINO, M. B.; MONCUNILL, D. F.; NECHET, D.; QUINTANA, J.; REBELLO, E.; RUSTICUCCI, M.; SANTOS, J. L.; TREBEJO, I.; VINCENT, L. A. Trends in total and extreme South American rainfall 1960-2000 and links with sea surface temperature. **Journal of Climate**, v. 19, p. 1490-1512, 2006.

HE, S.; PAN, P.; DAI, L.; WANG, H.; LIU, J. Application of kernel-based Fisher discriminant analysis to map landslide susceptibility in the Qinggan River delta, Three Gorges, China. **Geomorphology**, n. 171–172, p. 30–41, 2012.

HIGHLAND, L. M.; BOBROWSKY, P. **O Manual de Deslizamento**: um guia para a compreensão de deslizamentos. Reston: U.S. Geological Survey, 2008.

HONDA, E. A.; DURIGAN, G. A restauração de ecossistemas e a produção de água. **Hoehnea**, v.44, n.3, p. 315-327, 2017

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico de uso da terra**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2013. 171 p. (Manuais Técnicos em Geociências, n. 7). Disponível em: <<http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv81615.pdf>>. Acesso em: 14 mar. 2018.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Ortomosaico obtido por processo aerofotogramétrico digital**. Folha SH.22-X-B-I-3-SE MI-2924-3-SE. Escala 1:25.000. Rio de Janeiro, 2007.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sinopse do censo demográfico 2010**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. 261 p.

IMAIZUMI, F.; SIDLE, R. C. Linkage of sediment supply and transport processes in Miyagawa Dam catchment, Japan. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, v. 112, F03012, 2007.

IN-SITU SOIL TESTING, L.C. - SOIL BOREHOLE SHEAR TEST |. Disponível em: <<http://insitusoil.com/soil-borehole-shear-test/>> Acesso 18 jul. 2018.

INSTRUÇÃO NORMATIVA n. 1, de 24 de agosto de 2012. **Diário Oficial da União**. Seção 1, n. 169, quinta-feira, 30 de agosto de 2012. Disponível em:<

[http://www.editoramagister.com/doc\\_23667061\\_INSTRUCAO\\_NORMATIVA\\_N\\_1\\_D E\\_24\\_DE\\_AGOSTO\\_DE\\_2012.aspx](http://www.editoramagister.com/doc_23667061_INSTRUCAO_NORMATIVA_N_1_D E_24_DE_AGOSTO_DE_2012.aspx) > . Acesso em: 23 fev. 2021.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações - 1:25.000**: nota técnica explicativa. São Paulo: IPT, 2014.

KAREL, W.; DONEUS, M.; VERHOEVEN, G.; BRIESE, C.; RESSL, C.; PFEIFER, N. Oriental - automatic geo-referencing and ortho-rectification of archaeological aerial photographs. In: XXIV INTERNATIONAL CIPA SYMPOSIUM. 2 - 6 september, 2013, Strasbourg. V. II-5/W1, p.175-180, 2013.

KER, J. C.; ALMEIDA, J. A.; FASOLO, P. J.; HOCHMÜLLER, D. P. Pedologia. **Projeto RADAMBRASIL**. Folha SH-22 - Porto Alegre e parte das folhas SH-21 – Uruguiana e SI-22 – Lagoa Mirim. Rio de Janeiro: RADAM, 1986. p. 405-540. v. 33.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. O.; MARCELINO, E. V.; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. **Prevenção de desastres naturais**: Conceitos básicos. Curitiba: Organic Trading, 2006.

KOBIYAMA, M.; MICHEL, G. P.; GOERL, R. F. Relação entre desastres naturais e floresta. **Revista GeoNorte**, v. 6, p. 17-48, 2012. Ache

KOMAC, M. A landslide susceptibility model using the Analytical Hierarchy Process method and multivariate statistics in perialpine Slovenia. **Geomorphology**. v. 74, n. 1-4, p.17-28, 2006.

KREBS, A. S. J. **Contribuição ao Conhecimento dos Recursos Hídricos Subterrâneos da Bacia Hidrográfica do Rio Araranguá, SC**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Florianópolis: UFSC, 2004.

LADD, G. B.; NAGCHAUDHURI, A.; EARL, T. J.; MITRA, M.; BLAND, G. L. Rectification, georeferencing, and mosaicking of images acquired with remotely operated aerial platforms. In: ASPRS Annual Conference, Reno, Nevada, 1 - 5 May, 2006.

LEINZ, V.; LEONARDOS, O. H. **Glossário Geológico**. São Paulo: Cia Editora Nacional, USP, 1971.

LEROI, E.; BONNARD, C.; FELL, R.; MCINNES, R. Risk assessment and management. In: HUNGR, O., FELL, R., COUTURE, R., EBERHARDT, E. (eds.), **Landslide Risk Management**. London: Taylor and Francis, 2005, p. 159–198.

LUDWIG, L.; MATTEDI, M. A. Dos desastres do desenvolvimento ao desenvolvimento dos desastres: a expressão territorial da vulnerabilidade. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 39, p. 23-42, 2016.

MAGALHÃES, I. A. L.; THIAGO, C. R. L.; AGRIZZI, D. V.; SANTOS, A. R. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES:

uma análise comparativa entre dois métodos. **Cadernos de Geociências**, v. 8, n. 2, 2011.

MARCELINO, E. V. **Desastres naturais e geotecnologias**: conceitos básicos. Santa Maria: INPE, 2008.

MARCELINO, E. V. **Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento no município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de sensoriamento remoto**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, Programa de Pós-Graduação em Geografia, São José dos Campos: INPE, 2003. 228p.

MARENGO, J. M. O Futuro Clima do Brasil. **Revista USP**, São Paulo: n. 103, p. 25-32, 2014.

MARTIN, Y.; ROOD, K.; SCHWAB, J. W.; CHURCH, M. Sediment transfer by shallow landsliding in the Queen Charlotte Islands, British Columbia. **Canadian Journal of Earth Sciences**, v. 39, p. 189–205, 2002.

MATEUS, E. T. Calamidade pública em uma cidade submersa: a imprensa e a Enchente de 1974 (Tubarão – SC), **Revista Hydra**. v. 1, n. 2, p. 126-153, 2016.

MENDES, J. M. **Sociologia do risco**: uma breve introdução e algumas lições. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2015.

MENIN, F. A. **Aplicação do método AHP para hierarquização de condicionantes de corridas de massa**. 2013. 57 f. TCC (Graduação) - Graduação em Engenharia Ambiental, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2013.

MICHEL, G. P. **Modelagem de Estabilidade de Encostas com Consideração do Efeito da Vegetação**. 2013. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, UFSC, Florianópolis.

MICHEL, G. P. **Estimativa da profundidade do solo e seu efeito na modelagem de escorregamentos**. 2015. 164 f. Tese de Doutorado (Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas-IPH/UFRGS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MICHEL, G. P.; KOBAYAMA, M. Mapeamento de Áreas Susceptíveis a Fluxos de Detritos por Meio de Modelagem Computacional. In: **Planejamento e Gestão Territorial: Hidrografia e Sustentabilidade**/Nilzo Ivo Ladwig, Hugo Schwalm (orgs.). Florianópolis: Insular, 2016a. 304 p.

MICHEL, G. P.; KOBAYAMA, M. Development of new equation to estimate the maximum soil depth by using the safety factor. In: AVERSA, S.; CASCINI, L.; PICARELLI, L.; SCAVIA, C. (eds.) **Landslides and Engineered Slopes: Experience, Theory and Practice**, CRC Press/ Balkema, 2016b. p. 1417-1421.

MICHEL, G.P.; KOBİYAMA, M. Estimativa da profundidade do solo: Parte 1 – Métodos de campo. **Revista Brasileira de Geografia Física**. v. 8, p. 1206-1224, 2015.

MICHEL, G. P.; KOBİYAMA, M.; GOERL, R. F. Análise comparativa entre os modelos Shalstab e Sinmap na identificação de áreas susceptíveis a escorregamentos translacionais. In: X Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2012, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), 2012. CD-rom. p. 1-21.

MINUZZI, R.B.; CARAMORI, P. H. Variabilidade climática sazonal e anual da chuva e veranicos no Estado do Paraná. **Revista Ceres**, v. 58, (n.5), p. 593-602, 2011.

MONTEIRO, M. A.; FURTADO, S. M. A. O Clima no Trecho de Florianópolis – Porto Alegre: Uma Abordagem Dinâmica. Florianópolis: **Geosul**, v. 10, n.19-20, p. 117-133, 1996.

MORAD, M.; CHALMERS, A. I.; O'REGAN, P. R. The role of root-mean-square error in the geo-transformation of images in GIS. **International Journal of Geographical Information Systems**, v. 10, n. 3 p. 347-353, 1996.

MOTA, A. A.; KOBİYAMA, M. Avaliação da dinâmica da água na zona vadosa em solos de diferentes usos com o modelo HYDRUS-1D. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (Maceió: 2014), Maceió, ABRH, **Anais...**, 2011. 16p. (CD-ROM).

MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A Physically-Based Model for Topographic Control on Shallow Landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 1, p. 1153-1171, 1994.

MUKHERJEE, N.; HUGÉ, J.; SUTHERLAND, W. J.; McNeill, J.; VAN OPSTAL, M.; DAHDOUNH-GUEBAS, F.; KOEDAM, N. The Delphi technique in ecology and biological conservation: applications and guidelines. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 6, n. 9, p. 1097-1109, 2015.

NEARY, D. G., ICE, G. G.; JACKSON, C. R. Linkages between forest soils and water quality and quantity. **Forest Ecology and Management**, v. 258, p. 2269-2281, 2009.

NGUYEN, T. T. N.; LIU, C-C. A New Approach Using AHP to Generate Landslide Susceptibility Maps in the Chen-Yu-Lan Watershed, Taiwan. **Sensors**. v. 19, n. 3(505), p. 1-18, 2019.

NIETHAMMER, U.; JAMES, M. R.; ROTHMUND, S.; TRAVELLETTI, J.; JOSWIG, M. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. **Engineering Geology**, v. 128, p. 2–11, 2012.

NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. Rio de Janeiro: IBGE, 1989.

NUNES, D. M.; COELHO, C. D.; SOUZA, A. B.; CALIJURI, M. L.; SANTOS, A. P. Uso integrado do modelo SHALSTAB e análise multicritério para mapeamento de áreas susceptíveis aos escorregamentos de terra na Bacia do Ribeirão São



Bartolomeu, Viçosa - MG. **Revista Brasileira de Cartografia**, nº 68/9, p. 1853-1868, 2016.

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

OLSEN, M. J.; STUEDLEIN, A. W. Discussion of "Use of terrestrial laser scanning for the characterization of retrogressive landslides in sensitive clay and rotational landslides in river banks". **Canadian Geotech**, v. 47, p.1164–1168, 2010.

ONIGA, V. E.; BREABAN, A. I.; STATESCU, F. Determining the Optimum Number of Ground Control Points for Obtaining High Precision Results Based on UAS Images. **Proceedings**, v. 2, n. 352, 2018.

ORFEO, O. **Criterios para la clasificacion de barras em grandes rios entrelazados de llanura subtropical**. Actas VI Reunion Argentina de Sedimentologia, p. 231-236, 1996.

PAULINO, R. B. **Modelo AHP aplicado à ocorrência de deslizamentos na região nordeste de Santa Catarina**. 2013. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Geografia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

PELLÉRIN, J. R. G. M.; DUARTE, G. M.; SCHEIBE, L. F.; MENDONÇA, M.; BUSS, M. D.; MONTEIRO, M. A. Timbé do Sul – Jacinto Machado: avaliação preliminar da extensão da catástrofe de 23-24/12/95. **Geosul**, v. 12, n. 23, p.71-86, 1997.

PEZENTE, D. P. Análise temporal do comportamento das chuvas na Bacia Carbonífera de Santa Catarina. In: V Congresso Brasileiro de Carvão Mineral. Criciúma. **Anais...** Criciúma: SATC, 29 mai./01 jun., 2017.

PIAZZA, G. A.; VIBRANS, A. C.; LIESENBERG, V.; REFOSCO, J. C. Object-oriented and pixel-based classification approaches to classify tropical successional stages using airborne high-spatial resolution images. **GIScience & Remote Sensing**, v. 53, n. 2, p. 206-226, 2016.

PINHEIRO, A.; GRACIANO, R. L. G.; SEVERO, D. L. Tendências das séries temporais de precipitação da Região Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n.3, p. 281-290, 2013.

POURGHASEMI, H. R., GAYEN, A.; PARK, S.; LEE, C-W.; LEE, S. Assessment of Landslide-Prone Areas and Their Zonation Using Logistic Regression, LogitBoost, and NaïveBayes Machine-Learning Algorithms. **Sustainability**, v. 10, n. 3697, p. 1-23, 2018.

PRADHAN, A. M. S.; KIM, Y. T. Evaluation of a combined spatial multi-criteria evaluation model and deterministic model for landslide susceptibility mapping. **Catena**, nº 140, p. 125-139, 2016.

RAMALHO-FILHO, A.; BEEK, K. J. **Sistema de avaliação da aptidão agrícola das terras**. 3. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1995.

RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; REDIVO, A. L.; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Aplicação do modelo SHALSTAB, em ambiente ArcView, para o mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento raso na região do Quadrilátero Ferrífero (MG). **Espaço & Geografia**, v. 5, n. 1, p. 49-67, 2002.

REBELO, F. **Riscos Naturais e Acção Antrópica: Estudos e Reflexões**. 2ª ed. Coimbra: Imprensa da Universidade, 2003.

REGINATTO, G. M. P.; MACCARINI, M.; KOBIYAMA, M.; HIGASHI, R. A. R.; GRANDO, A.; CORSEUIL, C. W.; CAMEZ, M. L. Shalstab Application to Identify the Susceptible Areas of Shallow Landslides in Cunha River Watershed, Rio dos Cedros City, SC, Brazil. In: Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA), n. 4, Rio de Janeiro, 2012.

REUBENS, B.; POESEN, J.; DANJON, F.; GEUDENS, G.; MUYS, B. The role of fine and coarse roots in shallow slope stability and soil erosion control with a focus on root system architecture: a review. **Trees**, v.21, p.385-402, 2007.

RIBEIRO, J. A.; BRITO, J. L.; BERNARDO FILHO, O.; BADOLATO, I. S.; LIMA, R. D.; MOTA, G. L. E-Foto: an educational photogrammetric workstation. In: Open Source Geospatial Research & Education Symposium (OGRS2018), 2018 oct 9-11; Lugano, Italia. Disponível em: <https://peerj.com/preprints/27210/> Acesso em: 16 jan, 2020.

RICE, R. M., CROBETT, E. S.; BAILEY, R. G. Soil slips related to vegetation, topography, and soil in Southern California. **Water Resources Research**, v.5, p.647-659, 1969.

ROCCHINI, D.; DI RITA, A. Relief effects on aerial photos geometric correction. **Applied Geography**, v. 25, p. 159-168, 2005.

RODRIGUES, C. de S. **Mapeamento de suscetibilidade a escorregamentos de Nova Friburgo-RJ por meio de inferência fuzzy e elaboração de cenários de alerta com uso do TerraMA2**. 2013. 113 p. Dissertação (Mestrado) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais: São José dos Campos, INPE, 2013.

ROODPOSHTI, M. S.; ARYAL, J. PRADHAN, B. A Novel Rule-based Approach in Mapping Landslide Susceptibility. **Sensors**, v. 19, n. 10(2274), p. 1-20, 2019.

ROSAS E SILVA, D. M. **Aplicação do Método AHP para Avaliação de Projetos Industriais**. – 2007. 128 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

ROSS, J. L. S. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, v. 6, p. 17-29, 1992.

SAATY, T. L. A. Scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of the Mathematical Psychology**. n.15, p. 234-281, 1977.

SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: McGraw-Hill Pub. Co., 1991.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**, v. 1, n.1, 2008.

SAGA - SYSTEM FOR AUTOMATED GEOSCIENTIFIC ANALYSES. Disponível em: <http://www.saga-gis.org/en/index.html>. Acesso: 14 jan. 2020.

SAITO, S. M.; FERREIRA, C. C.; SAUSEN, T. M.; HANSEN, M. A. F.; MARCELINO, I. O. P. V. Sistematização de ocorrências de desastres naturais na região Sul do Brasil. In: XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR (Natal-RN: 2009), Natal, INPE, **Anais...** 2009, p. 2333-2339.

SANT ANA, W. O.; BACK, A. J. Tendência do aumento de chuvas e suas implicações na estabilidade de encostas no sul de SC. **Revista de Tecnologia e Ambiente**. Criciúma, v. 25, p. 95-109, 2019.

SCHEUREN, J-M.; WAROUX, O.P.; BELOW, R.; GUHA-SAPIR, D. **Annual Disaster Statistical Review: the Numbers and Trends 2007**. Brussels: Center for Research on the Epidemiology of Disasters, 2008.

SDS – SECRETARIA DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE SANTA CATARINA. **Levantamento Aerofotogramétrico – Ortomosaico RGB: Município de Treviso. Escala 1:2.000**. 2011. Disponível em: <<http://sigsc.sds.sc.gov.br/download/index.jsp>> Acesso em: 06 abr. 2018.

SELBY, M. **Hillslope Materials and Processes**. Oxford University Press: Oxford, 1993, 289 p.

SERVIÇOS AEROFOTOGRAFAMÉTRICOS CRUZEIRO DO SUL S.A. (Santa Catarina, SC). **Foto Aérea. Santa Catarina, 1957, nºs. 952, 954, 958 e 959**. Escala 1:25.000.

SERVIÇOS AEROFOTOGRAFAMÉTRICOS CRUZEIRO DO SUL S.A. (Santa Catarina, SC). **Foto Aérea. Santa Catarina, 1978, nºs. 18.485, 18.486, 18.488, 23.049 e 23.051**. Escala 1:25.000.

SIGSC – SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS. Levantamento Aerofotogramétrico 2010 - Modelo Digital de Terreno. Disponível em: <<http://sigsc.sds.sc.gov.br/download/restricted/home.js>> Acesso em 05 fev. 2020.

SILALAH, F. E. S.; ARIFIANTI, Y.; HIDAYAT, F. Landslide susceptibility assessment using frequency ratio model in Bogor, West Java, Indonesia. **Geoscience Letters**, v.6, n. 10, p. 1-17, 2019.

SILVA, D. C. O. **Aplicação do Modelo Shalstab na Previsão de Deslizamentos em Petrópolis**. 2006. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, D. C. da. Evolução da Fotogrametria no Brasil. **Revista Brasileira de Geomática**, v. 3, n. 2, p. 81–96, 2015.

SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; SCHILIPACK, P.; DIAS, S. M. Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da Serra do Mar Paranaense apoiado na análise digital do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, p. 3-22, 2014.

SILVEIRA, M. T. **Considerações Técnicas sobre o Submódulo de Extração do MDE da Versão Integrada do e-foto** (versão educacional), Rio de Janeiro, 2011. Disponível em: <[http://www.efoto.eng.uerj.br/images/Documentos/6Tutorial\\_MDS\\_OrtoRetif-16.06.pdf](http://www.efoto.eng.uerj.br/images/Documentos/6Tutorial_MDS_OrtoRetif-16.06.pdf)> Acesso em: 10 maio 2019.

SIMONETT, D. Landslide distribution and earthquakes in the Bewani and Torricelli Mountains, New Guinea, in JENNINGS, J. N.; MABBUTT, J. A., eds., **Landform Studies from Australia and New Guinea**. Canberra: Australian National University Press, p. 64–84, 1967.

SOETERS, R., VAN WESTEN, C. J. Slope instability recognition, analysis and zonation. In: TURNER, A. K., SCHUSTER, R. (eds.), **Landslides Investigation and Mitigation**. Transportation Research Board Special report, 247. Washington DC, National academy press, 1996.

SÔNEGO, M. O Clima do Litoral Sul de Santa Catarina. In: Seminário Interdisciplinar dos Cursos de Licenciatura, 3. Criciúma. **Anais...** Criciúma: UNESC, p.102-3, 2002.

SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI, L. Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models. **Natural Hazards**, v. 53, n. 2, p. 313-332, 2010.

STARK, C. P.; GUZZETTI, F. Landslide rupture and the probability distribution of mobilized debris volumes. **Journal of Geophysical Research**, v. 114, p. 1-16, 2009.

SUPERDECISIONS CDF®. Disponível em: [https://www.superdecisions.com/downloads/index.php?section=win2\\_X](https://www.superdecisions.com/downloads/index.php?section=win2_X). Acesso em: 06 jan. 2020.

TEKNOMO, K. **Analytic Hierarchy Process (AHP)**. 2006, Tutorial. Disponível em: <http://people.revoledu.com/kardi/tutorial/ahp/>. Acesso em 06 jul. 2018.

TEN BRINK, U. S.; GEIST, E. L.; ANDREWS, B. D. Size distribution of submarine landslides and its implication to tsunami hazard in Puerto Rico: **Geophysical Research Letters**, v. 33, L11307, 2006.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. do. **Desastres naturais**: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 2012.

TORRES, F. S. D. M. **Carta de suscetibilidade a movimentos de massa e erosão do município de Ipojuca-PE**. 2014. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014.

TRAMONTINA, J.; COSTA, C. C.; CORREA, A. N.; PEGORARO, A. J. "Análise de Usabilidade da Plataforma Fotogramétrica Educacional E- Foto para o Ensino da Fotogrametria Digital.", **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 69., p. 2019-1040, 2017.

TRICART, J. **Géomorphologie applicable**. Paris: Masson, 1978, 204 p.

UNISDR - United Nations Office for Disaster Risk Reduction. **UNISDR Terminology on Disaster Risk Reduction**. Geneva: UNISDR, 2009.

VAKHSHOORI, V.; ZARE, M. Is the ROC curve a reliable tool to compare the validity of landslide susceptibility maps? **Geomatics Natural Hazards and Risks**, v. 9, n. 1, p. 249-266, 2018.

VAN DEN EECKHAUT, M.; HERVÁS, J.; JAEDICKE, C.; MALET, J. -P.; MONTANARELLA, L.; NADIM, F. Statistical modelling of Europe-wide landslide susceptibility using limited landslide inventory data. **Landslides**, v. 9, n. 1, p. 357-369, 2012.

VERHOEVEN, G.; DONEUS, M. BRIESE, Ch.; VERMEULEN, F. Mapping by matching: a computer vision-based approach to fast and accurate georeferencing of archaeological aerial photographs. **Journal of Archaeological Science**, v. 39, p. 2060–2070, 2010.

VERYKOKOU, S.; IOANNIDIS C. Exterior orientation estimation of oblique aerial imagery using vanishing points. In: XXIII ISPRS Congress 2016 jul 12-19; Prague, Czech Republic. Disponível em: <https://www.int-arch-photogramm-remote-sens-spatial-inf-sci.net/XLI-B3/123/2016/isprs-archives-XLI-B3-123-2016.pdf>. Acesso em 20 ago. 2018.

VIBRANS, A. C.; MCROBERTS, R. E.; MOSER, P.; NICOLLETI, A. Using satellite image-based maps and ground inventory data to estimate the area of the remaining Atlantic forest in the Brazilian state of Santa Catarina. **Remote Sensing of Environment**, v. 130, p. 87-95, 2013.

WANG, H.; ELLIS, E.C. Spatial accuracy of orthorectified IKONOS imagery and historical aerial photographs across five sites in China. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, p. 1893-1911, 2005.

WILLNEFF, J.; POON, J. **Georeferencing from orthorectified and non-orthorectified high-resolution satellite imagery**. CRC for Spatial Information, University of Melbourne; 2006; Melbourne, Australia. Disponível em:

<https://pdfs.semanticscholar.org/3269/cb6ddfba20c6414651e95c49ce7e2a6ee643.pdf>. Acesso em: 25 abr. 2019.

WORBOYS, M.F. **GIS: A Computing Perspective**. London: Taylor and Francis, 1995.

ZHANG, W.; WANG, W., XIA, Q. Landslide Risk Zoning Based on Contribution Rate Weight Stack Method. **Energy Procedia**, v. 16, p. 178-183, 2012.

ZHU, L.; ERVING, A.; KOISTINEN, K.; NUIKKA, M.; JUNNILAINEN, H.; HEISKA, N.; HAGGRÉN, H. Georeferencing Multi-Temporal and Multi-Scale Imagery in Photogrammetry. In: **The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**. Vol. XXXVII. Part B5. Beijing 2008. p.225-230, 2008.



**APÊNDICE(S)**

## APÊNDICE A – Fototriangulação obtida para o bloco de fotografias aéreas de 1957

### E-FOTO Photo-triangulation Full Report - 1957

=====

Digital image unit: pixels  
Angle unit: degrees  
Ground X, Y, Z unit: meters

Total images: 3

Input Images:

=====

Image ID = 1

Point ID	Col	Row
2	5116.912	2000.639
3	5107.781	3108.779
4	3285.822	3215.901
5	3174.685	4153.178
6	2399.979	3212.940
7	2229.116	3549.869
8	1970.653	2230.231
9	1988.841	1260.588
10	2432.550	793.952
11	2261.742	1098.848
12	3222.021	678.019
18	5190.962	1269.340
19	3030.080	2615.237
31	4262.977	87.624
32	4186.460	2157.651
33	4063.317	2507.078
34	3974.244	3008.426
35	4858.126	3647.468
37	4333.026	957.364
39	3028.674	1896.649
40	4964.291	837.935

Affine coefficients from image (pixels) to film (millimeters):

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-118.2668276741	0.0439332125	0.0000747136	120.5548966282	0.0001324935	-0.0438040732

Image ID = 2

Point ID	Col	Row
1	4910.674	1646.793
2	3531.756	2174.663
3	3550.213	3280.268
4	1698.439	3402.758
5	1297.659	4393.154
6	544.325	3424.270
7	373.931	3771.030
8	108.012	2445.247
10	533.250	1031.959
11	359.280	1332.330
12	1280.679	913.277
13	1108.822	95.912
18	3552.176	1466.584
19	1469.583	2793.392
20	5060.524	537.550
21	4690.411	169.947
28	3701.162	611.128
31	2613.260	344.160
33	2581.127	2676.774
34	2430.766	3187.980
35	3249.356	3828.455
36	4431.184	2189.442
37	2727.176	1166.837
38	4103.099	631.918
39	1252.992	2105.129
40	3459.375	1048.980

Affine coefficients from image (pixels) to film (millimeters):

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-120.7957324142	0.0439506713	0.0006564766	118.3259104335	0.0007212015	-0.0438355386

Image ID = 3

Point ID	Col	Row
----------	-----	-----

1	3480.067	1691.829
2	1950.381	2216.656
3	1973.855	3316.763
4	49.831	3441.397
18	1947.535	1510.542
20	3513.126	589.304
21	3131.859	135.416
28	2123.000	656.187
31	1058.154	428.484
32	1041.746	2387.232
33	1088.023	2709.499
34	855.019	3223.591
35	1597.257	3864.757
36	2980.911	2228.323
37	1141.332	1204.951
38	2647.492	677.676
40	1967.911	1085.357
41	2944.885	1858.545

Affine coefficients from image (pixels) to film (millimeters):

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-119.9560936547	0.0438966891	0.0003390434	118.5796343762	0.0003834285	-0.0439203836

Photo-triangulation results:

=====

Number of iterations: 5

Converged: Yes

RMSE: 17.13560

The Exterior Orientation parameters:

Image ID	X0	Y0	Z0	Omega	Phy	Kappa
1	641811.5770000001	6849826.5499999998	4694.2557339417	0.4319927702	-2.0632664317	-5.6381756300
2	643554.9490000000	6849663.7340000002	4686.5052177729	-0.4781106329	0.6402267726	-6.9625041149
3	645407.1990000000	6849513.3569999998	4692.7052372880	0.1356502135	0.6941802506	-6.2590193116

The Interior Orientation parameters:

Image ID	f(mm)	x0	y0
1	153.52800	0.06300	0.03700
2	153.52800	0.06300	0.03700
3	153.52800	0.06300	0.03700

The residuals of control points (meters):

Point ID	rX	rY	rZ
1	28.22684	-9.30715	-63.94050
2	1.47479	-13.21579	-11.14969
3	-4.53412	-20.25476	-15.05283
4	6.25649	10.72481	27.84611
5	-13.13250	32.11637	-26.97696
6	28.99090	18.61440	9.46470
7	-20.87597	9.21783	28.84945
8	-4.61999	17.03893	15.65429
10	6.31448	24.61115	-23.12485
11	0.63521	23.09858	-31.08533
12	35.80883	17.02806	-10.66233
18	15.47624	-2.34900	-14.81422
19	-8.26642	28.70281	-27.07851
20	27.57335	-24.77055	-18.30803
21	5.66272	-59.41617	97.12771
28	37.04064	-3.58950	-24.16390
31	14.70734	-41.55730	24.52910
32	6.56181	-9.70731	6.69571
33	14.85980	-5.31217	-23.16876
34	-3.24194	4.18559	-22.42926
35	-9.49111	-14.76806	1.39159
36	10.60275	-12.03002	-32.42955
37	15.07886	1.20670	-16.64711
38	47.17087	-1.72854	-40.31076
39	10.71627	4.56654	8.92597
40	55.19291	-12.30245	-21.81106
Average	11.69958	-1.50758	-7.79496
Std.dev.	18.47174	20.84972	30.15815

The coordinates of object points:

Image ID	X	Y	Z	Measured in image(s)
1	646504.79900	6850756.02400	288.75600	2 3
2	644592.65100	6850236.38100	701.78119	1 2 3
3	644476.73700	6848979.60800	695.49255	1 2 3
4	642408.13200	6849107.43500	861.49237	1 2 3
5	642105.66900	6848366.90900	1394.51685	1 2
6	641495.80300	6849304.85800	1352.19263	1 2
7	641247.09400	6848984.05000	1362.49365	1 2

8	641149.64800	6850273.50000	1368.44067	1 2
9	641276.07500	6851153.37300	1430.45044	1
10	641733.27600	6851537.54900	1399.11877	1 2
11	641544.36300	6851270.84900	1400.42078	1 2
12	642484.16500	6851540.72400	1458.29712	1 2
13	642368.27700	6852339.23800	1414.49902	2
14	641978.54500	6852668.64500	1391.23340	
15	642514.19000	6852853.54500	1376.38245	
16	643568.55600	6853554.69300	1459.04480	
17	642798.61700	6852746.38900	1335.38623	
18	644697.73400	6851026.19700	767.15753	1 2 3
19	642175.67100	6849832.70900	687.14032	1 2
20	646587.92500	6851904.55900	683.62622	2 3
21	646183.64000	6852383.98500	804.48132	2 3
22	646082.04000	6853043.32800	750.78119	
23	646225.97400	6853233.82800	1011.59668	
24	644928.45500	6853530.16200	942.25488	
25	644735.83800	6852906.80300	835.21643	
26	644114.59500	6853249.70300	1102.89551	
27	643801.32700	6853124.82000	1164.55359	
28	645005.71300	6851977.58400	724.18439	2 3
29	644861.77900	6852155.38500	799.77948	
30	644188.67800	6852688.78600	938.50787	
31	643789.68600	6852362.81800	769.73157	1 2 3
32	643542.56400	6850156.85000	713.78503	1 3
33	643462.23700	6849795.11100	463.61771	1 2 3
34	643216.70300	6849237.63300	667.27234	1 2 3
35	644042.60100	6848455.76800	879.90833	1 2 3
36	645798.68000	6850142.51800	346.15952	2 3
37	643811.68800	6851481.69800	719.87860	1 2 3
38	645618.44500	6852085.98200	394.41229	2 3
39	642214.86000	6850508.32100	1200.87219	1 2
40	644769.15200	6851655.29200	422.86057	1 2 3
41	645810.63400	6850607.32800	348.63950	3

The residuals of control points reprojected to the image (pixels):

Point ID	Image ID	Vx	Vy
1	2	7.65997	-35.62193
1	3	-10.59986	-6.32431
2	1	2.70728	-33.25005
2	2	-0.25148	-16.25171
2	3	-2.89990	9.73351
3	1	19.84500	-37.75542
3	2	0.25140	-16.88095
3	3	11.68428	6.05797
4	1	-18.72617	-15.29334
4	2	5.81184	-1.67954
4	3	8.96181	34.70396
5	1	19.15965	29.22511
5	2	7.62713	61.57253
6	1	-28.41230	8.36629
6	2	-21.25769	33.36029
7	1	25.42197	-11.85195
7	2	44.45790	10.53426
8	1	8.48446	3.18853
8	2	20.44872	35.22074
9	1	4.10294	13.19329
10	1	-7.22380	2.90900
10	2	-18.07734	25.45560
11	1	-3.89499	-4.46022
11	2	-18.77905	25.26305
12	1	-36.71314	7.56971
12	2	-40.38755	24.44121
13	2	-21.29214	9.21077
18	1	-7.93680	-26.34975
18	2	-9.95079	-8.62679
18	3	-16.48407	17.16988
19	1	11.33190	19.85967
19	2	2.00062	28.74359
20	2	-17.22506	-46.57433
20	3	-20.58345	-10.91463
21	2	-57.47992	38.97690
21	3	-23.25823	-12.71099
28	2	-27.69412	-25.75058
28	3	-34.88641	0.19288
31	1	-18.58518	-49.41823
31	2	-23.36804	-38.21763
31	3	8.34578	23.33724
32	1	-11.26860	-35.23230
32	3	-1.06291	20.20053
33	1	-3.64389	-19.10743
33	2	-15.14440	-7.97486
33	3	-16.77575	15.80988
34	1	10.90249	-15.76743
34	2	0.09601	1.97486

34	3	-2.25795	30.69184
35	1	16.37318	-34.33674
35	2	1.04377	-17.42038
35	3	21.54609	7.65433
36	2	2.23492	-24.38793
36	3	-6.40163	-1.45303
37	1	-11.54133	-19.23615
37	2	-11.14210	-7.09785
37	3	-22.08305	12.53328
38	2	-26.27740	-32.41562
38	3	-37.26478	-2.10549
39	1	-12.65477	-8.34326
39	2	-4.98804	23.05482
40	1	-51.62616	-29.16289
40	2	-34.16573	-17.34651
40	3	-64.38129	3.01367
41	3	-13.96491	0.48033
Average		-8.80174	-1.31724
Std.dev.		19.98213	23.47696

End of report.

## APÊNDICE B – Fototriangulação obtida para o bloco de fotografias aéreas de 1978

### E-FOTO Photo-triangulation Full Report - 1978

=====

Digital image unit: pixels  
Angle unit: degrees  
Ground X, Y, Z unit: meters

Total images: 3

Input Images:

=====

Image ID = 1

Point ID	Col	Row
1	3990.419	2733.694
2	2087.724	3319.739
3	1977.023	4693.497
18	2176.308	2458.915
20	4206.680	1491.317
21	3809.456	914.018
25	2177.233	340.112
28	2502.298	1417.342
30	1547.877	552.921
31	1130.472	979.186
32	940.863	3425.410
33	965.045	3767.988
34	604.714	4431.726
35	1432.046	5433.781
36	3326.852	3340.950
37	1214.334	1973.036
38	3135.682	1416.182
40	2283.187	1871.768
41	3332.098	2884.540

Affine coefficients from image (pixels) to film (millimeters):

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-114.4731477191	0.0422819338	-0.0000437192	114.9145111967	-0.0001316949	-0.0423244847

Image ID = 2

Point ID	Col	Row
3	3570.622	4632.593
4	1251.113	4617.827
12	870.242	1605.946
13	845.273	545.014
14	338.187	151.244
17	1477.034	104.208
18	3801.056	2424.409
19	1049.196	3759.231
25	3839.954	290.353
28	4106.939	1370.673
31	2791.794	929.893
32	2545.266	3373.835
33	2463.645	3706.981
34	2202.975	4365.643
35	3118.493	5362.816
36	4762.462	3303.803
37	2815.812	1936.322
38	4594.995	1382.544
39	808.027	3069.290
40	3762.064	1840.048
41	4771.329	2848.508

Affine coefficients from image (pixels) to film (millimeters):

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-114.3460201716	0.0422855958	-0.0000954582	115.0923788440	-0.0001838737	-0.0423335168

Image ID = 3

Point ID	Col	Row
2	5125.752	3217.452
3	5013.316	4557.730
4	2769.866	4542.741
6	1581.452	4691.190
7	1265.392	5128.783
8	1090.555	3401.967



9	1200.876	2195.179
10	1829.463	1653.983
11	1572.872	2024.414
12	2858.730	1603.055
13	2691.555	502.250
14	2143.722	104.214
17	3244.681	30.686
18	5275.015	2352.892
19	2525.352	3713.867
30	4796.301	445.721
31	4285.743	873.019
33	3835.709	3669.588
34	3653.024	4316.173
35	4659.450	5278.691
37	4267.655	1887.543
39	2530.960	3033.003
40	5092.524	1772.544

Affine coefficients from image (pixels) to film (millimeters):

A0	A1	A2	B0	B1	B2
-114.5115038547	0.0422874363	-0.0000533821	115.1407594498	-0.0001554694	-0.0423271131

Photo-triangulation results:

=====

Number of iterations: 5

Converged: Yes

RMSE: 13.89050

The Exterior Orientation parameters:

Image ID	X0	Y0	Z0	Omega	Phy	Kappa
1	645156.5462039082	6850752.3000109131	4044.4071433346	-0.3647438234	0.7216203217	-0.7655386643
2	643716.8330000000	6850745.4400000004	4040.0401706435	0.0348529190	0.4412783986	0.2765712698
3	642341.2150000000	6850778.4179999996	4050.9474821100	-0.4418709716	-0.4248281766	-0.1970442735

The Interior Orientation parameters:

Image ID	f(mm)	x0	y0
1	153.52800	0.06300	0.03700
2	153.52800	0.06300	0.03700
3	153.52800	0.06300	0.03700

The residuals of control points (meters):

Point ID	rX	rY	rZ
2	-5.99089	-17.72125	-9.05184
3	-18.83754	-35.42914	-28.10263
4	-2.30101	34.44419	87.17359
12	21.34233	29.15566	-122.66531
13	14.69147	-8.87074	2.27421
14	25.70865	0.81564	23.81243
17	25.58889	-14.02679	34.89804
18	0.71993	-11.15222	0.86844
19	-13.57187	19.88573	-9.44742
25	10.59871	-38.52857	48.48330
28	4.56489	-22.71802	31.03240
30	0.99162	-13.38139	47.01293
31	7.36743	-10.33270	-30.09231
32	-22.69904	-9.19202	-25.69997
33	-10.96109	-0.79397	-31.96720
34	-28.84856	-12.45071	-31.18694
35	-21.01535	-35.69690	-33.88439
36	3.32830	-12.94651	-6.94803
37	2.99421	-11.07635	20.31887
38	-15.35789	-35.23227	51.75419
39	-3.56128	16.85926	17.86947
40	6.82127	2.92857	5.16395
41	0.76680	-10.62084	3.83213
Average	-0.76783	-8.52528	1.97600
Std.dev.	14.69645	19.18788	41.19986

The coordinates of object points:

Image ID	X	Y	Z	Measured in image(s)
1	646504.79900	6850756.02400	288.75600	1
2	644592.65100	6850236.38100	701.78119	1 3
3	644476.73700	6848979.60800	695.49255	1 2 3
4	642408.13200	6849107.43500	861.49237	2 3
5	642105.66900	6848366.90900	1394.51685	
6	641495.80300	6849304.85800	1352.19263	3
7	641247.09400	6848984.05000	1362.49365	3
8	641149.64800	6850273.50000	1368.44067	3
9	641276.07500	6851153.37300	1430.45044	3
10	641733.27600	6851537.54900	1399.11877	3

11	641544.36300	6851270.84900	1400.42078	3
12	642484.16500	6851540.72400	1458.29712	2 3
13	642368.27700	6852339.23800	1414.49902	2 3
14	641978.54500	6852668.64500	1391.23340	2 3
15	642514.19000	6852853.54500	1376.38245	
16	643568.55600	6853554.69300	1459.04480	
17	642798.61700	6852746.38900	1335.38623	2 3
18	644697.73400	6851026.19700	767.15753	1 2 3
19	642175.67100	6849832.70900	687.14032	2 3
20	646587.92500	6851904.55900	683.62622	1
21	646183.64000	6852383.98500	804.48132	1
22	646082.04000	6853043.32800	750.78119	
23	646225.97400	6853233.82800	1011.59668	
24	644928.45500	6853530.16200	942.25488	
25	644735.83800	6852906.80300	835.21643	1 2
26	644114.59500	6853249.70300	1102.89551	
27	643801.32700	6853124.82000	1164.55359	
28	645005.71300	6851977.58400	724.18439	1 2
29	644861.77900	6852155.38500	799.77948	
30	644188.67800	6852688.78600	938.50787	1 3
31	643789.68600	6852362.81800	769.73157	1 2 3
32	643542.56400	6850156.85000	713.78503	1 2
33	643462.23700	6849795.11100	463.61771	1 2 3
34	643216.70300	6849237.63300	667.27234	1 2 3
35	644042.60100	6848455.76800	879.90833	1 2 3
36	645798.68000	6850142.51800	346.15952	1 2
37	643811.68800	6851481.69800	719.87860	1 2 3
38	645618.44500	6852085.98200	394.41229	1 2
39	642214.86000	6850508.32100	1200.87219	2 3
40	644769.15200	6851655.29200	422.86057	1 2 3
41	645810.63400	6850607.32800	348.63950	1 2

The residuals of control points reprojected to the image (pixels):

Point ID	Image ID	Vx	Vy
1	1	0.70986	6.95932
2	1	4.83581	-3.85215
2	3	12.98503	-31.51403
3	1	2.92610	-6.22589
3	2	33.27412	-24.75562
3	3	29.08969	-36.31850
4	2	42.56247	8.56263
4	3	0.37438	-32.21768
6	3	22.97724	23.06963
7	3	44.28244	18.97605
8	3	18.71926	23.68380
9	3	0.64087	23.21743
10	3	-14.71576	7.82588
11	3	-13.03774	10.38317
12	2	-117.55217	-12.95406
12	3	-21.50375	-9.83152
13	2	-18.60371	2.62167
13	3	-20.44440	-23.43473
14	2	-13.88533	36.04109
14	3	-30.54842	12.32584
17	2	-18.30112	38.26410
17	3	-41.68868	-8.17190
18	1	-0.26534	1.79840
18	2	-1.26999	0.86882
18	3	-1.09390	-39.19924
19	2	9.81279	36.95058
19	3	14.22808	11.80298
20	1	-0.44658	-0.07163
21	1	4.79782	-7.17700
25	1	-4.73115	-2.57701
25	2	-28.89215	-10.38154
28	1	-3.46519	-4.31468
28	2	-18.00234	-19.81822
30	1	15.99838	31.02002
30	3	-33.05718	4.57685
31	1	-22.82986	-19.84533
31	2	-7.25752	-17.20666
31	3	6.17544	-46.53162
32	1	11.28892	-7.70331
32	2	23.52770	-2.69506
33	1	-9.08296	11.63295
33	2	11.24655	7.45776
33	3	16.73392	4.93490
34	1	-2.84720	2.79741
34	2	33.49768	5.07041
34	3	26.15778	-2.90575
35	1	-2.62642	-2.33660
35	2	35.01386	-14.09403
35	3	32.72708	-22.16058
36	1	-2.07359	0.84416
36	2	0.53701	-24.10160

37	1	5.18819	-7.35637
37	2	-3.68194	5.19447
37	3	-13.32854	-19.46235
38	1	8.43302	-9.73705
38	2	-11.43464	-22.06499
39	2	16.31950	33.23004
39	3	5.53925	5.50336
40	1	-5.55846	15.79775
40	2	-8.58071	16.23211
40	3	-9.70531	-19.34005
41	1	-1.39752	1.12121
41	2	-2.93190	-22.25647
Average		-0.22605	-1.96585
Std.dev.		23.61432	18.88974

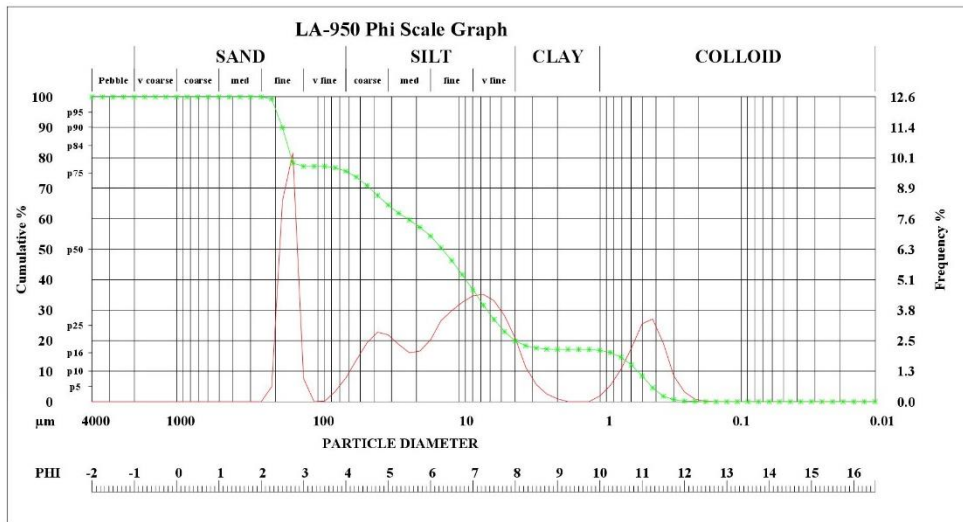
End of report.

APÊNDICE C – Análise granulométrica das amostras de cada unidade geotécnica

2019.10.16 11:38:25

**HORIBA** Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	: 01	Median Size	: 12.85177(µm)	: (9)S
ID#	: 201910161137211	Mean Size	: 51.20509(µm)	
Data Name	: 201910161137211	Variance	: 4781.0(µm <sup>2</sup> )	
Transmittance(R)	: 89.2(%)	Std.Dev.	: 69.1449(µm)	
Transmittance(B)	: 79.4(%)	Mode Size	: 172.4593(µm)	
Circulation Speed	: 6	Span	: OFF	
Agitation Speed	: 6	Geo.Mean Size	: 13.5187(µm)	
Ultra Sonic	: 00:20 (5)	Geo.Variance	: 5.1816(µm <sup>2</sup> )	
Form of Distribution	: Auto	Skewness	: 1.1998	
Distribution Base	: Volume	Kurtosis	: 2.6768	
Material	:	Diameter on Cumulative %	: (2)10.00 (%) - 0.5260(µm)	
Source	: -		: (5)50.00 (%) - 12.8518(µm)	
Lot Number	: wdoc			
Test or Assay. Number	:			
Refractive Index (R)	: Quartzo[Quartz( 1.450 - 0.000i),Water( 1.333)]			
Refractive Index (B)	: Quartzo[Quartz( 1.450 - 0.000i),Water( 1.333)]			

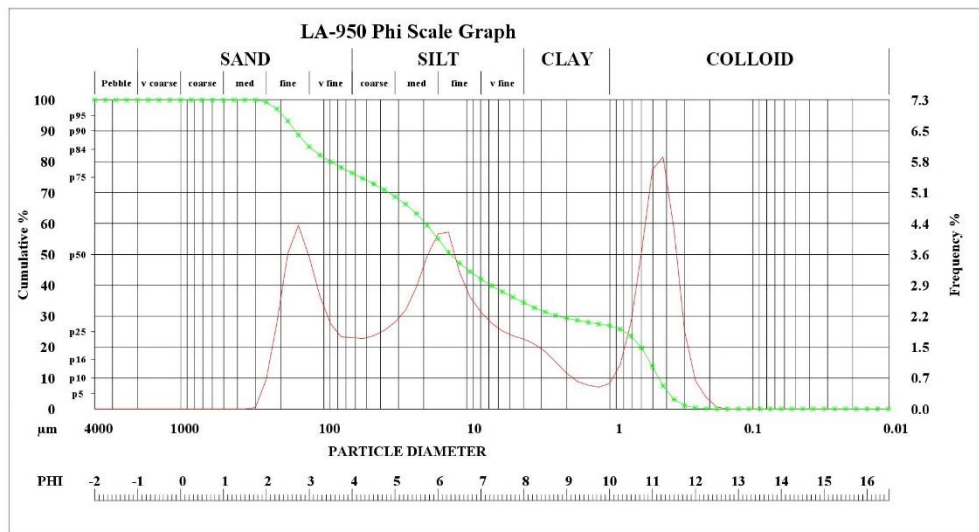


Diameter							Diameter						
Diameter	PHI	MILS	Microns	Frequency	Frequency	CUMULATIVE	Diameter	PHI	MILS	Microns	Frequency	Frequency	CUMULATIVE
F PEBBLE	5	-2.00	157.48	4000.00	0.00	0.00	100.00	7.75	0.18	4.65	4.03	22.88	22.88
	6	-1.75	132.42	3363.59	0.00	0.00	100.00	8.00	0.15	3.91	2.98	16.76	19.91
	7	-1.50	111.36	2828.43	0.00	0.00	100.00	8.25	0.13	3.28	1.61	0.00	18.30
	8	-1.25	93.64	2378.41	0.00	0.00	100.00	8.50	0.11	2.76	0.78	0.00	17.52
	10	-1.00	76.74	2000.00	0.00	0.00	100.00	8.75	0.09	2.32	0.36	0.00	17.16
FINE PEBBLE	12	-0.75	66.21	1681.79	0.00	0.00	100.00	9.00	0.08	1.95	0.12	0.00	17.04
	14	-0.50	55.68	1414.21	0.00	0.00	100.00	9.25	0.06	1.64	0.00	0.00	17.04
	16	-0.25	46.82	1189.21	0.00	0.00	100.00	9.50	0.05	1.38	0.00	0.00	17.04
V CRS SAND	18	0.00	39.37	1000.00	0.00	0.00	100.00	9.75	0.05	1.16	0.00	0.00	17.04
	20	0.25	33.11	840.90	0.00	0.00	100.00	10.00	0.04	0.98	0.26	0.00	16.78
	25	0.50	27.84	707.11	0.00	0.00	100.00	10.25	0.03	0.82	0.75	0.00	16.04
	30	0.75	23.41	594.60	0.00	0.00	100.00	10.50	0.03	0.69	1.52	0.00	14.52
CRS SAND	35	1.00	19.69	500.00	0.00	0.00	100.00	10.75	0.02	0.58	2.52	0.00	12.00
	40	1.25	16.55	420.45	0.00	0.00	100.00	11.00	0.02	0.49	3.65	0.00	8.36
	45	1.50	13.92	353.55	0.00	0.00	100.00	11.25	0.02	0.41	3.87	0.00	4.49
	50	1.75	11.70	297.30	0.00	0.00	100.00	11.50	0.01	0.35	2.73	0.00	1.76
MED SAND	60	2.00	9.84	250.00	0.00	0.00	100.00	11.75	0.01	0.29	1.20	0.00	0.56
	70	2.25	8.28	210.22	0.69	99.31	77.18	12.00	0.01	0.24	0.44	0.00	0.12
	80	2.50	6.96	176.78	9.41	89.90	77.18	12.25	0.01	0.21	0.12	0.00	0.00
	100	2.75	5.85	148.65	11.65	78.25	77.18	12.50	0.01	0.17	0.00	0.00	0.00
FINE SAND	120	3.00	4.92	125.00	1.07	22.82	77.18	12.75	0.01	0.15	0.00	0.00	0.00
	140	3.25	4.14	105.11	0.00	0.00	77.18	13.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00
	170	3.50	3.48	89.39	0.02	77.16	77.18	13.25	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
	200	3.75	2.93	74.33	0.47	76.70	77.18	13.50	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00
V FINE SAND	230	4.00	2.46	62.50	1.10	1.59	75.59	13.75	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00
	270	4.25	2.07	52.56	1.94	73.65	75.59	14.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00
	325	4.50	1.74	44.19	2.76	70.89	75.59	14.25	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
	400	4.75	1.46	37.16	3.25	67.64	75.59	14.50	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
CRS SILT	450	5.00	1.23	31.25	3.12	64.52	75.59	14.75	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
	500	5.25	1.03	26.28	2.67	61.84	75.59	15.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
	635	5.50	0.87	22.10	2.28	59.57	75.59	15.25	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
		5.75	0.73	18.58	2.36	57.21	75.59	15.50	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
MED SILT	600	6.00	0.62	15.63	2.89	54.32	75.59	15.75	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
		6.25	0.52	13.14	3.78	50.53	75.59	16.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
		6.50	0.43	11.05	4.26	46.28	75.59	16.25	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
		6.75	0.37	9.29	4.65	41.63	75.59	16.50	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
FINE SILT	700	7.00	0.31	7.81	4.98	36.67	75.59						
		7.25	0.26	6.57	5.03	31.65	75.59						
		7.50	0.22	5.52	4.73	26.92	75.59						

2019.10.16 11:51:08

# HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	: 02	Median Size	: 12.74584(μm)	: (9)S
ID#	: 201910161150213	Mean Size	: 43.54611(μm)	
Data Name	: 201910161150213	Variance	: 4118.5(μm <sup>2</sup> )	
Transmittance(R)	: 90.0(%)	Std.Dev.	: 64.1759(μm)	
Transmittance(B)	: 76.5(%)	Mode Size	: 0.4755(μm)	
Circulation Speed	: 6	Span	: OFF	
Agitation Speed	: 6	Geo. Mean Size	: 8.9435(μm)	
Ultra Sonic	: 00:16 (5)	Geo. Variance	: 7.3428(μm <sup>2</sup> )	
Form of Distribution	: Auto	Skewness	: 1.6359	
Distribution Base	: Volume	Kurtosis	: 4.5630	
Material	:	Diameter on Cumulative %	: (2)10.00 (%) - 0.4427(μm)	
Source	: -		: (5)50.00 (%) - 12.7458(μm)	
Lot Number	: wdoc			
Test or Assay. Number	:			
Refractive Index (R)	: Quartz[Quartz( 1.450 - 0.000i),Water( 1.333)]			
Refractive Index (B)	: Quartz[Quartz( 1.450 - 0.000i),Water( 1.333)]			

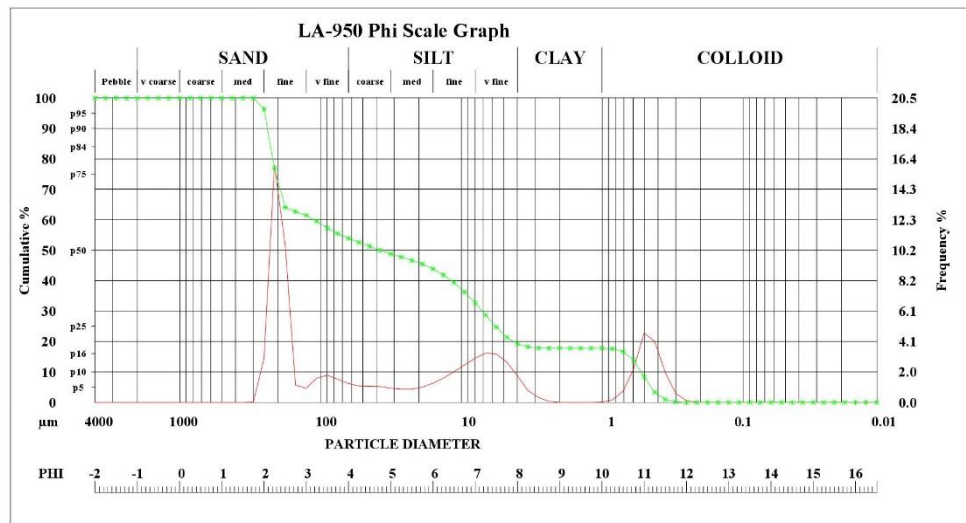


Diameter							Diameter						
Diameter	PHI	MILS	Microns	Frequency	Frequency	CUMULATIVE	Diameter	PHI	MILS	Microns	Frequency	Frequency	CUMULATIVE
F PEBBLE	5	-2.00	157.48	4000.00	0.00	0.00	100.00	7.75	0.18	4.65	1.82	36.13	36.13
	6	-1.75	132.42	3363.59	0.00	0.00	100.00	8.00	0.15	3.91	1.74	34.39	34.39
	7	-1.50	111.36	2828.43	0.00	0.00	100.00	8.25	0.13	3.28	1.62	32.78	32.78
	8	-1.25	93.84	2378.41	0.00	0.00	100.00	8.50	0.11	2.76	1.42	31.35	31.35
	10	-1.00	78.74	2000.00	0.00	0.00	100.00	8.75	0.09	2.32	1.16	30.19	30.19
FINE PEBBLE	12	-0.75	66.21	1681.79	0.00	0.00	100.00	9.00	0.08	1.95	0.89	29.30	29.30
	14	-0.50	55.68	1414.21	0.00	0.00	100.00	9.25	0.06	1.64	0.68	28.62	28.62
	16	-0.25	46.82	1189.21	0.00	0.00	100.00	9.50	0.05	1.38	0.59	28.03	28.03
V CRS SAND	18	0.00	39.37	1000.00	0.00	0.00	100.00	9.75	0.05	1.16	0.54	27.49	27.49
	20	0.25	33.11	840.90	0.00	0.00	100.00	10.00	0.04	0.98	0.63	26.87	26.87
	25	0.50	27.84	707.11	0.00	0.00	100.00	10.25	0.03	0.82	1.10	25.77	25.77
	30	0.75	23.41	594.60	0.00	0.00	100.00	10.50	0.03	0.69	2.17	23.59	23.59
CRS SAND	35	1.00	19.69	500.00	0.00	0.00	100.00	10.75	0.02	0.58	3.94	19.66	19.66
	40	1.25	16.55	420.45	0.00	0.00	100.00	11.00	0.02	0.49	5.96	13.70	13.70
	45	1.50	13.92	353.55	0.00	0.00	100.00	11.25	0.02	0.41	6.27	7.43	7.43
	50	1.75	11.70	297.30	0.03	0.03	99.97	11.50	0.01	0.35	4.47	2.96	2.96
MED SAND	60	2.00	9.84	250.00	0.75	0.78	99.22	11.75	0.01	0.29	1.93	1.03	1.03
	70	2.25	8.28	210.22	2.15	2.15	97.07	12.00	0.01	0.24	0.70	0.33	0.33
	80	2.50	6.96	176.78	3.87	3.87	93.20	12.25	0.01	0.21	0.29	0.04	0.04
	100	2.75	5.85	148.65	4.57	4.57	88.63	12.50	0.01	0.17	0.04	0.00	0.00
FINE SAND	120	3.00	4.92	125.00	3.78	14.37	84.85	12.75	0.01	0.15	0.00	0.00	0.00
	140	3.25	4.14	105.11	2.81	2.81	82.04	13.00	0.00	0.12	0.00	0.00	0.00
	170	3.50	3.48	88.39	2.11	2.11	79.93	13.25	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00
	200	3.75	2.93	74.33	1.79	1.79	78.14	13.50	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00
V FINE SAND	230	4.00	2.46	62.50	1.78	76.37	76.37	13.75	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00
	270	4.25	2.07	52.56	1.75	74.61	74.61	14.00	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00
	325	4.50	1.74	44.19	1.82	72.80	72.80	14.25	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00
	400	4.75	1.46	37.16	1.95	70.84	70.84	14.50	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
CRS SILT	450	5.00	1.23	31.25	2.16	68.69	68.69	14.75	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00
	500	5.25	1.03	26.28	2.46	66.23	66.23	15.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
	635	5.50	0.87	22.10	3.04	63.19	63.19	15.25	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00
		5.75	0.73	18.58	3.81	59.38	59.38	15.50	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
MED SILT		6.00	0.62	15.63	4.36	55.02	55.02	15.75	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
		6.25	0.52	13.14	4.40	50.62	50.62	16.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00
		6.50	0.43	11.05	3.41	47.22	47.22	16.25	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
		6.75	0.37	9.29	2.79	44.43	44.43	16.50	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
FINE SILT		7.00	0.31	7.81	2.41	42.02	42.02						
		7.25	0.26	6.57	2.14	39.88	39.88						
		7.50	0.22	5.52	1.94	37.94	37.94						

2019.10.16 12:02:35

# HORIBA Laser Scattering Particle Size Distribution Analyzer LA-950

Sample Name	: 03	Median Size	: 37.55987(μm)	: (9)E
ID#	: 201910161202215	Mean Size	: 95.15540(μm)	
Data Name	: 201910161202215	Variance	: 9730.0(μm <sup>2</sup> )	
Transmittance(R)	: 91.6(%)	Std.Dev.	: 98.6409(μm)	
Transmittance(B)	: 80.4(%)	Mode Size	: 216.7605(μm)	
Circulation Speed	: 6	Span	: OFF	
Agitation Speed	: 6	Geo.Mean Size	: 23.2319(μm)	
Ultra Sonic	: 00:40 (5)	Geo.Variance	: 9.1259(μm <sup>2</sup> )	
Form of Distribution	: Auto	Skewness	: 0.4011	
Distribution Base	: Volume	Kurtosis	: 1.3564	
Material	:	Diameter on Cumulative %	: (2)10.00 (%) - 0.5134(μm)	
Source	: -		: (5)50.00 (%) - 37.5599(μm)	
Lot Number	: wdoc			
Test or Assay. Number	:			
Refractive Index (R)	: Quartzo[Quartz( 1.450 - 0.000i),Water( 1.333)]			
Refractive Index (B)	: Quartzo[Quartz( 1.450 - 0.000i),Water( 1.333)]			



	Diameter				Diameter			Diameter							
	Diameter	PHI	MILS	Microns	Frequency	Frequency	CUMULATIVE	Diameter	PHI	MILS	Microns	Frequency	Frequency	CUMULATIVE	
F PEBBLE	5	-2.00	157.48	4000.00	0.00	0.00	100.00	V FINE SILT	7.75	0.18	4.65	3.29		21.35	
	6	-1.75	132.42	3363.59	0.00		100.00		8.00	0.15	3.91	2.17	13.47		19.18
	7	-1.50	111.36	2828.43	0.00		100.00		8.25	0.13	3.28			0.97	18.21
	8	-1.25	93.64	2378.41	0.00		100.00		8.50	0.11	2.76	0.38			17.83
	10	-1.00	78.74	2000.00	0.00	0.00	100.00		8.75	0.09	2.32	0.07			17.75
FINE PEBBLE	12	-0.75	66.21	1681.79	0.00		100.00	9.00	0.08	1.95	0.00			17.75	
	14	-0.50	55.68	1414.21	0.00		100.00	9.25	0.06	1.64	0.00			17.75	
	16	-0.25	46.82	1189.21	0.00		100.00	9.50	0.05	1.38	0.00			17.75	
V CRS SAND	18	0.00	39.37	1000.00	0.00	0.00	100.00	9.75	0.05	1.16	0.00			17.75	
	20	0.25	33.11	840.90	0.00		100.00	10.00	0.04	0.98	0.01	1.43		17.75	
	25	0.50	27.84	707.11	0.00		100.00	10.25	0.03	0.82	0.19			17.56	
	30	0.75	23.41	594.60	0.00		100.00	10.50	0.03	0.69	0.90			16.66	
CRS SAND	35	1.00	19.69	500.00	0.00	0.00	100.00	10.75	0.02	0.58	2.72			13.94	
	40	1.25	16.55	420.45	0.00		100.00	11.00	0.02	0.49	5.67			8.27	
	45	1.50	13.92	353.55	0.00		100.00	11.25	0.02	0.41	5.01			3.26	
	50	1.75	11.70	297.30	0.01		99.99	11.50	0.01	0.35	2.41			0.85	
	60	2.00	9.94	250.00	3.60	3.61	96.39	11.75	0.01	0.29	0.72			0.13	
	70	2.25	8.28	210.22	19.45		76.93	12.00	0.01	0.24	0.13			0.00	
	80	2.50	6.96	176.78	12.92		64.02	12.25	0.01	0.21	0.00			0.00	
	100	2.75	5.85	148.65	1.40		62.62	12.50	0.01	0.17	0.00			0.00	
FINE SAND	120	3.00	4.92	125.00	1.15		61.47	12.75	0.01	0.15	0.00			0.00	
	140	3.25	4.14	105.11	1.97		59.50	13.00	0.00	0.12	0.00			0.00	
	170	3.50	3.48	88.39	2.22		57.28	13.25	0.00	0.10	0.00			0.00	
	200	3.75	2.93	74.33	1.90		55.38	13.50	0.00	0.09	0.00			0.00	
V FINE SAND	230	4.00	2.46	62.50	1.54	7.63	53.85	13.75	0.00	0.07	0.00			0.00	
	270	4.25	2.07	52.56	1.32		52.52	14.00	0.00	0.06	0.00			0.00	
	325	4.50	1.74	44.19	1.31		51.21	14.25	0.00	0.05	0.00			0.00	
	400	4.75	1.46	37.16	1.28		49.93	14.50	0.00	0.04	0.00			0.00	
CRS SILT	450	5.00	1.23	31.25	1.14	5.06	48.79	14.75	0.00	0.04	0.00			0.00	
	500	5.25	1.03	26.28	1.07		47.71	15.00	0.00	0.03	0.00			0.00	
	635	5.50	0.87	22.10	1.09		46.63	15.25	0.00	0.03	0.00			0.00	
		5.75	0.73	18.58	1.24		45.38	15.50	0.00	0.02	0.00			0.00	
MED SILT		6.00	0.62	15.63	1.55	4.96	43.83	15.75	0.00	0.02	0.00			0.00	
		6.25	0.52	13.14	1.98		41.85	16.00	0.00	0.02	0.00			0.00	
		6.50	0.43	11.05	2.51		39.34	16.25	0.00	0.01	0.00			0.00	
		6.75	0.37	9.29	3.07		36.27	16.50	0.00	0.01	0.00	17.75		0.00	
FINE SILT		7.00	0.31	7.81	3.62	11.18	32.65								
		7.25	0.26	6.57	4.03		28.62								
		7.50	0.22	5.52	3.98		24.64								



## APÊNDICE D – Questionário aplicado a um dos especialistas entrevistados.



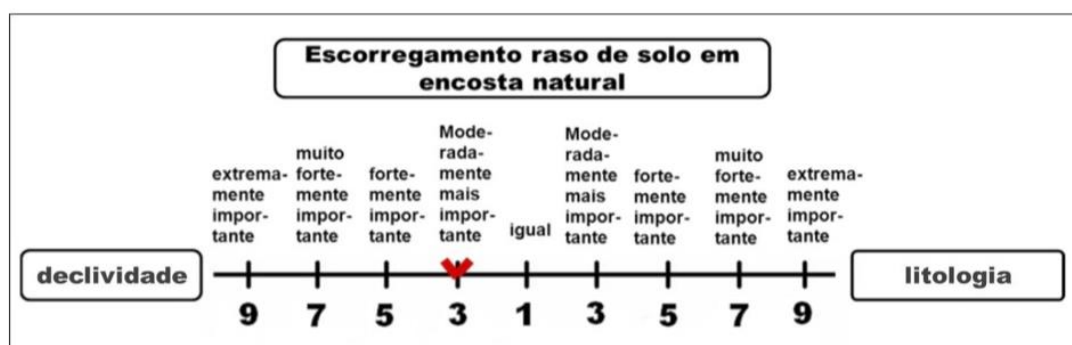
### QUESTIONÁRIO

**Entrevistado(a):** Antônio Sílvia Jornada Krebs

**Escopo da entrevista:** Verificar os resultados de atribuição de pesos efetuados por especialistas, organizados pelo método Delphi, a serem incorporados na análise multicritério - AHP.

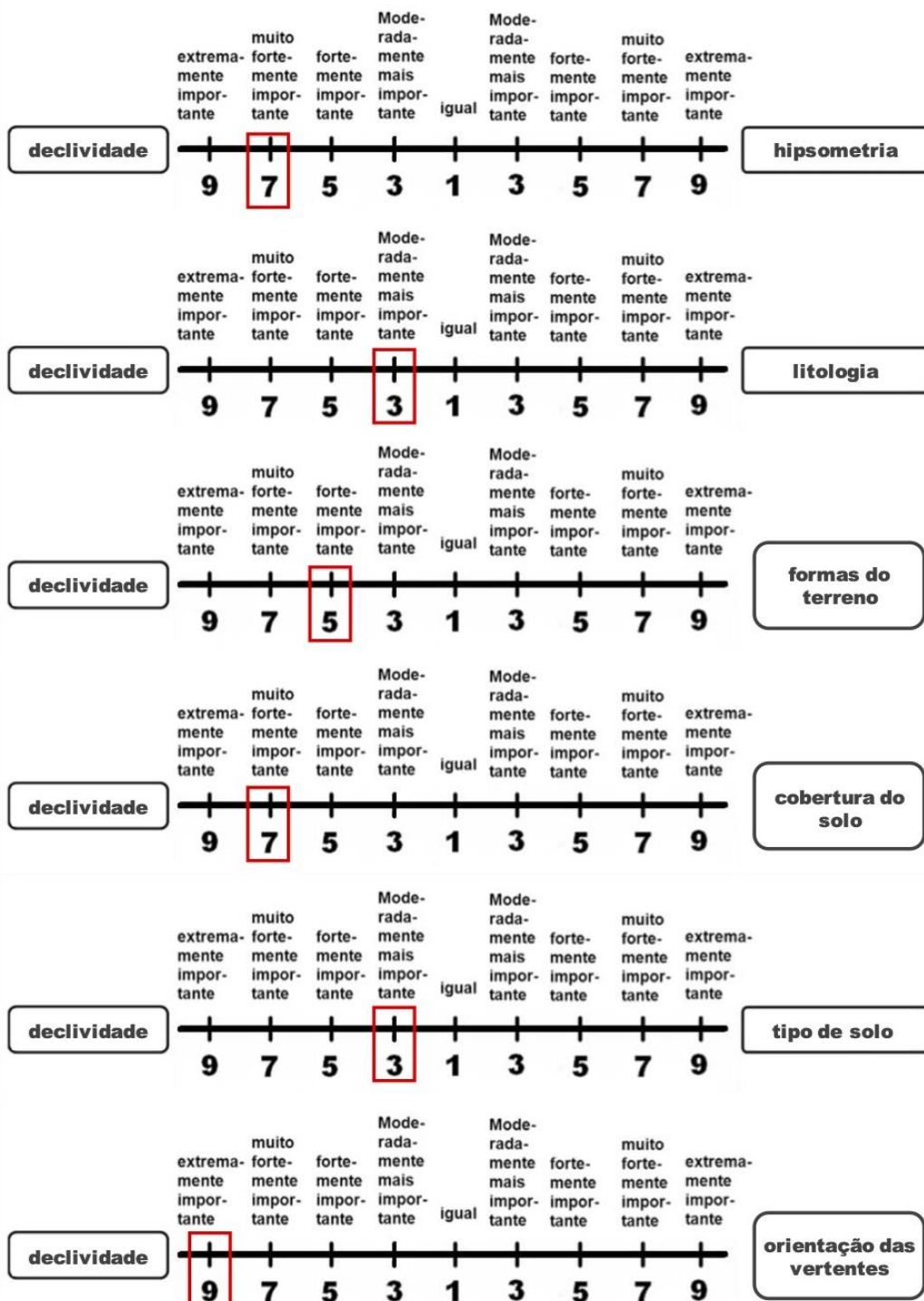
**Contexto:** Contribuição no processo de elaboração da Tese intitulada "ANÁLISE MULTICRITÉRIO E MODELO SHALSTAB PARA MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À ESCORREGAMENTOS EM ENCOSTAS". É reconhecido o uso de opinião de especialistas para avaliação de riscos à escorregamentos, contudo, para dirimir esta subjetividade, nesta área do conhecimento, a análise multicritério oferece um viés analítico com resultados quantitativos, a partir de dados qualitativos, a exemplo da modelagem pela Análise Hierárquica de Processos – AHP (SAATY, 1977, 1991, 2008). Através da ferramenta de abordagem comportamental conhecida como "método Delphi" (Arof, 2015), reconhecidamente de aplicação combinada com a AHP (Mukherjee et al., 2015), no desenvolvimento da pesquisa, haverá ponderação de opiniões extremas, identificação de tendências, etc. e os resultados serão reencaminhados aos entrevistados em rodada subsequente para busca de consenso. Depois de acatadas as opiniões dos especialistas será estabelecida uma escala de importância entre fatores predisponentes analisados para a área de estudo e, posteriormente, organizá-los numa matriz de decisão (Magalhães et al., 2011).

**Como participar:** Os entrevistados responderão individualmente a importância de fatores determinantes a escorregamentos, que serão pareados por julgamentos qualitativos, conforme a escala de Saaty, a exemplo da figura abaixo, em que o especialista elencou declividade moderadamente mais importante que litologia, para o processo de escorregamento translacional raso em encosta.

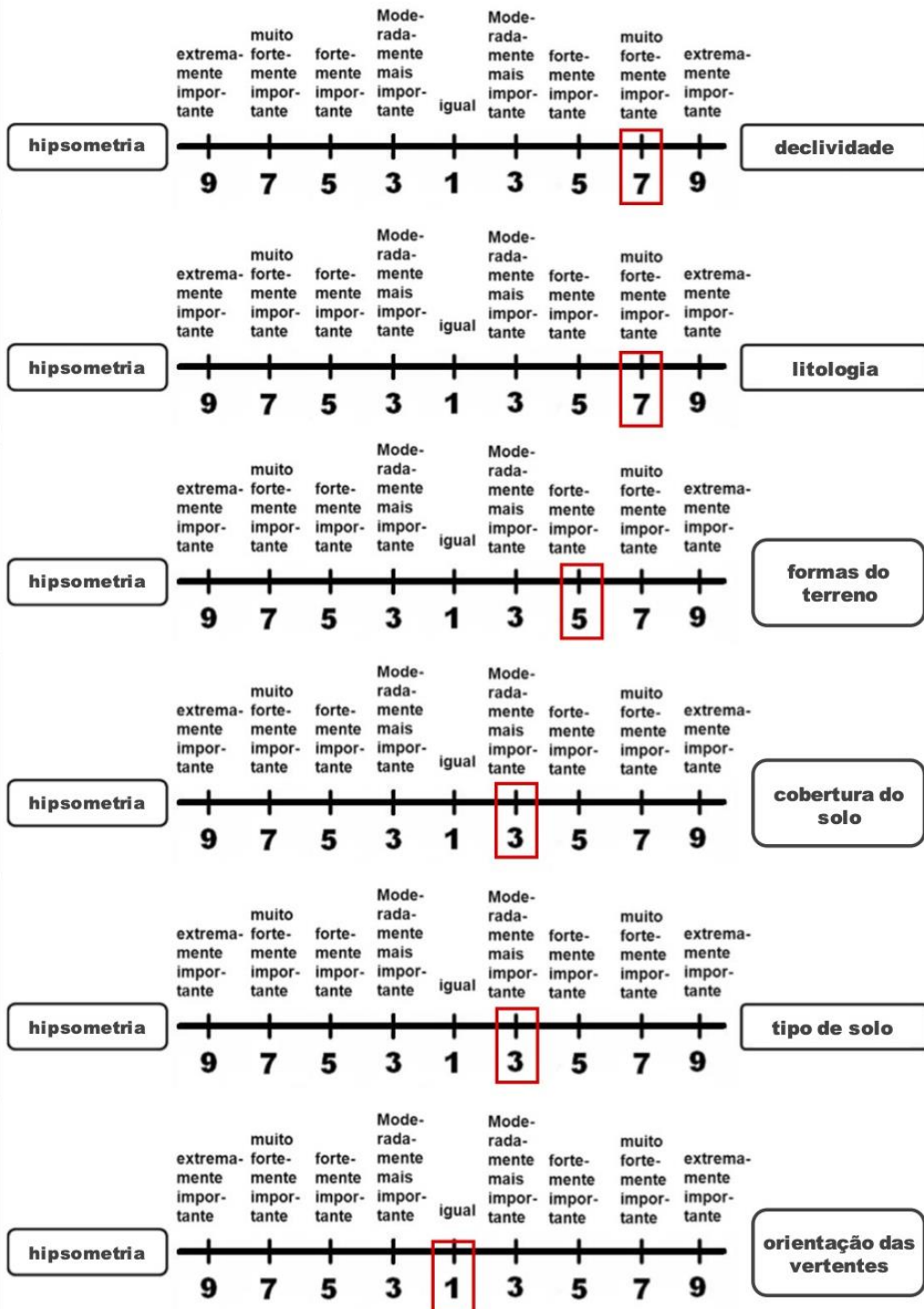


Agora que você já está ciente de como participar, de acordo com seus conhecimentos, assinale a importância na comparação pareada dos seguintes fatores:

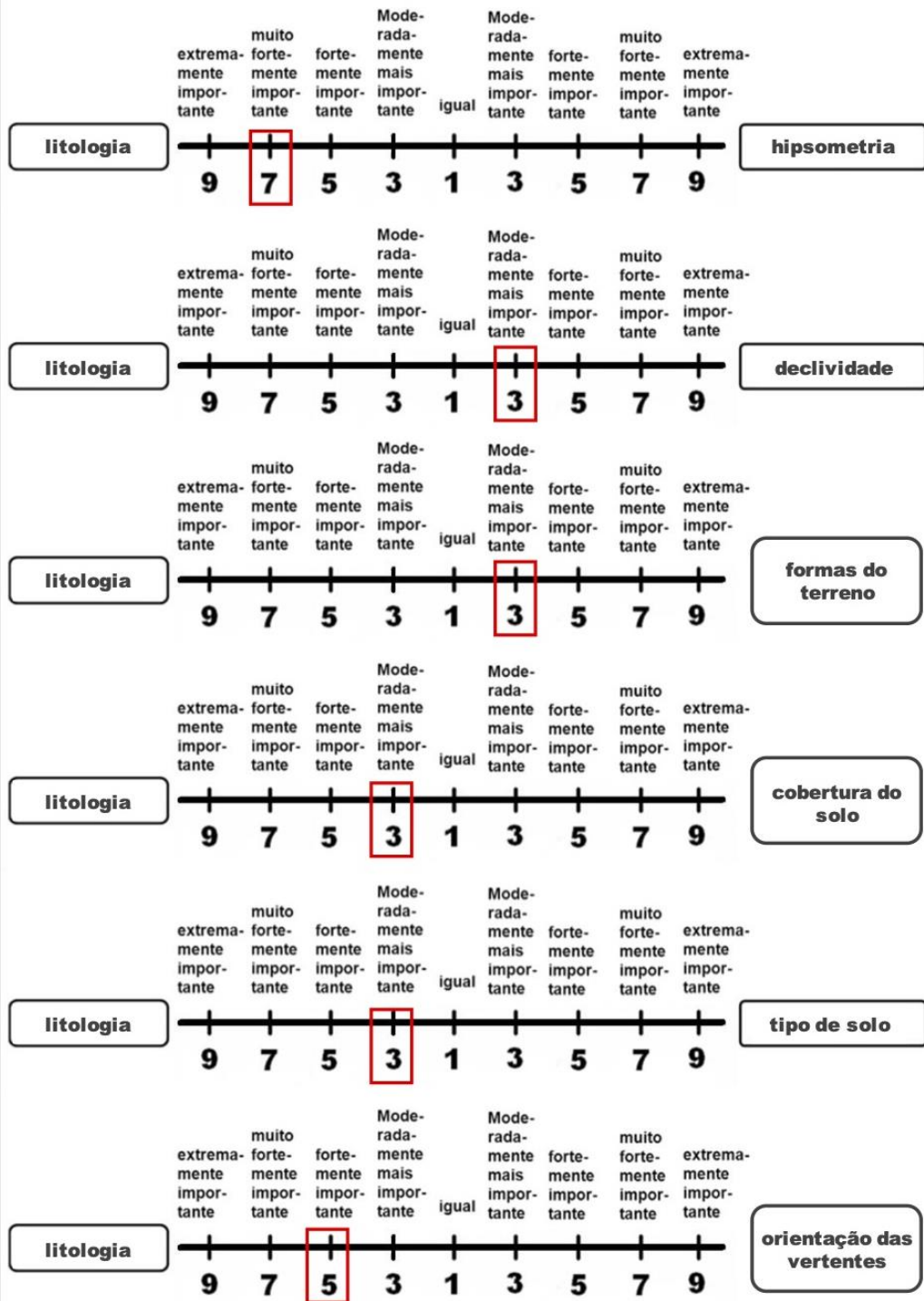
### Escorregamento raso de solo em encosta natural



### Escorregamento raso de solo em encosta natural

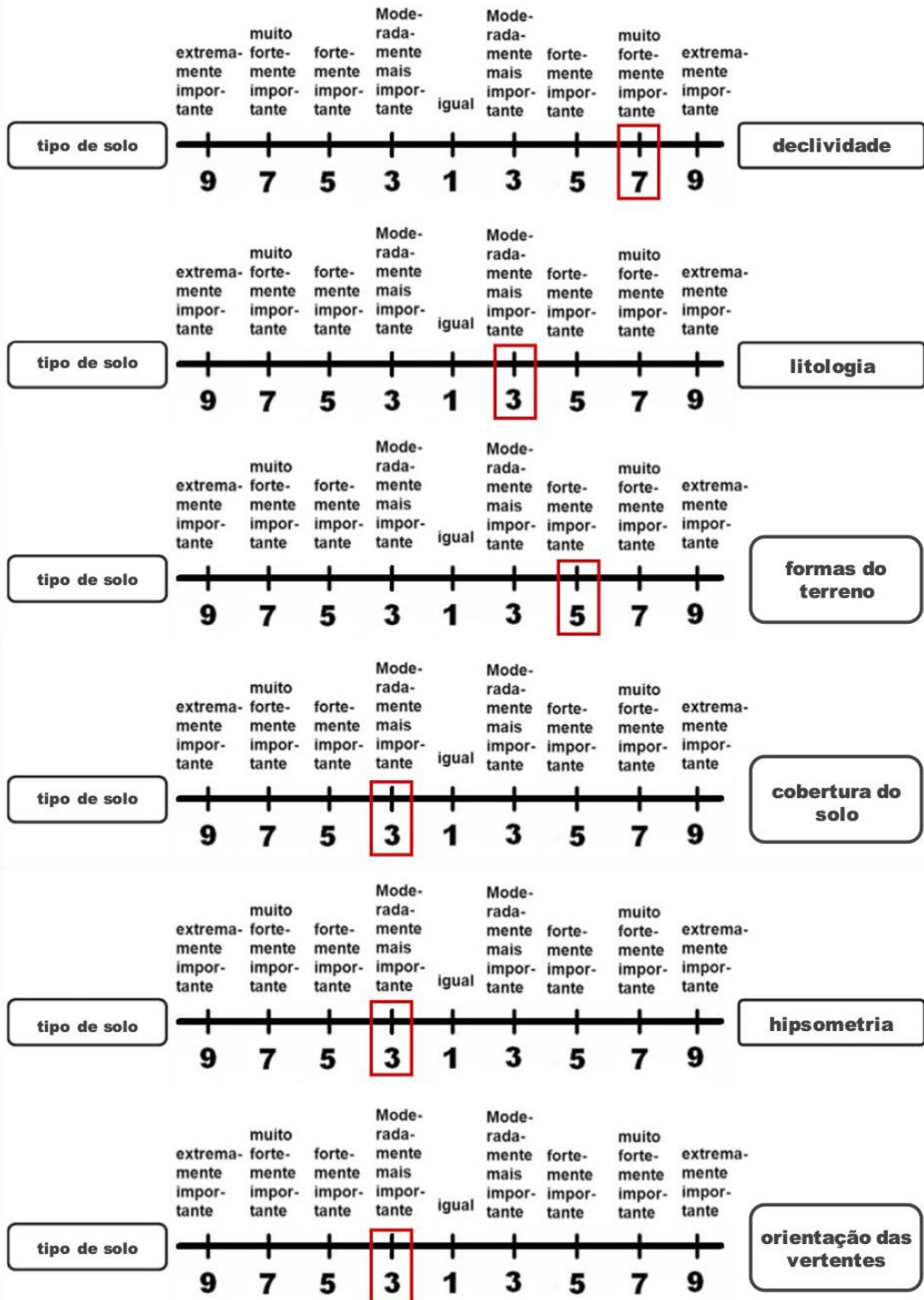


### Escorregamento raso de solo em encosta natural

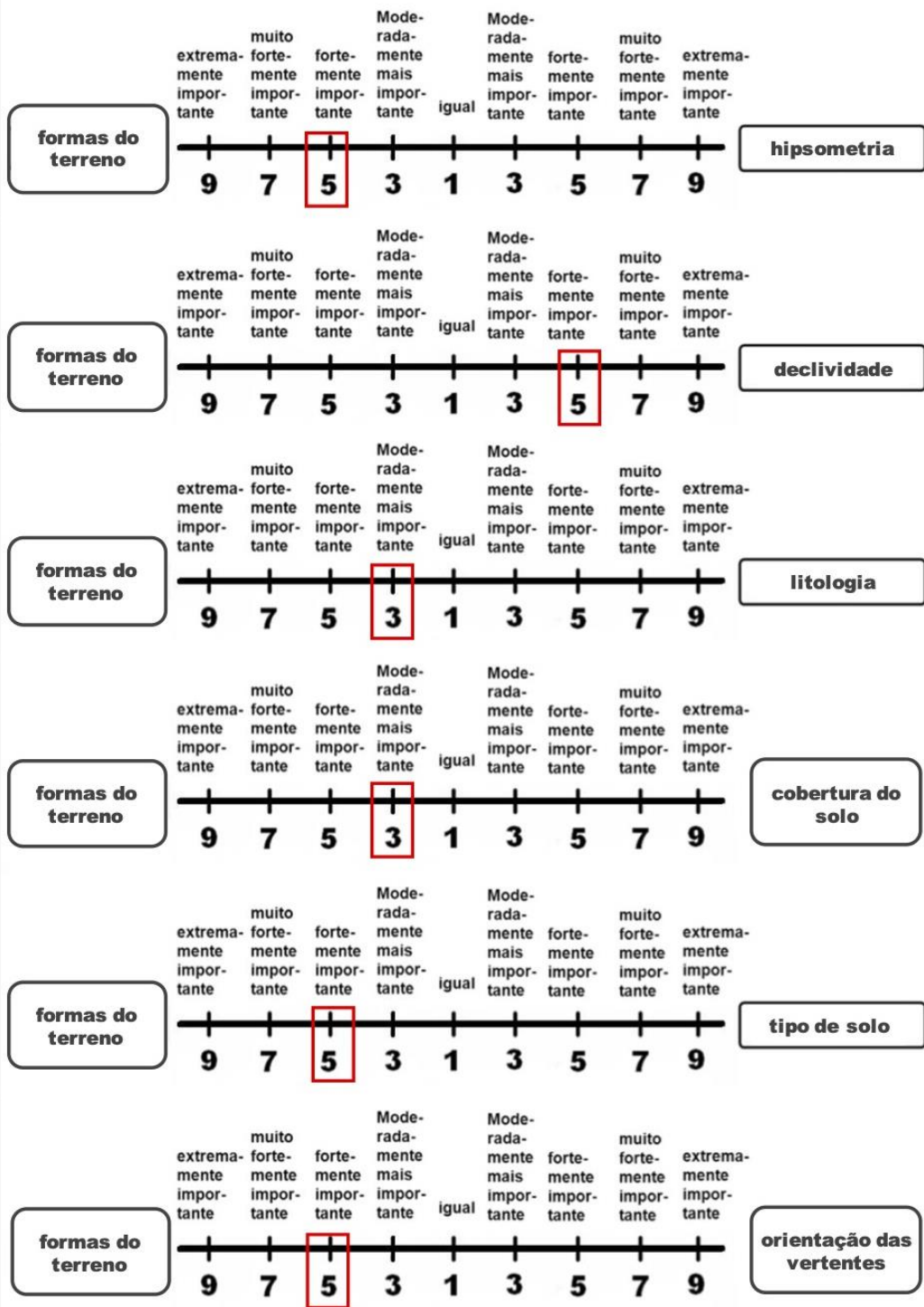




### Escorregamento raso de solo em encosta natural

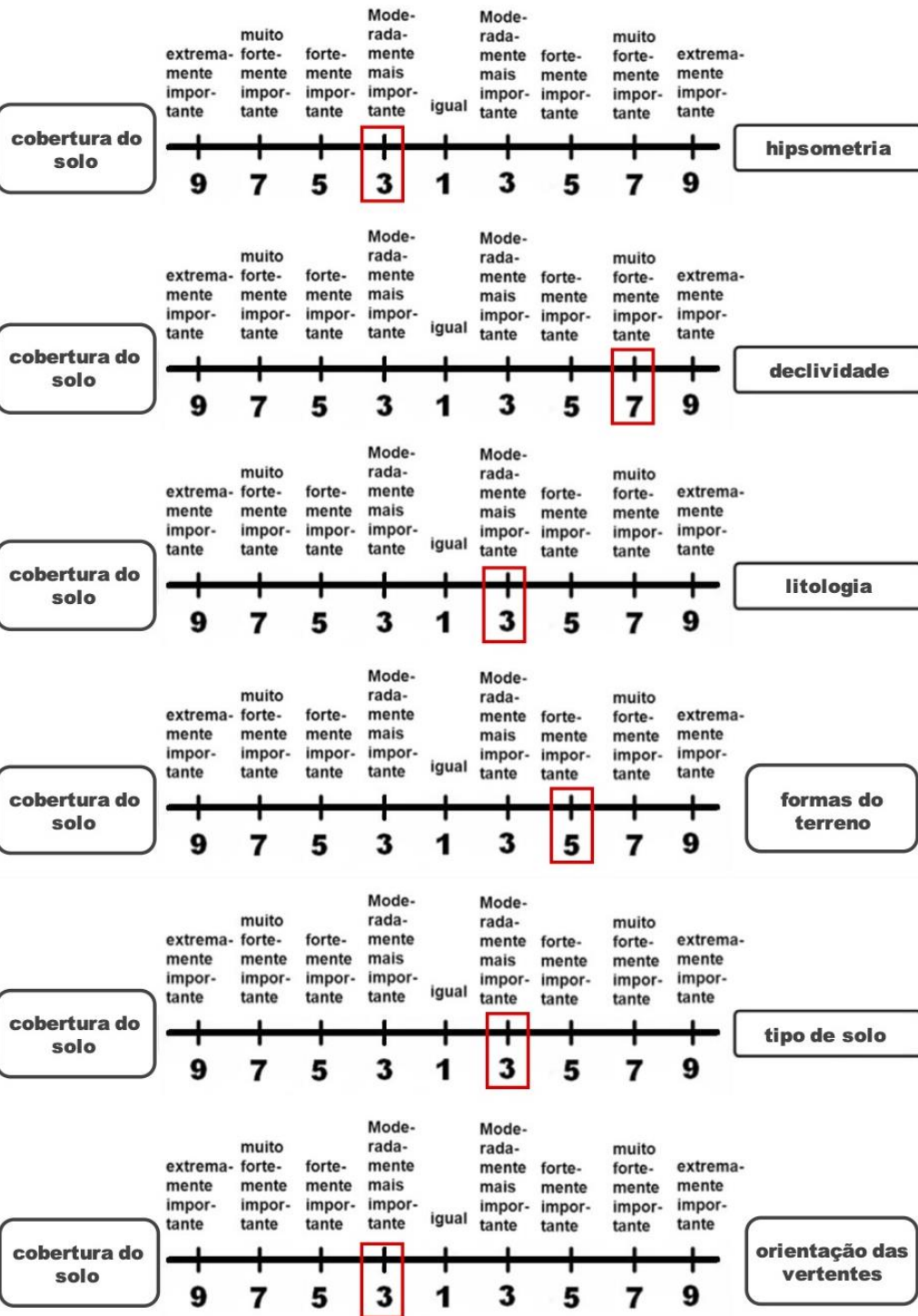


### Escorregamento raso de solo em encosta natural

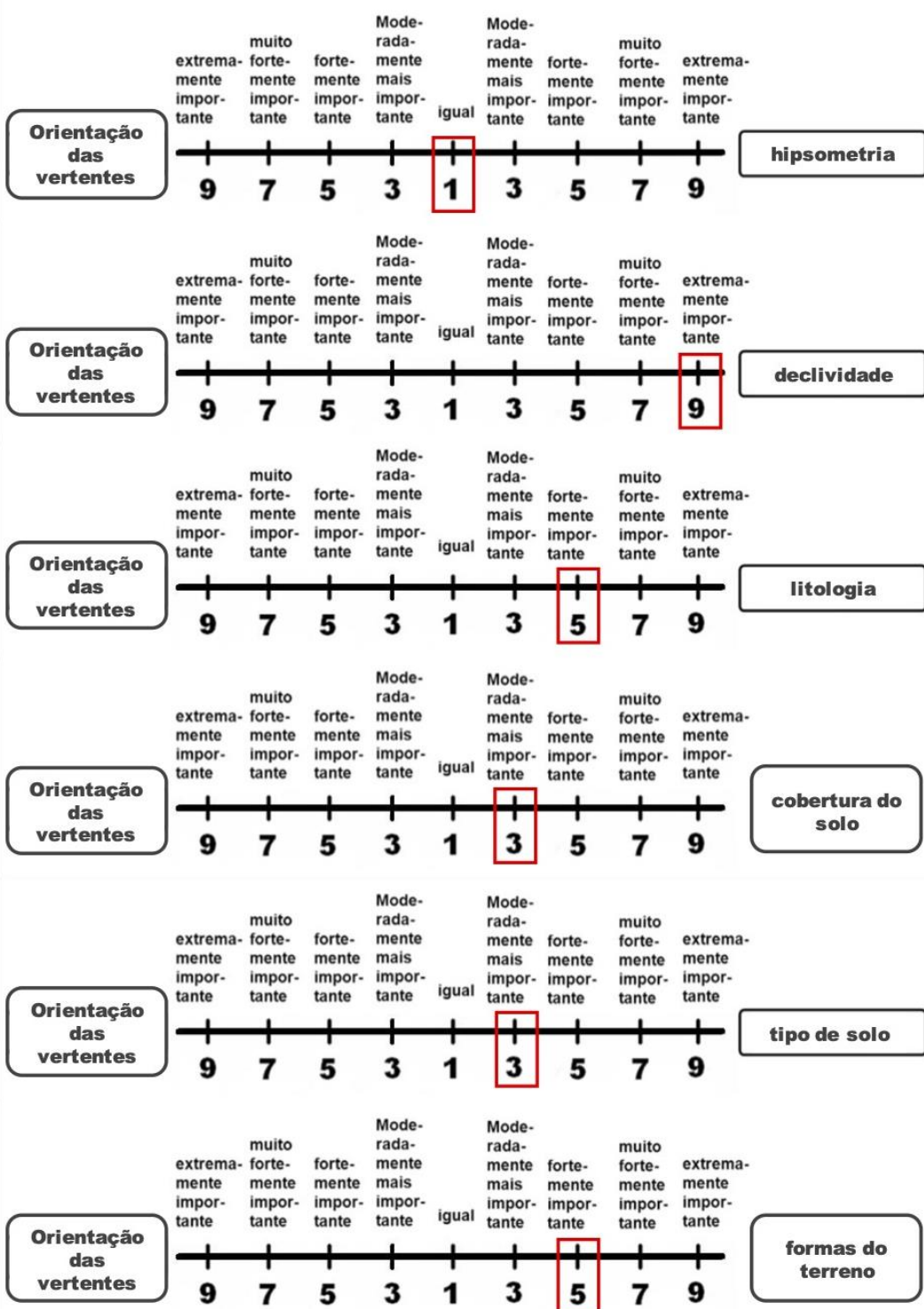




### Escorregamento raso de solo em encosta natural



### Escorregamento raso de solo em encosta natural





## REFERÊNCIAS

AROF, A. Md. The application of a combined Delphi-AHP Method in Maritime Transport Research: a review. **Asian Social Science**, v.11, n.23, p. 73-82, 2015.

MAGALHÃES, I. A. L.; THIAGO, C. R. L.; AGRIZZI, D. V.; SANTOS, A. R. Uso de geotecnologias para mapeamento de áreas de risco de inundação em Guaçuí, ES: uma análise comparativa entre dois métodos. **Cadernos de Geociências**, v. 8, n. 2, 2011.

MUKHERJEE, N.; HUGÉ, J.; SUTHERLAND, W. J.; McNeill, J.; VAN OPSTAL, M.; DAHDOUH-GUEBAS, F.; KOEDAM, N. The Delphi technique in ecology and biological conservation: applications and guidelines. **Methods in Ecology and Evolution**, v. 6, n. 9, p. 1097-1109, 2015.

SAATY, T. L. A. Scaling method for priorities in hierarchical structures. **Journal of the Mathematical Psychology**. n.15, p. 234-281, 1977.

SAATY, T. L. **Método de análise hierárquica**. São Paulo: McGraw-Hill Pub. Co., 1991.

SAATY, T. L. Decision making with the analytic hierarchy process. **International Journal of Services Sciences**. v. 1, n.1, 2008.

## APÊNDICE E – Modelo de Termo de Consentimento Livre e Esclarecido aplicado aos especialistas entrevistados



### CEP – COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

#### TCLE - TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

O (a) Sr (a) está sendo convidado (a) para participar da pesquisa intitulada: **ANÁLISE MULTICRITÉRIO E MODELO SHALSTAB PARA MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À ESCORREGAMENTOS EM ENCOSTAS**, que tem como objetivo: **EFETUAR UMA ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE ANÁLISE MULTICRITÉRIO E MODELO SHALSTAB PARA MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À ESCORREGAMENTOS TRANSLACIONAIS RASOS EM ENCOSTAS NATURAIS FLORESTADAS, NA SUB-BACIA DAS CABECEIRAS DO RIO MÃE LUZIA, TREVISÓ (SC).**

Mesmo aceitando participar do estudo, poderá desistir a qualquer momento, bastando para isso informar sua decisão aos responsáveis. Fica esclarecido ainda que, por ser uma participação voluntária e sem interesse financeiro, o (a) senhor (a) não terá direito a nenhuma remuneração. Declaramos que todos os riscos e eventuais prejuízos foram devidamente esclarecidos. Os dados referentes à sua pessoa serão sigilosos e privados, preceitos estes assegurados pela **Resolução nº 466/2012 do CNS - Conselho Nacional de Saúde**, podendo o (a) senhor (a) solicitar informações durante todas as fases da pesquisa, inclusive após a publicação dos dados obtidos a partir desta.

#### Procedimentos detalhados que serão utilizados na pesquisa

A pesquisa será realizada com o auxílio de um questionário estruturado, no qual o participante tem a oportunidade de expor a sua opinião sobre os temas da pesquisa, sendo o pesquisador apenas um orientador dos temas.

**Riscos:** Não se tem riscos presuntivos, desde que preservado os valores éticos aconselhados pela Resolução 466/12 da Pesquisa com seres humanos, resguardando sua identidade.

**Benefícios:** Como benefícios apontamos para um diagnóstico adequado da suscetibilidade natural à escorregamentos, orientando a calibração e validação de metodologias empregadas na pesquisa.

A coleta de dados será realizada pelo acadêmico WILLIAM DE OLIVEIRA SANTANA (fone: 48 – 9.9187.2917) do quarto ano do curso de Doutorado em Ciências Ambientais da UNESC e orientado pelo Professor responsável Álvaro José Back (fone: 48 – 9.9985.0039). O telefone do **Comitê de Ética é (48) 3431.2723**.

\_\_\_\_\_ de \_\_\_\_\_ de 2020.

Participante:

Pesquisador Responsável:

CPF: 097408990/72

CPF:



## APÊNDICE F – Aplicação da AHP pela matriz de comparação e consequente cálculo da RC a partir das respostas obtidas pela participação de especialista

### Matriz de comparação paritária

Parâmetros	Declividade	Hipsometria	Litologia	Tipo de solo	Formas do terreno	Cobertura do solo	Orientação das vertentes
Declividade	1	7	3	7	5	7	9
Hipsometria	1/7	1	1/7	1/3	1/5	1/3	1
Litologia	1/3	7	1	3	1/3	3	5
Tipo de solo	1/3	3	1/3	1	1/5	3	3
Formas do terreno	1/5	5	3	5	1	3	5
Cobertura do solo	1/7	3	1/3	1/3	1/3	1	3
Orientação das vertentes	1/9	1	1/5	1/3	1/5	1/3	1

### Matriz de comparação transformada e com números inteiros

Parâmetros	Declividade	Hipsometria	Litologia	Tipo de solo	Formas do terreno	Cobertura do solo	Orientação das vertentes
Declividade	1,00	7	3	7	5	7	9
Hipsometria	0,14	1,00	0,14	0,33	0,20	0,33	1,00
Litologia	0,33	7,00	1,00	3,00	0,33	3,00	5,00
Tipo de solo	0,33	3,00	0,33	1,00	0,20	3,00	3,00
Formas do terreno	0,20	5,00	3,00	5,00	1,00	3,00	5,00
Cobertura do solo	0,14	3,00	0,33	0,33	0,33	1,00	3,00
Orientação das vertentes	0,11	1,00	0,20	0,33	0,20	0,33	1,00
SOMA	2,26	27,00	8,01	17,00	7,27	17,67	27,00

### Matriz normalizada

Parâmetros	Declividade	Hipsometria	Litologia	Tipo de solo	Formas do terreno	Cobertura do solo	Orientação das vertentes
Declividade	0,44	0,26	0,37	0,41	0,69	0,40	0,33
Hipsometria	0,06	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04
Litologia	0,15	0,26	0,12	0,18	0,05	0,17	0,19
Tipo de solo	0,15	0,11	0,04	0,06	0,03	0,17	0,11
Formas do terreno	0,09	0,19	0,37	0,29	0,14	0,17	0,19
Cobertura do solo	0,06	0,11	0,04	0,02	0,05	0,06	0,11
Orientação das vertentes	0,05	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04
SOMA	1	1	1	1	1	1	1

### Cálculo dos autovetores normalizados

Parâmetros	Declividade	Hipsometria	Litologia	Tipo de solo	Formas do terreno	Cobertura do solo	Orientação das vertentes	Pesos (médias)	Somas	T - Autovetor normalizado%
Declividade	0,44	0,26	0,37	0,41	0,69	0,40	0,33	0,415	2,91	41,50
Hipsometria	0,06	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04	0,032	0,22	3,16
Litologia	0,15	0,26	0,12	0,18	0,05	0,17	0,19	0,158	1,11	15,84
Tipo de solo	0,15	0,11	0,04	0,06	0,03	0,17	0,11	0,095	0,67	9,53
Formas do terreno	0,09	0,19	0,37	0,29	0,14	0,17	0,19	0,205	1,43	20,50
Cobertura do solo	0,06	0,11	0,04	0,02	0,05	0,06	0,11	0,064	0,45	6,41
Orientação das vertentes	0,05	0,04	0,02	0,02	0,03	0,02	0,04	0,031	0,21	3,06
SOMA	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	7,00	100,00

### Cálculo da Razão de Consistência

Parâmetros	Declividade	Hipsometria	Litologia	Tipo de solo	Formas do terreno	Cobertura do solo	Orientação das vertentes
<b>Declividade</b>	1,00	7	3	7	5	7	9
<b>Hipsometria</b>	0,14	1,00	0,14	0,33	0,20	0,33	1,00
<b>Litologia</b>	0,33	7,00	1,00	3,00	0,33	3,00	5,00
<b>Tipo de solo</b>	0,33	3,00	0,33	1,00	0,20	3,00	3,00
<b>Formas do terreno</b>	0,20	5,00	3,00	5,00	1,00	3,00	5,00
<b>Cobertura do solo</b>	0,14	3,00	0,33	0,33	0,33	1,00	3,00
<b>Orientação das vertentes</b>	0,11	1,00	0,20	0,33	0,20	0,33	1,00
<b>Pesos (prioridade)</b>	0,415	0,032	0,158	0,095	0,205	0,064	0,031

**Cálculo da Razão de Consistência: matriz de comparação normalizada pelos autovetores (pesos)**

Parâmetros	Declividade	Hipsometria	Litologia	Tipo de solo	Formas do terreno	Cobertura do solo	Orientação das vertentes
<b>Declividade</b>	0,42	0,22	0,48	0,67	1,02	0,45	0,28
<b>Hipsometria</b>	0,06	0,03	0,02	0,03	0,04	0,021	0,03
<b>Litologia</b>	0,14	0,22	0,16	0,29	0,07	0,19	0,15
<b>Tipo de solo</b>	0,14	0,09	0,05	0,10	0,04	0,19	0,09
<b>Formas do terreno</b>	0,08	0,16	0,48	0,48	0,20	0,19	0,15
<b>Cobertura do solo</b>	0,06	0,09	0,05	0,03	0,07	0,06	0,09
<b>Orientação das vertentes</b>	0,05	0,03	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03
<b>Pesos (prioridade)</b>	0,415	0,032	0,158	0,095	0,205	0,064	0,031

**Cálculo da Razão de Consistência: obtenção do autovalor máximo**

Parâmetros	Somas dos pesos	Pesos	Soma/Prioridade	Autovalor Max
<b>Declividade</b>	3,53	0,415001	8,500399	
<b>Hipsometria</b>	0,24	0,031575	7,544973	
<b>Litologia</b>	1,22	0,158388	7,68641	
<b>Tipo de solo</b>	0,71	0,095323	7,410436	
<b>Formas do terreno</b>	1,74	0,204975	8,503574	
<b>Cobertura do solo</b>	0,46	0,064148	7,214934	
<b>Orientação das vertentes</b>	0,23	0,03059	7,652964	
<b>Pesos (prioridade)</b>			54,51369	<b>7,78767</b>

**Cálculo final do Índice de Consistência e Razão de Consistência: <10% = válido**

$$IC = (\lambda_{\max} - n) / (n - 1)$$

<b>IC =</b>	<b>0,131278</b>	
<b>Ca (n=7)</b>	<b>1,32</b>	
		%
<b>RC = IC / Ca</b>	<b>0,099453</b>	<b>9,94533</b>



**ANEXO(S)**

## ANEXO A – Certificado de calibração de câmera.

<b>CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DE CÂMERA AEROFOTOGRAMÉTRICA</b>			
 <small>ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE EMPRESAS DE LEVANTAMENTOS AEROSPACIAIS</small>	<b>CERTIFICADO Nº</b> <div style="border: 1px solid black; width: 100px; height: 20px; margin: 0 auto;"></div>	 <b>Geokosmos</b>	
<b>CALIBRAÇÃO REALIZADA PELO MÉTODO DO CAMPO TRIDIMENSIONAL</b> <b>CAMPO DE CALIBRAÇÃO: SÃO LUIZ DO PURUNÃ</b> <b>FOLHA 1/2</b>			
<b>PROPRIETÁRIO:</b> <span style="float: right;">ESTEIO - Engenharia e Aerolevantamentos S/A</span>			
<b>CARACTERÍSTICAS DA CÂMERA</b>			
<b>FABRICANTE:</b>	CARL ZEISS	<b>DISTÂNCIA FOCAL NOMINAL:</b>	153 mm
<b>MODELO DA CÂMERA:</b>	RMK A 15/23	<b>SÉRIE Nº:</b>	137 474
<b>TIPO DE LENTES:</b>	PLEOGON A2	<b>SÉRIE Nº:</b>	137 504
<b>QUADRO DO NEGATIVO:</b>	23 x 23 cm	<b>ABERTURA MÁXIMA:</b>	f4
<b>DADOS DA CALIBRAÇÃO</b>			
<b>DATA DAS AEROFOTOS</b>	09/dez/1995	<b>NÚMERO DE AEROFOTOS:</b>	17
<b>NÚMERO DE IMAGENS DOS ALVOS:</b>	320	<b>NÚMERO DE ALVOS:</b>	34
<b>FILME UTILIZADO:</b>	Kodak Double - X	<b>GRAUS DE LIBERDADE:</b>	552
<b>FILTRO UTILIZADO</b>	Amarelo	<b>APARELHO UTILIZADO NAS OBSERVAÇÕES FOTOGRAMÉTRICAS:</b>	Planicomp C-120 ZEISS
<b>RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO</b>			
	<b>PARÂMETROS</b>	<b>DESVIOS PADRÃO</b>	
<b>DISTÂNCIA FOCAL CALIBRADA: *</b>	$c = 153,528 \text{ mm}$	$\sigma_c = 0,043$	
<b>COORDENADAS DO PONTO PRINCIPAL:</b>	$x_0 = -0,063 \text{ mm}$ $y_0 = -0,037 \text{ mm}$	$\sigma_{x_0} = 0,016$ $\sigma_{y_0} = 0,017$	
<b>COEFICIENTES DA DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA:</b>	$k_0 = -2,667 \text{ E } -05$ $k_1 = -1,813 \text{ E } -09$ $k_2 = -5,877 \text{ E } -14$ $k_3 = -5,909 \text{ E } -18$	$\sigma_{k_1} = 1,217 \text{ E } -08$ $\sigma_{k_2} = 1,092 \text{ E } -12$ $\sigma_{k_3} = 3,009 \text{ E } -17$	
<b>COEFICIENTES DA DISTORÇÃO DESCENTRADA:</b>	$P_1 = -6,278 \text{ E } -07$ $P_2 = 7,172 \text{ E } -07$	$\sigma_{P_1} = 1,254 \text{ E } -07$ $\sigma_{P_2} = 1,495 \text{ E } -07$	
<small>* Escolhida de modo a deixar o módulo da máxima distorção positiva igual ao da máxima distorção negativa.</small>			
 <b>RESPONSÁVEL PELA COLETA DE DADOS</b>		 <b>RESPONSÁVEL PELA CALIBRAÇÃO</b> <small>DATA: 01 / fev 96</small>	

# CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DE CÂMERA AEROFOTOGRAMÉTRICA

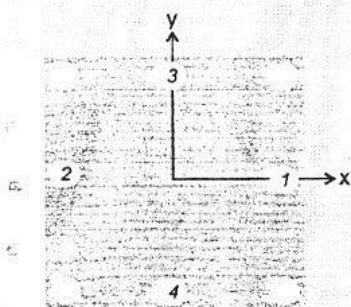


CERTIFICADO Nº



CALIBRAÇÃO REALIZADA PELO MÉTODO DO CAMPO TRIDIMENSIONAL  
CAMPO DE CALIBRAÇÃO: SÃO LUIZ DO PURUNÃ  
FOLHA 2/2

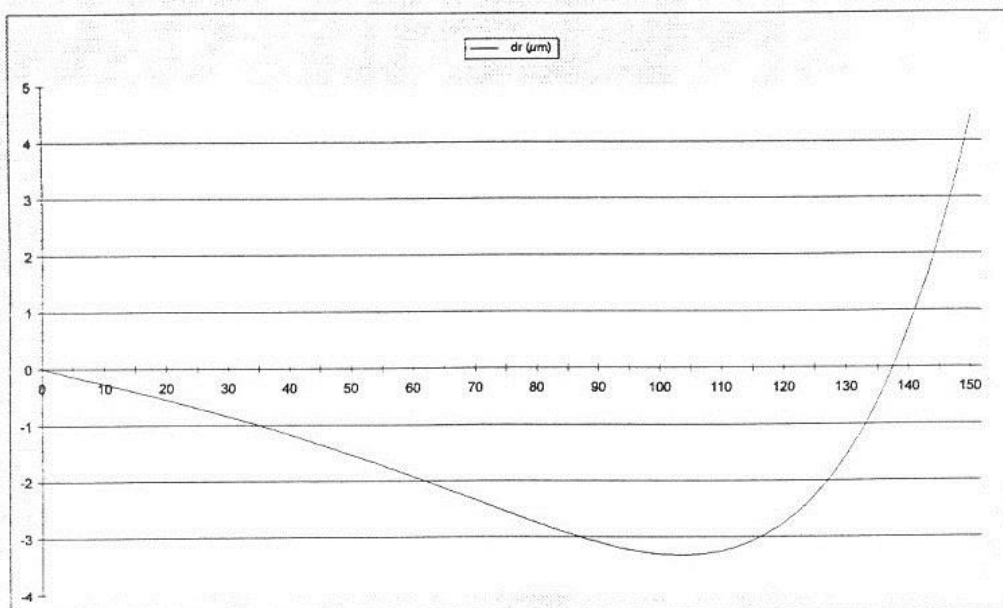
## SISTEMA DE COORDENADAS FIDUCIAIS



COORDENADAS:

PONTO	x (mm)	y (mm)
1	113,000	0,016
2	-113,006	0,018
3	0,004	113,015
4	0,007	-112,975

## CURVA DE DISTORÇÃO RADIAL SIMÉTRICA PARA DISTÂNCIA FOCAL CALIBRADA



RESPONSÁVEL PELA COLETA DE DADOS

ANEA

RESPONSÁVEL PELA CALIBRAÇÃO

DATA: 01 / fev /