

Trabalho de Conclusão de Curso  
Curso de Graduação em Geologia

APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NA ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A  
ESCORREGAMENTOS NA BACIA DO RIO PAU D'ALHO E CÓRREGO DA  
DIVISA EM CARAGUATATUBA (SP)

Tatiany Correia da Silva Santos

Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis (orientador)

Claudia Vanessa dos Santos Corrêa (co-orientadora)

Rio Claro (SP)

2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Câmpus de Rio Claro

TATIANY CORREIA DA SILVA SANTOS

APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NA ANÁLISE DA  
SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS NA BACIA DO  
RIO PAU D'ALHO E CÓRREGO DA DIVISA EM  
CARAGUATATUBA (SP)

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de  
Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio  
Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de  
Mesquita Filho, para obtenção do grau de Geóloga.

Rio Claro - SP

2016

TATIANY CORREIA DA SILVA SANTOS

APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NA ANÁLISE DA  
SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS NA BACIA DO  
RIO PAU D'ALHO E CÓRREGO DA DIVISA EM  
CARAGUATATUBA (SP)

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de  
Geociências e Ciências Exatas - Câmpus de Rio  
Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio de  
Mesquita Filho, para obtenção do grau de Geóloga.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis (orientador)

Prof. Dr. Paulina Setti Riedel

Pós Graduando Felipe Pereira de Sisto

Rio Claro, 29 de novembro de 2016.

---

Tatiany Correia da Silva Santos

---

Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

*Aos meus pais, Sergio e Joyce,  
exemplos de vida.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao concluir uma etapa em nossas vidas, é natural que muitas memórias e uma mistura de sentimentos venham à tona. Foram seis anos intensamente vividos, que envolveram momentos de muita alegria, tristeza, crescimento pessoal e superações alcançadas.

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus pais, Sergio e Joyce, pelo apoio incondicional durante toda esta jornada. Sem vocês, nada do que conquistei seria possível. Agradeço ao meu irmão, Rafael, que, mesmo distante, se fez presente em certos momentos que foram indispensáveis. Obrigada por me ensinar tantas coisas e me tornar uma pessoa melhor.

Não poderia deixar de mencionar o Mateus, meu grande parceiro e companheiro ao longo de todos estes anos. Obrigada por todo carinho, compreensão, motivação e principalmente paciência durante este processo. Tenho muita sorte de ter você!

Agradeço a Claudia, que se fez presente e me ajudou em todos os momentos desta etapa e ao Tullius Nery, que me ofereceu uma grande ajuda em momentos de crise. Agradeço aos funcionários da UNESP Rio Claro por serem parte essencial da minha trajetória acadêmica.

Agradeço aos amigos que conquistei durante esta jornada e que tornaram tudo mais divertido e leve: Laura, Tatiana, Flávia, Isabella, Raquel, Vinicius, Eduardo, Melissa e Rebeca. Obrigada por todos estes momentos compartilhados! Vou levar vocês sempre comigo.

O destino, certas vezes, dá um jeito de proporcionar encontros com pessoas especiais. Deste modo, tive a sorte de viajar para longe e encontrar pessoas incríveis no meu caminho. Agradeço ao Cayque, Genaro, Thaís, Ana, Luiz e Rebeca, que dividiram comigo uma das melhores experiências da minha vida e que, mesmo longe, se fazem presente todos os dias.

Agradeço as minhas amigas de São José dos Campos, que estiverem ao meu lado desde o início desta etapa: Mariani, Amanda, Mariana, Andrea, Gi e Deise, obrigada por todo apoio e compreensão durante estes seis anos. Agradeço também a constante

preocupação e suporte de uma família tão querida: Paulo, Dóris, Gisele, Lucas, Laís e Marcos, meus agradecimentos!

Agradeço ao Projeto “Alertas Meteorológicos para a Avaliação de risco geológico e geotécnico nas regiões Sul e Sudeste do Brasil”, financiado pela Petrobrás. Agradeço a Fundação para o Desenvolvimento da UNESP (FUNDUNESP) pelo apoio financeiro durante este trabalho. A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), agradeço pela bolsa de estudos para a realização do meu intercâmbio.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para o meu crescimento pessoal e profissional ao longo desta longa jornada.

“O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa,  
sossega e depois desinquieta.  
O que ela quer da gente é coragem.  
O que Deus quer ver é a gente aprendendo a ser capaz de ficar alegre mais e mais, no  
meio da alegria e ainda mais alegre no meio da tristeza (...)  
O mais importante do mundo, é isto: que as pessoas não estão sempre iguais, ainda  
não foram terminadas, mas que elas vão sempre mudando”.

Grande sertão Veredas

Guimarães Rosa

## RESUMO

Os escorregamentos translacionais rasos são frequentes na Serra do Mar e configuram fenômenos naturais que apresentam o maior número de danos e vítimas no Brasil. Deste modo, a elaboração de mapas de suscetibilidade constitui uma ferramenta que auxilia na prevenção e na redução de danos socioeconômicos que estes processos podem causar. Esta característica, aliada ao baixo custo, favorece a aplicação de modelos matemáticos determinísticos, tais como o SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability Analysis*), em regiões que apresentam alta suscetibilidade a escorregamentos, a fim de compreender e caracterizar estes processos. Diante deste contexto, o objetivo principal deste trabalho consistiu na análise da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos aplicado a duas bacias hidrográficas localizadas na Serra do Mar Paulista. As etapas deste trabalho dividiram-se na elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE) e os seus respectivos subprodutos (mapas de declividade e área de contribuição), mapa de cicatrizes e classificação das mesmas a partir da análise de ortofotos datadas de 2012 e geração de 14 mapas de suscetibilidade baseados em ensaios geotécnicos descritos por Wolle (1988) e Ferreira (2008). Os mapas topográficos, assim como os mapas de suscetibilidade, foram correlacionados com o mapa de cicatrizes e analisados por meio de índices percentuais de frequência de classes (F) e de concentração de cicatrizes (CC). Em certos cenários de suscetibilidade (1B, 5, 6, 7, 9 e 10), foi identificado uma expressiva concordância entre as feições de escorregamento e as classes consideradas como instáveis. Os resultados evidenciaram uma forte influência dos parâmetros de resistência dos solos, principalmente da coesão, uma vez que quando estes valores foram elevados, os mapas de suscetibilidade apresentaram áreas incondicionalmente estáveis cada vez mais expressivas e vice-versa. O uso de valores reduzidos ou nulos de coesão efetiva resultaram em uma superestimação das áreas instáveis, configurando o cenário 7 como o resultado de melhor calibração do modelo. A aplicação do modelo SHALSTAB mostrou-se bastante satisfatória no presente trabalho e poderá auxiliar na elaboração de medidas mitigadoras, a fim de amenizar os impactos socioeconômicos causados por eventos futuros.

**Palavras-chave:** escorregamentos rasos, SHALSTAB, Serra do Mar

## ABSTRACT

The shallow landslides are frequent in the Serra do Mar and represent natural phenomena that present the greatest number of damages and victims in Brazil. In this way, the development of susceptibility maps is a tool that helps to prevent and reduce socioeconomic damages that these processes can cause. This characteristic, added with the low cost, favors the application of deterministic mathematical models, such as SHALSTAB (Shallow Landslide Stability Analysis), in regions that present high susceptibility to landslides in order to understand and characterize these processes. Considering this context, the main objective of this academic work was the analysis of the susceptibility to shallow translational landslides applied to two drainage basins located in the Serra do Mar. The stages of this work were divided in the elaboration of the Digital Elevation Model (DEM) and its respective by-products (slope map and contribution area map), scars map and their classification from the analysis of orthophotos dated 2012 and generation of 14 susceptibility maps based on geotechnical tests described by Wolle (1988) and Ferreira (2008). Topographic maps, as well as maps of susceptibility, were correlated with the scars map and analyzed by means of percentage of class frequency and scars concentration. In certain susceptibility scenarios (1B, 5, 6, 7, 9 and 10), an expressive agreement was found between landslides features and unstable classes. The results showed a strong influence of the resistance parameters of the soils, especially of the cohesion, since when these values were high, the susceptibility maps presented unconditionally stable areas that were increasingly expressive and vice versa. The low and zero values of cohesion resulted in an overestimation of the unstable areas, configuring scenario 7 as the result that presents the better calibration of the model. The application of the SHALSTAB model was very satisfactory in the present study and could help in the elaboration of mitigating measures, in order to reduce the socioeconomic impacts caused by future events.

**Keywords:** shallow landslides, SHALSTAB, Serra do Mar

## Lista de Figuras

<b>Figura 1.1:</b> Estrutura da monografia em questão. ....	4
<b>Figura 2.1:</b> A) Esboço do desenvolvimento de fluxos verticais decorrentes do avanço da frente de saturação. ....	7
<b>Figura 2.2:</b> Perfil topográfico elaborado por meio do MDT, entre os municípios de Natividade da Serra e Caraguatatuba, em São Paulo, perfazendo uma secção da bacia do rio Santo Antônio. ....	10
<b>Figura 2.3:</b> Vista da Serra de Caraguatatuba após movimentos de massa generalizados em março de 1967. ....	11
<b>Figura 2.4:</b> Mapa de distribuição de escorregamentos ocorridos no evento de 1967 em Caraguatatuba. ....	12
<b>Figura 2.5:</b> Localização da área de estudo. ....	14
<b>Figura 2.6:</b> Drenagens que constituem a área de estudo. ....	15
<b>Figura 2.7:</b> Mapa litológico das bacias Pau D’Alho e Córrego da Divisa. ....	17
<b>Figura 3.1:</b> A) Esquema de um escorregamento planar. B) Escorregamento planar ocorrido na praia do Bananal, Ilha Grande em 2010. ....	24
<b>Figura 3.2:</b> A) Esquema de um escorregamento rotacional. B) Escorregamento ocorrido em 1995, em La Conchita, Califórnia (EUA). ....	25
<b>Figura 3.3:</b> A) Esquema de um escorregamento em cunha. B) Escorregamento real em cunha. ....	26
<b>Figura 3.4:</b> Perfil de alteração e seus respectivos horizontes de solo. ....	29
<b>Figura 4.1:</b> Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa. ....	40
<b>Figura 4.2:</b> Representação do modelo hidrológico de estado uniforme. ....	44
<b>Figura 4.3:</b> Fatores necessários para a geração dos mapas de suscetibilidade a ocorrência de escorregamentos rasos. ....	47
<b>Figura 4.4:</b> Mapa topográfico utilizado para a elaboração do MDE. ....	50
<b>Figura 4.5:</b> Tratamento de picos e sumidouros. ....	51
<b>Figura 4.6:</b> Fluxo de água de acordo com as elevações. ....	52
<b>Figura 4.7:</b> Vetores de direção de fluxo conforme a cor e valor, usando a abordagem eight-direction (D8). ....	52
<b>Figura 4.8:</b> Mapa de direções de fluxo das bacias Pau D’Alho e Córrego da Divisa. ....	54
<b>Figura 4.9:</b> Criação de rede de fluxo a partir das direções de fluxo. ....	55

<b>Figura 4.10:</b> Reconhecimento das cicatrizes de escorregamentos através da comparação entre vegetações rasteiras e vegetações de médio a alto porte.....	57
<b>Figura 4.11:</b> A) Parte da ortofoto da área de estudo com a delimitação de cicatrizes traçadas de acordo com a vegetação rasteira, que difere das demais. B) Parte das cicatrizes, inseridas no mapa topográfico da área. ....	57
<b>Figura 4.12:</b> Parâmetros de entrada referentes ao modelo SHALSTAB.....	59
<b>Figura 4.13:</b> Classes de estabilidade do SHALSTAB e suas respectivas cores. ....	61
<b>Figura 5.1:</b> Mapa de cicatrizes das bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa.....	63
<b>Figura 5.2:</b> Mapa de cicatrizes das bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa sobre imagem de satélite. ....	64
<b>Figura 5.3:</b> Modelo Digital de Elevação das bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa em formato raster. ....	66
<b>Figura 5.4:</b> Modelo Digital de Elevação das bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa em formato tin.....	67
<b>Figura 5.5:</b> Histograma referente ao Modelo Digital de Elevação (MDE). Distribuição percentual da Frequência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de elevação. ....	68
<b>Figura 5.6:</b> Mapa de Declividade das bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa. ....	69
<b>Figura 5.7:</b> Histograma referente ao Mapa de Declividade. Distribuição percentual da Frequência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de declividade.....	70
<b>Figura 5.8:</b> Mapa de contribuição das bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa. ....	72
<b>Figura 5.9:</b> Histograma referente ao Mapa de Contribuição. Distribuição percentual da Frequência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de contribuição. ....	73
<b>Figura 5.10:</b> Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas dos cenários 1A, 2A, 3A e 4A. 1A ( $c = 6000 \text{ N/m}^2$ ; $Y = 1430 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m; $\Phi = 34^\circ$ ); 2A ( $c = 12000 \text{ N/m}^2$ ; $Y = 1800 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m; $\Phi = 45^\circ$ ); 3A ( $c = 9500 \text{ N/m}^2$ ; $Y = 1650 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m; $\Phi = 40^\circ$ ) e 4A ( $c = 11000 \text{ N/m}^2$ ; $Y = 1850 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m; $\Phi = 45^\circ$ ).....	74
<b>Figura 5.11:</b> Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas dos cenários 1A, 2A, 3A e 4A. 1A ( $c = 6000 \text{ N/m}^2$ ; $Y = 1430 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m; $\Phi = 34^\circ$ ); 2A ( $c = 12000 \text{ N/m}^2$ ; $Y = 1800 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m; $\Phi = 45^\circ$ ); 3A ( $c = 9500 \text{ N/m}^2$ ; $Y = 1650 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m; $\Phi = 40^\circ$ ) e 4A ( $c = 11000 \text{ N/m}^2$ ; $Y = 1850 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m; $\Phi = 45^\circ$ ). ....	75

<b>Figura 5.12:</b> Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 1B ( $c = 1000 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1710 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m; $\Phi = 34^\circ$ ).....	77
<b>Figura 5.13:</b> Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 3B ( $c = 1000 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1820 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m; $\Phi = 36^\circ$ ).....	78
<b>Figura 5.14:</b> Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 1B ( $c = 1000 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1710 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m; $\Phi = 34^\circ$ ). Distribuição percentual da Freqüência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade.....	79
<b>Figura 5.15:</b> Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas dos cenários 3B ( $c = 1000 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1820 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m; $\Phi = 36^\circ$ ). Distribuição percentual da Freqüência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade.....	79
<b>Figura 5.16:</b> Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 2B ( $c = 4000 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1950 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m; $\Phi = 39^\circ$ ).....	80
<b>Figura 5.17:</b> Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 4B ( $c = 3500 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 2010 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m; $\Phi = 39^\circ$ ).....	81
<b>Figura 5.18:</b> Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 2B ( $c = 4000 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1950 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m; $\Phi = 39^\circ$ ). Distribuição percentual da Freqüência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade.....	82
<b>Figura 5.19:</b> Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 4B ( $c = 3500 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 2010 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m; $\Phi = 39^\circ$ ). Distribuição percentual da Freqüência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade.....	82
<b>Figura 5.20:</b> Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 5 ( $c = 0 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1240 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m; $\Phi = 29^\circ$ ). .....	84
<b>Figura 5.21:</b> Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 6 ( $c = 1199 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1050 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m; $\Phi = 32^\circ$ ).....	85
<b>Figura 5.22:</b> Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 9 ( $c = 0 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1110 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m; $\Phi = 37^\circ$ ). .....	86

<b>Figura 5.23:</b> Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 10 ( $c = 0 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1210 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m; $\Phi = 34^\circ$ ). .....	87
<b>Figura 5.24:</b> Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 5 ( $c = 0 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1240 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m; $\Phi = 29^\circ$ ). Distribuição percentual da Freqüência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade. ....	88
<b>Figura 5.25:</b> Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 6 ( $c = 1199 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1050 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m; $\Phi = 32^\circ$ ). Distribuição percentual da Freqüência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade. ....	88
<b>Figura 5.26:</b> Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 9 ( $c = 0 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1110 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m; $\Phi = 37^\circ$ ). Distribuição percentual da Freqüência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade. ....	89
<b>Figura 5.27:</b> Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 10 ( $c = 0 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1210 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m; $\Phi = 34^\circ$ ). Distribuição percentual da Freqüência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade. ....	89
<b>Figura 5.28:</b> Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 7 ( $c = 2160 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1410 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m; $\Phi = 26^\circ$ ). ....	91
<b>Figura 5.29:</b> Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 7 ( $c = 2160 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1410 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m; $\Phi = 26^\circ$ ). Distribuição percentual da Freqüência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade. ....	92
<b>Figura 5.30:</b> Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 8 ( $c = 11057 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1060 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m; $\Phi = 37^\circ$ ). ....	92
<b>Figura 5.31:</b> Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 8 ( $c = 11057 \text{ N/m}^2$ ; $\gamma = 1060 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m; $\Phi = 37^\circ$ ). ....	93
<b>Figura 5.32:</b> Concentração de Cicatrizes por classe de estabilidade, referente aos 14 cenários simulados. ....	96

## Lista de Quadros

<b>Quadro 2.1:</b> Unidades litológicas das bacias Pau D’alho e Córrego da Divisa. ....	16
<b>Quadro 3.1:</b> Classificação dos movimentos de massa segundo Varnes (1978). ....	20
<b>Quadro 3.2:</b> Principais tipos de movimentos de massa. ....	22
<b>Quadro 3.3:</b> Classificação dos movimentos de encosta segundo Varnes (1978). ....	27
<b>Quadro 3.4:</b> Respostas geodinâmica de encostas de acordo com a forma do talude. ....	31
<b>Quadro 3.5:</b> Aspectos relacionados à classificação de modelos. ....	37

## Lista de Tabelas

<b>Tabela 4.1:</b> Classes de estabilidade, rotuladas de A a G, referentes às condições de estabilidade e saturação em função da razão $a/b$ e $\tan\theta$ . .....	46
<b>Tabela 4.2:</b> Classes de declividade utilizadas no presente trabalho. ....	51
<b>Tabela 4.3:</b> Classificações atribuídas para cada cicatriz delimitada. ....	56
<b>Tabela 4.4:</b> Parâmetros geotécnicos referentes à duas áreas piloto localizadas na Serra do Mar. ....	58
<b>Tabela 4.5:</b> Parâmetros geotécnicos referentes a bacia do rio Guaxinduba. ....	59
<b>Tabela 4.6:</b> Parâmetros inseridos no modelo SHALSTAB correspondentes aos 14 cenários gerados.....	60
<b>Tabela 5.1:</b> Comparação entre a concentração de cicatrizes descritas no presente trabalho e a concentração de cicatrizes descritas por Lopes (2006).....	71
<b>Tabela 5.2:</b> Comparação entre os resultados dos mapas de suscetibilidade, envolvendo os parâmetros geotécnicos, a frequência das classes e concentração de cicatrizes. ....	97

## **Lista de Abreviaturas e Siglas**

EMPLASA - Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A

IAEG – *International Association of Engineering Geology*

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

GSD - *Ground Sample Distance*

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

MDE – Modelo Digital do Elevação

SIG – Sistema de Informação Geográfica

TRIGIS - *Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-Stability Model*

SINMAP - *Stability Index Mapping*

SHALSTAB - *Shallow Landslide Stability Analysis*

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Justificativas e contextualização do tema .....	2
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Organização da monografia.....	3
2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	5
2.1 A Serra do Mar .....	5
2.2 O Município de Caraguatatuba.....	8
2.3 As bacias hidrográficas do rio Pau D'Alho e Córrego da Divisa .....	13
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	18
3.1 Movimentos de massa.....	18
3.1.1 Classificação dos movimentos de massa.....	19
3.1.1.1 Rastejos (creep).....	21
3.1.1.2 Escorregamentos (slides) .....	21
3.1.1.2.1 Classificação dos escorregamentos .....	21
3.1.1.2.2 Fatores condicionantes dos escorregamentos .....	27
3.1.1.3 Quedas (falls).....	34
3.1.1.4 Corridas (flows).....	35
3.2 Métodos de previsão aplicados a escorregamentos .....	35
3.3 Modelagem de escorregamentos com softwares de simulação 2D .....	38
4. MATERIAIS E MÉTODOS .....	40
4.1 Primeira Etapa.....	41
4.1.1 Seleção da área de estudo .....	41
4.1.2 Seleção do Modelo .....	41
4.1.3 Levantamento de dados.....	46
4.2 Segunda Etapa.....	48
4.2.1 Elaboração de mapas a partir do Modelo Digital de Elevação.....	48
4.2.2 Elaboração de mapa a partir das ortofotos da área de estudo .....	55
4.3 Terceira Etapa.....	56
4.3.1 Levantamento dos Parâmetros Geotécnicos.....	56
4.3.2 Simulação dos Cenários de Suscetibilidade.....	58
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	62
5.1 Mapa de Cicatrizes.....	62

5.2 Mapas temáticos elaborados a partir do MDE .....	65
5.2.1 Modelo Digital de Elevação (MDE).....	65
5.2.2 Mapa de Declividade .....	68
5.2.3 Mapa de Contribuição .....	71
5.3 Cenários de suscetibilidade.....	71
5.3.1 Cenários fundamentados em Wolle (1988).....	73
5.3.2 Cenários fundamentados em Ferreira (2013).....	83
5.3.3 Comparação entre os mapas de suscetibilidade .....	94
6. CONCLUSÕES.....	99
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

## 1. INTRODUÇÃO

Desastres naturais são definidos como fenômenos que modificam a superfície terrestre e atingem regiões habitadas, provocando danos socioeconômicos e, por vezes, tendo como consequência mais grave, a perda de vidas humanas (AMARAL; GUTJAHR, 2011). Os principais processos modificadores da superfície terrestre que atingem e causam acidentes no território brasileiro são derivados da dinâmica externa da Terra, tais como enchentes, erosão, assoreamento, escorregamentos, subsidências e colapsos de solo.

Dentre estes processos, os escorregamentos em encostas representam um dos fenômenos naturais que apresentam maior número de vítimas e danos no Brasil, sendo frequentes nas regiões sul, sudeste e nordeste do país. O intenso processo de urbanização vivido a partir da década de 70, associado a falta de recursos e de políticas habitacionais adequadas, ocasionou a ocupação e a intervenção humana em áreas geologicamente desfavoráveis, potencializando a ocorrência destes desastres naturais (AUGUSTO FILHO, 2002). Este quadro afeta principalmente a parcela da população com menos recursos econômicos, uma vez que há um número muito maior da população de baixa renda vivendo em moradias mais frágeis, em áreas densamente povoadas e em terrenos de maior suscetibilidade aos perigos (TOMINAGA, 2009).

A Serra do Mar configura a região mais afetada por escorregamentos em encostas no país, associados em sua grande maioria a altas taxas de pluviosidade. Augusto Filho (1994) destaca a ocorrência de intensos processos de escorregamentos relacionados a esta região, tais como os eventos ocorridos em 1967 na Serra das Araras (RJ) e em Caraguatatuba (SP), que resultaram em 1.320 mortes e na destruição de centenas de edificações.

A importância da análise e controle destes processos está diretamente relacionada à demanda socioeconômica proveniente de acidentes e inúmeros problemas ligados a instabilizações de encostas. Devido a estes fatores, o estudo de escorregamentos acumulou uma extensa bibliografia nacional e internacional, configurando um campo de estudo que engloba diversas áreas de conhecimento como Geologia, Geomorfologia, Engenharia Civil, Geotecnia, entre outras.

Mafrá Junior (2007) ressalta que o mapeamento, bem como o estudo dos solos, tem se mostrado eficiente em relação aos problemas constantes na natureza, tais como a estabilidade de encostas. Nesse contexto, a obtenção de dados coerentes sobre as propriedades do solo e subsequente aplicação dos mesmos de forma precisa, permite a identificação de potenciais zonas suscetíveis à ocorrência de escorregamentos.

O uso de geotecnologias, como o Sistema de Informação Geográfica (SIG), vêm sendo utilizado com êxito na identificação de áreas instáveis. Esta ferramenta permite, entre outras utilidades, a elaboração de mapas de suscetibilidade a escorregamentos através da aplicação de modelos matemáticos.

Neste sentido, o presente trabalho propõe a utilização de um modelo matemático determinístico, o SHALSTAB, aplicado a duas bacias hidrográficas inseridas na Serra do Mar, denominadas Pau D'Alho e Córrego da Divisa.

### **1.1 Justificativas e contextualização do tema**

A região do Litoral Norte do Estado de São Paulo, que engloba o município de Caraguatatuba, apresenta-se como uma área com alta suscetibilidade a escorregamentos de encosta, agravados por eventos caracterizados pelos altos índices de pluviosidade. Quando associado ao crescimento populacional e, conseqüentemente, à expansão urbana, o risco torna-se ainda maior. Devido à grande ocorrência de escorregamentos sucedidos no município de Caraguatatuba, bem como um histórico que envolve danos imensuráveis causados por desastres naturais nesta região, optou-se por selecionar duas bacias hidrográficas do município para realizar o presente estudo.

### **1.2 Objetivos**

Diante deste cenário, o objetivo principal do presente trabalho consiste na análise da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos nas bacias hidrográficas do rio Pau D'Alho e Córrego da Divisa. Para tal fim, optou-se por utilizar o modelo SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability Analysis*), desenvolvido por Montgomery e Dietrich (1994). Esta ferramenta é descrita como um modelo determinístico baseado na

combinação do modelo de estabilidade de encosta infinita e no modelo hidrológico de estado uniforme, que visa prever a ocorrência de escorregamentos rasos em função da quantidade de chuva e das características geotécnicas do solo do local em questão (GUIMARÃES et al., 2003).

### **1.3 Organização da monografia**

Esta monografia foi estruturada em sete capítulos, conforme a Figura 1.1. O Capítulo 2 apresenta a caracterização da área de estudo, cujos temas percorridos envolvem a Serra do Mar, o município de Caraguatatuba e as bacias hidrográficas analisadas.

O Capítulo 3 aborda a conceituação dos movimentos de massa em geral, com foco em escorregamentos, bem como a classificação e os fatores condicionantes na deflagração de tais processos gravitacionais de massa. Ainda neste capítulo, são introduzidas as metodologias de previsão dos escorregamentos e três modelos matemáticos determinísticos que auxiliam na análise e na identificação de áreas instáveis.

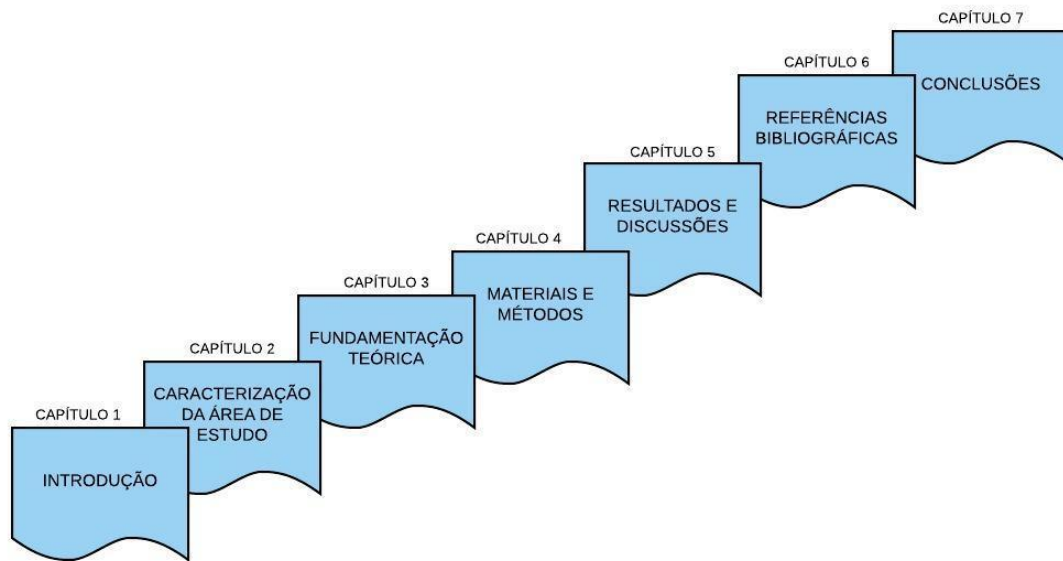
O Capítulo 4 descreve todos os materiais e métodos necessários para a execução do trabalho, envolvendo o levantamento dos parâmetros necessários para a aplicação do modelo SHALSTAB, o desenvolvimento e justificativas dos cenários, bem como o a elaboração de mapas temáticos, dentre outros.

O Capítulo 5 expõe os resultados das simulações realizadas de acordo com cada cenário estabelecido, bem como a correlação com o mapa de cicatrizes gerado a partir de registros de escorregamentos pretéritos.

O Capítulo 6 apresenta as conclusões e sugestões para pesquisas futuras.

Por fim, o Capítulo 7 engloba todas as referências bibliográficas consultadas e essenciais para a elaboração desta monografia.

Figura 1.1: Estrutura da monografia em questão.



## **2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**

A área de estudo compreende as bacias hidrográficas do Rio Pau D'Alho e Córrego da Divisa, situadas no município de Caraguatatuba (SP). O sistema orográfico da Serra do Mar, contexto sob o qual tal área encontra-se inserida, é abordado no item 2.1. O município de Caraguatatuba e suas características, bem como o evento de 1967 associado a intensos movimentos de massa sucedidos nesta região, são abordados no item 2.2. Por fim, o item 2.3 expõe as características das bacias hidrográficas do Rio Pau D'Alho e Córrego da Divisa, área de estudo propriamente dita.

### **2.1 A Serra do Mar**

A Serra do Mar é definida como um conjunto de escarpas festonadas com cerca de 1.000 km de extensão, que se estende desde o Estado do Rio de Janeiro até o norte do Estado de Santa Catarina. Em São Paulo, configura típica borda de planalto e é frequentemente nivelada pelo topo em altitudes que variam entre 800 a 1.200 m. Já na região centro-oriental do Rio de Janeiro, manifesta-se como montanhas constituídas por blocos de falhas inclinados para nor-noroeste em direção ao Rio Paraíba do Sul e vertentes abruptas voltadas para a Baixada Fluminense. No Paraná, é representada por uma cadeia de montanha com cumes de até 1.800 m de altitude (ALMEIDA et. al., 1998). Associações metamórficas e migmatíticas, bem como rochas ígneas, sustentam a Serra do Mar e revelam como principal litologia gnaisses, granitos, xistos e migmatitos. Em menor escala ocorrem filitos, quartzitos, rochas metacarbonáticas e diques de diabásio.

Tal sistema orográfico é formado por unidades geológicas distintas, que datam do Proterozóico Superior e Arqueano. As unidades mesozoicas configuram a fase inicial dos processos erosivos atuantes nas encostas e deposicionais nas regiões de baixada. A morfologia da Serra do mar está intrinsecamente associada a processos de movimentos gravitacionais de massa, onde os processos de mobilização do material ocorrem tanto nas encostas como nos canais de drenagem (GRAMANI, 2001).

Gramani (2001) também ressalta que devido a aspectos geológicos (processos de formação, constituição litológica e feições estruturais) e aspectos geomorfológicos (altura

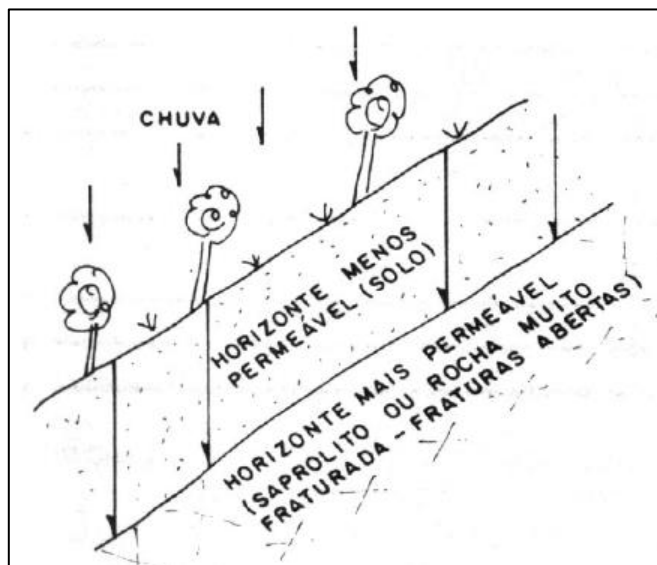
e geometria das encostas, localização geográfica, perfis de canais), a Serra do Mar apresenta uma elevada potencialidade à ocorrência de escorregamentos que podem evoluir posteriormente para corridas de detritos e lama. Tal característica, somada a altos índices pluviométricos atuantes nessa região, classifica a Serra do Mar como principal palco de ocorrência de deslizamentos em encostas do país.

Segundo Wolle e Carvalho (1994), os escorregamentos translacionais rasos são certamente os tipos mais frequentes de instabilizações de encostas encontrados em toda região da Serra do Mar. Estes processos associam-se as porções superficiais das encostas, que atingem o horizonte coluvionar superficial e, comumente, o horizonte de solo saprolítico (residual), imediatamente sotoposto. Tais autores ainda ressaltam que as espessuras envolvidas variam desde menos de um metro até alguns poucos metros, dependendo do mecanismo de instabilização e da litologia associada.

Como mecanismo de instabilização, Wolle e Carvalho (1994) destacam o mecanismo de fluxo vertical, que implica na redução da resistência do solo devido a saturação provocada pela água da chuva. Na maioria dos trechos de alta e média encosta da Serra do Mar no Estado de São Paulo, predominam capeamentos delgados de solos coluvionares e saprolíticos sobre maciços rochosos, constituídos principalmente por gnaisses, migmatitos e xistos, intensamente fraturados. O fraturamento resulta em condutividades hidráulicas muito superiores aos solos de capeamento, onde toda a água da chuva é drenada para horizontes inferiores que constituem o maciço rochoso, configurando um nível freático a algumas dezenas de metros de profundidade. O fluxo de água, neste caso, passa a ser predominantemente vertical (Figura 2.1). Este movimento descendente da água reduz bruscamente a coesão aparente do solo, aumentando a instabilidade na encosta.

As rochas que constituem a Serra apresentam graus distintos de fraturamento e alteração, além de serem cortadas por extensas zonas de falha de direção principal NE-SW. Tal circunstância, associada a litologias, condiciona a geometria e a orientação dos vales, que apresentam forte controle estrutural (GRAMANI, 2001).

**Figura 2.1:** A) Esboço do desenvolvimento de fluxos verticais decorrentes do avanço da frente de saturação.



Fonte: Wolle e Carvalho (1994).

As rochas formam duas províncias geológicas principais que são condicionadas pela Falha de Cubatão. A primeira pertence ao Complexo Costeiro e constitui rochas metamórficas mais antigas, predominantemente do Arqueano, localizadas ao sul do lineamento. Já a segunda província, localizada a norte, é representada predominantemente por rochas metamórficas mais recentes datadas do Proterozóico Superior e pertencentes ao Grupo Açungui (SANTOS, 2004).

No que diz respeito à curvatura das encostas inseridas na Serra do Mar, IPT (1986) salienta que as encostas retilíneas são mais frequentes e se associam a materiais com maior grau de predisposição a escorregamentos. A curvatura côncava apresenta pequena frequência em relação as demais, todavia, contribui com o entendimento de processos hidrogeológicos atuantes na região por configurar zonas convergentes de fluxos superficiais e material transportado. As porções convexas do relevo apresentam solos coluvionares e clastos grossos, caracterizando formas mais estáveis aos movimentos de massa e processos erosivos. Entretanto, este tipo de curvatura contém maior quantidade de material inconsolidado, que pode intensificar possíveis instabilizações (SANTOS,2004).

Em relação a litologia, Gramani (2001) afirma que as encostas mais resistentes à erosão são constituídas por granitos, gnaisses e migmatitos. Tais encostas possuem menor espessura do manto de solo e maior resistência aos processos de alteração, associando-se frequentemente a fenômenos de quedas de blocos, que contribuem para a formação dos materiais de drenagem.

A complexa interação entre fatores topográficos e atmosféricos configura a Serra do Mar como região mais chuvosa do país. Segundo Santos (2004), os maiores índices pluviométricos são registrados nas cotas mais altas da Serra (médias anuais em torno de 4.000 mm) e os menores, no sopé da escarpa (médias anuais em torno de 2.500 mm). As condições climáticas predominantes em tal sistema integram as características macroclimáticas da Baixada Santista, definidas por um clima tropical quente e úmido, cuja a maior precipitação pluviométrica (70%) compreende os meses de janeiro a março. Quanto aos fatores topográficos, Gramani (2001) caracteriza a Serra do Mar como uma barreira orogenética que favorece a concentração de maciças nuvens de chuva devido ao bloqueio de massas de ar que a mesma proporciona. A situação se agrava quando essa chuva incide em áreas restritas (anfiteatros de pequena dimensão) num curto espaço de tempo.

A vegetação na Serra do Mar, cientificamente denominada Floresta Ombrófila Densa ou Floresta Atlântica de Encostas, caracteriza-se por apresentar grande diversidade florística, endemismo de espécies, árvores de grande porte (25 a 30 m de altura), espessa serrapilheira, intensa umidade e corpo florestal denso. Cabe ressaltar que tal floresta é classificada como tropical úmida e ocorre essencialmente sobre relevo montanhoso (SANTOS, 2004).

## **2.2 O Município de Caraguatatuba**

O município de Caraguatatuba, cuja extensão abrange cerca de 485,097 km<sup>2</sup>, está localizado no litoral norte do estado de São Paulo e apresenta uma população estimada de 113.317 habitantes, conforme IBGE (2015). O acesso à área é realizado principalmente através das rodovias Tamoios (SP 099) e Rio-Santos (BR 101/SP 55).

A Serra do Mar, em tal município, é caracterizada por duas subunidades denominadas Serra Costeira e Baixadas Litorâneas. A primeira é caracterizada por altitudes de até 1200 metros e feições como escarpas festonadas, serras alongadas, espigões, morros paralelos e morros alongados. As Baixadas Litorâneas são caracterizadas por relevos baixos com altitudes inferiores a 70 metros, além de elevações que separam pequenas planícies e enseadas (CRUZ, 1974; HASUI et al., 1994; NERY, 2016).

Cruz (1974) compartimentou o relevo de Caraguatatuba em planaltos serranos, escarpas costeiras e planícies costeiras (Figura 2.2). Os planaltos configuram predominantemente relevos mamelonizados com espesso manto de regolito e restos de detritos mais grosseiros sob a forma clássica de linha de pedra. A influência estrutural é fundamental no que diz respeito a direção das cristas e vales, bem como o rebaixamento e levantamento de blocos. A orientação predominante, ENE e NNE (de 20 a 30°), é observada tanto no alinhamento das cristas dos morros, como pelos corpos intrusivos e diques.

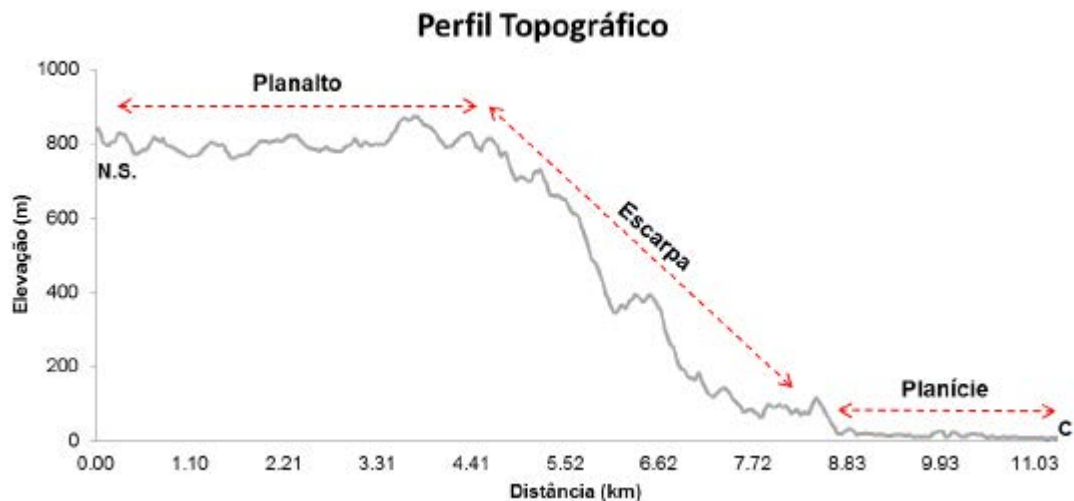
Quanto as escarpas costeiras, Cruz (1974) descreve:

São áreas predominantemente de desgaste, com grande dinamização geomorfológica e alta influência estrutural. A ação antrópica é limitada aos baixos e altos níveis, até 200-300 m. Há predominância de declives mais íngremes com índices acima de 40% nos altos das escarpas. Os baixos níveis, patamares intermediários e rampas de desgaste apresentam encostas mais suaves. A drenagem apresenta escoamento violento, com formação de corredeiras, lajeados e cachoeiras (CRUZ, 1974, p. 20).

O encontro entre faixas de gnaisses com direção preferencial NNE-SSW e migmatitos de direção geral ENE-WSW e E-W, presente nas escarpas de Caraguatatuba, determina uma zona de fraqueza bem aproveitada pelos rios Pau d'Alho e Anhembu, que formam nesse setor um recôncavo e rebaixam o Planalto. Nessa conjuntura, as escarpas festonam-se, rebaixam-se e os rios correm em linhas de fraturas.

As planícies costeiras caracterizam-se pela presença de depressões úmidas, terraços fluviais e colúvio-aluviais, além de terraços e taludes de detritos coluviais de pé de encosta. São áreas de deposição predominante, com menor dinamização geomorfológica e, em contrapartida, maior ocupação humana, que resulta numa maior incidência de processos antrópicos. De maneira geral, as planícies costeiras do litoral Norte do Estado de São Paulo raramente ultrapassam 70 m de altitude (CRUZ, 1974).

**Figura 2.2:** Perfil topográfico elaborado por meio do MDT, entre os municípios de Natividade da Serra e Caraguatatuba, em São Paulo, perfazendo uma secção da bacia do rio Santo Antônio.



Fonte: Nery (2016).

O município de Caraguatatuba, bem como suas áreas adjacentes, passou a se tornar intenso objeto de estudo após um evento climático ocorrido em 17 e 18 de março de 1967 denominado “A Catástrofe”. Segundo Cruz (1974), o episódio foi decorrente de um conjunto de perturbações atmosféricas caracterizadas por uma elevada taxa de pluviosidade, que resultou em inúmeros deslizamentos em Caraguatatuba (Figura 2.3) e enchentes. Tal anomalia positiva de precipitação acarretou na morte de mais de 120 pessoas, além de grandes prejuízos à infraestrutura e economia local. Cruz (1974) ainda descreve uma grande quantidade de sedimentos mobilizados, bem como o soterramento de 400 casas que resultou em 3 mil pessoas desabrigadas, o desaparecimento de estradas e a mobilização de 30 mil árvores que desceram pelas encostas e morros. O acidente é considerado por uma série de pesquisadores como o maior desastre natural ocorrido em território brasileiro.

**Figura 2.3:** Vista da Serra de Caraguatatuba após movimentos de massa generalizados em março de 1967.

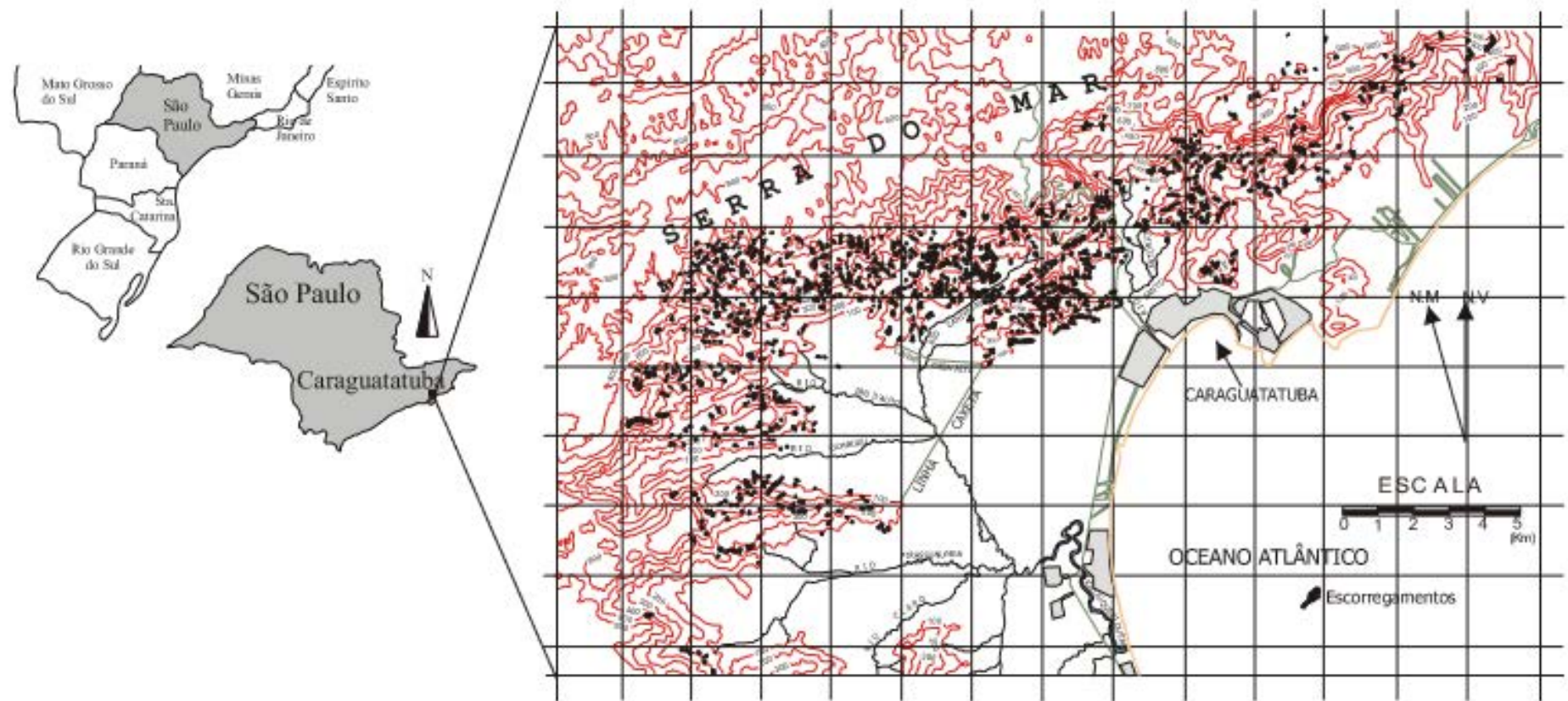


**Fonte:** Gramani (2002).

Os escorregamentos ocorridos na Serra de Caraguatatuba estão intimamente associados aos altos declives das vertentes e anomalias pluviométricas sob a qual tal região encontrou-se submetida em março de 1967. Cruz (1974) descreve que, durante este episódio, as encostas mais atingidas apresentaram declividade acima de 25 graus. Tavares et al. (2004) afirma que o litoral norte apresenta alta variabilidade de precipitação entre os meses de fevereiro e março e destaca que o município de Caraguatatuba, com precipitação média anual de 1784 mm, apresenta uma menor variabilidade em relação aos demais municípios devido a sua posição geográfica mais recuada, que resulta em sombras de chuva. No mês de março de 1967, segundo IPT (1988), foram registrados cerca de 945,6 mm de chuva nos postos pluviométricos localizados na cidade, sendo que 220 mm corresponderam ao dia 17 e 324,8 mm ao dia 18.

O mapa de distribuição de escorregamentos ocorridos no episódio de 1967 (Figura 2.4) registra 760 pontos de deslizamentos concentrados principalmente na cota 600. Dentre os locais mais afetados, destacam-se o vale do Rio Santo Antônio, devido ao maior índice de ocupação humana, e o vale do Casa Alta, em virtude da maior mobilização de massa (GRAMANI,2001).

**Figura 2.4:** Mapa de distribuição de escorregamentos ocorridos no evento de 1967 em Caraguatatuba.



**Fonte:** Gramani (2002). Modificado de Fúlvaro et al., 1976.

### **2.3 As bacias hidrográficas do rio Pau D'Alho e Córrego da Divisa**

Bacias hidrográficas são definidas, segundo Jorge e Uehara (1988), como áreas de drenagem que abrangem o conjunto de cursos d'água que convergem para um determinado rio, sendo limitadas por divisores de água, caracterizados por serem os pontos mais elevados do terreno e que separam bacias adjacentes.

Embora não possua um levantamento em detalhe acerca das suas características geológicas, pedológicas e geomorfológicas, as bacias do rio Pau D'Alho e Córrego da Divisa configuram uma área importante devido a sua associação ao evento de 1967. Tais bacias encontram-se inseridas no município de Caraguatatuba, no litoral norte do estado de São Paulo (Figura 2.5) e, somadas, abrangem uma área de aproximadamente 65 km<sup>2</sup>.

Cruz (1974) descreve que na bacia do Pau D'Alho os baixos níveis, que ocorrem nos montes isolados e baixos esporões, estariam condicionados a direções tectônicas cruzadas (NE-SW e NW-SE) e às ações da erosão diferencial. Os rios em tal área seguem linhas estruturais nítidas, com cotovelos retilíneos e vales apertados e profundos. As drenagens que constituem a área de estudo são a Pau D'Alho, Divisa e Aldeia (Figura 2.6).

As bacias do Pau D'Alho e Córrego da Divisa são representadas, com base nos mapas realizados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), pelas seguintes litologias conforme o Quadro 2.1 e a Figura 2.7:

Figura 2.5: Localização da área de estudo.

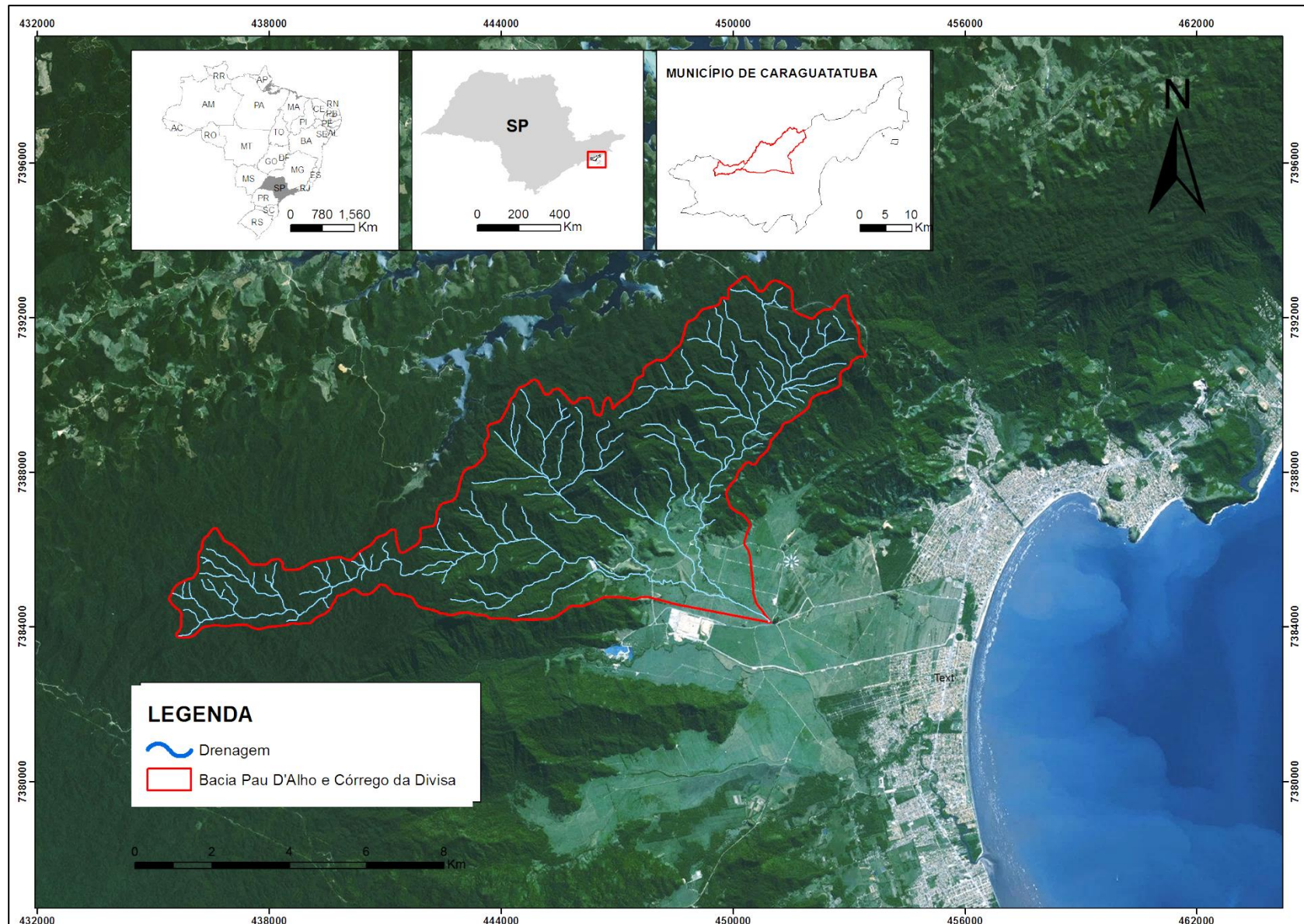
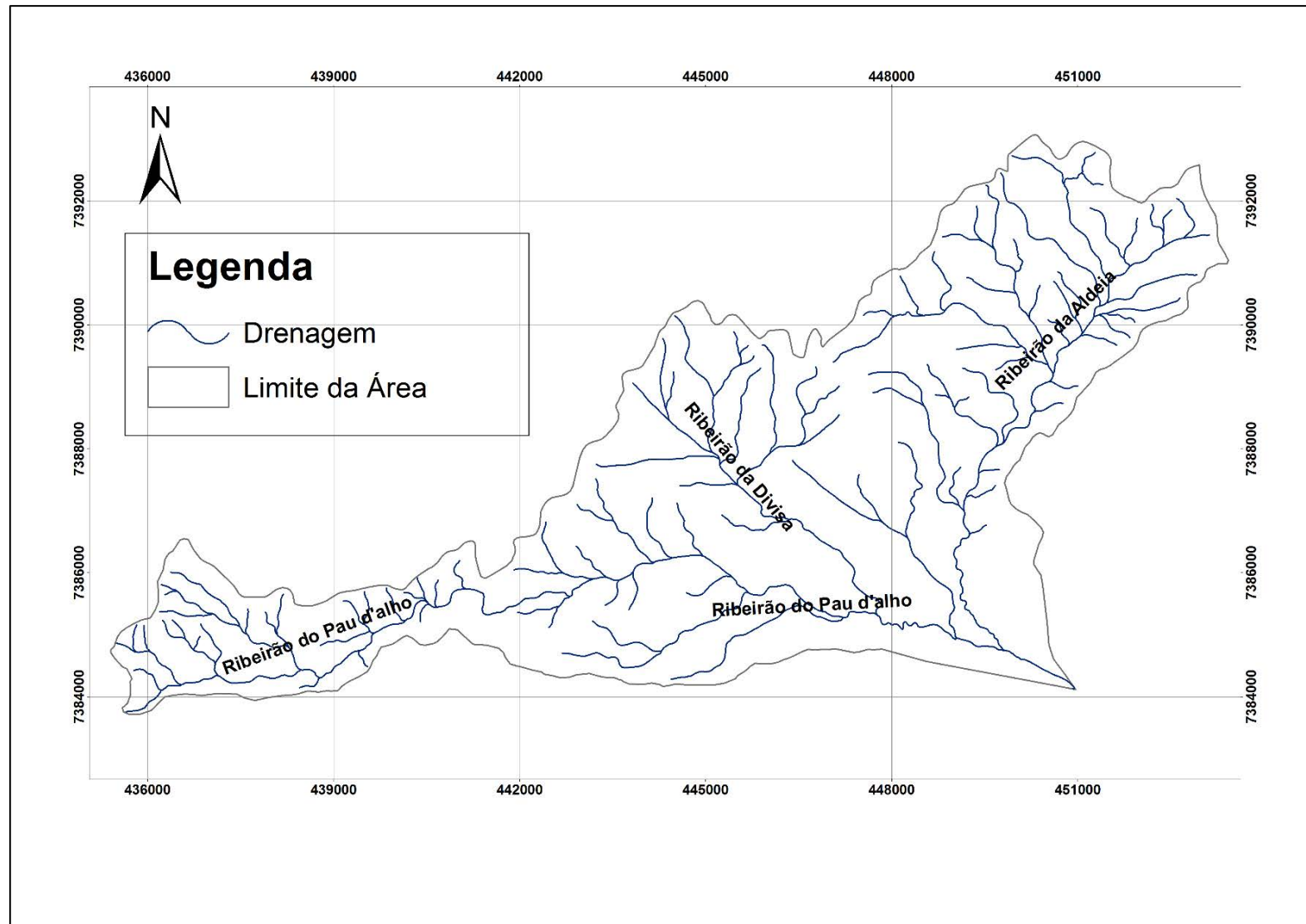


Figura 2.6: Drenagens que constituem a área de estudo.

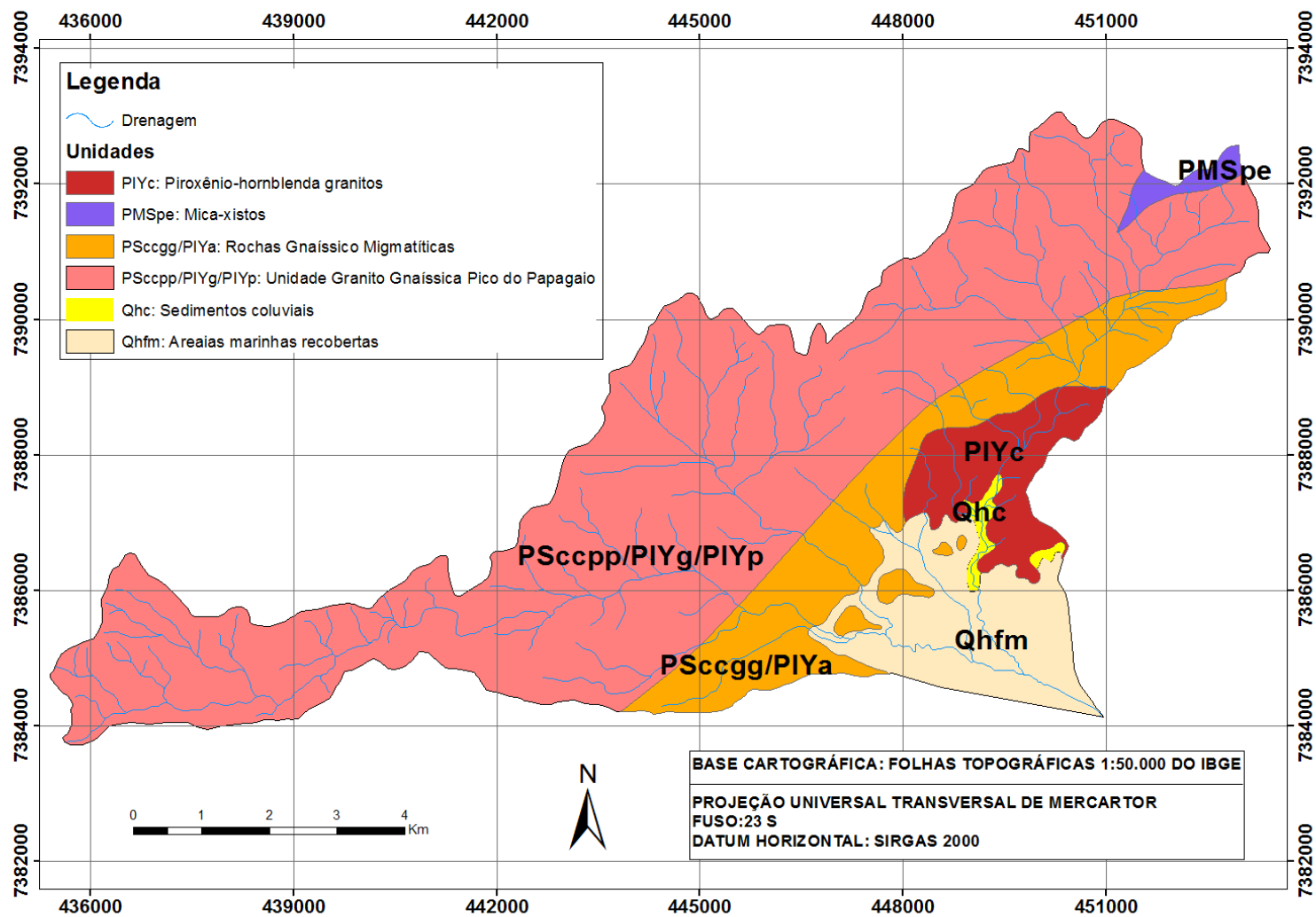


**Quadro 2.1:** Unidades litológicas das bacias Pau D’alho e Córrego da Divisa.

Unidades	Idades	Litologias
Qhc	Cenozóico	Sedimentos coluviais
Qhfm		Areias marinhas recobertas por areias, siltes e argilas de deposição fluvial
PScgg/PIYa	Proterozóico - Granitóides Caraguatatuba	Rochas Gnaíssico Migmatíticas: gnaisses de composição granítica a granodiorítica, biotita gnaisses bandados, biotita hornblenda gnaisses, migmatizados. Associação de augen-gnaisses com biotita granito-gnáissicos de granulação média a fina
Pscpp/PIYg/PIYp		Unidade Granito- Gnaíssica Pico do Papagaio: biotita hornblenda-gnaisse, biotita gnaisse e biotita granito. Biotita granito-gnaisse com texturas glomero-porfiroblásticas. Augen-gnaisses ou migmatitos oftamíticos, com associação subordinada de granitos-gnáissicos.
PIYc		Piroxênio-hornblenda granitos, hornblenda granitos e biotita-granitos, com granulação fina a média e estrutura gnáissica muito frequente, por vezes feldspatizados e com associação de augen-gnaisses
PMSpe	Proterozóico - Complexo Paraibuna	Mica-xistos, portanto, níveis ricos em magnetitas, e quartzitos, com associação de calcofels e tipos gnaissóides

**Fonte:** Elaborado pelo autor com base nos mapas geológicos das Folhas Pico do Papagaio (SF-23-Y-D-V-2) e Folha Caraguatatuba (SF-23-Y-D-VI-1), realizados pela CPRM em 1991 e 1982, respectivamente.

**Figura 2.7:** Mapa litológico das bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa.



Fonte: Adaptado de CPRM (1982;1991).

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A revisão bibliográfica apresentada no capítulo a seguir possui como objetivo principal contextualizar os assuntos que serão abordados ao longo do presente trabalho, configurando um capítulo de extrema importância. Previamente, faz-se necessário esclarecer o termo encosta, ou talude, definido por Augusto e Virgili (1998, p. 243) como “superfícies inclinadas de maciços terrosos, rochosos ou mistos (solo e rocha), originados de processos geológicos e geomorfológicos diversos”. O termo encosta é mais empregado em estudos de caráter regional e, portanto, será o mais utilizado neste trabalho.

Os fundamentos serão tratados em subdivisões, sendo elas movimentos de massa, métodos de previsão aplicados a escorregamentos e modelagem de escorregamentos com *softwares* de simulação 2D.

#### 3.1 Movimentos de massa

A atual morfologia do relevo brasileiro está intimamente associada a processos geomorfológicos, que atuam principalmente nas camadas mais alteradas e superficiais das encostas, denominados movimentos de massa. Para Wolle (1988), tais movimentos compreendem um dos processos erosivos mais importantes na modelagem do relevo na escala de tempo do homem, além de influenciarem na evolução natural das encostas.

Selby (1982) define estes processos geológicos como movimentos descendentes de solo ou material rochoso sob a influência da gravidade que não apresentam contribuição direta de fatores como água e gelo. Entretanto, o autor define que tais fatores estão frequentemente relacionados aos processos gravitacionais de massa por reduzirem a força dos materiais presentes na encosta e contribuírem com o comportamento plástico e fluído do solo.

Castro (2003) afirma que os movimentos de massa são nitidamente sazonais devido a sua ocorrência estar associada a épocas de chuvas intensas e concentradas, que ocorrem geralmente entre os meses de janeiro e março. Ademais, a dinâmica destes

movimentos é complexa, podendo estar relacionada tanto a forças internas quanto externas por meio de agente geológicos, climáticos, antrópicos e biológicos.

Os problemas associados a processos gravitacionais de massa estão presentes em muitos lugares do mundo, entretanto, em países cujo regime pluvial apresenta características de ambiente tropical e cuja a situação socioeconômica seja considerada como de subdesenvolvimento ou em desenvolvimento, os problemas tendem a se intensificar devido à falta de estrutura para evitar ou controlar tal fenômeno (GUERRA,1994).

### 3.1.1 Classificação dos movimentos de massa

Segundo Lopes (2006), a classificação dos movimentos de massa ainda não se encontra bem definida devido à complexidade dos processos envolvidos, a multiplicidade de ambientes de ocorrência e os diferentes enfoques dados por profissionais de acordo com sua área de atuação (geólogos, engenheiros, geógrafos, entre outros). Desse modo, existem inúmeras classificações de movimentos de massa baseadas na cinemática do movimento, tipo de material envolvido e tipo de geometria.

Os principais sistemas classificatórios de movimentos de massa foram compilados no trabalho de Selby (1982). De acordo com o autor, Sharpe (1938) foi o primeiro a apresentar uma breve classificação dos movimentos de massa, baseada na natureza e velocidade do movimento, tipo de material e quantidade de água e gelo atuantes no processo.

De alguma maneira as classificações posteriores foram influenciadas por Sharpe (1938). Surgiram classificações internacionais como as propostas por Varnes (1938, 1975), Hutchinson (1968), Nemcok et. al. (1972) e nacionais, tais como Guidicini e Nieble (1964), IPT (1991) e Augusto Filho (1992).

A classificação proposta por Varnes (1978) é a mais utilizada internacionalmente (adotada pela International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG)) e baseia-se no tipo de movimento e material transportado (Quadro 3.1).

**Quadro 3.1:** Classificação dos movimentos de massa segundo Varnes (1978).

TIPO DE MOVIMENTO			TIPO DE MATERIAL		
			ROCHA	SOLOS DE ENGENHARIA	
				GROSSEIROS	FINOS
Quedas ( <i>falls</i> )			Queda de rocha	Queda de detritos	Queda de terra
Tombamentos ( <i>topple</i> )			Tombamento de rocha	Tombamento de detritos	Tombamento de terra
Escorregamento ( <i>slide</i> )	Rotacional	Poucas unidades	Escorregamentos de rocha	Escorregamento de detritos	Escorregamentos de terra
	Translacional	Muitas unidades			
Expansões laterais ( <i>lateral spread</i> )			Expansões de rocha	Expansões de detritos	Expansões de terra
Corridas ( <i>flow</i> )			Corridas de rocha (rastejo profundo)	Corridas de detritos	Corridas de solo
				(Rastejo de solo)	
Complexos ( <i>complex</i> )			Combinação de dois ou mais dos principais tipos de movimentos		

**Fonte:** Varnes (1978).

A maioria das classificações apresenta aplicabilidade regional e baseia-se nas condições geológicas e climáticas locais. Augusto Filho (1992) adequou a proposta de Varnes (1978) e a aplicou de acordo com a dinâmica ambiental brasileira, classificando os movimentos de massa de acordo com o material constituinte, a velocidade de deslocamento, bem como a sua respectiva geometria. Tal classificação, adotada no

presente trabalho, divide os movimentos de massa em rastejos, quedas, escorregamentos e corridas, como exemplificado no Quadro 3.2.

#### 3.1.1.1 Rastejos (*creep*)

Gerscovich (2002) define rastejos como movimentos lentos e contínuos, sem superfície de ruptura bem definida e que podem englobar grandes áreas, sem que haja uma diferenciação clara entre a massa em movimento e a região estável. As causas do movimento estão associadas a variação da temperatura e a umidade, cujo processo de expansão e contração resultam no deslocamento do material.

Massad (2010) ressalta que na Serra do Mar os rastejos são detectáveis pelas árvores inclinadas na direção do talude. Além disso, um rastejo, com o tempo, pode evoluir para um escorregamento verdadeiro.

#### 3.1.1.2 Escorregamentos (*slides*)

O termo escorregamento, também denominado de deslizamento, é definido por Guidicini e Nieble (1984) e IPT (1991) como movimentos rápidos (m/h a m/s) cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora de um talude, de curta duração e com limites laterais e profundidades bem definidos. O material envolvido pode ser constituído por solos, solo e rocha, somente rocha, ou até por mesmo depósitos de lixo (FERNANDES; AMARAL, 1996). Gerscovich (2002) ressalta que a deflagração do movimento ocorre quando as tensões cisalhantes mobilizadas na massa do solo atingem a resistência ao cisalhamento do material.

##### 3.1.1.2.1 Classificação dos escorregamentos

A classificação dos escorregamentos é baseada de acordo com a geometria do plano de ruptura, que subdivide os escorregamentos em translacionais (planares), rotacionais (circulares) e em cunha.

**Quadro 3.2:** Principais tipos de movimentos de massa.

PROCESSOS	DINÂMICA / GEOMETRIA / MATERIAL
Rastejo ( <i>creep</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Vários planos de deslocamento (intenso)</li> <li>▪ Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade</li> <li>▪ Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes</li> <li>▪ Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada</li> <li>▪ Geometria indefinida</li> </ul>
Escorregamentos ( <i>slides</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Poucos planos de deslocamento (externos)</li> <li>▪ Velocidades médias (m/h) a altas (m/s)</li> <li>▪ Pequenos a grandes volumes de material</li> <li>▪ Geometria e materiais variáveis</li> <li>▪ Planares – solos poucos espessos, solos e rochas com 1 plano de fraqueza</li> <li>▪ Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas</li> <li>▪ Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza</li> </ul>
Quedas ( <i>falls</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Sem planos de deslocamento</li> <li>▪ Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado</li> <li>▪ Velocidades muito altas (vários m/s)</li> <li>▪ Material rochoso</li> <li>▪ Pequenos a médio volumes</li> <li>▪ Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc</li> <li>▪ Rolamento de matacão</li> <li>▪ Tombamento</li> </ul>
Corridas ( <i>flows</i> )	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Muitas superfícies de deslocamento</li> <li>▪ Movimento semelhante ao de um líquido viscoso</li> <li>▪ Desenvolvimento ao longo das drenagens</li> <li>▪ Velocidades médias a altas</li> <li>▪ Mobilização de solo, rocha, detritos e água</li> <li>▪ Grandes volumes de material</li> <li>▪ Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas</li> </ul>

**Fonte:** Augusto Filho (1992).

Os escorregamentos translacionais ou planares (Figura 3.1) são movimentos muito comuns na dinâmica das encostas serranas brasileiras, ocorrendo principalmente em encostas com altas declividades e solos pouco desenvolvidos (IPT, 2007). De acordo com Fernandes e Amaral (1996), tal tipo de escorregamento ocorre em superfícies rasas e apresenta superfície de ruptura planar que acompanha, de modo geral, descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas existentes no interior do material. Os escorregamentos translacionais são, em geral, compridos e rasos e apresentam plano de ruptura com profundidades que variam entre 0,5 a 2,0 m (GUERRA; CUNHA, 2000). Estes movimentos também podem estar associados a solos saprolíticos, saprólitos e rocha, condicionados por um plano de fraqueza associado a estruturas geológicas como foliação, xistosidade, falhas, fraturas, entre outros (IPT, 2007).

Em relação a Serra do Mar, Wolle e Carvalho (1994), indicam que este movimento ocorre sobre o horizonte coluvionar superficial e o horizonte de solo saprolítico (residual), apresentando espessuras que variam de um metro até poucos metros. Dias (2002) ressalta que os escorregamentos translacionais costumam ser deflagrados durante eventos de chuvas intensas, que ocasionam o aumento da poro –pressão do solo. Tal fator ocorre quando a taxa de infiltração se torna superior à taxa de retirada de água do interior da massa da encosta.

Os escorregamentos rotacionais ou circulares (Figura 3.2) ocorrem em superfícies de ruptura curvas e apresentam um raio de alcance relativamente menor que os escorregamentos translacionais. Encontram-se associados a aterros, pacotes de solo ou depósitos mais espessos, rochas sedimentares ou cristalinas ou intensamente fraturadas (IPT, 2007). Conforme Gerscovich (2002), escorregamentos rotacionais são classificados como múltiplos quando mobilizam simultaneamente mais de uma superfície de ruptura.

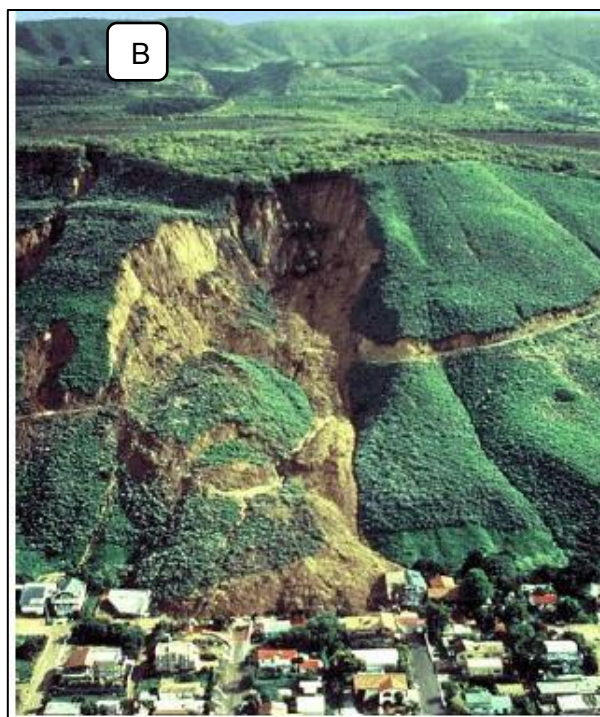
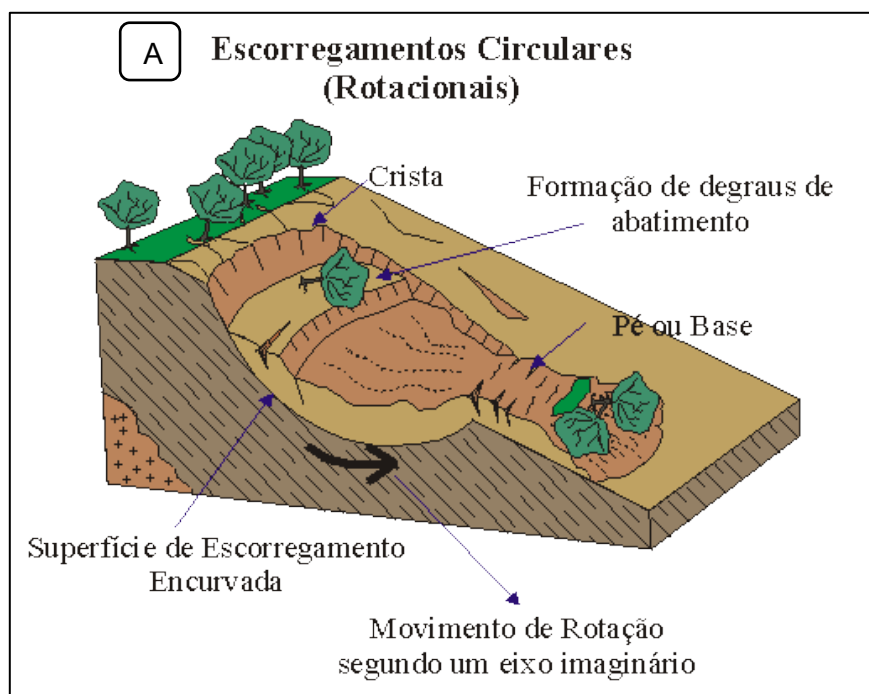
Os escorregamentos em cunha (Figura 3.3) ocorrem quando as camadas menos resistentes não são paralelas à superfície do talude ou quando os planos de fraqueza se cruzam, configurando uma superfície de ruptura em forma de cunha (GERSCOVICH, 2002). Estes processos estão associados a saprólitos e maciços rochosos, sendo frequente em taludes de corte ou encostas que foram submetidas a algum processo natural de desconfinamento, como erosão ou deslizamentos anteriores (IPT, 2007).

**Figura 3.1:** A) Esquema de um escorregamento planar. B) Escorregamento planar ocorrido na praia do Bananal, Ilha Grande em 2010.



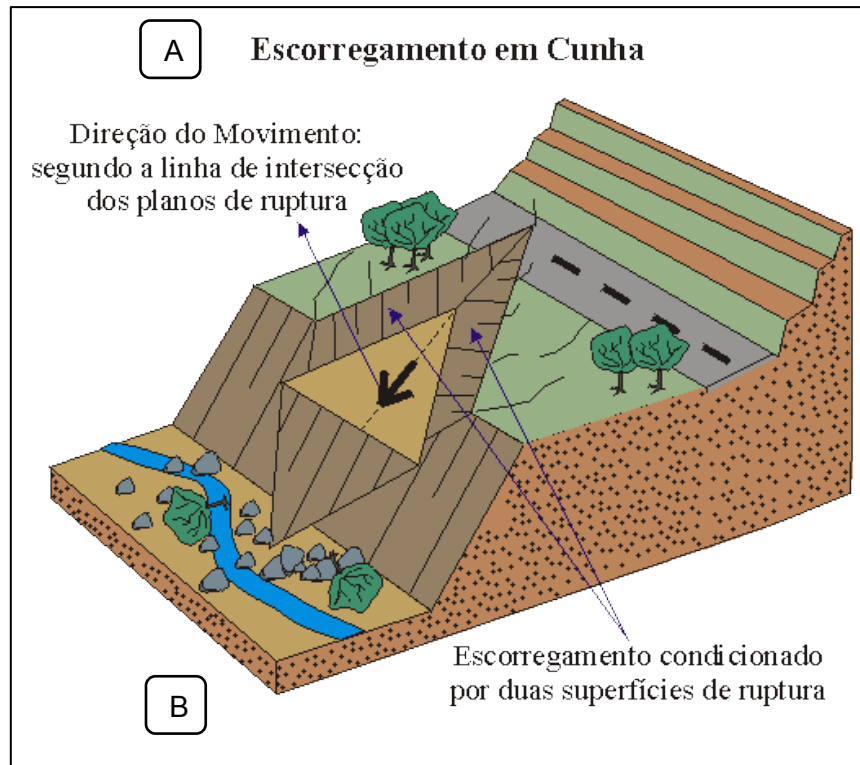
**Fonte:** A) Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998); modificada por Reis (2001). B) Disponível em [aquafluxus.com.br/quando-a-terra-vem-abaixo](http://aquafluxus.com.br/quando-a-terra-vem-abaixo).

**Figura 3.2:** A) Esquema de um escorregamento rotacional. B) Escorregamento ocorrido em 1995, em La Conchita, Califórnia (EUA).



**Fonte:** A) Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998); modificada por Reis (2001). B) Disponível em [geohazards.cr.usgs.gov](http://geohazards.cr.usgs.gov).

**Figura 3.3:** A) Esquema de um escorregamento em cunha. B) Escorregamento real em cunha.



**Fonte:** A) Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998); modificada por Reis (2001). B) Montgomery (1992).

### 3.1.1.2.2 Fatores condicionantes dos escorregamentos

Compreender os fatores que atuam na deflagração dos escorregamentos é fundamental para a adoção de medidas preventivas ou corretivas que, de modo geral, auxiliam na dinâmica socioeconômica de regiões sujeitas a estes movimentos. Varnes (1978) classifica os principais condicionantes e mecanismos desencadeadores dos escorregamentos em fatores que aumentam as solicitações e os que diminuem a resistência dos terrenos, ambos associados a processos naturais e antrópicos (Quadro 3.3).

**Quadro 3.3:** Classificação dos movimentos de encosta segundo Varnes (1978).

AÇÃO	FATORES	FENÔMENOS GEOLÓGICOS/ ANTRÓPICOS
AUMENTO DA SOLICITAÇÃO	Remoção da massa (lateral ou da base)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Erosão, escorregamentos</li> <li>▪ Cortes</li> </ul>
	Sobrecarga	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Peso da água de chuva, neve, granizo, etc.</li> <li>▪ Acúmulo natural de material (depósitos)</li> <li>▪ Peso da vegetação</li> <li>▪ Construção de estruturas, aterros, etc.</li> </ul>
	Solicitações dinâmicas	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Terremotos, ondas, vulcões, etc.</li> <li>▪ Explosões, tráfego, sismos induzidos</li> </ul>
	Pressões laterais	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Águas em trincas, congelamento, material expansivo</li> </ul>
REDUÇÃO DA RESISTÊNCIA	Características inerentes ao material (geometria, estruturas, etc.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Características geomecânicas do material, tensões</li> </ul>
	Mudança de fatores variáveis	<ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Intemperismo: redução na coesão, ângulo de atrito</li> <li>▪ Elevação do nível d'água</li> </ul>

**Fonte:** Varnes (1978).

Outra proposta, descrita por Lopes (2006), agrupa os condicionantes associados a deflagração de escorregamentos em seis fatores geoambientais fundamentais: geologia, pedologia, clima, geomorfologia, cobertura vegetal e ações antrópicas.

### Geologia

Os fatores geológicos englobam os aspectos mineralógicos, tectônicos e hidrogeológicos que influenciam diretamente nas propriedades mecânicas, grau de intemperismo e propriedades físico-químicas das diferentes litologias (WOLLE, 1988). Kanji (1972), citado por Lopes (2006, p.45), define estes aspectos da seguinte forma:

- Mineralógicos: influenciados pela litologia da matriz, tais como resistência, alterabilidade, erodibilidade e anisotropia (bandamento, estratificação, entre outros).
- Tectônicos: influenciados pelo movimento da crosta, como falhas, xistosidade, diaclases, entre outros, geralmente preservados no solo saprolítico;
- Hidrogeológicos: influenciados pela presença de água nos maciços, tais como surgimento de pressões neutras, diminuição da resistência do material e ocorrência de forças de percolação.

### Pedologia

A evolução pedológica, em regiões submetidas a climas tropicais úmidos como a Serra do Mar, é intensa devido a atuação de agentes químicos, físicos e biológicos. Tal tipo de clima impõe características próprias aos processos de intemperismo, configurando mantos de cobertura superficial de grandes espessuras, com a formação de zonas de diferentes permeabilidades e resistências que estão diretamente relacionadas a mecanismos de escorregamentos. Além disso, uma série de parâmetros e propriedades do solo influenciam, direta ou indiretamente, na suscetibilidade aos movimentos de massa, tais como peso específico, porosidade, índice de vazios,

granulometria, mineralogia, permeabilidade, entre outros (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998).

Os solos residuais, associados ao clima tropical úmido, estão principalmente sob influência do intemperismo químico e apresentam, quase sempre, espessura da ordem de dezenas de metros. Os perfis de alteração típicos de ambientes tropicais exibem uma sucessão de camadas definidas como horizontes do solo, que são distinguidas pela textura, cor, estruturas presentes e consistência. Um perfil de intemperismo, bem como os seus respectivos horizontes, é representado pela Figura 3.4. Cada horizonte encontrado no perfil de solo configura determinadas características físicas, químicas e pedológicas. Nesse sentido, segundo Augusto Filho e Virgili (1998), para cada horizonte é possível notar as seguintes propriedades:

**Figura 3.4:** Perfil de alteração e seus respectivos horizontes de solo.



Fonte: Ribeiro (2011).

- Horizonte A: ou horizonte de solo orgânico. Contém matéria orgânica além de areia, silte e argila em diferentes proporções. Apresenta, em geral, pequena espessura.
- Horizonte B: ou horizonte laterítico. Formado tanto por solos residuais ou transportados. O material é constituído, em geral, por quartzo, argilas

essencialmente cauliniticas, óxidos de ferro e alumínios hidratados. Apresenta predominantemente colorações avermelhadas e amareladas. Cabe frisar que os horizontes A e B compõem o solo superficial.

- Horizonte C: ou horizonte de solo saprolítico. Definido como a camada de solo mais profunda, onde é possível observar feições estruturais da rocha de origem. Os minerais mais comuns são o quartzo, a caulinita e a mica. Pode conter até 10% de blocos de rocha.
- Rocha alterada: composto por minerais que apresentam um certo estágio de alteração quando comparados a rocha sã. Tal alteração é mais intensa ao longo de juntas e fraturas do maciço.
- Rocha sã: corresponde a rocha sã, cujos minerais apresentam-se com brilho e sem sinais evidentes de alteração.

Cabe ressaltar o comportamento de solos transportados, tais como os depósitos detríticos de encosta denominados coluviões e talús. Estes tipos de depósitos encontram-se acima da rocha sã, associados a descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas ao longo deste contato, favorecendo a geração de fluxos d'água superficiais com forte componente lateral (GUERRA e CUNHA, 2000). Augusto Filho e Virgili (1998) afirmam que:

Os coluviões são depósitos de materiais inconsolidados, normalmente encontrados recobrimo encostas íngremes, formados pela ação da água e principalmente da gravidade. [...] compostos por misturas de solo e blocos de rochas pequenos (15-20 cm) sendo normalmente encontrados recobrimo encostas serranas, como a Serra do Mar. Estes materiais tem como característica importante sua baixa resistência ao cisalhamento, podendo apresentar movimentos lentos, como o rastejo (*creep*) e sendo, frequentemente, envolvidos pela maioria dos escorregamentos das encostas dessas regiões (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998, p. 248).


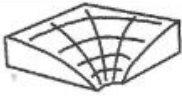
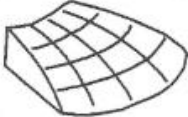
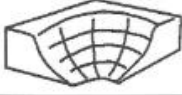
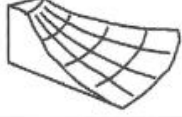
Os depósitos de talús ocorrem de forma localizada e ocupam os sopés das encostas de relevo acidentados como serras e escarpas. São formados em geral por blocos de rocha de variados tamanhos, arredondados e envolvidos ou não por matriz areno-silto-arenosa (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998). Massad (2010) descreve que os talús encontram-se, em geral, saturados e estão submetidos a escorregamentos devido à ação conjunta da gravidade e das pressões neutras.

## Geomorfologia

Os escorregamentos, principalmente os translacionais, encontram-se fortemente associados a parâmetros geomorfológicos, tais como as formas de vertentes e o grau de declividade. Augusto Filho e Virgili (1998) definiram vertentes como superfícies inclinadas, não-horizontais que configuram uma conexão dinâmica entre a linha divisora de águas e o fundo do vale. Os escoamentos superficiais e sub-superficiais da água, bem como os transportes de sedimentos, ocorrem em tais feições do relevo.

As vertentes, ou encostas/taludes, podem ser classificadas em retilíneas, convexas e côncavas (Quadro 3.4). Segundo Dietrich et al. (1986), as encostas retilíneas tendem a ser mais suscetíveis a escorregamentos translacionais que as encostas convexas devido a suas maiores declividades. Os perfis côncavos possuem, em geral, maior espessura de solo por serem zonas de convergência de fluxo de água e apresentam grande volume de material a ser mobilizado, configurando uma superfície de ruptura mais profunda.

**Quadro 3.4:** Respostas geodinâmica de encostas de acordo com a forma do talude.

TIPO DE TALUDE	SUPERFÍCIE	CONDIÇÃO DA ENCOSTA COM RELAÇÃO À ÁGUA SUPERFICIAL
	Plana	-
	Convexa	Coletora
		Difusora
	Côncava	Coletora
		Difusora

Fonte: Gerscovich (2002) modificado de Troeh (1965).

## Clima

O clima configura um papel essencial na deflagração dos escorregamentos, cuja atuação se dá de forma antecedente, como preparador potencial de instabilização de encostas, e de forma imediata e deflagratória, geralmente associado a chuvas intensas. O principal agente preparatório associado a regiões de clima tropical úmido, como a Serra do Mar, é definido pelo intemperismo, tanto químico quanto biológico, em razão da alta taxa de pluviosidade e de altas temperaturas sob qual tal região encontra-se submetida. (LOPES, 2006).

O Brasil apresenta grande concentração de processos de escorregamento em períodos chuvosos, que variam de região para região, configurando a chuva o agente não-antrópico principal no âmbito da deflagração de escorregamentos. Guidicini e Nieble (1976) descrevem que:

Durante o verão, as frentes frias que se originam na região polar antártica cruzam o Oceano Atlântico Sul, num ritmo cíclico de cerca de uma frente por semana. Ao se depararem com as massas de ar quentes tropicais, ao longo da costa sudeste brasileira, tais frentes geram fenômenos de instabilidade atmosférica intensos, consistindo em fortes chuvas e tempestades. Tais chuvas acarretam, com certa frequência, inundações, erosão intensa e escorregamentos, não raros e de caráter catastrófico (GUIDICINI; NIEBLE, 1976, p. 2).

A infiltração das águas das chuvas pode contribuir com a elevação das pressões neutras, de maneira que a resistência do solo se torna reduzida, e com o amolecimento do solo, através da diminuição dos parâmetros de resistência como a coesão aparente (MASSAD, 2010). Augusto Filho (1993) descreve que as chuvas contribuem diretamente para as instabilizações de encosta através dos seguintes mecanismos:

- Elevação do nível d'água e geração de forças de percolação;
- Geração de pressões hidrostáticas devido ao preenchimento temporário de fendas, trincas e/ou estruturas de solos saprolíticos e rochas (fraturas, juntas, etc.);
- Perda de coesão aparente devido a formação de “frentes de saturação”, que reduzem a resistência dos solos.

O trabalho pioneiro, em nível nacional, que estabeleceu uma correlação entre os índices pluviométricos e os escorregamentos foi desenvolvido por Guidicini e Nieble (1976). As análises obtidas por tal trabalho permitiram observar que eventos pluviométricos superiores a 20% da média anual são indicativos de alta possibilidade de deflagração de escorregamentos significativos.

### Cobertura vegetal

A cobertura vegetal desempenha uma importante função na proteção do solo e na estabilização das encostas. Massad (2010) ressalta que a vegetação é responsável pela absorção de parte das águas da chuva, facilitando o escoamento destas águas, e pelo aumento da resistência ao cisalhamento dos solos devido ao reforço que suas raízes implicam. Gray e Leiser (1882) citados por Augusto Filho e Virgili (1998, p. 252) acrescentam que as coberturas vegetais auxiliam na redistribuição de água proveniente das chuvas, onde as copas das árvores impedem o impacto direto da chuva na superfície e retardam a quantidade efetiva de água que infiltra no solo. A matéria orgânica depositada sobre a encosta, promovida pela vegetação, absorve parte da água precipitada e protege o talude dos efeitos de erosão superficial.

Entretanto, Gray e Leiser (1982) citados por Augusto Filho e Virgili (1998, p. 252) ainda descrevem fatores desfavoráveis causados pela presença da vegetação, abordados como:

- Efeito cunha: pressão lateral promovida pelas raízes ao penetrar fissuras, fendas e canais do solo ou rocha;
- Efeito alavanca: ocorre quando as copas das árvores são atingidas por ventos, resultando em uma força cisalhante provocada pelos troncos das árvores do terreno e transferida para a encosta;
- Sobrecarga vertical: efeito causado pelo peso das árvores. Pode apresentar um efeito positivo ou negativo na estabilidade das encostas, em razão da inclinação das vertentes e das características do solo.

### Ação Antrópica

A dinâmica natural das encostas vem sendo drasticamente interferida pelo homem através dos avanços do uso e ocupação do solo em áreas naturalmente suscetíveis a movimentos gravitacionais de massa. Tal fator classifica a ação antrópica como o principal agente indutor na deflagração dos movimentos de massa, que aceleram e ampliam os processos de instabilização.

Dentre as principais interferências antrópicas indutoras de escorregamentos, propostas por Augusto Filho e Virgili (1998), encontram-se: a remoção da cobertura vegetal; o lançamento e concentração de águas servidas; o vazamento na rede de abastecimento, esgoto e presença de fossas; a execução de cortes com geometria inadequada (altura e inclinação); a execução deficiente de aterros (compactação, geometria, fundação); o lançamento de entulho nas encostas e vibrações produzidas por tráfego pesados, explosões, etc.

#### *3.1.1.3 Quedas (falls)*

São movimentos rápidos de blocos e/ou lascas de rocha que caem encosta abaixo devido a ação da gravidade, na forma de queda livre, e não apresentam uma superfície de deslizamento (GUIDICINI; NIEBLE, 1984). Massad (2010) ressalta que tais movimentos estão associados a chuvas intensas e prolongadas, que causam erosão e solapamento do material junto às suas bases. Tal tipo de movimento também pode estar relacionado a atividades antrópicas, através da execução de cortes e escavações de forma inadequada.

As quedas contribuem para a formação de talús e ocorrem, em geral, em encostas íngremes de paredões rochosos. Este tipo de movimento é favorecido pela presença de descontinuidades da rocha, como fraturas e bandamentos composicionais, e pelo avanço do intemperismo físico e químico (GUERRA; CUNHA, 2000).

#### 3.1.1.4 *Corridas (flows)*

As corridas são definidas como movimentos gravitacionais de massa rápidos nos quais os materiais envolvidos se comportam como fluidos altamente viscosos (GUERRA; CUNHA, 2000). IPT (2007) descreve que tais movimentos estão associados a eventos pluviométricos excepcionais e ocorrem a partir de deslizamento nas encostas, mobilizando grandes volumes de material. Estes fenômenos provocam consequências extremamente preocupantes, visto que apresentam extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas, e um alto poder destrutivo, que pode afetar drasticamente zonas urbanas ou a própria natureza.

### **3.2 Métodos de previsão aplicados a escorregamentos**

A previsão de escorregamentos permite a elaboração de projetos de contenção, bem como o desenvolvimento de medidas que reduzirão as consequências associadas a estes processos, evitando a ampliação de acidentes que podem causar danos imensuráveis a uma determinada região. Tal previsão pode ser desenvolvida através de estudos detalhados que visam as características, a frequência e as magnitudes dos escorregamentos associados a uma área geográfica. A qualidade da descrição e da caracterização dos condicionantes dos escorregamentos pretéritos, bem como a análise de risco de movimentos futuros, são fatores essenciais que auxiliam na elaboração dos métodos de previsão (GUERRA; CUNHA, 2000)

Dentre as ferramentas que contribuem na previsão da ocorrência de escorregamentos em áreas instáveis, destacam-se os mapas de suscetibilidade. Segundo IPT (2007, p. 26), o termo suscetibilidade indica “a potencialidade de ocorrência de processos naturais e induzidos em uma área, expressando-se segundo classe de probabilidade de ocorrência”. Os mapas de suscetibilidade configuram instrumentos técnico-científicos que apresentam como objetivo básico a delimitação de zonas homogêneas quanto a tipologia, suscetibilidade e raio de alcance dos movimentos de massa numa determinada região, considerando as inter-relações entre a dinâmica destes processos e as diversas forma de uso e ocupação do solo (AUGUSTO FILHO, 1993). Um

recurso que auxilia na elaboração destes mapas consiste no uso do Sistemas de Informação Geográfica (SIG) que, segundo Antenucci et al. (1991), compõe um sistema de *hardware*, *software* e procedimentos, projetado para auxiliar na captura, gerenciamento, manipulação e análise de dados, referenciados espacialmente.

O crescente uso deste sistema está vinculado à necessidade de rápida avaliação de áreas instáveis em determinadas regiões e à ausência de dados, devido ao alto custo de medições de parâmetros, bem como o difícil acesso à área de estudo e disponibilidade de dados não confiáveis.

Os métodos de análise de estabilidade, ou modelos, segundo Augusto Filho e Virgili (1998), consistem em um conjunto de procedimentos que visam a determinação de um índice ou de uma grandeza que permita quantificar o quão próximo da ruptura uma determinada encosta se encontra, de acordo com uma série de condicionantes como pressões neutras, sobrecarga, geometria, etc. Nesse contexto, Lopes (2006) descreve que a utilização de modelos em estudos geoambientais tornou-se cada vez mais frequente, principalmente com o auxílio do SIG, devido a possibilidade de modelar a paisagem natural, bem como prever alterações futuras no ecossistema. Rennó (2003) definiu os modelos como um sistema de equações e procedimentos integrado por variáveis e parâmetros. Os parâmetros apresentam os mesmos valores durante o processo estudado, enquanto as variáveis podem mudar ao longo da execução do modelo. A relação entre os diversos tipos de modelos e as suas respectivas características são expostas no Quadro 3.5, com base em Rennó (2003).

A seleção de um modelo é feita a partir da disponibilidade de dados e nos objetivos que se pretende alcançar em um determinado trabalho. Desse modo, a escolha do modelo determinístico apresentou-se bastante vantajosa no presente trabalho. Tal modelo pode ser aplicado, por exemplo, em bacias hidrográficas ou em pequenas áreas por incluir especificamente os processos físicos que desencadeiam e envolvem a ruptura de uma encosta. Esses modelos envolvem dados como espessura do solo, resistência (ângulo de atrito interno e coesão), declividade de encosta, entre outros (NERY, 2011).

**Quadro 3.5:** Aspectos relacionados à classificação de modelos.

Classificação (em função das)	Tipos	Características
Variáveis utilizadas	Estocásticos	Quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório.
	Determinísticos	Quando os conceitos de probabilidade não são considerados durante elaboração do modelo. Cada valor de entrada produz um único valor de saída, mesmo que a variável de entrada seja aleatória.
Relações entre as variáveis	Empíricos	Fazem uso de relações baseadas em observações. São simples e úteis no dia a dia, pouco robustos e adaptados a cada região. Normalmente, não permitem mudanças nas condições para as quais foram elaborados.
	Baseados em processos	São mais complexos que os empíricos. Procuram descrever todos os processos que envolvem determinado fenômeno estudado. Faz uso de modelos detalhados e multivariados, que geralmente requerem um bom conjunto de informações e uma parametrização cuidadosa antes que eles possam ser executados. São divididos em modelos conceituais (fazem uso de equações empíricas – são semi-empíricos, mas que descrevem o sistema segundo as leis da física) e físicos (utilizam equações diferenciais do sistema físico na representação dos processos – seus parâmetros possuem um significado físico e, portanto, podem ser estimados através de medidas reais.
Representações dos dados	Discretos	Apesar dos fenômenos naturais variarem continuamente no tempo, na maioria das vezes, estes fenômenos são representados por modelos discretos (um único intervalo de tempo).
	Contínuos	Quando o fenômeno é representado por diversos intervalos de tempo. Quanto menor o intervalo, maior a precisão dos resultados e maior custo computacional.
Existência ou não de relações espaciais	Pontuais	Considera-se que todas as variáveis de entrada e de saída são representativas de toda área estudada. Normalmente, alguma discretização do espaço é feita para representar uma área homogênea.
	Distribuídos	Consideram a variabilidade espacial encontrada nas diversas variáveis do modelo. Modelos mais realísticos consideram também a existência de relação espacial entre elementos vizinhos (relação topológica).
Existência de dependência temporal	Estáticos	Quando um conjunto de dados de entrada produz um resultado oriundo da solução das equações do modelo em um único passo.
	Dinâmicos	Quando utilizam o resultado de uma interação como entrada para a próxima interação.

Fonte: Lopes (2006), adaptado de Rennó (2003).

A estabilidade de encosta é calculada por um coeficiente ou fator de segurança (FS), que é obtido pelo quociente entre a resistência do terreno (tensão cisalhante) e as forças motoras (tensão normal) ao longo da superfície de movimentação (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998). Segundo Carvalho (1991), em uma ruptura translacional, os valores de coeficiente de segurança (CS) e suas respectivas condições de estabilidade podem indicar:

- $CS < 1,0$ : talude instável. Caso o talude venha a ser implantado (corte ou aterro) nestas condições, deverá sofrer ruptura.
- $CS = 1,0$ : condição limite de estabilidade associada à iminência de ruptura.
- $CS > 1,0$  (pouco maior): condição estável. Quanto mais próximo de 1,0 for, mais frágil e precária será a condição de estabilidade de talude.
- $CS \gg 1,0$  (muito maior): condição estável. Quanto maior for o CS, menores serão as possibilidades de ruptura no talude.

Dentre as desvantagens que o modelo determinístico inclui, encontram-se a aplicabilidade em pequenas áreas e os valores atribuídos para o fator de segurança (FS) absolutos, que não permitem um teor probabilístico para a realização de mapas de suscetibilidade (VAN WESTEN, 1993; FERNANDES et al., 2001).

### **3.3 Modelagem de escorregamentos com softwares de simulação 2D**

Os modelos matemáticos determinísticos, tais como o TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-Stability Model*), o SINMAP (*Stability Index Mapping*) e o SHALSTAB (*Shallow Landslide Stability Analysis*), podem ser aplicados na previsão de escorregamentos translacionais rasos. Tais modelos combinam modelos de estabilidade de encosta com modelos hidrológicos, que possibilitam a definição de zonas suscetíveis a tal tipo de escorregamento.

O modelo TRIGRS foi desenvolvido por Baum et al. (2002) com o propósito de calcular a variação do fator de segurança (FS) em diferentes profundidades, conforme mudanças de carga de pressão ao longo de um evento pluviométrico. Os parâmetros de

entrada utilizados nesse modelo consistem na intensidade da precipitação, a declividade, a profundidade do solo, a coesão efetiva, o ângulo de atrito interno, entre outros.

O modelo SINMAP, desenvolvido por Pack et al. (1998), prevê áreas instáveis por meio de fatores topográficos, características dos solos e a altura da precipitação. Os parâmetros do modelo envolvem ângulo de atrito do solo, a relação entre a transmissividade do solo e a precipitação (T/R) e a coesão adimensional do solo.

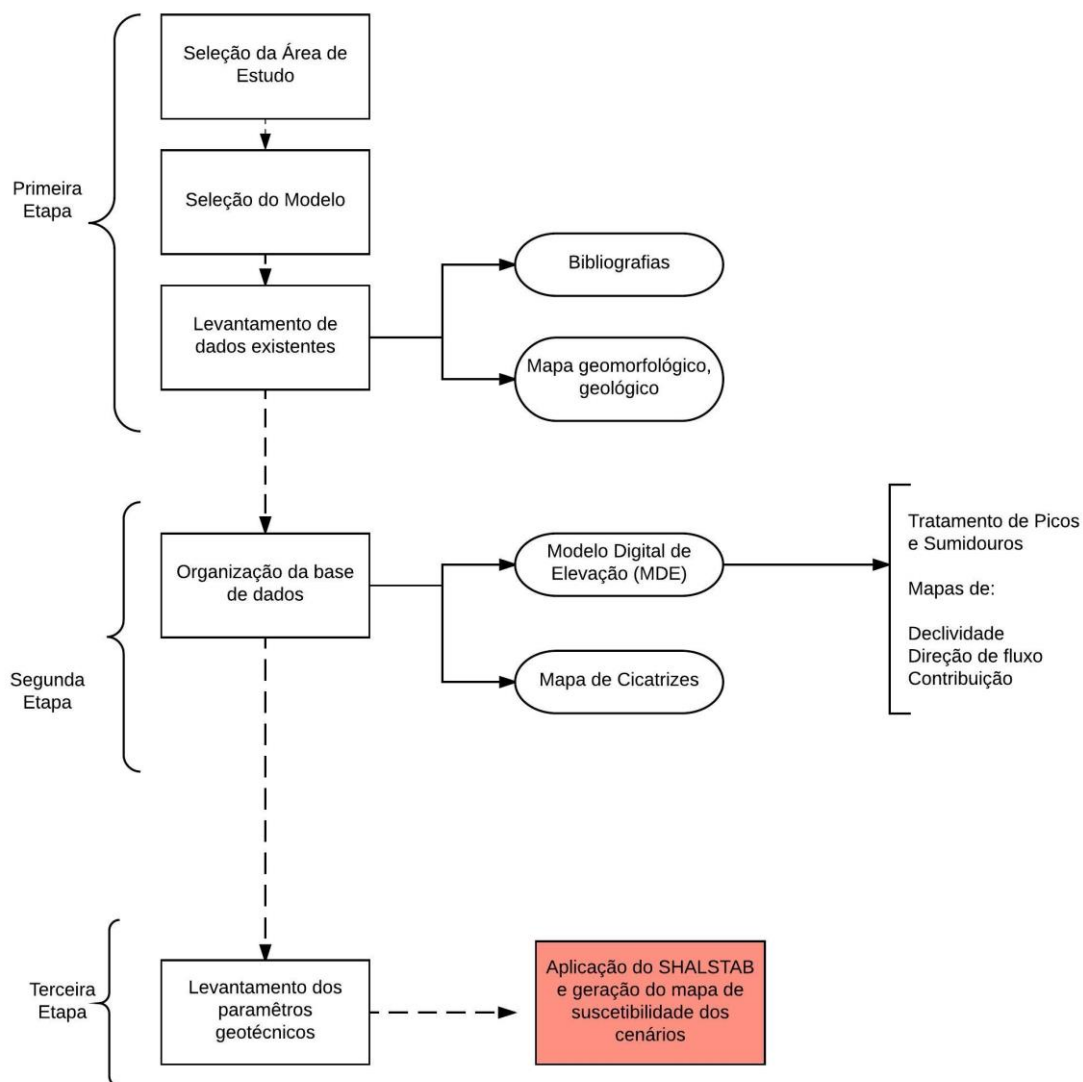
O modelo SHALSTAB, desenvolvido por Montgomery e Dietrich (1994), é utilizado para determinar regiões suscetíveis a escorregamentos em função da quantidade de chuva e características geotécnicas do local em questão. Tal modelo, apesar de ser elaborado com foco em áreas de clima temperado e utilizado primeiramente em regiões localizadas no oeste dos Estados Unidos, vem apresentando ótimos resultados em estudos realizados no Brasil, cujo o clima é classificado como tropical. Os produtos mostram que este modelo possui um grande potencial de uso na previsão de áreas instáveis em regiões onde as propriedades do solo ainda são pouco conhecidas (FERNANDES et al., 2001). O modelo apresenta limitações quanto as áreas que apresentam afloramentos rochosos, falésias, precipícios, áreas de lençol freático profundo e regiões que apresentem camadas espessas de solo. O modelo SHALSTAB configura extrema importância devido a sua aplicabilidade no presente trabalho e será abordado de maneira mais detalhada no capítulo a seguir.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo irá discorrer sobre os materiais e métodos necessários para alcançar o objetivo principal da presente monografia: a avaliação da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos nas bacias hidrográficas do Pau D'Alho e Córrego da Divisa.

Para tal fim, o trabalho foi dividido em três etapas principais (Figura 4.1).

**Figura 4.1:** Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa.



A primeira etapa consistiu na contextualização do tema, englobando a seleção da área de estudo, a escolha do modelo matemático a ser aplicado na previsão das áreas suscetíveis a escorregamentos, o trabalho de campo e o levantamento de dados em geral. A segunda etapa envolveu a organização da base de dados, levantamento dos parâmetros topográficos e hidrológicos, a elaboração do modelo digital de elevação (MDE), mapas de declividade, contribuição e inventário de cicatrizes. A terceira etapa abrangeu o levantamento dos parâmetros geotécnicos do solo e a simulação dos cenários propostos para a geração dos mapas de suscetibilidade da área.

## **4.1 Primeira Etapa**

### **4.1.1 Seleção da área de estudo**

A seleção das bacias do Rio Pau D'Alho e Córrego da Divisa está associada ao evento pluviométrico de 17 e 18 de março de 1967, ocorrido no município de Caraguatatuba. Tal evento resultou em inúmeros escorregamentos nesta região, governados principalmente pelos altos declives e altos índices pluviométricos. A área em questão apresenta diversos registros de escorregamentos evidenciados pela presença de cicatrizes na área e observados através de levantamentos aerofotogramétricos, entretanto, a disponibilidade de dados e pesquisas que envolvem ambas as bacias são escassas. Devido a estes fatores, optou-se pela escolha desta área de estudo, com a principal finalidade de coletar novas informações e enriquecer a bibliografia desta região.

### **4.1.2 Seleção do Modelo**

Com a finalidade de avaliar a suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos, o modelo SHALSTAB, desenvolvido exclusivamente para a análise destes movimentos, mostrou-se favorável para a realização do presente trabalho.

Os componentes deste modelo consistem em parâmetros topográficos, hidrológicos e geotécnicos. Os parâmetros topográficos são representados pela declividade e área de contribuição, obtidos através do MDE (Modelo Digital de Elevação).

Os fatores hidrológicos, tais como a transmissividade do solo e precipitação são variáveis do tempo, sendo que sua intensidade e duração influenciam diretamente na magnitude dos escorregamentos. Os parâmetros geotécnicos do solo, como coesão, ângulo de atrito e densidade, são obtidos através de ensaios de campo, laboratório e/ou estimados por estudos antecedentes realizados no local (GUIMARÃES et al., 2003).

Dentre as limitações do modelo, destaca-se a utilização de um conjunto de dados geotécnicos para toda a bacia. Desta forma, o modelo extrapola o mesmo parâmetro para toda a área analisada, ou seja, o solo de toda área será representado por um único valor de coesão, ângulo de atrito interno e peso específico.

A metodologia de previsão a deslizamentos do modelo SHALSTAB compreende o modelo digital de elevação (MDE) associado a uma equação matemática que combina um modelo de estabilidade de encostas com um modelo hidrológico, com o objetivo de definir as zonas susceptíveis à ocorrência de escorregamentos rasos para cada *pixel* em uma base de dados (GUIMARÃES et al., 2003).

O modelo de estabilidade de encostas é baseado na Lei de Mohr-Coulomb, que assume que a ocorrência de escorregamentos acontece quando as forças estabilizantes não suportam as forças de sustentação do material da encosta, como mostra a equação 4.1.

$$\tau = c + (\sigma - u) \operatorname{tg}\phi \quad (4.1)$$

Onde:

$\tau$  [N/m<sup>2</sup>] Tensão de cisalhamento tangencial

$c$  [N/m<sup>2</sup>] Coesão do solo

$\sigma$  [N/m<sup>2</sup>] Tensão normal

$u$  [N/m<sup>2</sup>] Poropressão

$\phi$  [N/m<sup>2</sup>] Ângulo de atrito interno do solo

Todavia, em áreas onde a aplicabilidade deste modelo é destinada à análise de escorregamentos translacionais rasos, como a Serra do Mar, é comum utilizar o modelo de estabilidade infinita, cujo o comprimento de encosta é muito maior do que a profundidade do solo. Segundo Guimarães et al. (2003), o modelo de talude infinito

despreza os efeitos causados por atrito nas laterais e extremidades da encosta em questão. Além disso, a simulação da estabilidade é dada em relação a um plano infinito de solo sobre um plano inclinado.

Nesse sentido, Selby (1993) sugeriu uma formulação desenvolvida a partir da equação 4.1, com o propósito de aplicá-la no modelo de encostas infinitas:

$$\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta = Cr + Cs + (\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos^2\theta - \rho_w \cdot g \cdot h \cdot \cos^2\theta) \cdot \tan\theta \quad (4.2)$$

Onde:

$\rho_s$  [kg/m<sup>3</sup>] Densidade do solo úmido

$g$  [m/s<sup>2</sup>] Gravidade

$z$  [m] Profundidade do solo

$\theta$  [graus] Declividade da encosta

$Cr$  [N/m<sup>2</sup>] Coesão das raízes

$Cs$  [N/m<sup>2</sup>] Coesão do solo

$\rho_w$  [Kg/m<sup>3</sup>] Densidade da água

$h$  [m] Altura da coluna de água no subsolo

Tal equação (4.2), de acordo com Guimarães et al. (2003), pode ser rearranjada da seguinte maneira:

$$\frac{h}{z} = \frac{C}{g \cdot z \cdot \cos^2\theta \cdot \tan\theta \cdot \rho_w} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan\theta}{\tan}\right) \quad (4.3)$$

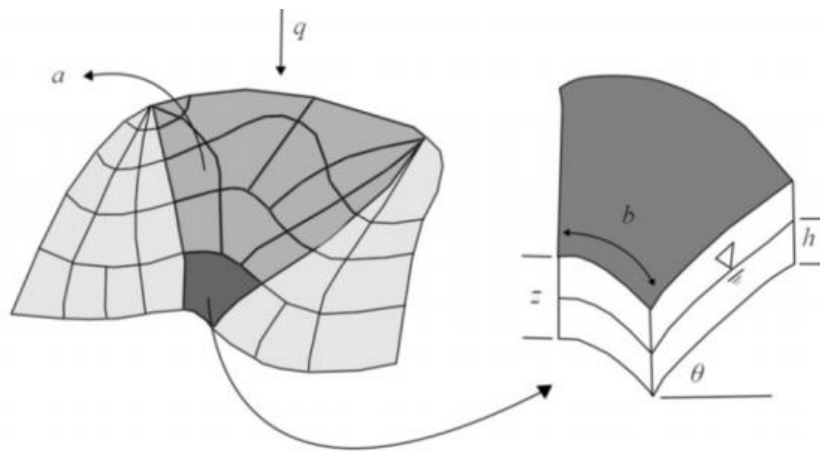
Sendo que a fração  $\left(\frac{h}{z}\right)$  representa a coluna de água necessária, no solo, para que a encosta venha a se desestabilizar.

O modelo hidrológico é baseado nos estudos pioneiros realizados por Beven e Kirkby (1979) e O'Loughlin (1986) e objetiva identificar as zonas de saturação no relevo. Tal modelo define um padrão de equilíbrio de saturação do solo baseado na declividade,

na área de contribuição à montante e na transmissividade do solo. Para que exista uma zona de saturação é necessário, segundo Montgomery e Dietrich (1994), que o produto entre a área drenada a montante (**a**) e a precipitação (**Q**) que passa por um elemento de contorno de comprimento (**b**), seja maior do que o produto da transmissividade do solo (**T**) e o seno do ângulo da encosta ( $\theta$ ), conforme a Equação 4.4 e a Figura 4.2.

$$a \cdot \frac{Q}{b} \geq T \sin \theta \quad (3.4)$$

**Figura 4.2:** Representação do modelo hidrológico de estado uniforme.



**Fonte:** Michael (2013).

O'Loughlin (1986) definiu a condição de saturação em equilíbrio (sem variação com o tempo) através de um índice de umidade ( $W$ ), conforme a Equação 4.5. Desse modo, o nível de saturação do solo é obtido através da relação entre a água que entra no sistema sob forma de recarga uniforme e a água que sai do sistema através de escoamento superficial, quando o solo está saturado:

$$W = \frac{Q \cdot a}{T \cdot b \cdot \sin \theta} \quad (4.5)$$

Onde:

W [m/m]	Umidade do solo
a [m <sup>2</sup> ]	Área de contribuição a montante
b [m]	Comprimento de contorno da fronteira de cada elemento
Q [m/d]	Taxa de recarga uniforme (intensidade da chuva)
T [m <sup>2</sup> /dia]	Transmissividade do solo
Θ [graus]	Declividade local

A combinação entre ambos os modelos configura o grau de estabilidade de uma encosta, onde através da Equação 4.6, é possível definir sete classes de estabilidade exibidas pela Tabela 4.1 e pré-estabelecidas pelo SHALSTAB. Os parâmetros de entrada requeridos pelo modelo são o ângulo de atrito ( $\Phi$ ), coesão ( $c$ ), peso específico ( $\gamma$ ) e espessura ( $z$ ). As demais variáveis  $a$ ,  $b$  e  $\Theta$  são obtidas através de um modelo digital do elevação (MDE) de boa qualidade. A resposta do modelo é gerada em função de um “parâmetro livre” ( $q/T$ ) responsável pela classificação do terreno de acordo com o grau de estabilidade (MICHEL et al., 2012).

$$\frac{q}{T} = \frac{\sin\theta}{a/b} \left[ \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan\theta}{\tan\phi} \right) + \frac{c}{g.z.\cos^2\theta.\tan\phi.\rho_w} \right] \quad (4.6)$$

A Figura 4.3 exibe, de maneira esquemática, os componentes do modelo SHALSTAB necessários para a geração dos mapas de suscetibilidade a escorregamentos rasos. Estes elementos envolvem a relação entre os parâmetros geomorfológicos, obtidos através do Modelo Digital de Elevação (mapa de declividade e área de contribuição) e os parâmetros do solo, obtidos através de ensaios geotécnicos.

**Tabela 4.1:** Classes de estabilidade, rotuladas de A a G, referentes às condições de estabilidade e saturação em função da razão  $a/b$  e  $\tan\theta$ .

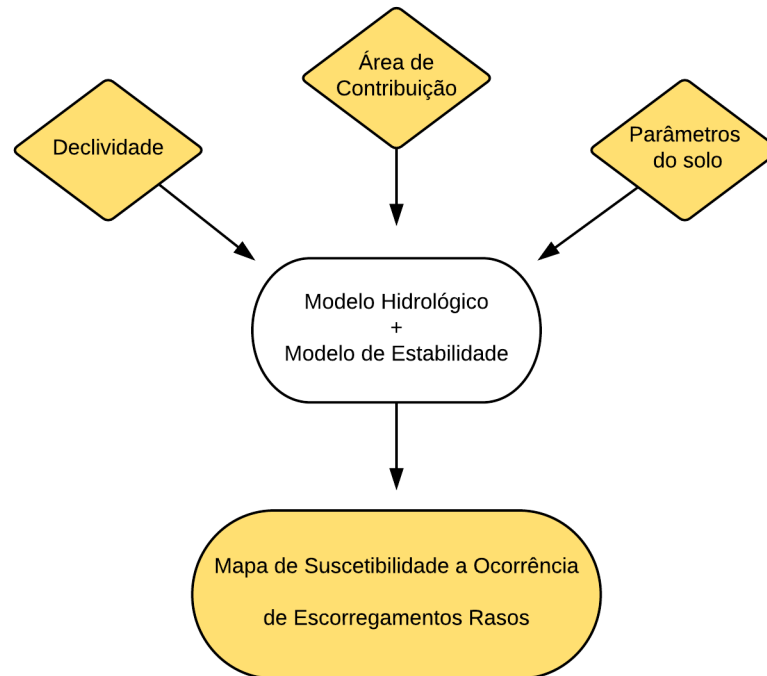
Classe de estabilidade	Condição
A) Incondicionalmente estável e saturado	$a/b > (T/q)\text{sen } \theta$ e $\tan\theta \leq \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s)$
B) Incondicionalmente estável e não saturado	$a/b < (T/q)\text{sen } \theta$ e $\tan\theta \leq \tan\phi(1-\rho_w/\rho_s)$
C) Estável e não saturado	$\frac{a}{b} < \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \frac{T}{q} \text{sen } \theta$ $a/b < (T/q)\text{sen } \theta$ e $\tan\phi(1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\phi$
D) Instável e não saturado	$\frac{a}{b} \geq \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \frac{T}{q} \text{sen } \theta$ $a/b < (T/q)\text{sen } \theta$ e $\tan\phi(1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\phi$
E) Instável e saturado	$\frac{a}{b} > \frac{\rho_s}{\rho_w} \left( 1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \frac{T}{q} \text{sen } \theta$ $a/b > (T/q)\text{sen } \theta$ e $\tan\phi(1-\rho_w/\rho_s) < \tan\theta < \tan\phi$
F) Incondicionalmente instável e não saturado	$\tan\theta > \tan\phi$ e $a/b < (T/q)\text{sen } \theta$
G) Incondicionalmente instável e saturado	$\tan\theta > \tan\phi$ e $a/b > (T/q)\text{sen } \theta$

**Fonte:** Dietrich e Montgomery (1994), citado por Guimarães (2000).

#### 4.1.3 Levantamento de dados

O levantamento de dados foi essencial para a elaboração deste trabalho. O embasamento bibliográfico foi realizado com base nos documentos que constaram os assuntos tratados na presente monografia, envolvendo o histórico de ocorrências de escorregamento na região serrana de Caraguatatuba e conceitos que compreendem os termos movimentos de massa, escorregamentos, estabilidade de taludes e o modelo determinístico SHALSTAB. Ademais, bibliografias que abordam a situação geológica, geomorfológica e geotécnica das bacias hidrográficas do Rio Pau D'Alho e Córrego da Divisa também apresentaram suma importância.

**Figura 4.3:** Fatores necessários para a geração dos mapas de suscetibilidade a ocorrência de escorregamentos rasos.



**Fonte:** Guimarães et al. (2003).

Além de inúmeras bibliografias consultadas que envolveram os temas abordados, fez-se necessário a aquisição de mapas geomorfológicos e geológicos na escala 1:50.000, que forneceram subsídios para a caracterização da região em foco. Para a digitalização da base topográfica foram utilizadas as Folhas Pico do Papagaio (SF-23-Y-D-V-2) e Folha Caraguatatuba (SF-23-Y-D-VI-1), extraídas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, em escala 1:50.000 (IBGE, 1974). A partir do georreferenciamento das folhas topográficas, as curvas de nível da zona de interesse foram digitalizadas de 20 em 20 metros em ambiente *ArcGis* 10.1. O mapa geológico foi vetorizado com base nos mapas geológicos referentes a Folha de Caraguatatuba e Pico do Papagaio, elaborados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) em 1982 e 1991, respectivamente. O levantamento de dados também envolveu a aquisição das orfotomas das bacias do rio Pau D'Alho e Córrego da Divisa com resolução

espacial GSD (*Ground Sample Distance*), concedidas pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano (EMPLASA) e datadas de 2012 em escala 1:10.000.

Com a finalidade de promover um reconhecimento geral da área de estudo, foi realizado uma campanha de campo entre os dias 15 e 18 de maio de 2016. Tal atividade visou coletar diversas informações acerca das bacias estudadas, tais como a identificação das unidades geológicas e geotécnicas e localização de cicatrizes relacionadas a eventos recentes e pretéritos. Entretanto, devido a fatores limitantes como ausência de vias de acesso, expressiva área florestal que abrange praticamente toda a área de estudo e características peculiares do relevo em questão, o acesso à área mostrou-se inatingível. Desse modo, a determinação dos parâmetros geotécnicos do solo referentes as áreas em questão, através da coleta de amostras e posterior realização de ensaios laboratoriais, não foi possível.

## **4.2 Segunda Etapa**

### **4.2.1 Elaboração de mapas a partir do Modelo Digital de Elevação**

Esta fase consistiu na elaboração de mapas fundamentais para o desenvolvimento do presente trabalho, tais como mapas de declividade, direção de fluxo e área de contribuição. Para tanto, fez-se necessário a elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE) da área, que configurou a base destes processos.

#### Modelo Digital de Elevação (MDE)

Tal modelo consiste em uma demonstração da distribuição espacial que representa graficamente o relevo da superfície terrestre. Guimarães (2003) descreve que o MDE se apresenta como uma ferramenta fundamental para a análise de modelos matemáticos, visto que se encontra associado direta ou indiretamente à obtenção de parâmetros topográficos, tais como a declividade e a área de contribuição.

O Modelo Digital de Elevação foi elaborado a partir das curvas topográficas obtidas na etapa anterior e através da ferramenta de interpolação *Topo to Raster* da extensão

*Spatial Analysis Tool*, em ambiente *ArcMap* 10.1. A Figura 4.4 apresenta o mapa topográfico das bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa, fundamental na geração do Modelo Digital de Elevação. Cabe ressaltar que para a confecção deste mapa foram utilizadas as folhas Pico do Papagaio (SF-23-Y-D-V-2) e Folha Caraguatatuba (SF-23-Y-D-VI-1), com curvas de nível extraídas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (1974), em escala 1:50.000 e com equidistância de 20 metros.

O Modelo Digital de Elevação (MDE) também foi criado no formato TIN, através do módulo *data management*, *TIN* e *create TIN*, referente a extensão *3D Analyst Tools*. Segundo análise realizada por Fernandes e Menezes (2005), ao se comparar diversos métodos de geração de MDE, constatou-se que tal formato permite uma melhor visualização do relevo e um desempenho superior aos demais, principalmente em áreas com maior altitude, onde a declividade é mais acentuada e o relevo mais acidentado.

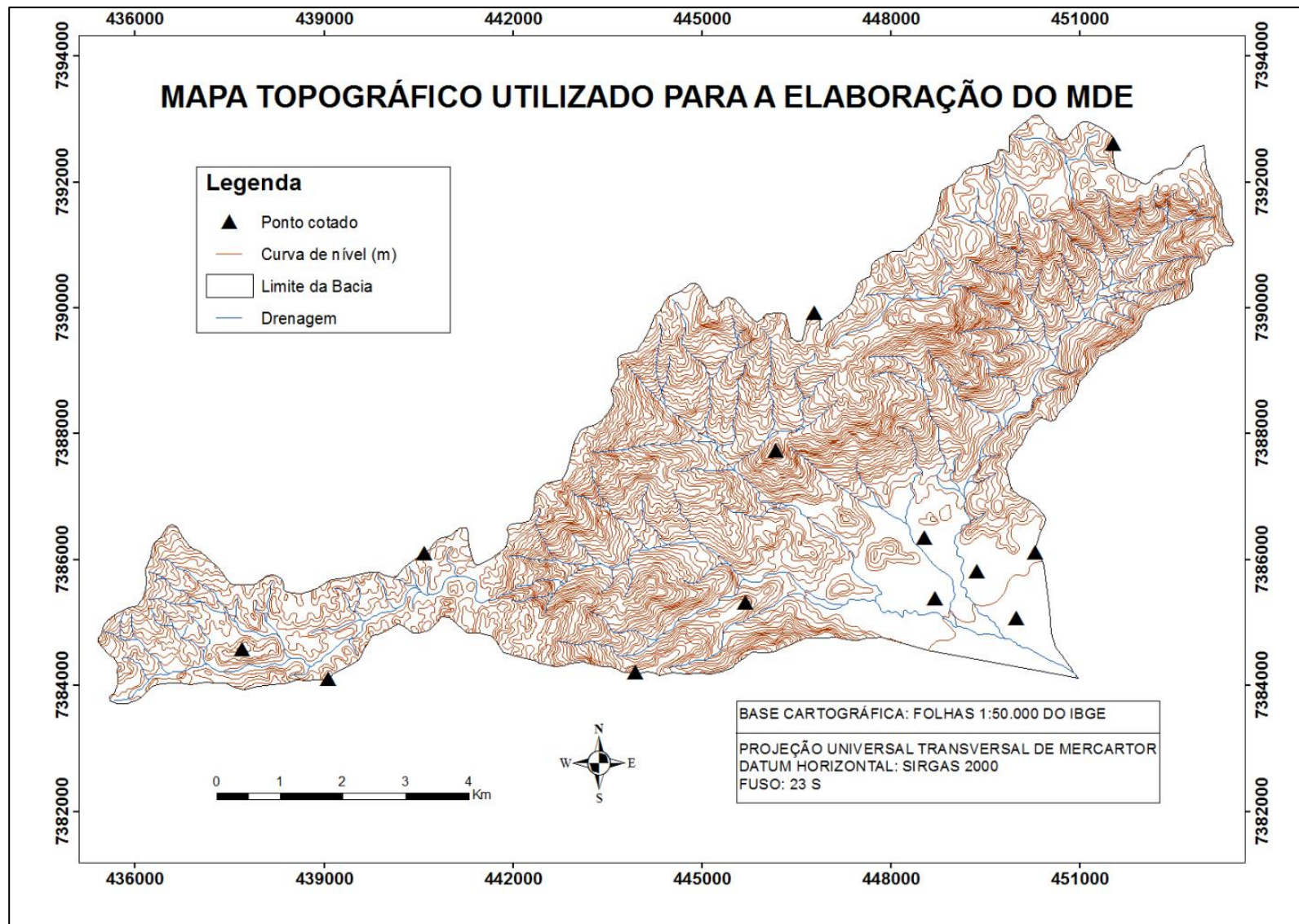
#### Tratamento de Picos e Sumidouros

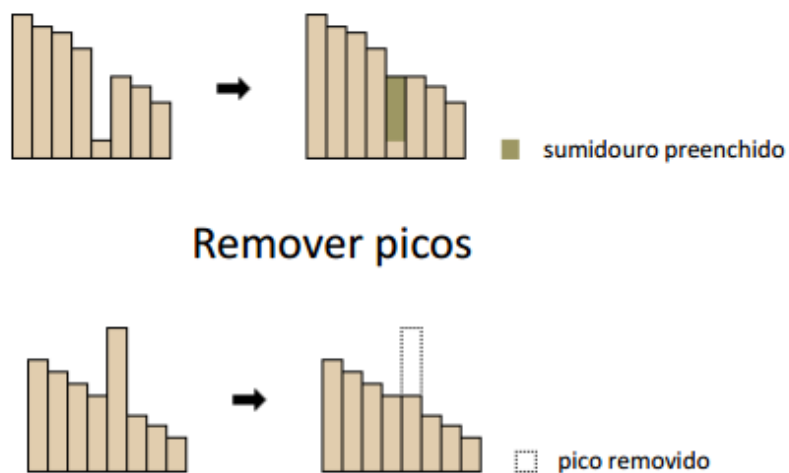
Para a correção de imperfeições contidas no Modelo Digital de Elevação (MDE), fez-se necessário corrigir a presença de picos e sumidouros que podem afetar a análise de distribuição do fluxo d'água. Os picos são geralmente células de valor muito alto, já os sumidouros são descritos como células de valor muito baixo à zero (Figura 4.5). O processo baseia-se na proposta da suavização do modelo com a finalidade de perder a menor quantidade possível de informações. O mapa de sumidouros foi obtido através da ferramenta *Fill*, no menu *Hydrology*, encontrado na extensão *Spatial Analysis Tool*.

#### Mapa de Declividade

O Mapa de Declividade foi elaborado através da ferramenta *slope*, no menu *raster surface* da extensão *3D Analyst Tools*. As classes de declividade foram determinadas conforme a Tabela 4.2.

Figura 4.4: Mapa topográfico utilizado para a elaboração do MDE.



**Figura 4.5:** Tratamento de picos e sumidouros.

Fonte: Bortoloti, 2014.

**Tabela 4.2:** Classes de declividade utilizadas no presente trabalho.

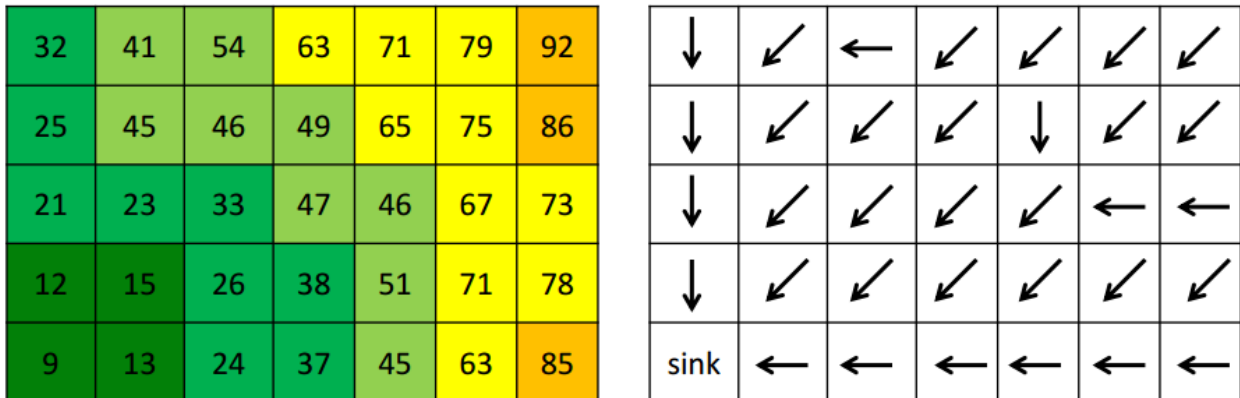
Classes de Declividade	Declividade (graus)
Muito baixa	0-5
Baixa	5-15
Média	15-30
Alta	30-45
Muito alta	45-90

### Mapa de Direção de Fluxo

O mapa de direção de fluxo apresenta a direção do escoamento da água, analisada conforme a elevação das células vizinhas do MDE. Cada célula é analisada separadamente pelo programa, onde o fluxo da água seguirá na direção da célula adjacente que apresenta menor elevação, conforme exemplificado na Figura 4.6. O

primeiro quadrado representa as elevações em metros e o segundo indica a direção de fluxo de acordo com as respectivas altitudes.

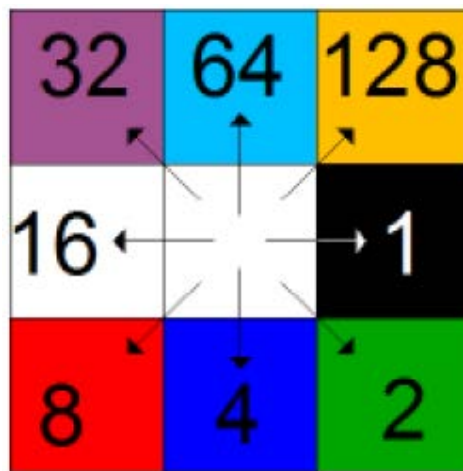
**Figura 4.6:** Fluxo de água de acordo com as elevações.



Fonte: Bortoloti, 2014.

O mapa de direção de fluxo, todavia, não apresenta as flechas apresentadas acima. Tal procedimento utiliza a abordagem *eightdirection* (D8), que consiste em um padrão de cores que representa cada uma das oito direções possíveis, conforme a Figura 4.7.

**Figura 4.7:** Vetores de direção de fluxo conforme a cor e valor, usando a abordagem *eight-direction* (D8).



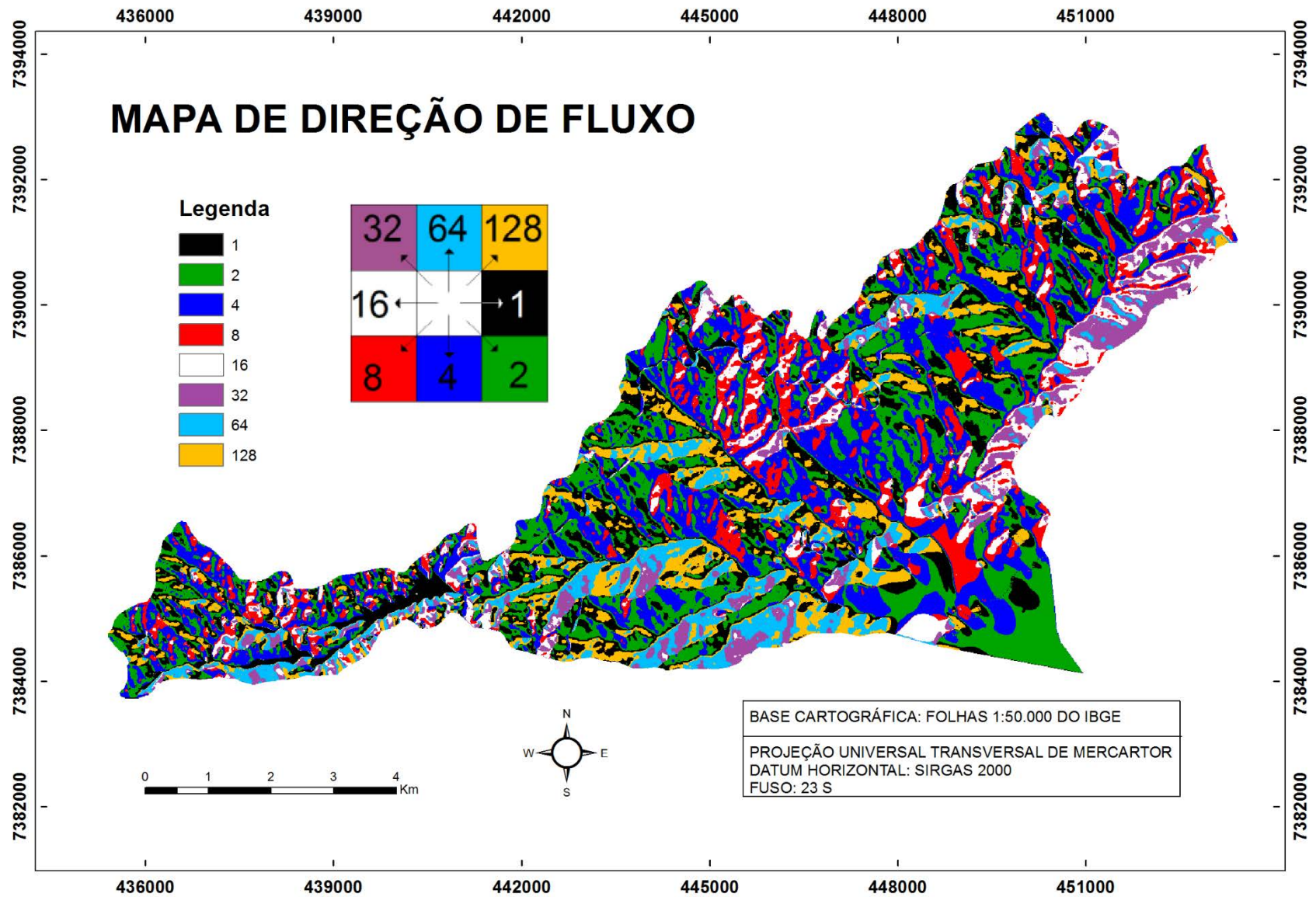
Fonte: Bortoloti, 2014.

A obtenção deste mapa (Figura 4.8) configurou fundamental importância devido a sua utilização na elaboração do mapa de contribuição. Para tanto, aplicou-se a ferramenta *flow direction* localizada no menu *hydrology* da extensão *Spatial Analysis Tool*.

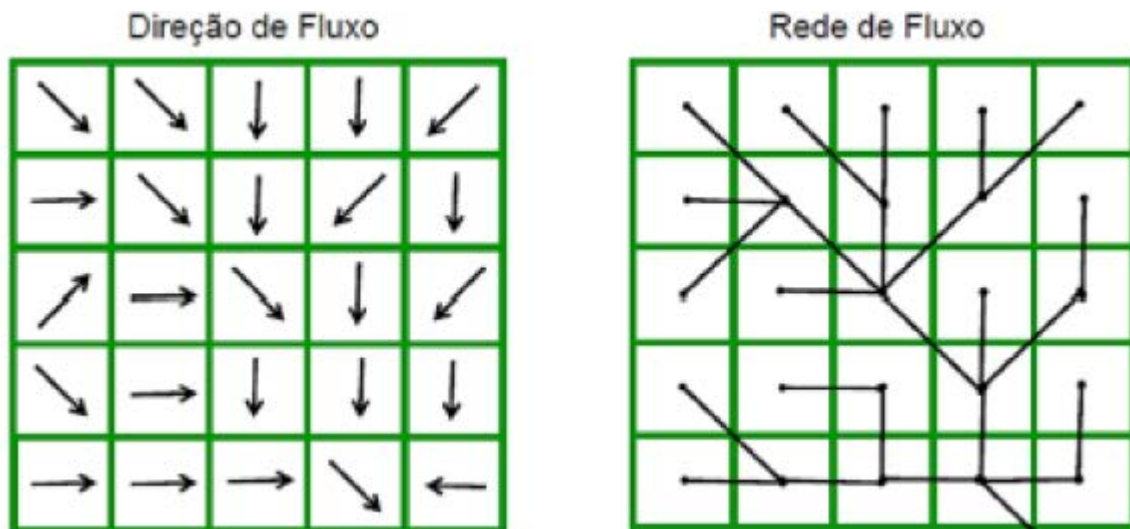
### Mapa de Contribuição

Segundo Vieira (2007), a área de contribuição configura um papel relevante na análise de suscetibilidade, principalmente quando utilizada juntamente com outras variáveis como declividade e transmissividade do solo. Essa importância se dá devido a relação direta entre a forma da encosta e processos hidrológicos/erosivos que a área de contribuição demonstra.

O mapa de contribuição, além de analisar o efeito da topografia no fluxo de água inserido na bacia, consiste na criação de uma superfície de acúmulo de fluxo a partir de direções de fluxo (Figura 4.9). Deste modo, o mapa de contribuição foi elaborado a partir do mapa de direções de fluxo, aplicando-se a ferramenta *flow accumulation*, no menu *hydrology* da extensão *Spatial Analysis Tool*.

**Figura 4.8:** Mapa de direções de fluxo das bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa.

**Figura 4.9:** Criação de rede de fluxo a partir das direções de fluxo.



**Fonte:** Guessier, 2003.

#### 4.2.2 Elaboração de mapa a partir das ortofotos da área de estudo

##### Mapa de Cicatrizes

A função do mapa de cicatrizes consiste em identificar escorregamentos ocorridos em determinada região por meio de ortofotos, que possibilitam a visualização de tais movimentos. Segundo Záruba e Mencil (1976), a fotografia aérea representa a ferramenta mais valiosa no quesito da identificação do fenômeno, porque fornece uma visão tridimensional da área, possibilitando a localização e os limites da sua ocorrência.

O mapa de cicatrizes foi elaborado em ambiente *ArcMap 10.1*, onde, com base nas ortofotos representativas da área, foram traçados polígonos para cada escorregamento a fim de identificar e delimitar estes fenômenos. Cada cicatriz foi categorizada segundo a sua respectiva bacia hidrográfica, altitude, declividade, área, perímetro, geologia e tipo de encosta, como mostra a Tabela 4.3. Para tanto, foi fundamental o uso simultâneo do modelo digital de elevação, o mapa de declividade, o mapa geológico, as curvas de nível e as drenagens da área em questão.

**Tabela 4.3:** Classificações atribuídas para cada cicatriz delimitada.

Cicatrizes							
FID	Bacia_hidr	Altitude	Slope	Area	Perimetro	Geologia	Encosta
0	Bacia hidrográfica do Ribeirão da Aldeia	164.558	36.998	7137.74109	327.608818	PIYc	Convexa
1	Bacia hidrográfica do Ribeirão do Pau d'alto	559.321	26.572	6746.476517	644.674331	PSccpp/PIYg/PIYp/PSccgg/PIYa	Convexa
2	Bacia hidrográfica do Ribeirão da Aldeia	238.649	29.582	2150.524434	266.153706	PIYc	Convexa
3	Bacia hidrográfica do Ribeirão da Aldeia	217.515	18.401	4200.907259	460.696667	PIYc	Convexa
4	Bacia hidrográfica do Ribeirão da Aldeia	117.356	24.296	3102.907541	296.648688	PIYc	Convexa
5	Bacia hidrográfica do Ribeirão da Aldeia	220.03	0.28	2934.335716	239.023792	PIYc	Convexa
6	Bacia hidrográfica do Ribeirão da Aldeia	186.419	31.871	10213.394083	417.076734	PIYc/PSccgg/PIYa	Convexa
7	Bacia hidrográfica do Ribeirão da Aldeia	292.231	43.002	22760.04216	932.607483	PIYc	Convexa
8	Bacia hidrográfica do Ribeirão da Aldeia	179.304	22.64	4961.139935	309.905696	PIYc	Convexa
9	Bacia hidrográfica do Ribeirão da Aldeia	180	0	5568.211251	422.967464	PIYc	Côncava
10	Bacia hidrográfica do Ribeirão da Aldeia	250.321	18.832	9686.23304	812.935751	PIYc	Convexa
11	Bacia hidrográfica do Ribeirão da Aldeia	300.828	29.649	6374.795736	531.10117	PIYc	Convexa
12	Bacia hidrográfica do Ribeirão da Aldeia	152.816	35.724	2019.353277	277.866008	PIYc	Côncava
13	Bacia hidrográfica do Ribeirão da Aldeia	379.421	24.75	3177.553468	281.857777	PSccgg/PIYa	Retilínea
14	Bacia hidrográfica do Ribeirão do Pau d'alto	463.813	26.465	5039.447803	353.016333	PSccpp/PIYg/PIYp	Convexa
15	Bacia hidrográfica do Ribeirão do Pau d'alto	420	0	581.843402	124.766356	PSccpp/PIYg/PIYp	Convexa
16	Bacia hidrográfica do Ribeirão do Pau d'alto	308.279	41.069	3137.300811	236.237136	PSccgg/PIYa	Convexa
17	Bacia hidrográfica do Ribeirão do Pau d'alto	190.594	37.667	471.901145	95.897886	PSccgg/PIYa	Convexa
18	Bacia hidrográfica do Ribeirão do Pau d'alto	162.363	42.742	305.491412	84.873311	PSccgg/PIYa	Convexa

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

A determinação das cicatrizes de escorregamentos foi realizada através da análise das coberturas vegetais encontradas na área. Desse modo, tornou-se possível determinar as cicatrizes de acordo com locais caracterizados pela ausência de vegetação ou constituídos por cobertura vegetal rasteira, que nitidamente diferem das áreas adjacentes (Figura 4.10). Tais feições foram representadas por polígonos, exemplificados na Figura 4.11).

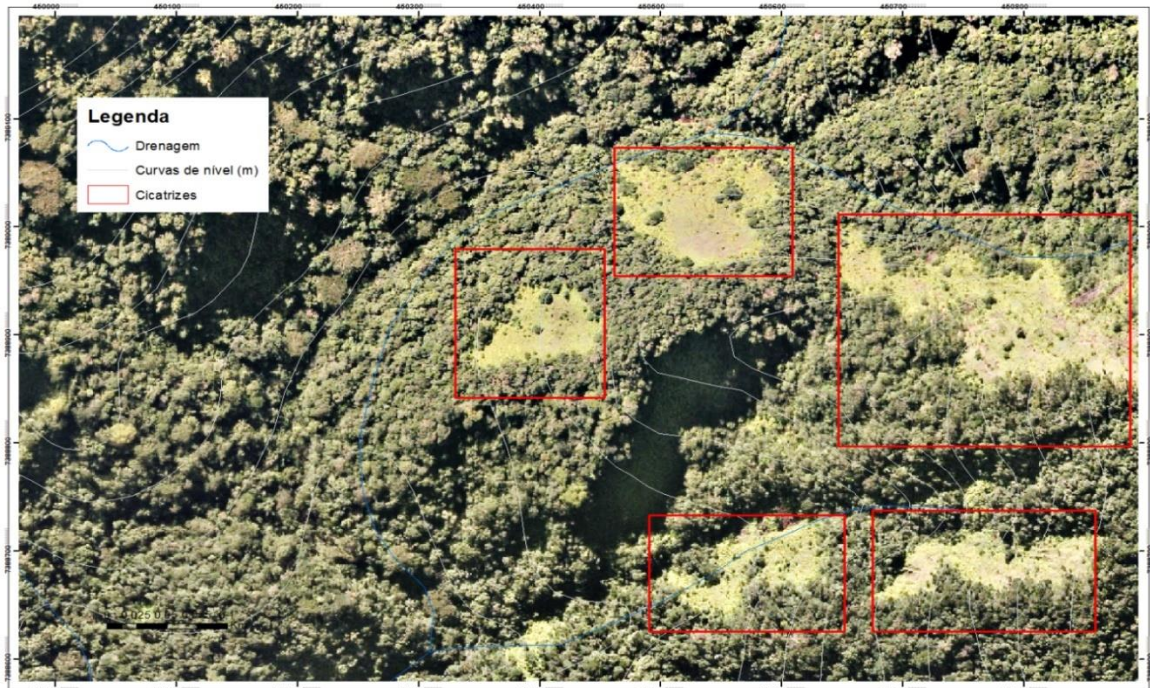
### 4.3 Terceira Etapa

#### 4.3.1 Levantamento dos Parâmetros Geotécnicos

Os parâmetros geotécnicos são fundamentais para a geração dos mapas de suscetibilidade por meio do modelo SHALSTAB. Entretanto, devido a inacessibilidade física à área de estudo, tais parâmetros foram obtidos através de dois trabalhos aplicados a áreas distintas, que determinaram estes valores por meio de ensaios laboratoriais.

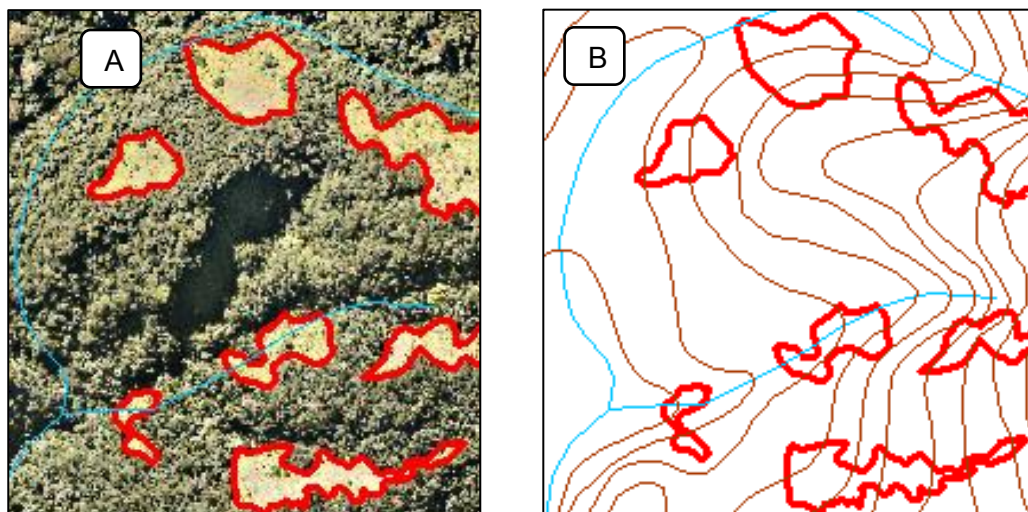
O primeiro, descrito por Wolle (1988), caracteriza ensaios realizados em duas áreas piloto inseridas na Serra de Cubatão e localizadas próximo à Rodovia dos Imigrantes, amostrados em solos coluvionares maduros com textura argilo-arenosa e em solos saprolíticos (Tabela 4.4).

**Figura 4.10:** Reconhecimento das cicatrizes de escorregamentos através da comparação entre vegetações rasteiras e vegetações de médio a alto porte.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Figura 4.11:** A) Parte da ortofoto da área de estudo com a delimitação de cicatrizes traçadas de acordo com a vegetação rasteira, que difere das demais. B) Parte das cicatrizes, inseridas no mapa topográfico da área.



**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Tabela 4.4:** Parâmetros geotécnicos referentes à duas áreas piloto localizadas na Serra do Mar.

Local estudado			Umidade Natural			Em condição inundada ("saturada")		
Área Estuda / Inclinação da encosta	Solo	Espessura (m)	Y (KN/m <sup>3</sup> )	c (Kpa)	Φ (°)	Y (KN/m <sup>3</sup> )	c (Kpa)	Φ (°)
A1 (40°)	Superficial (coluvionar)	1,0	14,3	6,0	34	17,1	1,0	34
	Saprolítico	1 a 2	18,0	12	45	19,5	4,0	39
A2 (43°)	Superficial (coluvionar)	1,0	16,5	9,5	40	18,2	1,0	36
	Saprolítico	1 a 2	18,5	11	45	20,1	3,5	39

Obs: Y= peso específico; c= coesão; Φ= ângulo de atrito

**Fonte:** Adaptada de Wolle (1988).

O segundo trabalho, realizado por Ferreira (2013), descreve os ensaios laboratoriais aplicados à bacia do rio Guaxinduba, localizada no município de Caraguatatuba. As amostras foram coletadas em porções distintas de três cicatrizes de escorregamentos rasos da área. Os parâmetros geotécnicos foram amostrados em solos arenosos, argilosos e siltosos, resultando nos valores exibidos na Tabela 4.5.

#### 4.3.2 Simulação dos Cenários de Suscetibilidade

Com base nos parâmetros coletados, gerou-se 14 cenários de suscetibilidade onde cada valor inserido apresentou diferentes valores de espessura, coesão, ângulo de atrito e peso específico. Os dados obtidos foram convertidos de acordo com as unidades de entrada do SHALSTAB (Figura 4.12) e os números decimais foram aproximados para valores inteiros, devido a padronização dos dados de entrada impostos pelo programa (Tabela 4.6).

**Tabela 4.5:** Parâmetros geotécnicos referentes a bacia do rio Guaxinduba.

Identificação das amostras coletadas	Textura	Espessura (m)	Parâmetros geotécnicos		
			$\gamma$ (g/cm <sup>3</sup> )	c (Kpa)	$\Phi$ (°)
CBP2 BLOCO 1	Franca	0,40	1,24	0	29,1
CBP2 BLOCO 2	Franco arenosa	1,75	1,05	1,199	31,9
CBP2 BLOCO 3	Franco argiloso	0,60	1,41	2,160	25,8
CBP2 BLOCO 4	Franco arenosa	2,0	1,06	11,057	36,8
CBP2 BLOCO 5	Franco siltosa	0,45	1,11	0	36,7
CBP2 BLOCO 6	Franco argiloso	2,0	1,21	0	33,5

Obs:  $\gamma$ = peso específico; c= coesão;  $\Phi$ = ângulo de atrito

**Fonte:** Ferreira (2013).

**Figura 4.12:** Parâmetros de entrada referentes ao modelo SHALSTAB.

**Fonte:** Modelo SHALSTAB.

A simulação de diversos cenários permitiu analisar a influência de cada parâmetro em relação à suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos nas bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa. As sete classes de estabilidade foram indicadas conforme as cores mostradas pela Figura 4.13, padronizadas pelo SHALSTAB.

**Tabela 4.6:** Parâmetros inseridos no modelo SHALSTAB correspondentes aos 14 cenários gerados.








Autor	Espessura (m)	Parâmetros geotécnicos			Cenários
		$\gamma$ (kg/m <sup>3</sup> )	c (N/m <sup>2</sup> )	$\Phi$ (°)	
Wolle (1988)	1,0	1430	6000	34	1A
	2,0	1800	12000	45	2A
	1,0	1650	9500	40	3A
	2,0	1850	11000	45	4A
	1,0	1710	1000	34	1B
	2,0	1950	4000	39	2B
	1,0	1820	1000	36	3B
	2,0	2010	3500	39	4B
Ferreira (2013)	1	1240	0	29	5
	2	1050	1199	32	6
	1	1410	2160	26	7
	2,0	1060	11057	37	8
	1	1110	0	37	9
	2,0	1210	0	34	10

Obs:  $\gamma$ = peso específico; c= coesão;  $\Phi$ = ângulo de atrito; A= umidade natural; B= condição saturada

**Fonte:** Elaborado pelo autor.

**Figura 4.13:** Classes de estabilidade do SHALSTAB e suas respectivas cores.

### Classes de estabilidade

	Incondicionalmente instável e saturado - $\log (q/T) = -10 - -9.9$	} CLASSES INSTÁVEIS
	Incondicionalmente instável e não saturado - $\log (q/T) = < -3.1$	
	Instável e saturado - $\log (q/T) = -3.1 - -2.8$	
	Instável e não saturado - $\log (q/T) = -2.8 - -2.5$	
	Estável e não saturado - $\log (q/T) = -2.5 - -2.2$	} CLASSES ESTÁVEIS
	Incondicionalmente estável e não saturado - $\log (q/T) = > -2.2$	
	Incondicionalmente estável e saturado - $\log (q/T) = 9.9 - 10$	

A validação dos resultados foi realizada através da correlação e posterior análise entre os mapas de suscetibilidade, gerados a partir dos 14 cenários sugeridos, e o mapa de cicatrizes da área de estudo. Para tanto, foram gerados dois histogramas para cada mapa de suscetibilidade, que consistiram no histograma da frequência das classes de estabilidade (F) e no histograma de concentração de cicatrizes em relação a cada classe de estabilidade (CC), ambos gerados com base no número de células que cada categoria apresentou. A concentração de cicatrizes foi calculada através da razão entre o número de células, de cada classe, afetadas pelas cicatrizes e o total de células afetadas na bacia. Secundariamente, foi realizado a correlação entre os parâmetros topográficos (declividade, altitude e área de contribuição) e as feições de escorregamentos encontradas nas classes de cada parâmetro, também através de histogramas de frequência (F) e concentração de cicatrizes (CC).

Todos os valores foram obtidos em ambiente *ArcMap* 10.1, e posteriormente, organizados em planilha Excel, que permitiu a geração de histogramas.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

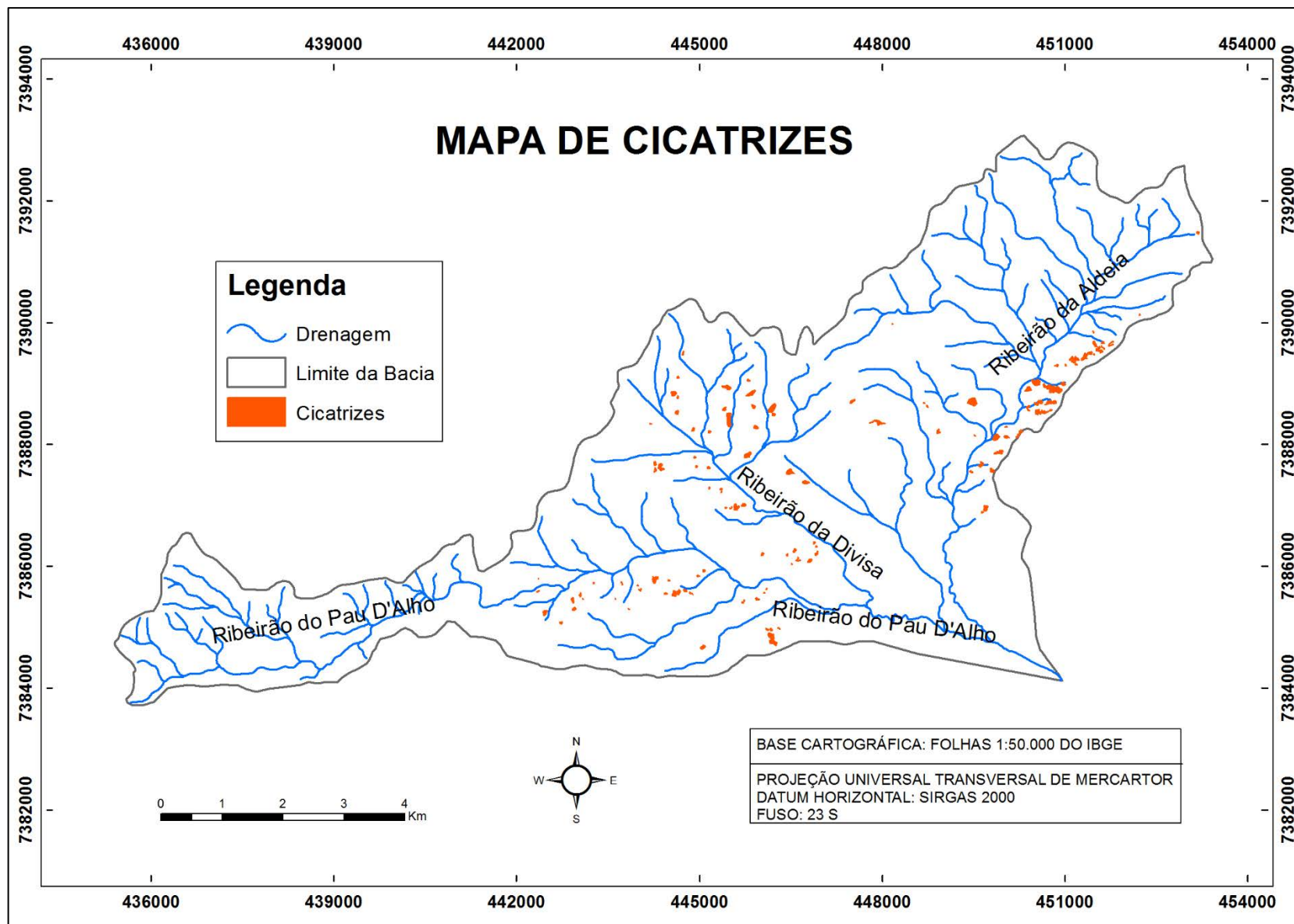
Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos ao longo do presente trabalho. Desta maneira, serão apresentados e posteriormente analisados o mapa de cicatrizes de escorregamentos presentes na área de estudo, os mapas temáticos elaborados a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE) e os mapas de suscetibilidade gerados pelo modelo matemático SHALSTAB.

### 5.1 Mapa de Cicatrizes

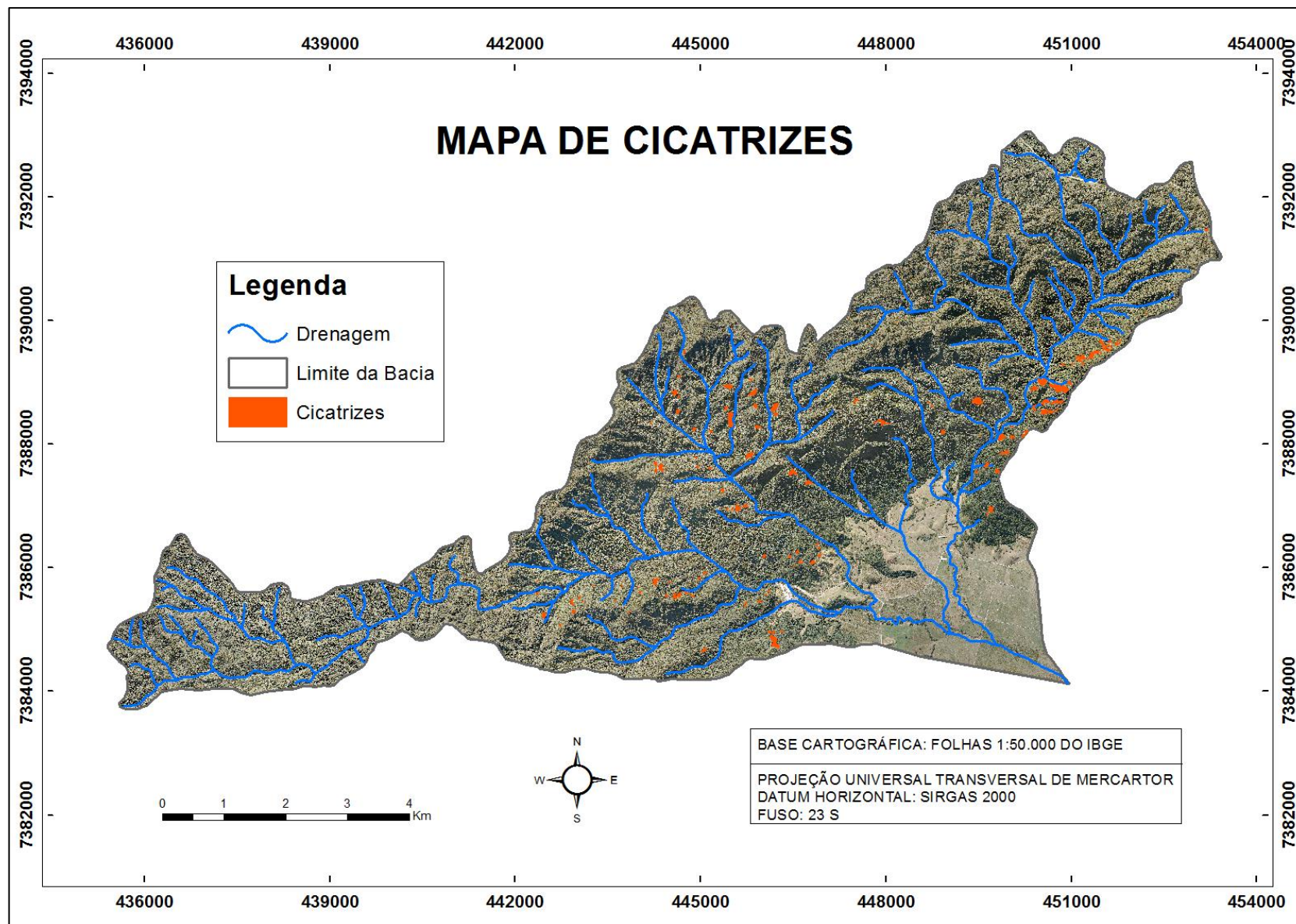
As bacias do Rio Pau D'Alho e Córrego da Divisa concentraram ao todo 119 feições de escorregamentos translacionais rasos (Figura 5.1 e 5.2). Como citado anteriormente no Capítulo 4, as cicatrizes foram classificadas quanto as suas respectivas bacias hidrográficas, altitudes, declividades, áreas, perímetros, geologia e tipo de encosta. Esta classificação permitiu identificar que a maioria das feições de escorregamentos apresentam as seguintes características:

- Encontram-se inseridas em declividades que variam de médias ( $15^{\circ}$  -  $30^{\circ}$ ) a muito altas ( $45^{\circ}$  -  $90^{\circ}$ );
- Encontram-se relacionadas, em sua grande maioria, a curvaturas do tipo convexa, seguidas por curvaturas do tipo retilínea. A concentração de cicatrizes em encostas do tipo côncava se faz a menos expressiva das três classes. De acordo com IPT (1986), o perfil das encostas da Serra do Mar apresenta-se predominantemente retilíneo e íngreme nas vizinhanças de borda do planalto. Já nos setores de meia-encosta, que também são caracterizados por altas declividades, os perfis retilíneos passam a se alternar com perfis convexos. Havenith et al. (2006) ressalta que as encostas convexas podem indicar a acumulação de materiais, como colúvios, que podem provocar a diminuição da resistência ao cisalhamento da encosta e configurar locais mais suscetíveis à deflagração de escorregamentos.

Figura 5.1: Mapa de cicatrizes das bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa.



**Figura 5.2:** Mapa de cicatrizes das bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa sobre imagem de satélite.



- As unidades geológicas que concentram a maioria das cicatrizes estão relacionadas aos Granitóides Caraguatatuba, que abrangem as unidades PScggg/PIY<sub>a</sub> (rochas gnáissico migmatíticas), Pscpp/PIY<sub>g</sub>/PIY<sub>p</sub> (unidade granito gnáissica Pico do Papagaio) e PIY<sub>c</sub> (piroxênio-hornblenda granitos), definidas no Quadro 2.1;
- Não exibem um padrão de altitude, estando concentradas em elevações que variam de 80 a 760 metros;
- Dentre as bacias hidrográficas presentes na área de estudo (Ribeirão da Aldeia, Divisa e Pau D'Alho), a Divisa apresenta uma maior associação com as cicatrizes mapeadas.

As feições de escorregamento, somadas, abrangem uma área de aproximadamente 0,36 km<sup>2</sup>, cerca de 0,55% das bacias. Quando comparado o tamanho de cada cicatriz, isoladamente, nota-se que a menor cicatriz apresenta 114 m<sup>2</sup> e a maior 3200 m<sup>2</sup>. A concentração de cicatrizes é observada em duas porções das bacias: o limite nordeste da área e a região central (exceto porções que apresentam declividade muito baixa).

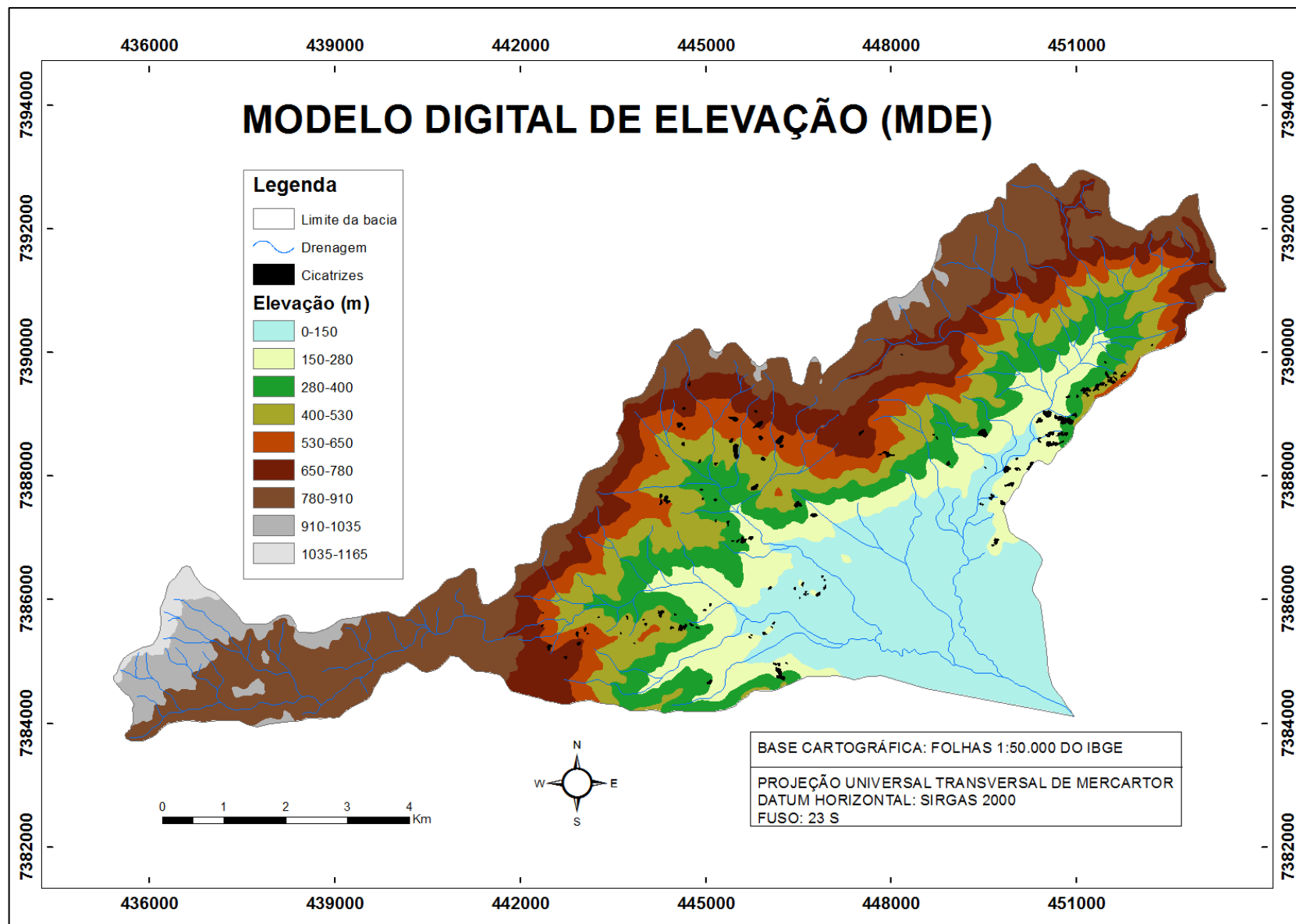
Como mencionado anteriormente, as cicatrizes foram extraídas visualmente de ortofotos datadas de 2012, concedidas pela EMPLASA. Devido a datação recente de tais imagens, não foi possível correlacionar as cicatrizes mapeadas com eventos de grande mobilização de massa, como o evento de 1967.

## **5.2 Mapas temáticos elaborados a partir do MDE**

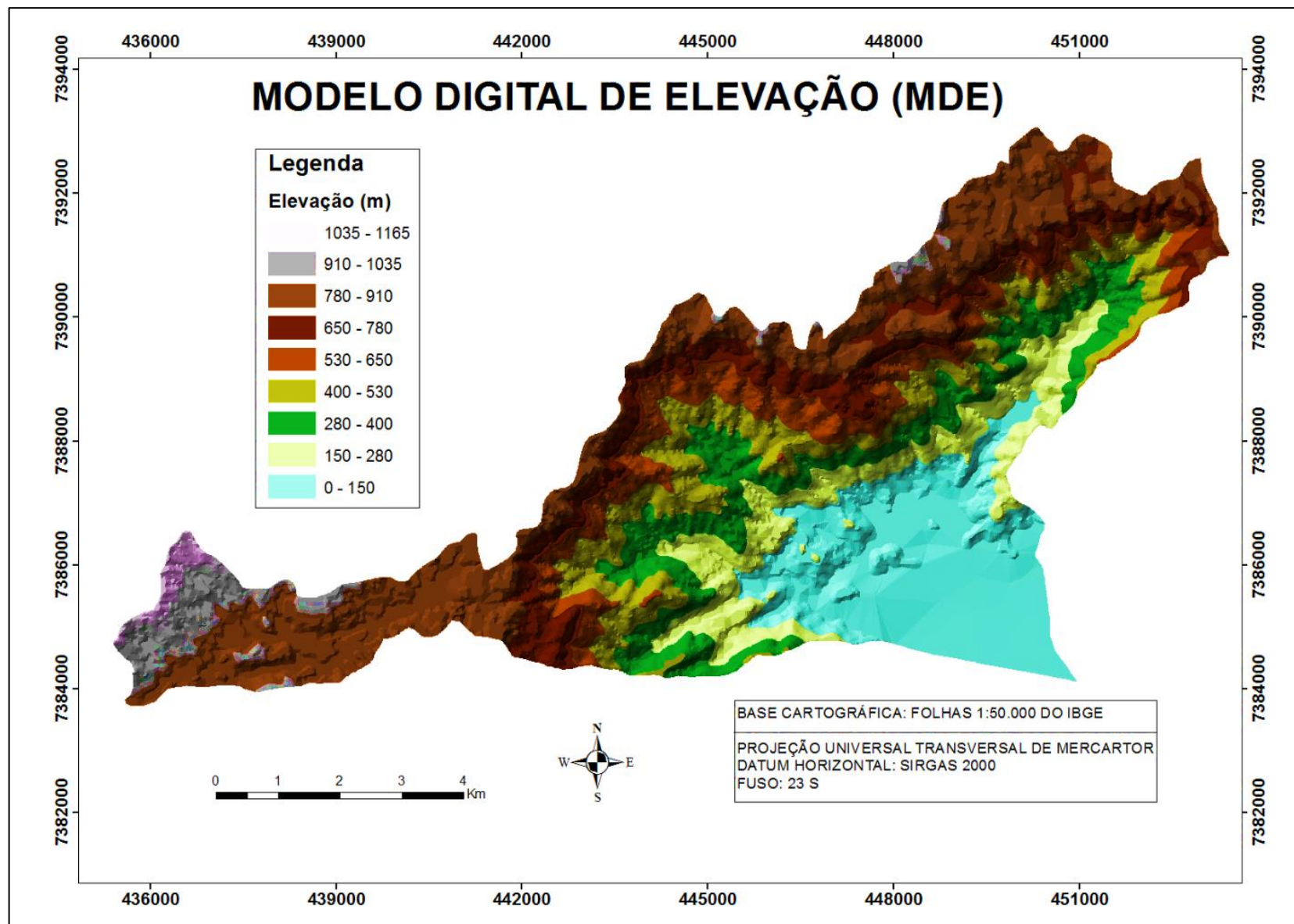
### **5.2.1 Modelo Digital de Elevação (MDE)**

O Modelo Digital de Elevação (Figura 5.3 e 5.4), foi classificado conforme 9 classes de altitude, que abrangem as classes de 0-150 m, 150-280 m, 280-400 m, 400-530 m, 530-650 m, 650-780 m, 780-910 m, 910-1035 m e 1035-1165 m. Conforme o histograma referente ao MDE (Figura 5.5), a classe de elevação que apresentou maior frequência (F) na região compreende o intervalo entre 780 e 910 m. Já a maior concentração de cicatrizes (CC), encontra-se associada a classe entre 150-280 metros.(28%), seguida pelas classes entre 280-400 m (26%) e 400-530 m (24%).

Figura 5.3: Modelo Digital de Elevação das bacias Pau D’Alho e Córrego da Divisa em formato *raster*.

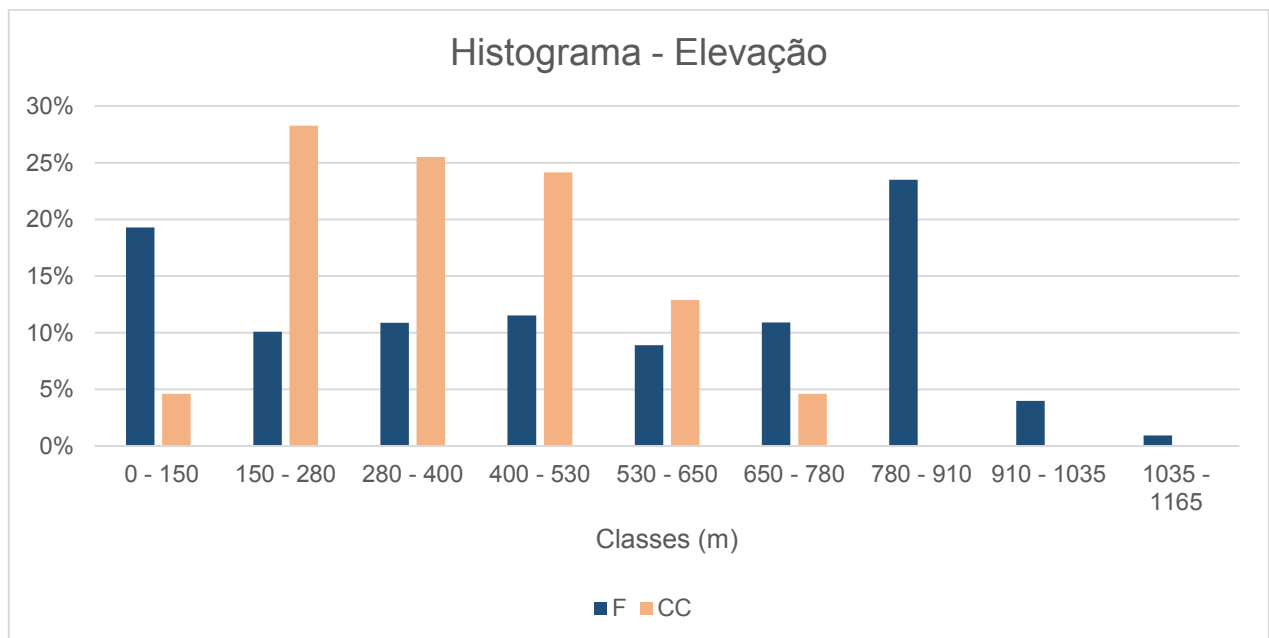


**Figura 5.4:** Modelo Digital de Elevação das bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa em formato *tin*.



Segundo Vieira (2007) o MDE permite uma verificação mais eficaz de feições morfológicas, tais como anfiteatros e distribuição das redes de drenagem, que auxiliam na análise e na interpretação da área em questão. Os parâmetros altimétricos não configuraram um fator determinante em relação a presença de cicatrizes. Neste caso, outros parâmetros topográficos, como a declividade e curvatura, desempenham uma função muito mais influente.

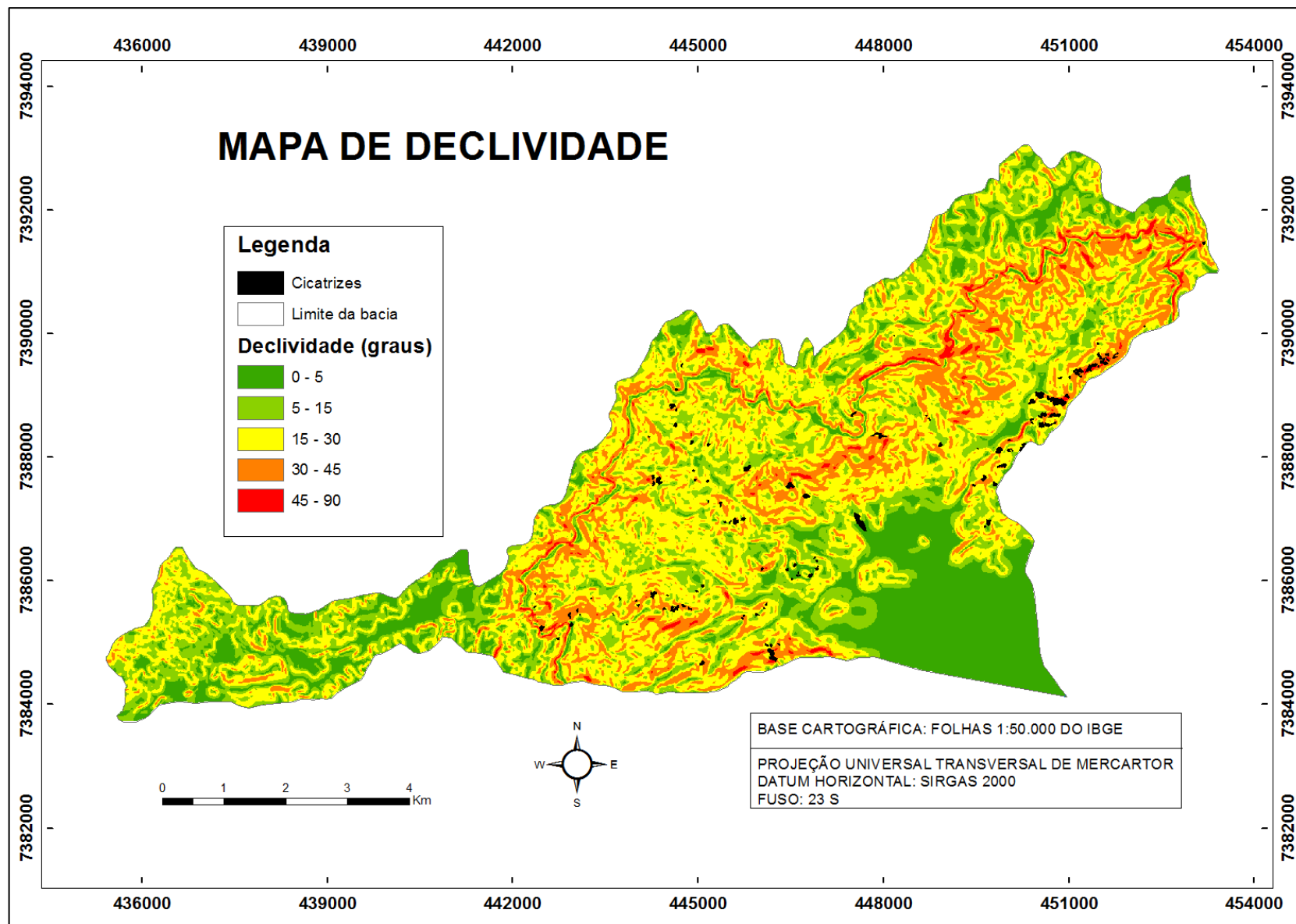
**Figura 5.5:** Histograma referente ao Modelo Digital de Elevação (MDE). Distribuição percentual da Frequência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de elevação.



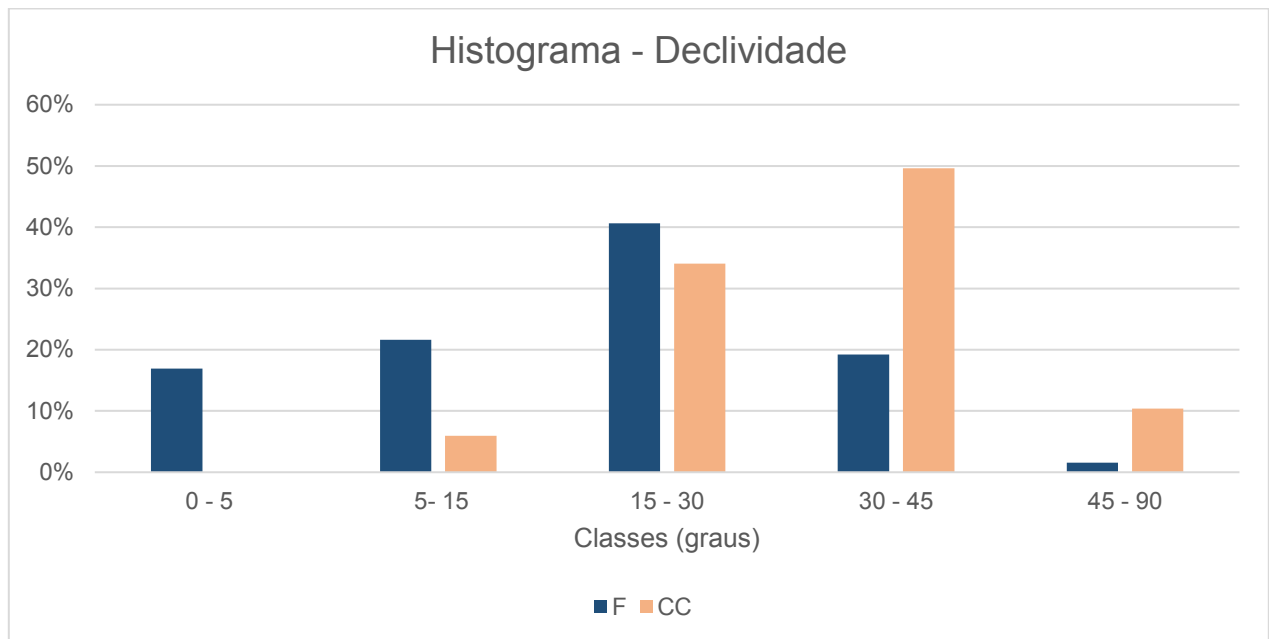
### 5.2.2 Mapa de Declividade

A classe de declividade predominante nas bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa abrange cerca de 41% da área e compreende o intervalo entre 15° a 30° (Figura 5.6 e 5.7). Segundo IPT (1986), de modo geral, existe um predomínio de encostas que possuem ângulo que variam entre 30° e 40° na Serra do Mar. Entretanto, esse intervalo de declividade definido por IPT (1986) representa a classe de declividade com a terceira maior frequência na área de estudo, com cerca de 19%.

**Figura 5.6:** Mapa de Declividade das bacias Pau D’Alho e Córrego da Divisa.



**Figura 5.7:** Histograma referente ao Mapa de Declividade. Distribuição percentual da Freqüência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de declividade.



A classe de declividade alta, que abrange o intervalo entre 30° a 45°, apresenta a maior concentração de cicatrizes (CC) na área. Tal intervalo concentra cerca de 50% de cicatrizes encontradas nas bacias hidrográficas em questão. Lopes (2006) obteve resultados semelhantes ao estudar a concentração de cicatrizes por declividade em bacias localizadas em Cubatão, também inseridas no contexto da Serra do Mar. Ao analisar dois inventários de cicatrizes referentes aos anos de 1985 e 1994, Lopes (2006) obteve uma concentração de cicatrizes para o intervalo entre 30° a 45° de 73,19% em 1985 e de 72,57% em 1994, valores que indicam que neste trabalho a maior concentração de cicatrizes também encontra-se associada a declividades altas.

As demais concentrações de cicatrizes, em relação à proporção das classes de declividade, também se assemelharam aos resultados obtidos por Lopes (2006) como indica a Tabela 5.1.

**Tabela 5.1:** Comparação entre a concentração de cicatrizes descritas no presente trabalho e a concentração de cicatrizes descritas por Lopes (2006).

Classes de declividades (graus)	Área de Estudo	Lopes (2006) – Inventário de 1985	Lopes (2006) – Inventário de 1994
15 – 30	34%	14.52%	17.12%
> 45	10%	11.31%	7.85%
5 -15	6%	0.8%	2.35%
0 -5	0%	0.17%	0.12%

### 5.2.3 Mapa de Contribuição

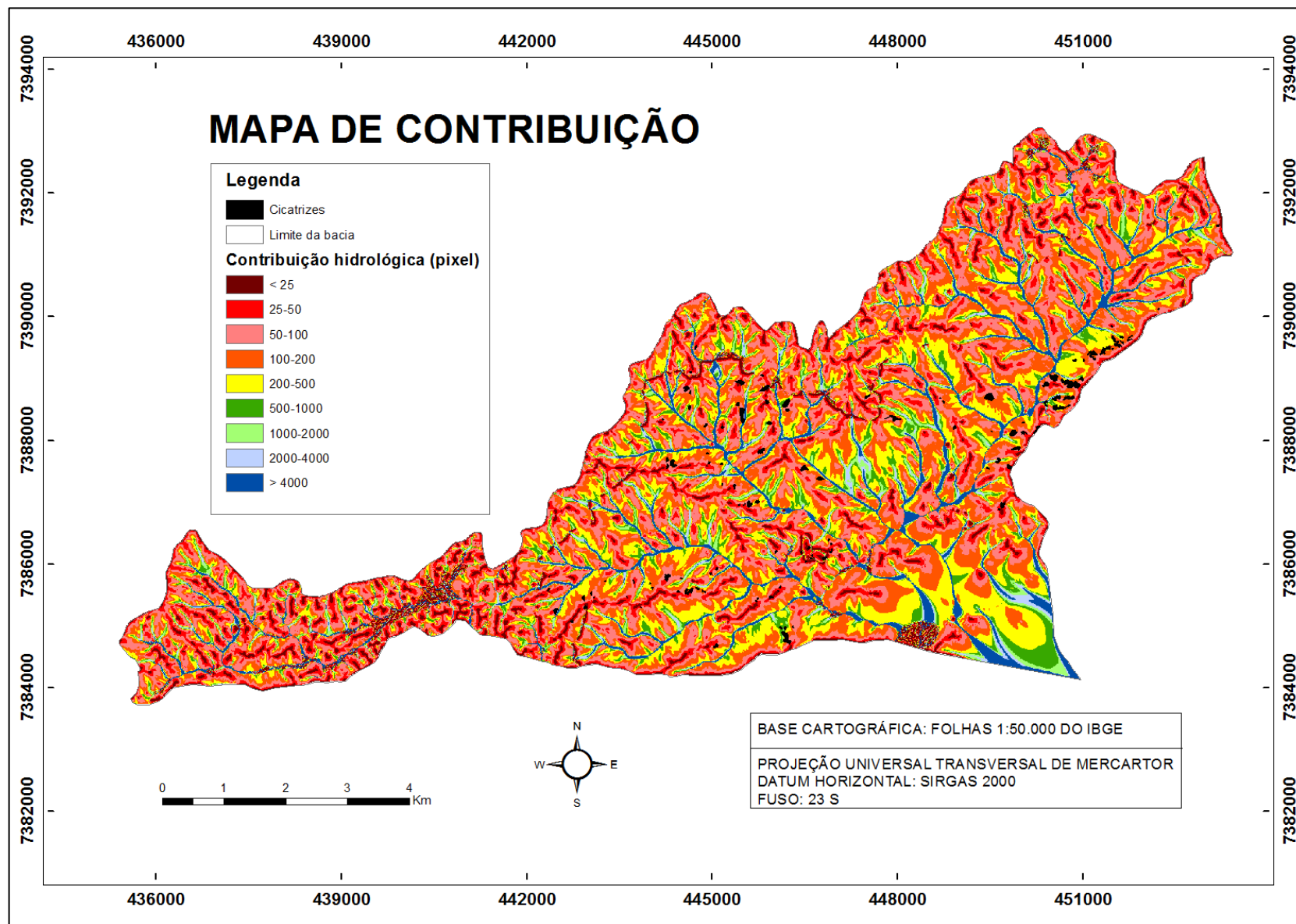
A área de contribuição (Figura 5.8 e 5.9) foi classificada de acordo com o número de *pixels* correspondente a cada classe de contribuição hidrológica. A classe de maior valor de contribuição (> 4000) corresponde as áreas de concentração de fluxo, associadas ao canal principal da bacia e seus afluentes. As classes de contribuição hidrológica que apresentam maior frequência na área de estudo compreendem os intervalos entre 50-100 e 100-200 *pixels*, ambas com 25% de representatividade.

A maior concentração de processos de escorregamentos também encontra-se nas classes de contribuição entre 50-100 e 100-200 *pixels*, onde cada classe concentra cerca de 33% das cicatrizes presentes na área.

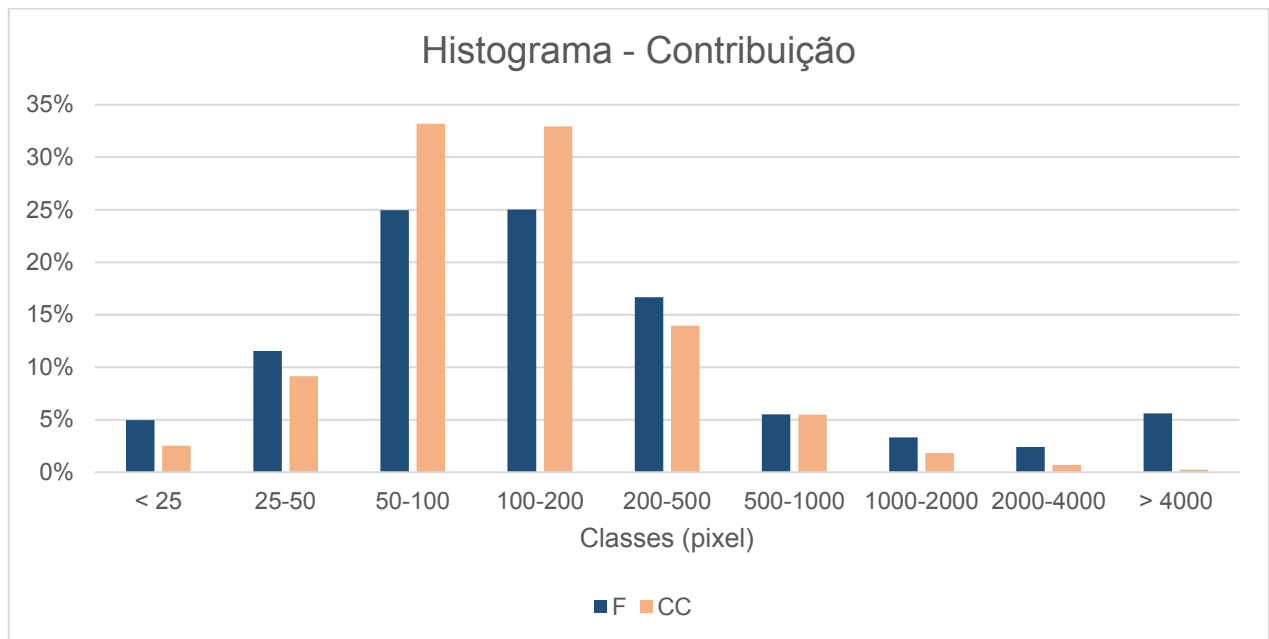
### 5.3 Cenários de suscetibilidade

O principal resultado pretendido no presente trabalho consiste na elaboração de mapas de suscetibilidade das bacias Pau D'Alho e Córrego da Divisa, conforme parâmetros geotécnicos do solo descritos no Capítulo 3 e a partir do modelo SHALSTAB. Para tanto, simulou-se 14 cenários que serão discutidos e avaliados a seguir. Para cada cenário foi analisada tanto a distribuição das categorias de suscetibilidade, representadas pelo  $\log(q/T)$ , quanto os percentuais da concentração de cicatrizes (CC).

**Figura 5.8:** Mapa de contribuição das bacias Pau D’Alho e Córrego da Divisa.



**Figura 5.9:** Histograma referente ao Mapa de Contribuição. Distribuição percentual da Frequência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de contribuição.

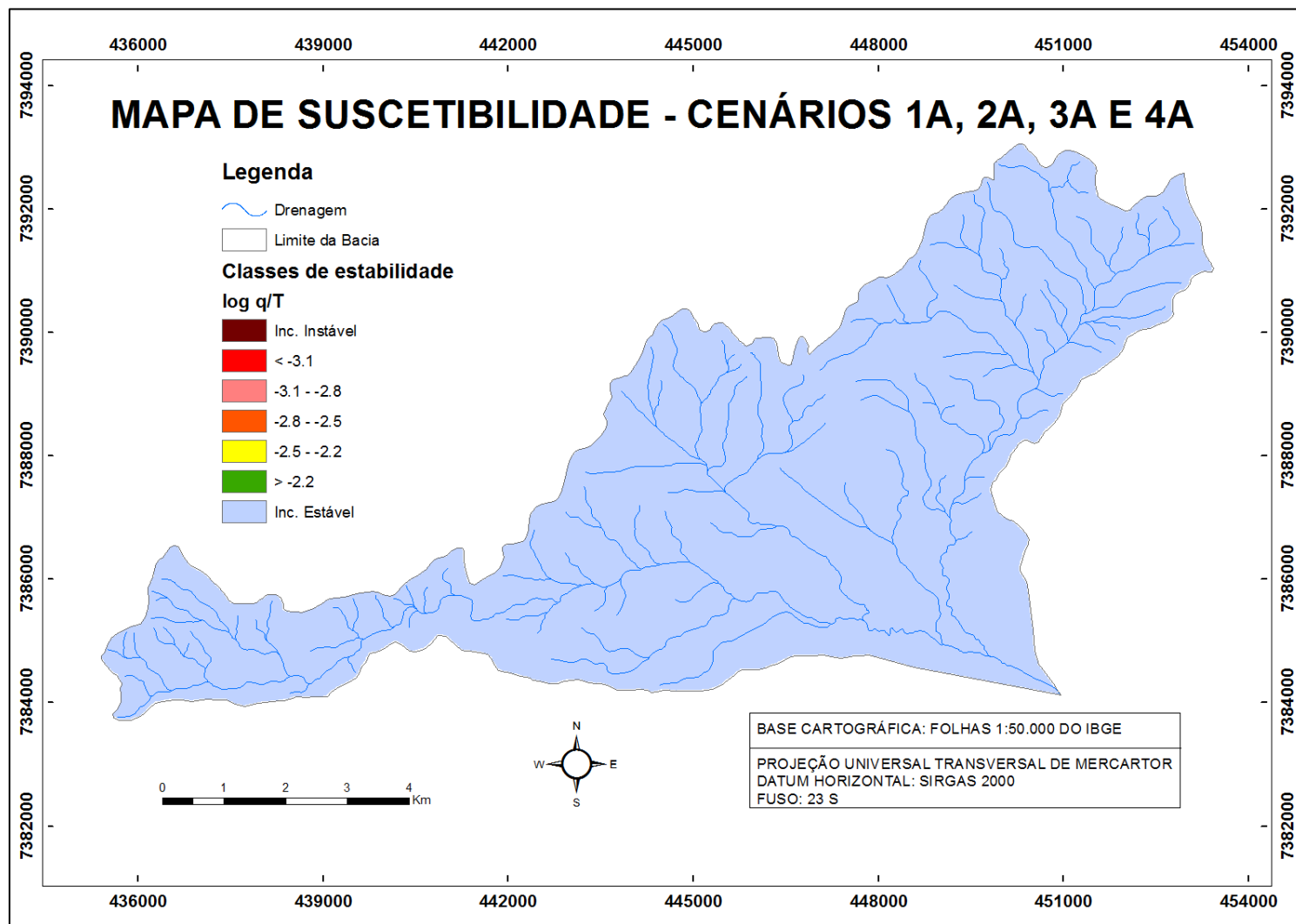


### 5.3.1 Cenários fundamentados em Wolle (1988)

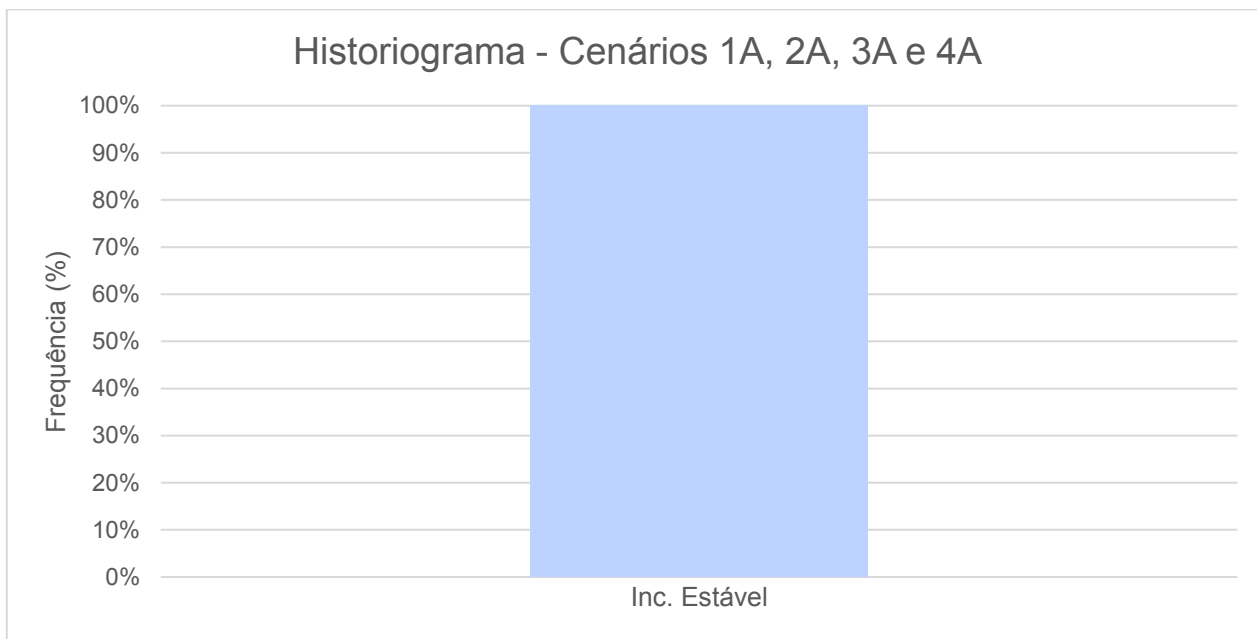
#### 5.3.1.1 Cenários 1A, 2A, 3A e 4A

Este grupo de cenários apresenta parâmetros geotécnicos referentes a amostras não saturadas. Esta condição proporciona mudanças significativas em relação à previsão de suscetibilidade, visto que, nestes cenários, os solos são caracterizados pela ausência de água e pelo alto valor de coesão (6000 N/m<sup>2</sup>, 12000 N/m<sup>2</sup>, 9500 N/m<sup>2</sup> e 11000, respectivamente), que garantem uma maior resistência do solo. A simulação dos cenários 1A, 2A, 3A e 4A classificou, exclusivamente, as bacias Rio Pau D'Alho e Córrego da Divisa como incondicionalmente estável (Figura 5.10 e 5.11). Desse modo, tornou-se inviável validar os cenários de acordo com as cicatrizes encontradas na área.

**Figura 5.10:** Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas dos cenários 1A, 2A, 3A e 4A. **1A** ( $c = 6000 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1430 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m;  $\Phi = 34^\circ$ ); **2A** ( $c = 12000 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1800 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m;  $\Phi = 45^\circ$ ); **3A** ( $c = 9500 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1650 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m;  $\Phi = 40^\circ$ ) e **4A** ( $c = 11000 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1850 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m;  $\Phi = 45^\circ$ ).



**Figura 5.11:** Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas dos cenários 1A, 2A, 3A e 4A. **1A** ( $c = 6000 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1430 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m;  $\Phi = 34^\circ$ ); **2A** ( $c = 12000 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1800 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m;  $\Phi = 45^\circ$ ); **3A** ( $c = 9500 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1650 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m;  $\Phi = 40^\circ$ ) e **4A** ( $c = 11000 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1850 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m;  $\Phi = 45^\circ$ ).



### 5.3.1.2 Cenários 1B, 2B, 3B e 4B

Este grupo de cenários configura mapas de suscetibilidade elaborados sob condições geotécnicas e hidrológicas saturadas. Segundo Wolle e Carvalho (1994), os parâmetros de resistência do solo são bastante afetados quando há um aumento no grau de saturação dos mesmos, proporcionado por intensos eventos pluviométricos. Desse modo, o efeito do encharcamento do solo possibilita uma redução nos parâmetros de resistência do solo, principalmente na coesão, ocasionando na eliminação da parcela de resistência resultante das “tensões de sucção”, que prevalecem nos solos insaturados. Tais autores ainda ressaltam que esta redução da resistência é suficiente para promover a instabilização das encostas.

Através das Figuras 5.12, 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19, constatou-se que a classe incondicionalmente estável fez-se predominante nos quatro cenários gerados. Esta condição pode estar associada aos parâmetros de declividade, visto que a classe incondicionalmente estável encontra-se associada a áreas com declividades

predominantemente muito baixas (0-5 graus) e baixas (5-15 graus). A classe incondicionalmente instável, no geral, apresenta-se bem marcada em todos os cenários e está relacionada a classes de declividade que variam de muito altas (> 45 graus) a altas (30-45 graus) e altitudes acima de 150 metros.

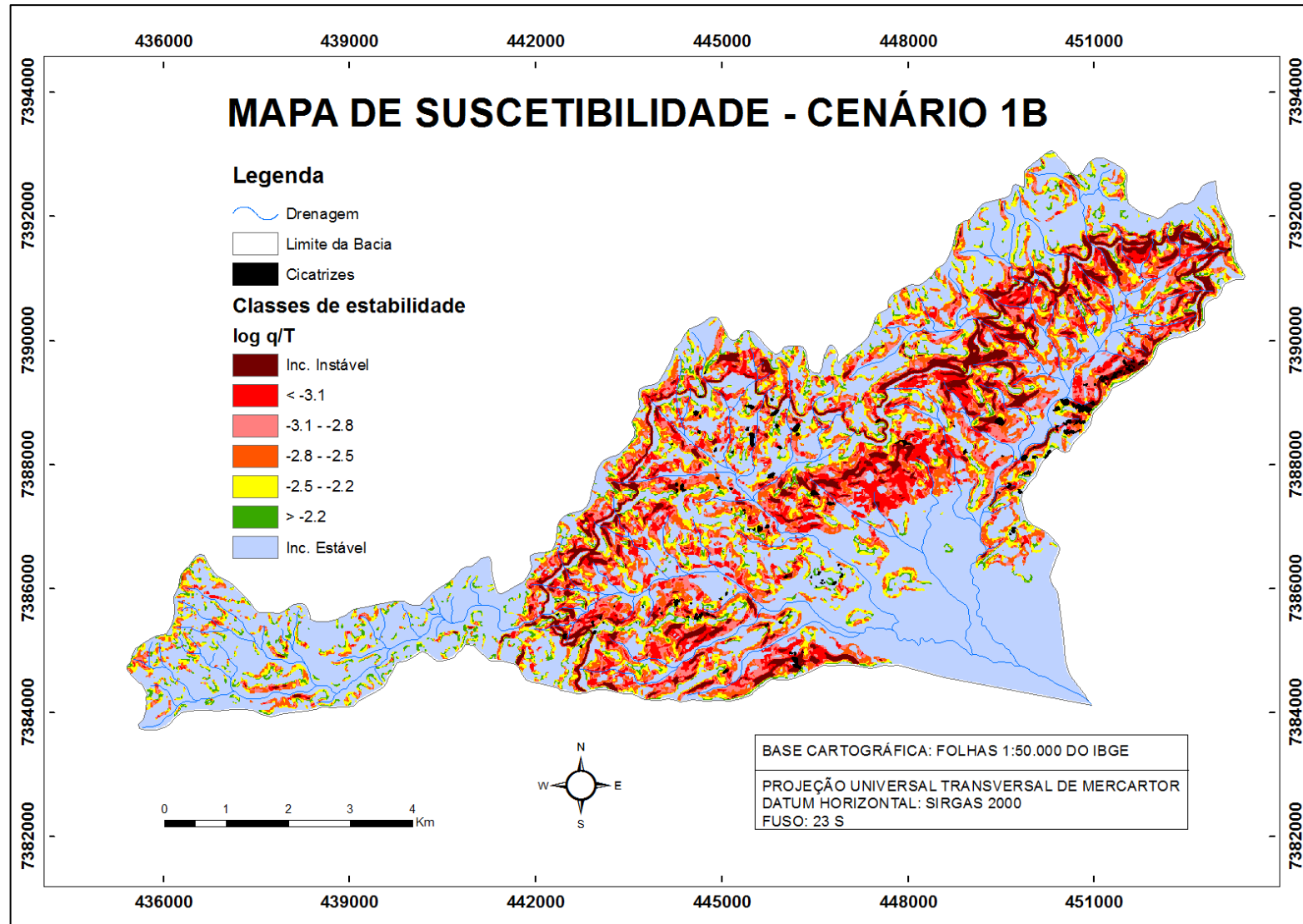
Os cenários 1B (Figura 5.12 e Figura 5.14 ) e 3B (Figura 5.13 e Figura 5.15) apresentam maior frequência das classes incondicionalmente instável,  $\log q/T < -3.1$ ,  $\log q/T$  entre  $-3.1$  e  $-2.8$  e  $\log q/T$  entre  $-2.8$  e  $-2.5$ , classes classificadas como instáveis, quando comparados aos demais cenários inseridos nesta categoria. Tal fator pode estar associado aos menores valores dos parâmetros de resistência que estes cenários apresentam em relação aos restantes, como o valor de coesão ( $1000 \text{ N/m}^2$ ) e ângulo de atrito ( $34^\circ$  e  $36^\circ$ , respectivamente). Cabe destacar que, quando comparados, o cenário 1B apresenta uma maior frequência das classes incondicionalmente instável e  $\log q/T < -3.1$ , em relação ao cenário 3B. Esta diferença pode ser atribuída ao menor ângulo de atrito ( $34^\circ$ ) que o cenário 1B apresenta em relação ao 3B ( $36^\circ$ ).

Ao comparar o mapa de suscetibilidade do cenário 1B com a concentração de cicatrizes oriundas da área de estudo, observou-se que, na grande maioria, as feições de escorregamento encontram-se relacionadas as áreas definidas como instáveis (60%), onde a classe incondicionalmente instável apresenta-se predominante (21%). Ainda assim, uma parcela das cicatrizes encontra-se relacionada a classes de estabilidade definidas como estáveis (40%), comprometendo a validação do modelo.

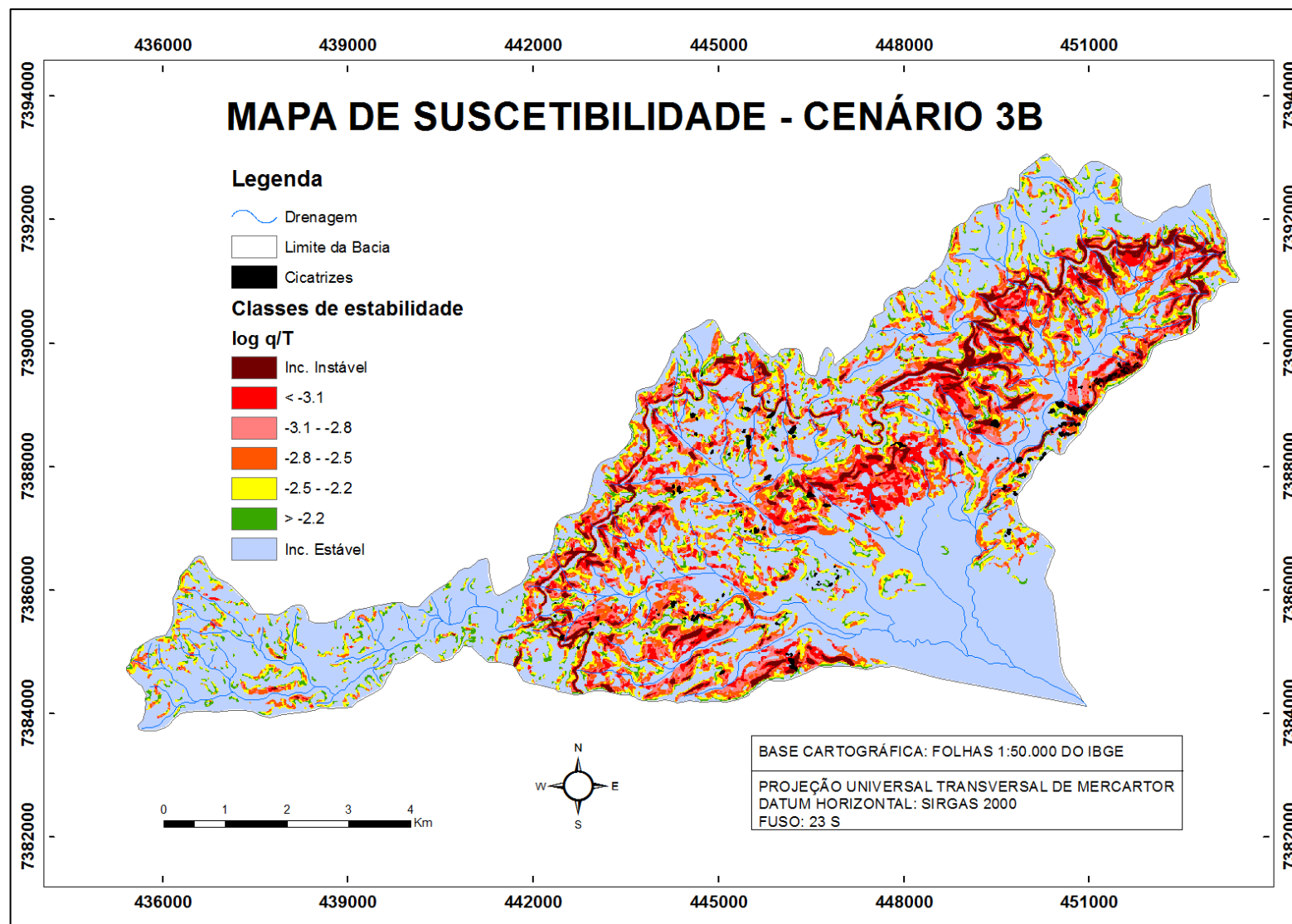
O cenário 2B (Figura 5.16 e Figura 5.18 ), similarmente ao cenário 4B (Figura 5.17 e Figura 5.19), apresenta uma menor frequência das classes instáveis, que estão restritas a áreas com declividade alta a muito alta. Esta característica pode estar associada aos maiores valores dos parâmetros geotécnicos de resistência, que abrangem os valores de coesão ( $4000 \text{ N/m}^2$  e  $35000 \text{ N/m}^2$ , respectivamente) e de ângulo de atrito ( $39^\circ$ ).

Quanto a correlação entre os mapas de suscetibilidade dos cenários 2B, 3B e 4B e a concentração de cicatrizes, é possível observar que as feições de escorregamento encontram-se distribuídas principalmente na classe incondicionalmente estável, com cerca de 50%, 26% e 49% das cicatrizes, respectivamente, encontradas nessa classe em questão.

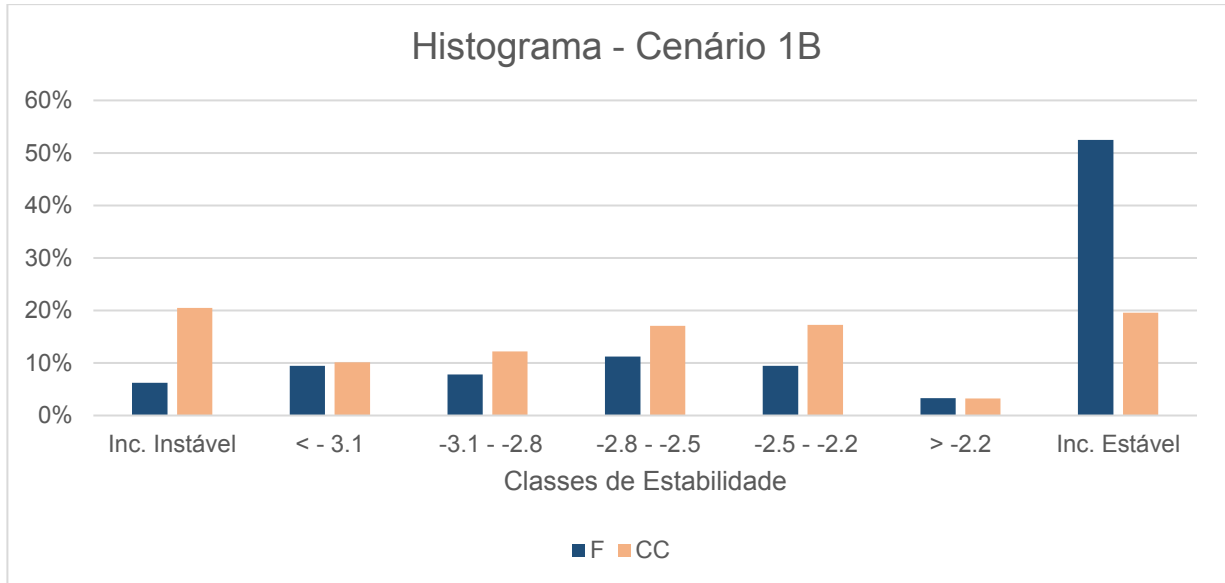
**Figura 5.12:** Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário **1B** ( $c = 1000$  N/m<sup>2</sup>;  $\gamma = 1710$  kg/m<sup>3</sup>; espessura = 1 m;  $\Phi = 34^\circ$ ).



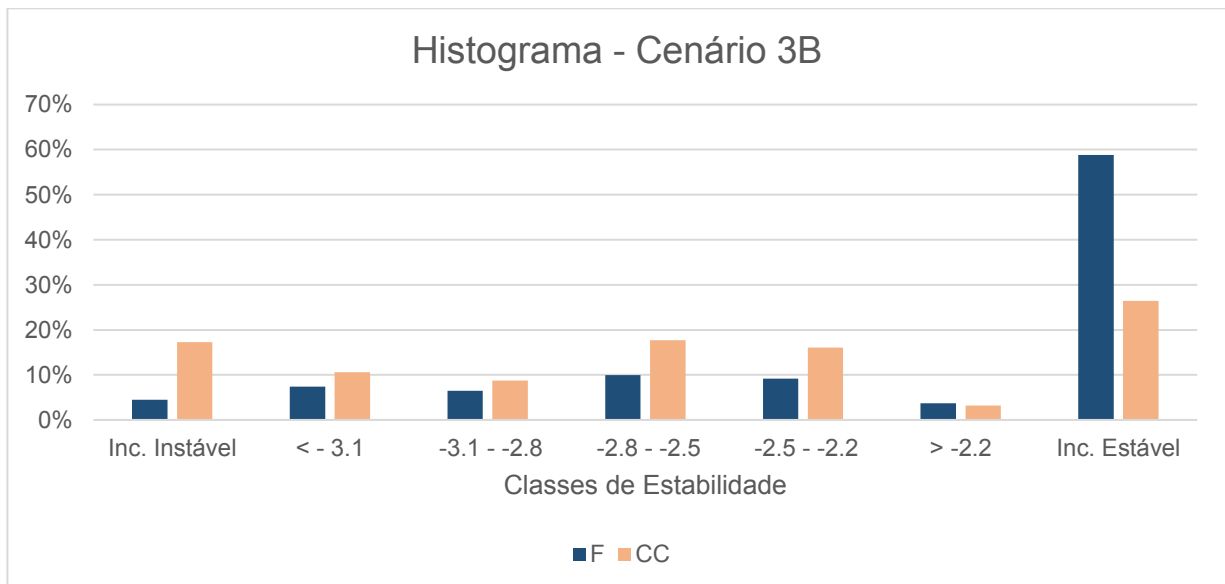
**Figura 5.13:** Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário **3B** ( $c = 1000 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1820 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m;  $\Phi = 36^\circ$ ).



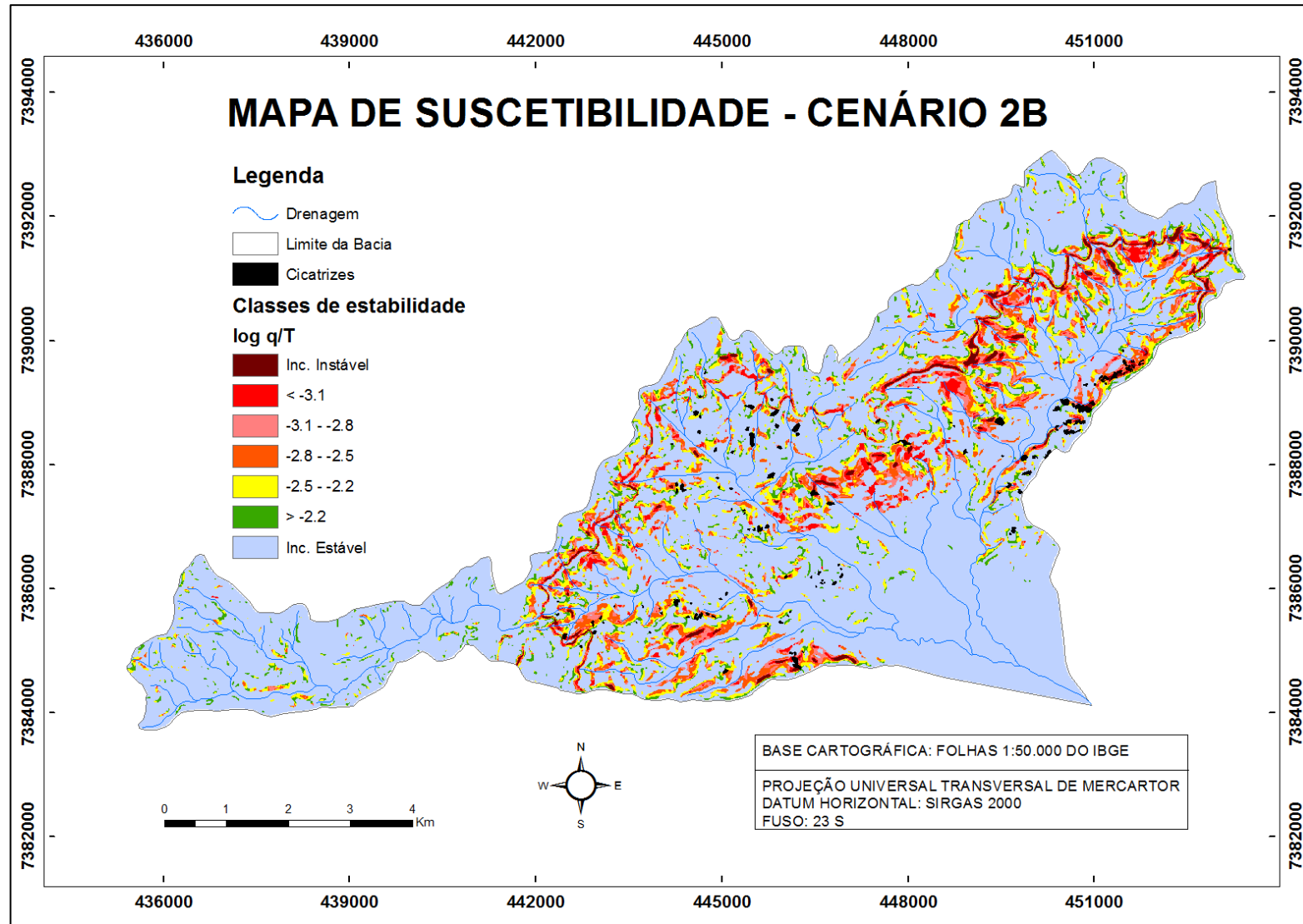
**Figura 5.14:** Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário **1B** ( $c = 1000 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1710 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m;  $\Phi = 34^\circ$ ). Distribuição percentual da Frequência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade.



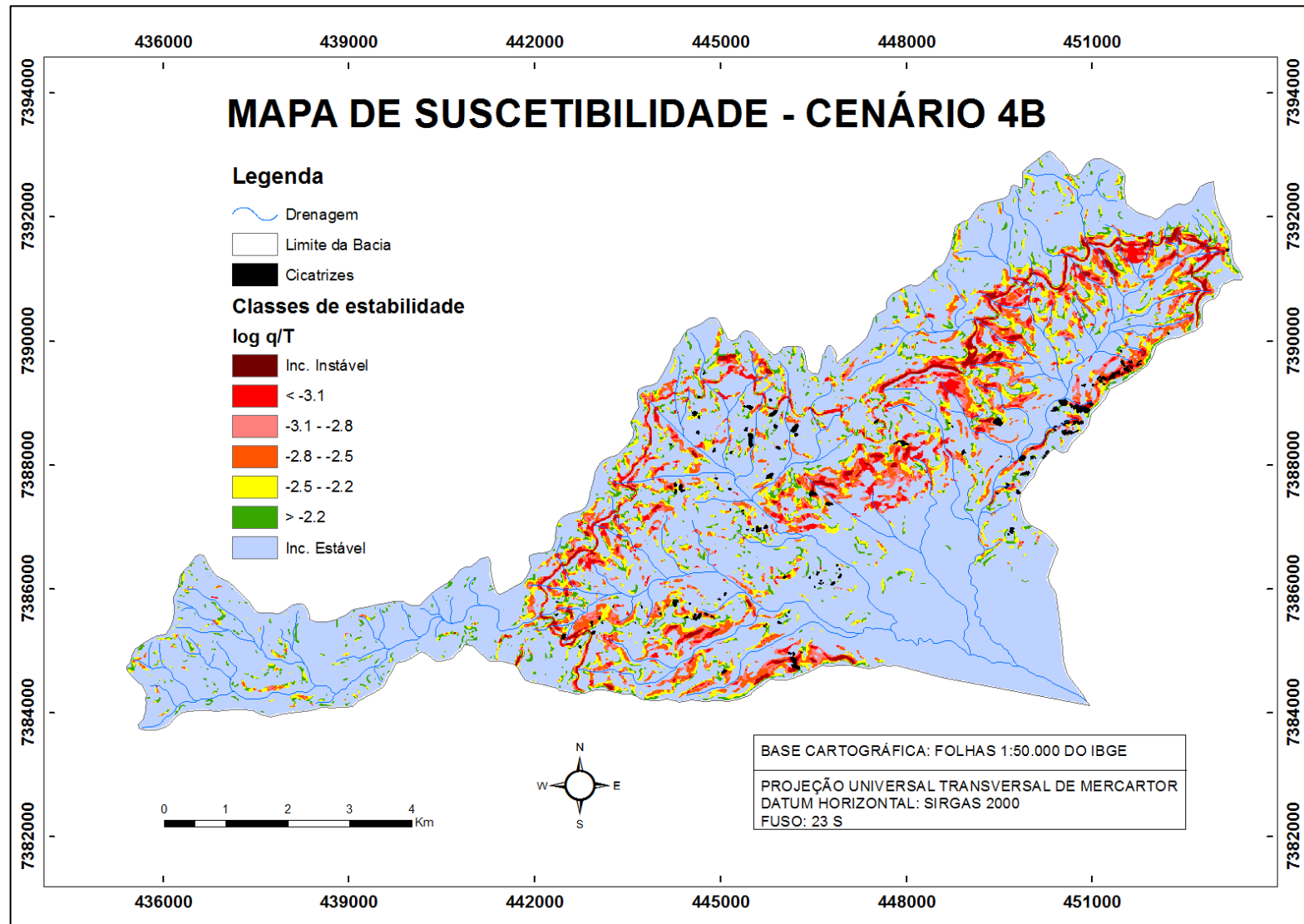
**Figura 5.15:** Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas dos cenários **3B** ( $c = 1000 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1820 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m;  $\Phi = 36^\circ$ ). Distribuição percentual da Frequência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade.



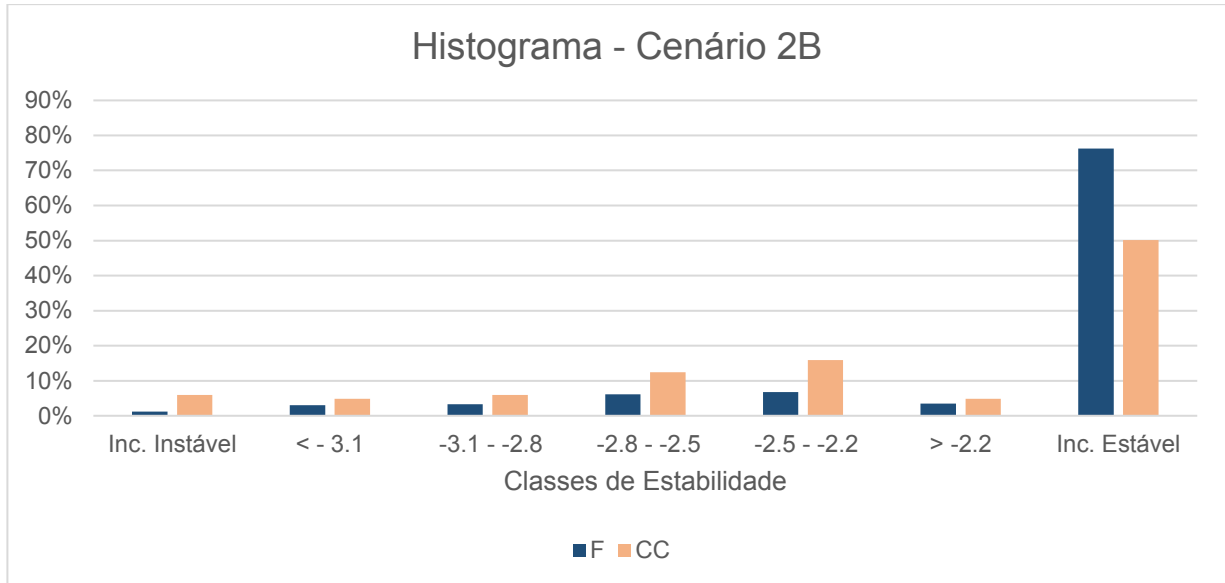
**Figura 5.16:** Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário **2B** ( $c = 4000$  N/m<sup>2</sup>;  $\gamma = 1950$  kg/m<sup>3</sup>; espessura = 2 m;  $\Phi = 39^\circ$ ).



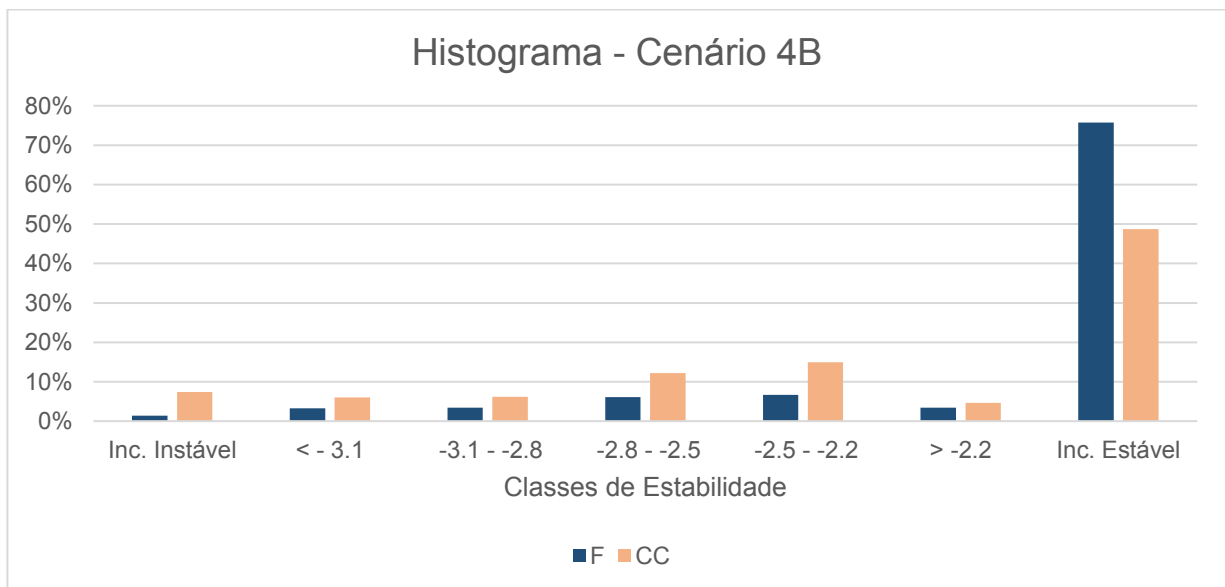
**Figura 5.17:** Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário **4B** ( $c = 3500$  N/m<sup>2</sup>;  $\gamma = 2010$  kg/m<sup>3</sup>; espessura = 2 m;  $\Phi = 39^\circ$ ).



**Figura 5.18:** Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 2B ( $c = 4000 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1950 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m;  $\Phi = 39^\circ$ ). Distribuição percentual da Frequência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade.



**Figura 5.19:** Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 4B ( $c = 3500 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 2010 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m;  $\Phi = 39^\circ$ ). Distribuição percentual da Frequência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade.



Cabe ressaltar que, neste grupo de cenários, fundamentados nos ensaios geotécnicos realizados por Wolle (1988), a simulação 1B foi definida como a situação

que melhor representou a condição real das bacias, visto que as feições de escorregamento se enquadram predominantemente nas zonas instáveis, principalmente na classe incondicionalmente instável.

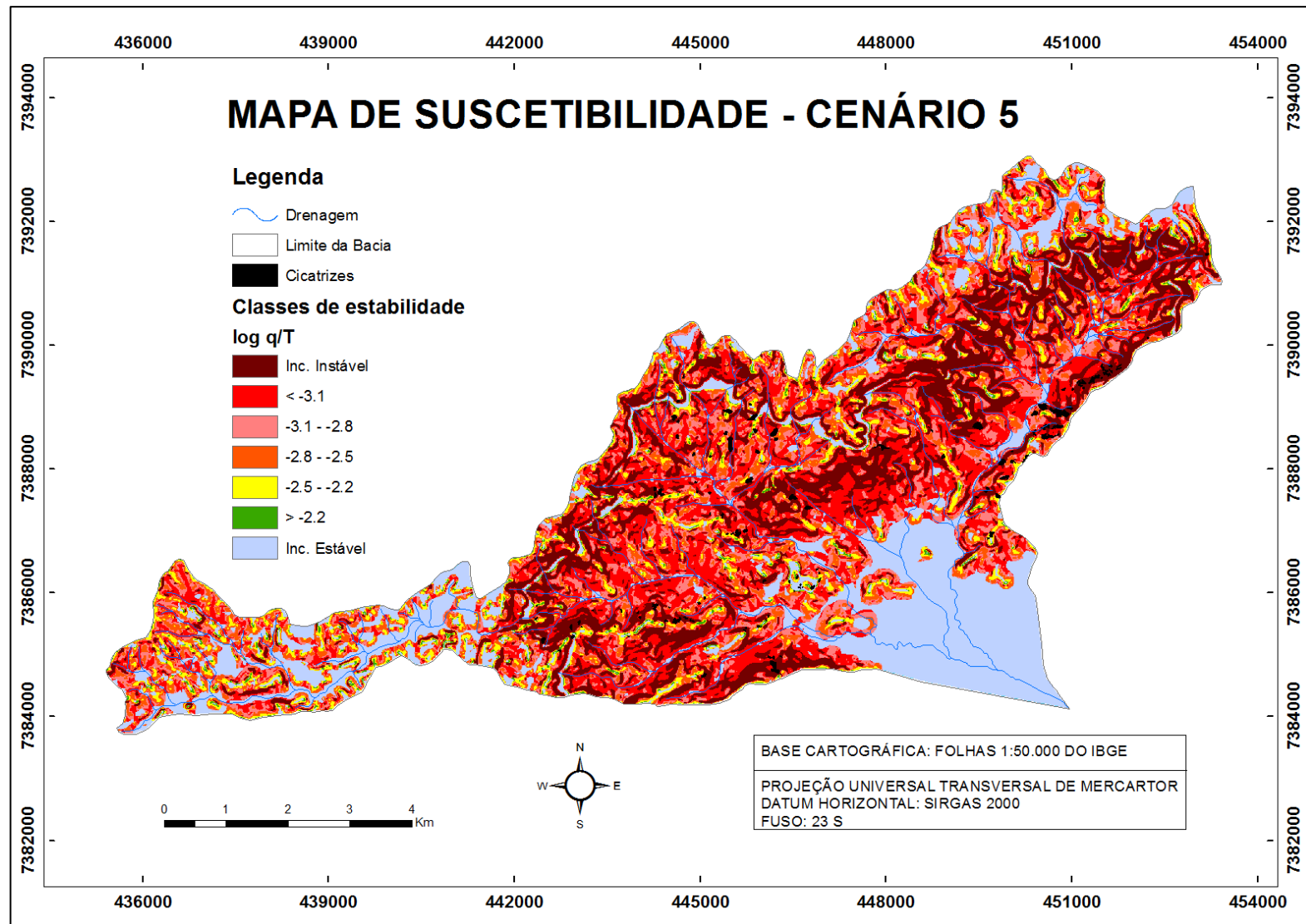
### 5.3.2 Cenários fundamentados em Ferreira (2013)

Este grupo de cenários é marcado pela notável influência dos parâmetros de resistência do solo, representados pelos valores de coesão e ângulo de atrito. A diminuição destes valores, devido a ações naturais e/ou antrópicas, acarreta na redução da resistência ao cisalhamento do solo, ocasionando o aumento da suscetibilidade a escorregamentos nas bacias.

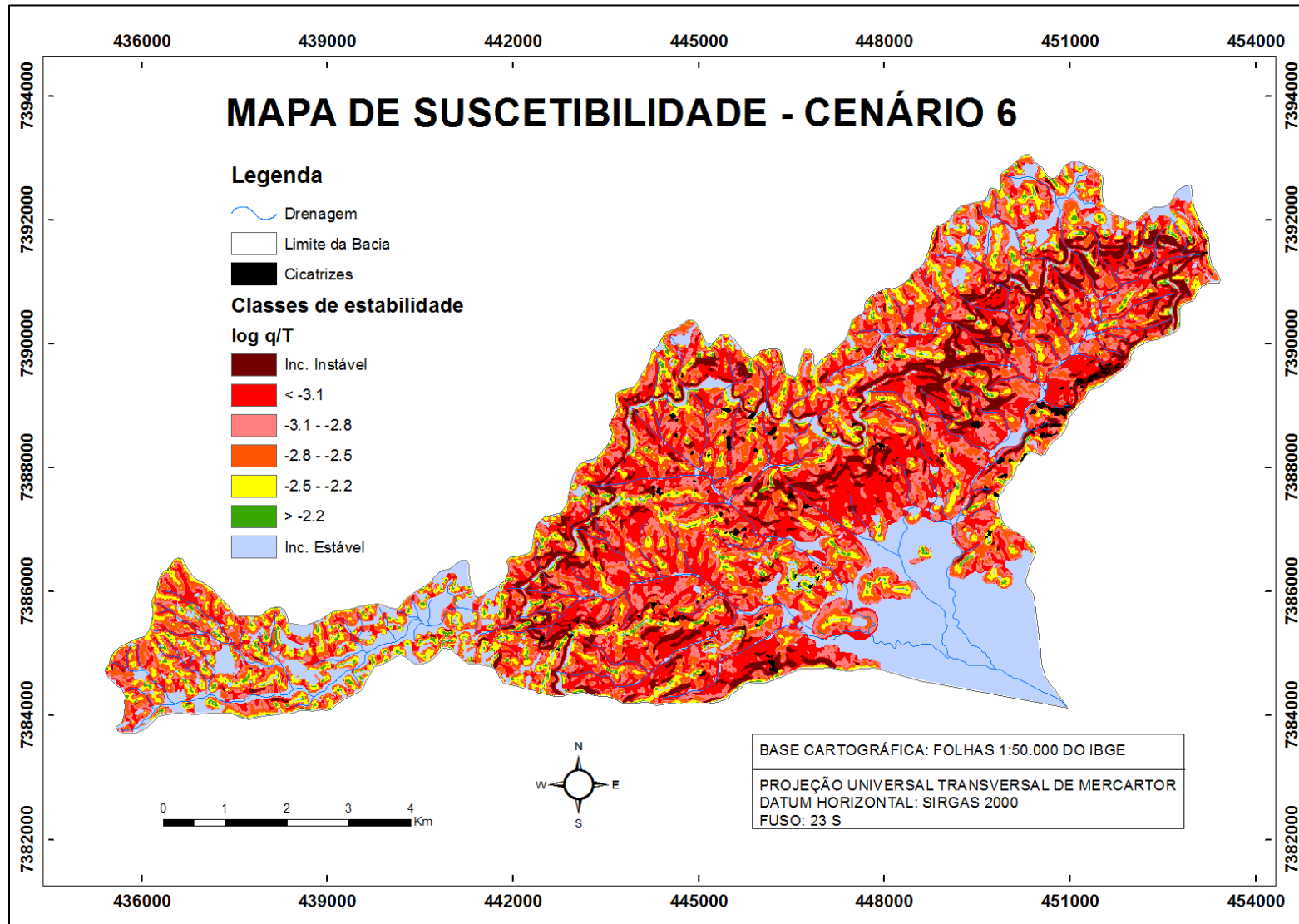
Os cenários 5 (Figura 5.20 e 5.24 ), 6 (Figura 5.21 e 5.25) , 9 (5.22 e 5.26) e 10 (5.23 e 5.27), apresentam uma maior frequência das classes instáveis, onde a classe incondicionalmente instável e não saturado ( $\log q/T < -3.1$ ) se faz predominante. Somadas, as classes instáveis (incondicionalmente instável,  $\log q/T < -3.1$ ,  $\log q/T$  entre -3.1 e -2.8 e  $\log q/T$  entre -2.8 e -2.5) perfazem cerca de 70% da área nas quatro simulações. Esta superestimação das classes instáveis é causada pelos valores de coesão nulos (cenários 5, 9 e 10) a baixos (1119 N/m<sup>2</sup> no cenário 6). Quando comparados ao mapa de declividade, os quatro cenários concentram as classes instáveis em valores de ângulo de encosta que variam de médios (15-30°) a muito altos (> 45 °). Os mapas de suscetibilidade apresentaram uma distribuição espacial bastante similar em relação as classes estáveis, que compõem cerca de 30% da área.

As feições de escorregamento, nestes cenários, concentram-se, em sua grande maioria, nas classes instáveis (em média 87%), sendo mais frequentes na classe incondicionalmente instável. Resultados similares foram descritos por Gomes (2006) em duas bacias hidrográficas, rio Quitite e Papagaio, localizadas no município do Rio de Janeiro (RJ).

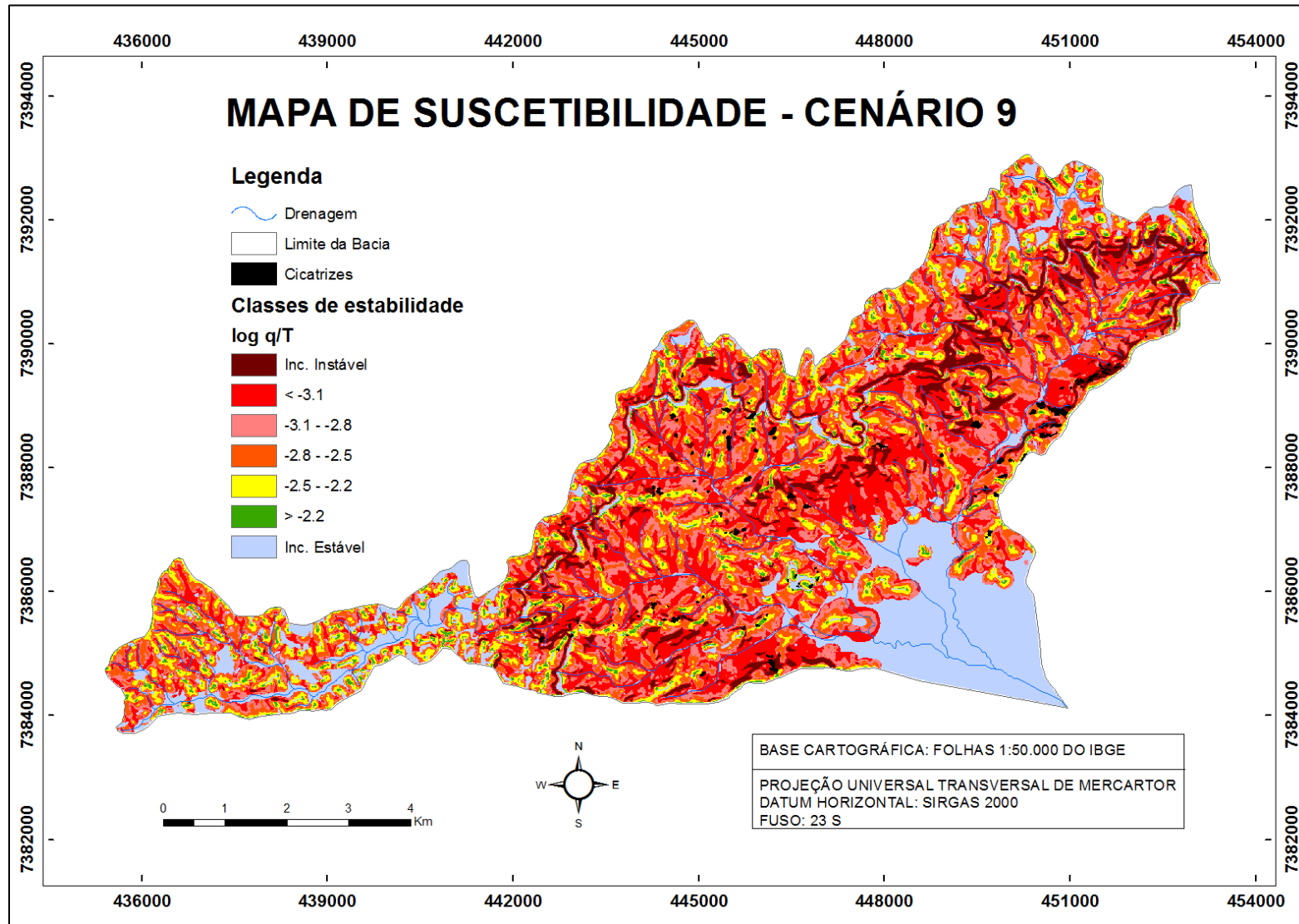
**Figura 5.20:** Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 5 ( $c = 0 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1240 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m;  $\Phi = 29^\circ$ ).



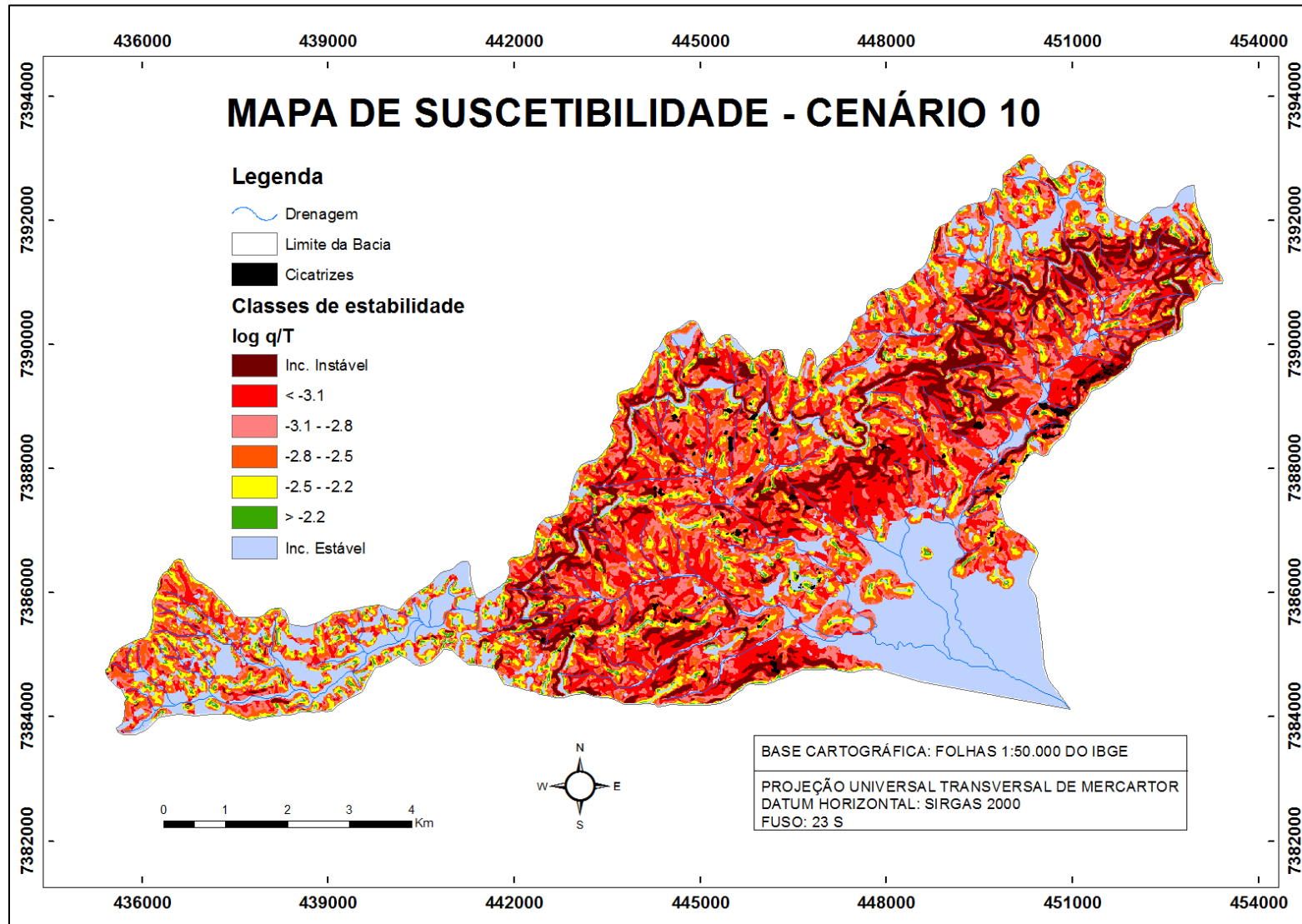
**Figura 5.21:** Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 6 ( $c = 1199 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1050 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m;  $\Phi = 32^\circ$ ).



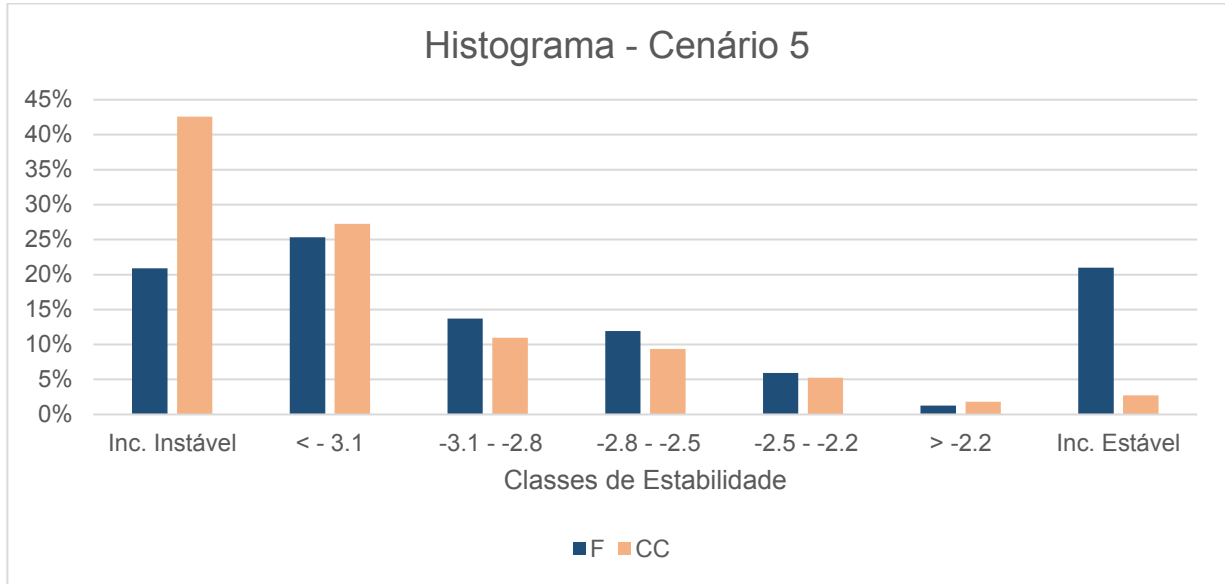
**Figura 5.22:** Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 9 ( $c = 0 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1110 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m;  $\Phi = 37^\circ$ ).



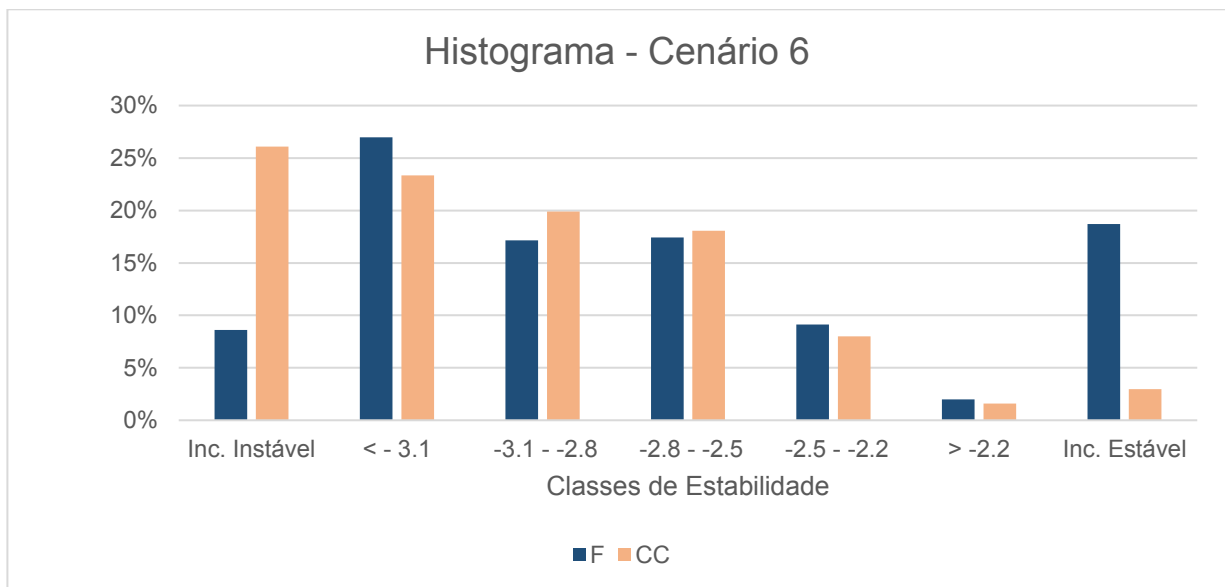
**Figura 5.23:** Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário **10** ( $c = 0 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1210 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m;  $\Phi = 34^\circ$ ).



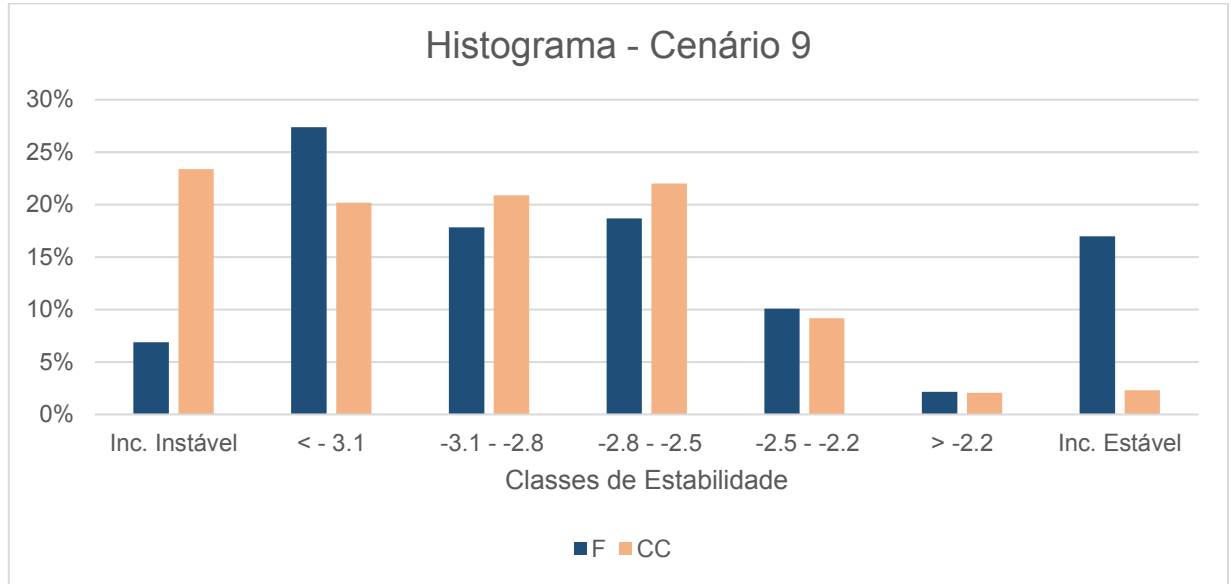
**Figura 5.24:** Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 5 ( $c = 0 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1240 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m;  $\Phi = 29^\circ$ ). Distribuição percentual da Frequência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade.



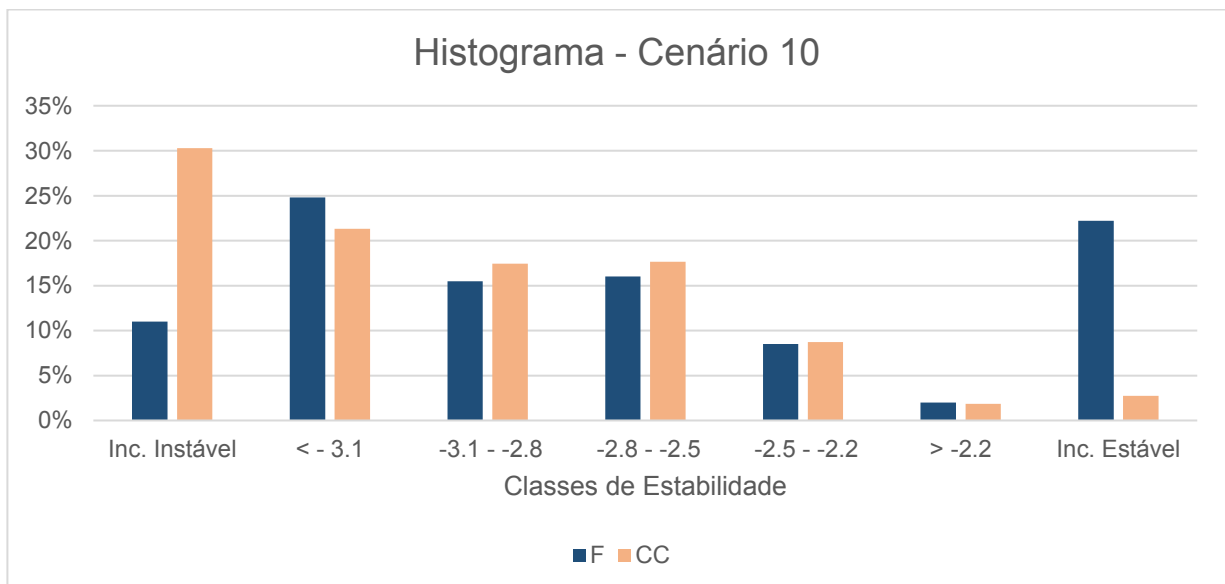
**Figura 5.25:** Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 6 ( $c = 1199 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1050 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m;  $\Phi = 32^\circ$ ). Distribuição percentual da Frequência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade.



**Figura 5.26:** Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 9 ( $c = 0 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1110 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m;  $\Phi = 37^\circ$ ). Distribuição percentual da Frequência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade.



**Figura 5.27:** Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 10 ( $c = 0 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1210 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m;  $\Phi = 34^\circ$ ). Distribuição percentual da Frequência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade.

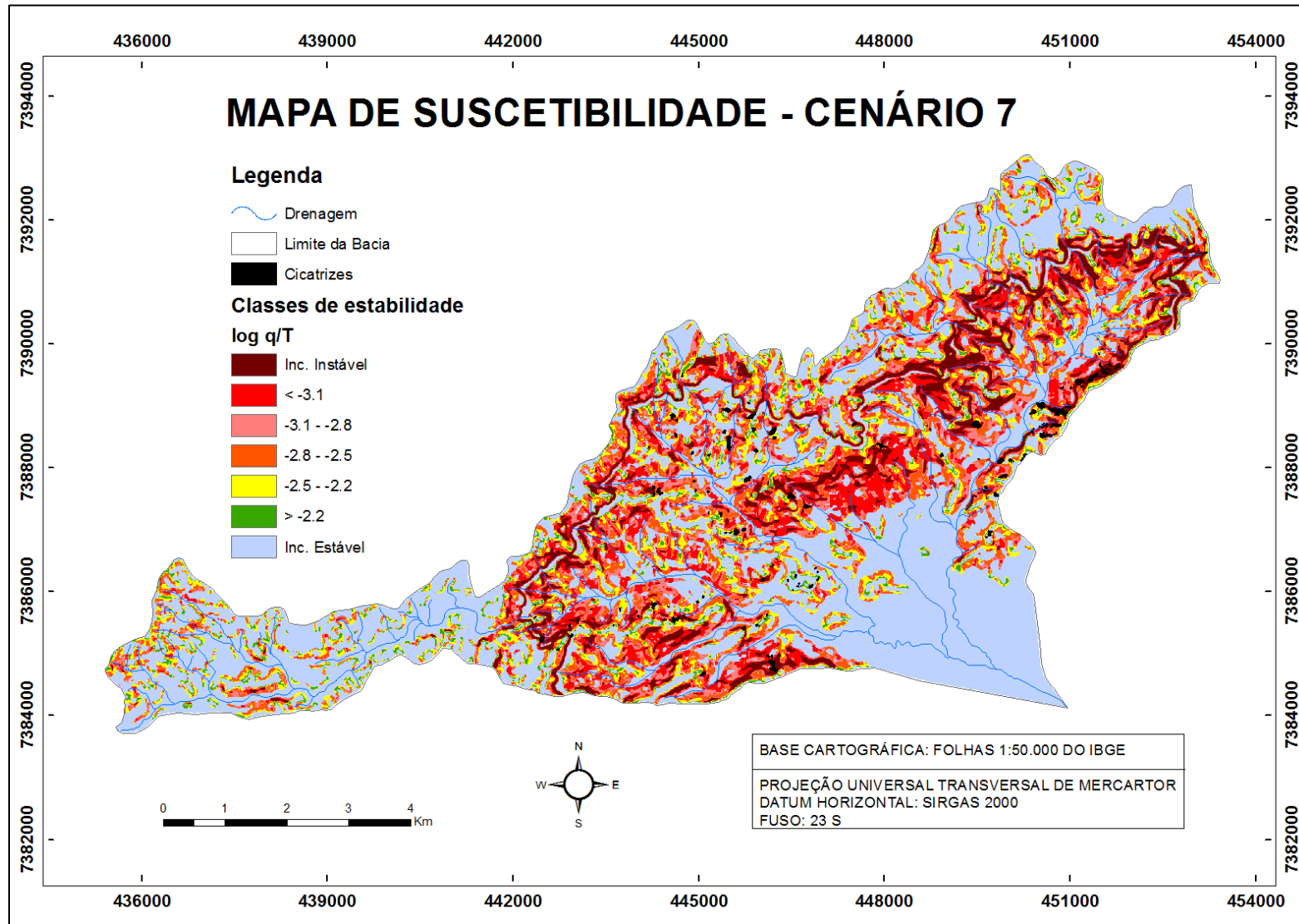


O autor simulou dois cenários a partir de duas condições (com coesão e com coesão nula), com base em 89 escorregamentos ocorridos em 1996. O resultado obtido previu para o cenário sem coesão que 97% dos escorregamentos ocorreram em áreas instáveis. O cenário com coesão concentrou 99% das cicatrizes em áreas instáveis, resultado que demonstrou um alto desempenho do modelo.

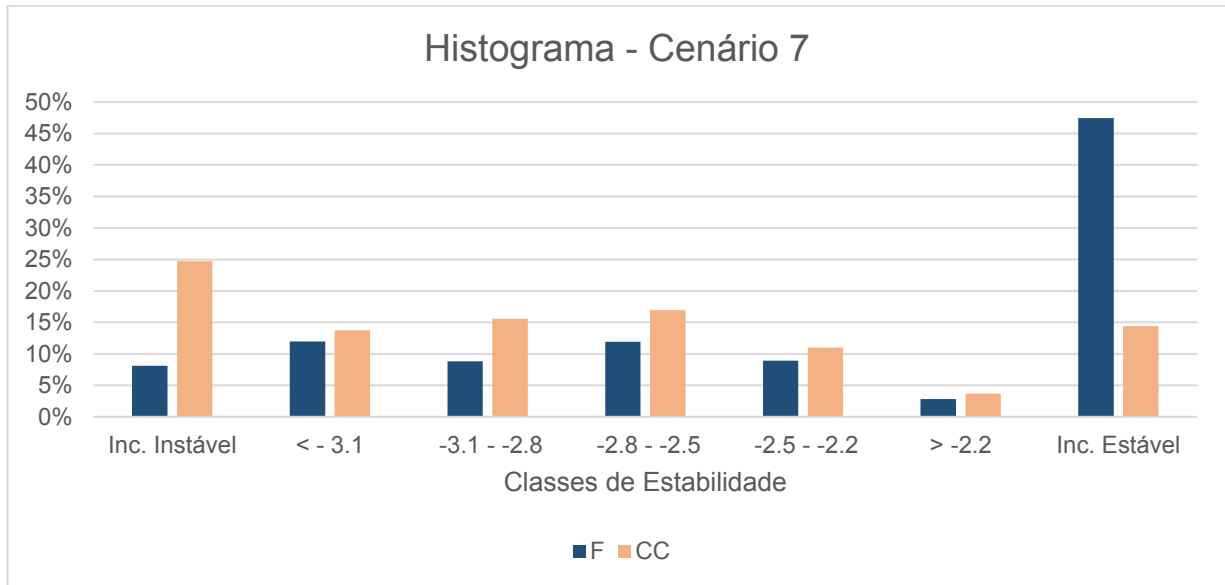
O cenário 7 (Figura 5.28 e 5.29) é baseado em um valor maior de coesão (2160 N/m<sup>2</sup>) em relação aos cenários citados anteriormente nesta categoria, fator que explica a menor frequência de classes instáveis nesta simulação. Dentre as classes estáveis, a classe incondicionalmente estável apresentou-se como a mais frequente neste cenário, ocupando 47% da área. As classes instáveis (incondicionalmente instável,  $\log q/T < -3.1$ ,  $\log q/T$  entre -3.1 e -2.8 e  $\log q/T$  entre -2.8 e -2.5), quando somadas, perfazem cerca de 41% do cenário, sendo que a classe incondicionalmente instável e não saturado ( $\log q/T < -3.1$ ) se faz a mais frequente. Em relação a concentração de cicatrizes (CC), cerca de 72% das feições de escorregamento encontram-se associadas as classes instáveis, sendo elas: 25% (incondicionalmente instável), 14% ( $\log q/T < -3,1$ ), 16% ( $\log q/T -3,1$  à -2,8) e 17 ( $\log q/T -2,8$  à -2,5). Cerca de 29% das cicatrizes se concentram nas classes estáveis, sendo elas 14% (incondicionalmente estável), 4% ( $\log Q/T > -2,2$ ) e 11% ( $\log Q/T -2,5$  à -2,2).

Vieira e Ramos (2015) aplicaram o modelo SHALSTAB na bacia do rio Guaxinduba e obtiveram como resultado 55% das cicatrizes concentradas em áreas instáveis, sendo a classe incondicionalmente instável a que apresentou maior concentração das feições de escorregamento (16,2%). Cabe ressaltar que, de certa forma, os resultados obtidos por estes autores apresentaram suma importância neste trabalho, visto que os parâmetros geotécnicos do solo, obtidos na literatura, se referem a bacia do rio Guaxinduba, como mencionado no Capítulo 3. Vieira (2007), ao aplicar o modelo na bacia Copebrás, inserida no município de Cubatão, obteve uma concentração de cicatrizes de 66% nas áreas instáveis, resultado que também se aproxima do cenário 7. Por fim, o cenário 8 (Figura 5.30 e 5.31) assemelha-se aos cenários não saturados descritos por Wolle (1988), devido a alta coesão que este cenário apresenta (11057 N/m<sup>2</sup>). Por este motivo, a área foi classificada exclusivamente como incondicionalmente estável e também não foi possível validar as cicatrizes.

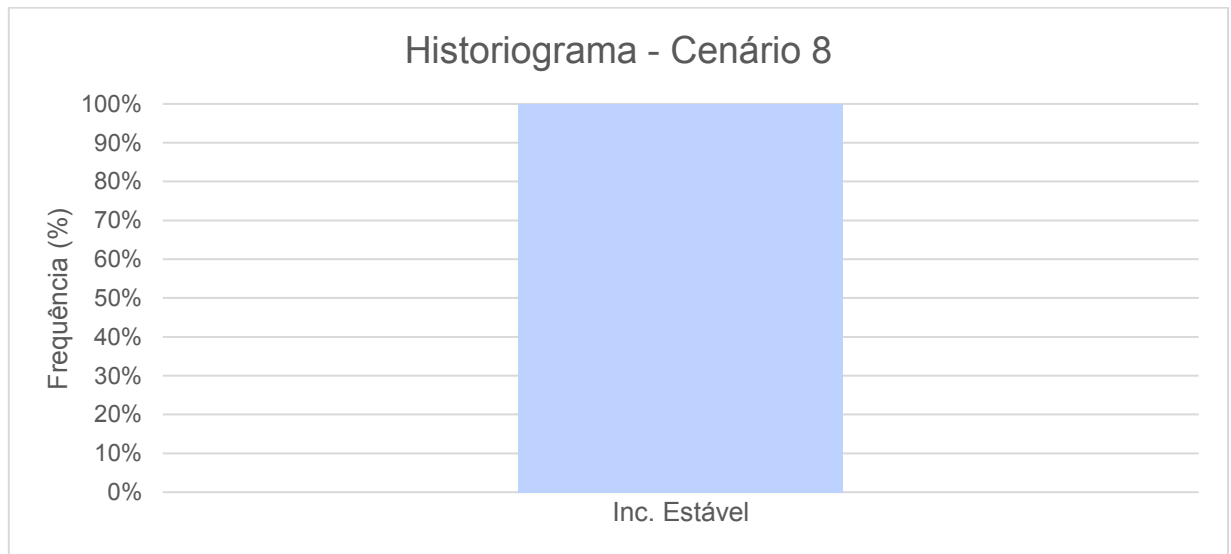
**Figura 5.28:** Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 7 ( $c = 2160 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1410 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m;  $\Phi = 26^\circ$ ).



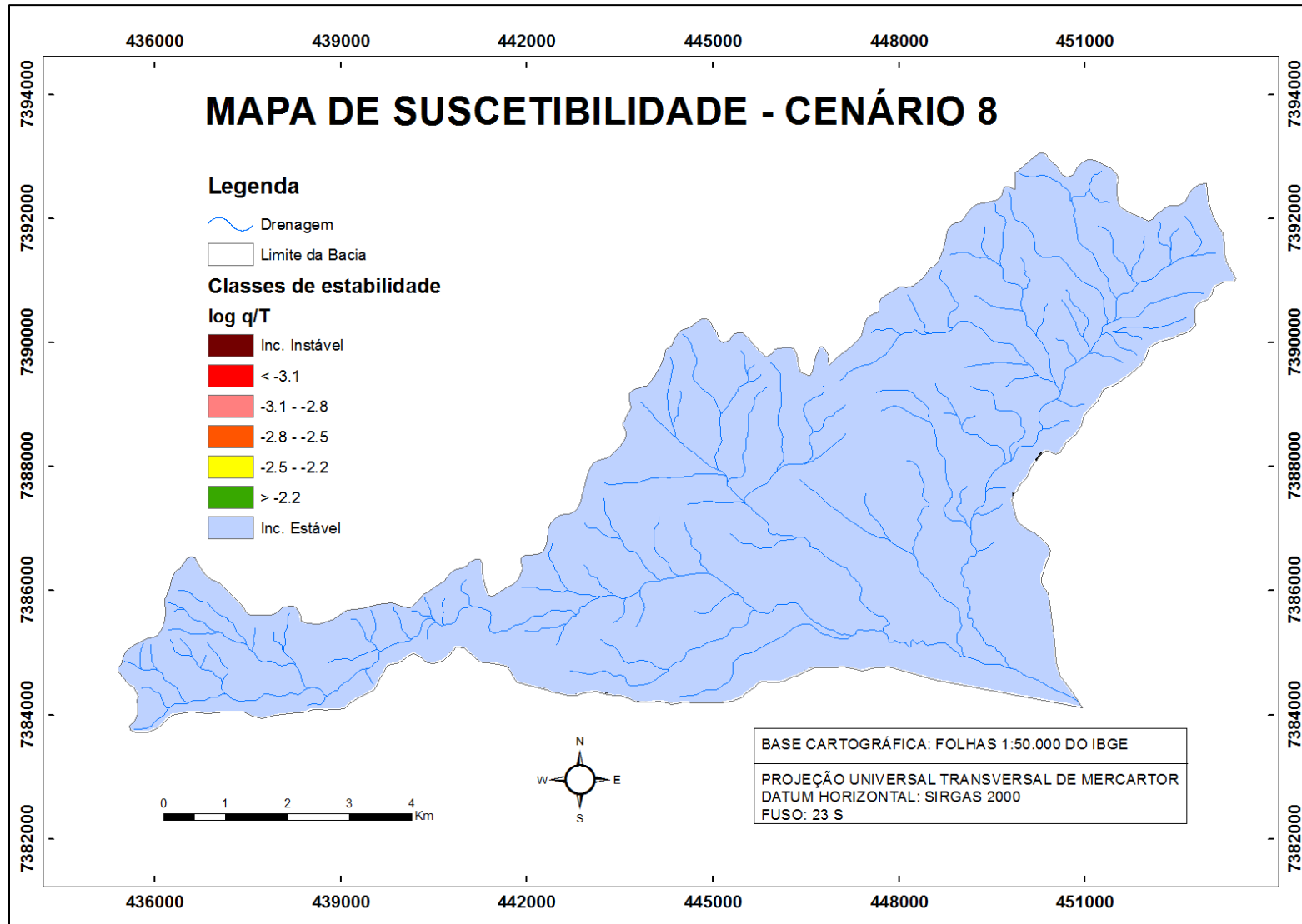
**Figura 5.29:** Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 7 ( $c = 2160 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1410 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 1 m;  $\Phi = 26^\circ$ ). Distribuição percentual da Frequência (F) e da Concentração de Cicatrizes (CC) para cada uma das classes de estabilidade.



**Figura 5.30:** Histograma referente às condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 8 ( $c = 11057 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1060 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m;  $\Phi = 37^\circ$ ).



**Figura 5.31:** Mapa de suscetibilidade simulado pelo modelo SHALSTAB sob as condições hidrológicas e geotécnicas do cenário 8 ( $c = 11057 \text{ N/m}^2$ ;  $\gamma = 1060 \text{ kg/m}^3$ ; espessura = 2 m;  $\Phi = 37^\circ$ ).



### 5.3.3 Comparação entre os mapas de suscetibilidade

Os parâmetros de resistência do solo, como os valores de coesão e ângulo de atrito interno, foram os fatores que mais influenciaram nos resultados obtidos. Ao comparar os cenários gerados pelo modelo SHALSTAB notou-se que, quando os valores de coesão foram elevados, os mapas de suscetibilidade apresentaram áreas incondicionalmente estáveis cada vez mais expressivas. Desse modo, os cenários que apresentam altos valores de coesão (1A, 2A, 3A, 4A e 8), foram classificados como exclusivamente incondicionalmente estáveis. Em contrapartida, quando os valores de coesão foram bruscamente reduzidos, ou apresentaram valores nulos, os mapas de suscetibilidade apresentaram classes instáveis cada vez mais abundantes, resultando na superestimação do modelo. Os cenários 5,6,9 e 10 se enquadram nesta situação.

Em relação ao ângulo interno, notou-se uma redução das classes estáveis quando o valor desse parâmetro foi diminuído, fator evidenciado pela comparação entre os cenários 1B e 3B. A declividade também configura um parâmetro importante na determinação das classes de estabilidade. Quando os valores de coesão não se encontram muito altos, as classes instáveis se associam, principalmente, as declividades altas ( $30^{\circ}$ - $45^{\circ}$ ) a muito altas ( $> 45^{\circ}$ ). Em relação aos valores de coesão baixos ou nulos, as áreas instáveis ainda se associam as classes médias de declividade ( $15^{\circ}$ - $30^{\circ}$ ). Já as classes estáveis estão associadas aos valores baixos de declividade.

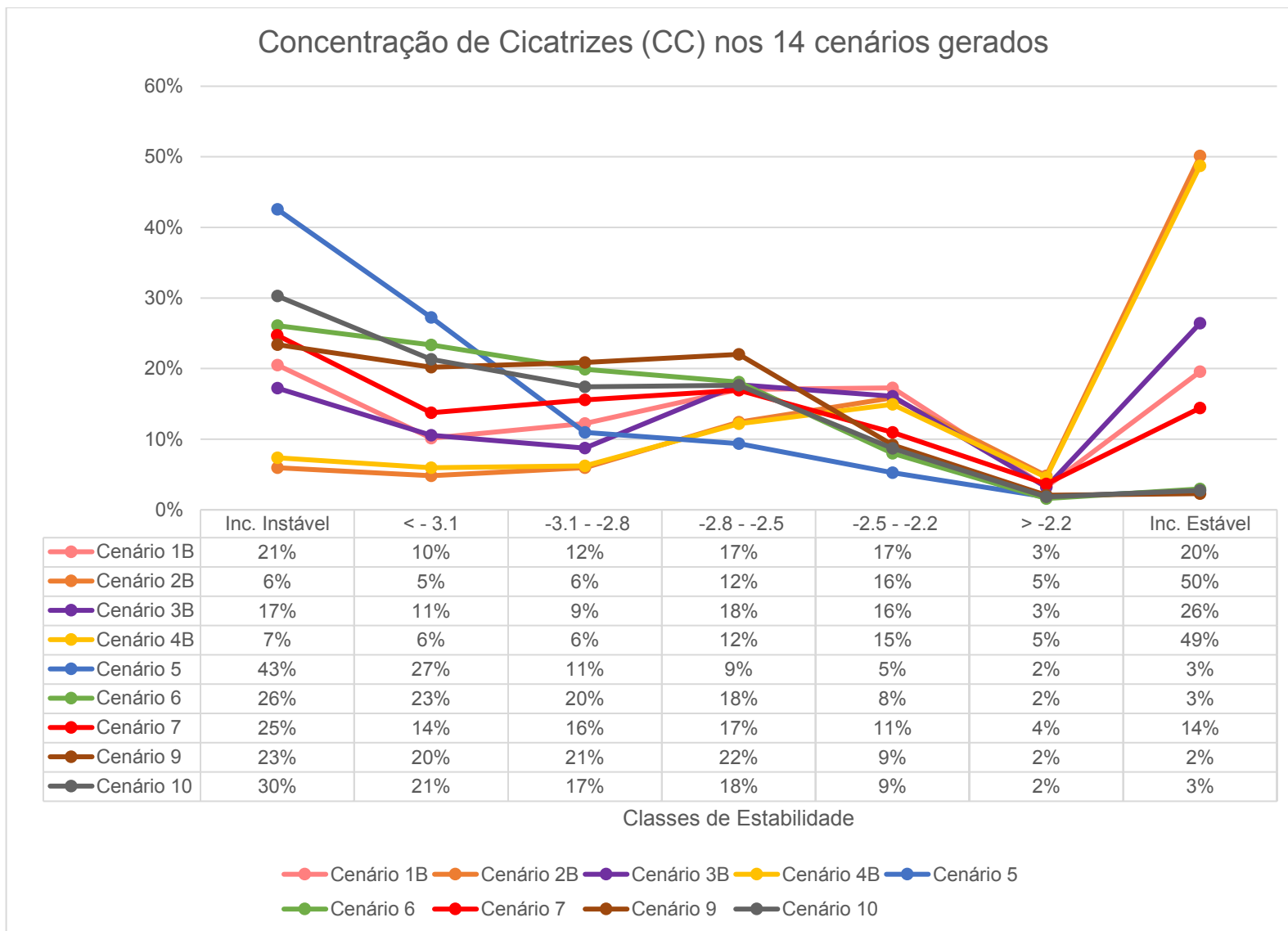
No geral, as cicatrizes fizeram-se presentes em todas as classes de estabilidade. Sabe-se que as classes indicam uma suscetibilidade a deflagração de escorregamentos, e que mesmo nas classes em que esta suscetibilidade se apresenta menor, é possível que tais movimentos ocorram. Segundo Wolle (1988), é precário correlacionar a incidência de movimentos com a declividade das encostas, pois esta relação depende de vários outros fatores condicionantes, como a cobertura vegetal, o perfil de encosta, a ação antrópica, entre outros. Entretanto, espera-se que num modelo ideal, boa parte das cicatrizes coincida com as classes mais instáveis.

Partindo desse pressuposto, os cenários que concentram a maior parte de cicatrizes nas classes instáveis configuram os cenários 5, 6, 9 e 10, sendo o cenário 5 o que mais se enquadra neste requisito. Entretanto, quando considerada essa

superestimação do modelo provocada pelos valores baixos e nulos de coesão, o cenário 7 apresenta um melhor resultado.

Neste cenário as áreas instáveis encontram-se associadas a declividades altas e a maioria das cicatrizes concentram-se nas classes instáveis (72%). A Figura 5.32 apresenta as concentrações de cicatrizes referentes a todos os cenários gerados e a Tabela 5.1 sintetiza todos os resultados obtidos na elaboração dos 14 cenários.

**Figura 5.32:** Concentração de Cicatrizes por classe de estabilidade, referente aos 14 cenários simulados.



**Tabela 5.2:** Comparação entre os resultados dos mapas de suscetibilidade, envolvendo os parâmetros geotécnicos, a frequência das classes e concentração de cicatrizes.

	Autores	Cenários	Classes instáveis				Classes estáveis		Parâmetros geotécnicos	
			Inc. Instável e saturado - $\log(q/T) = -10 - -9.9$	Inc. Instável e não saturado - $\log(q/T) = < -3.1$	Instável e saturado - $\log(q/T) = -3.1 - -2.8$	Instável e não saturado - $\log(q/T) = -2.8 - -2.5$	Estável e não saturado - $\log(q/T) = -2.5 - -2.2$	Inc. Estável e não saturado - $\log(q/T) = > -2.2$		Inc. Estável e saturado - $\log(q/T) = 9.9 - 10$
Frequência das classes de estabilidade (%)	Wolle e Carvalho (1988)	1A, 2A, 3A e 4A	0	0	0	0	0	0	100	c = 6000, 12000, 95000, 11000; $\gamma = 1430, 1800, 1650, 1850$ ; z = 1, 2, 1, 2; $\Phi = 34^\circ, 45^\circ, 40^\circ, 45^\circ$
Concentração de cicatrizes (%)			0	0	0	0	0	0	-	
Frequência das classes de estabilidade (%)		1B	6	9	8	11	9	3	52	c = 1000; $\gamma = 1710$ ; z = 1; $\Phi = 34^\circ$
Concentração de cicatrizes (%)			21	10	12	17	17	3	20	
Frequência da classe de estabilidade (%)		2B	1	3	3	6	7	3	76	c = 4000; $\gamma = 1950$ ; z = 2 m; $\Phi = 39^\circ$
Concentração de cicatrizes (%)			6	5	6	12	16	5	50	
Frequência da classe de estabilidade (%)		3B	5	7	6	10	9	4	59	c = 1000; $\gamma = 1820$ ; z = 1; $\Phi = 36^\circ$
Concentração de cicatrizes (%)	17		11	9	18	16	3	26		
Frequência da classe de estabilidade (%)	4B	1	3	3	6	7	3	76	c = 3500; $\gamma = 2010$ ; z = 2 m; $\Phi = 39^\circ$	
Concentração de cicatrizes (%)		7	6	6	12	15	5	49		

Frequência da classe de estabilidade (%)	Ferreira (2013)	5	21	25	14	12	6	1	21	c =0; $\gamma$ = 1240; z = 1; $\Phi$ = 29°
Concentração de cicatrizes (%)			43	27	11	9	5	2	3	
Frequência da classe de estabilidade (%)		6	9	27	17	17	9	2	19	c =1199; $\gamma$ = 1050; z = 2; $\Phi$ = 32°
Concentração de cicatrizes (%)			26	23	20	18	8	2	3	
Frequência da classe de estabilidade (%)		7	8	12	9	12	9	3	47	c =2160; $\gamma$ = 1410; z = 1; $\Phi$ = 26°
Concentração de cicatrizes (%)			25	14	16	17	11	4	14	
Frequência da classe de estabilidade (%)		8	0	0	0	0	0	0	100	c =11057; $\gamma$ = 1060; z = 2; $\Phi$ = 37°
Concentração de cicatrizes (%)			0	0	0	0	0	0	-	
Frequência da classe de estabilidade (%)	9	7	27	18	19	10	2	17	c =0; $\gamma$ = 1110; z = 1 m; $\Phi$ = 37°	
Concentração de cicatrizes (%)		23	20	21	22	9	2	2		
Frequência da classe de estabilidade (%)	10	11	25	15	16	9	2	22	c =0; $\gamma$ = 1210; z = 2 m; $\Phi$ = 34°	
Concentração de cicatrizes (%)		30	21	17	18	9	2	3		
Obs: $\gamma$ = peso específico (kg/m <sup>3</sup> ); c= coesão (N/m <sup>2</sup> ); $\Phi$ = ângulo de atrito; z = espessura (m)										

Fonte: Elaborado pelo autor.

## 6. CONCLUSÕES

Após extensa revisão bibliográfica, aplicação das metodologias necessárias e posterior análise dos resultados, constatou-se que o objetivo inicial foi atingido satisfatoriamente. Desse modo, a elaboração de mapas de suscetibilidade por meio do modelo matemático determinístico SHALSTAB, forneceu subsídios importantes para a compreensão da distribuição espacial dos escorregamentos translacionais rasos nas bacias do rio Pau D'Alho e Córrego da Divisa, bem como os fatores que os influenciam.

A elaboração do Modelo Digital de Elevação (MDE) configurou um fator essencial no desenvolvimento desta monografia. A partir deste, foram gerados os mapas temáticos, tais como declividade e área de contribuição, e os mapas de suscetibilidade. A geração, edição e integração de todos os mapas foi realizada por meio do *software ArcGis 10.1*, ferramenta que se mostrou indispensável na execução do presente trabalho.

Os cenários simulados pelo SHALSTAB foram fundamentados em ensaios geotécnicos referentes a duas localidades distintas inseridas na Serra do Mar, descritos nas bibliografias de Wolle (1988) e Ferreira (2008). A obtenção destes dados permitiu a elaboração de 14 cenários de suscetibilidade que, em geral, apresentaram-se influenciados principalmente pelos valores de coesão. Tal parâmetro geotécnico apresentou uma forte relação com a frequência das classes de estabilidade, visto que os mapas de suscetibilidade apresentaram áreas instáveis cada vez mais expressivas quando este parâmetro era reduzido. Quando este parâmetro foi elevado, observou-se a predominância de classes consideradas estáveis. Secundariamente, notou-se que as áreas instáveis se encontram associadas a altas declividades do terreno, configurando a categoria ângulo de encosta um fator influente no que diz respeito à suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos.

A validação dos cenários de suscetibilidade foi realizada através da correlação entre as classes consideradas instáveis e as feições de escorregamento dispostas na área de estudo. Dessa forma, a concentração de cicatrizes, definida como a razão entre o número de células de cada classe afetadas pelas cicatrizes e o total de células afetadas na bacia, aliada aos histogramas elaborados, permitiu concluir quais foram os cenários que mais se aproximaram da condição natural das bacias.

A elaboração de um inventário de cicatrizes permitiu identificar que tais feições estão relacionadas, principalmente, aos Granitóides Caraguatatuba (unidades PScgg/PIYa e Pscpp/PIYg/PIYp), curvaturas convexas e retilíneas e declividades que variam de médias ( $15^{\circ}$  -  $30^{\circ}$ ) a muito altas ( $45^{\circ}$  -  $90^{\circ}$ ). A delimitação de certas cicatrizes foi influenciada negativamente por fatores como o sombreamento topográfico que, por vezes, não permitiu uma delimitação e identificação correta de tal feição. Entretanto, o volume total destas feições foi suficiente para a validação dos mapas de suscetibilidade.

A fim de obter uma melhor caracterização das bacias em questão, recomenda-se como sugestões futuras:

- A realização de ensaios geotécnicos nas bacias do rio Pau D'Alho e Córrego da Divisa em porções distintas, inclusive em feições que indicam escorregamentos pretéritos. A geração do mapa de suscetibilidade com valores de ensaios geotécnicos referentes a área de estudo permitirá um resultado mais eficaz;
- A obtenção de ortofotos da área de estudo datadas logo após eventos de grande mobilização de massa. Tal fator permitiria uma classificação temporal das feições de escorregamento. Desse modo, poderia ser comparado a análise de diversas fotos datadas em diferentes épocas, resultando numa melhor compreensão das cicatrizes;
- Utilizar outros modelos matemáticos determinísticos na área de estudo, como o TRIGIS ou SINMAP, e compará-los posteriormente.

Por fim, o uso do modelo SHALSTAB, mesmo com base em dados secundários, permitiu uma melhor compreensão acerca dos processos de escorregamento presentes na área de estudo e indicou as áreas que são mais suscetíveis a tais processos. Desta forma, o baixo custo para geração dos mapas de suscetibilidade, aliado ao difícil acesso a área de estudo, configurou a aplicação do modelo SHALSTAB como favorável na região. Os mapas de suscetibilidade podem ser utilizados na prevenção dos escorregamentos e na indicação de áreas prioritárias para monitoramento real em épocas caracterizadas pela alta pluviosidade, a fim de reduzir danos socioeconômicos e contribuir para futuros planejamentos urbanos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, F.F.M.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e Evolução da Serra do Mar. Revista Brasileira de Geociências, n. 28, p. 135-150, 1998.

AMARAL, R.; GUTJAHR, M. R. Desastres naturais. São Paulo, SP: Instituto Geológico, 2009. 196 p.

AMARAL, R.; GUTJAHR, M. R. Desastres naturais. São Paulo, SP: Instituto Geológico, 2011. 100 p.

ANTENUCCI, J. C.; BROWN, K.; CROSWELL, P. L.; KEVANY, M. J. Geographic information systems: a guide to the technology. New York: Chapman and Hall, 1991. 301 p.

AUGUSTO FILHO, O. Cartas de risco de escorregamentos: uma proposta metodológica e sua aplicação no município de Ilhabela, SP. 1992. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1992.

AUGUSTO FILHO, O. Escorregamentos em Encostas Naturais e Ocupadas: Análise e Controle. In: BITAR, O.Y. (Org.). Curso de Geologia Aplicada ao Meio Ambiente. São Paulo: ABGE/IPT, 1993. p. 96-125

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J.C. Estabilidade de Taludes. In: OLIVEIRA, A.M. S.; BRITO, S.N.A. (Org.). Geologia de engenharia. São Paulo: ABGE, 1998. p. 244-269.

AUGUSTO FILHO, O. Carta de risco de escorregamentos quantificada em ambiente de SIG como subsídio para planos de seguro em áreas urbanas: um ensaio em Caraguatatuba (SP). 2001.166 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.

BAUM, R. L.; W. Z. SAVAGE; J. W. GODT. TRIGRS: A FORTRAN Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis. Colorado: U. S. Geological Survey, 2002. 35 p.

BLOOM, A. L. Superfície da Terra. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. 184 p.

BORTOLOTI, F. D. ArcGIS aplicado a bacias hidrográficas. Vitória: Laboratório de Topografia e Cartografia – LTC, Universidade Federal do Espírito Santo. Apresenta tutoriais aplicados a bacias hidrográficas em ambiente ArcGis. Disponível em: < [http://www.ltc.ufes.br/gisbasins/Aula\\_06.pdf](http://www.ltc.ufes.br/gisbasins/Aula_06.pdf)>. Acesso em: 25 de ago. 2016.

BRASIL. Ministério das Cidades / Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT). Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios. CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T. (Org.). Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 2007. 176 p.

CASTRO, A. L. C. Manual de desastres: desastres naturais. Brasília, DF: Ministério da Integração Nacional, 2003. 174 p.

CÔRREA, C. V. S. Modelagem fisiográfica do terreno para avaliação do potencial a corridas de detritos em dutovias: proposta aplicada em Caraguatatuba (SP) e São Sebastião (SP). 2016. 99 p. Exame de Qualificação de Doutorado - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" – UNESP, Rio Claro, 2016.

CÂMARA, G. Anatomia de Sistemas de Informação Geográficas: Visão Atual e Perspectivas de Evolução. In: ASSAD, E.; SANO, E. (Org.). Sistemas de Informações Geográficas: Aplicações na Agricultura. Brasília: Embrapa, 1993.

CÂMARA, G. et al. Introdução à ciência da geoinformação. São José dos Campos, SP: INPE, 2000.

CARVALHO, P. A. S. Taludes de rodovias: orientação para diagnóstico e soluções de seus problemas. São Paulo: IPT, 1991. 410 p.

CRUZ, O. A Serra do Mar e o Litoral na área de Caraguatatuba - SP. 1972. 181 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1974.

DIAS, F. P.; HERMANN, M. L. P. Suscetibilidade a deslizamentos: estudo de Caso no Bairro de Saco Grande, Florianópolis-SC. Florianópolis: Caminhos de Geografia, 2002.

DIETRICH, W. E., C. J. WILSON; S. L. RENEAU. Hollows, colluvion and landslides in soil-mantled landscapes. In m. Abraha, A.D and A. a. Unwin (eds), Winchester, 1986. p. 361-388.

DIETRICH, W. E. et al. A validation study of the shallow slope stability model, SHALSTAB, in the forest lands of Northern California. Stillwater Ecosystem, Watershaded & Riverine Sciences, Berkeley, 1998.

DIETRICH, W.E.; MONTGOMERY, D.R. SHALSTAB: A Digital Terrain Model for Mapping Shallow Landslide Potential. National Council for Air and Stream Improvement, 1998. 26 p.

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

FERNANDES, N. F. et al. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologia e aplicação de modelo de previsão de áreas suscetíveis. Revista Brasileira de Geomorfologia, v.2, n.1, p. 51-71, 2001.

GEORIO - INSTITUTO DE GEOTECNIA DO MUNICÍPIO DO RIO DE JANEIRO. Manual Técnico de Encostas - Análise e Investigação. Rio de Janeiro: Fundação Instituto de Geotécnica do Município do Rio de Janeiro, 2000. 253p

GERSCOVICH, D. Estabilidade de Taludes. São Paulo: Oficina de Textos, 2012. 166p.

GOMES, R. A. T. Modelagem de previsão de movimentos de massa a partir da combinação de modelos de escorregamentos e corridas de massa. 2006. 180 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociência, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

GRAMANI, M. F. Caracterização Geológico-Geotécnica das Corridas de Detritos ("Debris Flows") no Brasil e Comparação com Alguns Casos Internacionais. 2001. 372 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

GUESSER, L. H. Elaboração do mapa geotécnico preliminar e mapa de áreas suscetíveis a movimentos de massa do município de Antônio Carlos-SC. 2013. 142 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

GUERRA, A. J. T. A Erosão dos Solos no Contexto Social. Anuário do Instituto de Geociências da UFRJ, Rio de Janeiro, v. 17, p. 14-23, 1994.

GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. Geomorfologia e meio ambiente. 3 ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2000. 372 p.

GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y. Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos no meio tropical úmido. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1976. 48 p.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. 2.ed. São Paulo: Editora da USP, 1984. 194p.

GUIMARÃES, R. F. 2000. Utilização de um Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis a Escorregamentos Rasos com Controle Topográfico: Adequação e Calibração em Duas Bacias de Drenagem. 150 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

GUIMARÃES, R. F. et al. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. Engineering Geology, v.2, 137, p.1-10, 2003.

HASUI, Y.; MIOTO, J. A.; MORALES, N. Geologia do Pré-Cambriano. In: FALCONI, F. F.; JUNIOR, A. N. (Org.). Solos do Litoral de São Paulo. São Paulo: ABMS, 1994. p. 41-67.

HAVENITH, B. H.; et al. Analysis of landslides susceptibility in the Suusamy region, Tien Shan: statistical and geotechnical approach. Landslide, nº 3, p. 39-50, 2006.

INFANTI JÚNIOR, N.; FORSANARI FILHO, N. Processos de dinâmica superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Org.). Geologia de Engenharia. São Paulo: ABGE, 1998. p. 131-152.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). Ocupação de encostas - Manual. São Paulo, 1991. 216p. (Publicação, 1831).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). Banco de dados de mortes por escorregamentos no Brasil. Banco de Dados Digital. São Paulo: IPT, 2009.

JORGE, F.N.; UEHARA, K. Águas de Superfície. In: OLIVEIRA, A.M. S.; BRITO, S.B.A. de (Org.) Geologia de engenharia. São Paulo: ABGE, 1998. p. 101-110.

LOPES, E. S. S. Modelagem Espacial Dinâmica Aplicada ao Estudo de Movimentos de Massa em um Região da Serra do Mar Paulista, na Escala de 1:10.000. 2016. 314 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2016.

MAFRA JR, C. S. Elaboração do mapa preliminar de unidades geotécnicas do município de Brusque associado a um banco de dados geotécnico em ambiente de SIG. 2007. 123 p. Tese de Mestrado - Engenharia Civil – Área de Concentração: Infraestrutura e Gerência Viária, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

MASSAD, F. Obras de Terra. 2º ed. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

MICHEL, G. P. Modelagem de estabilidade de encostas com consideração do efeito da vegetação. 2013. 152 p. Dissertação de mestrado - Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

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

NERY, T. D. Avaliação da susceptibilidade a escorregamentos translacionais rasos na Bacia da Ultrafértil, Serra do Mar (SP). 2011. 170 p. Dissertação (Mestrado em Geografia Física), Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2011.

NERY, T. D. Dinâmica das corridas de detritos no Litoral Norte de São Paulo. 2016. 164 p. Tese (Doutorado em Geografia Física) - Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2016.

PACK, R. T.; TARBOTON D. G.; GOODWIN, C. N. SINMAP – a stability index approach to terrain stability hazard mapping. User's manual Terratech Consulting Ltd., Salmon Arm, B.C., Canada, 2005. 73 p.

RAMOS, H. A. Avaliação da Susceptibilidade aos Escorregamentos Translacionais Rasos a partir do modelo Shalstab na Bacia do Rio Guaxinduba (SP). Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia) – Universidade de São Paulo, 2012.

REIS, F. A. G. V. Curso de Geologia Ambiental Utilizando Técnicas de Educação à Distância via Internet. 173 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.

RENNÓ, C.D. Sistema de análise e simulação hidrológica aplicado a bacias hidrográficas. 2003. 119 p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos, 2003.

SANTOS, A. R. A grande barreira da Serra do Mar: da trilha dos Tupiniquins à Rodovia dos Imigrantes. São Paulo: O nome da Rosa, 2004. 122 p.

SELBY, M. Hillslope Materials and Processes. Oxford: Oxford University Press, 1982.

SHARPE, C.F.S. Landslide and Related Phenomena. New York: Columbia University press, 1938.

TAVARES, R. et al. Análise da variabilidade temporal e espacial das chuvas associada aos movimentos de massa no Litoral Norte Paulista. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1., 2004, Florianópolis. Anais... Florianópolis: GEND/UFSC, 2004. p. 680-696.

TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J; AMARAL, R. Desastres Naturais: conhecer para prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 2009.

VAN WESTEN, C. J. Application of Geographic Information System to Landslide Hazard Zonation. Enschede, The Netherlands: ITC Publication, 1993. p. 245.

VARNES, D. J. Landslides types and processes. Highway Research Board, Special Report, v. 29, p. 20-47. 1958.

VARNES, D.J. Slope movement types and processes. In: Schuster, R.L.; Krizek, R.J. (Org.) Landslides, Analysis and Control. Washington: National Academy of Science, 1978. p. 11-33.

VIEIRA, B. C. Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas. 2007. 193 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

WOLLE, C. M. Análise dos escorregamentos translacionais rasos numa região da Serra do Mar. 1988. 406 p. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988.

WOLLE, C. M.; C. S. CARVALHO. Taludes Naturais. In: FALCONI, F. F; JUNIOR, A. N. (Org.). Solos do litoral de São Paulo. São Paulo: ABMS, São Paulo, 1994. p. 180-203.

ZARUBA, Q., MENCL, V. 1976. Landslides and their control. Amsterdam: Elsevier, 1976. 205 p.