



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"

Campus Rio Claro



BEATRIZ GUZZO DUZ

**Avaliação dos modelos *SHALSTAB* e *SINMAP* à ocorrência de
escorregamentos rasos: aplicação em áreas de alta densidade de estruturas
geológicas da Serra do Mar**

Rio Claro/SP

2020

BEATRIZ GUZZO DUZ

**Avaliação de modelos *SHALSTAB* e *SINMAP* à ocorrência de
escorregamentos rasos: aplicação em áreas de alta densidade de estruturas
geológicas da Serra do Mar**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

Coorientadora: Dra. Claudia Vanessa dos Santos Corrêa

Rio Claro/SP

2020

D988a Duz, Beatriz Guzzo
Avaliação de modelos SHALSTAB e SINMAP à ocorrência de escorregamentos rasos: aplicação em áreas de alta densidade de estruturas geológicas da Serra do Mar / Beatriz Guzzo Duz. -- Rio Claro, 2020
109 f. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Fábio Augusto Gomes Vieira Reis
Coorientadora: Claudia Vanessa dos Santos Corrêa

1. Geociências. 2. Escorregamentos Rasos. 3. Geologia Estrutural. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA JÚLIO DE MESQUITA FILHO – UNESP

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

Campus de Rio Claro

BEATRIZ GUZZO DUZ

**Avaliação de modelos *SHALSTAB* e *SINMAP* à ocorrência de
escorregamentos rasos: aplicação em áreas de alta densidade de estruturas
geológicas da Serra do Mar**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora

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

Prof. Dr. José Eduardo Zaine

Dr. Eymar Silva Sampaio Lopes

Conceito: APROVADA

Rio Claro/SP, 01 de julho de 2020

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Valéria e Alexandre e ao meu irmão, Enzo, que sempre me apoiaram e incentivaram desde o processo seletivo do mestrado até sua conclusão.

Aos meus avós, Odila e Augusto que sempre torceram por mim e muitas vezes me fizeram companhia nas idas a Rio Claro.

Ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis, que não hesitou e aceitou de prontidão me orientar, e durante dois anos me proporcionou muito aprendizado.

A minha coorientadora Dra. Cláudia Vanessa dos Santos Corrêa, que me auxiliou na elaboração dos mapas, nas correções de trabalhos e me forneceu dicas importantes que levarei para sempre.

A Rosângela, que me auxiliou com todas as datas importantes durante todo o mestrado e me proporcionou vários momentos de descontração durante nossos rotineiros almoços.

Ao Prof. Dr. José Eduardo Zaine, que aceitou ser meu orientador por alguns meses e que muito me ensinou nas viagens de campo, na disciplina de Fotogeologia e na banca de Qualificação, juntamente com a Prof. Dra. Paulina Setti Ridel, à qual agradeço também.

Ao Prof. Dr. Norberto Morales, que muito contribuiu com os ensinamentos de geologia estrutural.

Aos meus grandes amigos da pós-graduação Adervaldo, Sandra, Marcos, Alcir, que foram de suma importância nestes dois anos auxiliando uns aos outros e estando presentes apesar de muitas vezes distantes.

Aos demais amigos Edvaldo Guedes, Débora Targa, Saul Riffel, Juan Navarro e Victor Cabral que mesmo convivendo por poucos meses de alguma maneira fizeram a diferença e contribuíram para o resultado deste.

Ao meu eterno amigo-irmão Bruno Oberdan, que mesmo após o término da faculdade e com os novos desafios da vida, nunca deixou de me incentivar e apoiar.

Aos meus professores da UNIFAL/MG, especialmente a Dra. Ana Olívia Magalhães, Dra. Carolina Del Roveri, Dr. Fabiano Cabanas, Dr. Marcelo Barison, Dr. Ériclis Freire e Me. Pedro Camarero que mesmo distantes sempre torceram por mim.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001*, à qual agradeço.

E, por fim, agradeço a Deus por me conceder saúde para a realização deste trabalho e por me conceder o privilégio de ter a companhia de todas as pessoas citadas anteriormente.

RESUMO

A região da Serra do Mar paulista é constantemente atingida por inúmeras ocorrências de escorregamentos rasos, dentre os quais ressalta-se o evento catastrófico ocorrido em março de 1967 em Caraguatatuba – destruindo parte da Rodovia dos Tamoios e muitos bairros do município. Sabe-se que para o desencadeamento destes escorregamentos existem diversos fatores condicionantes, destacando-se os agentes geológicos, relacionados à litologia e propriedades estruturais do maciço e os agentes deflagradores, como a pluviosidade. Assim, partindo de uma análise estrutural regional abrangendo os municípios de Caraguatatuba, Paraibuna e Natividade da Serra, Estado de São Paulo, realizou-se uma correlação entre a ocorrência de escorregamentos com a existência de estruturas geológicas, sejam elas falhas ou fraturas. Desta análise regional, foram selecionadas 5 bacias hidrográficas que possuíam um número mais elevado de cicatrizes de escorregamento: Pau D’Alho, Canivetal, Divisa, Santo Antônio e Ribeirão Aldeia, todas situadas no município de Caraguatatuba/SP. Com a delimitação destas bacias, o presente trabalho propôs a realização de uma análise comparativa entre a aplicação dos modelos SHALSTAB e SINMAP na área ocupada por essas bacias, bem como a avaliação da performance de ambos na escala de trabalho 1:50.000. A partir dos resultados obtidos, observou-se estruturas geológicas em duas direções principais: NW/SE para o sistema de fraturas e NE/SW para o sistema de foliações, seguindo o *trend* principal da Falha Bertioga-Caraguatatuba. Além disso, pôde-se relacionar a alta ocorrência de escorregamentos na região, à integração de 4 fatores principais: pluviosidade, declividade, estruturação geológica (falhas e fraturas) e, intervenção antrópica. Com relação aos modelos SHALSTAB e SINMAP, este último mostrou uma melhor performance na modelagem, dada pela adoção do Método da Taxa de Sucesso e Erro, cuja relação entre seus índices foi de 2,20, diferentemente do SHALSTAB, que apresentou para a mesma relação valor de 1,43. Destaca-se que o SINMAP apresentou maior porcentagem de áreas instáveis perante à área total de estudo, sendo, portanto, um importante identificador de áreas susceptíveis a escorregamentos em análises regionais. Recomenda-se que sejam realizadas modelagens em trabalhos futuros com o SHALSTAB e o SINMAP na escala 1:10.000 especialmente nas bacias Santo Antônio, Canivetal e Ribeirão Aldeia para avaliação de ambos modelos em escalas de maior detalhe.

Palavras-Chave: Escorregamento Raso. Geologia Estrutural. SHALSTAB. SINMAP

ABSTRACT

The Serra do Mar Paulista region is constantly affected by numerous occurrences of shallow landslides, highlighting the march 1967's catastrophic event, occurred in the municipality of Caraguatatuba - destroying part of the Tamoios Highway and many neighborhoods in the municipality. It is known that for the triggering of these landslides there are several conditioning factors, highlighting the geological agents, related to lithology and structural properties of the massif and the triggering agents, such as rainfall. Thus, starting from a regional structural analysis covering the municipalities of Caraguatatuba, Paraibuna and Nativity da Serra, State of São Paulo, a correlation was obtained between the occurrence of landslides and the existence of geological structures, be they failures or fractures. From this regional analysis, 5 watersheds that had the most landslides scars were selected: Pau D'Alho, Canivetal, Divisa, Santo Antônio and Ribeirão Aldeia, all located in the municipality of Caraguatatuba/SP. Then, with the delimitation of these basins, the present work proposed a comparative analysis between the application of SHALSTAB e SINMAP models in theses area, as well as the evaluation of the performance of both on the 1:50.000 work scale. The results showed geological structures in two main directions: NW/SE for the fractures system and NE/SW for the foliations system following the main trend of Bertioga – Caraguatatuba Fault. Futhermore, could be related the high occurrence of landslides in the region to the integration of 4 main factors: rainfall, slope, geological structuring (failures and fractures) and anthropic intervention. Concerning about the SHALSTAB and SINMAP models, the latter presented better performance in modeling, presenting as a result of the relationship between the success and error index a value equal to 2,20, differently from SHALSTAB which presented this value equal to 1,43. Stands out that the SINMAP considered a higher percentage of areas as unstable in relation to the total study area, being, therefore, an important identifier of areas susceptible to landslides in regional analyses. Finally, it is recommended that modeling be carried out in future works with SHALSTAB and SINMAP in the 1:10.000 scale, especially in the Santo Antônio, Canivetal and Ribeirão Aldeia watersheds for better verification of these models in more detailed scales.

Keywords: Shallow Landslide. Structural Geology. SHALSTAB. SINMAP

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da área de estudo	18
Figura 2. Localização das bacias hidrográficas analisadas	19
Figura 4: Mapa geológico estrutural da região de estudo	23
Figura 5: Representação do escorregamento translacional.....	26
Figura 6: Representação do escorregamento rotacional	27
Figura 7: Representação do escorregamento em cunha	28
Figura 8: Fluxograma representativo das etapas realizadas.....	38
Figura 9: Fluxograma representativo das etapas de pesquisa bibliográfica.....	39
Figura 10: Fluxo de água de acordo com a elevação	45
Figura 11: Mapa Geológico das bacias analisadas	48
Figura 12: Definição ilustrativa dos índices	49
Figura 13: Gráfico representativo de documentos publicados por ano	52
Figura 14: Documentos produzidos por país ao longo de 10 anos	52
Figura 15: Principais revistas cujos artigos analisados foram publicados	54
Figura 16: Mapa de Lineamentos Estruturais.....	55
Figura 17: Diagrama de Rosetas (N=340)	56
Figura 18: Mapa dos Percursos realizados na coleta de dados	57
Figura 19: Diagrama de Rosetas - Trilha dos Tropeiros - N=15.....	58
Figura 20: Diagrama de Rosetas - Rodovia dos Tamoios - N=31.....	60
Figura 21: Plano de foliação bem marcado em gnaiss (Rodovia dos Tamoios (SP-99))	61
Figura 22: Plano de foliação bem marcado em granito (Rodovia dos Tamoios (SP-99))	61
Figura 23: Plano de fratura encontrado em granito	62
Figura 24: Mapa de Densidade de Lineamentos Estruturais.....	63
Figura 25: Mapa de Densidade sobreposto aos Lineamentos Estruturais.....	64
Figura 26: Porcentagem da área de classes e concentração de cicatrizes	66
Figura 27: Mapa de Orientação das Encostas	68
Figura 28: Deslocamento ocorrido no plano de foliação do gnaiss	70
Figura 29: Zona de percolação de água em gnaiss	70
Figura 30: Cicatriz de Escorregamento encontrada na Bacia Santo Antônio	71
Figura 31: Modelo Digital de Elevação (MDE) das bacias da área de estudo	72
Figura 32: Mapa de Declividade das bacias analisadas	73
Figura 33: Mapa de Curvatura das Vertentes.....	74

Figura 34: Mapa de direção de fluxo de água das bacias	75
Figura 35: Mapa de susceptibilidade gerado pelo modelo SHALSTAB	77
Figura 36: Cicatrizes de Escorregamento sobrepostas ao Mapa de Susceptibilidade gerado pelo SHALSTAB.....	78
Figura 37: Mapa de Alta Susceptibilidade a Movimentos de Massa	83
Figura 38: Mapa de Média Susceptibilidade a Movimentos de Massa	84
Figura 39: Mapa de Baixa Susceptibilidade a Movimentos de Massa	85
Figura 40: Associação Mapa de Susceptibilidade e intervenções antrópicas	86
Figura 41: Sobreposição das cicatrizes aos núcleos de intervenção antrópica	87
Figura 42: Cálculo do Parâmetro T/R utilizado como input no SINMAP.....	88
Figura 43: Mapa de susceptibilidade obtido com o modelo SINMAP	89
Figura 44: Cicatrizes de Escorregamento sobrepostas ao Mapa de Susceptibilidade gerado pelo SINMAP	90
Figura 45: Mapa de Alta Susceptibilidade a Movimentos de Massa	93
Figura 46: Mapa de Média Susceptibilidade a Movimentos de Massa	94
Figura 47: Mapa de Baixa Susceptibilidade a Movimentos de Massa	95
Figura 48: Mapa de detalhe da sobreposição entre núcleo urbano, cicatrizes de escorregamento e susceptibilidade (SINMAP).....	96

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Características dos principais movimentos de massa.....	24
Quadro 2: Causas e agentes influenciadores na estabilidade das encostas	28
Quadro 3: Materiais utilizados para elaboração da base cartográfica	40
Quadro 4: Classes de Declividade adotadas no trabalho	44
Quadro 5: Síntese das características dos modelos SHALSTAB e SINMAP	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classes de estabilidade do modelo SHALSTAB	33
Tabela 2: Classes de Estabilidade do modelo SINMAP	34
Tabela 3: Parâmetros geotécnicos da bibliografia considerados na modelagem	47
Tabela 4: Resultados encontrados na plataforma Scopus	51
Tabela 5: Medidas estruturais realizadas ao longo da "Trilha dos Tropeiros" – Parque Estadual da Serra do Mar.....	58
Tabela 6: Medidas estruturais coletadas ao longo da Rodovia dos Tamoios (SP-99)	59
Tabela 7: Classes de orientação das encostas e escorregamentos	69
Tabela 8: Classes e Distribuição da Ocorrência de Escorregamentos (SHALSTAB).....	79
Tabela 9: Classes de Estabilidade e Distribuição da Ocorrência de Escorregamentos (SINMAP).....	91
Tabela 10: Índice para comparação dos modelos SINMAP e SHALSTAB.....	97

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVOS	16
3.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	17
3.1	Localização	17
3.2	Contexto Geomorfológico.....	20
3.3	Contexto Geológico	20
3.4	Contexto Estrutural.....	21
3.5	Contexto Climático	22
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
4.1	Movimentos Gravitacionais de Massa.....	24
4.1.1	Escorregamentos.....	25
4.1.1.1	<i>Escorregamentos Translacionais (Planares).....</i>	<i>25</i>
4.1.1.2	<i>Escorregamentos Rotacionais (Circulares).....</i>	<i>26</i>
4.1.1.3	<i>Escorregamentos em Cunha</i>	<i>27</i>
4.2	Agentes condicionantes a escorregamentos	28
4.3	Modelos de previsão de escorregamentos	30
4.3.1	SHALSTAB.....	31
4.3.2	SINMAP	33
5	MATERIAIS E MÉTODOS.....	37
5.1	Planejamento e Levantamento de Dados Bibliográficos	39
5.2	Organização da Base Cartográfica na escala 1:50.000.....	40
5.2.1	Elaboração do Mapa de Lineamentos Estruturais e Diagrama de Rosetas	40
5.2.2	Elaboração do Mapa de Densidade de Lineamentos Estruturais.....	41
5.2.3	Elaboração do Mapa de Cicatrizes de Escorregamento.....	41
5.2.4	Elaboração do Mapa de Orientação das Encostas	42

5.2.5	Compilação e análise dos mapas regionais gerados	42
5.2.6	Modelo Digital de Elevação (MDE).....	43
5.2.6.1	<i>Tratamentos no MDE</i>	43
5.2.7	Mapa de Declividade e Curvatura	43
5.2.8	Mapa de Direção de Fluxo.....	44
5.3	Trabalho de Campo	45
5.4	Modelagens nas Bacias (aplicação SHALSTAB e SINMAP).....	45
5.4.1	Parâmetros de entrada	47
5.4.2	Avaliação da Eficiência dos Modelos.....	49
5.5	Integração dos Resultados.....	50
6	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
6.1	Análise Bibliométrica dos Temas da Pesquisa	51
6.2	Análise Regional.....	54
6.3	Análise de Bacias Hidrográficas.....	71
6.3.1	SHALSTAB.....	76
6.3.1.1	<i>Comparativo SHALSTAB x Mapa de Susceptibilidade.....</i>	<i>80</i>
6.3.2	SINMAP	88
6.3.2.1	<i>Comparativo SINMAP x Mapa de Susceptibilidade</i>	<i>92</i>
6.3.3	Comparação dos Modelos.....	97
7	CONCLUSÕES	99
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	101

1. INTRODUÇÃO

Os processos relacionados aos movimentos gravitacionais de massa envolvem o desprendimento, transporte e deposição de solo e/ou rocha encosta abaixo sob ação da gravidade, contribuindo para a configuração do relevo (SELBY, 1982).

Segundo Fiori (1995), a força da gravidade é responsável por originar tensões cisalhantes internas no manto de alteração ao longo das vertentes. Estas tensões aumentam com a inclinação e a altura das encostas, com o peso específico do solo e com a quantidade de água que se infiltra e acumula no mesmo.

A água, neste caso, apresenta papel fundamental na ocorrência dos movimentos gravitacionais de massa, uma vez que, alojando-se nos planos de fraqueza, faz com que a resistência mecânica do solo diminua – através do efeito da pressão neutra – atuando como um agente deflagrador de escorregamentos em ambientes tropicais úmidos (GUIDICINI; IWASA, 1976).

Escorregamentos são definidos como fenômenos naturais de movimentos gravitacionais de massa, classificados como rápidos (m/h a m/s), de curta duração, com presença de plano de ruptura bem definido, permitindo-se, portanto, a diferenciação entre material transportado e não transportado (GUIDICINI; NIEBLE, 1984; AUGUSTO FILHO, 1992; FERNANDES, AMARAL, 1996; TOMINAGA, SANTORO, AMARAL, 2009; MORIMITSU, TOMINAGA, 2013).

De acordo com o IPT (2007) os fatores condicionantes dos movimentos de massa podem ser divididos em agentes predisponentes (relacionados às características intrínsecas do meio natural, como os aspectos geológicos, hidrológicos, climáticos e da vegetação); e agentes efetivos e deflagradores (atuando como mecanismo de origem ao processo de ruptura de uma encosta, podendo estar relacionado à pluviosidade, variação de temperatura e umidade, erosão e ação antrópica).

Dentre os agentes predisponentes, ressaltam-se os aspectos geológicos, principalmente aqueles relacionados às características da rocha (litologia) e às características estruturais (falhas, fraturas, bandamentos, foliações e inclinação das camadas) (SELBY, 1982; GERRARD, 1994; FIORI, 1995; AUGUSTO FILHO; VIRGILLI, 1998).

Segundo Lepsch (2002) a litologia, embora seja passiva à ação climática e orgânica, exerce influência no tipo de solo, como também nas suas características intrínsecas (permeabilidade, resistência ao cisalhamento, cor, granulometria, etc.).

Sobre as características estruturais, estas representam os pontos de menor resistência, e as descontinuidades presentes no maciço desempenham papel fundamental na infiltração da água, atuando, portanto, como caminhos preferenciais de alteração (SELBY, 1982; FIORI, 1995; FERNANDES; AMARAL, 1996; STEAD; WOLTER, 2015). Assim, através desta alteração, maciços rochosos consistentes e compactos são transformados em um manto particulado, inconsistente e friável (LOPES, 1995).

Ainda, de acordo com Selby (1982) e Fiori (1995), a inclinação das camadas, fraturas e planos de falhas ou de foliação, com alto índice de minerais como a biotita e a muscovita, no mesmo sentido de inclinação das vertentes, pode aumentar o risco de rupturas nas encostas (FRASCÁ; SARTORI, 2015).

Durante um evento de escorregamento, a presença dessas descontinuidades pode desempenhar o papel de planos de ruptura segundo Hoek e Bray (1981), Dietrich et al (2001) e Margielewski (2006) podendo, consequentemente, determinar sua forma, geometria e tipo (STURZENEGGER; STEAD, 2009; PARK et al., 2016).

A caracterização de áreas susceptíveis à ocorrência de escorregamentos é de suma importância para se prevenir e reduzir os danos que estes processos possam causar (DYKES, 2002; WILKINSON et al., 2002; VIEIRA; RAMOS, 2015). Para tal, diversos métodos foram desenvolvidos de modo a avaliar o papel dos agentes predisponentes e deflagradores, que podem ser aplicados em diversas escalas de trabalho, englobando análises desde encostas até bacias hidrográficas (LOPES et al., 2007; WILKINSON et al., 2002).

A modelagem computacional é um dos métodos de se caracterizar os escorregamentos translacionais rasos utilizando bases físicas. Tais modelos, descritos por meio de equações físicas, podem auxiliar na prenúncia da susceptibilidade a ocorrência de movimentos gravitacionais de massa em diferentes cenários de uso e ocupação do solo e de clima (GUZZETTI *et al.*, 1999; VAN WESTEN, 2004; VIEIRA; RAMOS, 2015).

Diversos trabalhos sobre definição de áreas susceptíveis a escorregamentos com uso de modelos computacionais foram realizados, destacando-se no Brasil as produções de Lopes et al. (2007), Guimarães et al. (2003), Silva (2013), Nery e Vieira (2014), Gerente et al. (2014), Michel et al. (2014), Vestena e Kobiyama, (2014), Pechincha e Zaidan, (2015), Sbroglia et al. (2016) e Cabral (2018). A mesma técnica também já foi adotada em outros países, destacando-se os trabalhos de Paulín et al (2014) no México, Meisina e Scarabelli (2007) e Lazzari et al., (2018) na Itália, Zaitchik et al. (2003) em Honduras, Sinarta et al. (2017) na Indonésia, e Goetz et al. (2011) no Canadá.

A modelagem dos atributos controladores de escorregamentos pode fornecer dados importantes no planejamento territorial e na construção de importantes obras civis (BEL et al., 2016).

Modelos de bases físicas utilizam conjuntamente modelos de estabilidade de encostas e modelos hidrológicos, dentre os quais se destacam o TRIGRS - *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability* segundo Alvioli e Baum (2016), o dSLAM - *Distributed, Physically Based Slope Stability Model* citado por Wu e Sidle (1995) o SINMAP - *Stability INDEX MAPping* segundo Pack (1998), Morrissey et al. (2001), PACK et al.(2001) e o SHALSTAB - *Shallow Landslide Stability Analysis* (MONTGOMERY E DIETRICH, 1994; MONTGOMERY et al., 1998).

Para este trabalho, foram aplicados os modelos SHALSTAB e SINMAP na análise da susceptibilidade a escorregamentos nas bacias hidrográficas “Pau d’Alho”, “Divisa”, “Ribeirão Aldeia”, “Canivetal” e “Santo Antônio”, situadas no município de Caraguatatuba (SP). Tais bacias foram selecionadas como objeto de análise devido à importante obra da duplicação da Rodovia dos Tamoios (SP-99) inserir-se no contexto destas bacias e no contexto da Serra do Mar. Salienta-se que a região da Serra do Mar paulista apresenta encostas com declividade entre 30° e 35°, com registros de altos índices pluviométricos, especialmente no verão, tornando-a favorável à ocorrência de escorregamentos (IPT, 1986; TATIZANA et al., 1987; AUGUSTO FILHO, 2001).

Cabe ressaltar que o trabalho apresenta grande relevância devido ao histórico de ocorrência de escorregamentos no município de Caraguatatuba – caracterizado principalmente pelo evento de escorregamentos e corridas de detritos generalizados em 18/03/1967 citados por Gramani (2001), Nery (2016) e Corrêa (2018). Além disso, diversas intervenções antrópicas vêm sendo realizadas tanto com as obras da Rodovia dos Tamoios (SP-99), quanto com a reocupação das encostas atingidas no evento de 1967. Enfatiza-se, portanto, a necessidade da aplicação e avaliação dos modelos SHALSTAB e SINMAP nestas áreas, afim de se obter Mapas de Susceptibilidade a Escorregamentos, bem como avaliar a acurácia das modelagens produzidas.

2. OBJETIVOS

O objetivo principal da pesquisa é a aplicação e a avaliação da susceptibilidade à ocorrência de escorregamentos rasos com base nos modelos SHALSTAB e SINMAP nas Bacias Hidrográficas Santo Antônio, Canivetal, Ribeirão Aldeia, Divisa e Pau d'Alho, situadas no município de Caraguatatuba, Litoral Norte do Estado de São Paulo.

Em complemento a execução do objetivo principal, destacam-se:

- Análise da estruturação geológica nos municípios de Paraibuna, Natividade da Serra e Caraguatatuba, localizados na Serra do Mar paulista, verificando e correlacionando a densidade de lineamentos estruturais com a existência de cicatrizes de escorregamento;
- Aplicação do Método de Taxa de Sucesso e Erro proposto por Sorbino et al. (2010), a fim de se verificar qual modelo apresenta melhor performance na escala 1:50.000 no município de Caraguatatuba, caracterizada por forte estruturação geológica.

3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

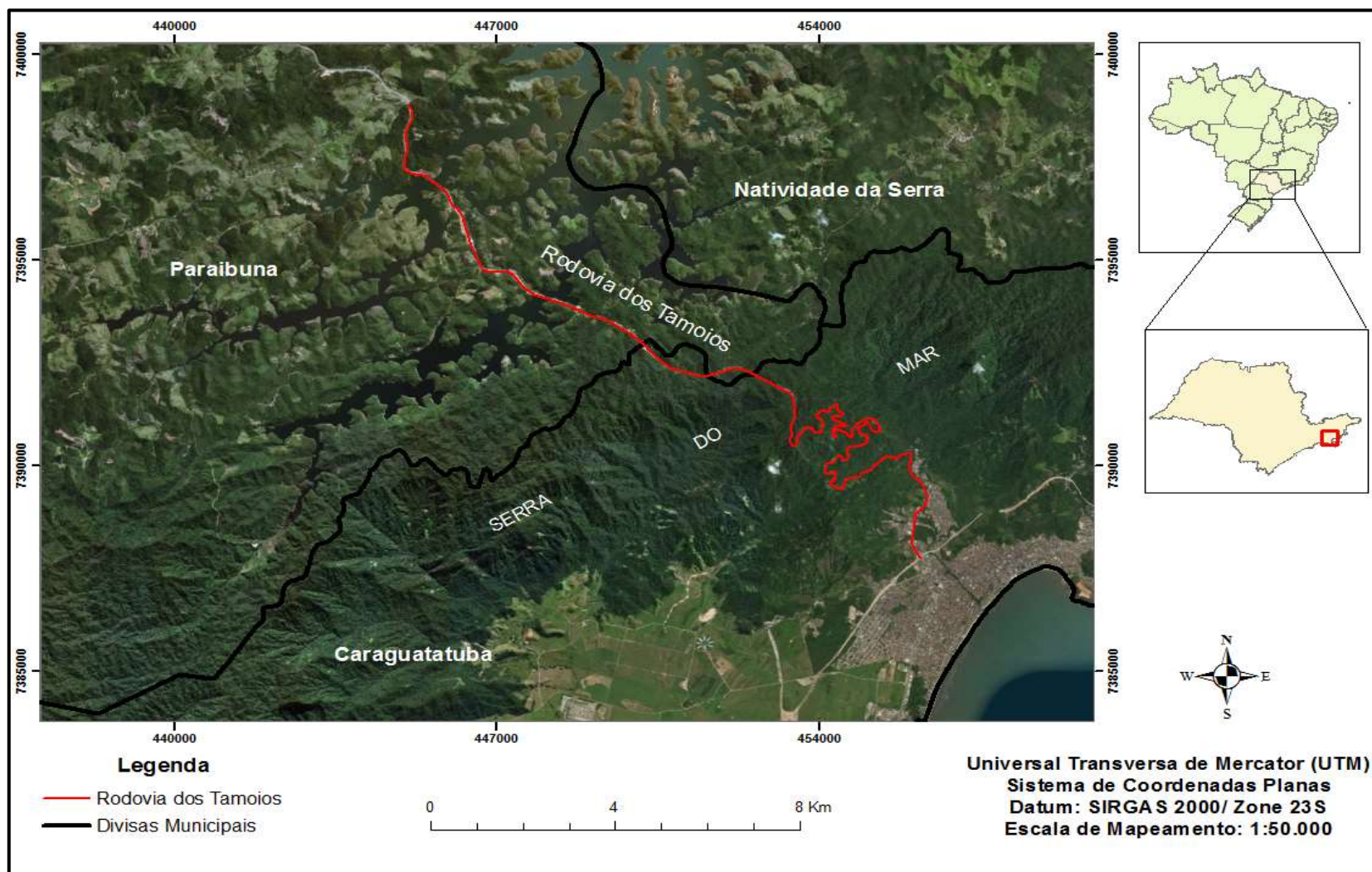
Este capítulo apresenta como objetivo uma breve contextualização da área de estudo com relação a sua localização e aspectos geológicos, geomorfológicos e estruturais.

3.1 Localização

A área de estudo deste trabalho insere-se no contexto da Serra do Mar paulista, cujo local apresenta condições favoráveis ao desenvolvimento de escorregamentos, devido ao clima tropical com alta pluviosidade, escarpas e desníveis elevados, forte controle estrutural e, intensa intervenção antrópica nas regiões costeiras (ALMEIDA, 1964; AUGUSTO FILHO, 2001; CERRI, 2018).

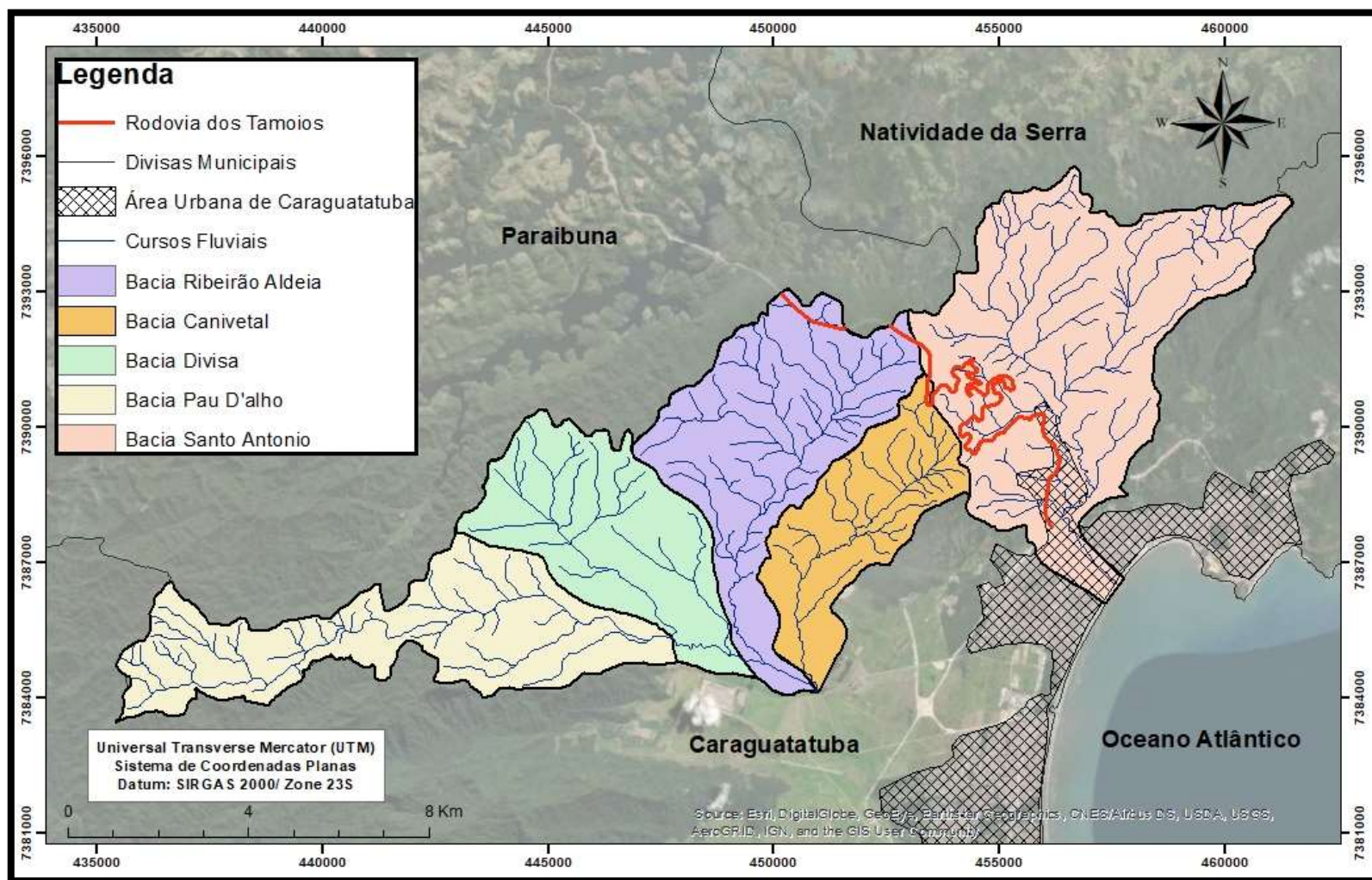
A área de estudo regional compreende os municípios de Caraguatatuba, Paraibuna e Natividade da Serra, localizados no Litoral Norte do Estado de São Paulo, (Figura 1). Para a análise em detalhe, foram consideradas as bacias hidrográficas “Pau d’Alho”, “Divisa”, “Ribeirão Aldeia”, “Canivetal” e “Santo Antônio”, localizadas no município de Caraguatatuba (SP) (Figura 2).

Figura 1: Localização da área de estudo



Fonte: (Autor, 2019)

Figura 2. Localização das bacias hidrográficas analisadas



Fonte: (Autor, 2019)

3.2 Contexto Geomorfológico

O sistema de escarpas e serras representado pelas Serras do Mar e da Mantiqueira constitui a mais destacada feição orográfica da borda atlântica do continente sul-americano. A Serra do Mar é um conjunto de escarpas festonadas com cerca de 1.000 km de extensão, se estendendo do Rio de Janeiro ao norte de Santa Catarina, onde deixa de existir como unidade orográfica de borda escarpada de planalto e se apresenta em cordões de serras paralelas. No Estado de São Paulo, a Serra do Mar impõe-se como borda de planalto, apresentando altitudes de 800 a 1.200 m (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998).

Segundo Asmus e Ferrari (1978) a origem da Serra do Mar é atribuída a processos tectônicos de movimentação vertical, configurando-se em um grande fronte dissecado de falhas e transcorrências complexas e eventos morfotectônicos ligados à gênese do Planalto Atlântico durante o Pleistoceno e Mioceno (VIEIRA; GRAMANI, 2015).

A área delimitada para estudo apresenta, de acordo com o Mapa Geomorfológico da Folha Caraguatatuba e Pico do Papagaio (CPRM, 1982), três diferentes tipos de compartimentos de relevo, sendo estes: Planalto, Encostas de Planalto – ou Serrania Costeira – e, por fim, Planície Costeira.

O compartimento denominado Planalto subdivide-se em duas distintas morfologias, sendo ao norte do mapa classificado como uma superfície de morros, com altitudes entre 900 a 700 metros, e, próximo à Serra do Mar, classificado como uma superfície de borda de planalto, onde detecta-se a presença de espigões e cristas condicionadas a lineamentos de falhas (CRUZ, 1974). Evidencia-se os escorregamentos, as corridas de massa e processos de erosão superficial nas Encostas de Planalto, onde torna-se possível encontrar depósitos de tálus e colúvios generalizados. Tanto no Planalto, como em suas encostas, são localizadas falhas e fraturas geomorfologicamente importantes e responsáveis pela configuração do relevo da região.

3.3 Contexto Geológico

De acordo com os mapas geológicos das folhas de Caraguatatuba e do Pico do Papagaio, elaborados pela CPRM em 1982 e 1991, respectivamente (Figura 3), a área de estudo compreende rochas de idades desde Cenozóico até o Arqueano. A maior parte da área é constituída por rochas do Proterozóico, do denominado Complexo do Paraibuna. Dentre estas, destacam-se os quartzitos com alternância rítmica de paragneisses, os gnaisses de feições

texturais e composicionais variadas, e, os biotita – granito gnáissico de diferentes texturas. Há ainda, em menor proporção e limitadas a folha de Caraguatatuba, rochas gnáissico – migmatíticas e parametamórficas do Complexo Costeiro da Era Arqueana. Por fim, são encontrados na Planície Costeira, os sedimentos inconsolidados do Quaternário, destacando-se areias, siltes e argilas de deposição fluvial, areias de deposição praial e, areias quartzosas e argilas de deposição marinha.

3.4 Contexto Estrutural

De acordo com Chierregati et al. (1982), a área de estudo apresenta 4 domínios estruturais com diferentes feições: granitoides Natividade da Serra, rochas do Complexo Paraibuna, granitoides Caraguatatuba e o das rochas do Complexo Costeiro.

O domínio dos granitoides Natividade da Serra compreende a uma faixa de evolução antiformal de acordo com a disposição das foliações presentes na área. Essa evolução ocorrida pode ter sido a responsável pelo alçamento de rochas do embasamento, ao nível estrutural das sequências de topo. Assim, destaca-se a presença de um bloco rígido rodeado por sequências de rochas mais foliadas (CHIEREGATI et al., 1982).

Os migmatitos presentes no domínio do Complexo Paraibuna apresentam estruturação geral ENE, concordante com a sequência de topo. Estes, exibem ainda, dobras intrafoliais com eixos em diferentes posições, sugerindo a plasticidade destas rochas durante os processos tectônicos que foram submetidas (CHIEREGATI et al., 1982; VENEZIANI; OKIDA, 1995).

O domínio dos granitoides Caraguatatuba representa um setor de anomalia estrutural, uma vez que os gnaisses presentes na porção central deste domínio estão dispostos para nordeste, porém com tendência menos acentuada para leste e baixos ângulos de mergulho para NW. Segundo Silva (2013) está feição corresponde a processos de cavalgamento em falhas de empurrão. Ademais, as estruturas migmatíticas do Complexo Costeiro dispõe-se seguindo o *trend* ENE da região.

Em suma, a estruturação geral da região segue uma tendência de orientação NE-SW - que corresponde à presença de diversos sistemas de falhas e zonas de cisalhamento de mesma direção (Figura 3).

Segundo os dados da CPRM (1991), regionalmente ao município de Caraguatatuba atravessam importantes falhas: Falha de Bertioga-Caraguatatuba, Falha do Bairro Alto, Falha de Freire-São Lourenço, além de outras estruturas como zonas de fraturas e diques basálticos.

Muitos destes diques estão relacionados aos derrames basálticos da Formação Serra Geral que seguem uma estruturação NW-SE, que podem estar relacionados ao alto do relevo presentes em algumas regiões (CERRI, 2018).

3.5 Contexto Climático

Observam-se no litoral do Estado de São Paulo características do clima tropical, sem estação seca bem definida, com diminuição dos volumes de precipitação durante o inverno e aumento no verão (SANTOS; GALVANI, 2012).

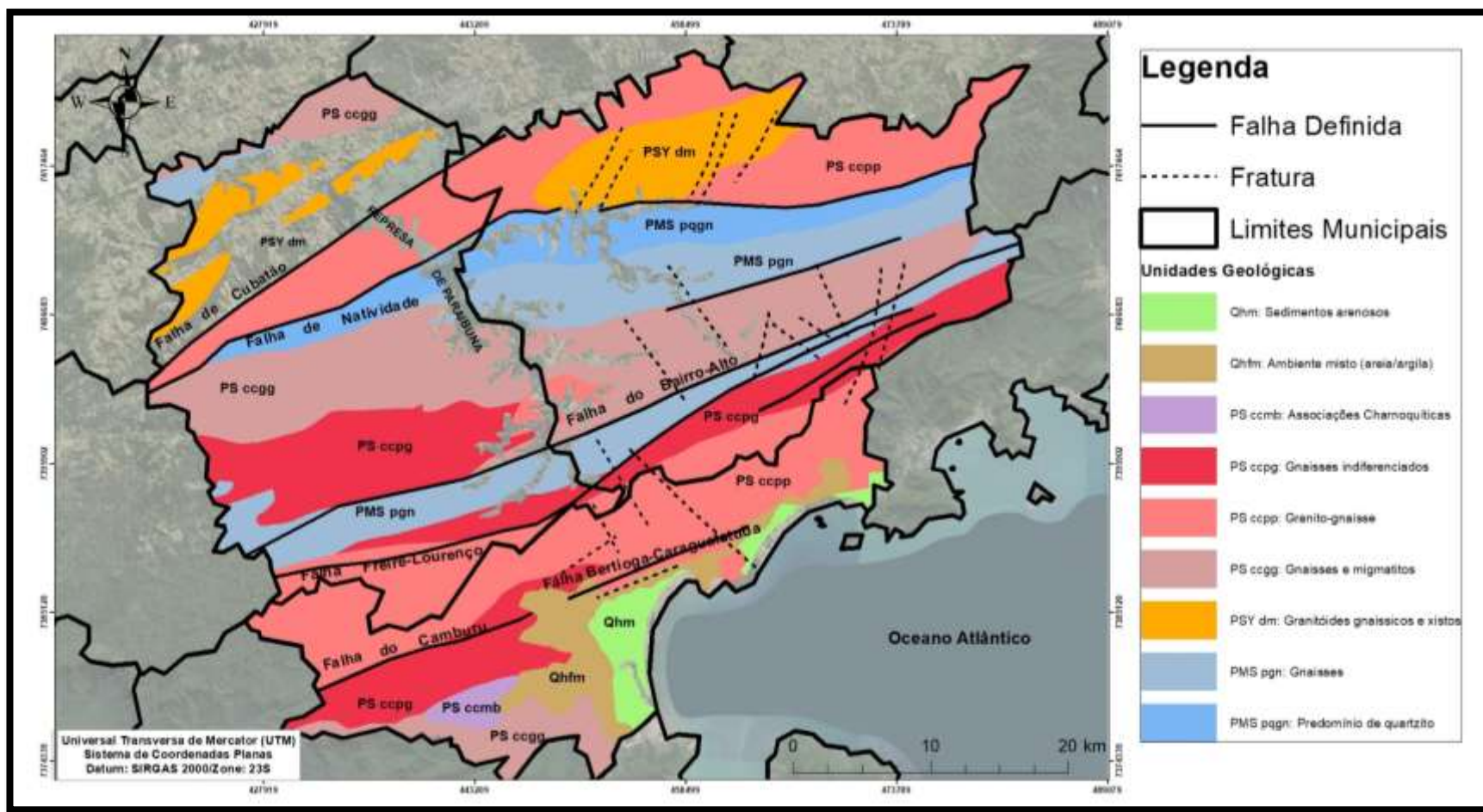
Na classificação de *Köppen* o clima da área de estudo é classificado como tipo Af: clima tropical chuvoso com chuvas o ano inteiro (SANCHEZ et al., 1999).

Tavares et al. (2004) apontam que, de forma geral, o litoral norte possui alta variabilidade de precipitação, principalmente entre os meses de fevereiro e março. Este efeito sazonal do regime pluviométrico é decorrente da influência das massas tropicais e sistemas frontais, que somados à influência topográfica, condicionam maiores valores de precipitação no Litoral Norte (BARBOSA, 2007; PELLEGATTI; GALVANI, 2010).

Cruz (1974) caracterizou o Litoral Norte como uma das áreas mais úmidas do país, devido às águas superficiais abundantes e rede de drenagem densa e contínua, somado ao regime de chuvas torrenciais, de alta intensidade, com máximas entre 100 a 200 mm em 24 horas e 40 a 50 mm por hora. Associadas às escarpas da Serra do Mar, estas características resultam em vários eventos de dinâmica superficial, como os escorregamentos e corridas de detritos generalizados ocorridos em março de 1967.

O município de Caraguatatuba, especificamente, apresenta uma menor variabilidade de precipitação em relação aos demais municípios, devido a sua posição geográfica mais recuada, que ameniza a relação da circulação atmosférica com a orografia, resultando em sombras de chuvas (TAVARES et al., 2004). Sua precipitação média anual é de 1758 mm apresentando grandes possibilidades de ocorrência de escorregamentos (CRUZ, 1974; VIEIRA; GRAMANI, 2015).

Figura 3: Mapa geológico estrutural da região de estudo



Fonte: (Autor, 2019)

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Movimentos Gravitacionais de Massa

Segundo Selby (1982), movimentos gravitacionais de massa são processos que envolvem o desprendimento, o transporte e a deposição de solo ou material rochoso encosta abaixo sob ação da gravidade, contribuindo para a configuração da paisagem.

Esses movimentos gravitacionais de massa podem ser subdivididos de acordo com o material transportado, velocidade de deslocamento e geometria, conforme Quadro 1.

Quadro 1: Características dos principais movimentos de massa

TIPO DO MOVIMENTO	CARACTERÍSTICAS
<i>Rastejos</i>	Vários planos de deslocamento (internos); Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas; Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes; Ocorre em solo, depósitos, rocha alterada/fraturada; Geometria indefinida
<i>Escorregamentos</i>	Poucos planos de deslocamento (externos); Velocidades médias (m/h) a altas (m/s); Pequenos a grandes volumes de material; Geometria e materiais variáveis; Planares – solos pouco espessos, solo e rochas com um plano de fraqueza; Circulares – solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas; Em cunha – solos e rochas com dois planos de fraqueza
<i>Quedas</i>	Sem planos de deslocamento; Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado; Velocidades muito altas (vários m/s); Material rochoso; Pequenos a médios volumes; Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. Rolamento de matacão e/ou tombamento
<i>Corridas</i>	Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação); Movimento semelhante ao de um líquido viscoso; Desenvolvimento ao longo das drenagens; Velocidades médias a altas; Mobilização de solo, rocha, detritos e água (grande volume); Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

Fonte: (AUGUSTO FILHO, 1992)

4.1.1 Escorregamentos

Os escorregamentos são definidos como movimentos rápidos e de curta duração, envolvendo massas do terreno que geralmente são bem definidas com relação ao seu volume, cujo centro de gravidade se desloca para partes mais baixas e externas ao talude (GUIDICINI; NIEBLE, 1984).

Um escorregamento ocorre quando a relação entre a resistência ao cisalhamento interno do material e a tensão de cisalhamento na superfície com potencialidade de movimentação decresce até atingir relação igual a uma unidade, caracterizando o momento do escorregamento. Ao longo da superfície de escorregamento ocorrem rupturas por cisalhamento à medida que o material vai perdendo a resistência. Assim, a velocidade do escorregamento cresce de quase zero até uma velocidade máxima. Ao atingir sua estabilização, o movimento pode cessar ou assumir um caráter de rastejo (TOMINAGA, 2007).

Tais movimentos são subdivididos de acordo com a geometria do plano de ruptura e a natureza do material instabilizado, sendo os principais denominados de translacionais (planares), rotacionais (circulares) e em cunha.

Segundo Tominaga (2007) trata-se de um dos processos mais frequentes e comuns na região da Serra do Mar, denominado popularmente por deslizamentos, queda de barreiras, desbarrancamento e desmoronamento.

Os tipos de escorregamentos mais comuns nas encostas das regiões serranas do Brasil são os escorregamentos translacionais, podendo envolver somente solos superficiais, mas também o contato com rochas alteradas ou não (INFANTI JUNIOR; FORNASARI FILHO, 1998).

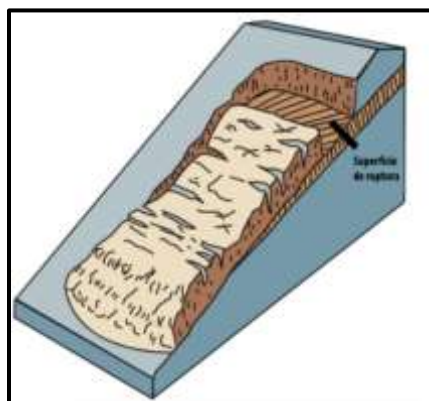
4.1.1.1 Escorregamentos Translacionais (Planares)

Escorregamentos translacionais são os mais frequentes nas encostas brasileiras e principalmente na Serra do Mar. Eles ocorrem em encostas com grande amplitude, inclinações maiores que 30°, solos pouco espessos e, no geral, são compridos e rasos, com plano de ruptura bem definido com profundidades geralmente variando entre 0,5 a 2 m (IPT, 2001; GUERRA; CUNHA, 2000).

Os planos de ruptura, planares, podem acompanhar descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas existentes no interior do material da encosta, conforme Figura 4 e são associados a solos saprolíticos, saprólitos e rocha, condicionados por plano de fraqueza associado a

estruturas como foliações, falhas, xistosidade e fraturas (WOLLE; CARVALHO, 1994; FERNANDES; AMARAL, 1996; IPT, 2007).

Figura 4: Representação do escorregamento translacional



Fonte: (USGS, 2004)

De acordo com Hoek e Bray (2001) para que os escorregamentos planares ocorram em um único plano de deslizamento, estes precisam apresentar quatro condições geométricas, sendo estas:

- 1º: O plano de deslizamento deve ter direção paralela ou com diferença próxima a 20º da face do talude;
- 2º: O ângulo de mergulho do plano de deslizamento deve ser menor ou igual ao ângulo de mergulho da face do talude;
- 3º: O ângulo de mergulho do plano de deslizamento deve ser maior que o valor do ângulo de atrito interno deste plano;
- 4º: Superfícies de descolamento que fornecem resistência desprezível para o escorregamento devem estar presentes na massa de material movimentado de modo a definir os limites laterais do escorregamento.

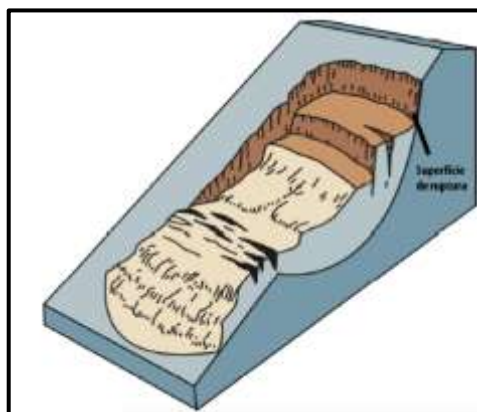
4.1.1.2 Escorregamentos Rotacionais (Circulares)

Escorregamentos rotacionais são característicos de solos e materiais homogêneos e espessos, ou, com rochas muito fraturadas, denominados múltiplos quando mobilizam de uma só vez mais de uma superfície de ruptura (GERSCOVICH, 2012).

As superfícies de escorregamento apresentam caráter côncavo ou convexo com baixa taxa de deformação em solos (SCHUSTER, 1996). Nestas superfícies, o movimento ocorre por

ruptura ao longo de uma superfície que de formato próximo a um arco de circunferência, sendo acompanhada de uma rotação em torno do centro deste arco (Figura 5).

Figura 5: Representação do escorregamento rotacional



Fonte: (USGS, 2004)

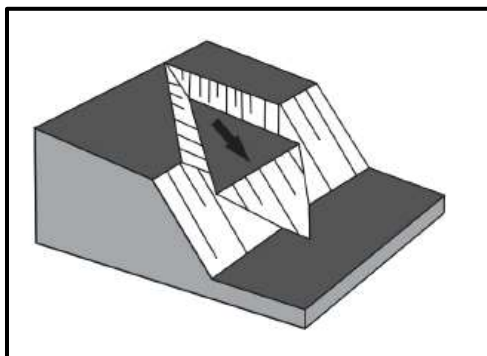
Segundo Santos (2004), na Serra do Mar, os escorregamentos circulares ocorrem somente quando se encontram associados a algum tipo de interferência antrópica, não havendo registros de ocorrências naturais.

4.1.1.3 Escorregamentos em Cunha

Os escorregamentos em cunha, dado sua denominação, apresentam superfície de ruptura no formato de cunha e são caracterizados pela intersecção de dois ou mais planos de fraqueza, não paralelos, delimitada por um ou mais planos de descontinuidades (Figura 6) (GERSCOVICH, 2012).

Segundo o IPT (2007) os escorregamentos em cunha podem ocorrer em horizontes saprolíticos do solo e em maciços rochosos, nos quais duas ou mais famílias de descontinuidades planares, desfavoráveis à estabilidade do talude ou encosta, podem condicionar o deslocamento e formação de uma cunha ao longo do eixo de intersecção destes planos.

Para Infanti Junior e Fornasari Filho (1998), o processo de escorregamento em cunha é comum em encostas que sofreram algum tipo de desconfinamento, podendo este ter caráter natural ou antrópico.

Figura 6: Representação do escorregamento em cunha

Fonte: GERSCOVICH, (2012)

4.2 Agentes condicionantes a escorregamentos

De acordo com Guidicini e Nieble (1984), os principais agentes que influenciam a estabilidade das encostas são divididos em predisponentes, associados às condições geológicas, geométricas e ambientais do meio, sem interferência antrópica; e efetivos, relacionados aqueles que dão início ao movimento, incluindo a atividade antrópica (Quadro 2).

Quadro 2: Causas e agentes influenciadores na estabilidade das encostas

Causas		Internas	Oscilação térmica Redução dos valores de coesão e ângulo de atrito do material, devido ao intemperismo
		Intermediárias	Elevação do nível piezométrico Rebaixamento rápido do lençol freático Piping Diminuição do efeito da coesão aparente
		Externas	Alterações naturais na geometria e inclinação da encosta Efeitos de vibrações
Agentes	Predisponentes		Geologia / Geomorfologia Clima
	Efetivos	Preparatórios	Pluviosidade Erosão Ação Humana Oscilação no nível de marés e lençol freático
		Imediatos	Chuvas intensas Erosão Terremotos Ação Humana

Fonte: (CROZIER, 1986; AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998).

As principais variáveis condicionantes de escorregamentos podem ser divididas em seis fatores geoambientais:

- **Geologia:** vincula-se à litologia (tipo de rocha) e às características estruturais (falhas, fraturas, bandamentos, foliações e inclinação das camadas) (SELBY, 1982; FIORI, 1995). Segundo Lepsch (2002) a litologia influencia no tipo de solo (material mineral) e também nas suas características intrínsecas (permeabilidade, resistência ao cisalhamento, cor, granulometria). Portanto, a natureza da rocha é importante, pois o comportamento mecânico será determinado em função da presença ou ausência de minerais resistentes como o quartzo, por exemplo. Esta variação de comportamento entre diferentes litologias dá origem a potenciais planos potenciais de ruptura no contato entre os mesmos (Fiori, 1995). Destaca-se também que as descontinuidades desempenham papel fundamental na infiltração e circulação da água, e, conseqüentemente, atuam como caminhos preferenciais de alteração, levando a potenciais planos de ruptura (Selby, 1982);
- **Pedologia:** os solos podem influenciar e sofrer a ação dos processos erosivos, em virtude da sua textura, estrutura, permeabilidade e densidade, principalmente quando localizados em regiões de clima úmido, que favorecem a evolução pedológica (BIGARELLA et al., 1996; AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 1998; SALOMÃO e ANTUNES, 1998; FIORI; CARMIGNANI, 2009; LEPSCH, 2002). Com relação a textura, está influencia na capacidade de infiltração e absorção de água da chuva (BIGARELLA et al., 1996): solos mais arenosos são mais porosos, permitindo rápida infiltração da água, e, conseqüentemente, possuem menor capacidade de armazenamento. No caso da estrutura, a influência está no direcionamento e na velocidade de infiltração da água, podendo interferir no aumento ou na diminuição da força de atrito nas camadas detríticas (SALOMÃO e ANTUNES, 1998);
- **Geomorfologia:** a geomorfologia também condiciona a ocorrência de escorregamentos em função dos parâmetros morfométricos, com destaque para a forma e a orientação das encostas, a declividade e a amplitude (CHRISTOFOLETTI, 1999; FERNANDES e AMARAL, 1996; FERNANDES et al., 2001). Com relação à forma das encostas, as côncavas por serem zonas de convergência de sedimentos e de fluxos d'água, são as mais favoráveis para a ocorrência de escorregamentos (GUERRA, 1999; FERNANDES e AMARAL, 1996);
- **Clima:** trata-se de um dos principais agentes desencadeadores e relaciona-se principalmente à pluviosidade e suas conseqüências sobre os processos morfogenéticos. Tanto as precipitações anômalas quanto as contínuas podem contribuir para deflagrar os

escorregamentos, uma vez que com a saturação do solo a coesão no contato rocha-solo diminui, favorecendo o aumento das tensões cisalhantes (GUIDICINI; IWASA, 1976; FIORI, 1995; FERNANDES; AMARAL, 1996);

- **Cobertura vegetal:** a presença de vegetação pode adiar ou intensificar a ocorrência de escorregamentos, uma vez que controla o escoamento superficial e a infiltração da água no solo (TATIZANA et al., 1987; SELBY, 1993). Ademais, as raízes podem aumentar o coeficiente de coesão do solo, auxiliando na estabilização das encostas, atuando como pilastras de sustentação dos horizontes superficiais. Porém, de acordo com o IPT (1988), a vegetação pode ter efeitos desfavoráveis na estabilidade de encostas, podendo causar uma sobrecarga vertical em solos rasos com presença de árvores robustas;

- **Ação antrópica:** a interferência antrópica ocorre principalmente pelo avanço das formas de uso e ocupação do solo em áreas instáveis, podendo influenciar diretamente na estabilidade das encostas, potencializando a ocorrência de escorregamentos (AUGUSTO FILHO, 1992; LARSEN; TORRES-SÁNCHEZ, 1998; JAKOB, 2000). Segundo Augusto Filho (1992) as principais ações antrópicas indutoras dos escorregamentos, são: remoção da cobertura vegetal; lançamento e concentração de águas pluviais; vazamentos na rede de abastecimento, esgoto e presença de fossas; execução de cortes com geometria inadequada; execução deficiente de aterros (compactação, geometria, fundação); lançamento de lixo nas encostas e vibrações produzidas por tráfego pesado.

4.3 Modelos de previsão de escorregamentos

O principal objetivo de se prever a ocorrência de escorregamentos é a redução das consequências advindas destes processos perante questões sociais, econômicas e ambientais. A descrição e caracterização dos condicionantes dos movimentos de massa e a análise de risco é essencial na elaboração de modelos que auxiliem na previsão desses processos (CUNHA, 1996).

Assim, define-se como modelo uma representação simplificada da realidade baseada em descrições objetivas do processo ao qual se deseja realizar simulações. De acordo com Lopes (2006), a utilização de modelos auxilia no entendimento dos mecanismos naturais da paisagem e na prevenção de alterações futuras no ecossistema. Rennó (2003) define modelos como conjunto de equações e procedimentos integrados pelo uso de variáveis e parâmetros, cuja

seleção é feita a partir da disponibilidade de dados e nos objetivos que se pretendem alcançar em determinado estudo.

Para este trabalho foram selecionados dois modelos para a modelagem dos escorregamentos: SHALSTAB, caracterizado por ser um modelo determinístico e SINMAP, de característica probabilística.

4.3.1 SHALSTAB

O SHALSTAB (*Shallow Landsliding Stability Model*) é um modelo matemático baseado na combinação de um modelo de estabilidade de encosta e um modelo hidrológico (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994;).

Para a análise de estabilidade, o modelo utiliza o princípio de vertente infinita, assumindo o estado de equilíbrio (*steady-state*), o fluxo paralelo à superfície e a lei de Darcy para estimar a distribuição espacial das pressões dos poros (MORRISSEY et al., 2001).

Segundo Guimarães et al. (2003), na análise de vertente infinita, os efeitos causados pelo atrito nas laterais e nas extremidades são desconsiderados, e a análise é considerada com relação a um plano infinito de solo sobre um plano inclinado. Tal fato é justificado em locais onde o comprimento da encosta é muito maior do que a espessura do solo, sendo consideradas as tensões tangencial e normal para a base de uma coluna de solo.

O modelo de estabilidade de encosta é baseado na lei de Mohr-Coulomb, no qual, durante a ruptura, o peso do solo é igual à resultante das forças estabilizadoras:

$$\tau = c + (\sigma - \mu) \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (1)$$

Onde: τ é a tensão cisalhante [N]; c é a coesão do solo [KPa]; σ é a tensão normal [N]; μ é a pressão dos poros [KPa] e ϕ é o ângulo de atrito [graus].

Considerando a presença de raízes e o lençol freático na camada de solo, Selby (1993) reescreveu a Equação (1) da seguinte maneira:

$$\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \operatorname{sen} \theta \cdot \cos \theta = c_r + c_s + (\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta - \rho_w \cdot g \cdot h \cdot \cos^2 \theta) \cdot \operatorname{tg} \phi \quad (2)$$

Onde: c_r é a coesão das raízes [N/m²]; c_s é a coesão do solo [N/m²]; θ é a inclinação da vertente [graus]; ρ_s é a densidade do solo úmido [kg/m³]; ρ_w é a densidade da água [kg/m³], g é a aceleração gravitacional [m/s²], z é a altura vertical do solo [m], h é a altura da camada de água dentro da camada de solo [m]; e ϕ é o ângulo de atrito interno do solo [graus].

Dividindo-se a parte direita da Equação (2), que representa as forças estabilizadoras do solo pela parte esquerda, que representa as forças desestabilizadoras, pode-se obter o valor do Fator de Segurança (FS) para encostas infinitas:

$$FS = \frac{c_r + c_s + (\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \cos^2 \theta - \rho_w \cdot g \cdot h \cdot \cos^2 \theta) \cdot \tan \phi}{\rho_s \cdot g \cdot z \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta} \quad (3)$$

A Equação (2) pode ser resolvida em função de h/z , que representa a proporção saturada da espessura do solo:

$$\frac{h}{z} = \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) + \frac{c}{\cos^2 \theta \tan \phi \rho_w g z} \quad (4)$$

O modelo hidrológico de acordo com os princípios de Beven e Kirkby (1979), mostram que a saturação do solo tem relação direta com a razão entre a área de drenagem a montante de um ponto dividida por uma unidade de comprimento de contorno e a declividade.

O'Loughlin (1986) através destes princípios, estabeleceu uma relação entre a saturação do solo, a área de contribuição a montante, a transmissividade e a declividade:

$$W = \frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \sin \theta} \quad (5)$$

Onde: W é o fator de umidade, q é a taxa de recarga expressa pela chuva, a é a área de contribuição que drena através da do comprimento do contorno b , e T é a transmissividade do solo. Pela definição, o W é igual a h/z . Portanto, igualando-se as equações (4) e (5), pode-se compilar os modelos de estabilidade de encosta e hidrológico:

$$\frac{a}{b} = \frac{T}{q} \sin \theta \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi}\right) + \frac{c}{\cos^2 \theta \tan \phi \rho_w g z} \right] \quad (6)$$

Na equação (6), três variáveis (a , b e θ) são extraídas do MDT (Modelo Digital de Terreno). Então, os parâmetros de entrada do modelo são $\emptyset$, c , ρ_s , e z .

Assim, pode-se reescrever a equação (6) em função das variáveis q e T , gerando a fórmula principal do modelo SHALSTAB:

$$\frac{q}{T} = \frac{b}{a} \operatorname{sen} \theta \left[\frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \emptyset} \right) + \frac{c}{\cos^2 \theta \operatorname{tg} \emptyset \rho_w g z} \right] \quad (7)$$

A combinação entre o modelo hidrológico e o modelo de encosta-infinita configura o grau de estabilidade da encosta, sendo possível defini-las em sete classes de estabilidade, conforme exibido na Tabela 1:

Tabela 1: Classes de estabilidade do modelo SHALSTAB

Intervalo log (q/T)	Classes de Estabilidade
Estável	Incondicionalmente estável e saturado
> -2.2	Incondicionalmente estável e não-saturado
-2.5 a -2.2	Estável e não-saturado
-2.8 a -2.5	Instável e não-saturado
-3.1 a -2.8	Instável e saturado
< -3.1	Incondicionalmente instável e não-saturado
Incondicionalmente instável	Incondicionalmente instável e saturado

4.3.2 SINMAP

O *Stability Index Mapping* - SINMAP, foi desenvolvido por Pack et al. (1998), e trata-se de um modelo físico probabilístico que tem como base o cálculo da probabilidade de uma área ser estável à ocorrência de escorregamentos translacionais rasos. É baseado no modelo de estabilidade de encosta infinita, utilizando-se da superfície topográfica no cálculo do fluxo de água em cada ponto ou célula da bacia, admitindo-se que o limite hidrológico sub-superficial é paralelo à superfície do terreno e assumindo que os parâmetros de resistências, condutividade hidráulica e espessura do solo são constantes por toda a região (NERY, 2011).

A classificação quanto à estabilidade do terreno é obtida a partir da entrada de dados topográficos, da área específica da bacia, propriedades dos materiais (coesão, peso específico) e dados climáticos e hidrológicos (MICHEL et al., 2014).

O modelo não requer parâmetros de entrada numericamente precisos e aceita uma margem de valores que representam essa incerteza (PACK et al., 2001).

O resultado primário do modelo é definido como fator de segurança (*FS*), que é um valor numérico usado para classificar a estabilidade do terreno em cada *grid* da área de estudo, variando entre 0 (mais instável) e 1 (menos instável) (PACK et al., 2001; NERY, 2011; MICHEL et al., 2014) (Tabela 2).

Tabela 2: Classes de Estabilidade do modelo SINMAP

Índice de Estabilidade (SI)	Classe de Estabilidade	Parâmetro	Possível influência de fatores não modelados
>1.5	Estável	Margem de instabilidade não modelada	Fatores desestabilizadores significantes são exigidos para instabilidade
1.5 > SI > 1.25	Moderadamente estável	Margem de instabilidade não modelada	Fatores desestabilizadores moderados são exigidos para instabilidade
1.25 > SI > 1.0	Quase estável	Margem de instabilidade não modelada	Fatores desestabilizadores menores são exigidos para instabilidade
1.0 > SI > 0.5	Limite inferior	Margem de média pessimista exigida para instabilidade	Fatores desestabilizadores não são exigidos para instabilidade
0.5 > SI > 0	Limite superior	Margem de média otimista exigida para instabilidade	Fatores estabilizadores podem ser responsáveis para estabilidade
0 > SI	Instável	Margem de estabilidade não modelada	Fatores estabilizadores são exigidos para estabilidade

Fonte: (MICHEL et. al, 2014)

O SINMAP é baseado na Equação 3 para calcular o Fator de Segurança. O modelo hidrológico *steady-state* (Equação 8) é utilizado para estimar a saturação do solo (W), assumindo que o valor máximo h/z é igual a 1. Então, se o valor é >1 , o fluxo sobre o terreno é formado.

$$W = \frac{h}{z} = \text{Min} \left(\frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \text{sen } \theta} \right), 1 \quad (8)$$

A taxa T/q determina a umidade relativa em termos de recarga uniforme em relação à capacidade do solo de drenar água. Embora o termo *steady-state* seja utilizado na nomenclatura do modelo, o valor de q não representa média da recarga a longo prazo (por exemplo, anual), é a taxa de recarga efetiva, para um período crítico, necessário para a geração de escorregamento (PACK et al., 1998). Pela combinação da Equação 8 com a Equação 3, a formulação final que rege o SINMAP é gerada:

$$FS = \frac{c_a + \cos \theta \left\{ 1 - \text{Min} \left(\frac{q \cdot a}{T \cdot b \cdot \text{sen } \theta}, 1 \right) \cdot r \right\} \text{tg } \phi}{\text{sen } \theta} \quad (9)$$

Onde: c_a representa o valor de coesão e o r representa a relação entre a densidade do solo seco e úmido. Alguns valores de entrada do SINMAP são descritos em termos de limites máximo e mínimo, como por exemplo a relação T/q , c_a e ϕ . No caso de ρ_s , é utilizado o seu valor médio.

Variações aleatórias nos valores de entrada entre seus limites geram uma distribuição da probabilidade de estabilidade do terreno (probabilidade do $FS > 1$). Considerando que a variável T/q seja representada por x , têm-se então que, x_1 é seu limite inferior e x_2 o limite superior. Analogamente, representando a tangente de ϕ por t , então t_1 e t_2 seriam os limites superiores e inferiores, respectivamente. C_1 e C_2 seriam, portanto, os limites inferiores e superiores para o valor da coesão adimensional.

O cenário mais conservativo, ou, pior cenário, para o SINMAP ocorre quando há a combinação de baixos valores de c e t (c_1 e t_1) com o mais alto valor de x (x_2):

$$SI = FS_{\min} = \frac{c_1 + \cos \theta \cdot \left[1 - \text{Min} \left(x_2 \frac{a}{b \cdot \text{sen } \theta}, 1 \right) \cdot r \right] t_1}{\text{sen } \theta} \quad (10)$$

Sob estas condições, se $FS > 1$, o local é considerado incondicionalmente estável. Em qualquer lugar que o fator de segurança mínimo seja menor que 1, há uma probabilidade de ruptura. Deste modo, o Índice de Estabilidade (SI) é definido por:

$$SI = \text{Prob} (FS > 1) \quad (11)$$

O melhor cenário resulta da combinação entre o limite superior do c e t (c_2 , t_2) com o limite inferior de x (x_1). Deste modo, obtém-se o máximo valor para FS :

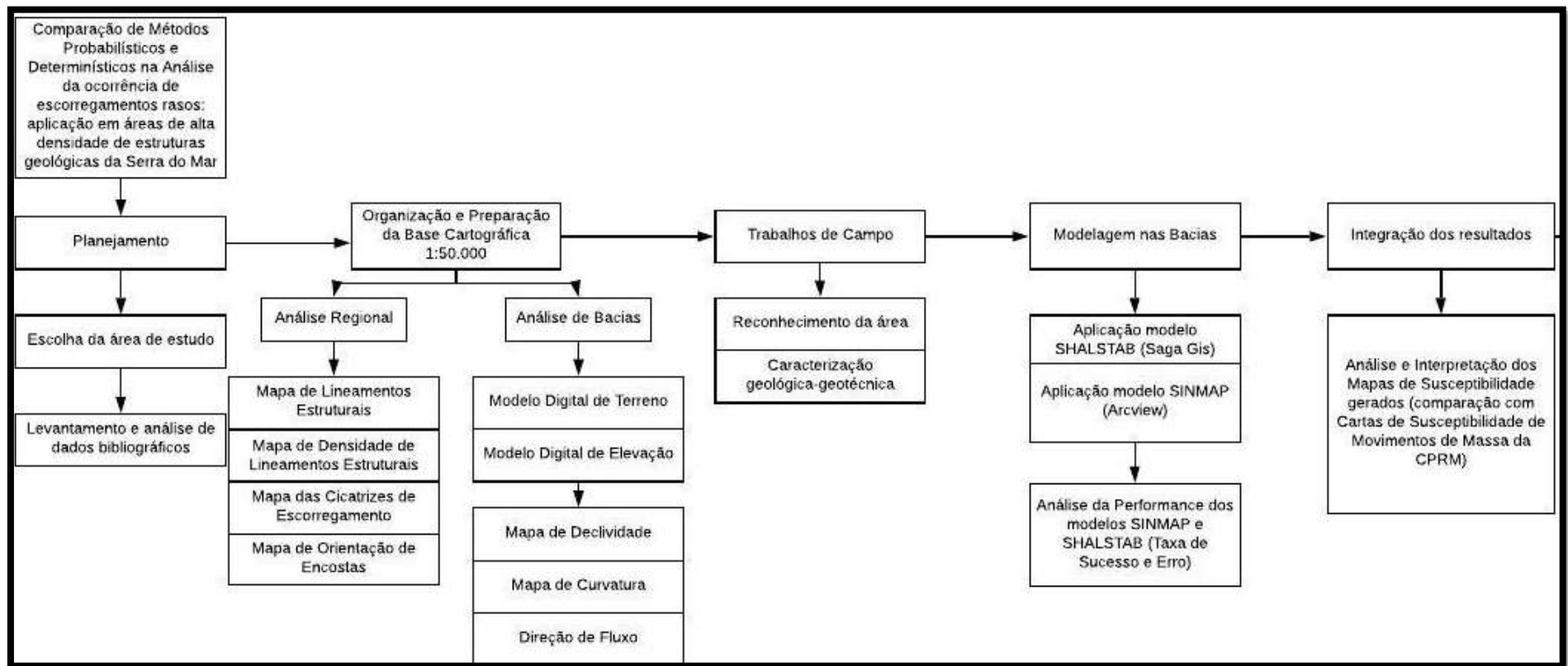
$$SI = FS_{max} = \frac{c_2 + \cos \theta \cdot \left[1 - \text{Min} \left(x_1 \frac{a}{b \sin \theta}, 1 \right) \cdot r \right] t_2}{\sin \theta} \quad (12)$$

Sob esta condição, se $FS < 1$, o local é considerado incondicionalmente instável.

5 MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo deste capítulo é apresentar os materiais utilizados para a elaboração deste trabalho, bem como explanar os métodos desenvolvidos. Para tal, apresenta-se na Figura 7, um fluxograma representativo das etapas de trabalho realizadas.

Figura 7: Fluxograma representativo das etapas realizadas

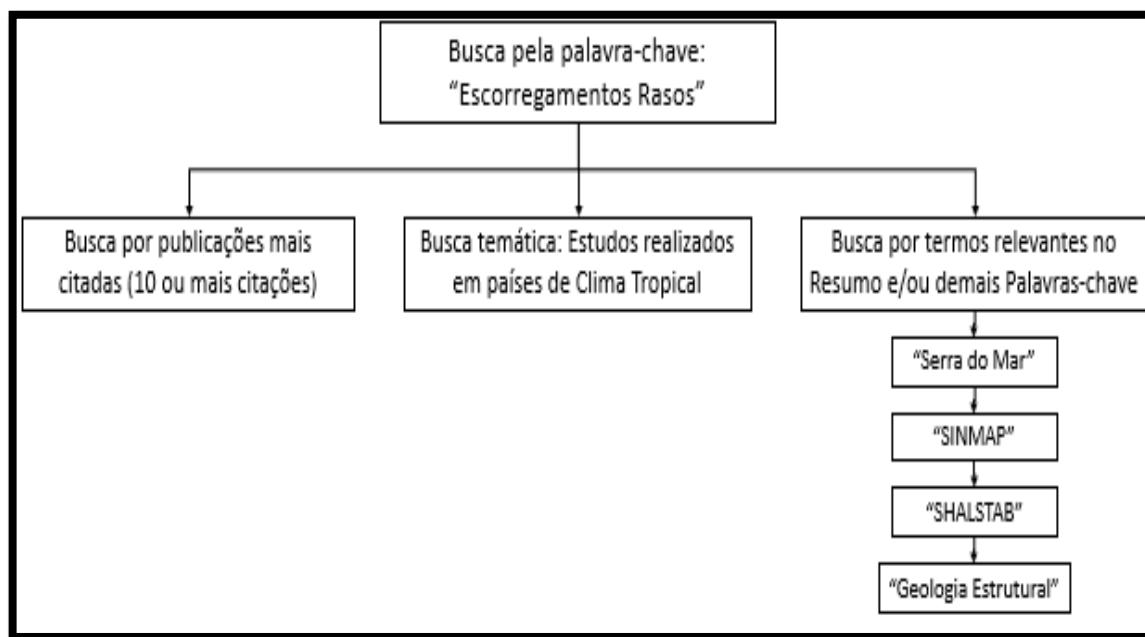


Fonte: (AUTOR, 2019)

5.1 Planejamento e Levantamento de Dados Bibliográficos

A metodologia adotada na primeira fase deste projeto consistiu na análise e pesquisa bibliográfica de documentos científicos na área de escorregamentos. Para tal, o banco de dados *Scopus*, que de acordo com Elsevier (2017) trata-se do maior banco de dados de resumos e citações de literatura científica, foi utilizado para obter informações de trabalhos já realizados na temática em questão. Essa pesquisa foi realizada em novembro de 2019 utilizando a palavra-chave “escorregamentos rasos” e foram considerados artigos publicados em revistas, congressos, capítulos de livros e revisões bibliográficas (Figura 8). Destes, consideraram-se apenas documentos de livre acesso publicados entre os anos de 2009 e 2019, visando obter um panorama geral das recentes pesquisas na área de movimentos de massa.

Figura 8: Fluxograma representativo das etapas de pesquisa bibliográfica



Fonte: (AUTOR, 2019)

Posteriormente à pesquisa bibliográfica, foram adotadas 2 etapas de pesquisa: a primeira envolvendo os municípios de Caraguatatuba, Paraibuna e Natividade da Serra, consistindo na análise de correlação entre geologia estrutural e cicatrizes de escorregamento ocorridas no ano de 1967; e a segunda, fazendo-se da análise das 5 bacias presentes nesta área macro que apresentavam maior incidência espacial de cicatrizes mapeadas.

5.2 Organização da Base Cartográfica na escala 1:50.000

De modo a compor a base cartográfica a ser utilizada para a confecção dos mapas temáticos, foram utilizados os seguintes documentos cartográficos:

Quadro 3: Materiais utilizados para elaboração da base cartográfica

Material	Escala	Fonte
Folhas Topográficas Pico de Papagaio (SF-23-Y-D-V-2, 1974) Caraguatatuba (SF-23-Y-D-VI-1, 1974)	1:50.000	IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística)
Mapas Geomorfológico e Geológico da Folha Caraguatatuba - 1982	1:50.000	CPRM (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais)
Mapa Geológico da Folha Pico do Papagaio – 1991	1:50.000	CPRM (Companhia de Pesquisas de Recursos Minerais)

As folhas topográficas obtidas em formato *raster* foram georreferenciadas no *software* ArcGis 10.4 pelo uso da ferramenta Georeferencing, utilizando-se a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM) e do *datum* SIRGAS2000, (zona 23S).

5.2.1 Elaboração do Mapa de Lineamentos Estruturais e Diagrama de Rosetas

Para a elaboração do Mapa de Lineamentos Estruturais foi realizada a fotointerpretação em imagens de satélite obtidas na base *World Imagery* do ArcGis 10.4, que utiliza imagens *Landsat* disponibilizadas pela USGS - *United States Geological Survey*, de modo a identificar lineamentos estruturais. Para tal, foram analisados os alinhamentos de drenagem na escala 1:50.000 e foram extraídos aqueles que possuíam comprimento maior que 1 cm. Fixando 1 cm de tamanho mínimo para escala de trabalho, obteve-se um padrão na análise dos lineamentos, uma vez que todas as feições mapeadas correspondem a pelo menos 500 metros, indicando os traços de maior continuidade e, possíveis de serem identificados em outras escalas (O'LEARY et al. 1976). Com isso, foi possível a elaboração do Mapa de Lineamentos Estruturais com o uso do *software* ArcGis 10.4.

Com base no Mapa de Lineamentos Estruturais, optou-se por utilizar o *software* *RockWorks* para se obter o Diagrama de Rosetas – importante ferramenta para a identificação

das direções preferenciais dos planos de descontinuidades. Para o funcionamento deste *software*, foi necessária a criação de 4 colunas na tabela de atributos dos lineamentos no *software ArcGis 10.4*. Tais colunas denominaram-se *X1*, *Y1*, *X2* e *Y2*, sendo que as primeiras foram utilizadas para o cálculo automático das coordenadas dos vértices de início dos lineamentos, e as duas últimas variáveis, empregadas no cálculo das coordenadas do vértice do fim do lineamento. A partir destas coordenadas o *software RockWorks* realiza a geometria e os cálculos de azimutes de cada lineamento para posteriormente gerar o Diagrama de Rosetas identificando as direções preferenciais dos lineamentos estruturais existentes.

5.2.2 Elaboração do Mapa de Densidade de Lineamentos Estruturais

O Mapa de Densidade de Lineamentos Estruturais derivou-se do Mapa de Lineamentos Estruturais. Para tal, utilizou-se a ferramenta *Density* do *ArcGis 10.4* com o item Estimador Kernel. Assim, foram estabelecidos como parâmetros de entrada para geração do respectivo mapa, células de saída de 100 por 100 metros e raio de busca de 1.500 metros (MOURA et al., 2012; CERRI, 2018).

5.2.3 Elaboração do Mapa de Cicatrizes de Escorregamento

Realizou-se a ortorretificação das fotografias aéreas com o auxílio dos *softwares Corel Photo Paint, ArcGis 10.4* e *ENVI*. Inicialmente ajustaram-se o brilho, contraste e saturação das imagens para maior e melhor visualização das feições e, em seguida, selecionaram-se os pontos de controle com coordenadas UTM reconhecidos no *Basemap* do *software ArcGis*. Os pontos de altimetria foram provenientes dos dados *SRTM* da Embrapa e lidos também no *software ArcGis*. Uma vez que foram distribuídos os pontos amostrais pela fotografia aérea, realizou-se a ortorretificação com inserção dos parâmetros da câmera e voo utilizados no levantamento. As imagens ortorretificadas geradas foram inseridas no *software ArcGis* e comparadas com o mapa do *Basemap*, de modo a verificar a compatibilidade entre as duas imagens. Em seguida, realizou-se a fotointerpretação com digitalização em tela das feições de escorregamento, delimitando as cicatrizes por meio de *shapefiles* do tipo polígonos.

5.2.4 Elaboração do Mapa de Orientação das Encostas

Como base para a elaboração do Mapa de Orientação das Encostas, foram gerados os Modelos Digital de Terreno (MDT) e Numérico de Terreno (MNT), utilizando a ferramenta *Triangulated Irregular Network (TIN)* do *software ArcGis 10.4*. Esta ferramenta representa uma estrutura de dados digitais elaborados a partir da interpolação de valores de altitude pela criação de triângulos entre uma linha e outra, gerando um modelo matemático com valores de altimetria da área de estudo. O arquivo *TIN* representa a área a partir de um conjunto de triângulos com tamanhos variados, gerado a partir das curvas de nível vetorizadas previamente.

A partir do MNT, realizou-se sua subdivisão em classes de ângulos, pela ferramenta *Aspect* do *Arcgis 10.4*, conforme realizado por Marcelino (2004). Assim, a área de estudo foi dividida nas seguintes classes de orientação dadas em graus (°), sendo estas: N (337,5-22,5), NE (22,5-67,5), E (67,5-112,5), SE (112,5-157,5), S (157,5-202,5), SW (202,5-247,5), W (247,5-292,5) e NW (292,5-337,5).

5.2.5 Compilação e análise dos mapas regionais gerados

A análise regional da área para identificação de locais que demandassem estudos em escala de detalhe foi realizada por meio da integração dos mapas anteriormente obtidos e suas interpretações (Mapa de Densidade de Lineamentos e Cicatrizes de Escorregamento). Para tal, realizou-se uma análise quantitativa dos mapas temáticos, com auxílio do *software ArcGis 10.4* e do *Microsoft Excel*. Os cálculos das áreas de cada classificação de densidade estabelecida foram realizados a partir da ferramenta “*Calculate Geometry*” do *ArcGis 10.4*. Estes valores foram exportados para uma planilha, onde calculou-se a Frequência (F), dada pela razão entre a área de cada classe e o total da área de estudo. Além disso, pela ferramenta “*Intersect*” foi realizada a intersecção de cada mapa temático com o mapa de cicatrizes com a finalidade de identificar apenas as regiões atingidas pelas cicatrizes. Tais valores foram também exportados para uma planilha e calculados os seguintes percentuais de: Frequência de cada classe (F) e Concentração de cicatrizes (CC). A Frequência (%), ou distribuição de cada classe, foi calculada pela razão entre a área de cada classe e a área total de estudo. A Concentração de Cicatrizes (%) indica a distribuição do total de cicatrizes dentro da classe, e foi calculada a partir da razão da área de escorregamentos da classe em relação à área total de ocorrência de escorregamentos. Os valores de Frequência e Concentração de Cicatrizes sempre obtiveram

valores totais iguais a 100%, pois referem-se ao total da área e cicatrizes mapeadas (VIEIRA, 2015).

5.2.6 Modelo Digital de Elevação (MDE)

Com base na folha topográfica em formato raster pertencente ao município de Caraguatatuba na escala 1:50.000, realizou-se a vetorização das curvas de nível, pontos cotados, hidrografia e rodovias que compreendem a área de estudo. Utilizou-se a projeção Universal Transversa de Mercator - UTM, com *datum* SIRGAS 2000, (Zona 23S). A partir da vetorização das curvas de nível e dos pontos cotados foi elaborado o modelo digital de elevação (MDE), mapa-base para aplicação dos modelos computacionais.

Para a geração do MDE foi utilizada a ferramenta de interpolação “*Topo to Raster*” da extensão 3D Analyst do software ArcGIS 10.4. Essa ferramenta utiliza-se da técnica de interpolação baseada em diferenças finitas para gerar um *grid* a partir de dados de elevação de pontos e curvas de nível (GUIMARÃES, 2003; LOEBMANN et al., 2005; CABRAL, 2018).

5.2.6.1 Tratamentos no MDE

Para minimizar 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, ao passo que os sumidouros são descritos como células de valor muito baixo à zero. O processo baseia-se na proposta da suavização do modelo com a finalidade de perder a menor quantidade possível de informações sobre o relevo. Para tal, foram utilizadas as ferramentas “*Sink*”, com o objetivo de identificar vazios e possíveis imperfeições no *raster* de superfície, e a ferramenta “*Fill*”, preenchendo os vazios existentes no MDE. Ambas se encontram em “*Hydrology*”, presente na extensão *Spatial Analysis Tool*, do ArcGis 10.4.1.

5.2.7 Mapa de Declividade e Curvatura

O mapa de declividade foi elaborado por meio da ferramenta “*Slope*” do menu “*Raster Surface*” da extensão 3D Analyst Tools do software ArcGis 10.4. Tal mapa foi subdividido em

intervalos de 5 classes (Quadro 4), representando de forma satisfatória as declividades da área de estudo (GABELINI, 2017).

Quadro 4: Classes de Declividade adotadas no trabalho

Classes de Declividade	Declividade (°)
Muito baixa	0-5
Baixa	6-15
Média	16-25
Alta	26-35
Muito alta	>35

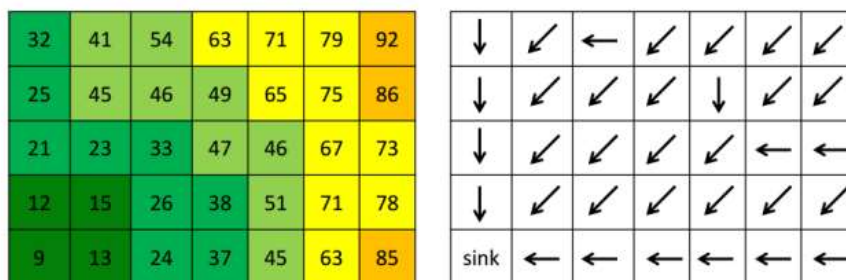
Fonte: (AUTOR, 2019)

O mapa de curvatura da encosta foi elaborado utilizando a ferramenta “*Curvature*” do *software ArcGIS 10.4*, classificando a área em três tipos de encostas: côncavas (valores positivos), lineares (valores iguais à 0) e convexas (valores negativos). O tipo de curvatura afeta a aceleração e desaceleração do fluxo pela superfície. Encostas convexas apresentam fluxos desacelerados, ao passo que encostas côncavas indicam fluxos acelerados.

5.2.8 Mapa de Direção de Fluxo

O mapa de direção de fluxo foi obtido a partir da ferramenta “*Flow direction*” do menu *Hydrology* da extensão *Spatial Analyst Tool do software ArcGis 10.4*. Este mapa representa a direção do escoamento d’água de acordo com a elevação das células vizinhas do MDE, onde cada célula é analisada separadamente pelo programa e o fluxo d’água seguirá na direção da célula adjacente que apresenta menor elevação (Figura 9).

Figura 9: Fluxo de água de acordo com a elevação



Fonte: Bortoloti, (2014)

No entanto, o mapa de direção de fluxo, não apresenta as flechas conforme mostrado na Figura 9, sendo utilizado, portanto, a abordagem *eightdirection* (D8), aderindo no mapa confeccionado um padrão de cores representativas para cada uma das oitos direções de fluxo possíveis.

5.3 Trabalho de Campo

Foram realizados dois trabalhos de campo na área de estudo: o primeiro ocorreu em outubro de 2018 e o segundo em dezembro de 2019. No primeiro realizou-se o reconhecimento da área de estudo, identificando pontos onde haveria possibilidade de coleta de informações sobre litologia, características estruturais e espessura de solo. Além disso, este primeiro campo foi importante para se obter autorização da Concessionária Tamoios em realizar paradas ao longo da Rodovia dos Tamoios (SP-99) para fins científicos. De posse desta autorização, realizou-se o segundo campo, onde foi possível coletar informações citadas anteriormente tanto em afloramentos presentes ao longo da Rodovia dos Tamoios, quanto na Trilha dos Tropeiros, situada no Parque Estadual da Serra do Mar.

5.4 Modelagens nas Bacias (aplicação SHALSTAB e SINMAP)

Admitindo-se as características dos modelos SHALSTAB e SINMAP apresentadas anteriormente e, presentes no Quadro 5, estes foram empregados na análise das bacias hidrográficas mais problemáticas com relação a ocorrência de escorregamentos. A análise de bacias com relação a escorregamentos na escala 1:50.000 já esteve presente em trabalhos como de Gomes (2006), Michel et al. (2014), Cabral (2018), Corrêa (2018) com resultados satisfatórios.

O SHALSTAB foi executado por meio do *software SAGA-GIS 2.1.3* em seu módulo de Análise de Terreno, seguido de Estabilidade de Talude. Com este foi possível partindo do MDE gerado previamente, a elaboração dos mapas de Declividade, em radianos, e da área de contribuição (m^2). Ambos os mapas, aliados aos parâmetros de entrada, tais como coesão (MPa), ângulo de atrito interno ($^{\circ}$) e densidade do material (g/cm^3) possibilitaram a criação de um *grid* identificando as classes de estabilidade previstas pelo modelo.

No caso do SINMAP, este foi executado por meio da extensão SINMAP presente no *ArcView 3.2*. As variáveis topográficas para este modelo também foram obtidas do MDE e sua classificação de estabilidade do terreno deriva da topografia, hidrologia e das características do solo. Diferentemente do SHALSTAB, o SINMAP permitiu a adoção de uma faixa de incerteza para os parâmetros referentes à hidrologia e pedologia.

Quadro 5: Síntese das características dos modelos SHALSTAB e SINMAP

Modelo numérico	Principais características	Principais <i>inputs</i>	Principais <i>outputs</i>
SHALSTAB (<i>Shallow Landslide Stability Analysis</i>)	- Modelo determinístico que combina modelos de estabilidade de encosta infinita, possibilitando a definição de zonas susceptíveis a escorregamentos translacionais em áreas com planos de transição bem definidos; - Modelo assume que a topografia local é o controle dominante na ocorrência de escorregamentos translacionais;	- Ângulo de atrito; - Coesão; - Peso específico do solo; - Espessura; - Área de contribuição; - Ângulo da encosta.	Delimitação de zonas estáveis a instáveis a escorregamentos translacionais.
SINMAP (<i>Stability INDEX MAPping</i>)	- Modelo estocástico para mapeamento de índices de estabilidade em encostas que utiliza o conceito de modelo hidrológico de estado uniforme (<i>steady-state</i>) e o clássico modelo de vertente infinita para determinação de estabilidade; - A classificação da estabilidade do terreno é realizada com base na variação espacial da declividade e do índice geomorfológico e estabelece correlação com a transmissividade do solo; - Índice de estabilidade (<i>SI</i>) é definido como a probabilidade de uma região ser estável, assumindo distribuições sobre intervalos de incerteza.	- Acumulado pluviométrico - Dados hidrológicos. - Ângulo de atrito; - Coesão; - Peso específico do solo; - Espessura. - Área de contribuição; - Ângulo da encosta	Classifica a estabilidade do terreno em cada grid da área de estudo, variando entre 0 (mais instável) e maior que 1,5 (menos instável).

5.4.1 Parâmetros de entrada

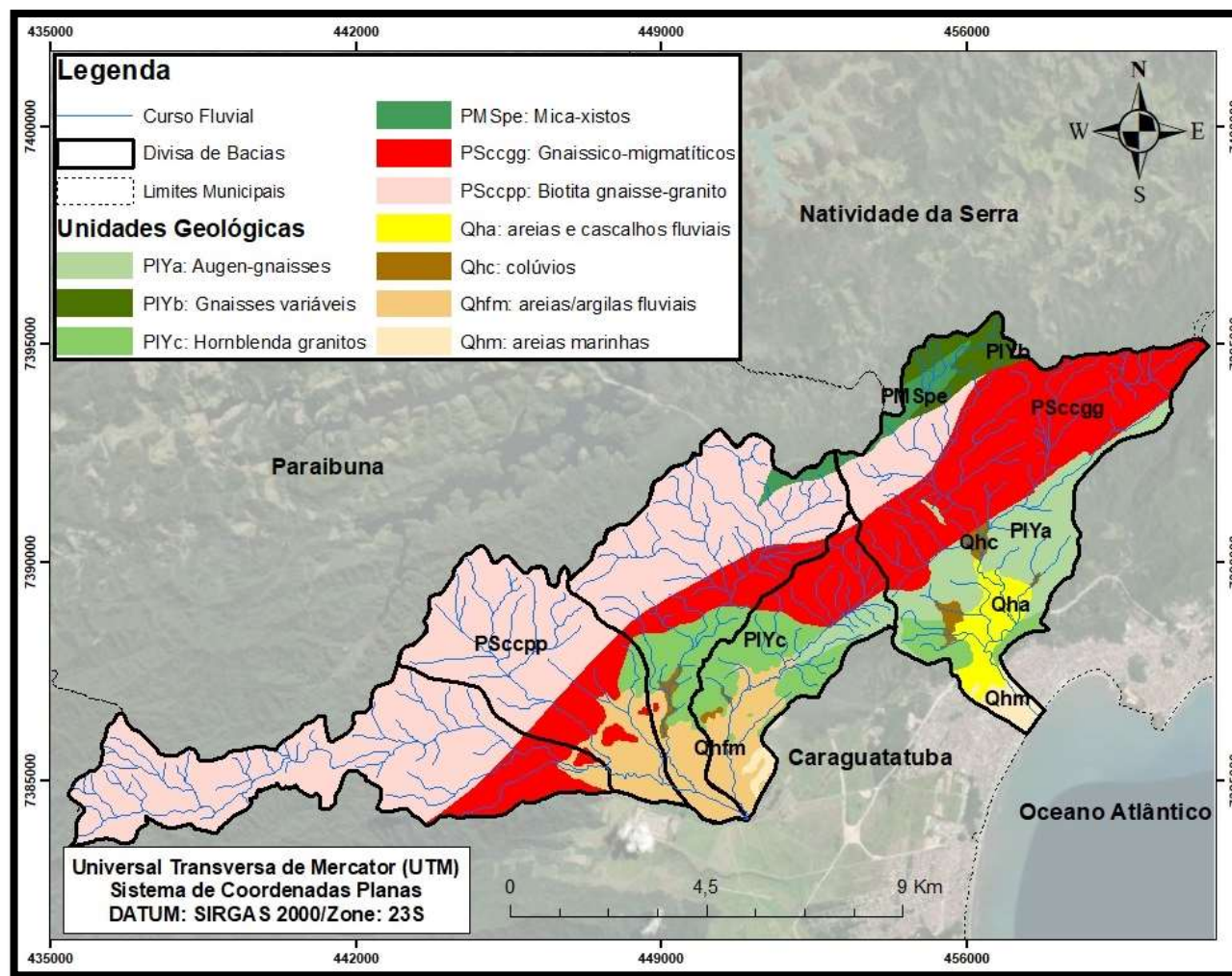
Admitindo-se que a região de análise das bacias Santo Antônio, Ribeirão da Aldeia, Canivetal, Divisa e Pau D'alto encontram-se predominantemente sob o domínio de rochas graníticas e gnáissicas (Figura 10), é apresentado na Tabela 3 um compilado de parâmetros geotécnicos obtidos na região de estudo por diferentes autores. O valor médio destes parâmetros, foi utilizado como dados de entrada na simulação dos modelos SHALSTAB e SINMAP.

Tabela 3: Parâmetros geotécnicos da bibliografia considerados na modelagem

				Solo Saturado		
Autores	Solo	Textura	Espessura	ρ_s (Kg/m³)	c (Kpa)	$\phi(^{\circ})$
Wolle e Carvalho (1989)	Residual	Areno-argilosa	1	1.820	1,0	36,0
Wolle e Carvalho (1994)				1.710	1,0	34,0
Amaral Junior (2007)				1.700	4,5	32,0
Mendes (2008)				2.750	10,0	31,6
Média				1.995	4,1	35,9

Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 10: Mapa Geológico das bacias analisadas



Fonte: (AUTOR, 2019)

5.4.2 Avaliação da Eficiência dos Modelos

A maior eficiência e aplicabilidade de um modelo ocorre quando o inventário de cicatrizes de escorregamentos coincide com as áreas classificadas como instáveis (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994; DIETRICH et al., 2001).

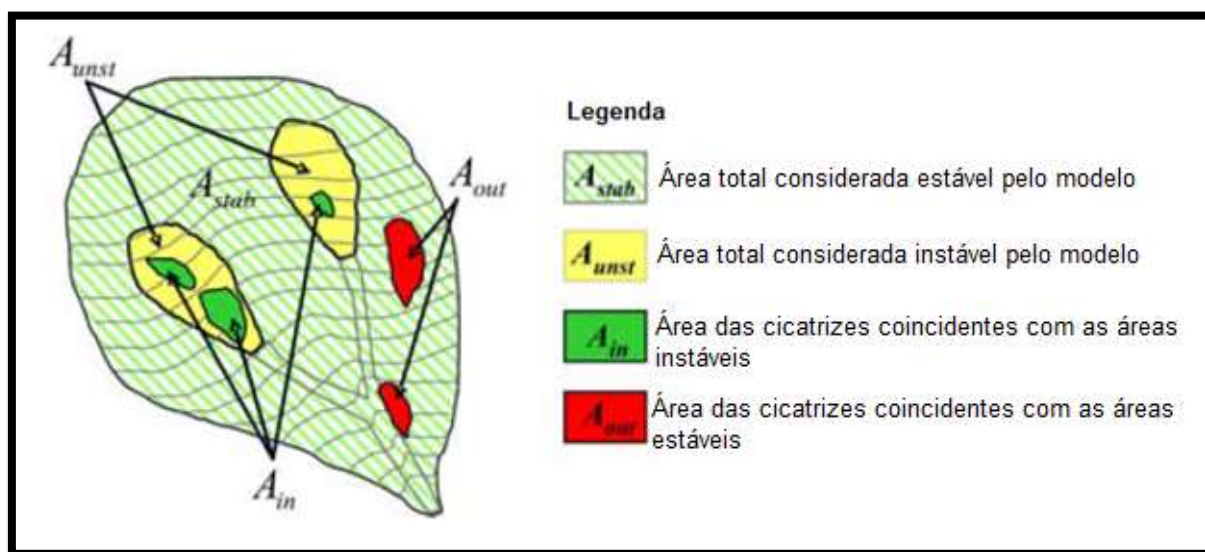
No entanto, a definição do modelo que melhor represente a área de estudo a partir da coincidência espacial entre áreas instáveis e cicatrizes de escorregamentos pode ser muito subjetiva, tornando-se necessária uma análise mais criteriosa. Sendo assim, utilizou-se neste trabalho o método da taxa de sucesso e erro proposto por Sorbino et al. (2010), conforme Figura 11.

Neste método, a eficiência dos modelos se dá por meio de dois índices: índice de sucesso (*SuI*) e índice de erro (*ErI*). *SuI* representa a relação entre a somatória da área média das cicatrizes coincidentes em áreas instáveis (*A_{in}*) dentro da área total considerada como instável pelo modelo (*A_{unst}*); enquanto que, *ErI* é a relação entre a somatória da área média das cicatrizes ocorridas em áreas consideradas estáveis (*A_{out}*), dentro da área total considerada estável pelo modelo (*A_{stab}*). Ambos índices são representados em porcentagem, conforme mostra as Equações 13 e 14:

$$SuI = \frac{A_{in}}{A_{unst}} \cdot 100 \quad (13)$$

$$ErI = \frac{A_{out}}{A_{stab}} \cdot 100 \quad (14)$$

Figura 11: Definição ilustrativa dos índices



Além deste, Sorbino et al. (2010) sugeriram o cálculo da razão entre *SuI* e *ErI* no caso de valores semelhantes entre esses índices. A proporção de maior valor indica o modelo com melhor desempenho.

5.5 Integração dos Resultados

De modo a fornecer discussões sobre os Mapas de Susceptibilidade gerados pelos modelos SHALSTAB e SINMAP, estes foram comparados com os Mapas Hipsométrico, Declividade e Curvatura. Além disso, foram sobrepostos aos Mapas de Susceptibilidade, as Cartas de Susceptibilidade a Ocorrência de Movimentos Gravitacionais de Massa, elaboradas pela CPRM (2013). Estas cartas, em escala 1:50.000, são documentos cartográficos que representam a possibilidade de ocorrência de um determinado evento, que no caso deste projeto relaciona-se à ocorrência de movimentos gravitacionais de massa. O levantamento realizado pela CPRM para a confecção destas cartas, consistiu em uma modelagem matemática realizada em escritório, e que foi posteriormente validada em trabalho de campo por uma equipe de pesquisadores, percorrendo toda a extensão do município a ser mapeado, neste caso, Caraguatatuba. As áreas foram então classificadas em alta, média e baixa susceptibilidade a movimentos de massa. Desse modo, pôde-se obter novos produtos para a integração e verificação dos resultados obtidos pelos modelos SHALSTAB e SINMAP.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos por meio das etapas descritas no capítulo anterior. Estes referem-se aos levantamentos bibliográficos e suas análises, confecção de mapas temáticos, análises estruturais regionais e simulações com os modelos SHALSTAB e SINMAP. Com base nos resultados, faz-se uma discussão acerca do assunto, relacionando-o a trabalhos anteriores.

6.1 Análise Bibliométrica dos Temas da Pesquisa

A pesquisa bibliográfica na plataforma *Scopus* utilizando a palavra-chave “escorregamentos rasos” exibiu 109 resultados (Tabela 4). Destes, 37 documentos apresentavam maior número de citações – 10 ou mais citações; 27 foram desenvolvidos em países de clima tropical – assim como a área de estudo deste trabalho; 3 apresentavam a palavra “Serra do Mar”, outros 3 a palavra “SINMAP”; mais 2 trabalhos com a palavra “SHALSTAB” e por fim outros 2 a palavra “Geologia Estrutural” seja elas em seus resumos ou palavras-chave. Estas 4 palavras foram escolhidas por representarem o panorama geral do estudo aqui relatado.

Tabela 4: Resultados encontrados na plataforma Scopus

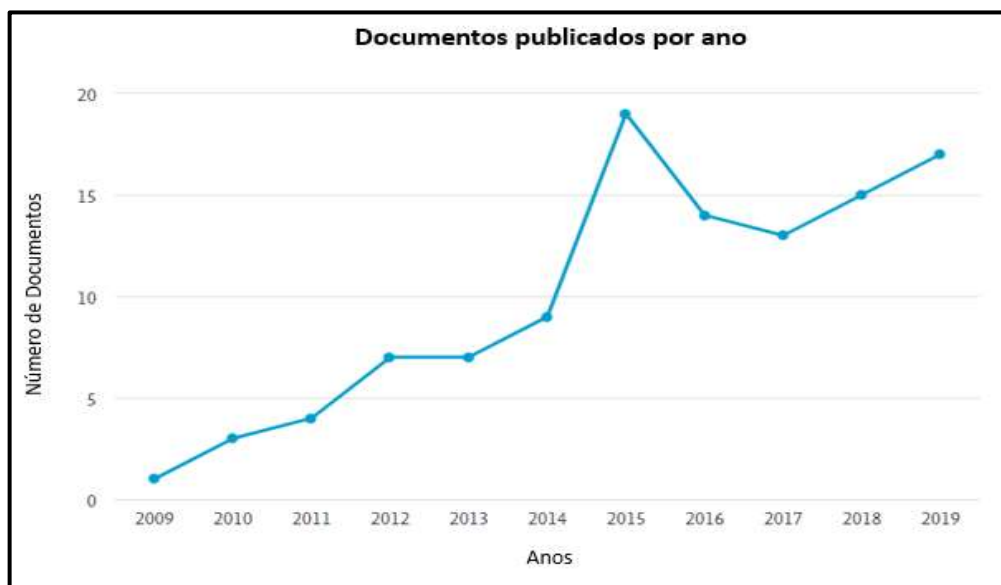
Escorregamentos Rasos (109 resultados)	
Parâmetro	Número de Resultados
Possuem 10 ou mais citações	37
Área de Estudo em Clima Tropical	27
“Serra do Mar” em Resumo ou Palavra-chave	3
“SINMAP” em Resumo ou Palavra-chave	3
“SHALSTAB” em Resumo ou Palavra-chave	2
“Geologia Estrutural” em Resumo ou Palavra-chave	2

Fonte: (AUTOR, 2019)

Analisando os 109 documentos encontrados na primeira busca realizada na plataforma *Scopus*, observou-se um aumento nas publicações anualmente (Figura 12) e a discrepância no

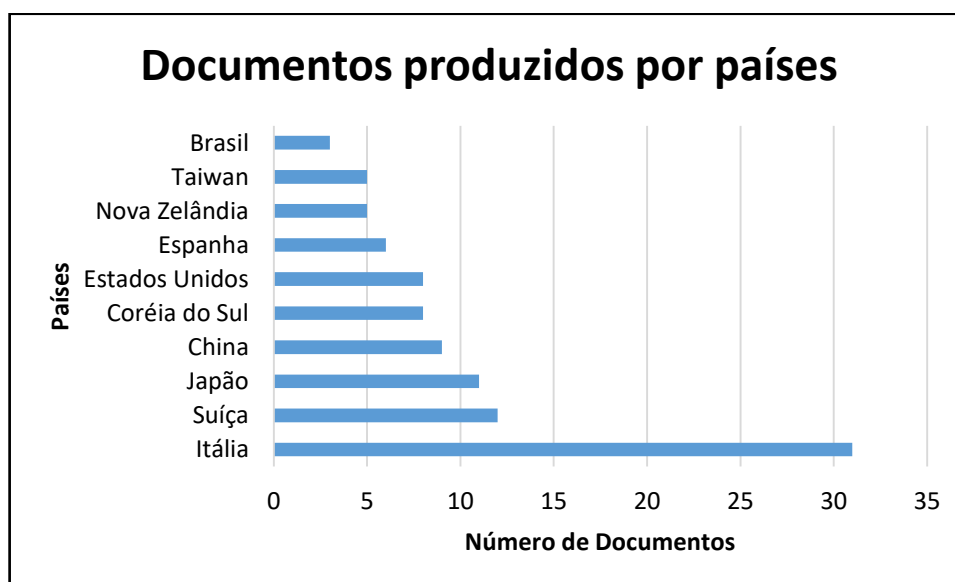
número de produções de artigos relacionados a escorregamentos rasos entre países como a Itália quando comparada ao Brasil, conforme Figura 13.

Figura 12: Gráfico representativo de documentos publicados por ano



Fonte: Elaborado pela autora com base na plataforma Scopus (2019)

Figura 13: Documentos produzidos por país ao longo de 10 anos



Fonte: Elaborado pela autora com base na plataforma Scopus (2019)

A disparidade da Itália diante dos demais países europeus, deve-se ao fato de que, de acordo com o estudo publicado em 2016 pela *World Risk Report* - ONU, os riscos de ocorrerem

inundações e escorregamentos na Itália são maiores do que nos outros países ocidentais. Ambos os processos estão atrelados a elevada pluviosidade presente em muitos locais da Itália, principalmente na região Sul, trazendo como consequência a saturação do solo e consequente diminuição de sua resistência – ocasionando escorregamentos em regiões com certa declividade, e, processos fluviais, como inundações e solapamento de margens em regiões com declividade entre 3° e 11° (D'AMATO AVANZI et al., 2004). Além disso, de acordo com o ISPRA (Istituto Superior de Proteção e Pesquisa Ambiental), órgão do governo italiano, a Itália possui 12% do total de sua população, correspondendo a cerca de 7 milhões de pessoas, vivendo em áreas de risco de escorregamentos e/ou inundações. Estima-se ainda, que mais de 90% dos municípios italianos encontram-se em regiões susceptíveis destes eventos ocorrerem, e, por ano, cerca de 10 óbitos são registrados em decorrência desses processos.

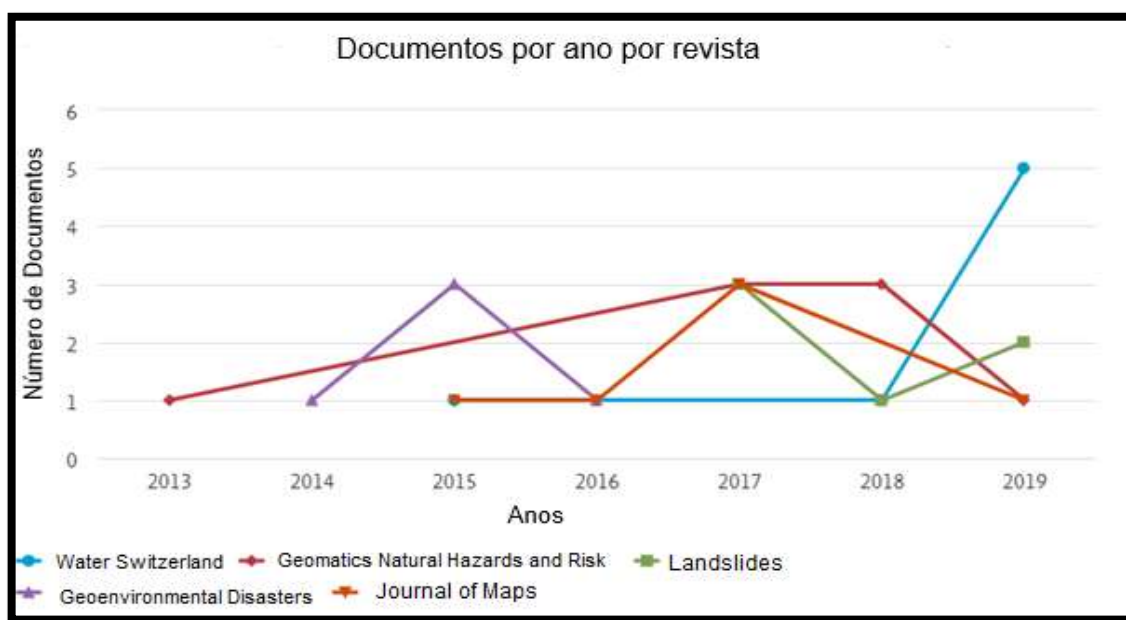
Nota-se também, que as frentes de pesquisa entre Brasil e Japão, por exemplo, são diferentes, uma vez que, além das condições ambientais serem distintas, inúmeros artigos produzidos por pesquisadores japoneses voltam-se a estudos de tecnologias passíveis de serem aplicadas ao monitoramento e prevenção de desastres envolvendo escorregamentos, frequentes no país. Ressalta-se, neste caso, a marcante diferença no modo como as pesquisas brasileiras e japonesas são conduzidas: no Brasil são produzidos artigos pós acidentes, muitas vezes catastróficos, buscando identificar o que ocasionou tal incidência; no Japão, por sua vez, as pesquisas são conduzidas antes da ocorrência de acidentes, buscando-se novas tecnologias para evitar que estes ocorram.

Assumindo-se que a elevada pluviosidade presente na Itália, e tsunamis no Japão são utilizados como fomentadores de estudos envolvendo a dinâmica superficial, faz-se o paralelo que a extensão continental do Brasil, e sua consequente geodiversidade, deveriam ser agentes evidenciadores da necessidade de pesquisas na área geotécnica no país. Além disso, paralelo aos números apresentados da Itália, têm-se segundo um estudo do IBGE de 2010, que cerca de 8,2 milhões de brasileiros vivem em áreas de risco de deslizamentos ou enchentes, ou seja, um número ainda maior comparado à Itália.

Dentre os principais meios de publicação desta temática, destaca-se a Revista *Landslides*, cujo fator de impacto é 4.252. Em 15 anos a revista publicou aproximadamente 1.345 artigos, com temáticas abrangendo os mecanismos e processos de deslizamentos de terra, vulcânicos e marinhos; bem como monitoramento e modelagem envolvendo técnicas de SIG (Sistema de Informação Geográfica). Outra revista de destaque é a revista *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, (fator de impacto 2.332), que publica artigos que tratam de novos conceitos, abordagens e estudos de caso usando técnicas de detecção geoespacial (GIS e GPS) e

sensoriamento remoto para estudar monitoramento, mapeamento, gerenciamento e mitigação de riscos, vulnerabilidade a riscos e aviso prévio de riscos naturais. No ano de 2019, a revista que publicou mais artigos sob a temática de escorregamentos rasos foi a *Water (Switzerland)*, cujo fator de impacto é 2.524. Apesar de não ser destaque em anos anteriores, a revista recebeu em 2019 5 artigos relacionando índices pluviométricos extremos a ocorrência de escorregamentos. A Figura 14 mostra as principais fontes de publicação dos 109 documentos encontrados nos últimos 6 anos.

Figura 14: Principais revistas cujos artigos analisados foram publicados

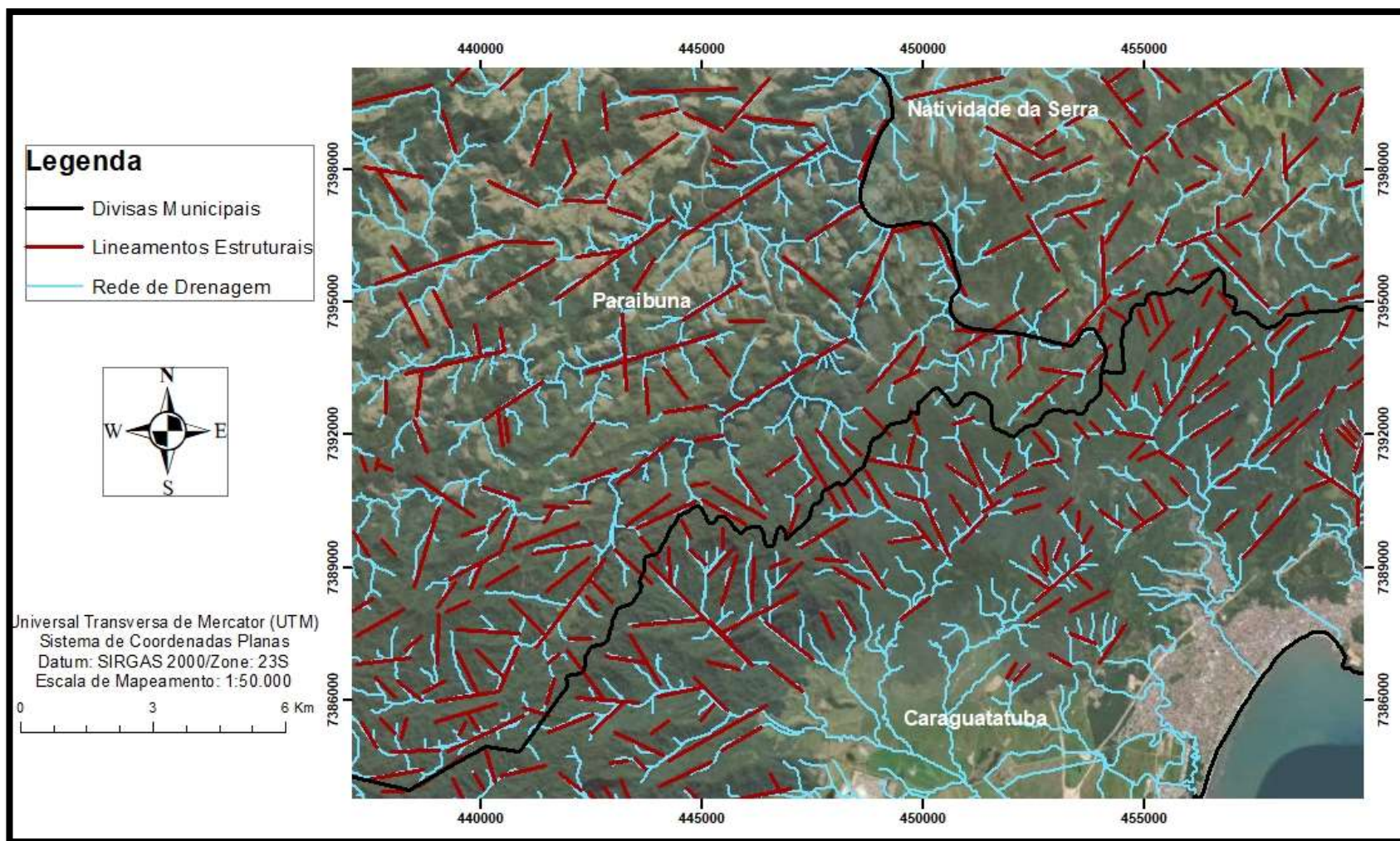


Fonte: Elaborado pela autora com base na plataforma Scopus (2019)

6.2 Análise Regional

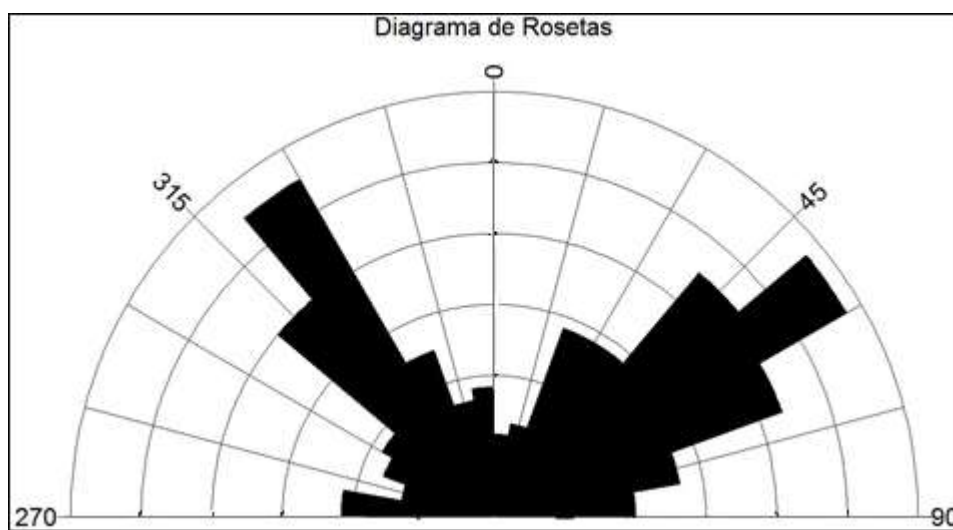
Apresenta-se na Figura 15 o Mapa de Lineamentos Estruturais da região estudada. A partir do conjunto de lineamentos, elaborou-se o Diagrama de Rosetas, que indica as maiores frequências de direções das discontinuidades presentes na região (Figura 16).

Figura 15: Mapa de Lineamentos Estruturais



Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 16: Diagrama de Rosetas (N=340)

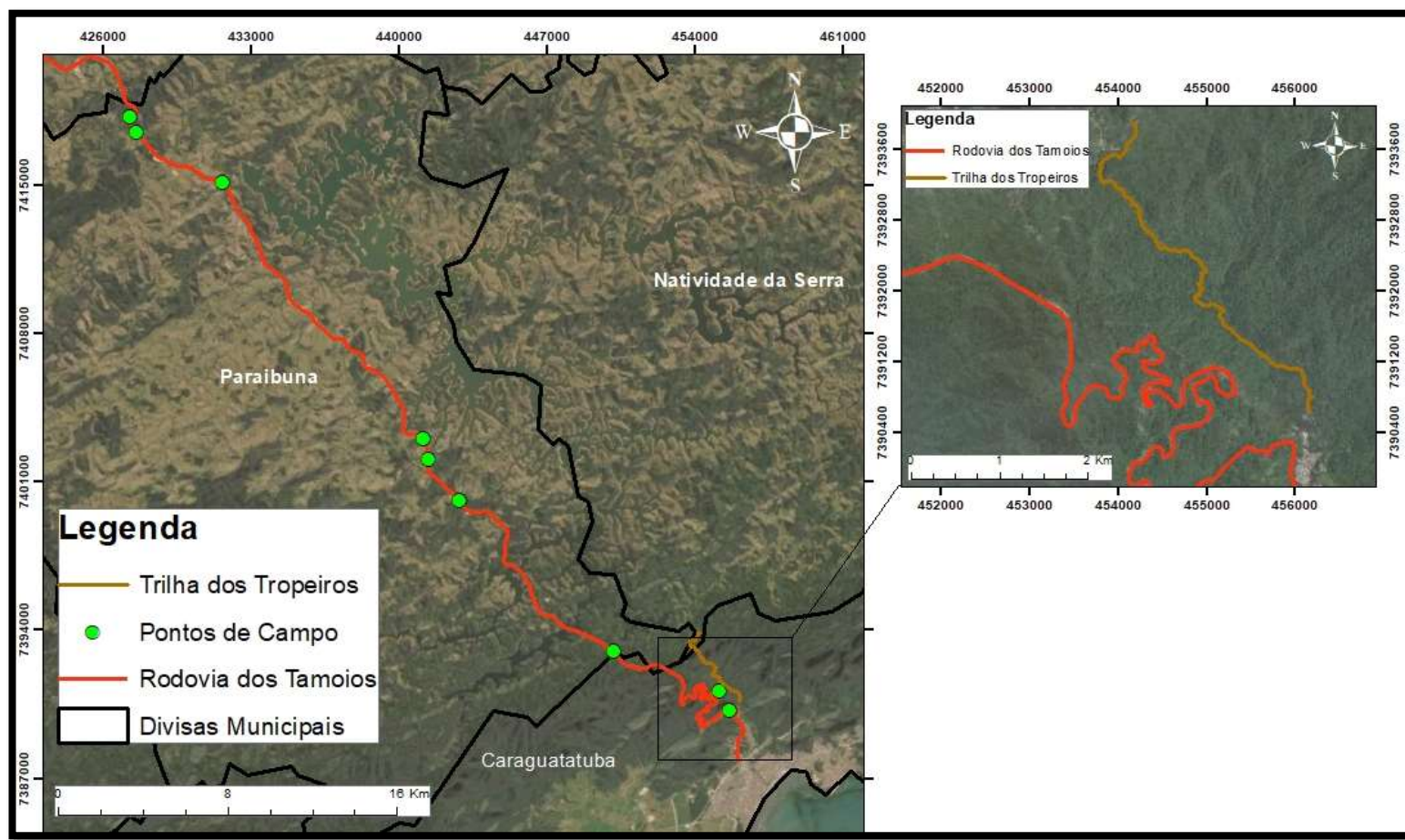


Fonte: (AUTOR, 2019)

A partir da análise do diagrama de rosetas, observa-se que as maiores frequências se encontram na direção NE-SW (N45-60), seguidas da direção NW-SE (N315-330). Tais direções são concordantes com as principais famílias de falhas e fraturas mapeadas na região: Falha Bertiooga – Caraguatatuba, Falha Freire – Lourenço e Barro Alto (NE-SW) e fraturas (NW-SE) registradas em ocorrências por todo o mapa. Estes resultados estão em consonância com os trabalhos de Campanha, Ens e Ponçano (1994) e Cerri (2018), bem como às informações estruturais coletadas em campo.

A Tabela 5 e a Figura 17 referem-se aos dados coletados ao longo da “Trilha dos Tropeiros”, localizada no Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo de Caraguatatuba. A Tabela 5 e a Figura 18 apresentam os dados coletados em cortes de maciços presentes ao longo do antigo traçado da Rodovia dos Tamoios (SP-99). Ambos caminhos percorridos para a coleta de dados encontram-se na Figura 17 e as medidas foram realizadas com o auxílio da bússola CLAR. Ressalta-se que a ausência de coordenadas na Tabela 10 deve-se ao fato da presença intensa de vegetação arbórea de grande porte, impossibilitando o sinal preciso do localizador do GPS utilizado.

Figura 17: Mapa dos Percursos realizados na coleta de dados



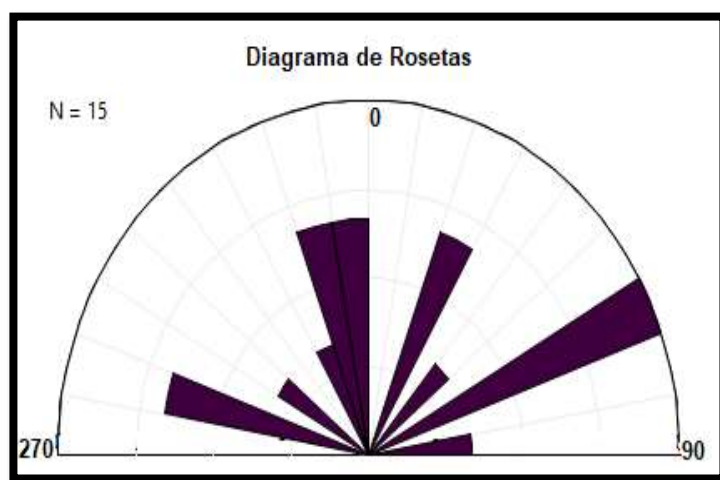
Fonte: (AUTOR, 2019)

Tabela 5: Medidas estruturais realizadas ao longo da "Trilha dos Tropeiros" – Parque Estadual da Serra do Mar

MEDIDA DA BÚSSOLA (NOTAÇÃO STRIKE/DIP)	TIPO DE DESCONTINUIDADE
85/90	Foliação
65/90	Foliação
65/84	Foliação
108/67	Fratura
47/63	Foliação
352/60	Fratura
340/60	Fratura
347/66	Fratura
176/60	Fratura
20/64	Foliação
62/55	Foliação
22/72	Foliação
306/76	Fratura
286/55	Fratura
332/90	Fratura

Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 18: Diagrama de Rosetas - Trilha dos Tropeiros - N=15



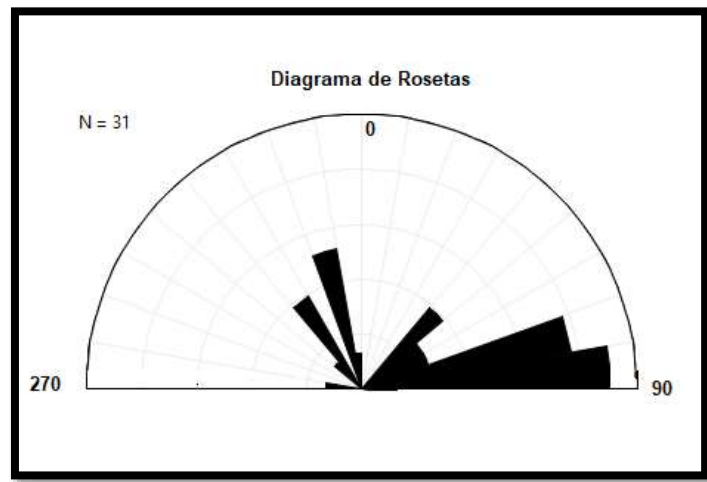
Fonte: (AUTOR, 2019)

Tabela 6: Medidas estruturais coletadas ao longo da Rodovia dos Tamoios (SP-99)

PONTO	COORDENADAS (GD)	MEDIDA DA BÚSSOLA (NOTAÇÃO STRIKE/DIP)	TIPO DE DESCONTINUIDADE
1	-23.343.768 -45.711.016	72/75	Foliação
		76/80	Foliação
		82/70	Foliação
		349/85	Fratura
2	-23.372.023 -45.668.502	40/78	Foliação
		40/89	Foliação
3	-23.508.078 -45.559.619	80/60	Foliação
		88/55	Foliação
4	-23.590.028 -45.439.011	322/34	Fratura
		352/20	Fratura
		326/45	Fratura
5	-23.598.354 -45.434.384	56/80	Foliação
		58/80	Foliação
		78/25	Foliação
		320/85	Fratura
		316/68	Fratura
6	-23.572.595 -45.487.887	66/75	Foliação
		84/75	Foliação
		342/20	Fratura
		340/55	Fratura
		78/80	Foliação
7	-23.490.458 -45.573.634	48/56	Foliação
		342/88	Fratura
		60/70	Falha destal
		70/80	Falha normal
		92/59	Falha normal
8	-23.481855 -45.575847	82/80	Foliação
9	-23.350.297 -45.707.989	84/84	Falha destal
		90/57	Falha destal
		80/86	Falha destal
		74/90	Falha destal

Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 19: Diagrama de Rosetas - Rodovia dos Tamoios - N=31



Fonte: (AUTOR, 2019)

Os resultados estruturais coletados em campo confirmam as informações observadas nas imagens de satélite, conforme Figura 15, observando-se a predominância de estruturas com direções NE e NW. Dentre as NW, destacam-se algumas com direção praticamente N-S, pouco observadas em satélite na escala 1:50.000, porém detectadas em campo e presentes em alguns trabalhos anteriores como de Maffra (2000), Reverte (2016) e Cerri (2018).

O padrão da foliação apresenta-se bem definido nas rochas gnáissicas e graníticas – litologia predominante na região (Figuras 20 e 21). Destaca-se também a presença de falhas secundárias de mesma direção da Falha principal denominada Bertioga-Caraguatatuba, originadas em período posterior a esta. Assume-se que os lineamentos observados nas imagens de satélite na direção NE se referem a foliações e falhas, e os lineamentos encontrados na direção NW relacionados a fraturas (Figura 22).

Figura 20: Plano de foliação bem marcado em gnaiss (Rodovia dos Tamoios (SP-99))



Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 21: Plano de foliação bem marcado em granito (Rodovia dos Tamoios (SP-99))



Fonte: (AUTOR, 2019)

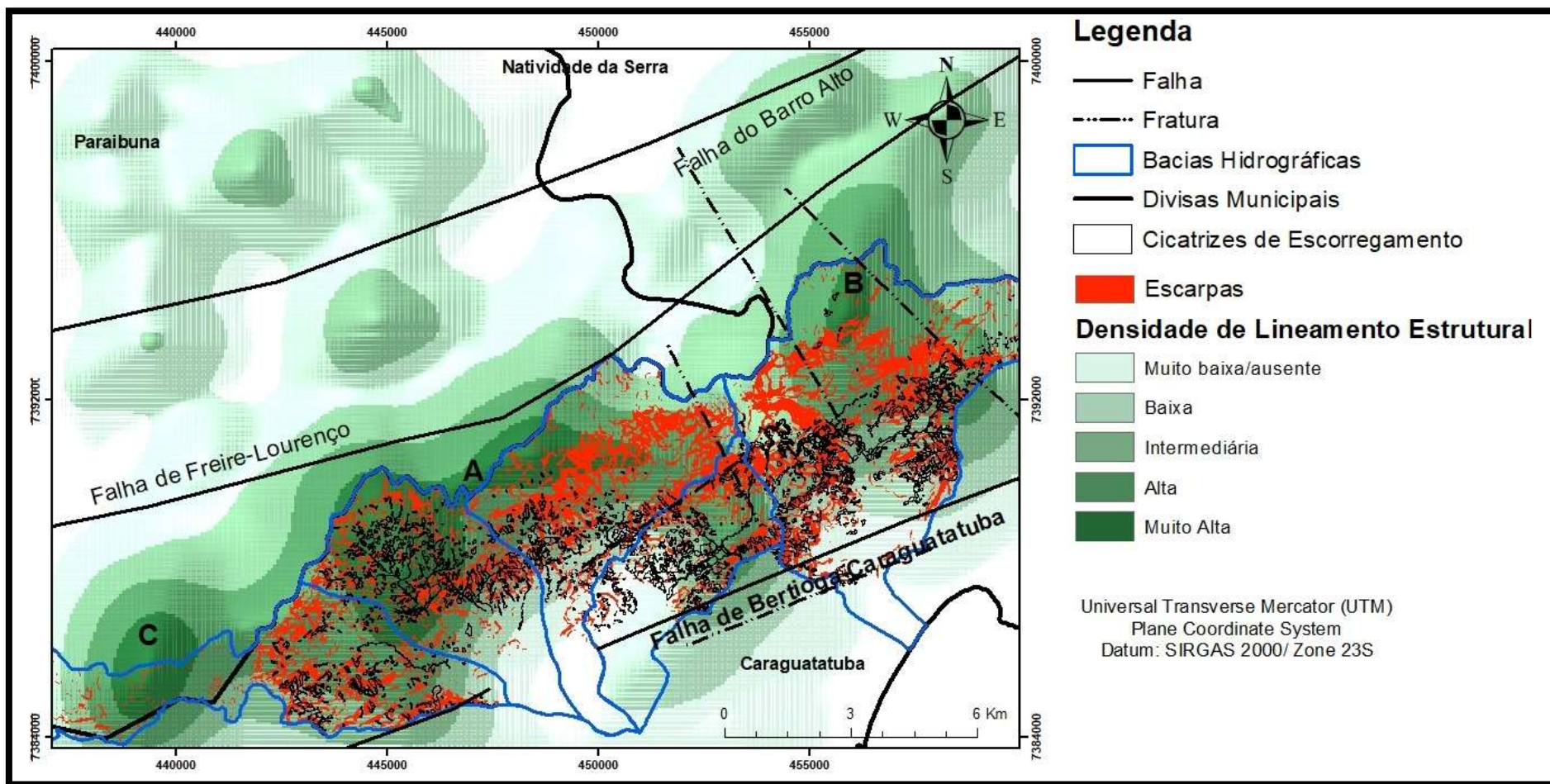
Figura 22: Plano de fratura encontrado em granito



Fonte: (AUTOR, 2019)

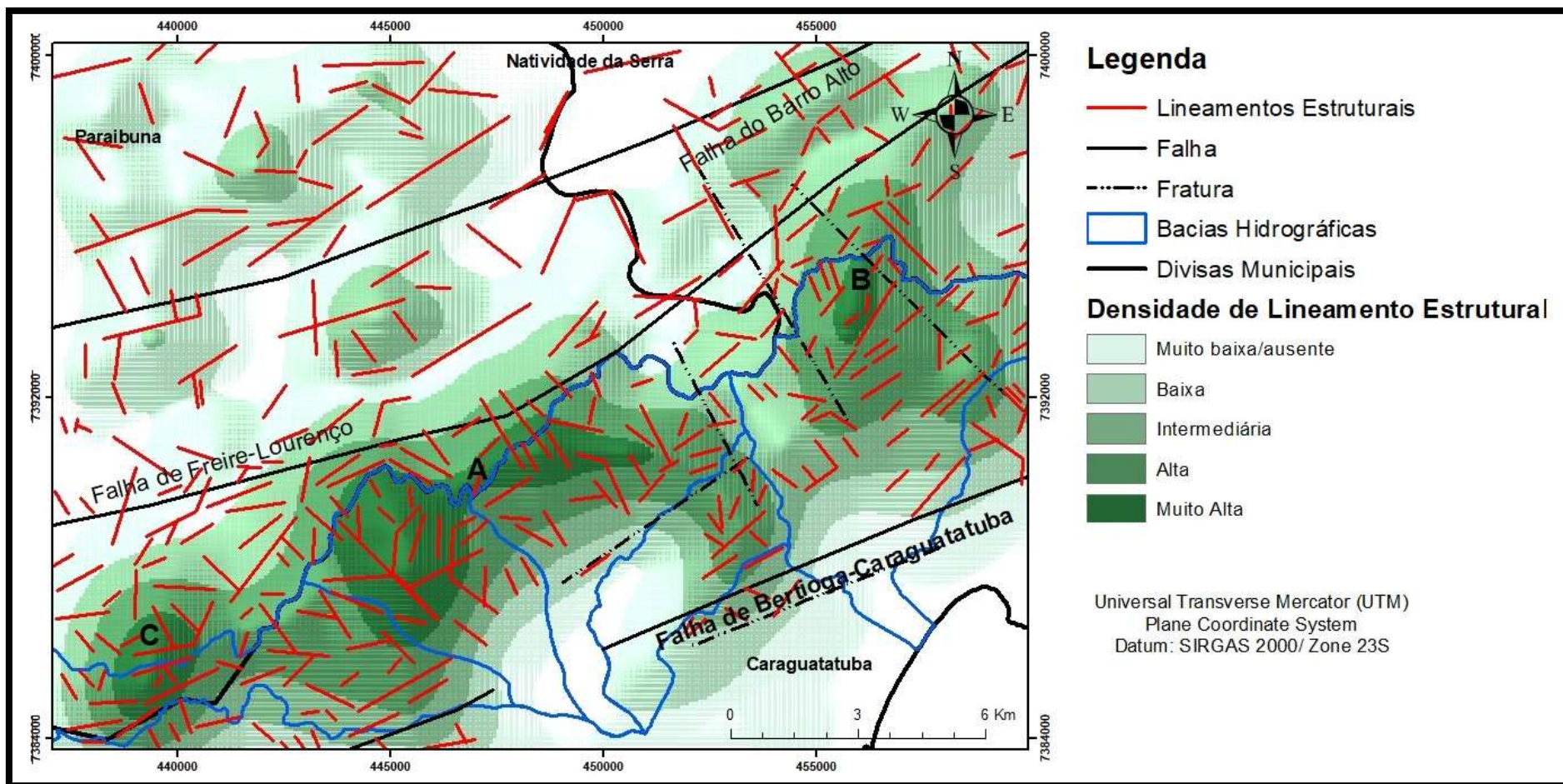
Através do Mapa de Lineamentos Estruturais, foi gerado o Mapa da Densidade de Lineamentos Estruturais (Figuras 23 e 24), com a finalidade de se obter uma correlação entre a ocorrência das cicatrizes de escorregamento e as áreas com alta densidade de lineamentos.

Figura 23: Mapa de Densidade de Lineamentos Estruturais



Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 24: Mapa de Densidade sobreposto aos Lineamentos Estruturais



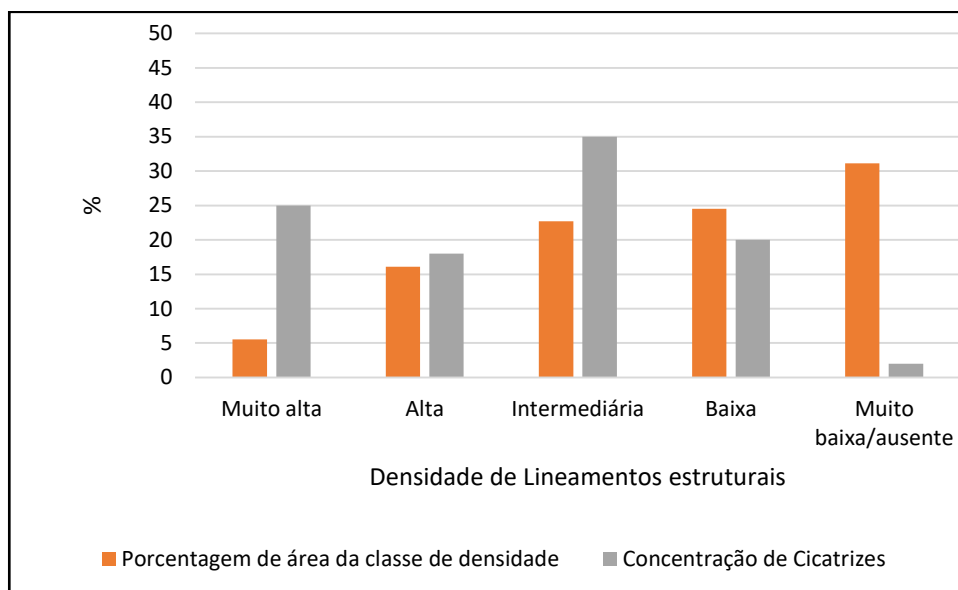
Fonte: (AUTOR, 2019)

No Mapa de Densidade de Lineamentos Estruturais (Figuras 23 e 24) observa-se que as cicatrizes de escorregamento se localizam nas Escarpas da Serra do Mar, concentrando-se no município de Caraguatatuba, presentes em 5 bacias hidrográficas: Santo Antônio, Pau d'alto, Divisa, Ribeirão Aldeia e Canivetal, sendo a primeira a mais afetada pelos escorregamentos de 18/03/1967 (CORRÊA, 2018). As 1.405 cicatrizes mapeadas ocupam uma área de aproximadamente 7,025 km², correspondendo a 1,85% da área de estudo (379 km²).

Correlacionando-se as cicatrizes de escorregamento com os lineamentos estruturais mapeados, observa-se que 8,5% dos escorregamentos ocorridos intersectaram ao longo de lineamentos mapeados (Figura 15). Das 3 principais áreas classificadas como áreas de muito alta densidade de lineamentos (A, B e C), conforme indicado na Figura 23, apenas uma área, localizada no sudoeste do mapa (área A), apresenta alta concentração de cicatrizes, dada por área de cicatrizes com relação à área do polígono. Comparativamente a área B, que também apresenta uma alta densidade de lineamentos, a área A apresenta mais concentração de cicatrizes (11,4%) do que B (1,87%). Pode-se atribuir a esta diferenciação as direções dos lineamentos observados na Figura 15. Na área A os lineamentos apresentam mais de uma direção preferencial, ao passo que em B, observa-se uma predominância dos lineamentos na direção NE-SW, concordante a Falha de Bertiooga-Caraguatatuba. Desse modo, conforme citado por Okida (1996), pode-se atribuir como um dos possíveis, mas não exclusivo, fatores do desencadeamento de escorregamentos na Serra do Mar, o controle estrutural da área, principalmente quando há a intersecção de várias direções de lineamentos estruturais, justificando a alta concentração de cicatrizes na área A (Figura 23).

Ao realizar o cálculo de Frequência e de Concentração de Cicatrizes para cada classe definida na densidade de lineamentos estruturais, foi elaborado o gráfico presente na Figura 25. O gráfico estabelece uma correlação entre a porcentagem de área de cada classe de densidade (muito alta/alta/intermediária/baixa/ausente) perante a área total de análise e, para cada uma destas, a porcentagem de cicatrizes perante o número total delas, coincidentes na área.

Figura 25: Porcentagem da área de classes e concentração de cicatrizes



Fonte: (AUTOR, 2019)

Com a análise do gráfico anterior, observa-se que a maior concentração de cicatrizes (35%) ocorre nas regiões classificadas como de média densidade de lineamentos estruturais. É nesta região, que está uma das principais estruturas mapeadas: a Falha Bertioga-Caraguatatuba e suas falhas secundárias adjacentes. Ademais, aliada a existência destas falhas, observa-se nesta região, a presença do relevo escarpado da Serra do Mar, com inclinações acima de 35°, que propiciam a ocorrência maior de escorregamentos (GRAMANI, 2001).

Apesar da maior concentração de cicatrizes situar-se na região de média densidade de lineamentos estruturais, esta região representa aproximadamente 23% da área total de estudo, ou seja, aproximadamente 87 km², resultando em uma média de 6 cicatrizes a cada km². Paralelamente, têm-se a expressividade da Área A, classificada como uma classe de muito alta densidade de lineamentos. Em seus 15 km² de área, concentra mais de 24% do total de cicatrizes (os decimais restantes para completar os 25% de cicatrizes, presentes na Figura 25, encontram-se na Área B). Desse modo, têm-se que na região de alta densidade de lineamentos estruturais, cuja maior parte concentra-se na Área A, a média de cicatrizes por km² é de 23. Assim, analisando conjuntamente as Figuras 23, 24 e 25, observa-se a importância da Falha Bertioga-Caraguatatuba e da presença de escarpas, nos escorregamentos ocorridos em áreas de média densidade de lineamentos estruturais e, a influência dos vários lineamentos estruturais

intersectando-se em diferentes direções nas áreas de muita alta densidade de lineamentos estruturais, principalmente relacionado a Área A.

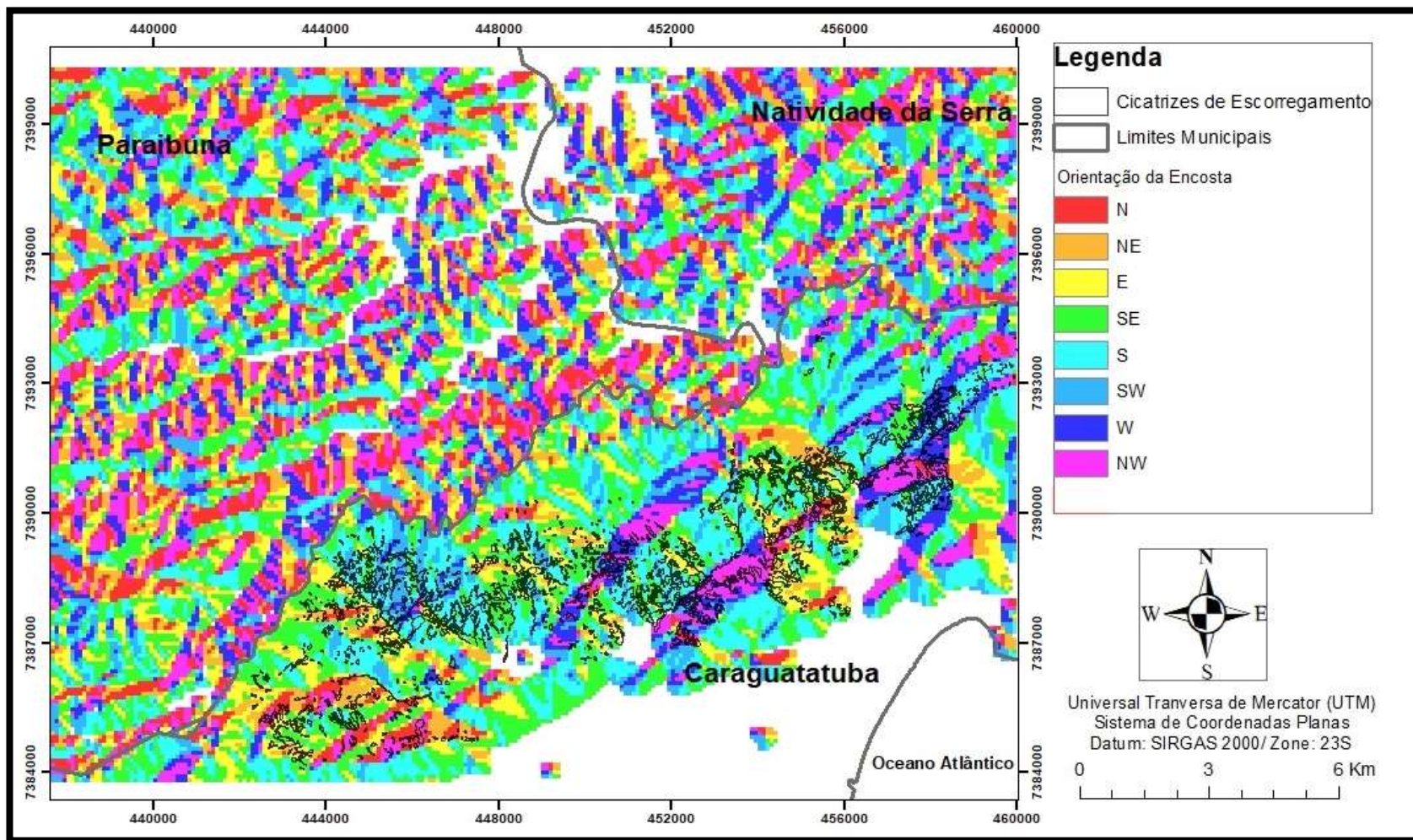
Nesse contexto, a presença de estruturas geológicas de variáveis atitudes, aliadas à remoção da vegetação devido ao processo de antropização e a incidência de altos índices pluviométricos atuam como um catalisador na ocorrência de escorregamentos (OKIDA, 1996).

Considerando os registros de inúmeros escorregamentos ocorridos no município de Caraguatatuba, é possível afirmar que o agente catalisador para a deflagração desses processos foram as extremas precipitações registradas. Apenas no mês de março de 1967, 946 mm de chuva foram registrados nos postos pluviométricos do município, e destes, 585 mm ocorreram entre os dias 17 e 18 (GRAMANI, 2001; NERY, 2016; CORRÊA, 2018).

O clima úmido das vertentes do litoral norte paulista é responsável pela elevada pluviosidade característica da área de estudo, que possui grande influência das massas de ar Tropical Marítimo (mT) e Polar Atlântico (mP). Aliada a essa condição, a direção NE-SW da Serra do Mar torna-se responsável pelo elevado índice de pluviométrico devido ao efeito orográfico, estendendo-se inclusive em meses de inverno (GUTJAHR et al., 2000).

Os índices pluviométricos podem ainda se correlacionar com as barreiras topográficas impostas por meio das escarpas da Serra do Mar e os ventos oriundos do sul. Para estabelecer a correlação entre a orientação das encostas e as cicatrizes de escorregamento, foi elaborado o Mapa de Orientação das Encostas (Figura 26 e Tabela 7).

Figura 26: Mapa de Orientação das Encostas



Fonte: (AUTOR, 2019)

Tabela 7: Classes de orientação das encostas e escorregamentos

CLASSES	ESCORREGAMENTOS	%
N	41	3
NE	99	7
E	338	24
SE	348	26
S	181	13
SW	168	11
W	126	9
NW	104	7
TOTAL	1.405	100

Fonte: (AUTOR, 2019)

De acordo com a Tabela 7, observa-se que a maioria dos escorregamentos ocorreu nas encostas voltadas para a direção E-SE, no qual foram identificadas 686 cicatrizes (49%). Resultado semelhante foi encontrado no trabalho de Cerri (2018), que ao analisar as bacias hidrográficas do município de Caraguatatuba, concluiu que as encostas com rumo SE, apresentam maiores potencialidades à ocorrência de escorregamentos planares.

As encostas voltadas aos quadrantes E-S funcionam como uma barreira topográfica às passagens de sistemas frontais, fazendo com que ocorram precipitações orográficas (MARCELINO, 2003). Ainda de acordo com Marcelino (2003), a umidade advinda dos ventos marítimos, bem como a menor incidência de raios solares nas encostas direcionadas ao quadrante E, favorecem o aumento da umidade no solo.

Estas observações corroboram os resultados dos trabalhos de Donati e Turrini (2002) e Dai e Lee (2002), que destacam a correlação entre escorregamentos e a orientação das encostas, uma vez que agrupadas as condições de incidência de raios solares, direção dos ventos, quantidade de precipitação e umidade, irão consequentemente afetar a resistência ao cisalhamento. Quanto menor a resistência ao cisalhamento do material que recobre a Serra do Mar, maiores são as chances de ocorrerem escorregamentos. Em campo, pôde-se observar dois pontos que confirmam o supracitado: ocorrência de escorregamento planar com orientação paralela a foliação registrada (Figura 27) e, a presença de zonas de maior percolação de água no maciço, que diminui as características de coloração e resistência da rocha (Figura 28).

Figura 27: Deslocamento ocorrido no plano de foliação do gnaisse



Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 28: Zona de percolação de água em gnaisse



Fonte: (AUTOR, 2019)

6.3 Análise de Bacias Hidrográficas

A definição das regiões que foram submetidas ao processo de modelagem nos modelos SINMAP e SHALSTAB, foi baseada nos resultados obtidos na análise em escala regional. Considerando estes resultados, observou-se que as cicatrizes de escorregamento advindas do evento ocorrido em março de 1967 concentraram-se em 5 bacias hidrográficas distintas: Pau d'alho, Canivetal, Santo Antônio, Divisa e Ribeirão Aldeia (Figura 29). Além disso, a proximidade destas com as obras de duplicação existentes na Rodovia dos Tamoios (SP-99) acresceu no peso de importância na seleção destas bacias para análise e aplicação dos modelos.

A aplicação dos respectivos modelos se torna importante para avaliar qual apresenta melhor resultado perante ao evento ocorrido no passado, sendo escolhido, portanto, para aplicações e análises futuras em uma região com intenso tráfego de pessoas.

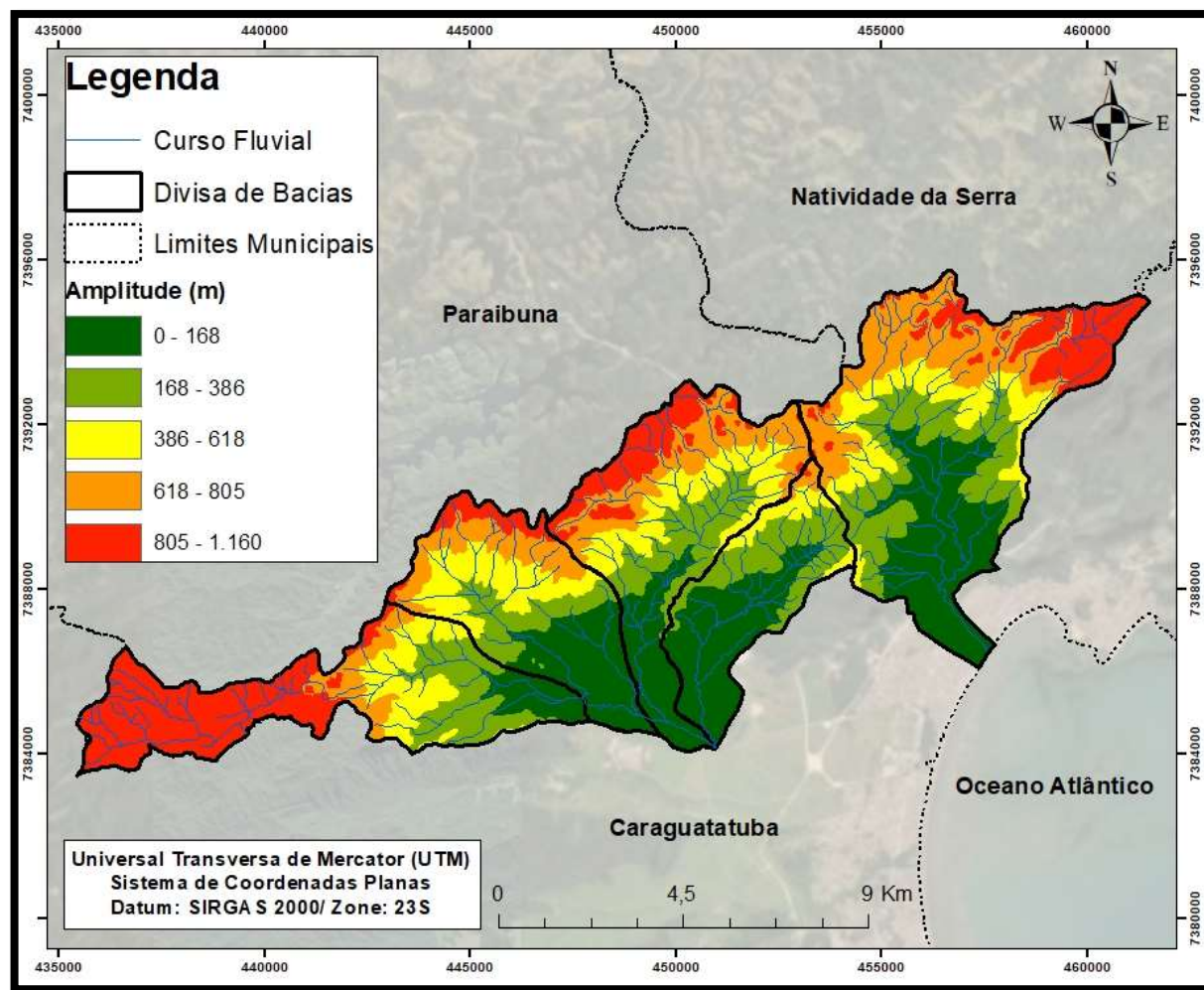
Figura 29: Cicatriz de Escorregamento encontrada na Bacia Santo Antônio



Fonte: (AUTOR, 2019)

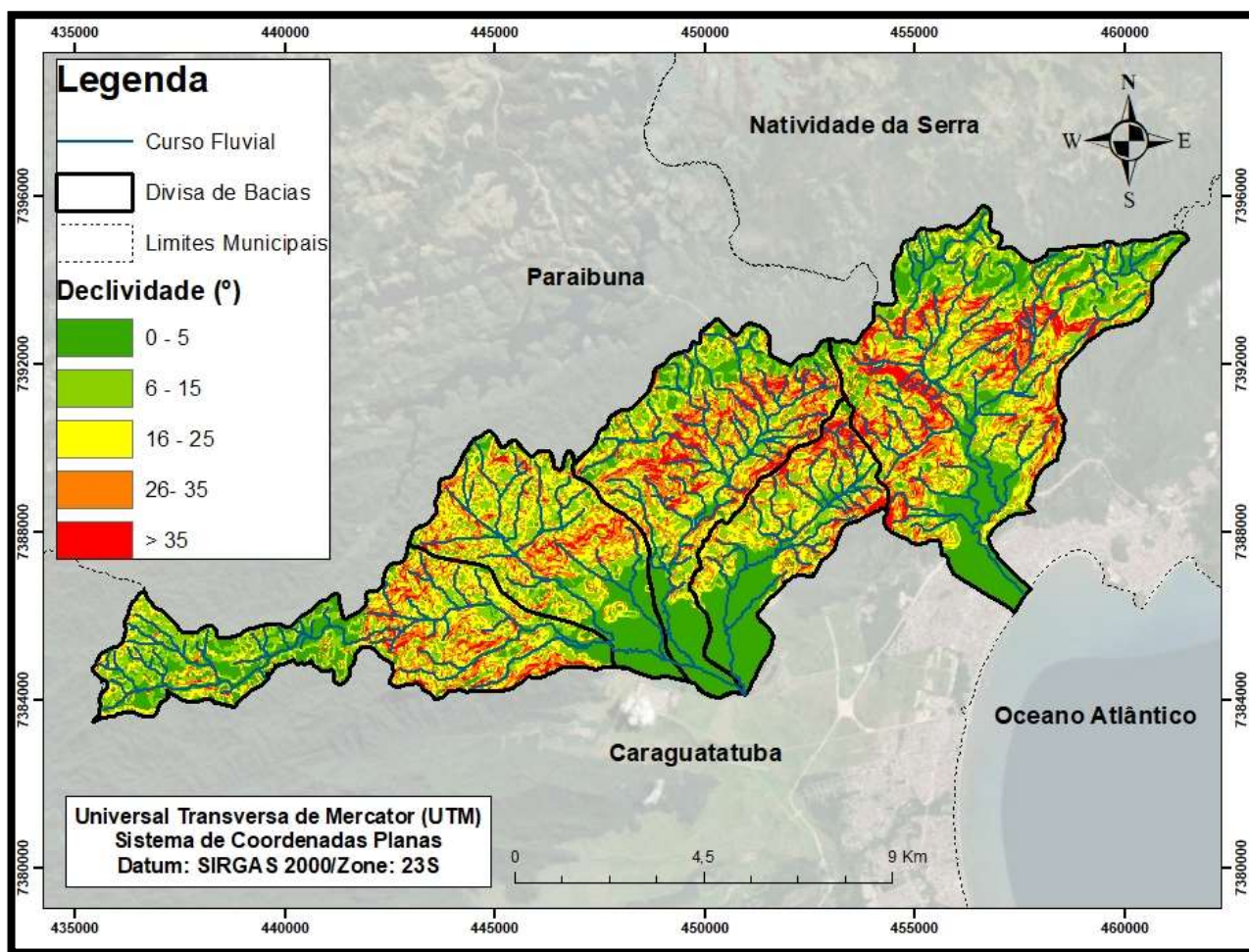
A base de entrada dos dados para execução de ambos modelos foram os parâmetros topográficos, obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), do Mapa de Declividade, do Mapa de Curvatura e do Mapa de Direção de Fluxo (Figuras 30, 31, 32 e 33, respectivamente).

Figura 30: Modelo Digital de Elevação (MDE) das bacias da área de estudo



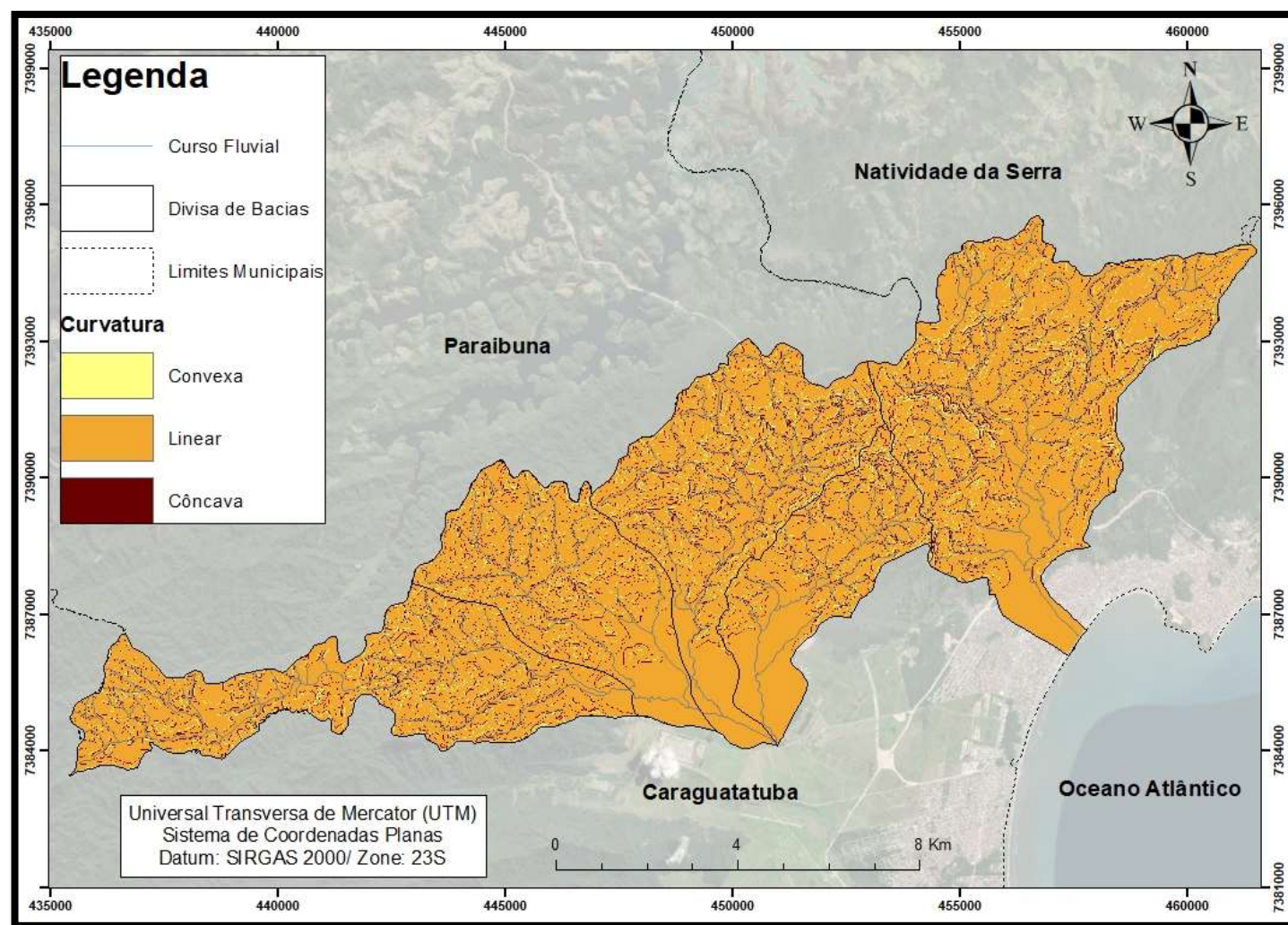
Fonte: AUTOR, 2019

Figura 31: Mapa de Declividade das bacias analisadas



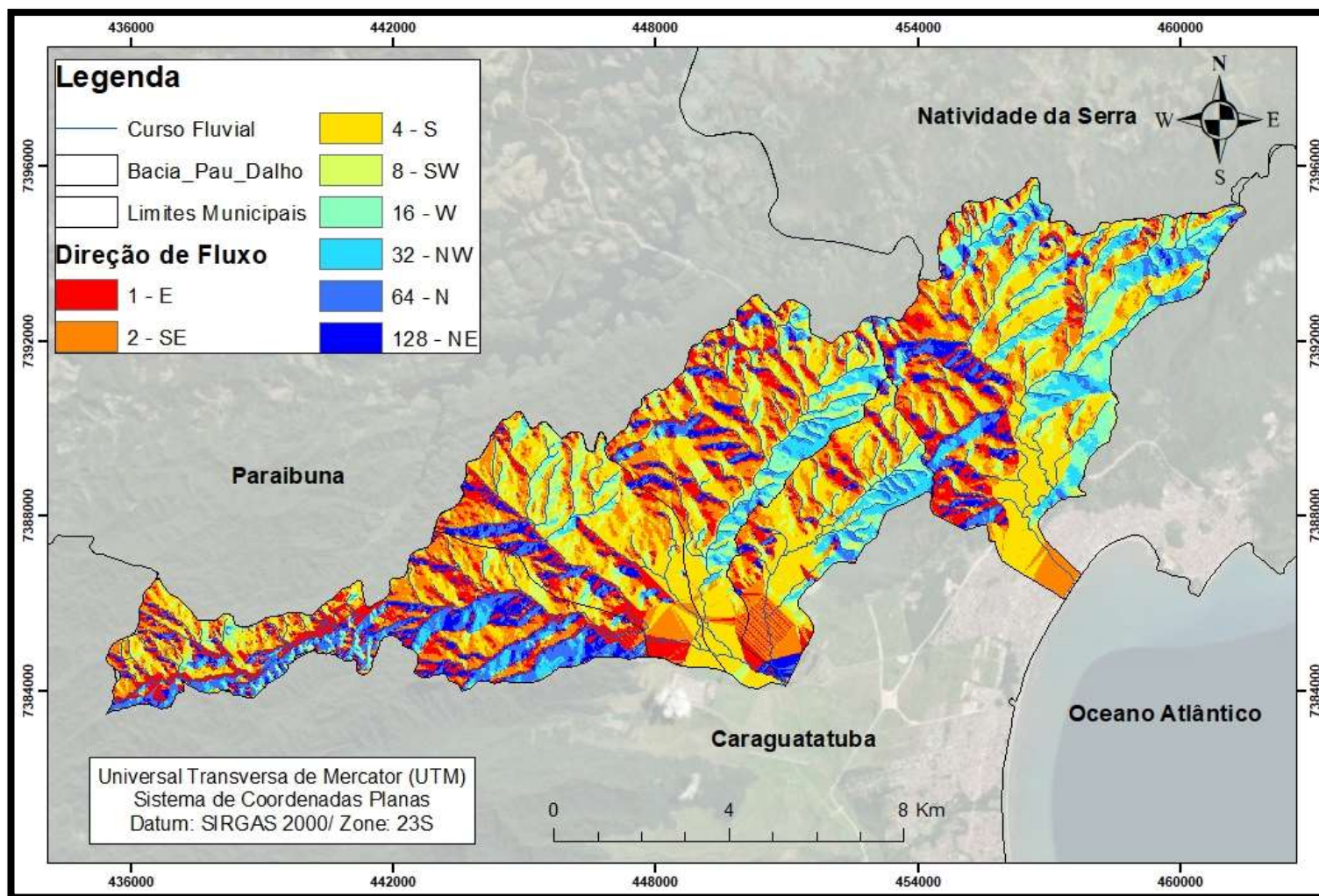
Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 32: Mapa de Curvatura das Vertentes



Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 33: Mapa de direção de fluxo de água das bacias

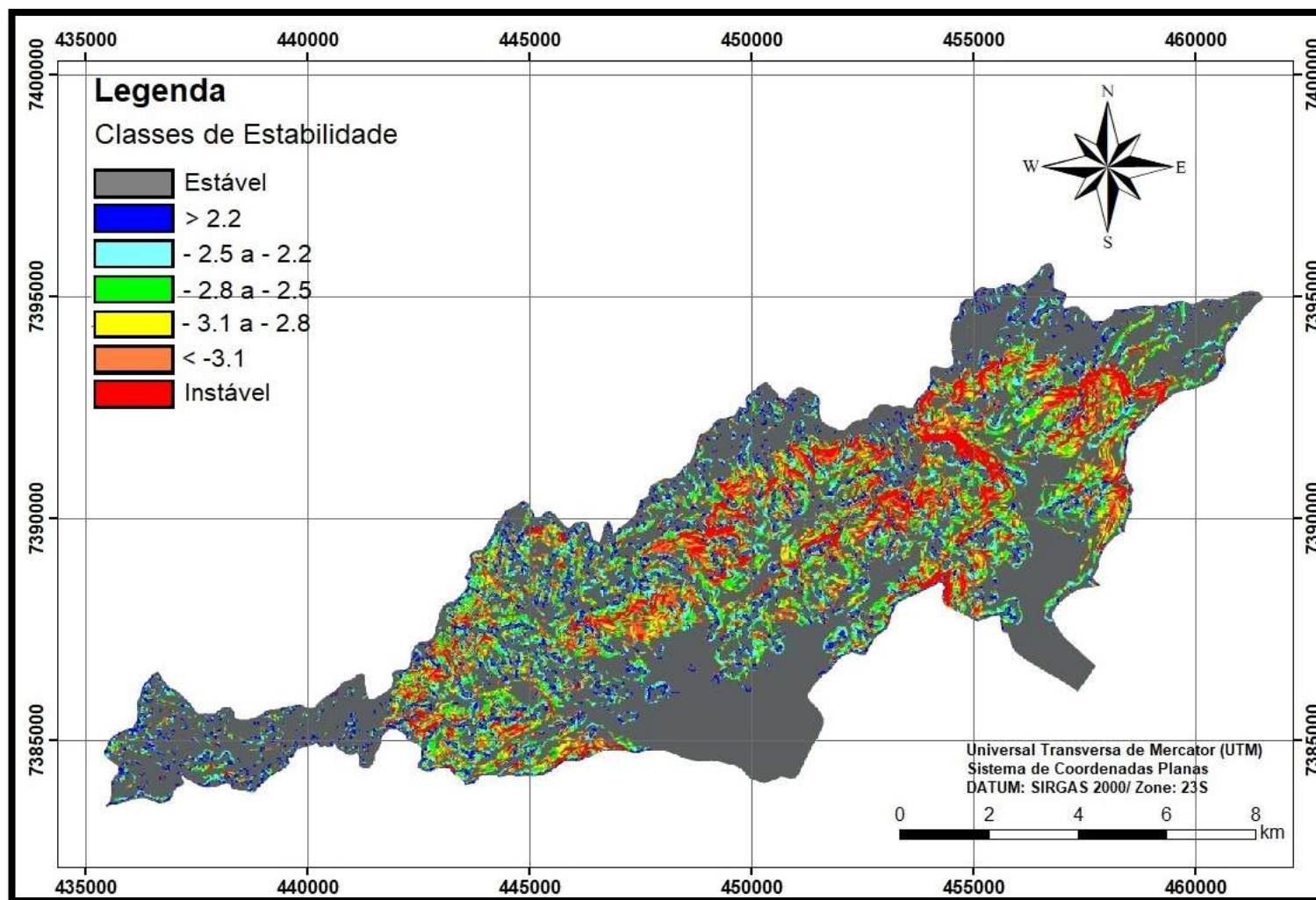


Fonte: (AUTOR, 2019)

6.3.1 SHALSTAB

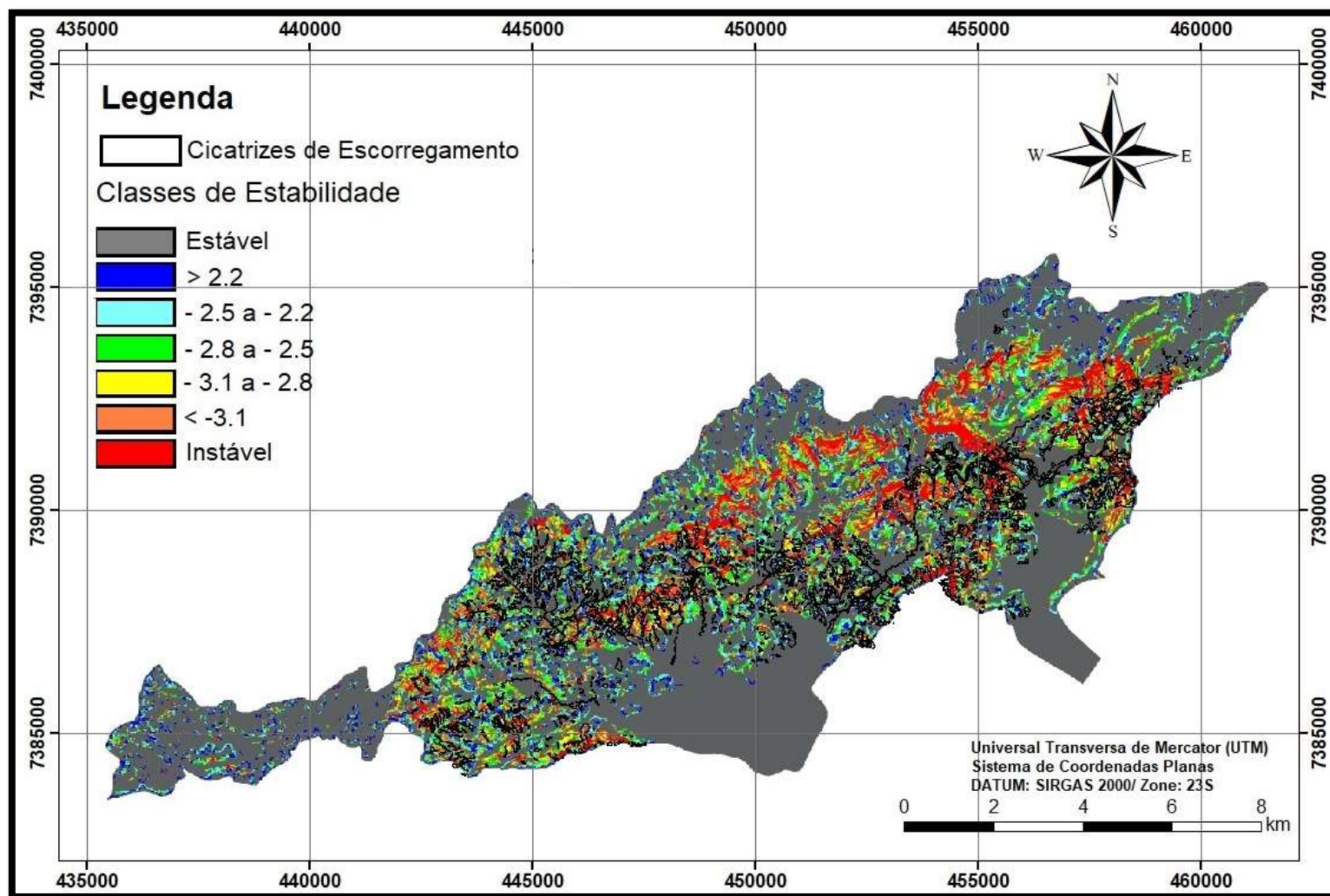
Os parâmetros geotécnicos de entrada utilizados pelo modelo SHALSTAB na avaliação da suscetibilidade a escorregamentos nas bacias encontram-se descritos na Tabela 8. Tal modelo foi executado por meio do *software* SAGA GIS, em sua extensão de análise de terreno. De modo a gerar uma melhor visualização, confeccionaram-se dois mapas: um indicando os resultados pela simulação do modelo SHALSTAB, representando o mapa de estabilidade das 5 bacias analisadas com as 7 diferentes classes propostas por Montgomery e Dietrich (1994) (Figura 34); e outro com as cicatrizes de escorregamento sobrepostas ao mapa anterior (Figura 35). A maioria das áreas classificadas geomorfologicamente como planícies foram consideradas estáveis pelo modelo, mesmo em condições de solo saturado. Observa-se também, que áreas dadas como instáveis pelo modelo, concentram-se principalmente nas escarpas da Serra do Mar e, principalmente nas bacias Santo Antônio, Ribeirão Aldeia e Canivetal – fato este comprovado através da observação de inúmeros registros de escorregamentos ao longo da Rodovia dos Tamoios (SP-99) e no percurso da Trilha dos Tropeiros.

Figura 34: Mapa de susceptibilidade gerado pelo modelo SHALSTAB



Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 35: Cicatrizes de Escorregamento sobrepostas ao Mapa de Susceptibilidade gerado pelo SHALSTAB



Fonte: (AUTOR, 2019)

Conforme supracitado, aproximadamente 50% da área total de estudo, enquadra-se em zona estável, dado pela presença de planícies nas porções ao sul dos contornos das bacias hidrográficas. Ressalta-se que dentre o restante da porcentagem, a maior fração (aproximadamente 10%) foi classificada como área instável, correlacionando-se com zonas de alta declividade (Figura 31) comprovando a importância do fator declividade para a modelagem de áreas susceptíveis a escorregamentos. Assim como no estudo de Gabelini (2017), realizado na Serra do Mar (municípios de Caraguatatuba e São Sebastião), verifica-se que as classes com declividade entre 15 e 45° apresentam maior concentração de cicatrizes. Resultados semelhantes foram encontrados por Lopes (2006) e Vieira (2015), destacando-se o intervalo entre 30 e 40° como mais susceptíveis a escorregamentos rasos na Serra do Mar (SP).

Ainda segundo Gabelini (2017), a menor concentração de cicatrizes em áreas com declividade maior que 45° deve-se ao fato de que estas regiões se enquadram em regiões de bordas do planalto, com elevações maiores que 800 m, caracterizadas pela presença de paredões rochosos com profundidade de solo ausente ou muito raso, tornando os processos de escorregamento mais escassos do que movimentos do tipo queda de blocos, fato verificado também neste trabalho.

Os valores das demais porcentagens das 7 classes atribuídas pelo modelo SHALSTAB encontram-se na Tabela 8, correlacionando-as ao número de cicatrizes presentes em cada classe. Ressalta-se que essa correlação foi realizada pelo próprio *software* SAGA GIS, módulo *Análise de Terreno*, e que para cada polígono de cicatriz foi criado um ponto médio, sendo este analisado em qual classe localizava-se.

Tabela 8: Classes e Distribuição da Ocorrência de Escorregamentos (SHALSTAB)

Classes	Área km ²	Área (%)	Número de Cicatrizes	Cicatrizes (%)	% Cicatrizes / % Área
Instável	8,9	9,8	140	10	1,02
log q/T < -3.1	6,6	7,3	170	12,1	1,65
-3.1 < log q/T < -2.8	6,5	7,1	130	9,2	1,41
-2.8 < log q/T < -2.5	7,2	7,9	294	20,9	2,64
-2.5 < log q/T < -2.2	8,4	9,3	180	12,8	1,35
log q/T > -2.2	6,1	6,7	91	6,5	0,95
Estável	47,2	51,9	400	28,5	0,54
Total	90,9	100	1405	100	-

Fonte: (AUTOR, 2019)

Com base na Tabela 8, ponderam-se algumas observações, tais quais: embora o número de cicatrizes verificadas em áreas estáveis seja elevado (400 cicatrizes), estas encontram-se em

uma área que representa aproximadamente 52% da área total analisada, ou seja, em média encontram-se 8 cicatrizes por km² considerado estável. Paralelo a esta análise, têm-se que a área classificada como instável, cuja área representa 5 vezes menos a da área estável, possui 140 cicatrizes, correspondendo a aproximadamente 16 cicatrizes por km² de área instável.

Analisando o agregado de áreas instáveis e intermediárias (classes instáveis até classes menores a -2.5), têm-se 734 cicatrizes em uma área equivalente a 29,2 km², representando aproximadamente a existência de 25 cicatrizes de escorregamento a cada km². Unindo as classes restantes para uma análise comparativa de cicatrizes e área, têm-se 671 cicatrizes para 61,7 km², configurando em aproximadamente 10 cicatrizes de escorregamento para cada km² analisado.

A última coluna presente na Tabela 8, apresenta a correlação entre porcentagem de cicatrizes de escorregamento por porcentagem de área de cada classe de estabilidade existente e, com isso, são indicadas em quais classes ocorreram maior número de escorregamentos. Desse modo, os valores desta razão maiores que 1, representam as classes com maior incidência de escorregamentos e, as menores que 1, as classes com menor incidência de escorregamentos. Têm-se no modelo SHALSTAB que a maior coincidência espacial entre as cicatrizes de escorregamento foi estabelecida na classe intermediária, cuja relação q/T varia entre -2,8 e -2,5, seguida pela classe de $q/T < -3,1$. Ressalta-se que ambas são classificadas de acordo com o modelo, como classes instáveis.

Sendo assim, observa-se que embora o modelo SHALSTAB tenha classificado muitas cicatrizes em zonas estáveis, estas encontram-se menos concentradas do que se comparadas as zonas instáveis, dadas principalmente pelo valor de área de localização. Apresenta-se ainda, que a ocorrência de cicatrizes em áreas classificadas como estáveis, já ocorreu em trabalhos anteriores, como por exemplo de Riffel et al. (2016), onde 6,4% do total de cicatrizes analisadas coincidiu com áreas estáveis, e pouco mais de 4% coincidiu com áreas instáveis, dadas pelo modelo SHALSTAB. Pondera-se também o fato relacionado a dificuldade em se diferenciar cicatrizes de escorregamento de erosões associadas a drenagens, podendo fazer com que dentre o elevado número de cicatrizes em áreas estáveis estejam presentes feições erosivas fluviais.

6.3.1.1 Comparativo SHALSTAB x Mapa de Susceptibilidade

A fim de se comparar o Mapa de Susceptibilidade obtido com o modelo SHALSTAB e a Carta de Susceptibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa, ambos foram sobrepostos e os resultados finais encontram-se nas Figuras 36, 37 e 38.

A integração entre esses mapas permitiu estabelecer uma boa correlação entre os dados gerados pelo SHALSTAB e as áreas delimitadas pela CPRM. Ressalta-se, principalmente, o mapa apresentado na Figura 37: a delimitação de áreas propensas a movimentos gravitacionais de massa, proposta pelo Serviço Geológico, inclui áreas de baixa elevação (até 400 metros), porém com declividades maiores a 15°, destacando-se mais uma vez a importância do fator declividade na susceptibilidade a ocorrência de movimentos de massa.

Na Figura 38, observa-se que as áreas classificadas como de baixa susceptibilidade a movimentos de massa concentram-se nas áreas dadas como estáveis pelo modelo, ou seja, nas bordas inferiores e superiores da área de estudo, bem como na porção oeste. Em todas observa-se uma predominância de baixas declividades e caracterizadas pela geomorfologia contínua: planaltos para as zonas oeste e bordas superiores; planícies para a borda inferior.

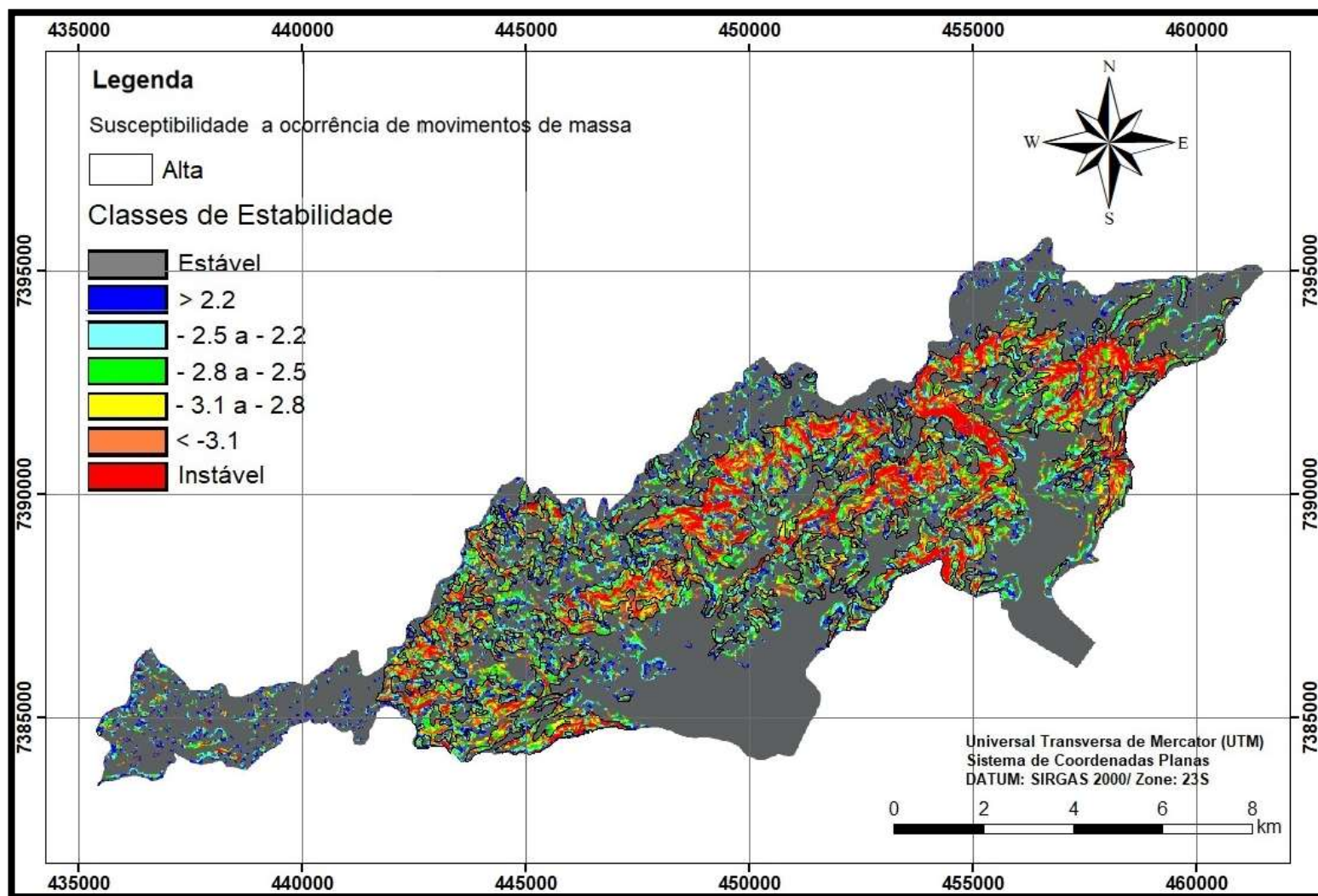
A presença de cicatrizes em áreas consideradas de baixa susceptibilidade pela CPRM, assim como visto anteriormente a ocorrência destas em áreas estáveis do modelo, pode estar condicionada ao fato de que embora os escorregamentos ocorram na maioria das vezes em encostas, estes podem também ocorrer em taludes suaves e rasos com declividade mínima, próximas ou inferiores a 5°. Segundo Highland e Bobrowsky (2008), a distribuição dos escorregamentos correlaciona-se com padrões de clima e tempo, cursos de rios e córregos ou padrões humanos que envolvam a destruição da vegetação, modificação da morfologia do terreno, dentre outras práticas urbanas e rurais.

Dentre a principal causa dos escorregamentos, segundo os mesmos autores, está a saturação de água no solo, sendo esta advinda de chuvas intensas, como o ocorrido neste presente estudo, ou mesmo de mudanças do nível de água na superfície ao longo da orla costeira. Exemplo desta saturação ocorreu em 1985 em Porto Rico, onde um escorregamento no local levou ao óbito pelo menos 129 pessoas. Este fenômeno catastrófico foi provocado por uma tempestade tropical produzindo elevados índices de chuva, e, aliado a isso, houve a saturação por esgoto em área densamente povoada, e existência de canalização de água com vazamento bem no cume do escorregamento (Highland e Bobrowsky, 2008).

Observa-se na área de estudos, a existência de núcleos urbanos na porção leste do mapa, bem como da antiga Estrada Tamoios (Figura 39). Considerando que a região urbana demonstrada em detalhe na Figura 40, apresenta cicatrizes de escorregamento em áreas consideradas estáveis pelo SHALSTAB e de baixa susceptibilidade a movimentos de massa pela CPRM, pode-se atribuir a ocorrência de escorregamentos nesta região à interferências antrópicas, sejam estas devido a existência de ocupações irregulares presentes antes do evento de 1967 e persistentes até os dias de hoje conforme observado em campo, ou devido a existência

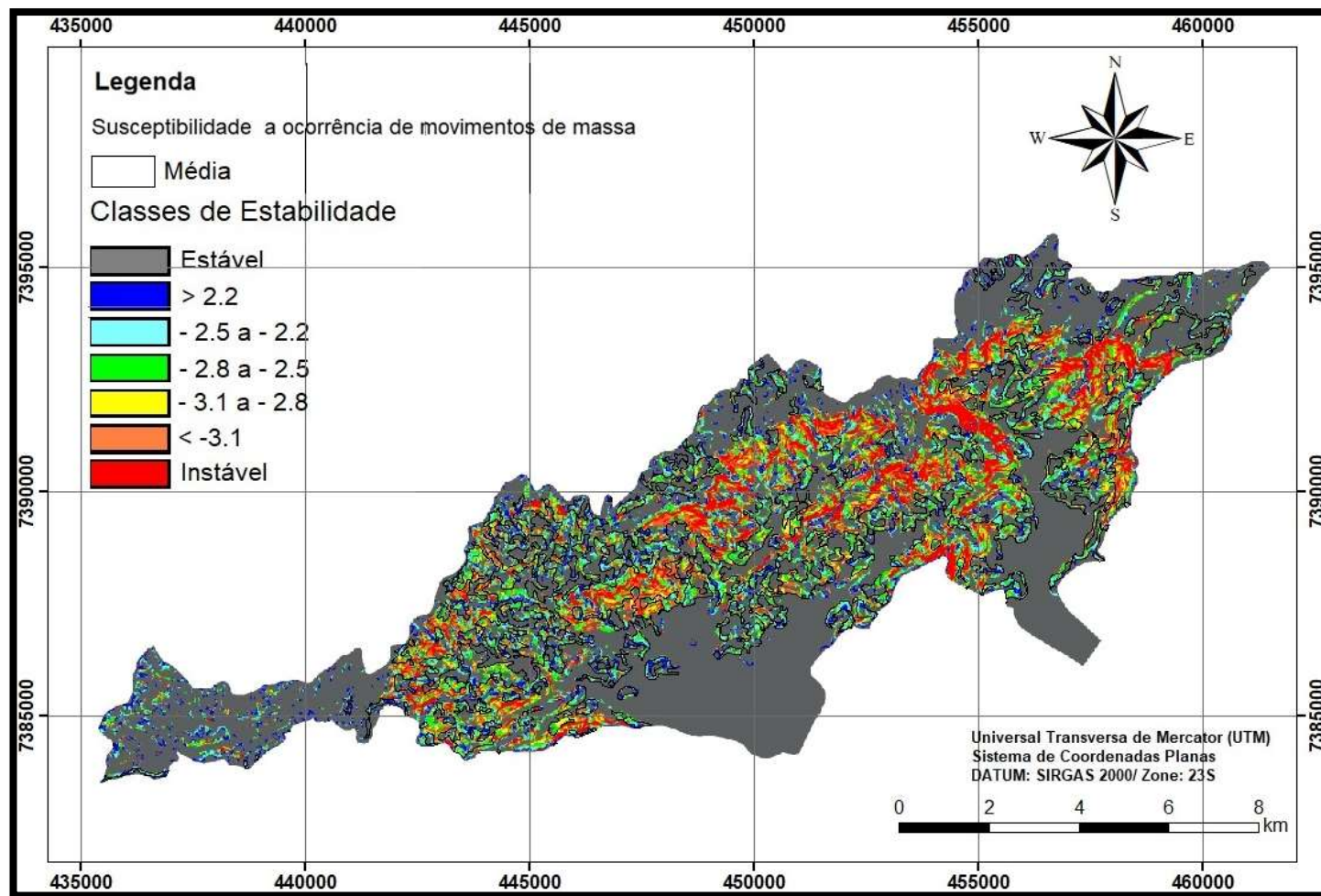
da Rodovia dos Tamoios, inaugurada em 1957, cuja construção modificou a morfologia do local.

Figura 36: Mapa de Alta Susceptibilidade a Movimentos de Massa



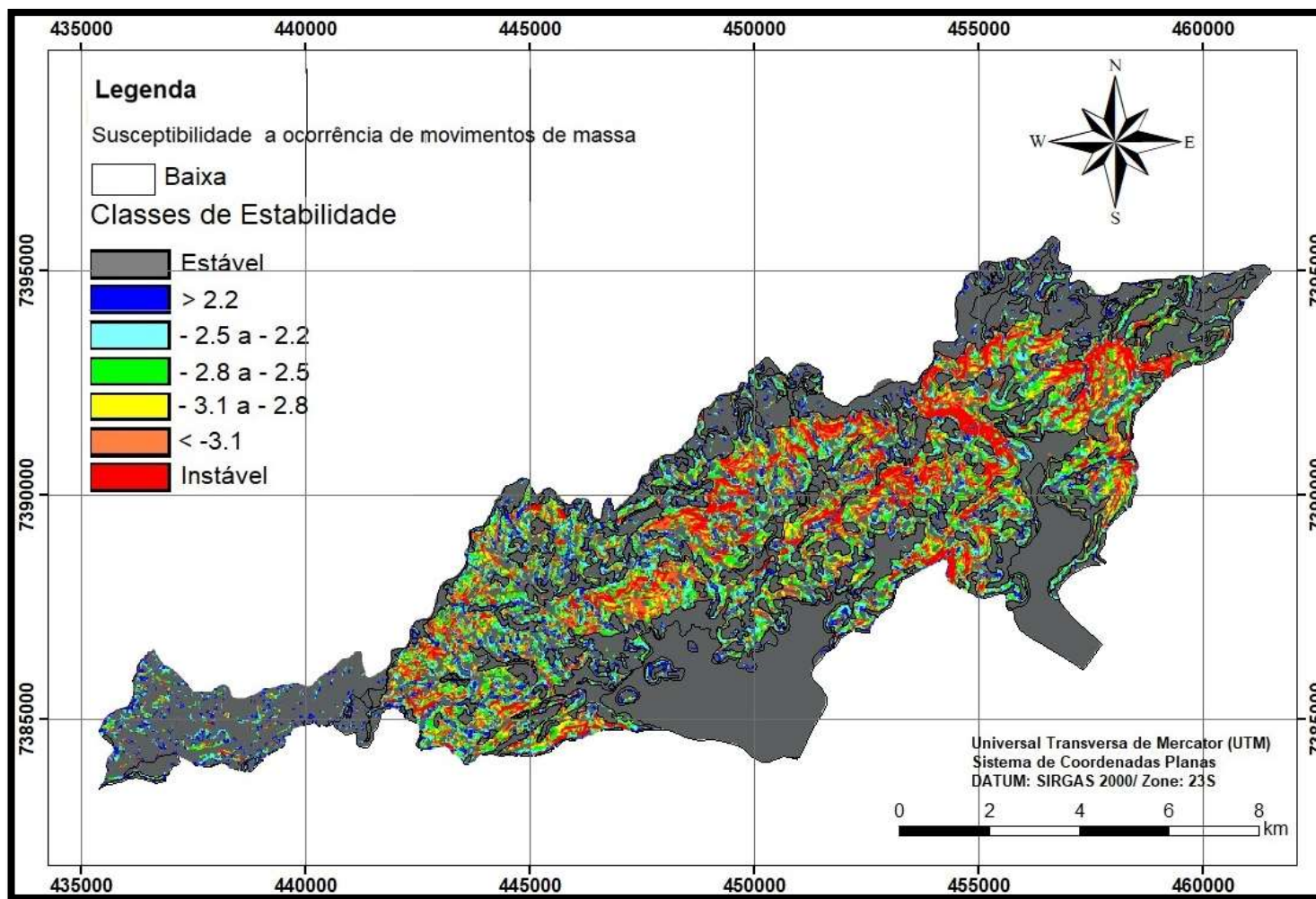
Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 37: Mapa de Média Susceptibilidade a Movimentos de Massa



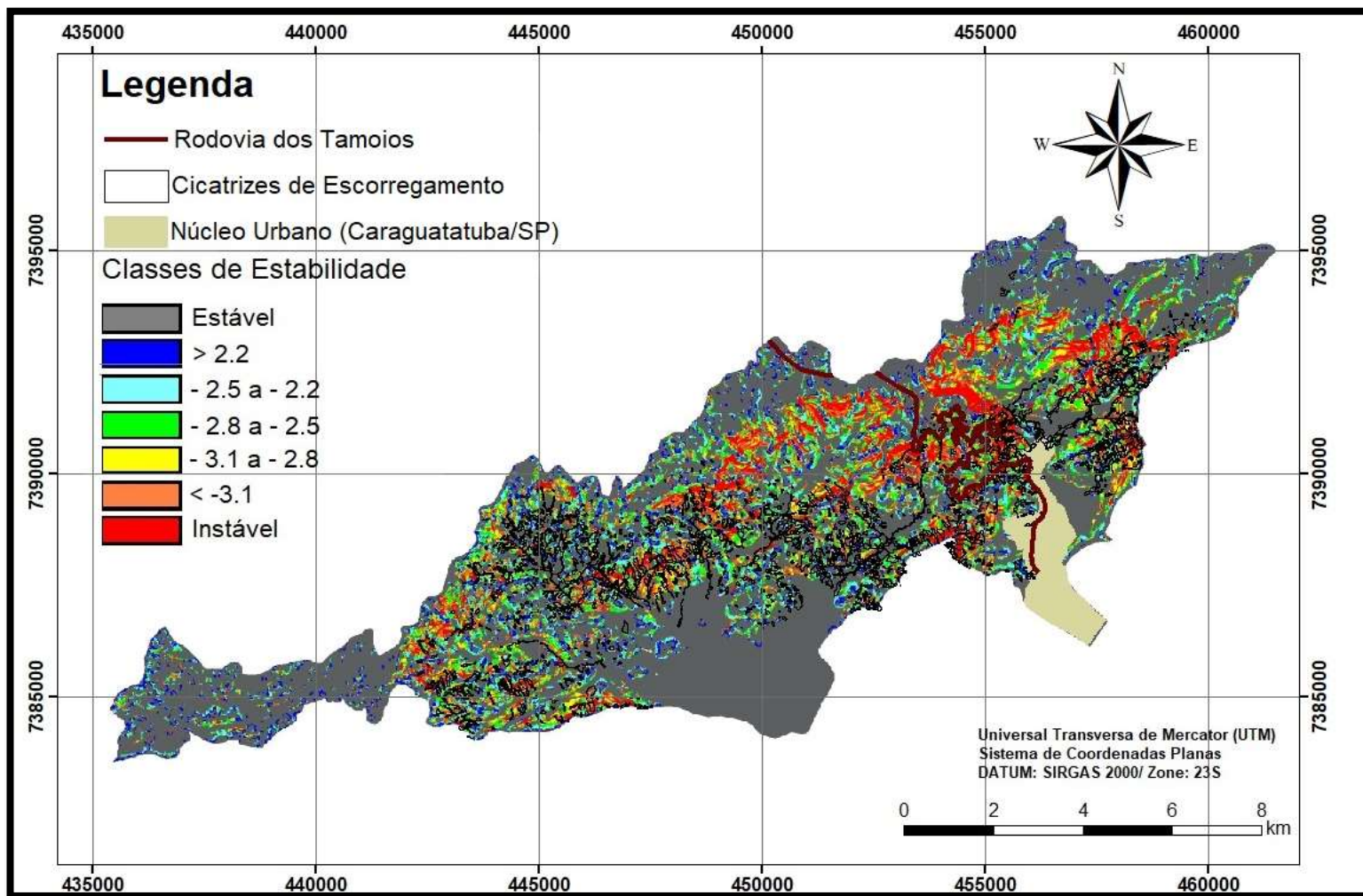
Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 38: Mapa de Baixa Susceptibilidade a Movimentos de Massa



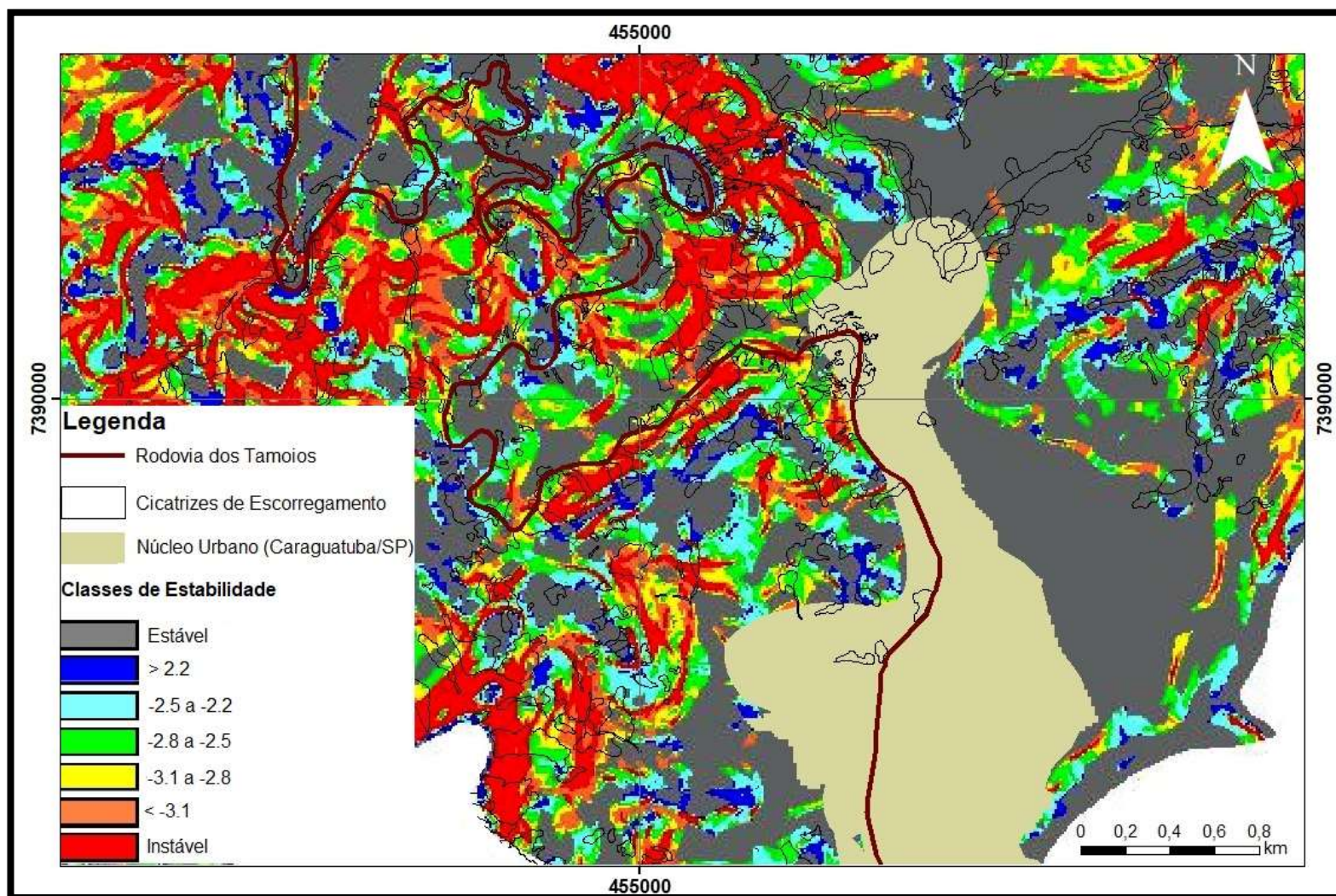
Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 39: Associação Mapa de Susceptibilidade e intervenções antrópicas



Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 40: Sobreposição das cicatrizes aos núcleos de intervenção antrópica



Fonte: (AUTOR, 2019)

6.3.2 SINMAP

A partir do ArcView GIS 3.2 com a extensão SINMAP ativada, aplicou-se este modelo nas bacias analisadas com base nos parâmetros geotécnicos apresentados na Tabela 8. Ressalta-se que no SINMAP são permitidas variações nos parâmetros de entrada, aplicando-se, portanto, +/- 20% dos valores médios citados na Tabela 8 para as condições saturadas. Além disso, neste modelo ocorre a adição do parâmetro T/R (Transmissividade do solo sobre recarga), incorporando em suas modelagens valores customizáveis de precipitação, diferentemente do SHALSTAB. Calculou-se o parâmetro T/R com base na pluviometria do episódio de 1967 (Figura 41) e a condutividade hidráulica dos solos foi obtida a partir de Michel et al. (2014).

Figura 41: Cálculo do Parâmetro T/R utilizado como *input* no SINMAP

CÁLCULO DE T/R

Evento de 1967: chuva acumulada em dois dias: 585 mm – 0,29 m/dia

$$\frac{\text{Transmissividade}}{\text{Recarga}} = \frac{\frac{3,8 \text{ m}}{\text{dia}} \times 1 \text{ m}}{0,29} = 13 \text{ m}$$

Adotando-se:

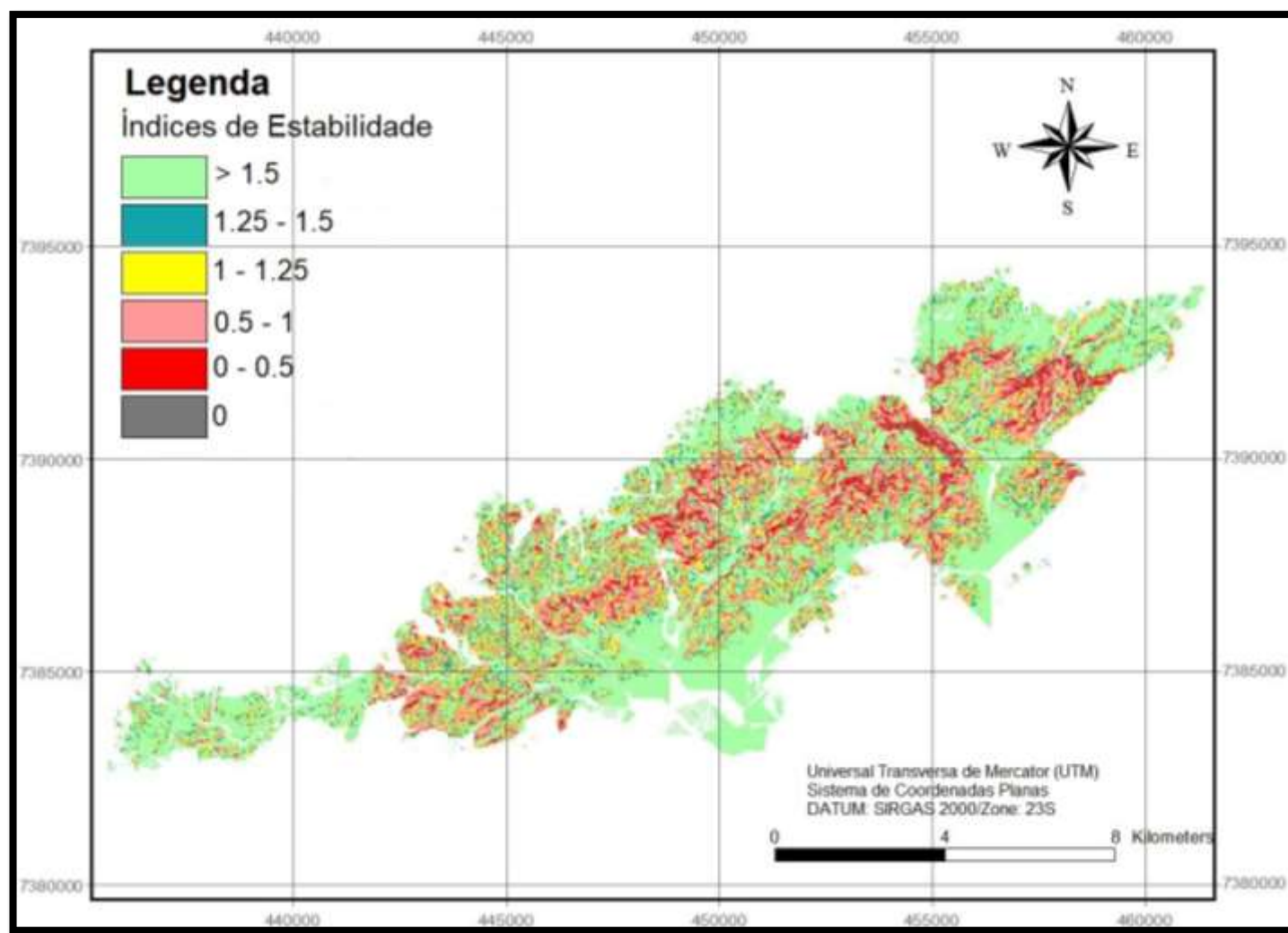
Espessura média do solo = 1 metro (conforme observado em campo)

Condutividade Hidráulica para solos tropicais da Serra do Mar: 3,8 m/dia
(Michel et al., 2014)

Fonte: (AUTOR, 2019)

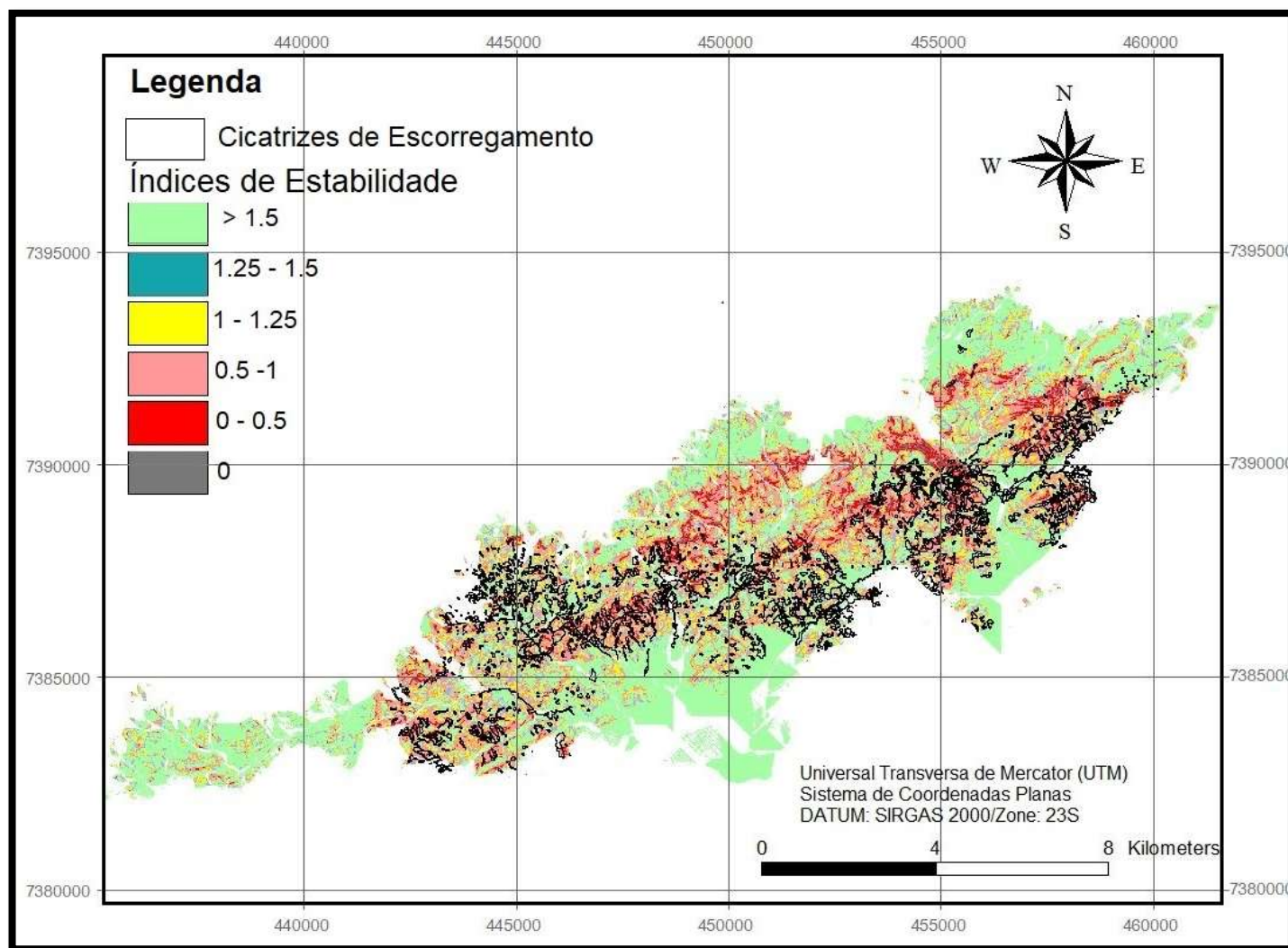
O mapa de estabilidade resultante da simulação do SINMAP, exibiu 6 classes representativas da variação do índice de estabilidade. Este índice representa a probabilidade de cada pixel em obter um Fator de Segurança maior que 1 (Figuras 42 e 43).

Figura 42: Mapa de susceptibilidade obtido com o modelo SINMAP



Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 43: Cicatrizes de Escorregamento sobrepostas ao Mapa de Susceptibilidade gerado pelo SINMAP



Fonte: (AUTOR, 2019)

A maioria das cicatrizes de escorregamento (41%) coincidem com a classe considerada como instável ($0.5 < SI < 1$). Com relação a área total analisada, 40,5% encontra-se em zonas estáveis, razão esta novamente comprovada pela presença de planícies no sul das bacias selecionadas. Novamente, têm-se ressaltado a coincidência entre a presença de classes mais instáveis em áreas com declividade entre 15 e 35°, ou seja, a declividade da área de estudo tem relação direta com a caracterização de áreas susceptíveis a escorregamentos.

Observa-se ainda, que os núcleos caracterizados como instabilidade crônica ($SI=0$; coloração cinza escuro) - presentes na Figura 42 e em maior detalhe na Figura 47 – correlacionam-se com as encostas convexas da Figura 32. Segundo Souza (2014), as rochas cristalinas, principalmente granitos e gnaisses, sob condições de clima úmido, geram morros de vertentes predominantemente convexas. Apesar desta configuração de vertente não ser a mais favorável para a ocorrência de escorregamentos (FERNANDES e AMARAL, 1996), as encostas convexas aliadas a formas mais verticalizadas, apresentam-se escarpadas, com elevadas altitudes e altas declividades, fazendo com que a intensa pluviosidade as torne bastante propícias a escorregamentos (SOUZA, 2014). Correlacionando-se as Figuras 31, 32 e 42, têm-se que o modelo SINMAP caracterizou a pior classe de estabilidade justamente nos locais de combinação destes fatores.

Além disso, comparativamente ao modelo SHALSTAB, o valor de áreas estáveis apresenta-se menor, e, consequência disso, a somatória de porcentagem de áreas instáveis (unindo-se as classes de SI inferiores a 1 e a instável), é maior: 30,7% oposta a 24,2% obtido na simulação pelo SHALSTAB. Os valores obtidos com o SINMAP encontram-se detalhados na Tabela 9.

Tabela 9: Classes de Estabilidade e Distribuição da Ocorrência de Escorregamentos (SINMAP)

Classes	Área km²	Área (%)	Número de Cicatrizes	Cicatrizes (%)	% Cicatrizes / % Área
Estável	40.5	44.6	300	21.3	0,47
$1.25 < SI < 1.5$	9.4	10.3	170	12.0	1,16
$1 < SI < 1.25$	13.0	14.3	241	17.1	1,19
$0.5 < SI < 1$	22.0	24.2	573	41.0	1,70
$0 < SI < 0.5$	5.1	5.6	104	7.4	1,32
Instável	0.9	0.9	17	1.2	1,33
Total	90.9	100	1405	100	-

Analisando os dados apresentados na tabela 14, faz-se a correlação entre o número de cicatrizes encontradas para cada classificação. Têm-se um total de 300 cicatrizes na classe

considerada estável pelo modelo SINMAP, no entanto, essas cicatrizes encontram-se em uma área de 40,5 km², configurando-se em média, 7 cicatrizes por km² de área analisada. Com relação a área considerada instável, têm-se apenas 1,2% de cicatrizes com relação ao total, mas dada a ínfima área ocupada por essa classe, a média torna-se de 17 cicatrizes a cada km² de área instável. Agrupando-se, ainda, todas as classes instáveis (SI <1), têm-se em média 25 cicatrizes por km², *versus* 11 cicatrizes por km² no agrupamento das classes restantes (consideradas estáveis).

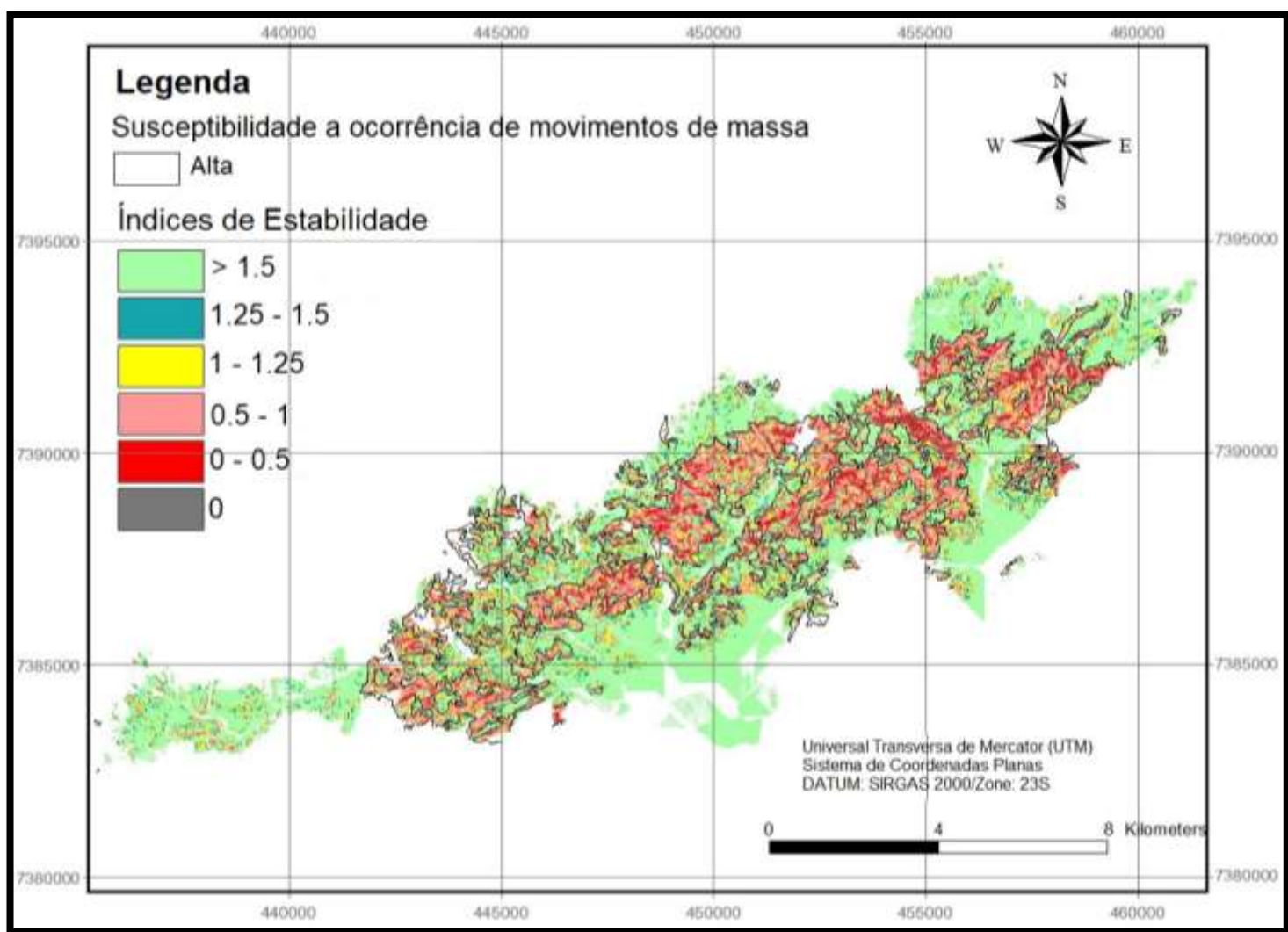
Além disso, a Tabela 9 também correlaciona a porcentagem de cicatrizes de escorregamento e a porcentagem de área de cada classe de estabilidade existente. Com isso, são indicadas as classes em que foram encontrados o maior número de escorregamentos, e, neste caso, a maior coincidência espacial entre as cicatrizes de escorregamento foi apresentada pelo Índice de Estabilidade que varia entre 0,5 e 1 e a menor, na classe considerada estável, cuja relação obtida foi de 0,47.

6.3.2.1 Comparativo SINMAP x Mapa de Susceptibilidade

Conforme exposto no capítulo 6.3.1.1, confeccionaram-se mapas com sobreposição da Carta de Susceptibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa ao Mapa gerado pelo SINMAP, cujos resultados finais encontram-se nas Figuras 44, 45 e 46. Observa-se que a delimitação das áreas que apresentam alta susceptibilidade a ocorrência de movimentos de massa possuem melhor correlação com o modelo gerado pelo SINMAP se comparado ao SHALSTAB. Isso porque dentre estas áreas, há muito mais presença de classes instáveis e intermediárias, com poucos núcleos da classe entre 1.25 e 1.5, do que o apresentado na Figura 42 (presença maior de núcleos estáveis (>2.2 e de -2.5 a -2.2) dentre a área delimitada pelo estudo da CPRM.

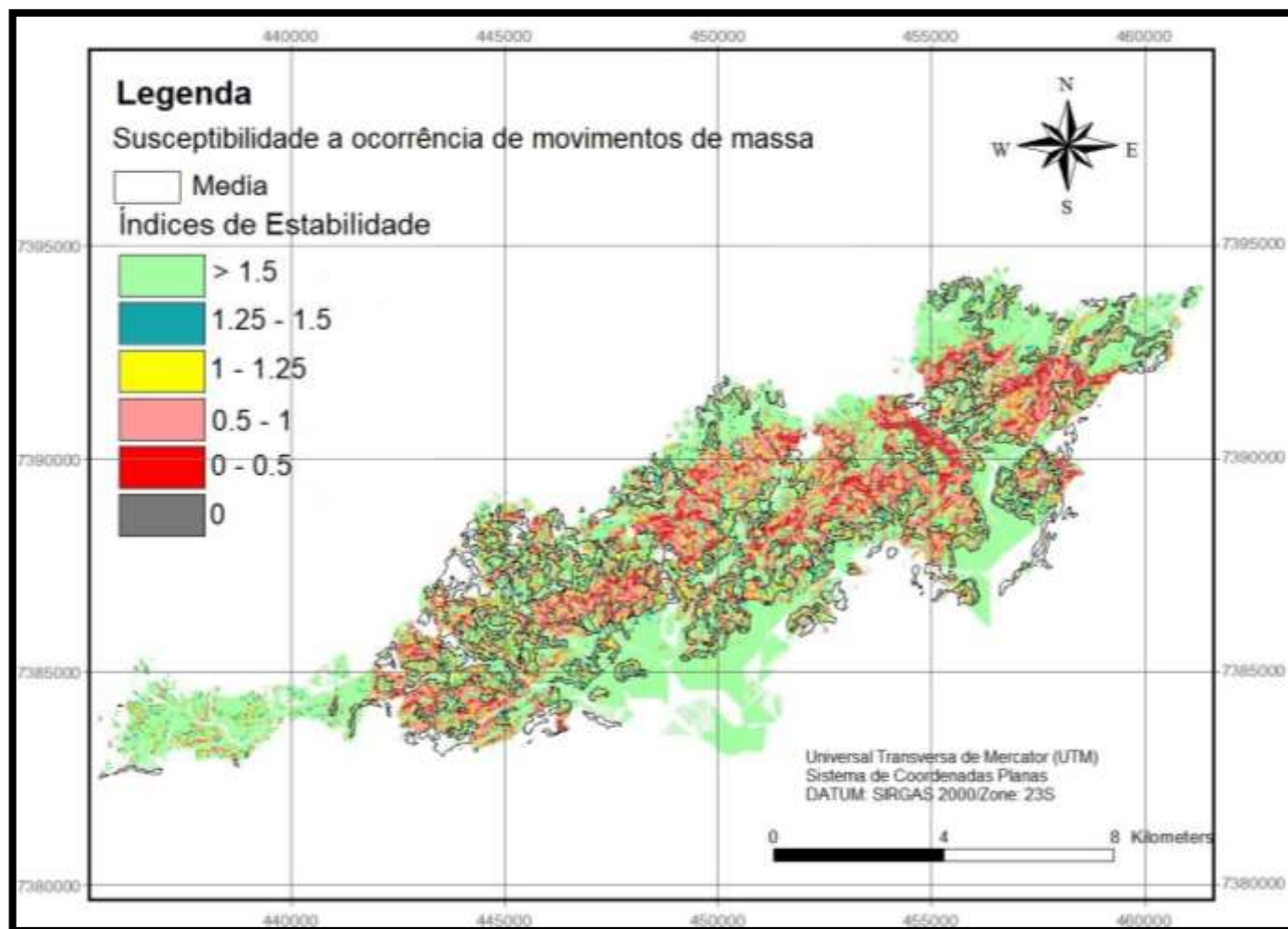
Ademais, a presença de cicatrizes em áreas estáveis do SINMAP foi correlacionada com os resultados produzidos pela Carta de Susceptibilidade da CPRM (2013), envolvendo as classes de estabilidade propostas pelo modelo e a mancha urbana do município de Caraguatatuba (Figura 47).

Figura 44: Mapa de Alta Susceptibilidade a Movimentos de Massa



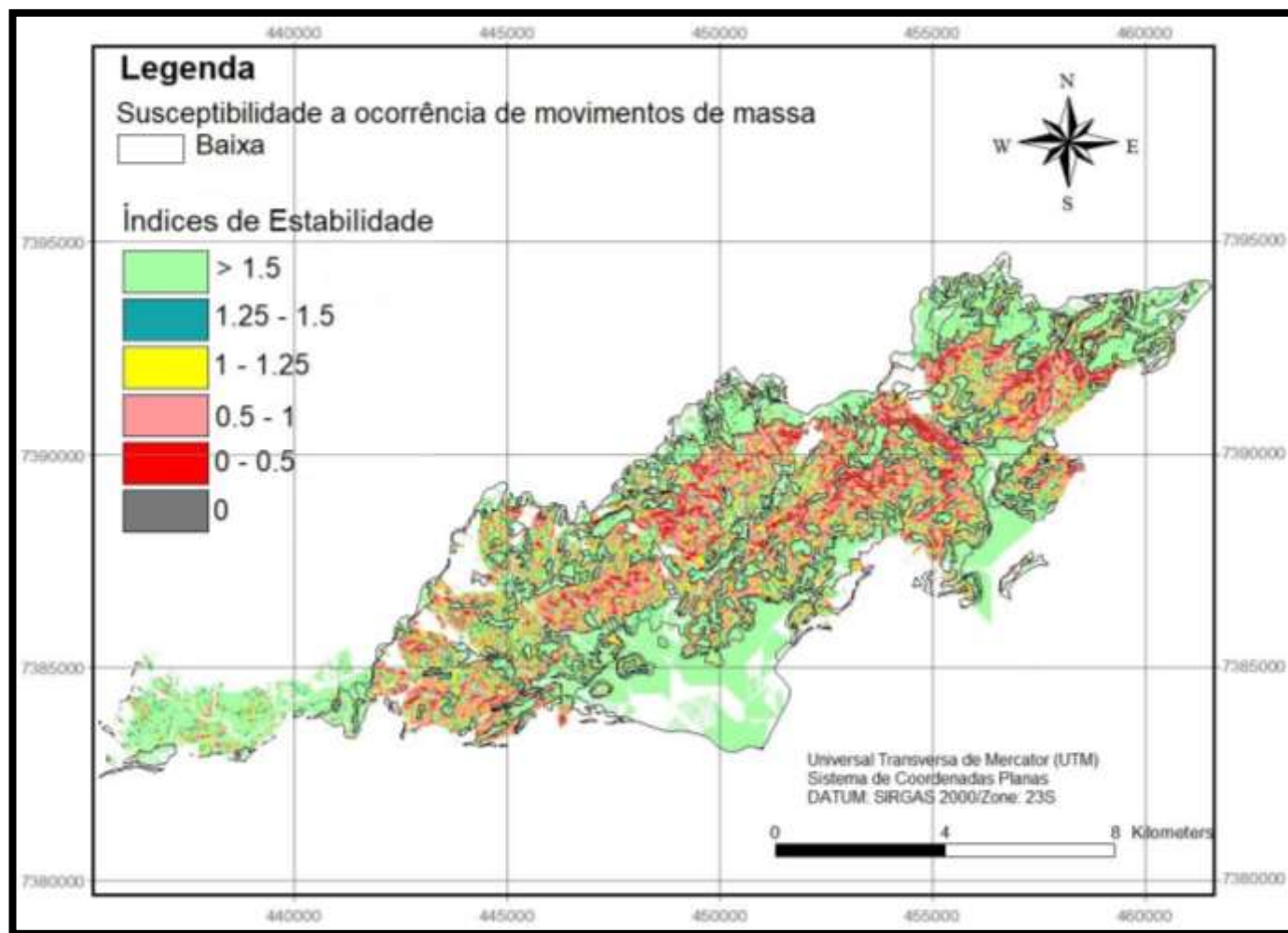
Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 45: Mapa de Média Susceptibilidade a Movimentos de Massa



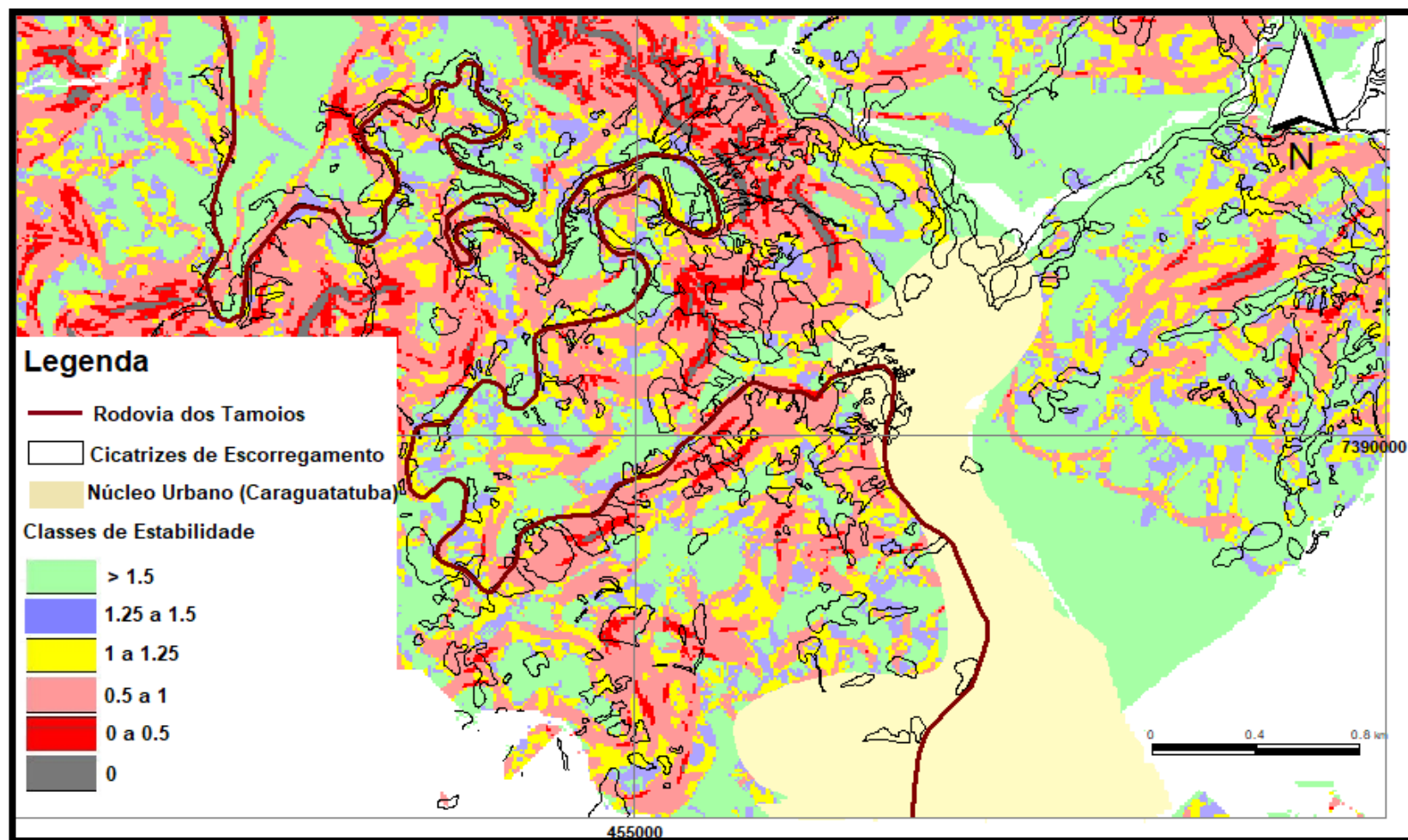
Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 46: Mapa de Baixa Susceptibilidade a Movimentos de Massa



Fonte: (AUTOR, 2019)

Figura 47: Mapa de detalhe da sobreposição entre núcleo urbano, cicatrizes de escorregamento e susceptibilidade (SINMAP)



Fonte: (AUTOR, 2019)

Estabelecendo-se uma correlação entre as duas análises de detalhe, presentes nas Figuras 47 e 40, observa-se, principalmente no entorno da Rodovia dos Tamoios (SP-99), e do Núcleo Urbano de Caraguatatuba/SP, que o modelo SINMAP considera uma área maior como instável, seja ela presente nas três diferentes classes ($0.5 < SI < 1$; $0 < SI < 0.5$; $SI = 0$) de instabilidade. Nesta mesma região, o modelo SHALSTAB considera maiores as áreas classificadas como instabilidade máxima (representada por vermelho no SHALSTAB), porém classifica todo o entorno destas, como estáveis, principalmente aquelas próximas ao núcleo urbano. Têm-se, portanto, uma superestimação de classes instáveis pelo SINMAP, porém uma melhor subdivisão destas por este modelo.

Embora haja este superdimensionamento de áreas instáveis, o modelo SINMAP ainda apresentou cicatrizes de escorregamento em áreas estáveis, frequentes conforme observado na Figura 47, nas regiões ao entorno de intervenções antrópicas – Rodovia ou Bairros – caracterizando também, a influência do fator intervenção antrópica nos escorregamentos, seja ela no aumento da saturação do solo por presença de estruturas urbanas em não conformidade, ou, por reconfigurações na morfologia local.

6.3.3 Comparação dos Modelos

Considerando que as condições não saturadas do solo não corresponderam a interpretações confiáveis, apresentam-se neste item as análises comparativas dos modelos referentes as simulações com os parâmetros de solo saturado. Para tal, no SINMAP, foram agrupados os valores referentes as classes cujo SI apresentou resultado menor que 1 e, com essas calculou-se os valores de *SuI* e *ErI*. No caso do SHALSTAB, as classes instáveis e < -2.8 foram unidas em uma única só classe para posterior cálculo.

Tabela 10: Índice para comparação dos modelos SINMAP e SHALSTAB

	SINMAP	SHALSTAB
Índice de Sucesso (SuI) (%)	12,4	10,0
Índice de Erro (ErI) (%)	5,64	7,0

Fonte: (AUTOR, 2019)

De acordo com o proposto por Sorbino et al. (2010), o maior valor da relação SuI/ErI indica qual modelo possui melhor performance. Com base na Tabela 15, obteve-se que esta relação foi de 2.20 e 1.43 para os modelos SINMAP e SHALSTAB, respectivamente. Estes valores indicam que o modelo SINMAP obteve uma melhor performance para a área de estudo na escala 1:50.000 do que o modelo SHALSTAB.

Considerando as proposições de Dietrich et al. (2001), a melhor performance de um modelo de análise de estabilidade é dada observando-se a coincidência de cicatrizes de escorregamento com áreas classificadas como instáveis e ao mesmo tempo, estas áreas instáveis representam a menor parte da área total de estudo. Deste modo, têm-se que o modelo SHALSTAB, neste caso, apresentou dados insatisfatórios, uma vez que a maior porcentagem de cicatrizes encontram-se em áreas classificadas pelo modelo como estáveis (68,7%).

Para o SINMAP, no entanto, 49,6% das cicatrizes de escorregamento encontram-se em áreas classificadas como instáveis pelo modelo. Porém, ressalta-se que com relação a área classificada como instável, o modelo SINMAP apresenta maior porcentagem com relação a área total analisada. Isso explica-se devido ao fato de que o SINMAP é um modelo probabilístico, indicando, portanto, a probabilidade de rupturas, tendenciando na classificação de grandes áreas da bacia como instáveis.

7 CONCLUSÕES

A análise estrutural regional da área de estudo, permitiu concluir que a presença de estruturas geológicas não se configura de maneira única e exclusivamente como um agente predisponente na ocorrência de escorregamentos. Observou-se com a análise regional da área de estudo que, os escorregamentos concentraram-se em duas principais áreas: uma em que há a intersecção de estruturas geológicas em diferentes direções; e outra em que há a presença de uma grande estrutura geológica, a Falha Bertioga-Caraguatatuba, aliada a presença de relevos escarpados, ou seja, de elevada declividade. Exemplo da importância do fator declividade é comprovado ao se verificar que a presença das Falhas Freire-Lourenço e do Barro Alto nas regiões de planalto não traz como consequência o registro de escorregamentos rasos.

Além disso, a maior densidade de lineamentos, principalmente quando estes encontram-se em diferentes direções, faz com que esta região apresente maior facilidade de percolação de água no interior do solo ou saprólito existente, aumentando a chance de desagregação e consequente deflagração de escorregamentos. Essa alta estruturação faz ainda com que as rochas possuam um alto grau de faturamento e, em ambos casos, são gerados planos de fraqueza, que dependendo da forma das vertentes configuradas, geram com muito mais facilidade escorregamentos.

Com relação às modelagens realizadas com os modelos SINMAP e SHALSTAB, concluiu-se que, devido ao maior valor obtido com relação aos índices de sucesso e erro (2.20), o modelo SINMAP apresentou melhor performance na área de estudo. Apesar de superestimar áreas instáveis ao longo das bacias, o modelo representou melhor coincidência espacial das cicatrizes se comparado ao SHALSTAB. Tratando-se de uma área como a Serra do Mar, com alta incidência de escorregamentos, grandes obras de engenharia e núcleos populacionais, sugere-se como trabalhos futuros, a aplicação de ambos modelos em escala 1:10.000, de modo a minimizar os possíveis erros com relação a diferenciação entre cicatrizes de escorregamento e feições erosivas próximas a drenagens, bem como avaliar a performance em escala de maior detalhe.

Por fim, ressalta-se que, com o avanço da tecnologia disponível (softwares, imagens de satélites, instrumentação e formas de contenção) é possível realizar uma gestão do planejamento territorial de forma eficiente, garantindo que áreas com alta probabilidade de escorregamentos não sejam ocupadas, ou, no caso da necessidade de construção de obras nestes trechos, como por exemplo a Rodovia dos Tamoios (SP-99), áreas mais instáveis sejam passíveis da adoção

de medidas de medidas efetivas de reforço dos maciços, ou mesmo de controle de inclinação dos taludes adjacentes a ela.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.28, n.2, p. 135-150, 1998.
- ALMEIDA, F. F. M. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim do Instituto Geográfico Geológico**, São Paulo, v. 41, p. 169-263, 1964.
- ALVIOLI, M.; BAUM, R. L. Parallelization of the TRIGRS model for rainfall-induced landslides using the message passing interface. **Environmental Modelling and Software**. 2016.
- ASMUS, H. E.; FERRARI, A. L. Hipótese sobre as causas do tectonismo Cenozóico na região sudeste do Brasil. In: PETROBRÁS. Aspectos estruturais da margem continental leste e sudeste do Brasil Rio de Janeiro, **CENPES**. p. 78-88, 1978.
- AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: **CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS – COBRAE** - Anais. Rio de Janeiro, nº 1, p.721-733, 1992.
- AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J.C. Estabilidade de Taludes. In: OLIVEIRA, A.M. dos S.; BRITO, S.B.A. de (Ed.) **Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. Cap. 15, 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 f. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001.
- BARBOSA, J. P. M. Estudo sobre a evolução dos eventos extremos de precipitação no setor Paulista da Serra do Mar. In: **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – Anais**. São Paulo, nº 17, p. 1-21, 2007.
- BEL, C.; LIÉBAULT, F.; NAVRATIL, O.; ECKERT, N.; BELLOT, H.; FONTAINE, F.; LAIGLE, D. Rainfall control of debris-flow triggering in the Réal Torrent, Southern French Alps. **Geomorphology**, 2016.
- BEVIN, K. J. and M. J. KIRKBY. A Physically based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin** v.24: 43-69, 1979.
- BIGARELLA, J. J.; Becker, R. D.; Passos, E. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Editora da UFSC, p. 875, 1996.
- CABRAL, V. C. Avaliação dos modelos SHALSTAB e SINMAP na análise da suscetibilidade a escorregamentos em Cubatão (SP). Dissertação de Mestrado. Rio Claro, 2018
- CAMPANHA, G. A. C.; ENS, H. H.; PONÇANO, E. W. L. Análise morfotectônica do Planalto do Juqueriquerê, São Sebastião (SP). **Brazilian Journal of Geology**, v. 24, n. 1, p. 32–42, 1994.
- CERRI, R. I. Avaliação dos condicionantes estruturais para a ocorrência de escorregamentos na Serra do Mar: estudo de caso nos municípios de Caraguatatuba e São Sebastião / Dissertação de Mestrado. Rio Claro, 2018
- CHIEREGATI, L. A.; THEODOROVICZ, A. M. G.; THEODOROVICZ, A.; MENEZES, R. G.; CHIODI FILHO, C.; RAMALHO, R. Projeto folhas Natividade da Serra e Caraguatatuba. In: **Projeto Folhas Natividade da Serra e Caraguatatuba**: relatório final. [S.l.]: CPRM, 1982.

CHRISTOFOLLETI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher, p. 236, 1999.

CORRÊA, C.V.S. **Modelagem morfométrica para avaliação da potencialidade de bacias hidrográficas a corridas de detritos**: proposta aplicada em Caraguatatuba (SP) e São Sebastião (SP) / Tese de Doutorado. Rio Claro, 2018.

CPRM. Mapa Geológico da Folha Pico do Papagaio 1:50000. **Projeto de Integração Geológica da Região Metropolitana de São Paulo**, 1982.

CROZIER, M. J. **Landslides: causes, consequences and environment**. New Hampshire, USA: Ed. Croom Helm, p. 252, 1986.

CRUZ, O. **A Serra do Mar e o Litoral na área de Caraguatatuba-SP: contribuição à geomorfologia litorânea tropical**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo (USP), 1974.

CUNHA, S. B. **Degradação ambiental**. In: CUNHA, S. B. Geomorfologia e meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 337-339, 1996.

D'AMATO AVANZI, G., GIANNECCHINI, R., PUCCINELLI, A. The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. An example in a temperate climate environment: the june 1996 event in northwestern Tuscany (Italy). **Engineering Geology**, v. 73, p. 215-228, 2004.

DAI, F. C.; LEE, C. F. Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. **Geomorphology**, v. 42, n. 3-4, p. 213-228, Jan, 2002.

DHAKAL, AMOD & AMADA, T. & ANIYA, M. Landslide hazard mapping and its evaluation using GIS: An investigation of sampling schemes for a grid-cell based quantitative method. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**. v. 66, p. 981-989, 2000.

DIETRICH, W.E.; BELLUGI, D.; ASUA, R. Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management. In: WIGMOSTA, M.S.; BURGESS, S.J. (Eds.) **Land use and watersheds: human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas**. AGU, Washington DC, v. 2, p. 195-227, 2001.

DONATI, L.; TURRINI, M. C. An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslide with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy). **Engineering Geology**, v. 63, n. 3-4, p. 277-289, 2002.

DYKES, A.P. Weathering-limited rainfall-triggered shallow mass movements in undisturbed steepland tropical rainforest. **Geomorphology**, v.46, p. 73-93, 2002.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. D.; GUERRA, A. J. T. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. **Geomorfologia e meio ambiente**, Bertrand Brasil Rio de Janeiro, v. 5, 1996.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.2, n.1, p.51-71, 2001.

FIORI, A. P. Fatores que influem na análise de vertentes e no movimento de massa em encostas. **Boletim Paranaense de Geografia**, n. 43, p. 7-24, 1995.

FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de Mecânica dos solos e das rochas: aplicação na estabilidade de taludes** – Ed. UFPR – Curitiba, PR. 2009.

FRASCÁ, M. H. B. O.; SARTORI, P. L. P. **Minerais e Rochas**. In: In OLIVEIRA, A. M. S e BRITO, S. N. A (Eds). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, p. 15 – 38, 2015.

GABELINI, B.M. **Suscetibilidade a escorregamentos na região entre Caraguatatuba e São Sebastião (SP)**: análise fisiográfica e quantitativa. 2017. 121 f. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente), IGCE – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Rio Claro, 2017.

GERRARD, J. The landslide hazard in the Himalayas: geologic control and human action. **Geomorphology** 10, p. 221–230, 1994

GERENTE, J.; BINI, G. M. P., LUIZ, E. L. Análise da variável forma de relevo como condicionante de movimentos de massa: estudo de caso na Bacia do Rio Saltinho em Gaspar/SC. **Revista Equador (UFPI)**, v. 4, n. 3, 2015.

GERSCOVICH, D. M. S. **Estabilidade de Taludes**. 1a. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 2012.

GOETZ, J.; GUTHRIE, R.; BRENNING, A. Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models. **Geomorphology**, p. 129, 2011.

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

GRAMANI, M.F. **Caracterização geológica-geotécnica das corridas de detritos (“Debris Flows”) no Brasil e comparação com alguns casos internacionais**. 2001. 372f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Solos) – EPUSP - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

GREENBERG, H. Condicionantes geomorfológicos dos escorregamentos nas encostas: avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.

GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. da; BOTELHO, R. G. M., **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 340 p. 1999.

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

GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y. **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido**. [S.l.]: São Paulo: IPT (IPT) - Publicação, 1080, 1976.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Editora da USP, p. 216, 1984.

GUIMARÃES, R. F.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. M.; FERNANDES, N. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO JR., O. A. P. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, v.69, p. 99-108, 2003.

GUTJAHR, M. R., TAVARES, R., PEREIRA, P. R. B. e SANTORO, J. “Os estudos climáticos na compreensão dos movimentos de massa na Serra do Mar/SP”. In **IV Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica**. Rio de Janeiro: UFRJ, 2000.

GUZZETI, F.; CARRARA, A.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Landslides hazard evaluation: a review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. **Geomorphology**, v. 31, p. 181-216, 1999.

- GUZZETTI, F.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. The influence of structural setting and lithology on landslide type and pattern. **Environmental & Engineering Geoscience**, Assoc Eng Geologists, v. 2, n. 4, p. 531–555, 1999.
- HIGHLAND, L.M., and BOBROWSKY, PETER. The landslide handbook – A guide to understanding landslides: Reston, Virginia, U.S. **Geological Survey Circular**, p. 1325, 129, 2008.
- HOEK, E.; BRAY, J. D. **Rock Slope Engineering**. [S.l.]: Spoon Press, v. 3, p. 358, 2001.
- INFANTI, N. J.; FILHO, N. F. Processos de Dinâmica Superficial. Geologia de engenharia, **Assoc. Bras. Geol. Engenharia (ABGE)**. São Paulo, 1998.
- IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Programa Serra do Mar**: levantamentos básicos nas folhas de Santos e Riacho Grande, Estado de São Paulo. Anexo A – Estudos geológicos e geomorfológicos. São Paulo, Relatório 23.394, v. 2, 120 p., 1986
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Plano de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Litoral Norte**. São Paulo. 2001.
- IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Relatório Um de Situação dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Pardo - Relatório Final**. São Paulo: IPT/Cetae, 2007. Relatório Técnico no. 40.670. 2007.
- JAKOB, M. A size classification for debris flows. **Engineering Geology**, v. 79, n. 3-4, p. 151-161, 2000.
- LARSEN, M. C.; TORRES-SÁNCHEZ, A. J. The frequency and distribution of recent landslide in three montane tropical regions of Puerto Rico. **Geomorphology**, v. 24, n. 4., 1998.
- LAZZARI, M.; GIOIA, D. E ANZIDEI, B. “Landslide inventory of the Basilicata region (Southern Italy)”, **Journal of Maps**, v.14, n.2, p.348-356, 2018.
- LEPSCH, I. F. **Formação e conservação dos solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2002.
- LOEBMANN, D. G.; FREITAS, L. F.; GOMES, R. A. T.; GUIMARAES, R. F.; CARVALHO Jr., O. A. Minimização de erros na interpolação de modelo digital de terreno provenientes da concentração de informações nas curvas de nível. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, XI, 2005, São Paulo. **Anais do Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada**, São Paulo, 2005, p. 2291- 2298.
- LOPES, J. A. U. **Os movimentos coletivos dos solos e a evolução das encostas naturais nas regiões tropicais e subtropicais úmidas**. Curitiba. 1995. 157f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Universidade Federal do Paraná - UFPR, 1995.
- LOPES, E. S. S. 2006. **Modelagem Espacial Dinâmica em Sistema de Informação Geográfica: Uma Aplicação ao Estudo de Movimentos de Massa em Uma Região da Serra do Mar Paulista**. Tese de doutorado. Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, pp. 314.
- LOPES, E. S. S.; RIEDEL, P. S; BENTZ, C. M.; FERREIRA, M. V. Calibração e Validação do índice de estabilidade de encostas com inventário de escorregamentos naturais na bacia do rio da onça na região de serra do Cubatão, SP. **Revista Geociências**. Volume 26, n.1, p. 83-95. 2007.
- MAFFRA, Cristina de Queiroz Telles. **Geologia estrutural do embasamento cristalino na região de São Sebastião, SP**: evidências de um domínio transpressivo. 2000. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e Geotectônica) - Instituto de Geociências, University of São Paulo, São Paulo, 2000.

MARCELINO, E. V. **Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento no município de Caraguatatuba (SP), usando técnicas de sensoriamento remoto**. 2003. 228 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003.

MARGIELEWSKI, W. Structural control and types of movements of rock mass in anisotropic rocks: case studies in the Polish Flysch Carpathians. **Geomorphology**, Elsevier, v. 77, n. 1, p. 47–68, 2006.

MEISINA, C; SCARABELLI, S. A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. **Geomorphology**, v. 87, n. 3, p. 207-223, 2007.

MICHEL GP, KOBIYAMA M, GOERL RF. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. **J Soils Sediments**. v. 14, p. 1266–1277, 2014.

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

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

MORIMITSU, K. H.; TOMINAGA, L. K. Mapeamento e Análise do perigo de escorregamento no município de Caraguatatuba. **Anais do 3 SIGMA**, 2013.

MORRISSEY, M. M.; WIECZOREK, G. F.; MORGAN, B. A. A comparative analysis of hazard models for predicting debris flows in Madison Country, Virginia. Open File Report 01-0067. U.S. **Geological Survey**, p. 1-28, 2001.

MOURA, C. A.; MATTOS, J. T.; JIMENEZ-RUEDA, J. R. Análise de fraturamentos para determinação de áreas instáveis na faixa de dutos Osvat/Osplan-São Sebastião, em São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, Sociedade Brasileira de Geologia, v. 42, n. 3, p. 585–596, 2012.

NERY, T. D. **Avaliação da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos na bacia da ultrafértil, Serra do Mar (SP)**. 2011. Tese (Doutorado), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

NERY, T. D. **Dinâmica das corridas de detritos no Litoral Norte de São Paulo**. 2016. 164 f. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2016.

NERY, T.; VIEIRA, B. Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**. 2014.

O'LEARY, D.; FRIEDMAN, J. D.; POHN, H. A. Lineament, linear, lineation: Some proposed new standards for old terms. **GSA Bulletin**. v. 10, p. 1463–1469, 1976.

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

OKIDA, R. **Técnicas de sensoriamento remoto como subsídio ao zoneamento de áreas sujeitas a movimentos gravitacionais de massa e a inundações**. São José dos Campos. 1996. 147p. (INPE-6343-TDI/595). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1996.

OKIDA, R.; VENEZIANI, P. 1995. Movimentos gravitacionais de massa: uma abordagem com produtos de sensoriamento remoto. In: **SIMPÓSIO LATINOAMERICANO DE PERCEPCIÓN REMOTA**, 7, México, p. 395-401.

- PACK, R.; TARBOTON, D.; GOODWIN, C. The SINMAP approach to terrain stability mapping. **Procedeeings of the 8th congress of the international association of engineering geology**, Vancouver, British Columbia. Canada. p. 21-25. 1998.
- PACK, R.T.; TARBOTON, D.G.; GOODWIN, C.N. Assessing Terrain Stability in a GIS using SINMAP. **15th Annual GIS Conference**. Vancouver, British Columbia. February, p. 1-9, 2001.
- PARK, D. W.; NIKHIL, N. V.; LEE, S. R. Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 13, n.11, p. 2833–2849, 2013.
- PARK, H.-J.; LEE, J.-H.; KIM, K.-M.; UM, J.-G. Assessment of rock slope stability using GIS-based probabilistic kinematic analysis. **Engineering Geology**, Elsevier, v. 203, p. 56–69, 2016.
- PAULÍN, G. L., HURBP J. L.; QUESADA, J. F. A. Assessing Landslide Frequency for Landform Hazard Zoning Purposes. In: Sassa, K.; Canuti, P.; Yin, Y. **Landslide Science for a Safer Geoenvironment**. Netherlands: Springer, v. 2, p. 129-134, 2014.
- PECHINCHA, M. G. H., E ZAIDAN, R. T. Zoneamento de Risco à ocorrência de escorregamentos: uma aplicação na bacia do Córrego Matirumbide, Juiz de Fora, MG. **Revista Espinhaço**, 4(2), 45–57, 2015.
- PELLEGATTI, C.H.G.; GALVANI, E. Avaliação da precipitação na Serra do Mar-SP em eventos de diferentes intensidade e duração. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 27, p. 147 – 158. 2010.
- RIFFEL, E.S.; RUIZ, L.F.C, GUASSELLI, L.A. Mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos a partir de mineração de dados e do modelo SHALSTAB. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 68, p. 1805–1818, 2016.
- RENNÓ, C. D. **Sistema de análise e simulação hidrológica aplicado a bacias hidrográficas**. 2003. 119f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, São José dos Campos. 2003.
- REVERTE, F.; GARCIA, M. O patrimônio geológico de são sebastião – sp: inventário e uso potencial de geossítios com valor científico. **Geociencias**, v. 35, p. 495-511, 2016.
- SALOMÃO, F. X. T.; ANTUNES, F. S. **Solos em Pedologia**. In: Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. A. (Ed.); Associação Brasileira de Geologia de Engenharia: São Paulo, 1998.
- SANCHEZ, M.; PEDRONI, F.; LEITÃO-FILHO, H.F.; CESAR, O. Composição florística de um trecho de floresta ripária na Mata Atlântica em Picinguaba, Ubatuba, SP. **Revista Brasileira de Botânica**, n. 22, p. 31-42. 1999.
- SANTOS, D.D.; GALVANI, E. Caracterização sazonal das precipitações no município de Caraguatatuba – SP, entre os anos de 1943 a 2004. **Revista GEONORTE**, Edição Especial 2, vol. 1, n. 5, p. 1196-1203, 2012.
- SANTOS, A. R. **A grande barreira da Serra do Mar**: da trilha dos Tupiniquins à Rodovia dos Imigrantes. São Paulo: Ed. O Nome da Rosa, p. 122, 2004.
- SBROGLIA, R. M.; HIGASHI, R. A. R.; TOMAZZOLI, E. R.; GUIMARÃES, R.F. Mapeamento de áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos na microbacia do Ribeirão Baú, Ilhota/SC, com o uso de modelagem matemática. **Revista Brasileira de Cartografia**, n. 68/2, p. 339–354, 2016.
- SCHUSTER, R.L. Socioeconomic significance of landslides. In: TURNER, A.K., **Landslides: Investigation and Mitigation**. National Academy Press, Washington D.C., p. 12–35, 1996.

- SELBY, M. J. **Hillslope materials and process**. Oxford: Oxford University Press, 1982.
- SELBY, M. J. **Hillslope: materials and process**. Oxford, England: Oxford University Press, p 451, 1993.
- SILVA, D. R. P. **Avaliação da contribuição de sistemas de fraturas nas condições de fluxo e estabilidade de encostas**. 2013. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, área de concentração: Geotecnia, Departamento de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, 2013.
- SINARTA, N.; RIFA'I, A.; FATHANI, T.; WILOPO, W (2017). Slope Stability Assessment Using Trigger Parameters and SINMAP Methods on Tamblingan-Buyan Ancient Mountain Area in Buleleng Regency, Bali. **Geosciences**. 2017.
- SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI, L. Susceptibility analysis of shallow landslides source áreas using physically based models. **Natural Hazards**, v. 53, p. 313–332, 2010.
- SOUZA, C. R. G. The Bertioga Coastal Plain: An Example of Morphotectonic Evolution. In: **Landscapes and Landforms of Brazil**. [S.l.]: Springer, 2015. p. 115–134.
- SOUZA, J.M. **Características do meio físico em um escorregamento em São Pedro da Serra e suas influências na transformação da paisagem em nova Friburgo, RJ**. 2014. Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Geografia, 2014.
- STEAD, D.; WOLTER, A. **A critical review of rock slope failure mechanisms: The importance of structural geology**. Journal of Structural Geology 74 (2015), p.1 – 23.
- STURZENEGGER, M.; STEAD, D. Quantifying discontinuity orientation and persistence on high mountain rock slopes and large landslides using terrestrial remote sensing techniques. **Natural Hazards and Earth System Science**, Copernicus GmbH, v. 9, n. 2, p. 267–287, 2009.
- TATIZANA, C. et al. Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos na Serra do Mar, município de Cubatão. In: **Congresso Brasileiro De Geologia De Engenharia**, 5, 1987, São Paulo. Anais. São Paulo: ABGE, v.2, p.225-236, 1987a.
- TAVARES, R.; SANT'ANNA NETO, J.L.; TOMMASSELLI, J. T. G.; PRESSINOTTI, M. M. N.; SANTORO, J. 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, p. 680-696. 2004.
- TOMINAGA, L. K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP**. 2007. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2007.
- TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (organização). 2009. Desastres Naturais: Conhecer para Prevenir. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. 160 p
- USGS. **Landslide types and processes**. 2004. Fact Sheet 2004-3072. Disponível em: <<http://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/fs-2004-3072.html>>. Acesso em: 29 ago. 2019.
- VAN WESTEN, C. J. Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recente development. In: **Landslides, Evaluation and Stabilization**. Rio de Janeiro: Taylor & Francis Group, p. 39-53, 2004.
- VESTENA, L. R. KOBİYAMA, M. Identificação e mapeamento dos processos erosivos na bacia hidrográfica do rio Caeté, no município de Alfredo Wagner/SC. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.15, n.1, (jan-mar) p.23-33, 2014.

VIEIRA, B. C.; GRAMANI, M. F. Serra do Mar: The Most “Tormented” Relief in Brazil. In: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C. (Ed.). **Landscapes and Landforms of Brazil**. [S.l.]: Springer, p. 285–297, 2015.

VIEIRA, B.; RAMOS, H. Aplicação do modelo SHALSTAB para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v. 29, p. 161-174, 2015.

WILKINSON, P. L.; ANDERSON, M.G.; LLOYD, D.M. An integrated hydrological model for raininduced landslide prediction. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 27, p. 1285–1297, 2002.

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

WU, W.; SIDLE, R. C. A distributed slope stability model for steep forested basins. **Water Resources. Res.** v. 31, p. 2097- 2110, 1995.

ZAITCHIK, B.; VAN ES, H.; SULLIVAN, P (2003). Modeling Slope Stability in Honduras: Parameter sensitivity and Scale of Aggregation. *Soil Science Society of American Journal*. 67. 268-278.