UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Rio Claro

Instituto de Geociências e Ciências Exatas

AVALIAÇÃO DOS MODELOS SHALSTAB E SINMAP NA ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS EM CUBATÃO (SP)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

VICTOR CARVALHO CABRAL

Rio Claro – SP

2018

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Campus Rio Claro

VICTOR CARVALHO CABRAL

AVALIAÇÃO DOS MODELOS SHALSTAB E SINMAP NA ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS EM CUBATÃO (SP)

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de 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

Rio Claro, SP
2018

551.8 Cabral, Victor Carvalho
C117a Avaliação dos modelos SHALSTAB e SINMAP na análise da suscetibilidade a escorregamentos em Cubatão (SP) / Victor Carvalho Cabral. - Rio Claro, 2018
106 f. : il., figs., gráfs., quadros

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

1. Geologia estrutural. 2. Escorregamentos. 3. Serra do Mar. 4. Modelos de bases físicas. 5. Clima tropical. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP
Campus de Rio Claro/SP - Ana Paula Santulo C. de Medeiros / CRB 8/7336

AVALIAÇÃO DOS MODELOS SHALSTAB E SINMAP NA ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A ESCORREGAMENTOS EM CUBATÃO (SP)

Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Campus de 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

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Cenira Maria Lupinacci da Cunha – UNESP/IGCE

Prof. Dr. Edilson PIssato – USP/IGc

Conceito: **Aprovado**

Rio Claro, SP

20 de Junho de 2018

Aos meus pais, Sirlei e Carlos

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio acadêmico e financeiro, que proporcionou o desenvolvimento e conclusão desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis, pela orientação, amizade e apoio durante o mestrado. Aos meus colegas geólogos, ecólogos e geógrafos, Cláudia Vanessa, Vinicius Veloso, Natália Almeida, Débora Targa e Gabriela Florêncio pelo apoio em campo e no desenvolvimento desta pesquisa. Aos geólogos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), Marcelo Gramani e Agostinho Ogura, por todos os ensinamentos de campo e ao Alan de Oliveira, por todo o suporte nas campanhas de campo.

Aos meus amigos de Rio Claro, Raquel, André, Vanessa, Patrícia, Laila e Michele, pela amizade e ajuda durante todos os anos que passamos juntos. E, finalmente e principalmente, a minha família, Sirlei, Carlos e Carla, pelo carinho e apoio durante essa jornada.

"Science, my lad, is made up of mistakes, but they are mistakes which it is useful to make, because they lead little by little to the truth."

- **Júlio Verne**, Viagem ao centro da Terra

-

"You can never be overdressed or overeducated"

- **Oscar Wilde**

-

RESUMO

Apesar de consideráveis avanços na análise de impacto e gestão de riscos de movimentos de massa, estes continuam a representar grande risco à vida e infraestruturas em regiões montanhosas no mundo. A região da Serra do Mar, devido à suas características geomorfológicas, climáticas e ao avanço da urbanização, é região favorável à ocorrência de movimentos de massa, sobretudo os escorregamentos translacionais rasos. Embora a previsão de áreas instáveis seja essencial para a redução dos danos que esses processos causam, a tarefa não é simples em função da complexidade e variabilidade de fatores que controlam a estabilidade das encostas. A aplicação de modelos de bases físicas é forma objetiva de caracterização de movimentos de massa, especialmente escorregamentos translacionais, em função da aplicação direta de equações que descrevem fisicamente esses processos erosivos naturais, prevendo a suscetibilidade sob diferentes cenários de uso e ocupação do solo e situações climáticas. Este trabalho tem como objetivo a avaliação da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos nas bacias hidrográficas dos rio Mogi e Perequê, município de Cubatão (SP), através da caracterização geológica-geotécnica e da aplicação dos modelos de base física SHALSTAB e SINMAP. Ademais, tem como objetivo a determinação do modelo que melhor se aplica à região de estudo nas escalas de trabalho. Através da criação do modelo digital de elevação (MDE) da área de estudo, base para a obtenção das informações topográficas, da coleta de amostras de solo nas campanhas de campo e da realização de ensaios laboratoriais na obtenção dos parâmetros geotécnicos, é feita a modelagem usando os modelos SINMAP e SHALSTAB nas escalas de 1:50.000 e 1:10.000. A calibração dos modelos é baseada no mapeamento de cicatrizes de episódios de escorregamentos que ocorreram na região nos anos de 1994 e 1985, onde, respectivamente, 542 e 1679 cicatrizes foram mapeadas por meio de imagens aéreas na escala de 1:25.000. Utilizando os métodos de taxa de sucesso e erro e matriz de contingência na determinação do modelo que melhor se aplica à área de estudo, o modelo SHALSTAB mostra-se o mais adequado em ambas as escalas de trabalho pois apresenta maior acurácia (cicatrizes dentro de áreas instáveis) e menor proporção de cicatrizes em áreas estáveis (falsos negativos). Portanto, o emprego de modelos de bases físicas na avaliação da suscetibilidade a escorregamentos na Serra do Mar mostra-se eficaz e representa importante auxílio na análise de risco que esses fenômenos podem representar à sociedade. A determinação do modelo que melhor se aplica a uma área específica é essencial na qualidade e eficiência de análises e avaliações de riscos a escorregamentos pois é uma ferramenta direta e objetiva de representação de processos erosivos.

Palavras-chave: Modelos de bases físicas, Serra do Mar, escorregamentos, SINMAP, SHALSTAB.

ABSTRACT

Despite considerable advances on mass movements risk analysis and assessment, these processes still represent great danger to infrastructure and human lives in mountainous regions around the world. The Serra do Mar region, due to its geomorphological and climatic characteristics and due to urbanisation increase, is highly susceptible to mass movements' occurrences, especially shallow landslides. While the prediction and mapping of unstable areas are essential to mitigate damages that these processes can cause, it is not an easy task due to the complexity and variability of the parameters that control slope stability. The application of physically based models is an objective method to characterise mass movements, especially shallow landslides, since it directly applies equations that physically describe the processes, predicting their susceptibility under many different scenarios of land use and climatic situations. The objective of this dissertation is the application of the SHALSTAB and SINMAP models on shallow landslide susceptibility assessment at the Mogi and Perequê rivers' watersheds, in the municipality of Cubatão (São Paulo). Also, it aims to determine which model best represents slope stability in the study area at each work scale. Based on the digital elevation model (DEM), which provides topographic information to the model, and soil samples collected during fieldwork that later were tested to acquire geotechnical parameters, the modelling of shallow landslides is made using the SINMAP and SHALSTAB models at the scales of 1:50.000 and 1:10.000. The model calibration is based on landslide scars mapping of mass movements events that occurred in the region in 1994 and 1985, where, respectively, 542 and 1679 landslides scars were mapped using aerial images at a scale of 1:25.000. By using the success and error index method and a contingency table to determine the model that best suits the study region, the SHALSTAB model stands out as the most adequate in both work scales since it presents a higher accuracy (landslide scars within unstable areas) and lower proportion of landslide scars in stable areas (false negatives). The application of physically based models in assessing landslide susceptibility at the Serra do Mar region proves to be successful and, therefore, represents an important tool in risk analysis and assessment. The determination of a model that best represents the slope stability of a particular region is essential to the quality and efficiency of landslide risk analysis and assessment, as well as in urban planning, since it is a direct and objective method of representing and predicting the occurrence of these erosive processes.

Keywords: Physically based models, Serra do Mar, Landslides, SHALSTAB, SINMAP.

-

-

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO **9**

2 HIPÓTESE E OBJETIVOS **12**

3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO **13**

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA **15**

4.1 MOVIMENTOS DE MASSA **15**

4.2.1 Geologia 19

4.2.2 Pedologia 19

4.2.3 Clima 20

4.2.4 Geomorfologia 21

4.2.5 Cobertura vegetal 22

4.2.6 Ações antrópicas 22

4.3 MÉTODOS DE PREVISÃO DE ESCORREGAMENTOS **23**

4.4 ESTABILIDADE E RUPTURA DAS ENCOSTAS **23**

4.4.1 Fator de Segurança e o modelo de estabilidade da encosta infinita 23

4.4.2 Modelo Hidrológico 26

5 MATERIAIS E MÉTODOS **27**

5.1 MATERIAIS **28**

5.2 MÉTODOS **28**

5.2.1 Modelo digital de elevação 29

4.2.2 Elaboração da base cartográfica 30

4.2.3 Fotoanálise e fotointerpretação 31

4.2.4 Campanhas de campo e coleta de amostras 31

4.2.5 Ensaios geotécnicos 34

4.2.6 SHALSTAB 36

4.2.7 SINMAP 38

4.2.8 Avaliação da performance dos modelos e cenários geotécnicos 40

5 RESULTADOS **43**

5.1 ETAPA GERAL **43**

5.1.1 Parâmetros geotécnicos 43

5.1.2 Caracterização geológica e geomorfológica 44

5.1.3 Mapeamento de cicatrizes de escorregamentos 52

5.1.4 Pluviometria da região de estudo 54

5.1.5 Compartimentação fisiográfica na escala de 1:50.000 60

5.1.5 Uso dos modelos de bases físicas 66

6.2 ESCALA DE DETALHE **79**

6.2.1 SHALSTAB 79

6.2.2 SINMAP 84

7 DISCUSSÃO **92**

7.1 ASPECTOS FISIOGRÁFICOS E CLIMÁTICOS **92**

7.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS **94**

7.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS NAS MODELAGENS **97**

7.4 INFLUÊNCIA DA ESCALA NOS RESULTADOS DAS MODELAGENS **99**

8 CONCLUSÕES **103**

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS **105**

1 INTRODUÇÃO

Movimentos gravitacionais de massa podem ser definidos como os movimentos de massas de rocha, detritos ou solo nas encostas, desencadeados por uma variada gama de estímulos externos, como chuvas, terremotos e mudanças no nível freático (CRUDEN, 1991). Escorregamentos, corridas de massa, deslizamentos, rastejo e quedas, são alguns dos termos utilizados para descrever movimentos de massa em diferentes escalas de tempo e espaço, como parte da evolução natural do relevo (SESTINI, 2000; GUIDICINI E NIEBLE, 1984; WOLLE, 1988). Apesar de consideráveis avanços na análise de impacto e gestão de riscos de movimentos de massa, como a aplicação de ferramentas GIS, estes continuam a representar grande perigo à vida e infraestrutura em regiões declivosas no mundo e, embora sejam parte integral dos processos naturais da paisagem, a mudança de padrões climáticos, contínuo desmatamento e o aumento da urbanização contribuem para um aumento da atividade desses processos (GOETZ *et al*., 2011; DIETRICH *et al.*, 1998; SCHUSTER, 1996; MONTGOMERY E DIETRICH, 1994). Desta forma, estudos detalhados sobre modelos de suscetibilidade a movimentos de massa e caracterização geológica-geotécnica dessas regiões são necessários para a redução dos impactos econômicos e sociais que tais fenômenos podem ocasionar (GOETZ *et al.,* 2011; ZUQUETTE *et al.,* 1995; SESTINI, 2000).

A previsão de suas ocorrências representam um desafio para as comunidades científicas, tecnológicas e governamentais, frequentemente devido principalmente à complexidade dos fatores controladores da estabilidade da encosta e à falta de dados disponíveis que ajudem a monitorar esses processos. Apesar das diferenças entre as perspectivas analíticas sobre movimentos de massa, sobretudo escorregamentos, existe um consenso a respeito do papel da chuva como o principal elemento de deflagração desses fenômenos em regiões declivosas com clima tropical (PETLEY, 2012; LOPES *et al*., 2007; TATIZANA *et al.*, 1987a; CROSTA, 2004). Diversos trabalhos relacionam a ocorrência de escorregamentos e corridas de massa com fatores climáticos, de longa ou curta duração (NIKOLOPOULOS *et al.*. 2015; GIANNECCHINI *et al.*, 2016; WILKINSON *et al*., 2012; CHANG *et al*., 2011; LACERDA, 2007).

A região da Serra do Mar apresenta encostas com declividade média variando entre 30º e 35º, com alto regime de chuvas nas épocas mais úmidas (verão), o que torna essas áreas favoráveis à ocorrências de movimentos de massa (IPT, 1986; TATIZANA *et al.,* 1987a; AUGUSTO FILHO, 2001). Escorregamentos, sobretudo os translacionais, e corridas de massa são os principais processos que ocorrem naturalmente nas médias e altas encostas da região, mesmo naquelas que não sofrem ou sofreram alteração antrópica (WOLLE, 1988;

IPT, 1986).

A caracterização de áreas instáveis é essencial na redução dos danos que esses processos causam, embora a tarefa não seja simples (WILKINSON *et al.*, 2012; DYKES, 2002; VIEIRA E RAMOS, 2015). Para isso, foram desenvolvidos diferentes métodos e ferramentas que avaliam o papel dos fatores condicionantes e deflagradores. Esses métodos englobam escalas de análises variadas, desde unidades elementares da paisagem, como uma encosta, até recortes espaciais mais amplos, como bacias hidrográficas (WILKINSON *et al.*, 2012, LOPES *et al*., 2007). Uma dessas ferramentas é a aplicação de modelos computacionais que utilizam bases físicas na caracterização de escorregamentos translacionais rasos. Em função da aplicação direta de equações que descrevem fisicamente os processos, estes modelos preveem a suscetibilidade sob diferentes cenários de uso e ocupação do solo e situações climáticas (GUZZETTI *et al.*, 1999; VAN WESTEN, 2004; VIEIRA E RAMOS, 2015).

A modelagem e a melhor compreensão dos atributos que controlam escorregamentos podem fornecer dados importantes no planejamento urbano e designação de áreas destinadas a usos industriais em municípios (VIERA & RAMOS, 2015; BEL *et al.*, 2016; CROSTA, 2004). Modelos de bases físicas usam de modo acoplado modelos de estabilidade de encostas e modelos hidrológicos, onde se destacam o TRIGRS - *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability* (ALVIOLI E BAUM, 2016), o dSLAM - *Distributed, Physically Based Slope Stability Model* (WU E SIDLE, 1995; DHAKAL E SIDLE, 2003), o SINMAP - *Stability INdex MAPping* (PACK*,* 1998; MORRISEY *et al.*, 2001; PACK *et al.*, 2001) e o SHALSTAB - *Shallow Landslide Stability Analysis* (MONTGOMERY E DIETRICH, 1994; MONTGOMERY *et al.,* 1998).

Nesta dissertação foram aplicados os modelos SHALSTAB e SINMAP na análise da suscetibilidade a escorregamentos nas bacias hidrográficas dos rios Mogi e Perequê, em Cubatão (SP), com o auxílio da caracterização geológica-geotécnica da região na obtenção dos dados de entrada dos modelos. Este estudo realizou ainda a avaliação de cada modelo quanto a sua capacidade de previsão de áreas instáveis, na tentativa de identificar qual melhor se aplica à região de estudo nas escalas de trabalho (1:50.000 e 1:10.000). Devido à diversas e repetidas perdas econômicas e ao risco que a população fica submetida por esses processos erosivos, há grande necessidade e urgência em melhor caracterizar esses processos na região.

A pesquisa tem relevância devido ao histórico de ocorrência de escorregamentos na região da Serra do Mar, bem como o crescimento urbano dos municípios em direção à regiões serranas (como, por exemplo, os bairro Cota em Cubatão). A região da Serra do Mar

apresenta condições favoráveis à aplicação de modelos de base física devido à ocorrência de escorregamentos associados a eventos pluviométricos e diversos trabalhos descrevem o uso de modelos SHALSTAB e SINMAP em regiões íngremes sob o regime de um clima tropical úmido, semelhante ao da área de estudo (GOETZ *et al*., 2011; CLAESSENS *et al*., 2005; MICHEL *et al*., 2014; GUIMARÃES, 2000; GUIMARÃES *et al.,* 2003; GOMES *et al.,* 2005; RABACO, 2005; MORRISEY *et al*., 2001; RAFAELLI *et al.,* 2001; VIEIRA E RAMOS, 2015; WU *et al.*, 2015; MOURA BUENO *et al*., 2012; BAUM E ALVIOLI, 2016; SALCIARINI *et al.*, 2008; PARK *et al.*, 2013; LIU E WU, 2008; GODT *et al*., 2008).

Estudos como os de Michel *et al.* (2014), Andriola *et al*. (2009) e Meisina e Scarabelli (2007) comparam as respostas dos modelos SHALSTAB e SINMAP na análise de escorregamentos em uma bacia hidrográfica, com o SHALSTAB apresentando resultados mais satisfatórios que o SINMAP quando aplicados em escala de detalhe (1:10.000 e 1:5.000). A aplicação e comparação dos modelos em escala regional, como feito neste estudo, é ainda pouco registrada na literatura. Numa bacia hidrográfica, modelos de bases físicas têm como objetivo principal a compreensão da distribuição espacial das rupturas da encosta na paisagem, assim como a tentativa de uma previsão da ocorrência desses processos (VIERIA E RAMOS, 2015).

2 HIPÓTESE E OBJETIVOS

Esta pesquisa baseia-se na hipótese de que há um modelo de base física que melhor representa as características geotécnicas, geomorfológicas e geológicas da área de estudo e de quanto maior o nível de detalhe da escala de trabalho, maior é a acurácia destes modelos na previsão de áreas suscetíveis a escorregamentos. Desta forma, o objetivo geral desta dissertação é a análise comparativa dos resultados dos modelos SHALSTAB e SINMAP quando aplicados em bacias hidrográficas com clima tropical úmido, a fim de definir aquele que melhor se aplica às bacias selecionadas – as bacias hidrográficas dos rios Mogi e Perequê, em Cubatão. Como objetivos específicos, esta dissertação se propõe a:

- Avaliar a influência da chuva e do relevo na ocorrência de escorregamentos na região, a partir da caracterização geológica-geotécnica na escala de 1:50.000 e da aplicação dos modelos nas escalas de 1:50.000 e 1:10.000;
- Comparar a acurácia dos resultados obtidos pelos modelos, a fim de definir qual melhor se aplica às bacias hidrográficas de estudo nas diferentes escalas de trabalho.
- Analisar a influência da escala de trabalho na acurácia dos resultados obtidos pelos modelos.

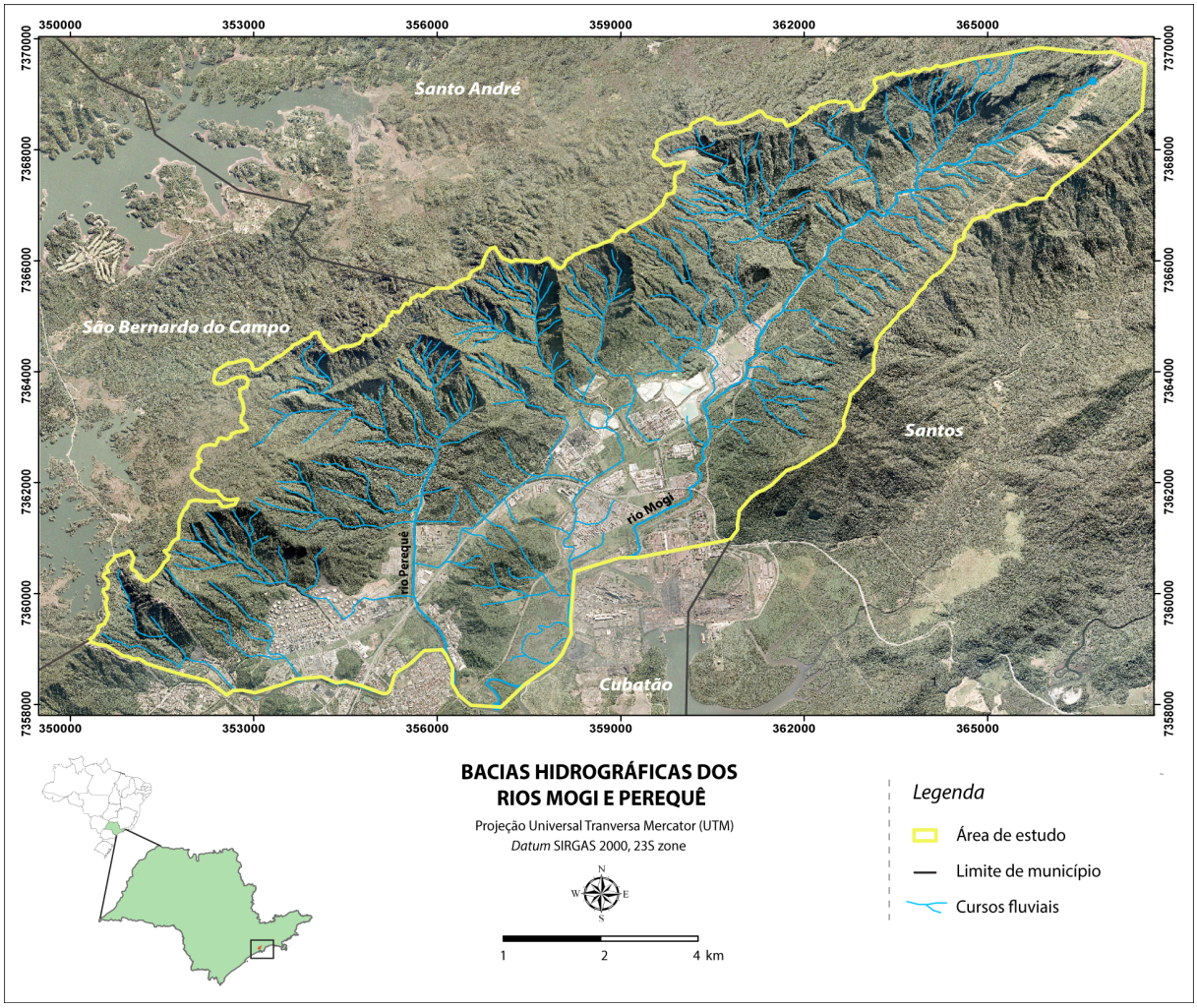
3 LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O trabalho tem como foco as bacias hidrográficas dos rios Mogi e Perequê, situadas no município de Cubatão (Figura 1). Cubatão está inserido no contexto da Serra do Mar, que corresponde à escarpa montanhosa da borda oriental do Planalto Atlântico, acompanhando as direções geográficas e estruturais SW/NE do litoral sudeste brasileiro. Na área de estudo, registra-se a presença de escarpa de falha recuada, com desnível superior a 1000 m de alta declividade (SANTOS, 2004; TATIZANA *et al.,* 1987a). De acordo com IBGE (2017), Cubatão tem população de 127.887 habitantes, em área total de 142,879 km^2, apresentando altos índices pluviométricos, com índice anual na Serra de Cubatão de aproximadamente 3.000 mm - ocasionalmente atingindo 4.500 mm (KANJI *et al*., 2008). A temperatura varia de 17º a 36º C durante o ano, com chuvas causadas devido ao avanço de frentes frias vindas do sul (Andes Argentino-Chileno). O aumento na intensidade da chuva ocorre devido ao efeito orográfico causado pela Serra do Mar e a distribuição das chuvas pode ser bastante variável, intensas em curto período de tempo com picos superiores a 50 mm/h, chegando a mais de 100 mm/dia (LOPES, 2006).

Ao analisar a história de Cubatão é possível observar o registro de eventos de escorregamentos, intrinsicamente ligados a episódios intensos de chuvas. Em Janeiro de 1985, na bacia hidrográfica do Rio Perequê, ocorreram escorregamentos de modo generalizado em que grande volume de material foi canalizado pelo sistema de drenagem e se transformou em corridas de lama e detritos, alcançando grandes distâncias com alto poder destrutivo (LOPES *et al*., 2007). Outro evento semelhante, nos dias 6 e 7 de fevereiro de 1994, produziu uma centena de escorregamentos no terço superior das encostas nas cabeceiras do Rio das Pedras (pertencente à bacia do rio Perequê), gerando corrida de massa que atingiu a refinaria Presidente Bernardes da Petrobrás, paralisando a produção por duas semanas e causando prejuízos da ordem de milhões de dólares (LOPES *et al*., 2007; GRAMANI, 2001).

A baixada Santista é região de grande importância para o Estado de São Paulo e para o Brasil, pois é cortada por importante rodovias, ferrovias e dutovias (petróleo e gás) que ligam a capital e o interior do estado ao litoral. Diversas indústrias estão fixadas na região, com destaque para indústrias químicas, petroquímicas e siderúrgicas, sendo Cubatão considerado o maior polo petroquímico da América Latina, sede da maior refinaria de petróleo do Brasil - a refinaria Presidente Bernardes da Petrobrás (ARAUJO FILHO *et al.*, 1998). A produção e estocagem de materiais químicos altamente inflamáveis e contaminantes aumentam o risco de grandes acidentes e impactos ambientais na região.

Figura 1: Localização da área de estudo, englobando as bacias hidrográficas dos rios Mogi e Perequê.



Fonte: elaborado pelo autor

4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O principal objetivo deste capítulo é a contextualização sobre os assuntos abordados ao longo deste trabalho, sobretudo as classificações e definições básicas de movimentos de massa com foco em escorregamentos. Também é feita uma breve introdução teórica sobre o fator de segurança da encosta e sobre os modelos da encosta-infinita e hidrológico, cuja combinação é base essencial dos modelos de bases físicas utilizados nesse trabalho.

4.1 MOVIMENTOS DE MASSA

Existem diversas classificações a respeito de movimentos de massa na literatura devido a diferentes enfoques de acordo com a área de aplicação, como geologia, engenharia, geomorfologia, etc. Neste trabalho é adotada a classificação proposta por Varnes (1978), adaptada por Augusto Filho (1992). A classificação de Varnes é a mais utilizada internacionalmente, adotada pela *International Association for Engineering Geology and the Environment* (IAEG) e baseia-se no tipo de movimento e material transportado (Quadro 1). Augusto Filho (1992), a partir da classificação de Varnes, classificou os movimentos de massa de acordo com material constituinte, velocidade de deslocamento e geometria (Quadro 2).

Os escorregamentos, foco desta pesquisa, são processos de movimentos rápidos, com plano de ruptura definido e são classificados com base na forma do plano de ruptura e no tipo de material em movimento (FERNANDES E AMARAL, 1996). IPT (1991) define escorregamentos como movimentos cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora de um talude, de curta duração e com limites laterais e de profundidade bem definidos, cujo material envolvido pode ser constituído por solo, solo e rocha, somente rocha ou até mesmo resíduos sólidos. Os escorregamentos podem ser subdivididos em translacionais (planares), rotacionais (circulares) e em cunha.

4.1.1 Escorregamentos translacionais (planares)

Escorregamentos translacionais são os mais comuns nas encostas brasileiras e os que ocorrem com maior frequência na área de estudo. Ocorrem principalmente em encostas com alta declividade e solos pouco espessos e, no geral, são compridos e rasos, com plano de ruptura bem definido com profundidades que variam entre 0,5 a 2 m (IPT, 2000; GUERRA, 2000; CUNHA, 2000). Os planos de ruptura, planares, podem acompanhar descontinuidades mecânicas e/ou hidrológicas existentes no interior do material da encosta (WOLLE E CARVALHO, 1994; FERNANDES E AMARAL, 1996) e são associados a solos saprolíticos, saprólitos e rocha, condicionados por plano de fraqueza associado à estruturas como

foliações, falhas, xistosidade e fraturas (IPT, 2007).

Quadro 1: Classificação de movimentos de massa.

Tipo de movimento		Tipo de material		
		Rocha	Solo	
			Grosseiro	*Fino*
Quedas (*Fall*)		de rocha	de detritos	de terra
Tombamentos (*Topless*)		de rocha	de detritos	de terra
Escorregamentos (*slides*)	Rotacionais	abatimento de rocha	abatimento de detritos	abatimento de terra
		de blocos rochosos	de blocos de detritos	de blocos de terra
	Translacionais	de rocha	de detritos	de terra
Corridas/escoamentos (*Flows*)		de rocha	de detritos	de terra
Expansões laterais		de rocha	de detritos	de terra
Complexos: combinação de dois ou mais tipos de movimentos, ação de vários agentes				

Fonte: Varnes (1978)

Escorregamentos translacionais, de acordo com Dias (2002), são deflagrados durante eventos de chuvas intensas, que aumentam a poro-pressão do solo que ocorre quando a taxa de infiltração se torna maior que a taxa de retirada de água do interior da massa da encostas, causando assim instabilizações. A figura 2b e 2a mostram, respectivamente, esquema de um escorregamento translacional, elaborado pelo serviço geológico dos Estados Unidos – USGS (*United States Geological Survey*), e um exemplo na região de estudo de escorregamento translacional visto em campo.

4.1.2 Escorregamentos rotacionais (circulares)

Escorregamentos rotacionais ocorrem em superfícies de ruptura curvas, na qual o material sofre movimentação côncava para cima com um raio de alcance menor que os escorregamentos translacionais. Estão associados a aterros, solos mais espessos e rochas sedimentares (IPT, 2007). Podem ainda, de acordo com Gerscovich (2002), mobilizar mais que uma superfície de ruptura, sendo então classificados como múltiplos. A figura 2e mostra o esquema de um escorregamento rotacional, elaborado pelo serviço geológico dos Estados Unidos – USGS (*United States Geological Survey*). Em função dessas características, estão associados, geralmente, a ambientes com presença de solos mais profundos que permitem a maior infiltração e a percolação profunda da água. A figura 2f mostra um exemplo de escorregamento rotacional visto na paisagem.

Quadro 2: Classificação de movimentos de massa, de acordo com Augusto Filho (2001).

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO, MATERIAL E GEOMETRIA
Rastejo (*Creep*)	Vários planos de deslocamento Velocidades muito baixas (cm/ano) que decrescem com a profundidade Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes Solos, depósitos, rocha alterada/fraturada Geometria indefinida
Escorregamentos (*slides*)	Poucos planos de deslocamentos (externos) Velocidade médias (m/h) e altas (m/s) Pequenos a grandes volumes de materiais Geometria e materiais variáveis Planares - solos poucos espessos, com plano de fraqueza Circulares - solos espessos homogêneos e rochas fraturadas Em cunha - solo e rocha com dois planos de fraqueza
Quedas (*Falls*)	Sem planos de deslocamento Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado Velocidades muito altas (m/s) Material rochoso Pequenos a médios volumes Geometria variável: lascas, placas, blocos e etc Rolamento de matacão Tombamento
Corridas (*Flows*)	Muitas superfícies de deslocamentos (internas e externas à massa de movimentação) Movimentos semelhantes ao de um líquido viscoso Desenvolvimento ao longo das drenagens Velocidades médias a altas Mobilização de solo, rocha e detritos e água Grandes volumes de material Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas

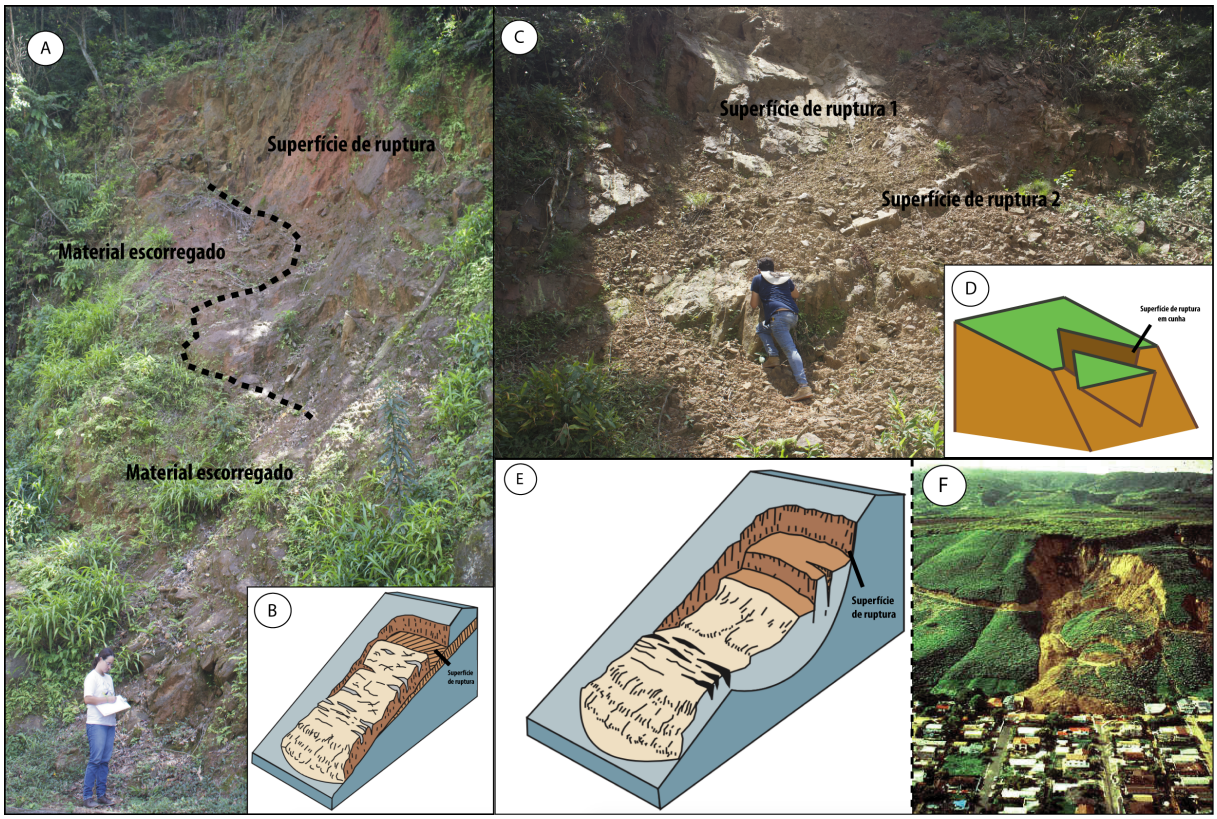
Fonte: Augusto Filho (2001)

4.1.3 Escorregamentos em cunha

Os escorregamentos em cunha possuem essa denominação devido à forma da superfície de ruptura, em forma de cunha. Ocorrem quando as camadas menos resistentes não são paralelas à superfície do talude ou quando os planos de fraqueza se cruzam, como mostra a figura 2d retirada de Lopes (2006), modificada de IPT (1991). Estes processos estão associados a saprólitos e maciços rochosos, sendo frequentes em taludes de corte ou encostas que foram submetidas a algum processo natural de desconfinamento, como erosão ou deslizamentos anteriores (IPT, 2007). A figura 2c mostra exemplo de escorregamento em

cunha observado na área de estudo, na rodovia “Caminhos do mar”.

Figura 2: Classificação dos tipos de escorregamentos. A) Exemplo de escorregamento translacional visto em campo (Caminhos do Mar – SP 148). B) Esquema de escorregamentos translacionais rasos (USGS, 2004). C) Exemplo de escorregamento em cunha visto em campo (Caminhos do Mar – SP 148). D) Esquema de escorregamento em cunha. E) Esquema de escorregamento rotacional (USGS, 2004). F) Exemplo de escorregamento rotacional na Califórnia, Estados Unidos (USGS, 2004).



Fonte: elaborado pelo autor

4.2 FATORES CONDICIONANTES DE MOVIMENTOS DE MASSA

O quadro 3 mostra, baseado em Guidicini e Nieble (1976), os principais fatores que influenciam a estabilidade das encostas. Os agentes predisponentes são aqueles que tornam a encosta suscetível ao movimento de massa e estão geralmente associados às condições geológicas, geométricas e ambientais do meio, sem interferência antrópica (LOPES, 2006). Já os agentes efetivos são aqueles que dão início ao movimento, incluindo a atividade antrópica (AUGUSTO FILHO E VIRGILI, 1998; LOPES, 2006; CROZIER, 1986).

As causas são destacadas de acordo com sua posição no talude, onde as internas levam à instabilidade sem haver mudança na geometria da encosta, diminuindo a resistência do material que a constitui; as externas provocam o aumento da tensão cisalhante, sem diminuir a resistência do material do talude; e as intermediárias são resultados de agentes

externos na parte interna do talude. De acordo com Lopes (2006), a deflagração de movimentos de massa, mais especificamente escorregamentos, está condicionada a seis fatores geoambientais fundamentais: geologia, pedologia, clima, geomorfologia, cobertura vegetal e ações antrópicas.

Quadro 3: Principais agentes e causas que influenciam a estabilidade das encostas.

CAUSAS	Internas		Efeito das oscilações térmicas Redução dos parâmetros de resistência ao cisalhamento por intemperismo, como diminuição do ângulo de atrito e coesão do material
	Intermediárias		Elevação do nível piezométrico em massas homogêneas Elevação da coluna de água em descontinuidade Rebaixamento rápido do lençol freático Erosão subterrânea (piping) Diminuição do efeito da coesão aparente
	Externas		Mudanças na geometria da encosta Efeitos de vibrações Mudanças naturais na inclinação da encosta
AGENTES	Predisponentes		Geologia (mineralogia, tectônica e estratigrafia) Geomorfologia (forma da encosta, inclinação) Clima (regime hidrológico Ação gravitacional, calor e vegetação
	Efetivos	Preparatórios	Pluviosidade Erosão pela água e vento Congelamento e degelo Variação de temperatura Oscilação do nível de marés e lençol freático Ação humana
		Imediatos	Chuvas intensas Fusão do gelo e neve Erosão Terremotos Ondas Vento Ação do homem

Fonte: Guidicini e Nieble (1976)

4.2.1 Geologia

Os fatores geológicos que controlam a estabilidade de encostas podem ser classificados em aspectos mineralógicos, tectônicos e hidrogeológicos – que influenciam diretamente nas propriedades mecânicas, grau de intemperismo e propriedades físico-químicas das diferentes litologias. O quadro 4 aprofunda um pouco mais nos aspectos geológicos influentes na estabilidade das encostas.

4.2.2 Pedologia

O clima quente e úmido da região da Serra do Mar favorece a rápida evolução pedológica, que desempenha papel fundamental no desenvolvimento de escorregamentos de terra. O clima tropical favorece a ação física, químico e biológica dos agentes intempéricos, formando assim elúvios (solos formados pela decomposição do material de origem) e/ou

colúvio e tálus, que são solos transportados por agentes de transporte ou movimento de materiais (AUGUSTO FILHO E VIRGILI, 1998).

Quadro 4: Fatores geológicos que influenciam a estabilidade das encostas

Fator Geológico		Característica
Mineralógico		São as características decorrentes da própria natureza mineralógica da rocha, como: resistência, alterabilidade, erodibilidade e anisotropia; incluindo a presença de minerais expansivos e o intemperismo diferencial.
Tectônico	*Feições estruturais*	Correspondem a planos de fraqueza da rocha (falha, fratura, foliação), frequentemente preservados no solo saprolítico. A rugosidade, planaridade, continuidade, preenchimento e posição espacial dessas feições são importantes no condicionamento da estabilidade dos corpos.
	Dinâmicos	Referentes à presença de sismos e ao comportamento do maciço rochoso e terroso frente à diferentes solicitações dinâmicas.
	Estado de tensões	Caso os corpos estejam sobre elevadas tensões, o excessivo alívio pode gerar instabilidade
Hidrogeológico		São os fatores resultantes da presença e movimento das águas no maciços.

Fonte: Lopes (2006)

A forte ação intempérica favorece o desenvolvimento de solos mais espessos, com zonas de diferentes resistências e permeabilidades, influenciando diretamente nos mecanismos de ruptura (AUGUSTO FILHO E VIRGILI, 1998). Essas zonas com características físicas diferentes interferem na percolação ou concentração de água, diretamente relacionada à condutividade hidráulica (K). No entanto, solos tropicais são de difícil caracterização pois esforços capilares são de difícil mensuração em ensaios convencionais e solos saprolíticos, que são os que mais ocorrem na área de estudo, apresentam diversas descontinuidades e heterogeneidades herdadas a rocha mãe, de difícil reprodução em laboratório e requerem caracterização de detalhe em campo (LOPES, 2006; WOLLE, 1988).

4.2.3 Clima

O clima representa um dos mais importantes papeis no desencadeamento de escorregamentos e, de acordo com Wolle (1988), atua tanto como agente predisponente quanto agente deflagrador. Segundo IPT (1988), as chuvas não constituem componente condicionante de escorregamentos, mas somente de deflagrador imediato do processo. É inegável, porém, que os índices pluviométricos regionais e locais representam um dos fatores de maior importância na delimitação de áreas suscetíveis a escorregamentos.

Lopes (2006) defende que chuvas intensas podem afetar diretamente o Fator de Segurança da encosta, pois diminuem a coesão e ângulo de atrito do solo, aumentam o peso

específico e formam um nível freático de curta duração, levando à instabilizações. As precipitações críticas, que levam ao desencadeamento desses fenômenos, têm características muito específicas que devem ser conhecidas e determinadas, como intensidade (mm/min, mm/hora, mm/dia), duração e distribuição espacial. No estudo dos escorregamentos há necessidade de se levar em consideração as chuvas antecedentes, pois influenciam fortemente na saturação do solo (DOMINGUES *et al*., 1971; WIECZOREK, 1987; MARTINEZ, 1999). Wolle e Carvalho (1989) defendem que a ação combinada de chuva precedente e chuva intensa de curta ou média duração são responsáveis pela deflagração de escorregamentos, salientando casos da Serra do Mar como o evento de janeiro de 1985. Quanto mais úmido o solo, mais rápido ocorre a saturação em superfície, com maior velocidade de avanço da frente de saturação.

4.2.4 Geomorfologia

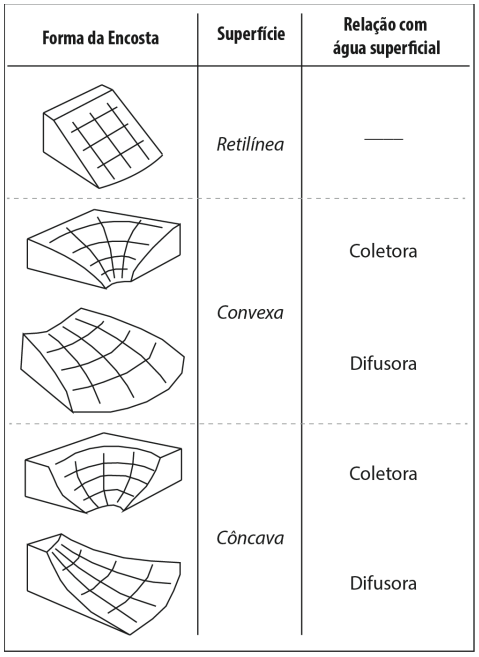
O relevo representa papel fundamental no controle de escorregamentos, pois condicionam os parâmetros hidrológicos e as características do solo (Lopes, 2006). A forma das vertente e as variáveis morfométricas, como declividade, área de contribuição, aspecto e amplitude são condicionante geomorfológicos importantes, que influenciam diretamente na estabilidade das encostas.

Altas declividades, altas amplitudes e, de acordo com Wolle (1988) e IPT (1986), encostas retilíneas favorecem o desenvolvimento de escorregamentos. A forma da encosta pode afetar a orientação das raízes das árvores, que fortemente influencia fluxos preferenciais dentro da encostas dos morros (TSUTSUMI *et al*., 2004; GHESTEM *et al*., 2011). Fluxos preferenciais têm sido citados como fatores que podem contribuir na acresção da poro-pressão (onde o caminho dos fluxos converge e possivelmente se truncam) e dissipação de água dentro solo (onde as raízes agem eficientemente como drenos), influenciando, assim, positivamente ou negativamente na estabilidade da encosta (UCHIDA *et al*., 2001; SIDLE E OCHIAI, 2006; BOGAARD E GRECO, 2015).

Na área de estudo, Wolle (1988) defende que a instabilidade das encostas predominam em encostas retilíneas de cotas elevadas, onde se concentram os maiores índices pluviométricos. Segundo Dietrich *et al*. (1988), as encostas retilíneas tendem a ser mais suscetíveis a escorregamentos translacionais que as encostas convexas devido a suas maiores declividades. Já os perfis côncavos possuem, em geral, maior espessura de solo por serem zonas de convergência de fluxo de água e apresentam grande volume de material a ser

mobilizado, configurando uma superfície de ruptura mais profunda. A figura 13 mostra as respostas geodinâmicas de acordo com a forma da encosta, baseado em Gerscovich (2002).

Figura 3: Respostas geodinâmicas de acordo com a forma da encosta.



Fonte: Gerscovich (2002)

4.2.5 Cobertura vegetal

A vegetação também representa um fator importante na estabilidade de encosta, pois pode retardar ou acelerar a deflagração de escorregamentos. A vegetação controla o escoamento superficial e a infiltração da água no solo (TATIZANA *et al*., 1987a; SELBY, 1993), podendo reter a água, impedindo seu impacto direto sobre o solo, assim como reter parte da água precipitada, que volta à atmosfera por meio da evapotranspiração – diminuindo a infiltração e escoamento superficial (*runoff*).

Ademais, as raízes podem aumentar o coeficiente de coesão do solo, ajudando na estabilização das encostas, servindo como reforço mecânico e também por ajudar no escoramento do solo, servindo como pilastras de sustentação dos horizontes superficiais (TATIZANA *et al*., 1987a; LOPES, 2006). Porém, a vegetação pode ter efeitos desfavoráveis na estabilidade de encostas, como ressalta IPT (1988), podendo produzir efeito alavanca – produzido pelo troncos pela agitação das copas das árvores pelo vento -, efeito cunha – causado pela penetração das raízes em fendas, fissuras e fraturas do solo e da rocha -, e efeito de sobrecarga vertical - causado pelo peso das árvores em solos rasos.

4.2.6 Ações antrópicas

A interferência antrópica pode influenciar diretamente na estabilidade das encostas,

pois as modificações que o homem faz ao meio natural podem induzir e/ou potencializar escorregamentos (AUGUSTO FILHO, 1994). As principais atividades antrópicas que influenciam nas instabilizações são: remoção da cobertura vegetal; execução de cortes de na encosta de geometria inadequada; lançamento de lixos nas encostas; vibrações causadas pelo tráfego pesado; vazamentos na rede de abastecimento e de esgoto – que pode gerar efeito *piping* (LOPES *et al*., 2007)

4.3 MÉTODOS DE PREVISÃO DE ESCORREGAMENTOS

A previsão de escorregamentos tem como principal objetivo a redução das consequências socioeconômicas e ambientais associadas a esses processos, evitando a ampliação de acidentes que podem ser ocasionados em determinada região. A descrição e caracterização dos condicionantes de movimentos de massa e a análise de risco é essencial na elaboração de métodos ou modelos que auxiliam na previsão desses processos (CUNHA, 2000). Um modelo pode ser definido como uma representação simplificada da realidade, baseada em descrições objetivas do processo ao qual se deseja realizar simulações. Segundo Lopes (2006), a utilização de modelos ajuda a entender os mecanismo naturais da paisagem e ajuda a prever 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. O quadro 5 mostra os diversos tipos de modelos e suas características, baseado em Rennó (2003).

Neste trabalho são selecionados dois modelos na caracterização dos escorregamentos: um determinísticos (SHALSTAB) e um estocástico (SINMAP). Os modelos escolhidos são baseados em processos pontuais, estáticos e a base fundamental da estabilidade das encostas, fundamentais no entendimento dos modelos utilizados neste trabalho, é detalhada a seguir.

4.4 ESTABILIDADE E RUPTURA DAS ENCOSTAS

4.4.1 Fator de Segurança e o modelo de estabilidade da encosta infinita

Para escorregamentos translacionais rasos, mais frequentes na área de estudo, a superfície de ruptura se dá aproximadamente paralela à superfície da encosta e o embasamento pode ser considerado impermeável (CHANG *et al*., 2014; PACK *et al*., 1998). Assim, a melhor forma de avaliação da estabilidade da encosta se dá por meio do cálculo do fator de segurança (FS), que é a razão entre o somatória das forças cisalhantes (T) e as forças de resistência ao cisalhamento (τ). A figura 4 esquematiza as forças atuantes numa encosta,

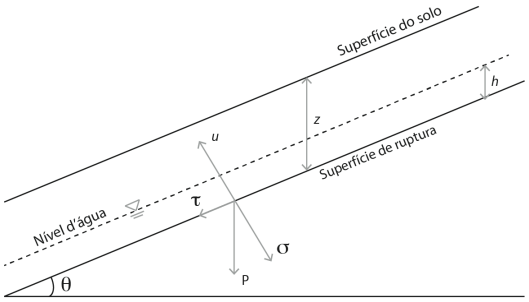
que compõem o índice do Fator de Segurança. Quando a força de resistência ao cisalhamento (τ) é igual à força motora (T), o Fator de segurança é igual a 1 e indica que a encosta está no limite da estabilidade (PACK *et al*., 1998; DIETRICH *et al.,* 2001). Fator de Segurança maior do que 1 (FS > 1) indica condição de estabilidade na encosta, enquanto Fator de Segurança menor do que (FS < 1) indica que a encosta é iminentemente instável. Consequentemente, quanto menor o valor do fator de segurança, maior a instabilidade da encosta. A diminuição do fator de segurança ocorre com o aumento da coluna d'água do material d a encosta, devido à redução das forças de resistência. Logo, durante um episódio de chuva, o aumento da coluna d'água reduz o FS e conforme a chuva apresenta maior duração e intensidade, maior a probabilidade de rupturas na encosta.

Quadro 5: Características dos diferentes tipos de modelos de bases físicas.

CLASSIFICAÇÃO	TIPO	CARACTERÍSTICAS
Variáveis utilizadas	*Estocásticos*	Quando pelo menos uma das variáveis envolvidas tem comportamento aleatório
	Determinísticos	Quando os conceitos de probabilidade não são considerados durante a elaboração do modelo. Cada valor de entrada produz um único valor de saída, mesmo que a variável de entrada seja aleatória
Relações entre variáveis	*Empíricos*	Fazem uso de relações baseadas em observações. São simples e úteis no dia a dia, pouco robustos e adaptados a cada região. Não permite, normalmente, mudanças nas condições para as quais foram elaborados
	Baseados em processos	São Mais complexos que os empíricos, pois procuram descrever todos os processos envolvidos no fenômeno estudado. Faz uso de modelos detalhados e multivariados, que requerem bom conjunto de informações e parametrização cuidados. São divididos em modelos conceituais (que faz uso de equações empíricas) e físicos (que utilizam equações físicas na representação dos processos, cujos parâmetros possuem significado físico que podem ser estimados através de medidas reais)
Representação dos dados	*Discretos*	Apesar dos fenômenos naturais variarem continuamente no tempo, na maioria das vezes, estes fenômenos são representados por modelos discretos (um único intervalo de tempo)
	Contínuos	Quando o fenômeno é representado por diversos intervalos de tempo. Quanto menos o intervalo, maior a precisão dos resultados e maior custo computacional
Existência ou não de relações espaciais	*Pontuais*	Considera-se que todas as variáveis de entrada e de saída são representativas de toda a área estudada. Normalmente, alguma discretização é feita para representar uma área homogênea
	Distribuídos	Consideram a variabilidade espacial encontrada nas diversas variáveis do modelo. Modelos mais realísticos consideram tamvém a existência de relação espacial entre elementos vizinhos (relação topológica)
Existência de dependência temporal	*Estáticos*	Quando um conjunto de dados de entrada produz um resultado oriundo da solução das equações do modelo em um único passo
	Dinâmicos	Quando utilizam o resultado de uma interação como entrada para a próxima interação

Fonte: Rennó (2003)

Figura 4: Esquema das forças atuantes em uma encosta.



Fonte: Pack et al. (1998)

A determinação do Fator de Segurança das encostas é base essencial dos modelos de bases físicas aplicados nesse trabalho e é feita a partir do modelo de estabilidade da encosta infinita, que leva em consideração os parâmetros geotécnicos e climáticos da região de interesse. O modelo de encosta infinita é baseado na lei de *Mohr-Coulomb*, que dita que no momento da instabilização a força cisalhante (τ), devido ao componente do peso do solo, é superior à força de resistência causada pela coesão (c) e ângulo de atrito (º) devido à pressão normal efetiva no plano de falha (equação 1). Os parâmetros de resistência dos solos, ângulo de atrito e coesão são essenciais para qualquer análise quantitativa da estabilidade de encostas (WOLLE, 1988; GUIDICINI E NIEBLE, 1984).

$$\boldsymbol{\tau = c + (\sigma - u)\cdot \tan \varphi} \quad (1)$$

Onde σ é a Força Normal ($N.m^{-2}$); u é a pressão poro do solo que se opõe à carga normal ($N\ m^{-2}$); e φ é o ângulo de atrito do solo (º). A equação 1 pode ser modificada para a seguinte equação, conforme propõe Selby (1993):

$$\boldsymbol{\rho_S \cdot g \cdot z \cdot \sin\theta \cdot \cos\theta = c_r + c_S + (\rho_S \cdot g \cdot z \cdot \cos^2\theta - \rho_W \cdot g \cdot h \cdot \cos^2\theta) \cdot \tan\varphi} \quad (2)$$

Onde ρ_S é a densidade do solo saturado ($kg.m^{-3}$), *z* é a profundidade do solo (m), θ é o angulo da encosta (º), ρ_W é a densidade da água ($kg.m^{-3}$), *h* é o nível d'agua (m), c_r é a coesão das raízes ($N.m^{-2}$), c_S é a coesão do solo ($N.m^{-2}$) e *g* é a aceleração gravitacional. É utilizada a densidade do solo saturado devido à similaridade com as condições de campo em que ocorrem os escorregamentos. Ao dividir a equação que representa as forças estabilizantes do solo (porção direita da equação 2), pela porção de forças desestabilizantes (porção esquerda), o fator de segurança da encosta infinita pode ser obtido:

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

4.4.2 Modelo Hidrológico

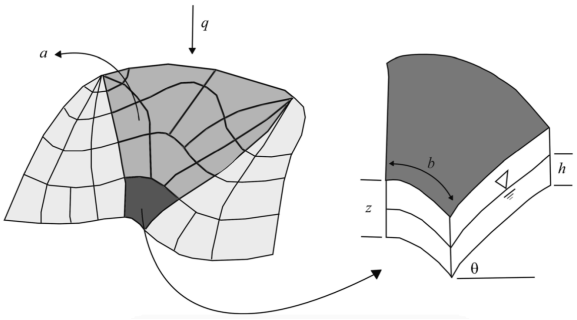
As condições de estabilidade da encosta está diretamente relacionada a fatores hidrológicos, logo é essencial o uso de modelos na estimação das condições de umidade do solo durante episódios de escorregamento. O conceito hidrológico mais comum adotado em modelagens de estabilidade de encosta, como os modelos SHALSTAB e SINMAP, é o fluxo subsuperfície *steady-state*, descrito em TOPOMODEL (BEVEN E KIRKBY, 1979) e TOPOG (O'LOUGHLIN, 1986). Esse conceito assume uma recarga uniforme que simula a variação espacial da nível d'água durante episódio de chuva. Definindo umidade (*wetness*) como a porção saturada do solo submetida a uma recarga uniforme, O'Loughlin (1986) propôs que ela é dada pela relação entre a água que entra no sistema na forma de recarga uniforme e água que sai do sistema a partir da camada saturada do solo. A equação 4 mostra a formulação final do modelo hidrológico steady-state:

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

$$T = K_s \cdot z \cdot \cos\theta \quad (4)$$

De acordo com a figura 5, para que exista zona de saturação é necessário que o produto entre a área drenada a montante (a) e a precipitação (q) que passa por um elemento de contorno de comprimento (b), seja maior do que o produto da transmissividade do solo (T) e o seno do ângulo da encosta (θ), conforme a equação 4. Onde W é a taxa umidade do solo (*wetness*), T a transmissividade do solo (m^2d^{-1}) e Ks (md^{-1}) é a condutividade hidráulica saturada, considerada homogênea ao longo da profundidade do solo (z).

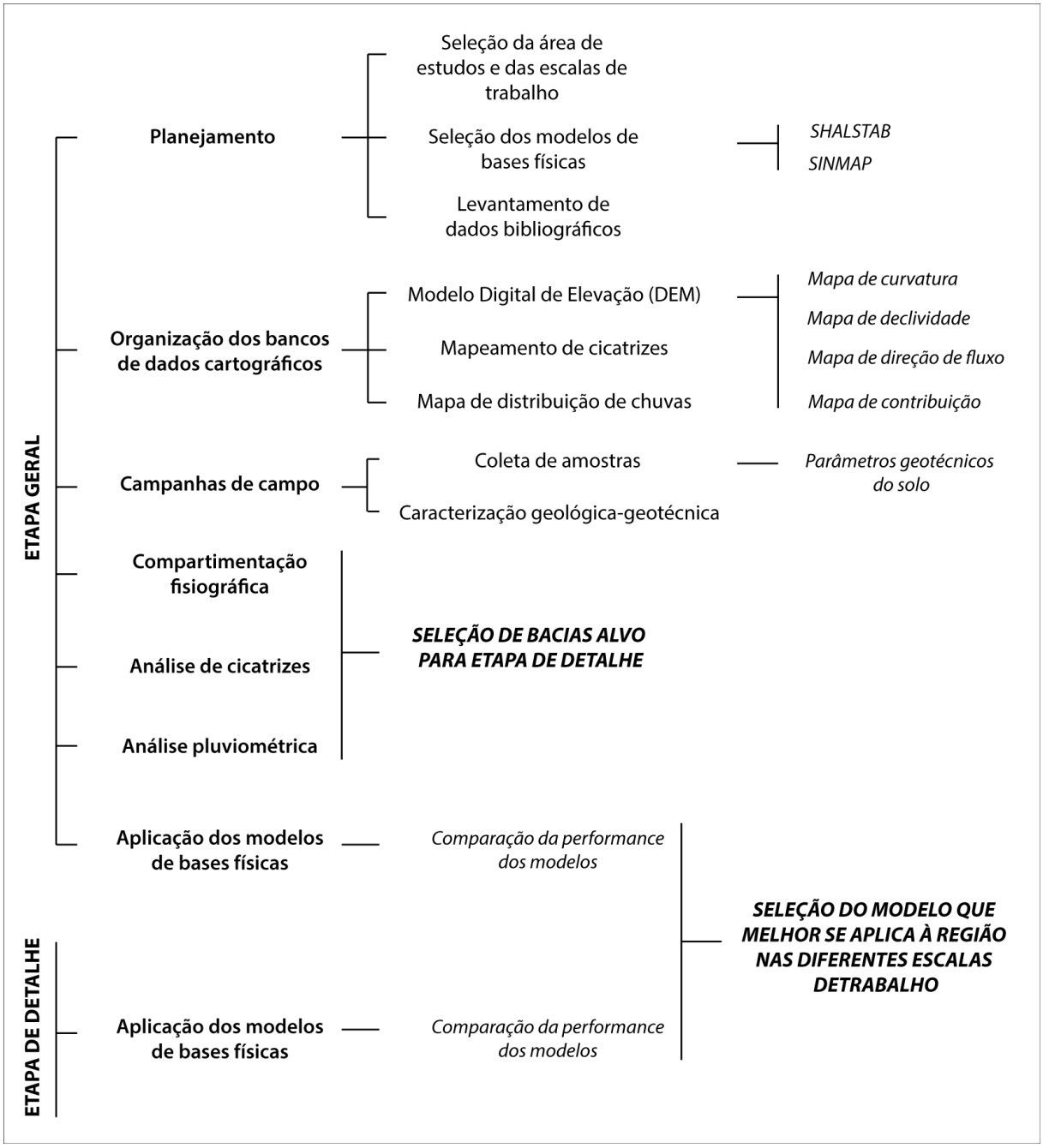
Figura 5: Representação dos parâmetros que compõem o modelo hidrológico.



5 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta dissertação toma como base a lógica do método proposto por Cerri *et al*. (1996) de detalhamento progressivo, que considera etapas sucessivas de detalhamento com aprofundamento no nível de detalhe na fase subsequente. São consideradas duas etapas de trabalho: geral, na escala de 1:50.000, e de detalhe, na escala de 1:10.000. A figura 6 mostra as etapas utilizadas na execução desta pesquisa, cujos materiais e métodos utilizados são detalhados a seguir.

Figura 6: Etapas de execução deste estudo.



Fonte: elaborado pelo autor

5.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados na elaboração deste trabalho foram as fotografias aéreas e ortofotos da região de interesse, bases topográficas do município de Cubatão (SP) e mapa geológico da baixada santista (tabela 1). As imagens aéreas e ortofotos correspondentes ao ano de 2011, nas escala de 1:4.000 e 1:25.000 respectivamente, foram fornecidas pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano SA (EMPLASA), enquanto as fotografias aéreas de 1985 e 1994, na escala de 1:25.000, foram fornecidas pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo - IGC.

Tabela 1: Materiais utilizados e suas respectivas escalas de trabalho

MATERIAL	ESCALA	FONTE
Ortofotos	1 : 4.000	Empresa de Planejamento Metropolitano do Estado de SP (EMPLASA)
Fotografias aéreas	1 : 25.000	Instituto Geográfico e Cartográfico do Estadode São Paulo (IGC)
Mapa geológico	1 : 50.000	Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT)
Base topográfica	1 : 50.000 e 1 : 10.000	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e Instituto Geográfico e Cartográfico do Estadode São Paulo (IGC)
Dados pluviométricos	——	Departamento de Água e Energia do Estado de São Paulo (DAEE)

Fonte: elaborado pelo autor

O mapa topográfico na escala de 1:50.000 foi disponibilizado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Folha Santos SF-23-Y-D, e o mapa geológico (1:50.000) foi obtido por meio do Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT (1985). A base topográfica na escala de 1:10.000 foi disponibilizada pelo Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo (IGC) e, a partir das bases topográficas, foi elaborado o modelo digital de elevação (MDE) - base na geração dos mapas de declividade, curvatura, direção de fluxo e contribuição hidrológica. Os dados de chuva da região foram obtidos através do banco de dados pluviométricos do portal do Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de São Paulo. Na extração das cicatrizes dos escorregamentos e na geração do MDE e mapas derivados foi utilizado o *software* de geoprocessamento ArcGIS®.

5.2 MÉTODOS

Na etapa geral (1:50.000), foi feita caracterização geológica-geotécnica e geomorfológica, análise das cicatrizes de escorregamentos e análise da pluviometria da

região, que serviram de base na execução da compartimentação fisiográfica da área de estudo. A compartimentação fisiográfica de áreas susceptíveis a escorregamentos é importante instrumento de avaliação ambiental e planejamento urbano, pois auxilia na identificação de áreas mais suscetíveis à ocorrência desses fenômenos, baseando-se nas características do relevo da região de interesse.

Os modelos SHALSTAB e SINMAP também foram aplicados nesta etapa e, junto à compartimentação, auxiliam na identificação das regiões mais suscetíveis a escorregamentos, a partir de um ponto de vista objetivo, considerando principalmente o papel da topografia na estabilidade da encosta. Os modelos de base física, então, foram novamente aplicados nas região mais suscetíveis, na escala de 1:10.000, e foi feita a comparação dos resultados dos modelos nas diferentes escalas. Também foi determinado, em ambas escalas, o modelo que melhor representa as instabilidades nas encostas das bacias de estudo.

5.2.1 Modelo digital de elevação

Utilizando a folha topográfica que engloba o município de Cubatão na escala de 1:50.000, foi feita a vetorização das curvas de nível, hidrografia, estradas e rodovias que fazem parte da área de estudo. A projeção utilizada foi a Universal Transversa de Mercator - UTM, com *datum* SIRGAS 2000, Zona 23S. A partir da vetorização das curvas de nível foi possível elaborar o modelo digital de elevação (MDE), base fundamental na aplicação dos modelos de base física pois está associado diretamente à obtenção da declividade e da área de contribuição da região de interesse, exigindo grande acurácia (GUIMARÃES, 2000). A elaboração do DEM utilizado na escala de detalhe (1:10.000) foi feita com base nas curvas de nível disponibilizadas pelo IGC, também na projeção UTM – datum SIRGAS 2000, zona 23 S.

De acordo com Claessens *et al.* (2005), a escolha da resolução do MDE deve ser feita de acordo com os objetivos do estudo, levando em consideração a escala de trabalho e o volume de dados disponíveis sobre a região. Resolução perfeita não existe pois nem mesmo o mais detalhado MDE é capaz de reproduzir todas as instabilizações da encosta no espaço e tempo (CLAESSENS *et al*., 2005). Desta forma, a resolução de 20 m é adotada na escala regional de trabalho (1:50.000), enquanto que na escala de 1:10.000 a resolução adotada é de 10 m. Segundo Moura Bueno *et al.* (2012), que comparou a sensibilidade do SINMAP em diferentes resoluções de DEM, em uma caracterização de detalhe a resolução de 10 m mostra-

se ideal. A resolução de 20 m foi escolhida para o DEM da etapa regional devido à resolução da base topográfica, com curvas de 20 em 20 m.

Na geração do MDE foi utilizado o módulo de interpolação *Topo to Raster* da extensão *3D Analyst* do *software* ArcGIS. Esse método 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, 2000; LOEBMANN *et al.*, 2005). Na correção das imperfeições contidas no MDE, foi feito o tratamento de picos e sumidouros através da ferramenta *Fill* no menu *Hydrology*, da extensão *Spatial Analyst Tool*. Esse tratamento se faz necessário pois corrige imperfeições que podem afetar a análise da distribuição do fluxo d'água, com o objetivo de perder a menor quantidade possível de informação do relevo.

4.2.2 Elaboração da base cartográfica

O Modelo Digital de Elevação (MDE) serve de base para a elaboração dos mapas de declividade, curvatura da encosta, direção de fluxo e contribuição hidrológica, feitos em ambas escalas. Com exceção do mapa de curvatura da encosta, todos são essenciais na aplicação dos modelos de bases físicas. O mapa de declividade foi elaborado com intervalos em graus formando 5 classes, que representam de forma satisfatória a área de estudo: 0º- 5º, de 5º- 15º, de 15º- 30º, de 30º- 45º e maiores que 45º (FERREIRA *et al.,* 2008). O mapa de curvatura da encosta, que auxiliou na compartimentação da área de estudo na escala de 1:50.000, foi elaborado utilizando a ferramenta *curvature* do *software* ArcGIS, que classificou na área três tipos de encostas: côncavas (valores abaixo de 0 a -1), retilíneas (valores iguais à 0) e convexas (valores acima de 0 a 1).

O mapa de direção de fluxo foi obtido a partir da ferramenta *flow direction* do menu *Hydrology* da extensão *Spatial Analyst Tool*. Este mapa apresenta a direção do escoamento d'água conforme 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. Já o mapa de contribuição hidrológica foi feito com base no mapa de direção de fluxo, através da ferramenta *flow accumulation*, da ferramenta *Hydrology* da extensão *Spatial Analyst Tool* do ArcGIS. O mapa de contribuição analisa o efeito da topografia no fluxo d'água inserido na bacia e cria uma superfície de acúmulo de fluxo a partir das direções deste.

O mapa de distribuição pluviométrica na região, que também auxiliou na compartimentação fisiográfica, foi elaborada a partir de dados coletados de nove pluviômetros espalhados pelo municípios de Cubatão, Santos, Santo André e São Bernardo, utilizando a

média do índice de chuva para os meses de Dezembro a Março dos anos de 1936 a 2000. Também foram gerados mapas de distribuição das chuvas do eventos de 1985 e 1994, que desencadearam escorregamentos de modo generalizado na região. Os dados pluviométricos foram interpolados utilizando o software ArcGIS, ferramenta *topo to raster,* classificados em seis classes através de *natural breaks (jenks)*. Ainda com base nos dados dos pluviômetros da região, foram elaborados histogramas do índice de chuva diária dos anos de 1984, 1985, 1993 e 1994, na identificação de padrões no comportamento da chuva relacionada aos episódios de escorregamentos de 1985 e 1994.

4.2.3 Fotoanálise e fotointerpretação

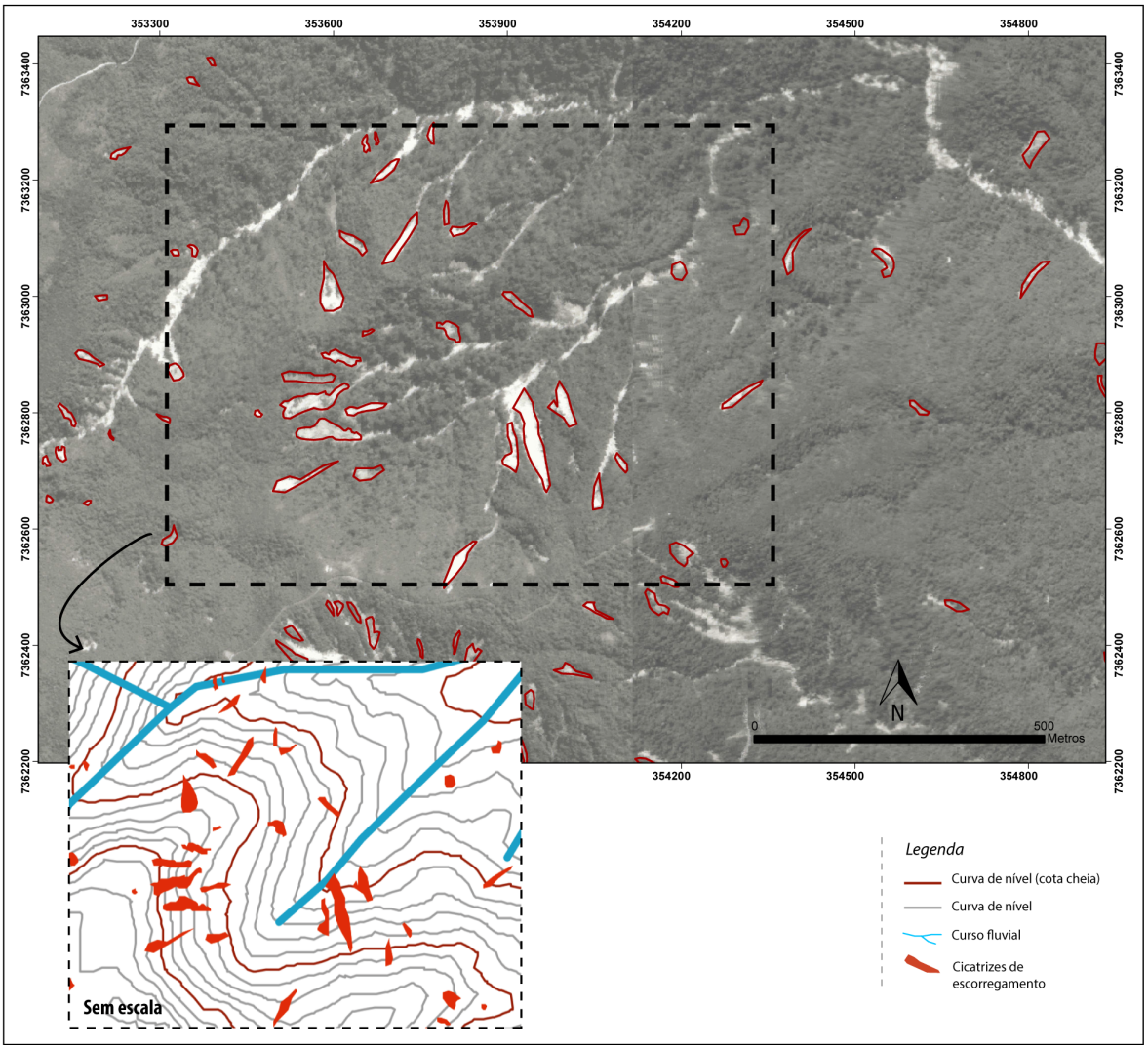
Nesta etapa foram utilizadas as imagens aéreas e ortofotos disponibilizadas pela EMPLASA e IPT na identificação das características do relevo da área de estudo e também no mapeamento das cicatrizes de 1985 e 1994. Os critérios fotointerpretativos para o reconhecimento das cicatrizes foram a ausência de vegetação, posição na vertente, a forma (alongadas) e o tamanho (comprimento superior à largura), como mostra a figura 7.

Para a compartimentação fisiográfica foram adotados os métodos de fotoanálise e fotointerpretação na sua confecção. A fotoanálise utilizou-se do quadro de análise geológica elaborado por Zaine (2011), mostrado no quadro 6. A fotointerpretação consistiu na interpretação dos dados obtidos a partir da fotoanálise, separando a área de estudo em unidades de compartimentação, que apresentam características do relevo semelhantes, e classificando as unidades quanto a sua suscetibilidade a ocorrência de escorregamentos e ao risco que o desencadeamento dos escorregamentos representam à comunidade.

4.2.4 Campanhas de campo e coleta de amostras

Foram feitos dois levantamentos de campo na região, no reconhecimento, coleta de amostras de solo e caracterização geológica-geotécnica da área de estudo. Por se tratar de uma área que se insere dentro de um Parque Estadual – Parque Estadual da Serra do Mar -, foi necessário o requerimento de autorização para os trabalhos de campo e coleta de amostras, que foi obtida em Setembro de 2017 (Processo COTEC - SMA nº 005.552/2017). As campanhas de campo serviram de grande auxílio na compartimentação fisiográfica e na obtenção dos parâmetros geotécnicos de entrada dos modelos, essencial na garantia da representatividade das modelagens. Em grande parte da área de estudo não foi possível a caracterização e coleta de amostras devido à questões fisiográficas da região (de difícil acesso) e devido à temporada de chuvas, que se estendeu por mais tempo no verão de 2017/2018.

Figura 7: Extração de cicatrizes de escorregamento com base em fotografias aéreas. Fotografia aérea utilizada no exemplo foi obtido por meio do IGC, na escala de 1:25.000.



Fonte: elaborado pelo autor

Quadro 6: Análise geológica do relevo, Adaptado de Zaine (2011).

CRITÉRIOS	CLASSES		
Densidade de elementos de drenagem	**Baixa** (0 a 5/10 km²)	**Média** (5 a 30/10 km²)	**Alta** (>30/ km²)
Densidade de elementos de relevo	**Baixa**	**Média**	**Alta**
Amplitude local	**Pequena (0 a 100m)**	**Média (100 a 300m)**	**Grande (>300m)**
Declividade	**Baixa (0 a 15%)**	**Média (15 - 30%)**	**Alta (>30%)**
Forma de encosta	**Convexa**	**Côncava**	**Retilínea**
Forma do vale	**Aberto**	———	**Fechado**
Forma de topo	**Aplainado**	**Arredondado**	**Anguloso**

Fonte: elaborado pelo autor

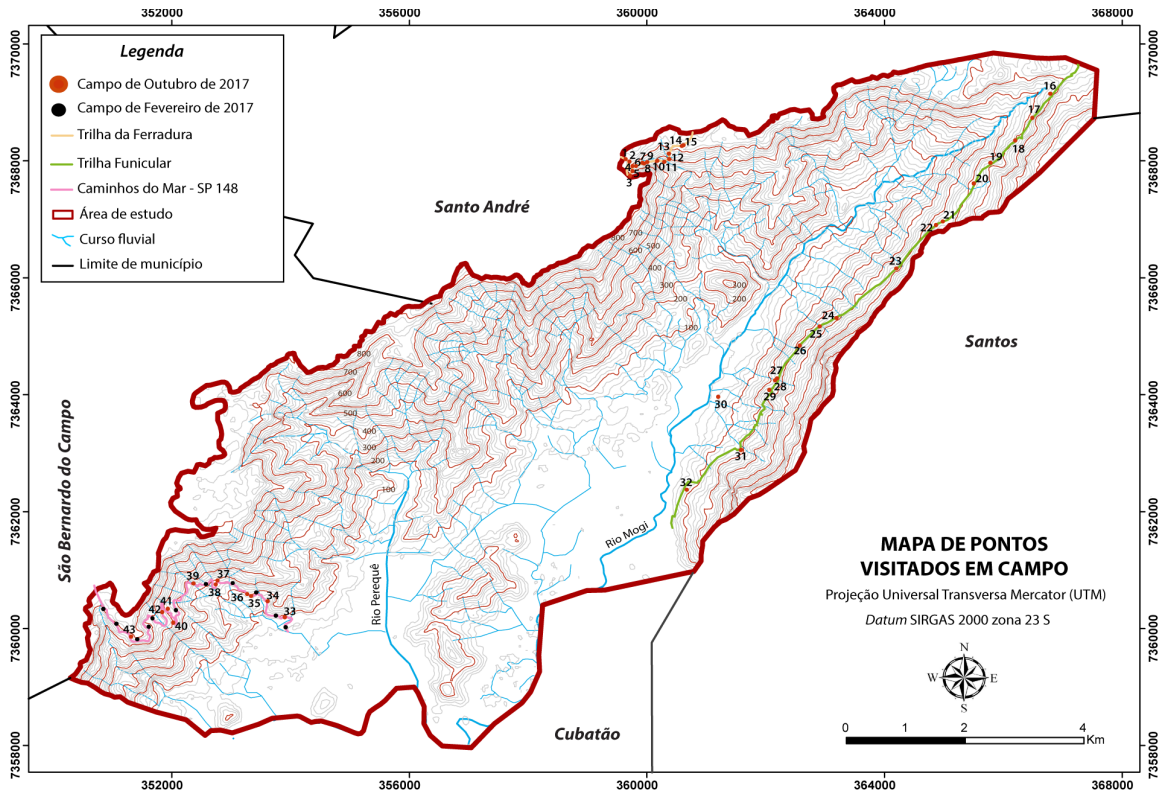
O primeiro campo, de reconhecimento, ocorreu nos dias 6 a 10 de fevereiro de 2017, onde foram descritos 17 pontos, como mostra a tabela 2. Na segunda campanha de campo, nos dias 4 a 6 de outubro de 2017, foram caracterizados 43 pontos (tabela 3) e coletadas 8 amostras de solo. A figura 8 mostra a localização dos pontos visitados durante as campanhas de campo.

Tabela 2: Pontos descritos na campanha de campo de fevereiro de 2017.

Ponto	Coordenadas		Bloco	Litologia	Medidas	
	X	Y			Fratura	Foliação
1	353754	7360219	Juquitiba	Xisto	-	342/65
2	353638	7360475	Juquitiba	Gnaisse	252/85 ; 248/85 ; 350/60 ; 320/70	-
3	353754	7360219	Juquitiba	Xisto	-	342/65
4	353423	7360611	Juquitiba	gnaisse migmatitico	-	-
5	353240	7360647	Juquitiba	gnaisse	-	172/50
6	353030	7360775	Juquitiba	gnaisse migmatitico	-	-
7	352780	7360811	Juquitiba	migmatito	-	-
8	352698	7360706	Juquitiba	escorregamento	-	-
9	352576	7360757	Juquitiba	escorregamento	-	-
10	352390	7360772	Juquitiba	escorregamento	-	-
11	352070	7360311	Juquitiba	gnaisse	82/85 ; 08/80 ; 180/45	296/85
12	351883	7360342	Juquitiba	gnaisse	342/80 ; 52/10 ; 54/50 ; 52/30	344/80
13	351678	7360170	Juquitiba	gnaisse	178/90 ; 330/82 ; 54/75 ; 112/05	68/55
14	351614	7360029	Juquitiba	gnaisse	66/80 ; 222/80 ; 52/48 ; 12/20 ; 62/40 ; 24/35	338/65
15	351419	7359811	Juquitiba	gnaisse	14/45 ; 75/85 ; 314/55 ; 335/56 ; 322/60	342/45
16	350847	7360335	Juquitiba	-	-	-
17	351067	7360079	Juquitiba	gnaisse	252/40 ; 228/60	-

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 8: Mapa de pontos descritos durante as campanhas de campo, mostrando também o percurso das trilhas visitadas.



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 3: Pontos descritos na campanha de campo de outubro de 2017.

Ponto	Coordenadas		Bloco	Litologia	Amostra	Medidas	
	X	Y				Fratura	Foliação
1	359644	7368025	Juquitiba	Gnaisse bandado	-	-	5/90
2	359705	7367981	Juquitiba	Blocos na drenagem	-	-	-
3	359736	7367708	Juquitiba	Blocos de gnaisse	-	-	-
4	359755	7367903	Juquitiba	Blocos de gnaisse	4A e 4B (solo)	-	-
5	359755	7367818	Juquitiba	Migmatito	-	direção NE/SW	-
6	359817	7367903	Juquitiba	Blocos de gnaisse	-	-	-
7	359928	7367958	Juquitiba	Gnaisse e migmatito	-	-	-
8	359954	7367945	Juquitiba	Blocos de migmatito	-	-	-
9	360002	7367971	Juquitiba	Migmatito	-	-	direção NE/SW
10	360173	7367995	Juquitiba	migmatito	-	-	-
11	360289	7367976	Juquitiba	Migmatito e gnaisse migmatitico	-	-	-
12	360315	7368043	Juquitiba	Tálus	12A (solo)	-	-
13	360368	7368116	Juquitiba	Tálus	13A (solo)	-	-
14	360589	7368247	Juquitiba	<igmatito	-	-	-
15	360611	7368260	Juquitiba	Milonito - migmatito	-	-	08/90
16	366796	7369149	Costeiro	-	-	-	-
17	366493	7368739	Costeiro	Gnaisse	-	-	168/50 e 192/60
18	366205	7368352	Costeiro	-	-	-	-
19	365787	7367970	Costeiro	Gnaisse	19A (rocha)	-	-
20	365506	7367617	Costeiro	Tálus	20A (solo)	-	-
21	364988	7366964	Costeiro	Granito	21A (rocha)	-	-
22	364874	7366904	Costeiro	Escorregamento	22A e 22B	-	-
23	364205	7366158	Costeiro	Gnaisse	23A (rocha)	-	198/45
24	363195	7365314	Costeiro	Gnaisse	-	335/55 e 310/60	170/65 e 173/60
25	362914	7365167	Costeiro	Migmatito	-	-	-
26	362576	7364843	Costeiro	Granito	-	-	-
27	362195	7364278	Costeiro	Migmatito	-	-	-
28	362162	7364245	Costeiro	Migmatito e gnaisse migmatitico	-	-	-
29	362065	7364086	Costeiro	Migmatito	-	-	-
30	361588	7363054	Costeiro	Gnaisse migmatitico	30A (rocha)	-	-
31	361204	7363967	Costeiro	Gnaisse	-	-	316/35
32	360674	7362374	Costeiro	Gnaisse	-	234/65	354/25 e 298/15
33	353916	360201	Juquitiba	-	-	-	-
34	353908	7360190	Juquitiba	Mica xisto	34A (rocha)	-	-
35	353621	7360461	Juquitiba	Gnaisse	35A (rocha)	00/90; 72/88 ; 222/32 ; 78/75 ; 152/72 e 156/75	340/75; 352/75; 330/75
36	353332	7360567	Juquitiba	-	-	-	-
37	352780	7360814	Juquitiba	Tálus	36A (solo)	-	-
38	352750	7360746	Juquitiba	Migmatito	37A (rocha)	-	-
39	352370	7360764	Juquitiba	Tálus	38A (solo)	-	-
40	352031	7360097	Juquitiba	Escorregamento	39A (solo)	-	-
41	351872	7360339	Juquitiba	Tálus	41A (solo)	-	-
42	351322	7359855	Juquitiba	Gnaisse	42A (rocha)	-	-
43	351067	7360078	Juquitiba	Escorregamento	-	-	-

Fonte: elaborado pelo autor

4.2.5 Ensaios geotécnicos

Os ensaios geotécnicos laboratoriais foram realizados no Laboratório de Pesquisa em Geotecnia e Meio Ambiente do Departamento de Geologia Aplicada (DGA) da UNESP - Rio Claro -, seguindo as normas estabelecidas pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). As oito (8) amostras coletadas em campo foram submetidas a ensaios geotécnicos considerando os índices físicos: granulometria/sedimentação (NBR7181/84), ensaios de permeabilidade e porosidade (NBR6457/16), peso específico (NBR6508/84) e saturação do solo.

Parâmetros de coesão e ângulo de atrito interno, necessário no cálculo do FS pelos modelos, não foram obtidos de forma direta devido à indisponibilidade técnica e, assim, foram estimados a partir da correlação entre a textura do solo e o peso específico (Godoy,

1983) – figura 9. A textura das amostras foi obtida a partir do triângulo de textura de solos proposto pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos – USDA (figura 9).

A aquisição indireta destes parâmetros, no entanto, não é ideal devido à generalizações a respeito do comportamento do solo e material das encostas, o que pode afetar os resultados das modelagens. Desta forma, também é utilizado os parâmetros geotécnicos obtidos por Wolle (1988), em solos saturados da Serra do Mar próximo à rodovia dos Imigrantes, em que os parâmetros de coesão e ângulo de atrito foram obtidos de forma direta (tabela 4). A comparação entre os resultados das modelagens utilizando parâmetros com correlação indireta com modelagens utilizando parâmetros diretos é importante na avaliação do efeito que os parâmetros geotécnicos de entrada têm sobre mapas de suscetibilidade gerado pelos modelos.

Figura 9: Correlação entre peso específico do solo, textura e golpes SPT, para solos argilosos e arenosos. Baseado em Godoy (1983).

Correlação para solos argilosos

N (GOLPES SPT)	CONSISTÊNCIA	PESO ESPECÍFICO (KN/M³)
≤2	Muito mole	13
3 - 5	Mole	15
6 - 10	Média	17
11 - 19	Rija	19
>20	Dura	21

Correlação para solos arenosos

N (GOLPES SPT)	CONSISTÊNCIA	PESO ESPECÍFICO (KN/M³)		
		Areia seca	Úmida	Saturada
< 5	Fofa	16	18	19
5 - 8	Pouco compacta			
9 - 18	Medianamente compacta	17	19	20
19 - 40	Compacta	18	20	21
> 40	Muito compacta			

A correlação empírica da resistência à penetração (N) do SPT com o ângulo de atrito, é dado por:

$$\varphi = 28° + 0{,}4\ N$$

A correlação entre a coesão e o índice de resistência à penetração (N) do SPT, é dado por:

$$C = 10\ N\ (KPa)$$

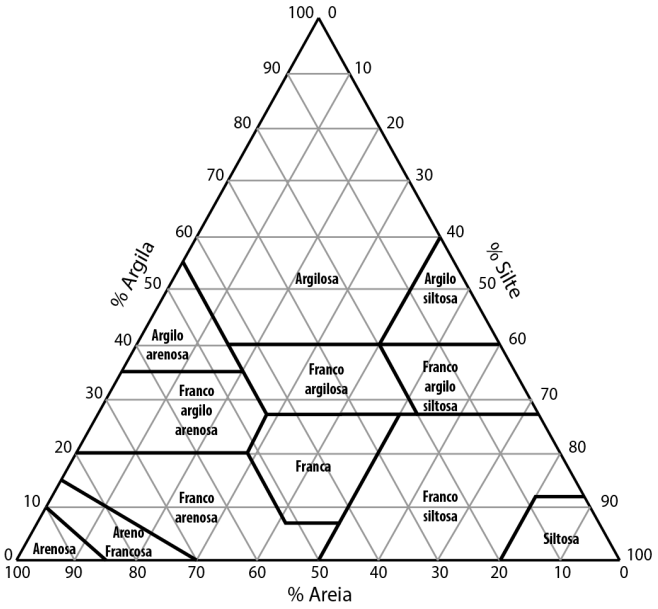
Fonte: Adaptado de Godoy (1983)

Tabela 4: Parâmetros geotécnicos obtidos em solos saturados da Serra do Mar por Wolle (1988).

Amostra	Profundidade (m)	Peso específico (Kg/m^3)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito interno (º)
1B	1	1710	1000	34
2B	2	1950	4000	39
3B	1	1820	1000	36
4B	2	2010	3500	39

Fonte: Wolle (1988)

Figura 10: Gráfico de textura do solo, com base em ensaios granulométrico. proposto pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos - USDA.



Fonte: USDA (2018)

4.2.6 SHALSTAB

O modelo SHALSTAB utiliza a combinação de modelos de estabilidade de encosta-infinita e modelo hidrológico, possibilitando a definição de zonas suscetíveis a escorregamentos translacionais na paisagem, em áreas com planos de transição bem definidos e com forte diminuição no processo de infiltração (MONTGOMERY & DIETRICH, 1994; DIETRICH *et al.*, 1998). O modelo assume que a topografia local é o controle dominante na ocorrência de escorregamentos translacionais (GUIMARÃES *et al.*, 2003; GOETZ *et al.*, 2011). O risco relativo a escorregamentos é calculado a partir da razão entre a precipitação efetiva e a transmissividade do solo (q/T). O valor de q/T depende de duas variáveis: a área de drenagem pela largura do fluxo subsuperfície e o ângulo da encosta local, ambas obtidas a partir do MDE (DIETRICH *et al.*, 1998).

A combinação entre o modelo hidrológico e o modelo de encosta-infinita configura o grau de estabilidade da encosta através do cálculo feito a partir da equação 5, em que é possível definir sete classes de estabilidade (Tabela 5). Os parâmetros de entrada do modelo, obtidos a partir de ensaios geotécnicos de amostras de solo, são: ângulo de atrito (ϕ), coesão (c), peso específico do solo (ρ_s) e espessura (z). As demais variáveis da equação são obtidas a partir do modelo digital de elevação (a, b e q). Resolvendo a equação 2 em termos de h/z (camada saturada do solo) resulta na quantidade de saturação necessária para a ocorrência dos escorregamentos:

$$h / z = (\rho_s / \rho_w) . (1 - \tan\theta/\tan\phi) + c / (\cos^2\theta . \tan\phi . \rho_w . g . z) \quad (5)$$

Aplicando a equação 5 em uma encosta, duas condições extremas são estabelecidas: incondicionalmente instável e incondicionalmente estável. A primeira condição acontece quando h/z é definido como 0 (sem coluna de água) e a relação entre os parâmetros do solo não podem compensar os efeitos desestabilizantes da encosta (Equação 6). A segunda condição acontece quando h/z é definido como 1 (totalmente saturado), e a relação entre parâmetros do solo sobrepõe os efeitos da inclinação da encosta (Equação 7)

$$\tan\theta \geq \tan\phi + c / (\cos^2\theta . \rho_s . g . z) \quad (6)$$

$$\tan\theta \leq \tan\phi . (1 - \rho_w/\rho_s) + c / (\cos^2\theta . \rho_s . g . z) \quad (7)$$

Quando as condições incondicionalmente instável e estável não são estabelecidas, uma saturação parcial do solo pode levar a rupturas na encosta, e então os modelos da encosta infinita e modelo hidrológico são combinados:

$$q . a / T . b . \sin\theta = (\rho_s/\rho_w) . (1 – \tan\theta/\tan\phi) + c / (\cos^2\theta . \tan\phi . \rho_w . g. z) \quad (8)$$

Uma modificação na equação 8 é feita nos termos dos parâmetros q e T que gera a formulação final do SHALSTAB. As classes mais extremas (incondicionalmente instável e incondicionalmente estável) são relacionadas às equações 6 e 7, e as outras cinco classes são estabelecidas a partir da função q/T (equação 9).

$$q / T = b/a . \sin\theta \{ (\rho_s/\rho_w) . (1 – \tan\theta/\tan\phi) + c / (\cos^2\theta. \tan\phi . \rho_w . g . z) \} \quad (9)$$

Tabela 5: 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 to -2.2	Estável e não-saturado
-2.8 to -2.5	Instável e não-saturado
-3.1 to -2.8	Instável e saturado
< -3.1	Incondicionalmente instável e não-saturado
Incondicionalmente instável	Incondicionalmente instável e saturado

Fonte: Montgomery e Dietrich (1994)

4.2.7 SINMAP

O *Stability Index Mapping* ou SINMAP, desenvolvido por Pack *et al.* (1998), é um modelo físico estocástico 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 (*range of uncertainty*) (PACK *et al*., 2001). O resultado primário do modelo é definido como fator de segurança (FS) ou *stability index* (SI), que é um valor numérico usado para classificar ou caracterizar 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). A tabela 6 mostra as classes de estabilidade do SINMAP. O modelo se propõe a prever o ponto inicial dos escorregamentos, mas não a sua magnitude, sua trajetória e sua área de deposição e, assim, o índice de estabilidade/fator de segurança só pode ser entendido em termos de perigo relativo (PACK *et al*, 2001). Assim como o SHALSTAB, é distribuído gratuitamente por seus desenvolvedores.

O SINMAP é baseado na equação 3 para calcular o Fator de Segurança. O modelo hidrológico *steady state* (Equação 10) é usado para estimar a saturação do solo (W) , assumindo que o valor máximo h/z é igual a 1. Então, se o valor é >1, fluxo sobre o terreno é formado.

$$\mathbf{W = h/z = Min\ [\ q\ .\ a\ /\ (T\ .\ b\ .\ \sin\theta)\ ,\ 1\ ]} \quad (10)$$

A taxa q/T determina a umidade relativa em termos de recarga uniforme em relação à capacidade do solo de drenar água. Embora o termo *steady-state* é o usado 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 10 com a equação 3, a formulação final do SINMAP é gerada:

$$FS = \frac{c_a + \cos\theta \{ 1 - Min [(q . a) / (T . b . \sin\theta) , 1] . r \} . \tan\phi}{\sin\theta} \quad (11)$$

Tabela 6: Classes de estabilidade do modelo SINMAP.

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

Fonte: Pack et al. (1998)

Variações aleatório nos parâmetros de entrada entre suas bordas geram a distribuição da probabilidade de estabilidade do terreno (probabilidade do FS>1). Assumindo que a variável T/q é representada por x, e então x1 é o limite inferior e x2 o limite superior. Similarmente, representando a tangente de o por t, então t1 e t2 são os limites superiores e inferiores. O mesmo acontece para a coesão c, c1 e c2 são os limites inferiores e superiores

para coesão adimensional. O pior cenário é aquele em que há a combinação entre os valores menores de c e t, com os valores maiores de x:

$$\mathbf{SI = FS_{min} = \frac{c_1 + \cos\theta \,.\, \{ 1 - Min\, [\, x_2 \,.\, (\, a / b.\, Sin\theta\, ,\, 1)\, .\, r\,]\, .\, t_1}{Sin\theta}} \qquad (12)$$

Sobre essas condições, de FS > 1, o local é considerado incondicionalmente estável. Em qualquer área em que o FS mínimo é < 1, então há a probabilidade de falha na encosta. Nesse caso, o índice de estabilidade (SI) é definido como:

$$\mathbf{SI = Prob\ (FS > 1)} \qquad (13)$$

O melhor cenário combina o limite superior de c e t, com o limite inferior de x. Logo, o valor máximo do FS é obtido por:

$$\mathbf{SI = FS\ máx = \frac{c_2 + \cos\theta\ \{ 1 - Min\, [\, x_1 \,.\, (\, a / b.\, Sin\theta)\, ,\, 1]\, .\, r\}\, .\, t_2}{Sin\theta}} \qquad (14)$$

Sob esse cenário, se FS < 1, o local é considerado incondicionalmente instável

4.2.8 Avaliação da performance dos modelos e cenários geotécnicos

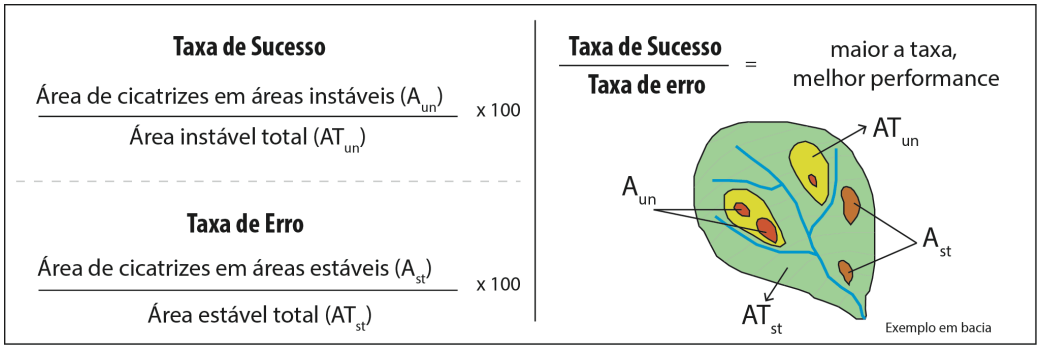
A melhor adaptação de um modelo a uma bacia se dá quando o inventário de escorregamentos coincide com as áreas classificadas como instáveis e ao mesmo tempo estas áreas representam pequena porcentagem em área da bacia (DIETRICH *et al*., 2001; MONTGOMERY E DIETRICH, 1994). No entanto, a definição do melhor modelo, bem como a definição do cenário de parâmetros geotécnicos, que melhor represente uma área de interesse a partir da coincidência entre áreas instáveis e cicatrizes, pode ser muito subjetiva, sendo imprescindível uma análise mais objetiva. Desta forma, este trabalho faz uso de dois métodos: taxa de sucesso e erro, proposto por Sorbino *et al*. (2010), e matriz de contingência, baseado em Fawcett (2006).

4.2.8.1 Taxa de Sucesso e Erro

A figura 10 mostra como é feita a classificação do índice de sucesso e do índice de erro. O índice de sucesso considera a área das cicatrizes que coincidem em áreas **instáveis**

sobre a área classificada como **instável**. Já o índice de erro calcula a área das cicatrizes que estão em área classificadas como **estáveis** sobre a área classificada como **estável**. A razão entre o índice de sucesso e erro é sugerido por Sorbino *et al.* (2010), onde quanto maior o valor dessa razão, melhor a performance. A porcentagem de área instável utilizada neste estudo é a somatória das áreas das classes instáveis: Limite inferior, Limite superior e Instável no SINMAP; -2.8 a 2.5; -3.1 a -2.8, < -3.1 e Incondicionalmente instável no SHALSTAB. A porcentagem de área estável é a somatória da área de todas as classes estáveis classificadas pelos modelos.

Figura 9: Taxa de Sucesso e Erro.



Fonte: Sorbino et al. (2010)

4.2.8.2 Matriz de contingência

A matriz de contingência compara os resultados obtidos pelos modelos com o que é observado no relevo (de acordo com o mapeamento de cicatrizes de escorregamentos), classificando essas comparações em quatro classes: Verdadeiro Positivo (VP), Falso Positivo (FP), Verdadeiro Negativo (VN) e Falso Negativo (FN) – figura 11.

Figura 10: Matriz de contingência, baseado em Fawcett (2006).

	Positivo (P)	Negativo (N)
	Verdadeiro Positivo (VP)	**Falso Positivo (FP)**
	Falso Negativo (FN)	**Verdadeiro Negativo (VN)**

Verdadeiro Positivo: área das cicatrizes em áreas instáveis

Falso negativo: área das cicatrizes em áreas estáveis

Verdadeiro negativo: área estável sem ocorrência de cicatrizes

Falso Positivo: áreas classificadas como instáveis, sem ocorrência de cicatrizes

Fonte: elaborado pelo autor

Essas classes de resultados são base para o cálculo dos índices de performance mostrados na figura 12. Um mapa de suscetibilidade a escorregamentos ideal simultaneamente maximiza o acordo entre locais de escorregamentos conhecidos e previstos

(verdadeiros positivos) e minimiza a área fora dos locais de cicatrizes conhecidos previstos como instáveis (falsos positivos).

Figura 11: Índices de avaliação da performance dos resultados obtidos pelos modelos, com base em Fawcett (2006).

ÍNDICE	PARÂMETROS UTILIZADOS	
Acurácia	$\frac{VP + VN}{P + N}$	**TPR/FPR** = Maior o valor, melhor a performance
Precisão	$\frac{VP}{VP + FP}$	
Taxa de Positivo Verdadeiro (TPR)	$\frac{VP}{P}$	
Taxa de Falso Positivo (FPR)	$\frac{FP}{N}$	

Fonte: elaborado pelo autor

5 RESULTADOS

Este capítulo é dividido em duas partes: a primeira detalha os resultados gerados na etapa geral e a segunda parte os resultados da etapa de detalhe. Os resultados obtidos na escala regional serviram de base na escolha das áreas alvo da escala de detalhe.

5.1 ETAPA GERAL

5.1.1 Parâmetros geotécnicos

A tabela 7 mostra os resultados dos ensaios geotécnicos feitos nas amostras coletadas em campo, enquanto a tabela 8 mostra o resultado da correlação dos parâmetros de coesão e ângulo de atrito, com base em Godoy (1983). Os diversos conjuntos de parâmetros geotécnicos representam diferentes respostas dos solos frente às instabilizações do terreno, logo as modelagens são feitas com todos os cenários na tentativa de identificar aquele que melhor represente as características geotécnicas médias da área de estudo nas diferentes escalas de trabalho.

Tabela 5: Resultados dos ensaios geotécnicos feitos em amostras coletadas em campo.

Amostra	Peso específico saturado (g/cm3)	textura	Porosidade	Índice de saturação	Umidade
4A	1,79	Franco arenosa	45,05	77,58	24,26
12A	1,31	Franco arenosa	49,31	95,22	35,9
13A	1,43	Franca	46,40	95,11	30,95
20A	1,23	Franca	53,11	72,54	31,21
22A	1,30	Franco argilosa	50,51	83,14	32,26
36A	1,48	Franca	43,90	80,39	23,67
38A	1,39	Argila arenosa	48,46	69,84	24,39
41A	1,24	Franco arenosa	51,42	50,91	20,99

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 6: Parâmetros utilizados nas modelagens com os modelos SINMAP e SHALSTAB, com valores de coesão e ângulo de atrito correlacionados com base em Godoy (1983).

Amostra	Consistência	Profundidade (m)	Peso específico (Kg/m^3)	Coesão (kPa)	Ângulo de atrito (º)
4A	Soft	2	1755	0	30
12A	Soft	2	1284	0	28
13A	Soft	1	1400	0	29
20A	Soft	1	1200	0	28
22A	Very soft	1	1274	1000	0
36A	Soft	2	1450	0	29
38A	Very soft	1	1360	1200	0
41A	Soft	2	1216	0	28

Fonte: elaborado pelo autor

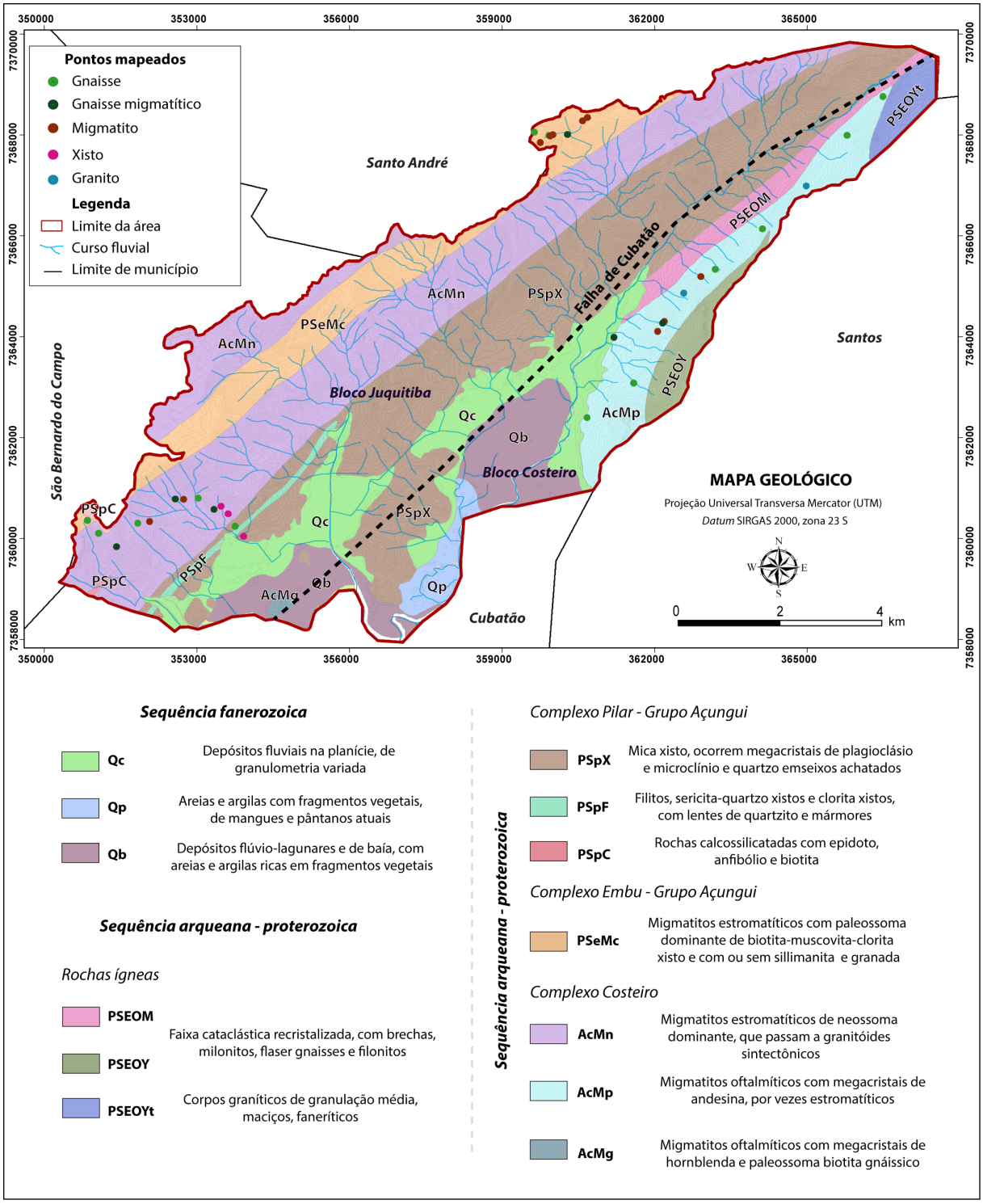
5.1.2 Caracterização geológica e geomorfológica

A província Mantiqueira é dividida em três cinturões orogênicos - Araçuaí, Tijucas e Ribeira - e é no contexto do cinturão Ribeira que a área de estudo está inserida (HASUI, 2012). O cinturão Ribeira é dividido em dois blocos: a norte, Bloco Juquitiba, onde domina o Grupo Açungui (Proterozoico Superior), e a sul, Bloco Costeiro, com rochas do Complexo Costeiro (Arqueano), separados pela zona de falhamento transcorrente de Cubatão (IPT, 1986). O bloco Juquitiba é constituído por filitos, quartzitos, xistos e migmatitos. Já o bloco costeiro é constituído por migmatitos diversos, suítes graníticas, rochas cataclásticas e miloníticas, além de sedimentos cenozoicos da Formação Cananeia, sedimentos marinhos holocênicos, mangues e pântanos atuais, sedimentos continentais de planície aluviais e sopé de encostas (IPT, 1986). O mapa da figura 14 mostra a geologia da área de estudo, baseada no mapeamento feito Instituto Pesquisas Tecnológicas - IPT na escala de 1:25.000 e pelo mapeamento feito para este estudo.

De acordo com Hasui (1973), o bloco Juquitiba é constituído predominantemente por migmatitos estromatíticos de paleossoma xistoso do Grupo Açungui, com frequentes sinais de retrometamorfismo. Ainda neste bloco, Hasui (1973) e Wolle (1988) descrevem migmatitos homogêneos com neossoma dominante, rochas calcossilicatadas, filitos, xistos e quartzitos. Nos trabalhos de campo na porção Nordeste do bloco Juquitiba, próximo ao município de Paranapiacaba, foram observados migmatitos com paleossoma dominante, com estruturas estromatíticas e dobradas (Figuras 15a), gnaisses (mais abundantes, Figuras 15b) e, em alguns pontos, xistos. Foi observado ainda *boudins* de material quartzoso e granítico nos migmatitos de paleossoma dominante (figura 15c), que em algumas porções apresentam estrutura ptigmática. Nos migmatitos ainda é possível observar evidências cinemáticas de movimento dextral através de porfiroblastos de feldspatos, que em alguns pontos se assemelha à textura de milonito (figura 15d). A granulometria das rochas neste bloco é, no geral, média a grossa, com textura granolepidoblástica, de coloração cinza escura (paleossoma) e cinza claro (neossoma, gnaisses e xistos).

Na porção mais a sul do bloco, ao longo da rodovia “Caminhos do Mar”, também são observados migmatitos estromatíticos com paleossoma dominante, gnaisses e xistos (figuras 16a, 16b e 16c). As rochas apresentam textura granolepidoblástica, com granulação fina a média, de coloração cinza escura (migmatitos) e cinza claro (xistos e gnaisses) com material de alteração argiloso e de cor avermelhada (xistos e paleossoma de migmatitos) e acinzentada (gnaisses e neossoma de migmatitos) (figura 16d e 16e).

Figura 12: Mapa geológico da área de estudo, com base no mapeamento de IPT (1986).

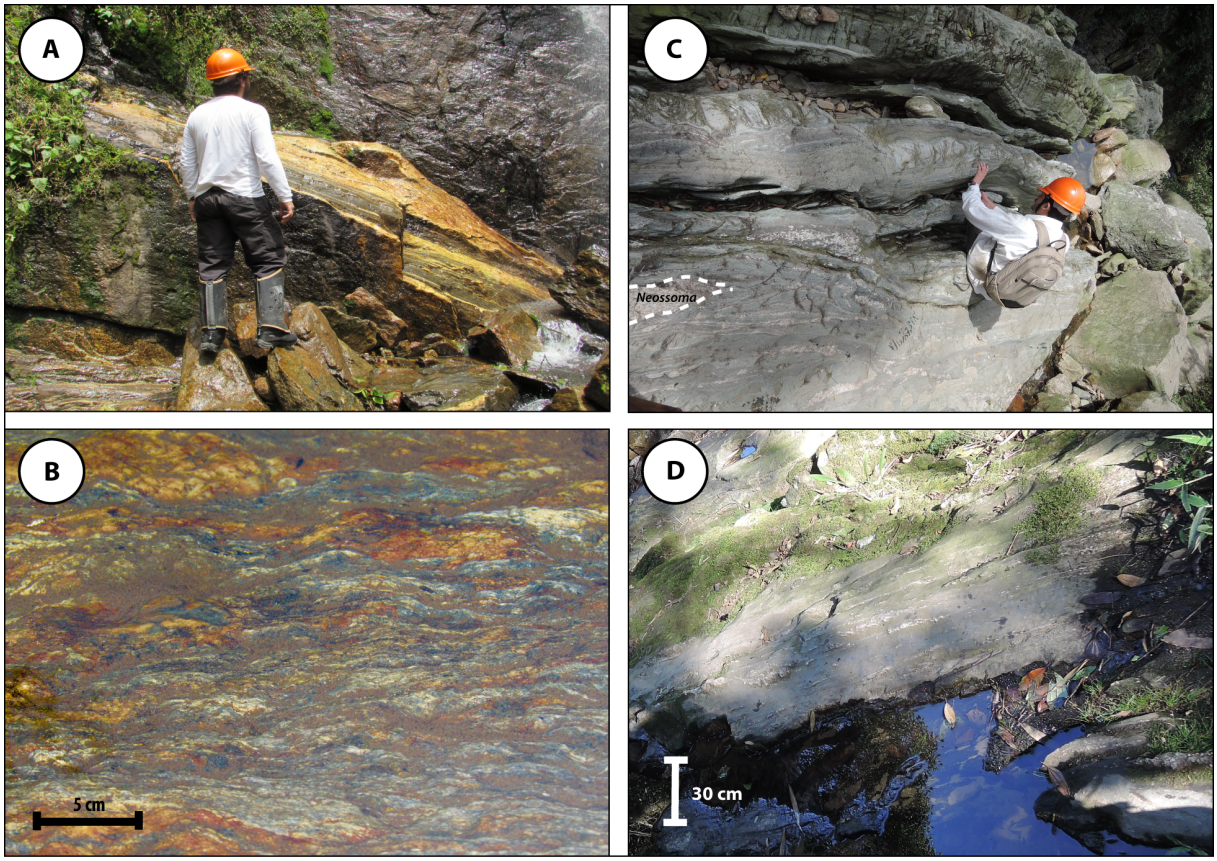


Fonte: elaborado pelo autor

Na porção da área de estudo associada à Falha de Cubatão, que separa o bloco Juquitiba do bloco Costeiro, ocorrem rochas metassedimentares de baixo grau onde se desenvolve o vale do rio Mogi (LOPES, 2006). De acordo com Wolle (1988), tipos de rocha

ali encontradas são xistos e quartzitos, mármores e faixas milonitizadas nas bordas que acompanham a direção NE.

Figura 13: Litologias da parte norte do bloco Juquitiba, próximo a Paranapiacaba, SP. A) Migmatito estromatítico com paleossoma dominante (Ponto 5). B) Detalhe de gnaisse com foliação bem marcada, abundante por toda a área de estudo (Ponto 1). C) Migmatito com paleossoma dominante e presença de boudins de material quartzoso e granítico (Ponto 9). D) Visão geral de gnaisse bandado, com marcantes evidências cinemáticas de movimento dextral, se assemelhando a milonito (Ponto 15).

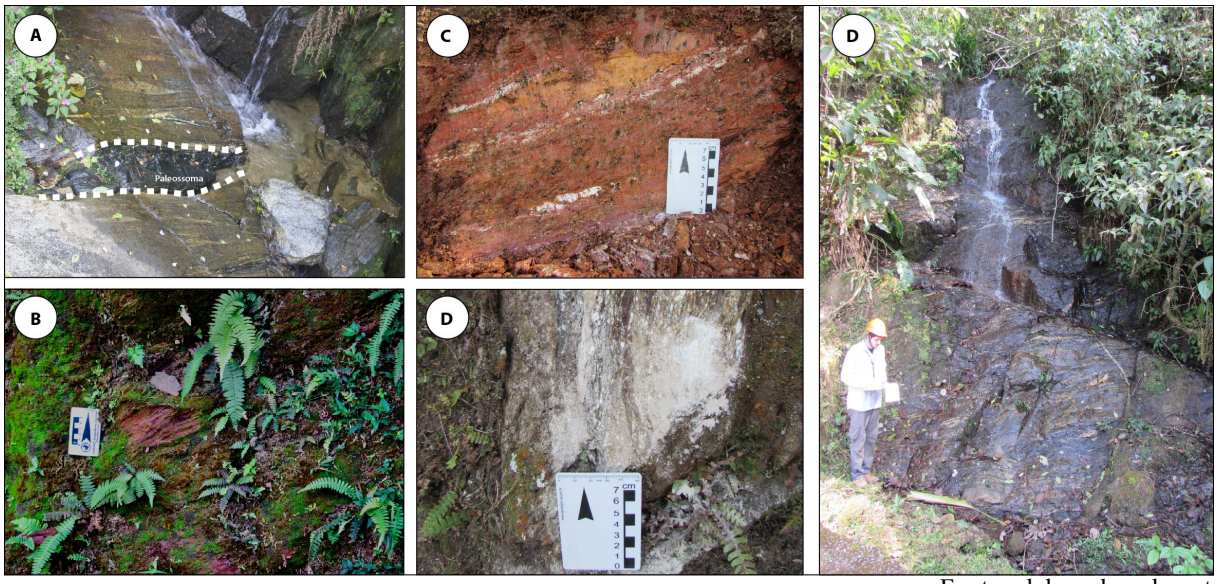


Fonte: elaborado pelo autor

No bloco Costeiro ocorrem migmatitos oftalmíticos e, secundariamente, estromatíticos, podendo ocorrer também cataclasitos e suítes graníticas, como as suítes da Serra do Morrão e Tauapebas, e a transição de uma litologia para outra nesse bloco é de difícil diferenciação (LOPES, 2006; WOLLE, 1988). Nas descrições de campo, foram observadas transições entre gnaisses, migmatitos e, localmente, granitoides com foliação incipiente. Os gnaisses apresentam coloração cinza clara, com diferentes graus de alteração - formando caulim. Os migmatitos (figuras 17a, 17b e 17d) são de coloração cinza escuro, com paleossoma dominante e estrutura estromatítica (oftalmítica, dobrada e ptigmática são observadas em alguns pontos) e os xistos também apresentam coloração cinza escura. As rochas metamórficas deste bloco apresentam granulação média a grossa, com textura

granolepidoblástica e porfiroblástica (gnaisse), com material de alteração, no geral, cinza esbranquiçado e de cor cobre. Os granitoides apresentam textura granolepidoblástica – com leve orientação -, de coloração cinza claro. No bloco costeiro ainda são observadas diversas cicatrizes nas encostas, ao longo da ferrovia abandonada ("funicular"), com o material escorregado constituído por blocos anguloso do embasamento – gnaisse, muscovita xisto (figura 17c), migmatito e granitoides – , material mais fino e restos vegetais.

Figura 14: Litologia da parte mais a sul do Bloco Juquitiba, próximo à área urbana de Cubatão, SP. A) Migmatito com paleossoma dominante com presença de *boudins* de rocha máfica (Ponto 37). B) Xisto avermelhado com grau de alteração avançado (Ponto 34). C) Material argiloso de cor vermelha formado pela alteração do paleossoma dos migmatitos e xistos (Ponto 34). D) Material argiloso cinza claro, formado pela alteração dos gnaisses e neossoma dos migmatitos (Ponto 42). E) Gnaisse migmatíticos, encontrado por toda a região (Ponto 37).

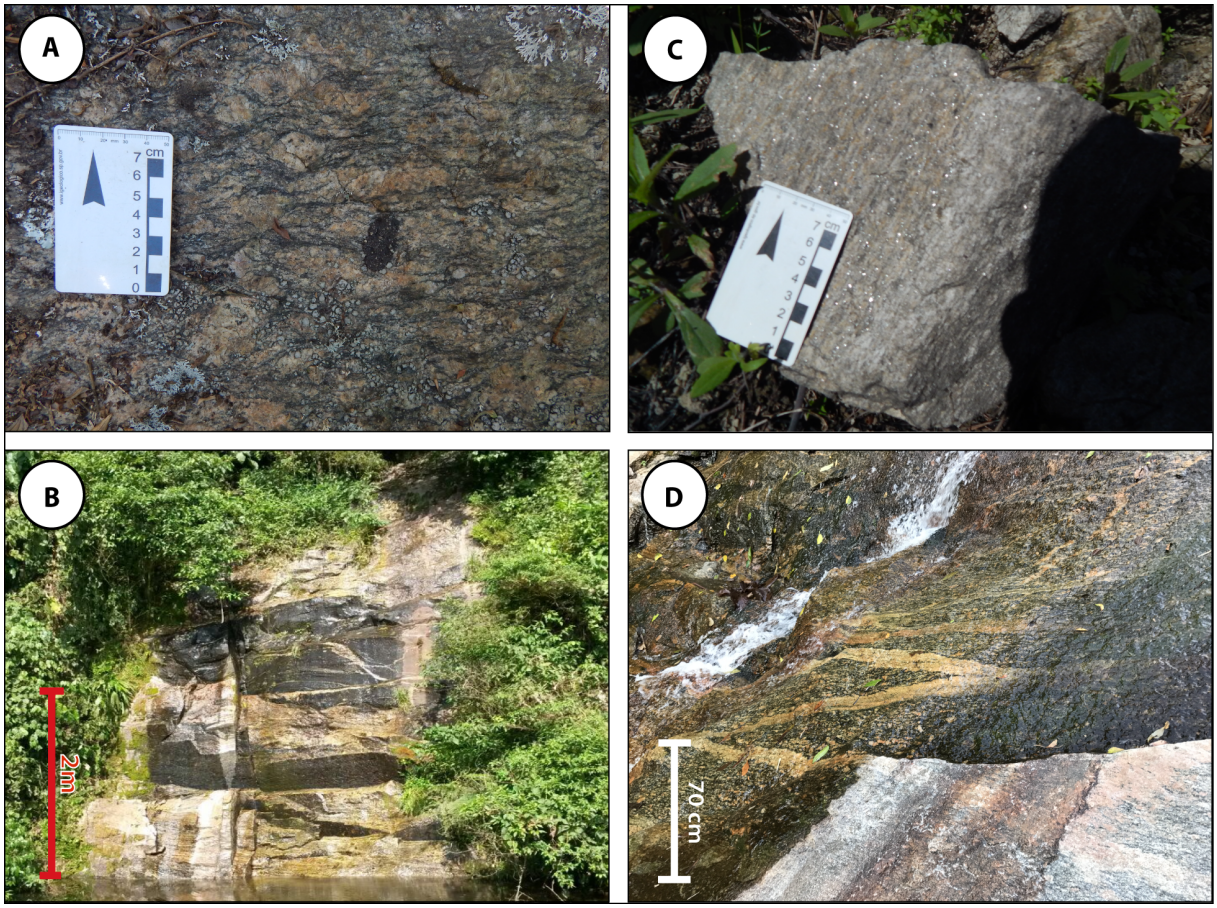


Fonte: elaborado pelo autor

Por toda a região de estudo é possível observar escorregamentos recentes de pequenas extensões, como mostram as figuras 18a e 18b. É possível também observar corpos de tálus e coluviões de extensões variadas acompanhando a linha geral da escarpa serrana, mais abundantes na vertente norte do rio Mogi, bloco Juquitiba. De acordo com Lopes (2006), os corpos maiores de tálus encontram-se nas cotas mais baixas estendendo-se até o vale, enquanto os menores são encontrados em encostas mais elevadas. Nas observações de campo, foi possível observar depósitos de tálus de diversas dimensões, formados por blocos angulosos de composição variada (gnaisses, migmatitos, xistos) do embasamento, centimétricos a métricos, com matriz variada mais fina (areia, silte e argila), formando corpos de geometria convexa na paisagem, contrastando com as encostas predominantemente retilíneas na região, muitas vezes com o embasamento exposto (figuras 18c e 18d). As

proporções de blocos e material mais fino variam amplamente entre diferentes corpos de tálus. Segundo Wolle (1988), tálus são depósitos recentes (Quaternário) e instáveis, abundantemente infiltrados por água e muitas vezes com nível d'água alto e, a oeste da área de estudo, alguns corpos de tálus são monitorados pois estão sob núcleos habitacionais (bairros cota em Cubatão).

Figura 15: Bloco Costeiro. A) Migmatito com porções que apresentam estrutura oftalmítica (Ponto 23). B) Migmatito com estrutura Schlieren (Ponto 25). C) Bloco de Muscovita xisto em material escorregado (Ponto 17). D) Migmatito com estrutura ptigmática (Ponto 30).



Fonte: elaborado pelo autor

Na parte estrutural, as estruturas geológicas que mais se destacam na região são os falhamentos transcorrentes da zona de falha de Cubatão, as foliações e xistosidade das rochas e o sistemas de juntas de fraturamento (WOLLE, 1988). A figura 19 mostra o mapa de estruturas observadas em campo, com base em medições de xistosidade e fraturas. Sadowski (1991) descreve o "Sistema de megafalhas de Cubatão" como extensas zonas de cisalhamento subparalelas com direções N50E a N70E, que se estendem desde o Oceano Atlântico até a borda sul do estado de Minas Gerais, com largura de cerca de 300 km, constituída por três

segmentos de falhas – Lancinha/Itapeúna, Cubatão e Além Paraíba. Na zona de cisalhamento de Cubatão, do tipo transcorrente dextral, ocorrem rochas metassedimentares de baixo grau, que separa as rochas de médio a alto grau do bloco Costeiro e rochas de baixo a médio grau do bloco Juquitiba (HASUI E SADOWSKI, 1976; SADOVSKI, 1991). De acordo com Ribeiro (2003), as estruturas observadas na região indicam um falhamentos do tipo rúptil, com reativações associadas ao soerguimento tardio provocando esforços extensionais com um aprofundamento do vale, observável através do entalhe fluvial dos rios Mogi e Cubatão que apresentam direção concordante à zona de cisalhamento da região (NE).

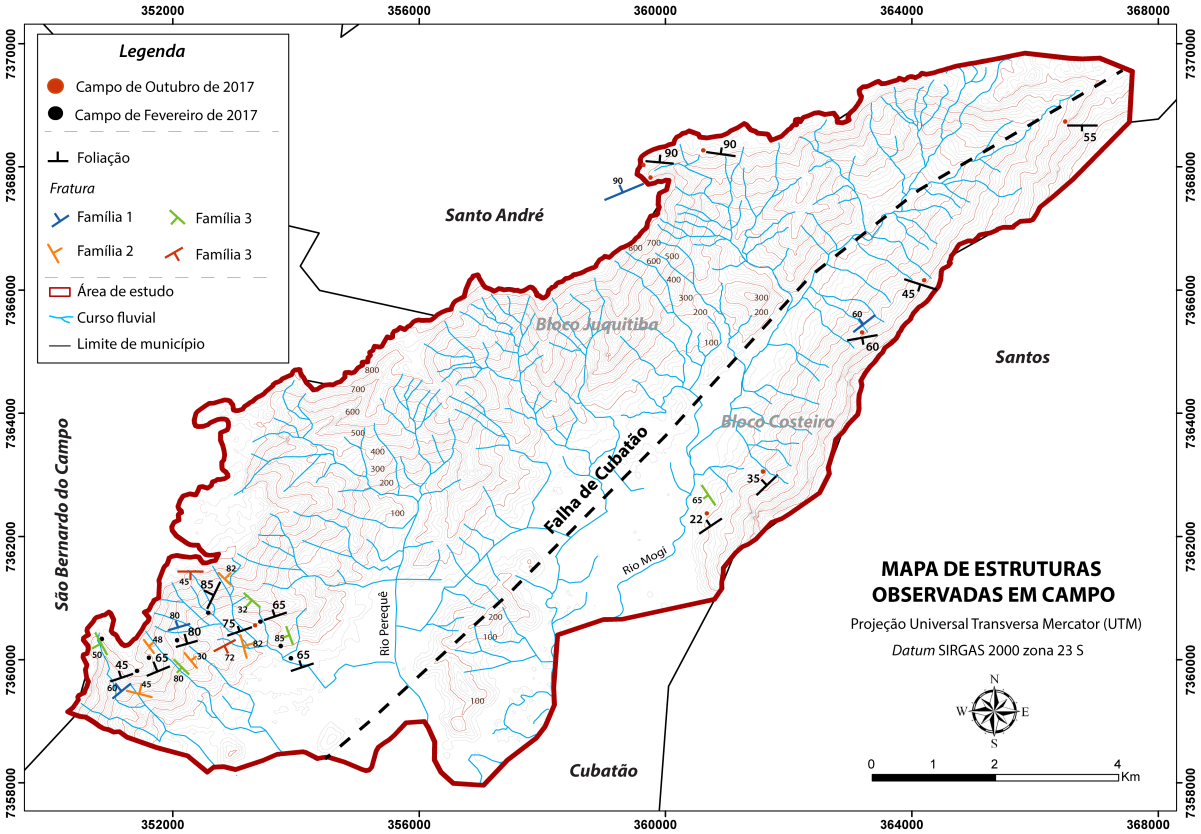
Figura 16: A) Escorregamento recente de pequena proporção na encosta sul do vale do rio Mogi, Bloco Costeiro (Ponto 17). B) Escorregamento de média proporção que expôs o embasamento migmatítico na encosta sul do vale do rio Mogi, Bloco Costeiro (Ponto 28). C) Corpo de tálus com evidências de *creeping* (árvores curvas em direção encosta abaixo) na encosta da rodovia "Caminhos do Mar ,SP148". D) Corpo de tálus entre dois braços de drenagem na encosta norte do vale do rio Mogi, bloco Juquitiba (Ponto 11).

Fonte: elaborado pelo autor

De acordo com as medidas de campo, no bloco Juquitiba as direções da xistosidade das rochas apresentam um *trend* geral NE/SW, seguindo o padrão geral da zona de cisalhamento de Cubatão. No entanto, na porção nordeste do bloco, próximo a Paranapiacaba, a direção geral da foliação/xistosidade das rochas daquela porção é NW/SE como se observa

na figura 19. As falhas no bloco Juquitiba apresentam direção NE/SW e NW/SE, predominantemente subverticais, com predominância da direção NW/SE mais a sul do bloco e NE/SW mais a norte no bloco. No bloco Costeiro, a foliação/xistosidade das rochas da vertente sul do rio Mogi apresentam *trend* NE/SW na porção mais próxima à área urbana de Cubatão, a sul, e *trend* NW/SE mais próximo a Paranapiacaba, norte do bloco, semelhante ao que ocorre no Bloco Juquitiba. As falhas/fraturas do bloco Costeiro apresentam direção NE/SW e NW/SE, estas últimas mais a sul no bloco, semelhante ao que ocorre no bloco Juquitiba.

Figura 17: Mapa de estruturas observadas em campo.

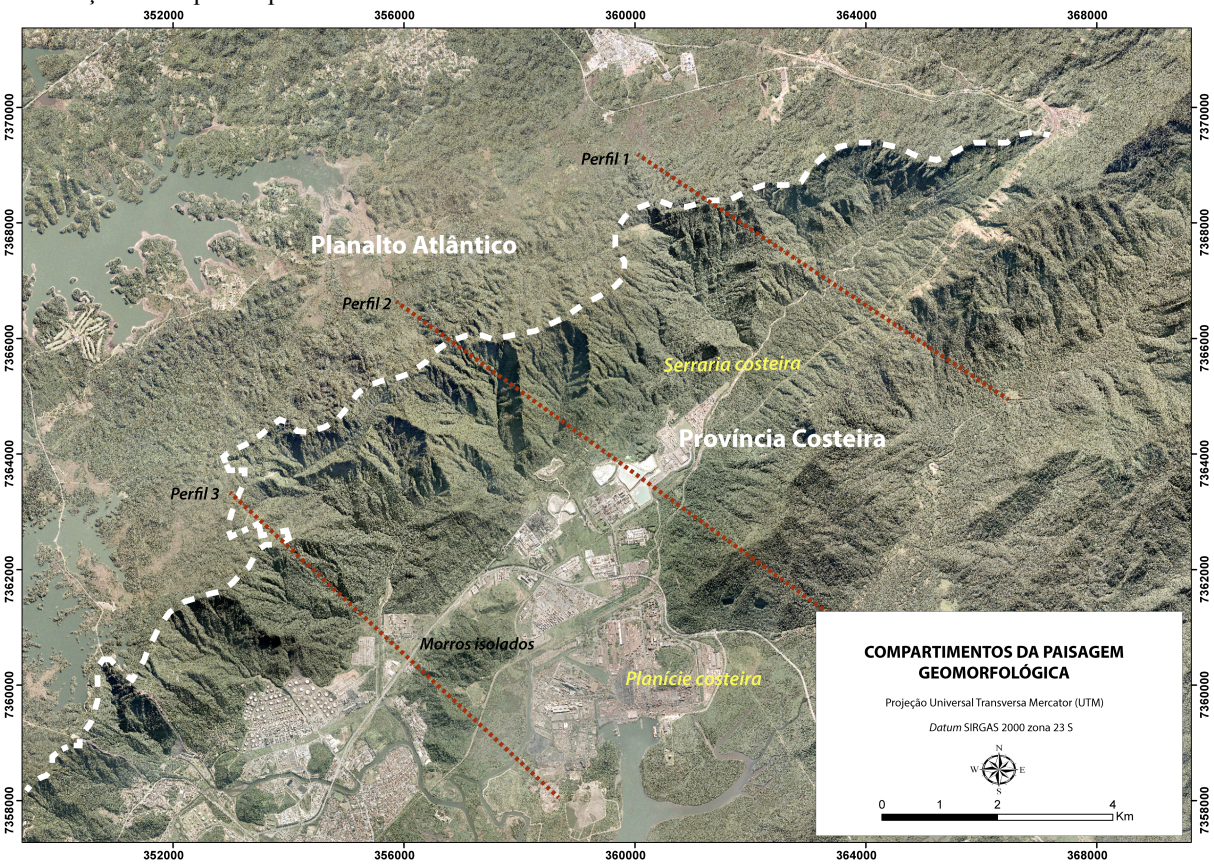


Fonte: elaborado pelo autor

Geomorfologicamente, a área de estudo está compreendida na transição entre duas províncias principais: Planalto Atlântico e Província Costeira (ALMEIDA, 1964). Na área do Planalto Atlântico é encontrado o "Relevo de Morrotes", denominado como Unidade de Morrotes Baixos, descrito como relevo ondulado, onde predominam amplitudes locais menores que 50 m (PAULA *et al*., 2008). Na Província Costeira distinguem-se dois sistemas de relevo nas escarpas da Serra do Mar, de "Escarpas Festonadas", que constitui a Serra do Mar propriamente dita, e "Escarpas com Espigões interdigitados", localmente interdigitados

ao planalto e que foram separados devido ao entalhe fluvial (PONÇANO *et al*., 1981; PAULA *et al*., 2008). Diante da cidade de Santos e Cubatão, a Serra do Mar apresenta a forma "pinça de caranguejo", resultante de intenso e longo processo de erosão que alterou rochas menos resistentes com maior intensidade (PAULA *et al*., 2008). A figura 20 mostra a divisão geomorfológica da área de estudo.

Figura 18: Mapa mostrando os compartimentos da paisagem geomorfológica da área de estudo, bem como a localização dos 3 perfis que cortam a área de estudo.

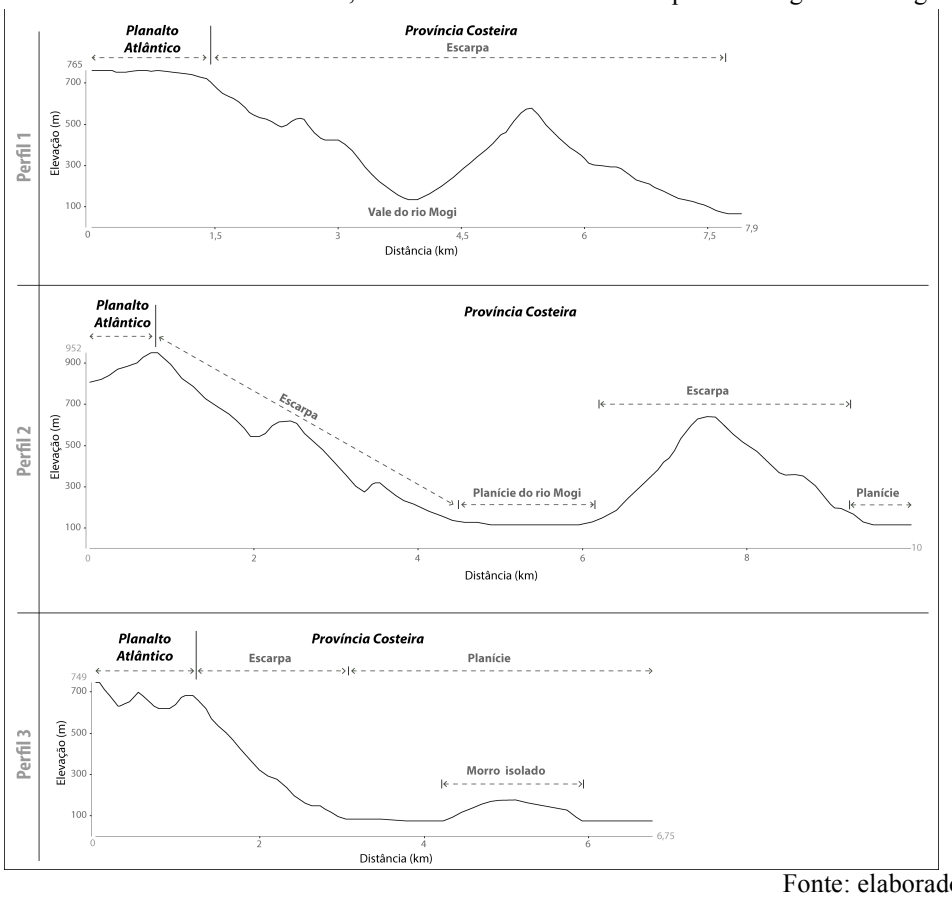


Fonte: elaborado pelo autor

Na área de estudo, a província do Planalto Atlântico representa apenas pequena porção da borda nordeste. A maior parte da área de interesse está inserida no contexto da Província Costeira, subdividida em duas zonas – Serraria Costeira e Planície Costeira. A Serraria Costeira na vertente norte do rio Mogi e Cubatão apresenta borda bem marcada com cotas em torno de 750 m, apresentando reentrâncias na cabeceira do rio Perequê na área de estudo. As vertentes são muito inclinadas, entre 35º a 50º em média, resultando num gradiente hidráulico elevado. O vale do rio Mogi, de acordo com Ponçano *et al*. (1981), foi desenvolvido a partir da erosão de rochas menos resistentes da zona de falhamentos de Cubatão, formando as vertentes norte e sul composta por migmatitos, gnaisses e xistos, que são mais resistentes à erosão. As áreas da planície costeira são planas devido à ação das marés, ocorrendo também

sedimentos alúvio-coluvionares nas porções mais baixas do rio Mogi, formados por seixos e matacões centimétricos a poucos metros, com matriz arenosa grosseira. A Figura 21 mostra 3 perfis do relevo da área de estudo, mostrando o limite entre as duas províncias geomorfológica, cuja localização é observada na figura 20.

Figura 19: Perfis do relevo da área de estudo, mostrando a divisão entre as províncias geomorfológicas.

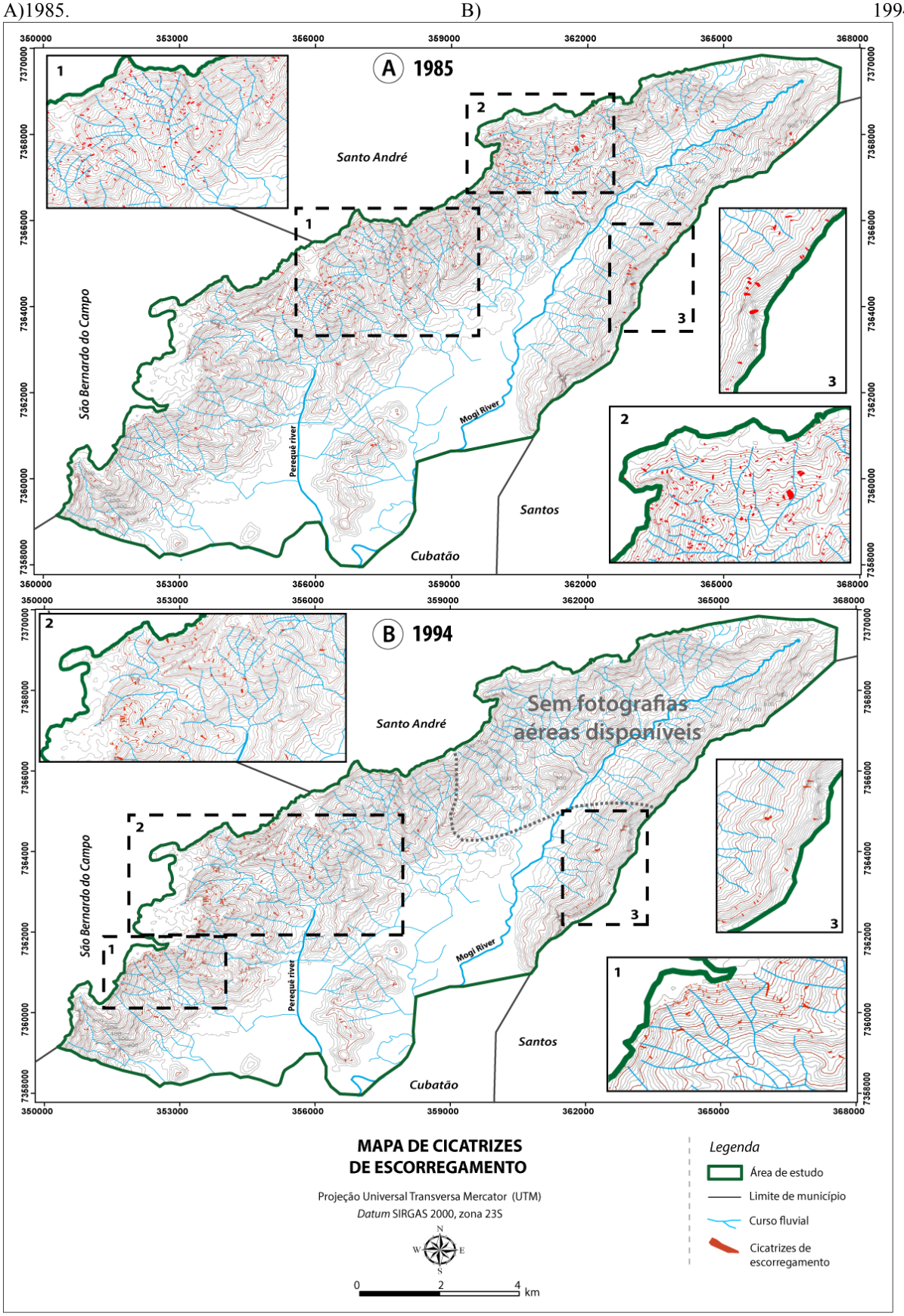


Fonte: elaborado pelo autor

5.1.3 Mapeamento de cicatrizes de escorregamentos

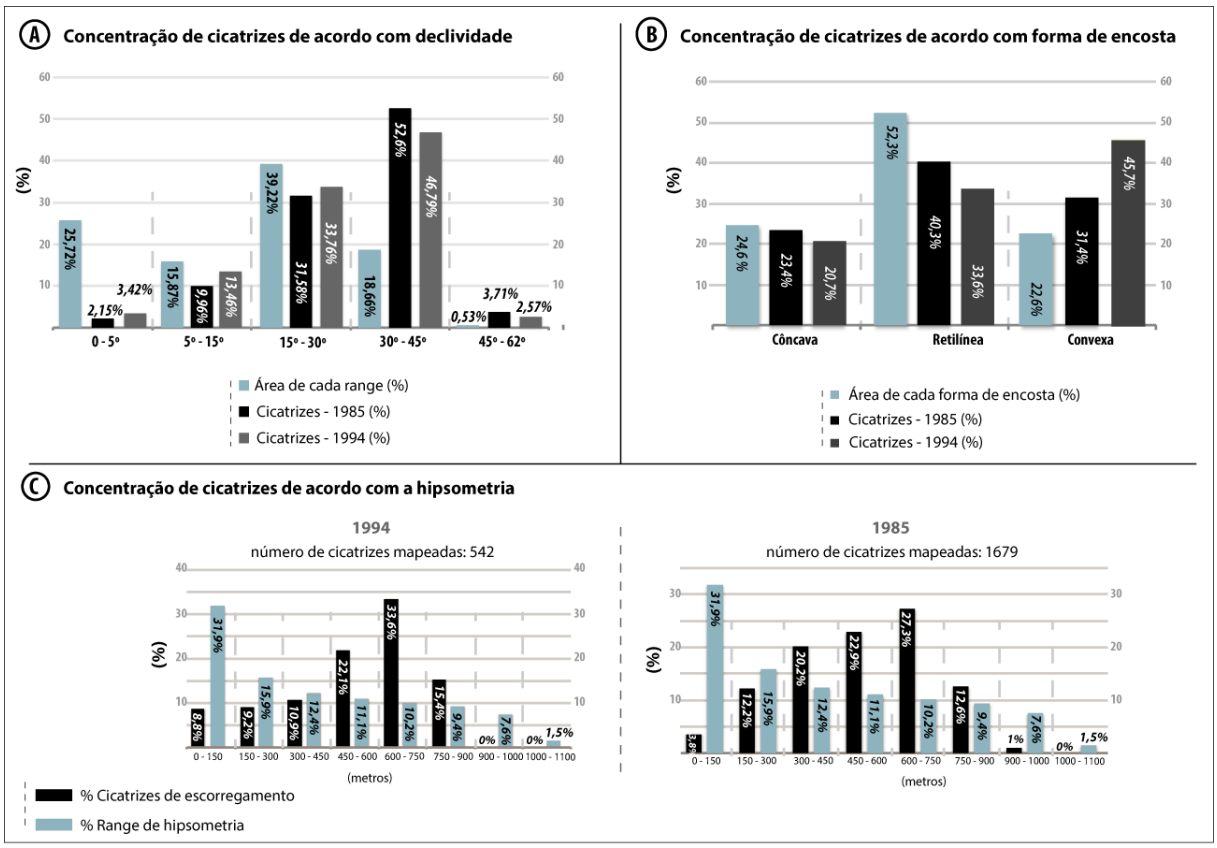
A figura 22 mostra o mapeamento de cicatrizes dos anos 1985 (a) e 1994 (b) na área de estudo em que, respectivamente, 1679 e 542 cicatrizes foram mapeadas. As cicatrizes estão concentradas em encosta convexas, com declividade acima de 30º e em cotas de 600 a 750 m (Figura 23). As cicatrizes mapeadas do evento de 1985 apresentam em média 338,49 m^2, enquanto que as de 1994 apresentam 538,16 m^2. Fotografias aéreas para o ano de 1994 na porção nordeste da área de estudo não estão disponíveis, logo não há cicatrizes mapeadas naquela porção.

Figura 20: Mapeamento de cicatrizes de episódios de escorregamentos que aconteceram na área de estudo. A)1985. B) 1994.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 21: Concentração das cicatrizes mapeadas de acordo com declividade (a), forma de encosta (b) e hipsometria (c).



Fonte: elaborado pelo autor

Similarmente ao que acontece com escorregamentos recentes, as cicatrizes de escorregamento dos episódios de 1985 e 1994 estão concentrados na vertente norte do rio Mogi, onde rochas metamórficas de alto grau, com foliação bem marcada, do bloco Juquitiba afloram. De acordo com Augusto Filho *et al.* (1988) e Gramani (2001), escorregamentos que ocorrem na Serra do Mar estão relacionado a solos poucos espessos em encostas retilíneas – forma de encosta dominante –, de alta declividade, cujo embasamento é constituído por migmatitos e gnaisses. No entanto, como é observado na área de estudo, a maior concentração de cicatrizes se dá em encostas convexas, de alta declividade (a formação de solo, no entanto, é necessária para que ocorra escorregamentos), principalmente ao se analisar o episódio de 1994. Na altimetria em que as cicatrizes estão concentradas (600 a 750 m), são encontrados, de maneira geral, migmatitos estromatíticos e gnaisses do bloco Juquitiba, como mostra o mapa geológico da figura 14.

5.1.4 Pluviometria da região de estudo

O alto índice pluviométrico da área de estudo, principal agente desencadeador de escorregamentos, está relacionado à ação da Serra do Mar como barreira orogenética que

concentra nuvens de chuva, bloqueando as massas de ar provenientes do oceano Atlântico, o que agrava e torna mais comum a ocorrência de chuvas torrenciais (GRAMANI, 2001). Com base nos dados dos pluviômetros que abrangem a área de interesse, a média de chuvas para meses de verão – estação mais úmida e com maior histórico de eventos de escorregamentos - é de 344,18 mm (Tabela 9). Esses dados representam a média de Dezembro a Março de 1936 até 2000 e a figura 24 mostra a distribuição da média da chuva de verão na região.

Tabela 7: Índices de chuvas médias para cada pluviômetro, de Dezembro a Março (verão), com a localização de cada um dos sete pluviômetros que abrangem a área de estudo. Coordenadas UTM

Pluviômetro	**Coordenadas**		**Média (mm)**
	X	**Y**	
E3-149	362434,96	7370953,09	323,13
E3-104	364734,18	7367283,39	357,89
E3-038	358026,44	7358605,63	325,62
E3-101	355769,76	7357967,96	317,16
E3-144	352375,63	7357933,58	302,10
E3-143	347850,06	7357886,49	381,93
E3-109	346113,55	7361559,73	401,42

Fonte: banco de dados pluviométricos do DAEE - SP

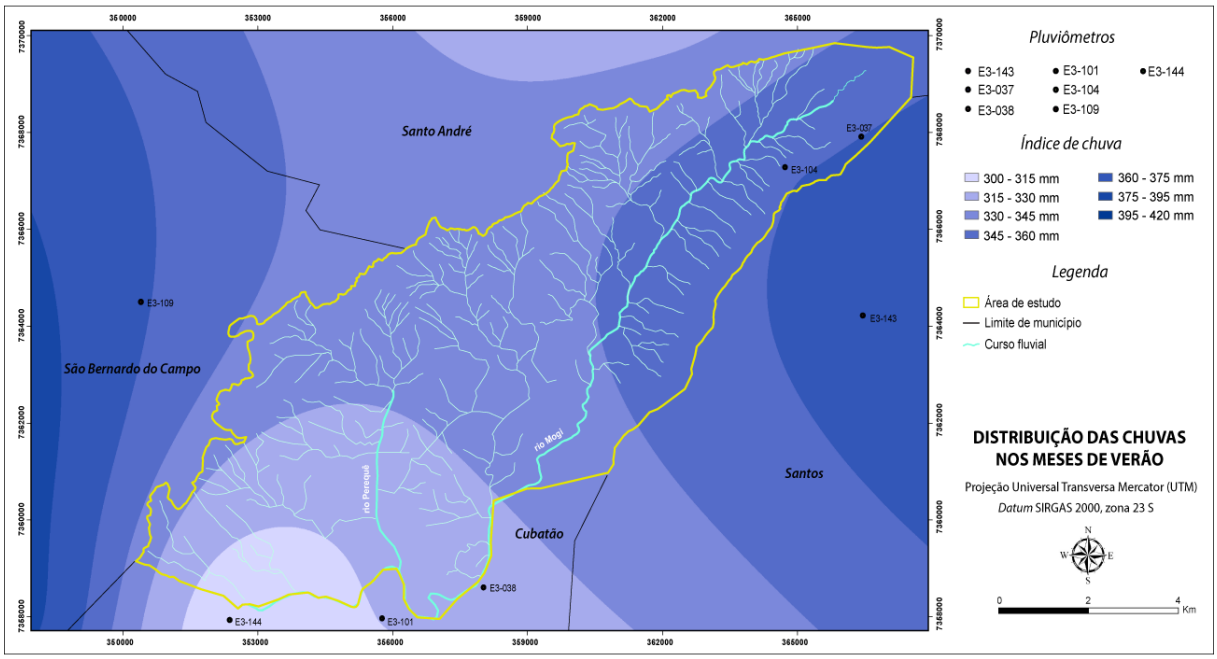
Na análise da influência do acumulado de chuvas no desencadeamento dos escorregamentos de 23 e 24 de Janeiro de 1985 e 06 e 07 de fevereiro de 1994, foi feita observação diária das chuvas dos anos de 1984 e 1985, e 1993 e 1994. Os dados de chuvas apresentados nos histogramas representam o acumulado entre as 7 horas da manhã do dia anterior ate às 7h da manhã do dia considerado. A figura 25 mostra o histograma de chuva diária de 1984, cuja média mensal para os meses de Dezembro (1983) a Março (1984) foi de 238,13 mm, índice abaixo da média geral para o verão da região. Em 1985 a média para o verão foi bem acima da média esperada, com 420,45 mm (Figura 26).

Esse padrão também foi observado em 1993 e 1994, com 1993 apresentando um verão relativamente mais seco quando comparado ao verão 1994, este especialmente úmido. Em 1993, a média foi de 281,43 mm (Figura 27) e em 1994 a média para o verão foi de 553,04 mm, onde se destacam os dias 6 e 7 de fevereiro com 78,8 mm e 258,2 mm, respectivamente (Figura 28).

O acumulado de chuvas da semana antecedente aos episódios de escorregamentos evidencia o impacto que chuvas prolongadas culminadas por eventos de tempestade ou

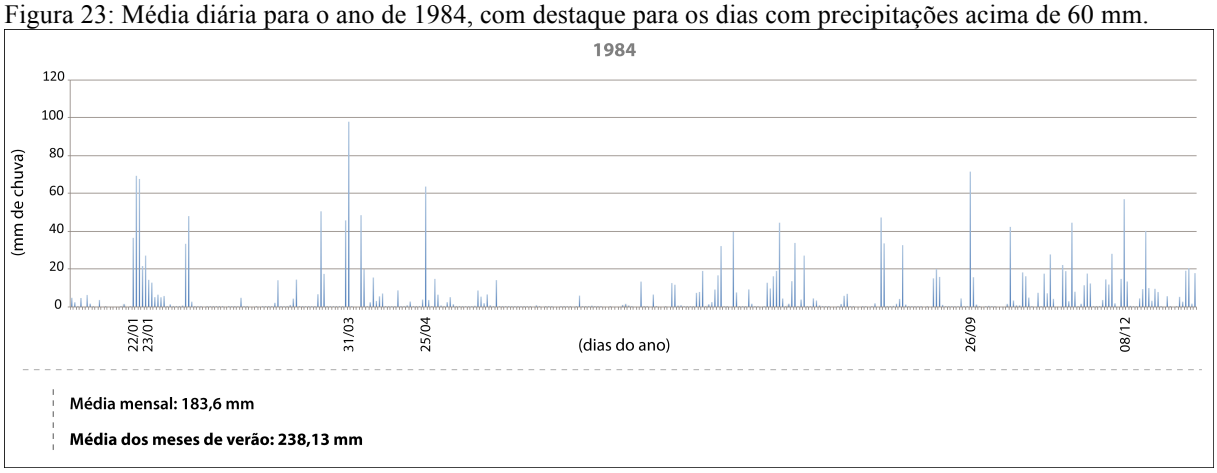
chuvas intensas têm sobre a estabilidade das encostas. De 14 a 24 de janeiro de 1985, choveu o equivalente a 387.82 mm, 40 mm a mais do que o esperado para o mês todo. Em 1994, de 1 a 7 de fevereiro, o acumulado de chuvas foi de 379,92 mm, sendo que somente nos dias 5 e 6 de fevereiro choveu o equivalente à 337 mm . Santos (2004) afirma que a maior probabilidade de ocorrência de escorregamentos ocorre quando há um histórico de chuvas contínuas de 3 ou 4 dias, culminado por episódio de chuva torrencial ou de grande intensidade – como aconteceu nos eventos aqui considerados -, pois nessas situações os solos superficiais atingem níveis críticos de saturação e percolação interna com decorrente enfraquecimento de suas propriedades geotécnicas.

Figura 22: Distribuição das chuvas nas bacias hidrográficas dos rios Mogi e Perequê. Média dos anos de 1936 a 2000 para os meses de Dezembro a Março (meses mais chuvosos - verão), com dados obtidos através do banco de dados pluviométricos do Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE) do Estado de São Paulo.



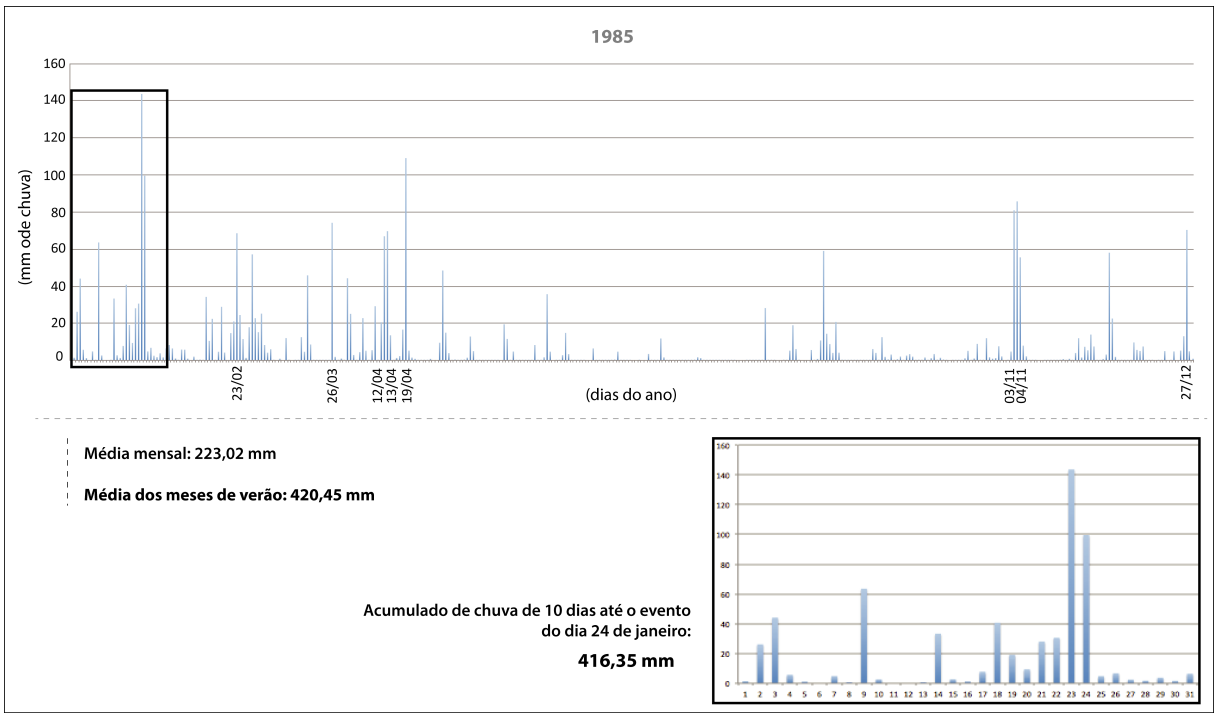
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 23: Média diária para o ano de 1984, com destaque para os dias com precipitações acima de 60 mm.



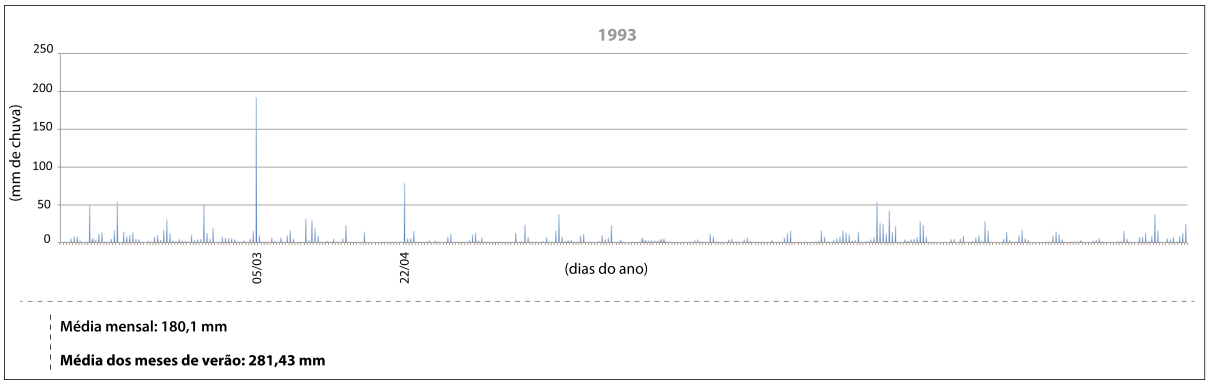
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 24: Média diária para o ano de 1985, com destaque para o mês de Janeiro, em que ocorreram milhares de escorregamentos rasos por toda a região.



Fonte: elaborado pelo autor

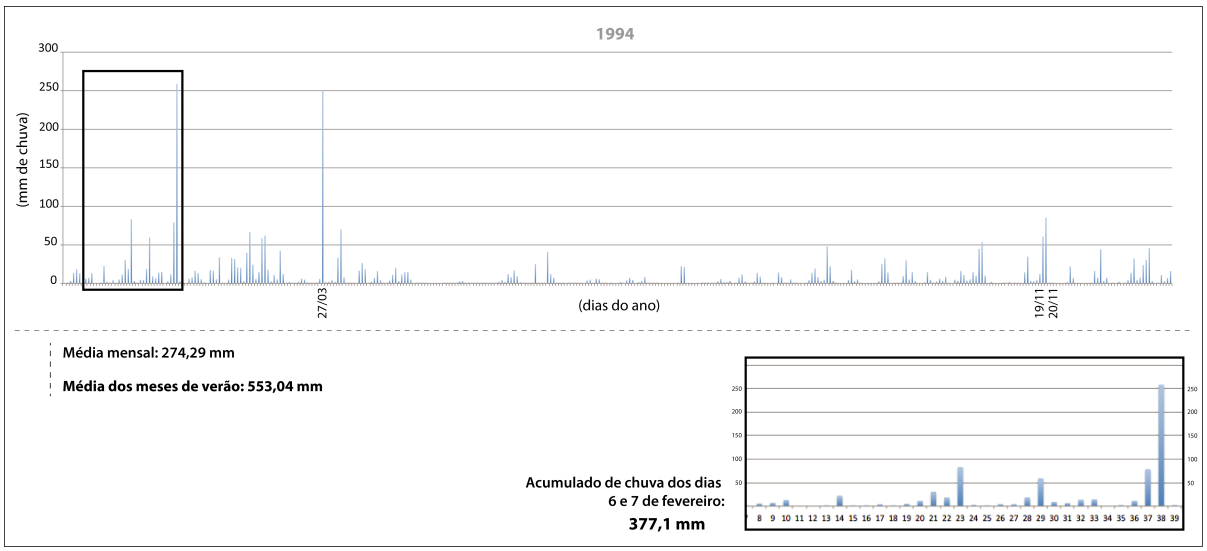
Figura 25: Média diária para o ano de 1993, com destaque para os dias com chuvas acima de 60mm.



Fonte: elaborado pelo autor

De acordo com Kanji *et al*. (2008), o evento de 1994, que gerou corrida de detritos na bacia do rio das Pedras, ocorreu aproximadamente às 21:00 do dia 6 de fevereiro, com chuva de pico de intensidade de 60mm/h, com total de 140 mm em 3 horas. Durante a manhã do dia 7, chuva com pico de 70 mm/h foi registrada na região (MASSAD *et al*., 2000). No evento de 1985, o pico máximo de chuva ocorreu no dia 24, com 80mm/h, e chuva acumulada em 24 horas de 265 mm (MASSAD, *et al.*, 2000). A tabela 10 mostra os principais eventos de corridas de detritos na região – desencadeados a partir de escorregamentos -, com base em Massad et al. (2000).

Figura 26: Média diária para o ano de 1994, com destaque para o mês de janeiro e fevereiro, em que ocorreram centenas de escorregamentos.



Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 8: Principais eventos de corridas de detritos, desencadeados por escorregamentos na encostas dessas bacias, com base em Massad *et al*. (2000), retirado de Kanji *et al*. (2008).

Local	Data	Chuva máxima (1h)	Chuva máxima (24h)
Bacia Copebrás	28 de Jan de 1976	39 mm	276 mm
Refinaria Presidente Bernardes (RPBC) e Bacia do Perequê	22 - 24 de Jan de 1985	84 mm	265 mm
Bacia do rio das Pedras - Eletropaulo	20 - 22 de Jan de 1988	25 mm	135 mm
RPBC	9 de Mar de 1996 6 de Fev de 1994	18 mm 60 mm	– 214 mm

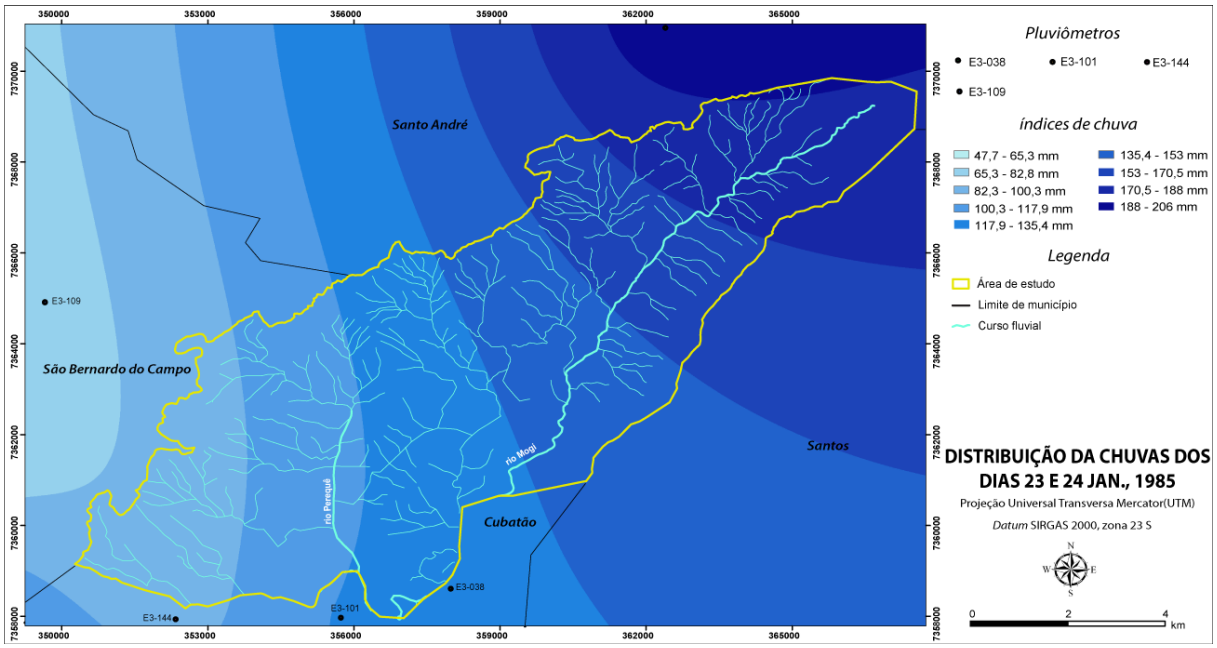
Fonte: Massad et al. (2000)

A distribuição da chuva nos eventos de 1994 e 1985 nos ajuda a observar o comportamento da pluviometria na região, como mostram as figuras 29 e 30. A figura 30 exibe a distribuição pluviométrica dos dias 6 e 7 de fevereiro de 1994, com base em 4 pluviômetros, indicando concentração de índices mais altos de chuva na porção sudoeste da área de estudo – onde, não por coincidência, há maior densidade de cicatrizes de escorregamento. A distribuição da chuva nos dias 23 e 24 de janeiro de 1985 (figura 29) indica que a chuva se concentrou com maior intensidade na porção central e nordeste da área de estudo, onde a densidade de cicatrizes de escorregamento na área de estudo também é maior – especialmente na vertente norte do rio Mogi.

O acompanhamento e análise do comportamento da pluviometria na região é de extrema importância na definição de áreas prioritárias pois, como já dito, chuva é um dos principais fatores desencadeadores de escorregamentos. A vertente norte do rio Mogi,

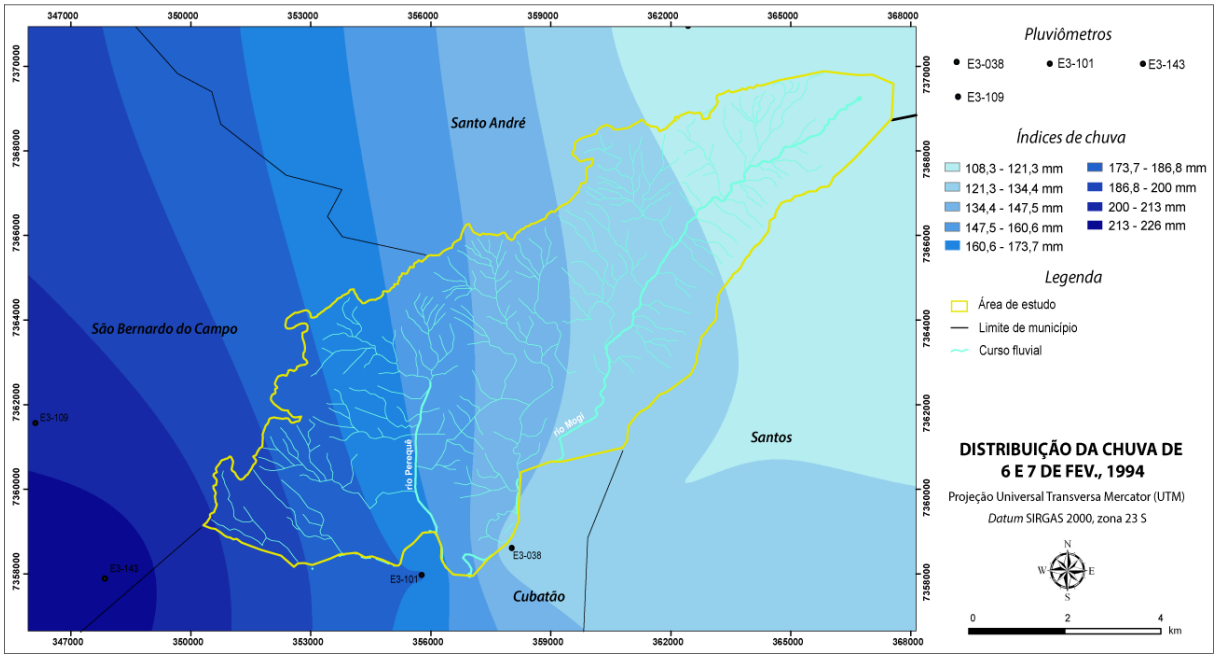
portanto, devido à maior densidade de cicatrizes de escorregamentos, de acordo com o mapeamento histórico da região, e devido à altas taxas de chuvas, emerge como a região dentro da área de estudo com maior potencialidade ao desencadeamento de escorregamentos.

Figura 27: Distribuição da chuva dos dias 23 e 24 de janeiro de 1985.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 28: Distribuição da chuva dos dias 6 e 7 de fevereiro de 1994.

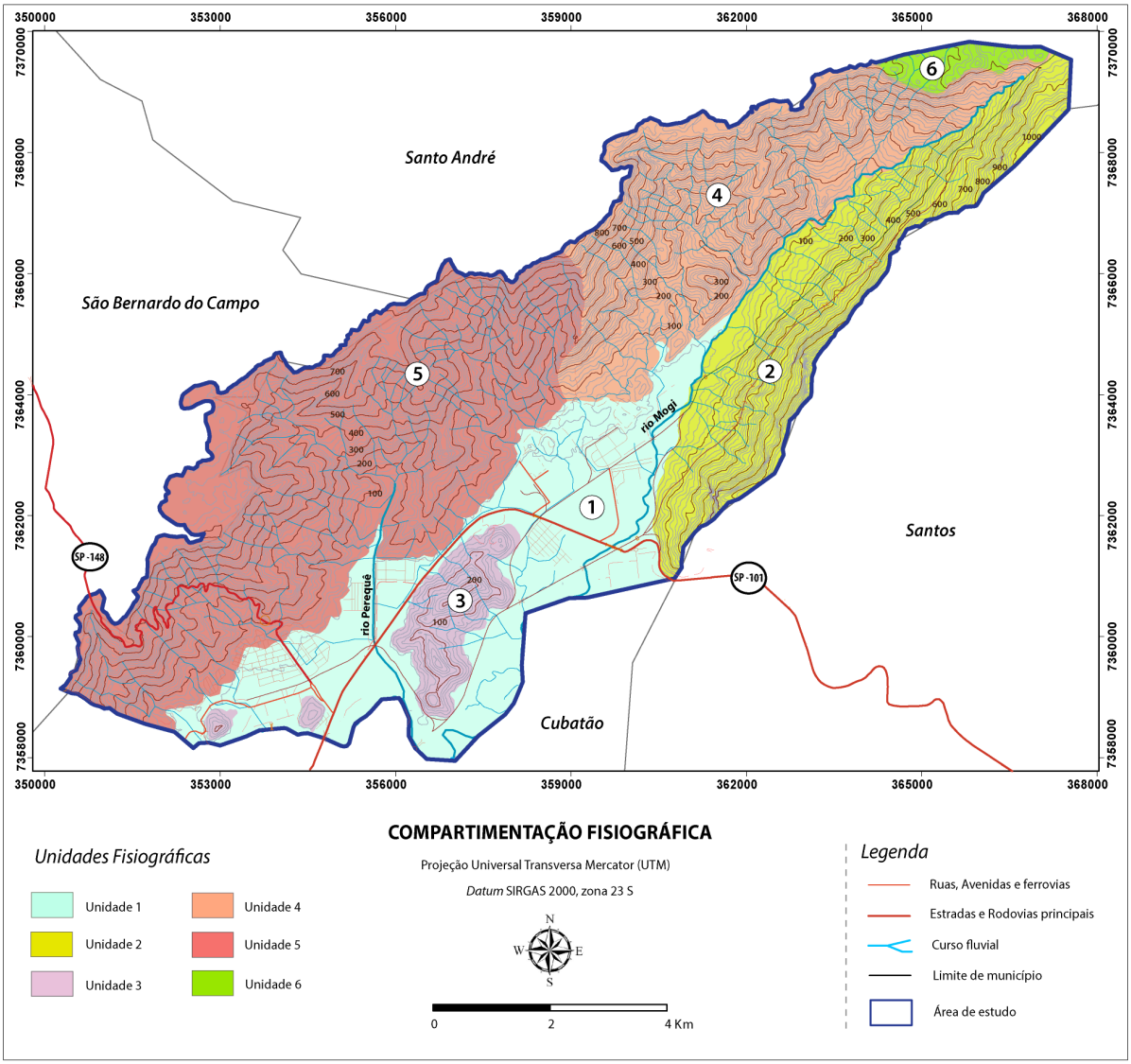


Fonte: elaborado pelo autor

5.1.5 Compartimentação fisiográfica na escala de 1:50.000

Neste estudo, a compartimentação fisiográfica mostra-se fundamental na escolha de áreas prioritárias dentro da área de estudo que serão detalhadas na etapa seguinte, com o uso dos modelos de bases físicas. Baseado na caracterização geológica-geomorfológica, análise das cicatrizes de escorregamentos e da distribuição de chuvas na região, seis unidades fisiográficas foram compartimentadas. A figura 31 e tabela 11 mostram, respectivamente, a carta de compartimentação e a descrição de cada unidade de acordo com o quadro proposto por Zaine (2011). O mapa de forma de encosta (figura 33) também auxiliou na compartimentação da área de estudo.

Figura 29: Compartimentação fisiográfica da área de estudo, baseada nos métodos de fotoanálise e fotointerpretação, na caracterização geológica-geomorfológica da área de estudo e na análise do mapeamento de cicatrizes e distribuição pluviométrica.



Fonte: elaborado pelo autor

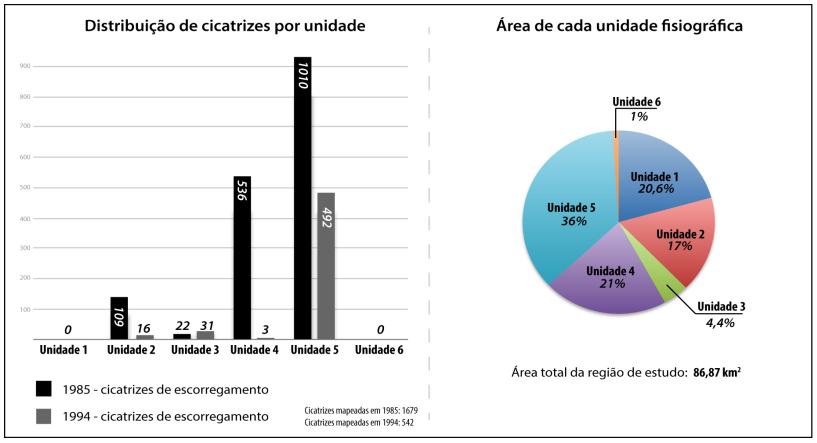
Tabela 9: Caracterização das unidades fisiográfica de acordo com as características geológicas e geomorfológicas do terreno, de acordo com Zaine (2011).

UNIDADES	*Geologia*	*Províncias Geomorfológicas*	FOTOANÁLISE				FOTOINTERPRETAÇÃO	
			Densidade de drenagem	*Elementos de relevo*	*Amplitude*	*Declividade*	*Suscetibilidade a escorregamentos*	*Análise de risco*
1	Depósitos aluvionares e coberturas detríticas indiferenciadas	Costeira, zona da Planície costeira	**Alta**	**Baixa**	——	——	**Baixa**	**Baixo**
2	Granitos e Gnaisses Migmatiticos	Costeira, zona da Serraria costeira	**Média**	**Alta**	**Grande**	**Alta**	**Alta**	**Alto**
3	Gnaisses Bandados	Costeira, zona da Planície costeira	**Baixa**	**Baixa**	**Média**	**Média**	**Alta**	**Alto**
4	Ortognaisse, Milonitos e Xistos	Costeira, zona da Serraria costeira	**Alta**	**Alta**	**Grande**	**Alta**	**Alta**	**Baixo**
5	Ortognaisse, Milonitos e Gnaisses	Costeira, zona da Serraria costeira	**Alta**	**Alta**	**Grande**	**Alta**	**Alta**	**Muito alto**
6	Milonitos e Xistos Migmatíticos	Planalto Paulista	**Média**	**Média**	**Pequena**	**Baixa**	**Baixa**	**Baixo**

Fonte: elaborado pelo autor

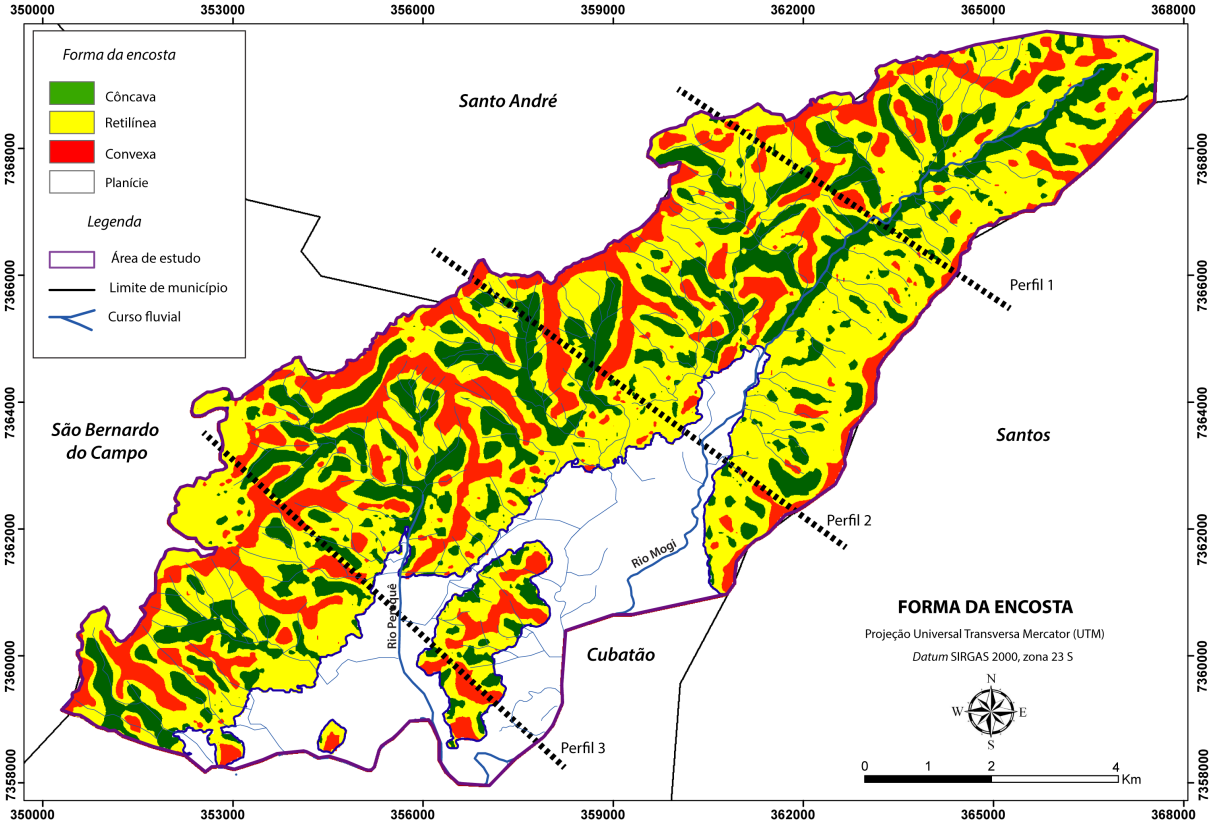
A figura 32 mostra que a unidade 5 apresenta a maior concentração de escorregamentos dentro da região de estudo, embora a unidade 4 também esteja dentro do contexto da vertente norte do rio Mogi. Os processos atuantes na unidade 5 atingem diretamente áreas urbanas e industriais do município de Cubatão, como a refinaria Presidente Bernardes (Petrobrás) e a usina hidroelétrica Henry Borden. Desta forma, além de alta suscetibilidade a escorregamento, a unidade apresenta alto risco socioeconômico a Cubatão. Trabalho na fase de detalhe, portanto, devem estar concentrados em bacias inseridas no contexto da unidade 5.

Figura 30: Concentração de cicatrizes de acordo com unidade fisiográfica (esquerda). Unidade 5 concentra maior número de cicatrizes, perfazendo 36% da área de estudo.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 31: Mapa mostrando as formas de encostas da região. Localização dos perfis da figura 21 também estão indicados.



Fonte: elaborado pelo autor

5.1.5.1 Unidade 1

A unidade 1 apresenta densidade de elementos de drenagem alta e baixa densidade de elementos de relevo, com amplitude pequena e declividade baixa. Não há a presença de encostas e os vales são abertos. Encontra-se inserida na província geomorfológica Costeira e sua geologia é composta por coberturas detríticas indiferenciadas, que são essencialmente sedimentos de composição arenosa a argilosa de origem coluvial e fluvial e depósitos aluvionares, depositados principalmente ao longo das principais drenagens existentes na área de estudo. Praticamente toda a área urbana e industrial de Cubatão está inserida nessa unidade, devido à baixa declividade do relevo. Seu potencial para o desenvolvimento de escorregamentos é muito baixo, logo o risco à infraestrutura e população do município também é baixo. A figura 34 mostra visão geral da região englobando a unidade 1.

5.1.5.2 Unidade 2

Unidade inserida na província geomorfológica Costeira, zona da Serraria Costeira, com densidade média de elementos de drenagem, em padrão retilíneo com forte controle estrutural aparente, e densidade média/alta de elementos de relevo. Apresenta uma amplitude

grande e alta declividade, com encostas predominantemente retilíneas, vales fechados e topos angulosos. Cortando a unidade encontra-se a ferrovia controlada pela MRS logística e a antiga, já desativada, ferrovia funicular. A geologia é composta por rochas ígneas (granitos, granodioritos) de idade paleozoica e rochas metamórficas (gnaisses migmatíticos, migmatitos) neoproterozoicas. O potencial de desencadeamento de escorregamentos e movimentos de massa é alto, devido à sua alta declividade e encostas majoritariamente retilíneas. O risco às comunidades urbanas de Cubatão, porém, é baixo devido ao seu relativo isolamento da área central do município. No entanto, o alto potencial para escorregamentos põe em risco a ferrovia que corta a unidade. A figura 34b mostra a porção sul desta unidade, através de visão geral a partir da unidade 4, e a Figura 35a mostra o limite entre a unidade 2 e a unidade 4.

5.1.5.3 Unidade 3 –Gnaisses bandados

Unidade com baixa densidade de elementos de drenagem, em padrão dendrítico, e baixa densidade de elementos de relevo. Apresenta amplitude média e declividade média baixa, com encostas convexas e retilíneas, de vales fechados e topos arredondados. Encontra-se dentro da província geomorfológica Costeira, zona da Planície Costeira, e sua geologia é composta por gnaisses e migmatitos de idade proterozoica/neoproterozoica. A unidade está inserida dentro da área urbana de Cubatão e algumas porções de ocupação urbana e industrial ocorrem dentro da unidade. Desta forma, apresenta risco alto à comunidade e infraestrutura do município, bem como potencial alto para o desenvolvimento de escorregamentos. A figura 34a mostra uma porção desta unidade, através de visão geral a partir da unidade 5.

5.1.5.4 Unidade 4 – Ortognaisse, Rochas miloníticas e xistos

Unidade com alta densidade de elementos drenagem, em padrão dendrítico, média densidade de elementos de relevo, amplitude grande e alta declividade. Apresenta encostas retilíneas, que predominam, e convexas, com vales fechados e topos angulosos. Assim como a Unidade 2, encontra-se dentro da subzona da Serraria Costeira da Província Costeira. A geologia é diversa, composta por ortognaisses, rochas miloníticas e xistos migmatíticos do Proterozoico/Neoproterozoico. Apresenta potencial alto para o desencadeamento de escorregamentos e baixo risco à comunidade urbana e industrial do município de Cubatão.

Figura 32: A) Visão geral da região, a partir da unidade 5, mostrando as unidades 3 e 1. B) Visão geral da região, a partir da unidade 4, mostrando as unidade 2 e 1.

Fonte: elaborado pelo autor

5.1.5.5 Unidade 5 – Ortognaisse, Milonitos e Gnaisses bandados

Assim como a unidade 4, esta unidade exibe alta densidade de drenagem, em padrão dendrítico, amplitude grande e alta declividade. Apresenta alta densidade de elementos de relevo, com encostas predominantemente retilíneas, vales fechados e topos angulosos. A geologia é heterogênea, composta por ortognaisses, rochas miloníticas e gnaisses e migmatitos de idade proterozoica/neoproterozoica. O potencial para o desenvolvimento de escorregamentos é muito alto, devido à sua alta declividade, encostas retilíneas e pela alta incidência histórica de escorregamentos e corridas de detritos. A estrada estadual “Caminhos

do Mar" (SP 148), a usina hidrelétrica Henry Borden e os gasodutos da Petrobrás estão inseridos nessa unidade e, desse modo, apresenta risco muito alto a esses empreendimentos e também à área urbana do município.

Figura 33: A) Visão geral da área de estudo, mostrando as Unidades 2, 4 e 1. B) Visão geral da área de estudo, mostrando porções da unidade 1, 2 e 5.

Fonte: elaborado pelo autor

A Figura 35b mostra parte desta unidade, em visão geral fotografada a partir da unidade 2. Embora parecida geomorfologicamente e geologicamente com a unidade 4, a

unidade 5 apresenta, além de risco socioeconômico maior, anfiteatros bem marcados pelo entalhe fluvial e erosão nas sub-bacias hidrográficas, bem reconhecíveis nos mapas de suscetibilidade, garantindo uma densidade de elementos de relevo maior e mais complexo.

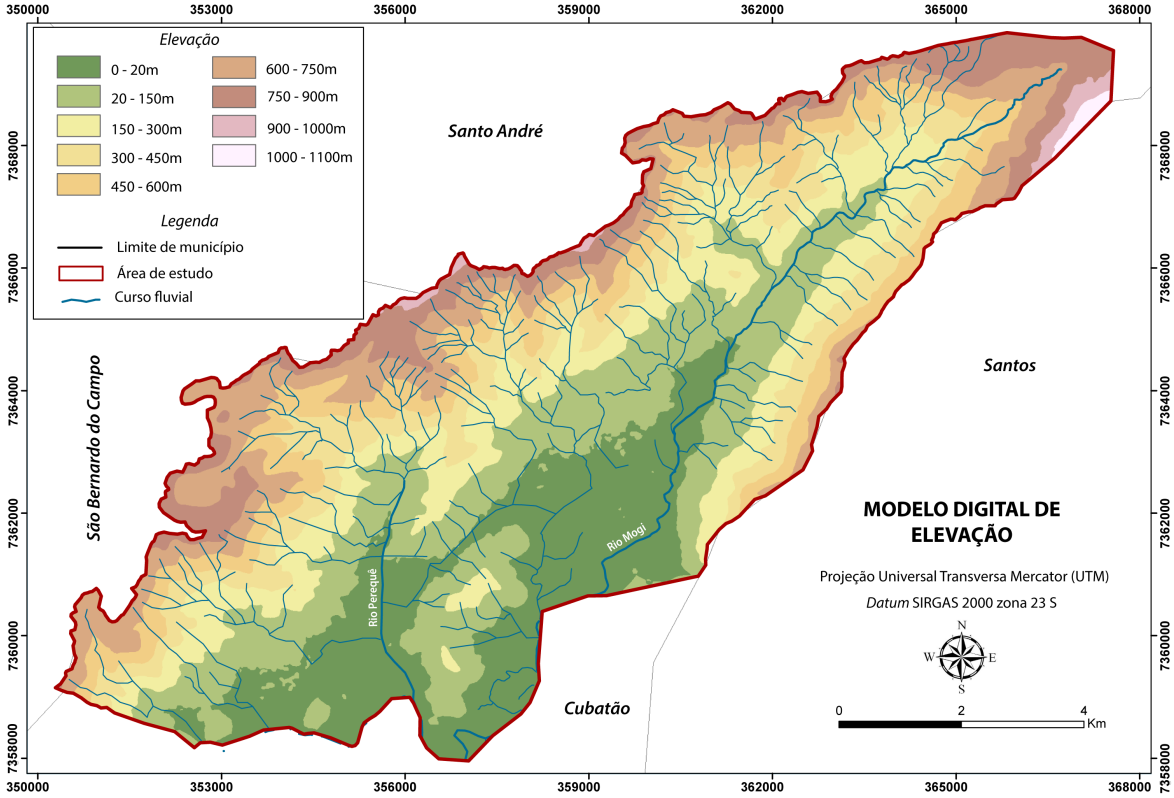
5.1.5.6 Unidade 6 – Rochas miloníticas e xistos migmatíticos

A unidade 6 está inserida na província geomorfológica do Planalto Paulista, a única da área de estudo fora da província Costeira. Apresenta média densidade de elementos de drenagem, baixa densidade de elementos de relevo, amplitude pequena e declividade baixa. A forma da encosta é convexa, com vales fechados e formas de topo arredondadas. A geologia é composta predominantemente por rochas miloníticas e xistos migmatíticos de idade proterozoica/neoproterozoica. Apresenta baixa suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos e baixo risco à comunidade da região pois, dentro da área de estudo, não há ocupação urbana ou industrial.

5.1.5 Uso dos modelos de bases físicas

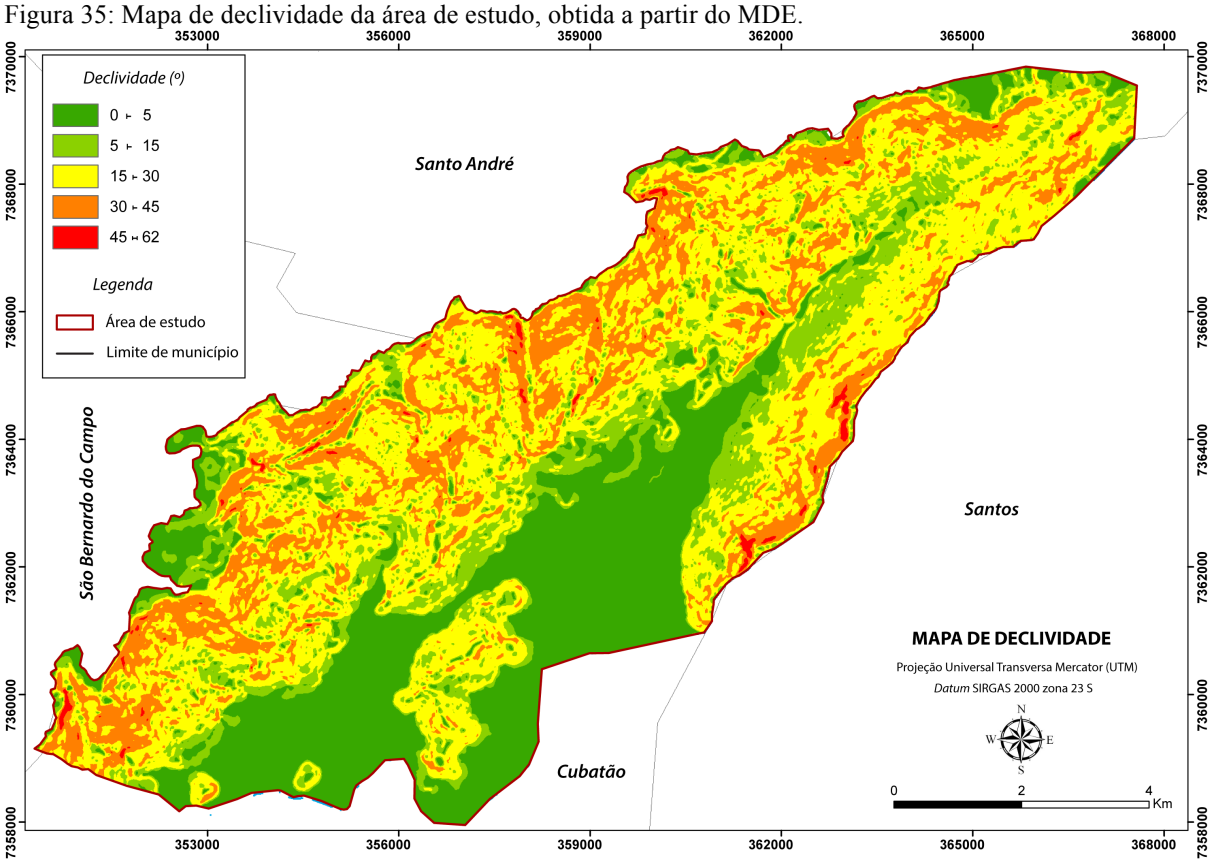
O uso dos modelos de bases físicas na escala de 1:50.000 tem como objetivo a geração de cenários de suscetibilidade a escorregamentos, com bases nos parâmetros geotécnicos e topográficos da região. Quando aplicados em escala regional, é importante a calibração dos cenários de parâmetros geotécnicos na identificação daquele que represente o comportamento médio do solo mais adequado, na garantia da acurácia das modelagens. As informações topográficas são obtidas por meio do MDE (figura 36), que serve de base na geração de mapas de declividade (figura 37), de direção de fluxo (figura 38) e contribuição hidrológica (figura 39) - essenciais na modelagem de escorregamentos.

Figura 34: Modelo digital de elevação (MDE) do terreno da área de estudo, com resolução de 30 m. Base na obtenção dos parâmetros topográficos pelos modelos aplicados neste estudo.



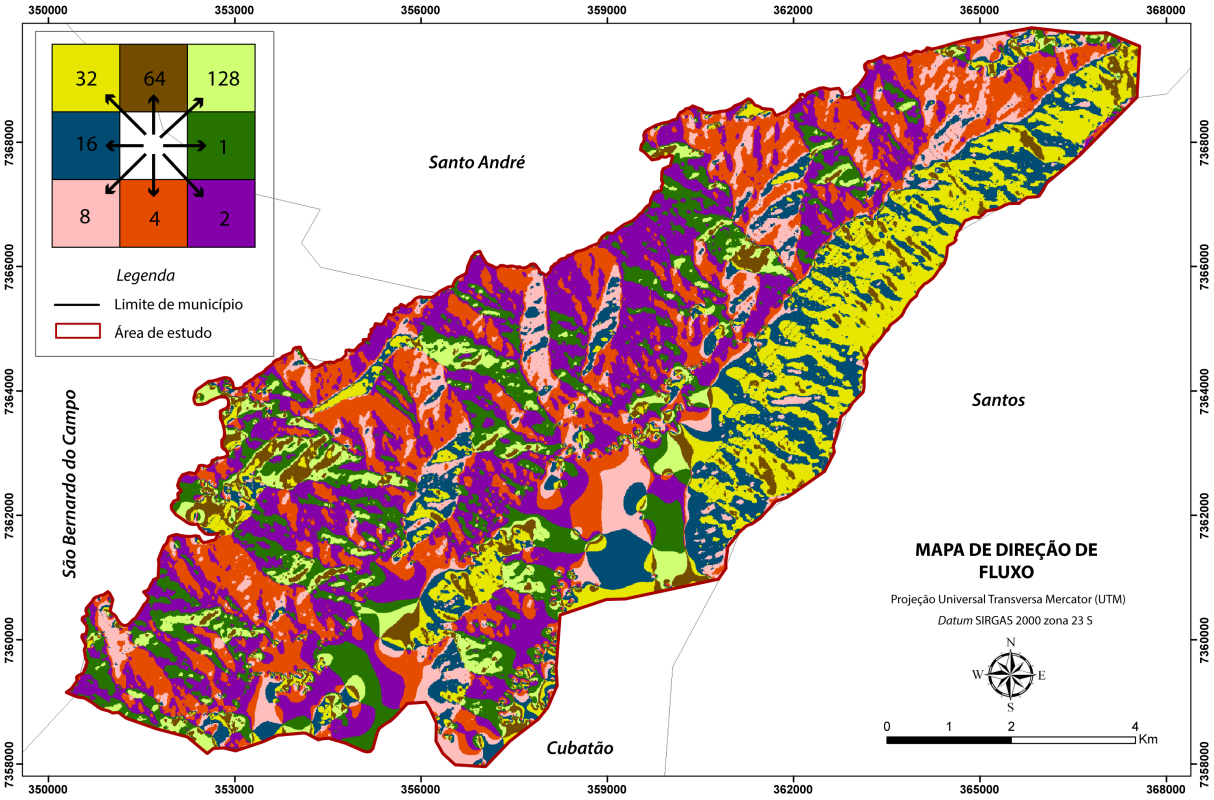
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 35: Mapa de declividade da área de estudo, obtida a partir do MDE.



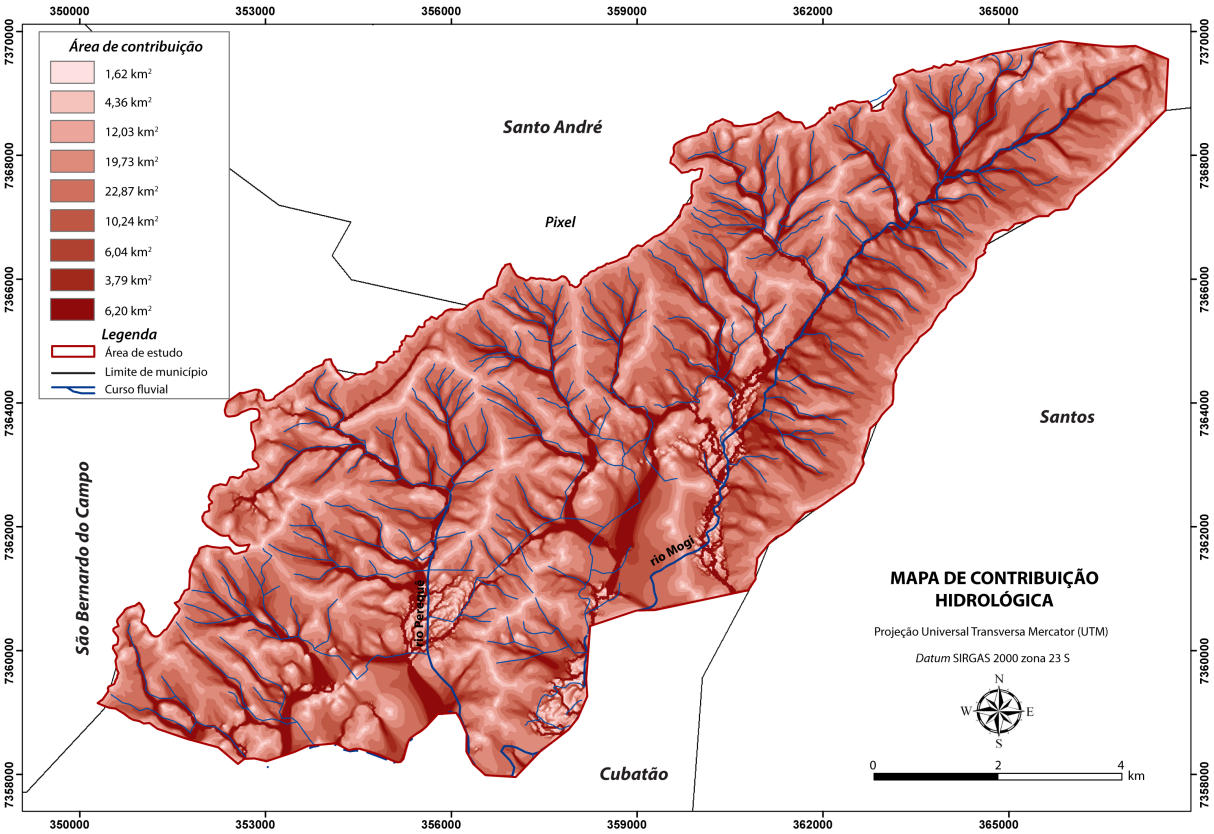
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 36: Mapa de direção de fluxo, obtido a partir do MDE.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 37: Mapa de contribuição hidrológica da área de estudo.



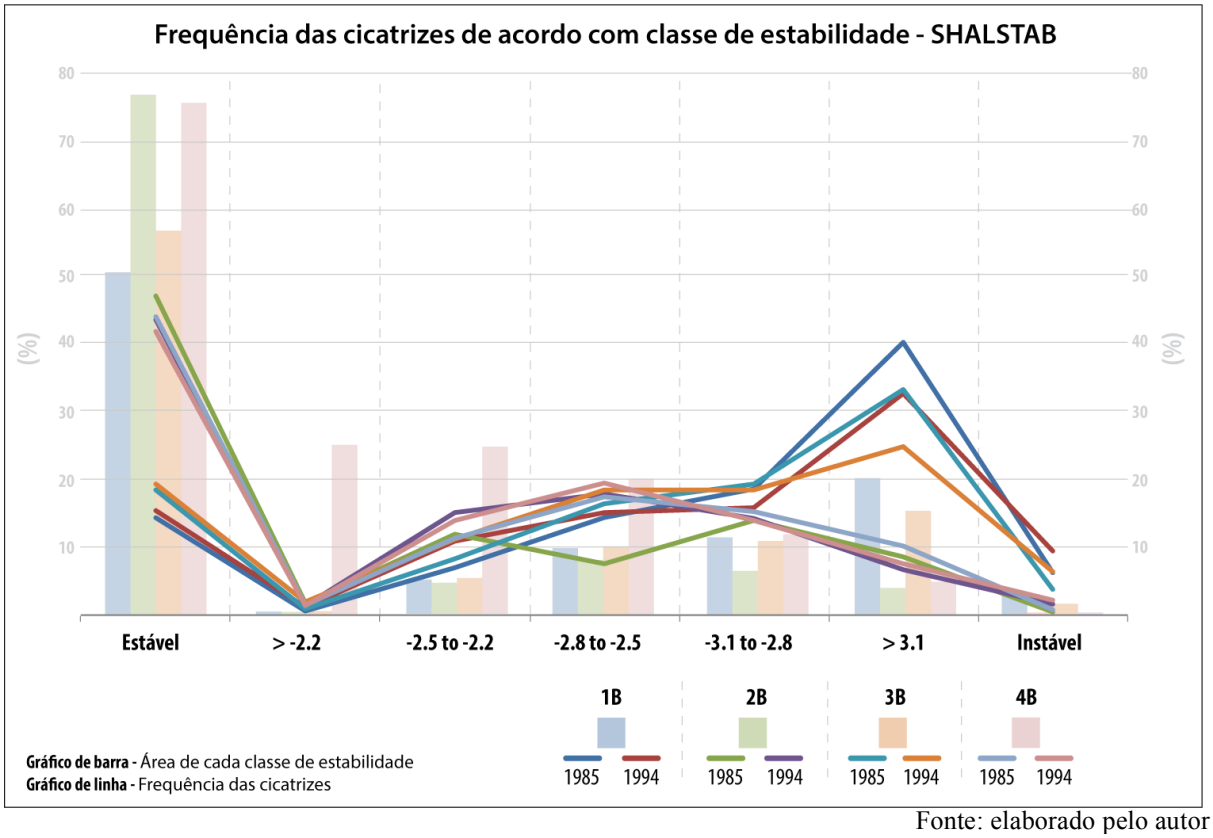
Fonte: elaborado pelo autor

5.1.5.1 SHALSTAB

Os parâmetros geotécnicos utilizados pelo modelo SHALSTAB na avaliação da suscetibilidade a escorregamentos na região estão sintetizados nas tabelas 2 e 8. A tabela 2 mostra os parâmetros obtidos por Wolle (1988), enquanto a tabela 8 exibe os parâmetros obtidos a partir dos ensaios realizados nas amostras coletadas em campo. Na tentativa de identificar o cenário que melhor represente a área de estudo na escala de 1:50.000, foram feitas modelagens com cada conjunto de parâmetros geotécnicos e, por fim, foram feitas comparações a partir do método proposto por Dietrich *et al.* (2001) e Sorbino *et al*. (2010).

Dentre os cenários obtidos por Wolle (1988), se destacam os cenários 1B e 3B para solos saturados, que apresentam maior frequência de cicatrizes em áreas classificadas pelo modelo como instáveis (figura 40). A figura 42 mostra os cenários de suscetibilidade utilizando os parâmetros 1B e 3B para solos saturados para 1985 e 1994, respectivamente.

Figura 38: Frequência de cicatrizes de escorregamento de acordo com classe de estabilidade, com base nos parâmetros geotécnicos de Wolle (1988) para solos saturados. Cenários 1B e 3B apresentam maior coincidência de cicatrizes em áreas instáveis.



Fonte: elaborado pelo autor

Na determinação do melhor cenário entre 1B e 3B, é utilizado o método de taxa de sucesso e erro (SORBINO *et al*., 2010), observado na figura 41. O cenário 1B mostra-se o mais representativo na região quando calibrado a partir do ano de 1985 pois apresenta taxa de

sucesso maior (cicatrizes em áreas instáveis) e razão sucesso/erro também maior que o cenário 3B. Já quando calibrado a partir dos escorregamentos de 1994, o cenário 3B mostra-se o mais representativo para a região nessa escala.

Figura 39: Comparação entre os cenários 1B e 3B, usando método proposto por Sorbino et al. (2010). Cenário 1B mostra o mais representativo do comportamento geotécnico do solo do episódio de 1985, enquanto que o cenário 3B do episódio de 1994.

Área da região de estudo	Ano	Área total das cicatrizes	Área média-cicatrizes	No. cicatrizes áreas instáveis*	No. cicatrizes áreas estáveis*	Áreas instáveis* (%)	Áreas estáveis* (%)
86,9 km^2	1994	2,9 km^2	538,16 m^2	262(1B) 244 (3B)	98 (1B) 116 (3B)	44,26 (1B) 37,89 (3B)	55,74 (1B) 62,11 (3B)
	1985	5,7 km^2	338,49 m^2	690 (1B) 633(3B)	183 (1B) 240 (3B)		

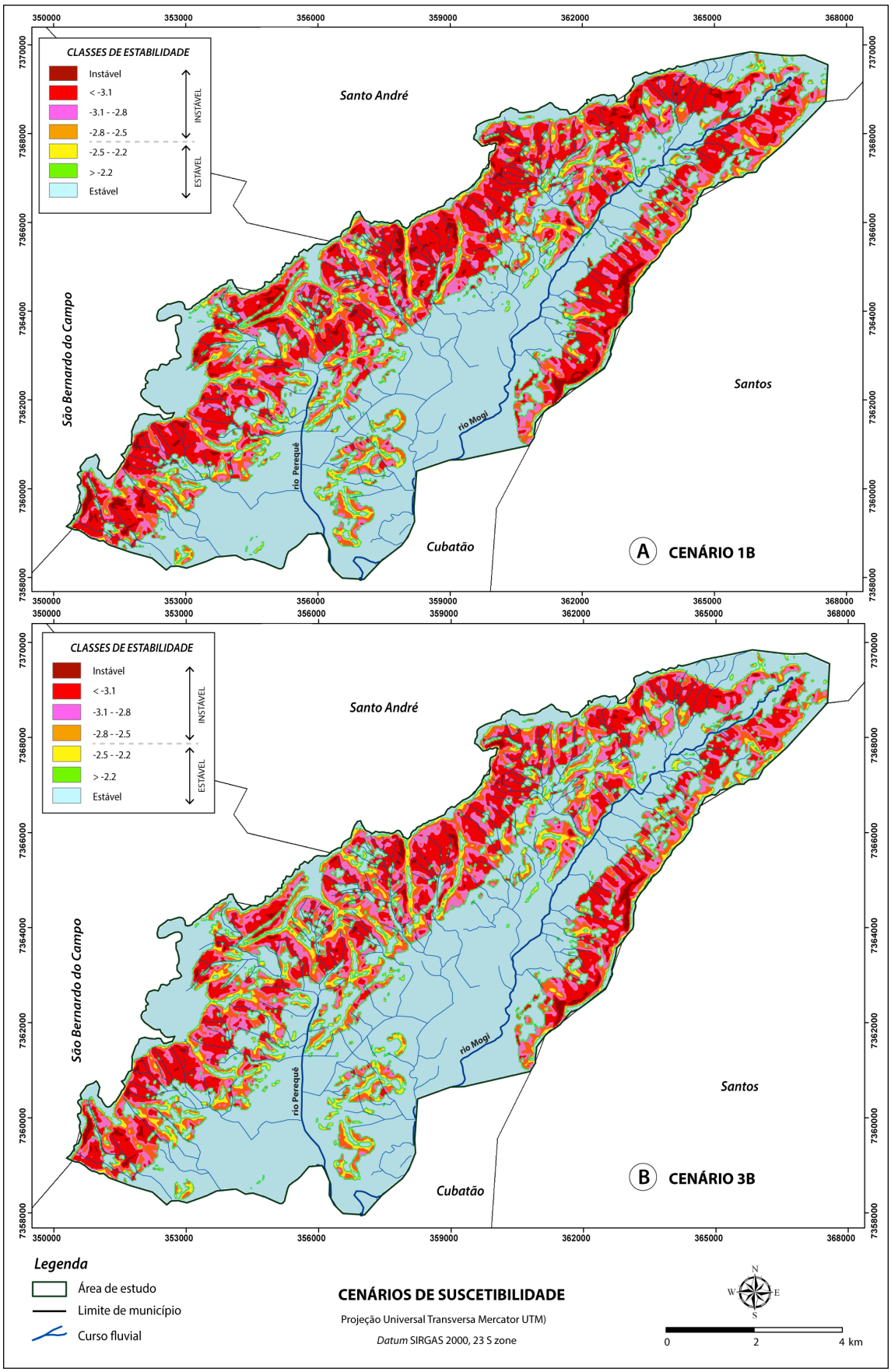
CENÁRIO 1B		CENÁRIO 3B	
Success Index = 0,367%	Success Index = 0,644%	Success Index = 0,399%	Success Index = 0,690%
Error Index = 0,109%	Error Index = 0,136%	Error Index = 0,116%	Error Index = 0,159%
Sul/El = 3,367	Sul/El = 4,748	Sul/El = 3,448	Sul/El = 4,323
1994	1985	1994	1985

* De acordo com a modelagem usando o SHALSTAB.

Fonte: elaborado pelo autor

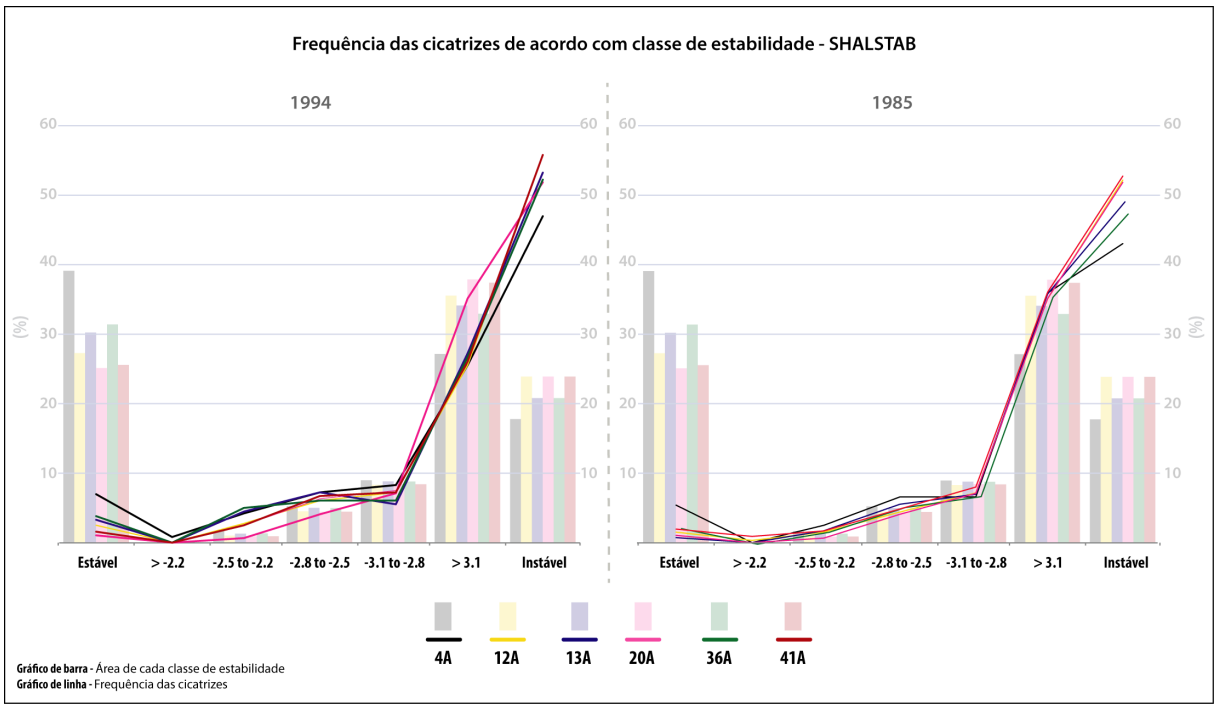
Dentre os cenários obtidos a partir das amostras de solo coletadas nas campanhas de campo desta pesquisa, destacam-se dois cenários: 13A e 36A (figura 43). Cenário 22A e 38A não geraram resultados usando, provavelmente devido ao ângulo de atrito nulo para amostras de natureza argilosa, segundo a correlação por Godoy (1983). Na identificação do cenário mais representativo do comportamento geotécnico do solos da região na escala de 1:50.000, é utilizado método da taxa de sucesso e erro, assim como feito com os cenários de Wolle (1988). Ao aplicar o método de Sorbino *et al.* (2010), figura 44, o cenário 13A (figura 45) mostra-se o mais representativo das condições geotécnicas do solo

Figura 40: Mapas de suscetibilidade obtidos por meio do SHALSTAB, utilizando os cenários de parâmetros geotécnicos 1B e 3B, de Wolle (1988).



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 41: Frequência de cicatrizes de escorregamento de acordo com classe de estabilidade, com base nos parâmetros geotécnicos obtidos a partir solos coletados na área de estudo.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 42: Comparação da performance dos cenários 13A e 36A, a partir da taxa de sucesso e erro. Cenário 13A mostra-se o mais representativo do comportamento geotécnico médio do solo da região.

Área da região de estudo	Ano	Área total das cicatrizes	Área média das cicatrizes	No. cicatrizes áreas instáveis*	No. cicatrizes áreas estáveis*	Área instável* (%)	Área estável* (%)
86,9 km²	1994	2,9 km²	538,16 m²	332 (13A) 328 (36A)	28 (13A) 32 (39A)	68,08 (13A) 66,85 (36A)	31,92 (13A) 33, 15 (36A)
	1985	5,7 km²	338,49 m²	838 (13A) 835 (36A)	35 (13A) 37 (36A)		

CENÁRIO 13A

Success Index = 0,302% **Success Index = 0,48%**

Error Index = 0,054% **Error Index = 0,043%**

Sul/EI = 5,559 **Sul/EI = 11,226**

1994 1985

CENÁRIO 36A

Success Index = 0,304% **Success Index = 0,487%**

Error Index = 0,059% **Error Index = 0,044%**

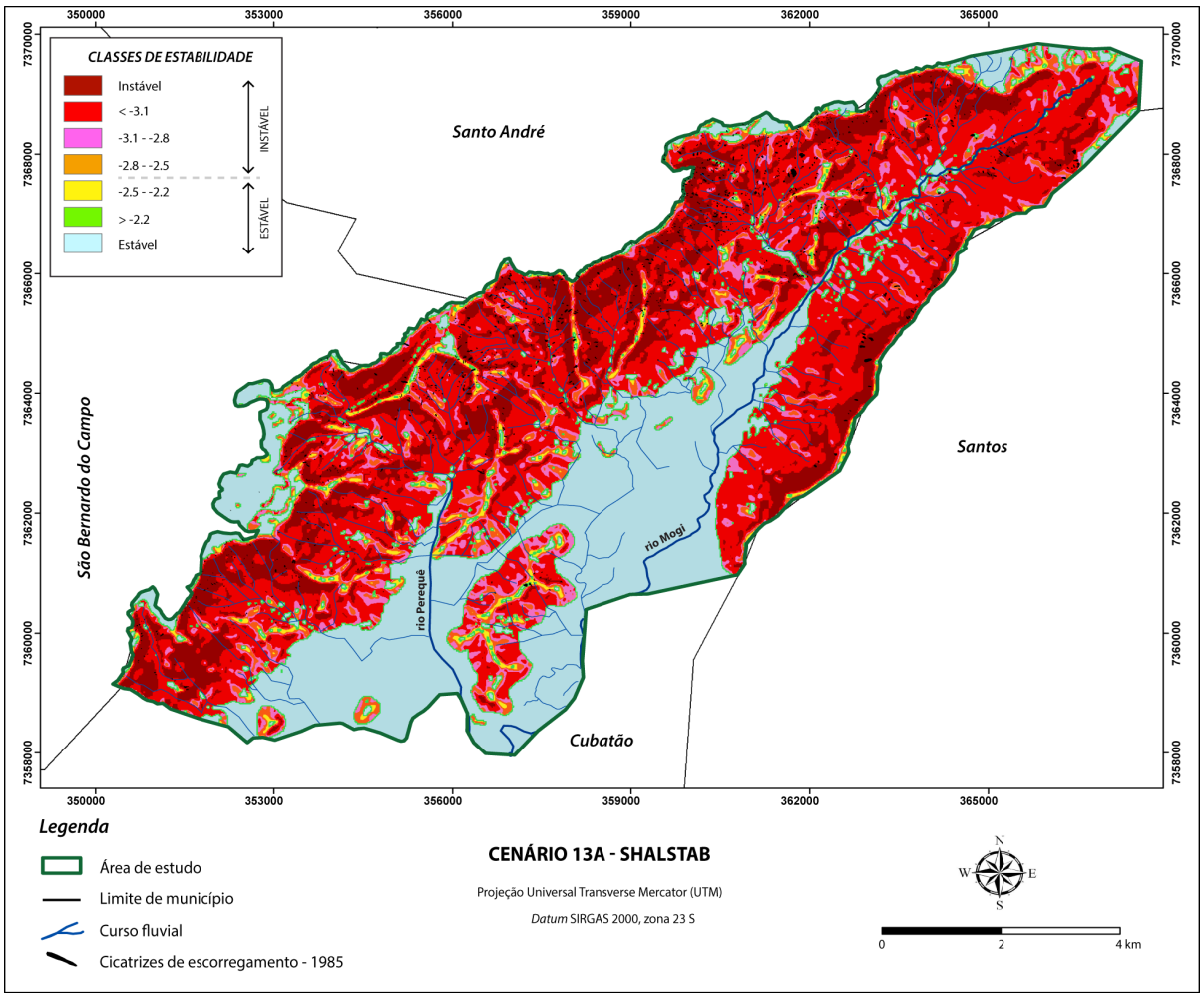
Sul/EI = 5,083 **Sul/EI = 11,191**

1994 1985

* De acordo com a modelagem de cada cenário com o SHALSTAB.

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 43: Mapa de suscetibilidade utilizando os parâmetros geotécnicos do cenário 13A, a partir do modelo SHALSTAB.



Fonte: elaborado pelo autor

5.1.5.2 SINMAP

Da mesma forma que nas modelagens com SHALSTAB, é aplicado o SINMAP na região com base nos parâmetros geotécnicos obtidos por Wolle (1998) e nos parâmetros adquiridos pelos ensaios feitos nas amostras coletadas em campo (tabela 12 e 13, respectivamente). O SINMAP, por meio do parâmetro T/R (Transmissão do solo sobre Recarga), incorpora em suas modelagens valores customizáveis de precipitação, diferentemente do SHALSTAB. O parâmetro T/R foi calculado com base na pluviometria dos episódios de 1985 e 1994, como detalha a figura 46. A condutividade hidráulica dos solos foi retirada de Michel *et al.* (2014), para solos tropicais da Serra do Mar.

Tabela 10: Cenários geotécnicos utilizados na modelagem utilizando o SINMAP, com base em Wolle (1988). SINMAP permite a variação nos parâmetros de entrada e, neste estudo, é adotada variação de 20%.

Amostra	Parâmetros geotécnicos					
	Peso especifico (kg/m3)	Ângulo de atrito (º)	Coesão (adimensional)	T/R (m) 1994	T/R (m) 1985	T/R (m) *Default*
1B	1710	34 +/-20%	0 - 0,25	30+/-20%	76+/-20%	2000 - 3000
2B	1950	39+/-20%	0 - 0,25	30+/-20%	76+/-20%	2000 - 3000
3B	1820	36+/-20%	0 - 0,25	30+/-20%	76+/-20%	2000 - 3000
4B	2010	39+/-20%	0 - 0,25	30+/-20%	76+/-20%	2000 - 3000

Fonte: Wolle (1988)

Tabela 11: Parâmetros geotécnicos de entrada do modelo SINMAP, obtidos por meio de amostras de solo coletados em campo. Variação de 20% nos parâmetros é adotada neste estudo.

Amostra	Peso específico (Kg/m3)	Coesão adimensional	Ângulo de atrito (º)	T/R (m) 1994	T/R (m) 1985
4A	1755	0 - 0,25	30+/-20%	30+/-20%	76+/-20%
12A	1284	0 - 0,25	28+/-20%	30+/-20%	76+/-20%
13A	1400	0 - 0,25	29+/-20%	30+/-20%	76+/-20%
20A	1200	0 - 0,25	28+/-20%	30+/-20%	76+/-20%
22A	1274	0 - 0,25	0+/-20%	30+/-20%	76+/-20%
36A	1450	0 - 0,25	29+/-20%	30+/-20%	76+/-20%
38A	1360	0 - 0,25	0	30+/-20%	76+/-20%
41A	1216	0 - 0,25	28+/-20%	30+/-20%	76+/-20%

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 44: Cálculo do parâmetro de entrada T/R (Transmissividade sobre recarga), a partir dos dados pluviométricos dos eventos de 1985 e 1994.

T / R

1994

Chuva acumulada dos dias 6 e 7 fev.: 258 mm/dia --- 0,26m/d

$$\frac{\textbf{Transmissividade (T)}}{\textbf{Recarga (R)}} = \frac{\frac{3{,}8\ m}{dia} \times 2\ m}{0{,}26\ m} = 30\ m$$

1985

Chuva acumulada dos dias 23e 24 jan.: 100 mm/dia --- 0,1m/d

$$\frac{\textbf{Transmissividade (T)}}{\textbf{Recarga (R)}} = \frac{\frac{3{,}8\ m}{dia} \times 2\ m}{0{,}1\ m} = 76\ m$$

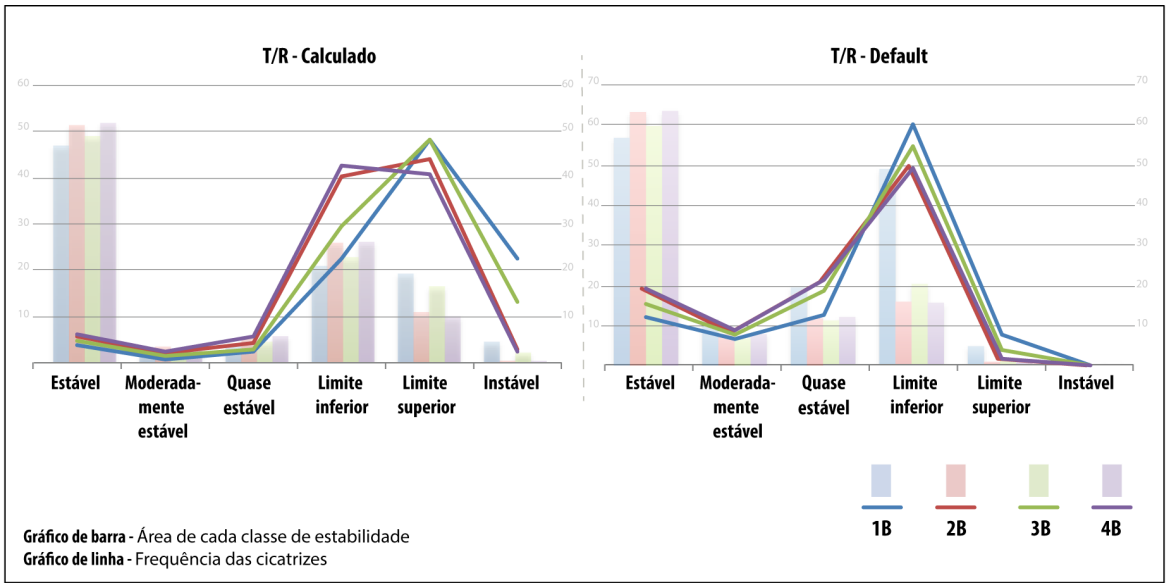
Espessura média do solo = 2 m

Condutividade hidráulica (solos arenosos) = 3,8 m/dia (Michel *et al.*, 2014)

Fonte: elaborado pelo autor

Os gráficos da figura 47 mostram a performance dos cenários utilizando os parâmetros obtidos por Wolle (1988) para o ano de 1994, quando se aplica o parâmetro T/R *default* do modelo (direita) e o T/R calculado (esquerda). Comparando a performance do modelo quando utiliza o T/R calculado, este melhor representa as instabilizações na área de estudo – com maior frequência de cicatrizes de escorregamentos em áreas classificadas como instáveis, ao mesmo tempo que essas áreas representam porção relativamente baixa da área de estudo. Desta forma, em todas as simulações apresentadas aqui neste estudo são utilizadas o valor T/R calculado.

Figura 45: Comparação entre modelagens utilizando o parâmetro T/R calculado e parâmetro T/R default no modelo SINMAP. T/R calculado apresenta maior frequência de cicatrizes em áreas instáveis, representando melhor a instabilidade nas encostas da região.



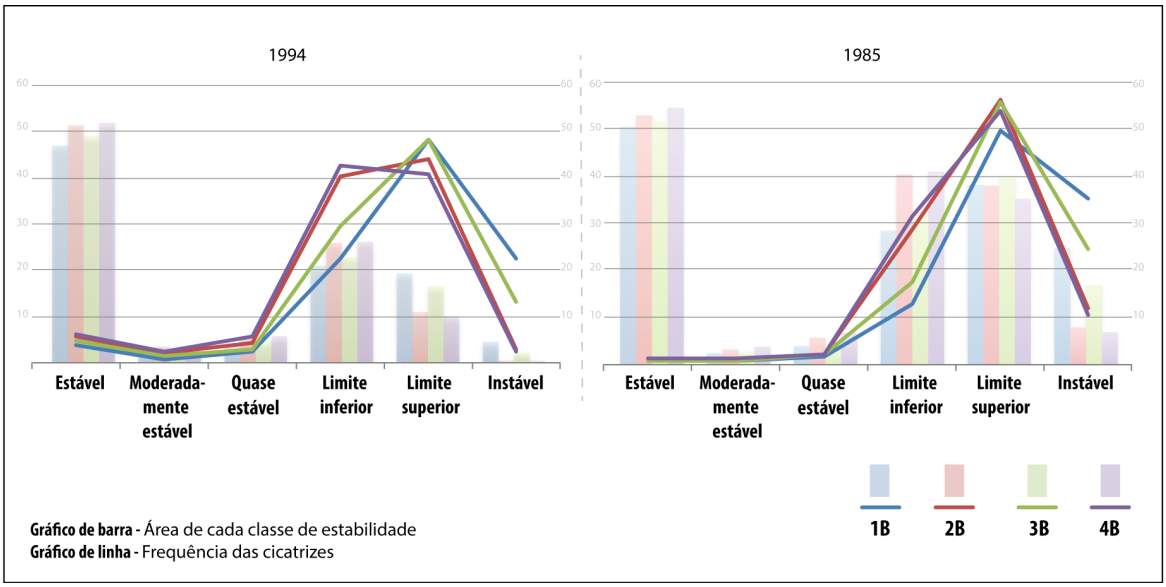
Fonte: elaborado pelo autor

Dentre os cenários obtidos por Wolle (1988), os cenários 1B e 3B se destacam, pois apresentam maior frequência de cicatrizes mapeadas em áreas instáveis (figura 48). Ao utilizar a taxa de sucesso e erro (SORBINO *et al.*, 2010), o cenário 1B se sobressai por apresentar maior taxa de sucesso e maior valor na razão entre sucesso/erro, tanto comparado ao ano de 1994 quanto 1985 (Figura 49). Desta forma, o cenário 1B (figura 50) mostra-se o mais representativo para a região de estudo na escala de 1:50.000, dentre os cenários geotécnicos obtidos por Wolle (1988).

Utilizando os parâmetros geotécnicos das amostras de solo coletadas na região, os cenários 13A E 36A (Figura 51) se destacam por apresentar maior frequência de cicatrizes em áreas instáveis, assim como ocorreu nas modelagens com o SHALSTAB. Ao aplicar o

método proposto por Sorbino *et al*. (2010), o cenário 13A (Figura 53) mostra-se o mais representativo do comportamento geotécnico do solo da área de estudo, pois apresenta maior taxa de sucesso, pequena taxa de erro e o maior valor na razão entre sucesso/erro tanto para o ano de 1994 quanto 1985 (Figura 52).

Figura 46: Performance dos diferentes cenários obtidos por Wolle (1988), utilizando o SINMAP. Cenários 1B e 3B se destacam por apresentar maior frequência de cicatrizes em áreas instáveis, tanto em 1985 quanto 1994.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 47: Comparação da performance dos cenários por meio da taxa de sucesso e erro. Cenário 1B mostra-se o mais representativo do comportamento geotécnico médio do solo na escala de trabalho.

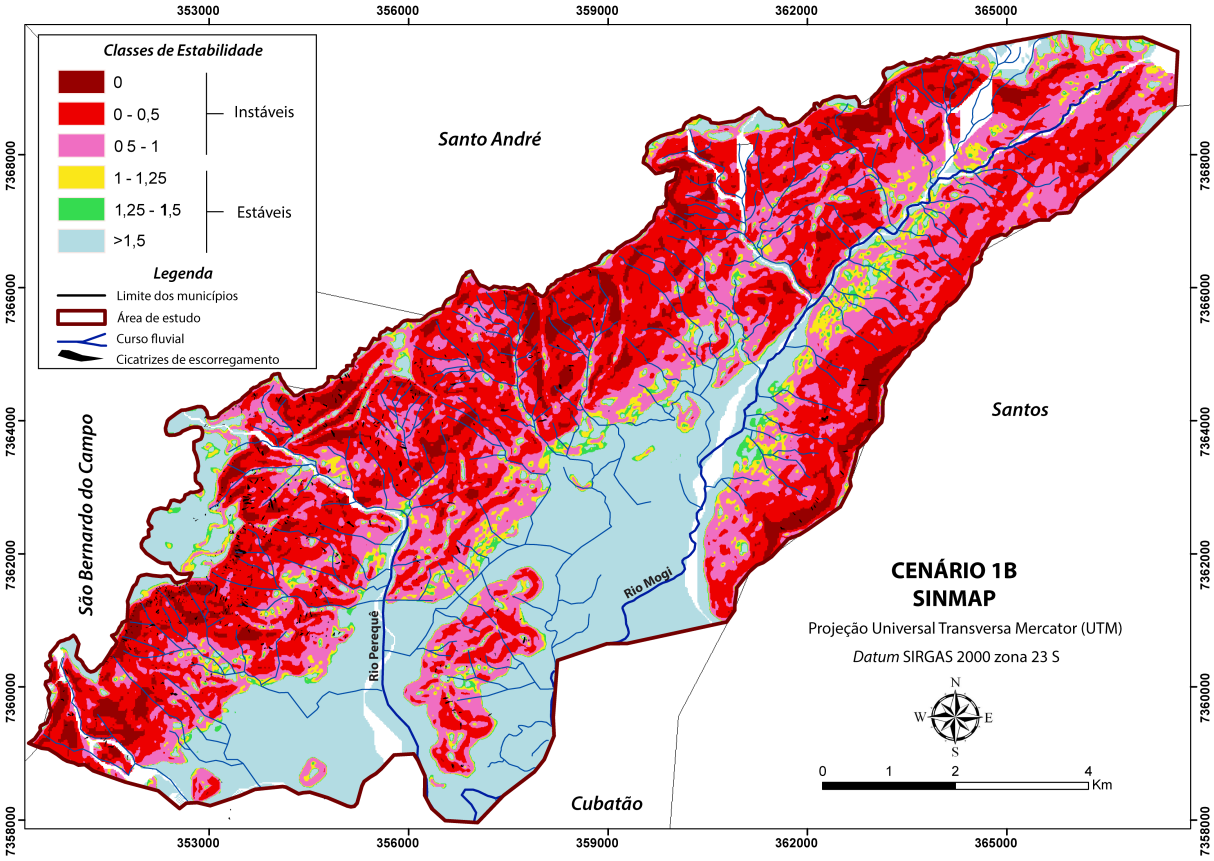
Área da região de estudo	Ano	Área total das cicatrizes	Área média das cicatrizes	No. cicatrizes áreas instáveis*	No. cicatrizes áreas estáveis*	Área instável* (%)	Área estável* (%)
86,9 km²	1994	2,9 km²	538,16 m²	499 (1B) 489 (3B)	37 (1B) 47 (3B)	65,4 (1B) 61,6 (3B)	34,6 (1B) 38,4 (3B)
	1985	5,7 km²	338,49 m²	1480 (1B) 1450 (3B)	73 (1B) 103 (3B)		

CENÁRIO 1B		CENÁRIO 3B	
Success Index = 0,473%	Success Index = 0,883%	Success Index = 0,493%	Success Index = 0,918%
Error Index = 0,07%	Error Index = 0,08%	Error Index = 0,08%	Error Index = 0,105%
Sul/EI = 7,135	Sul/EI = 10,726	Sul/EI = 6,486	Sul/EI = 8,776
1994	1985	1994	1985

* De acordo com cada cenário modelado pelo SINMAP.

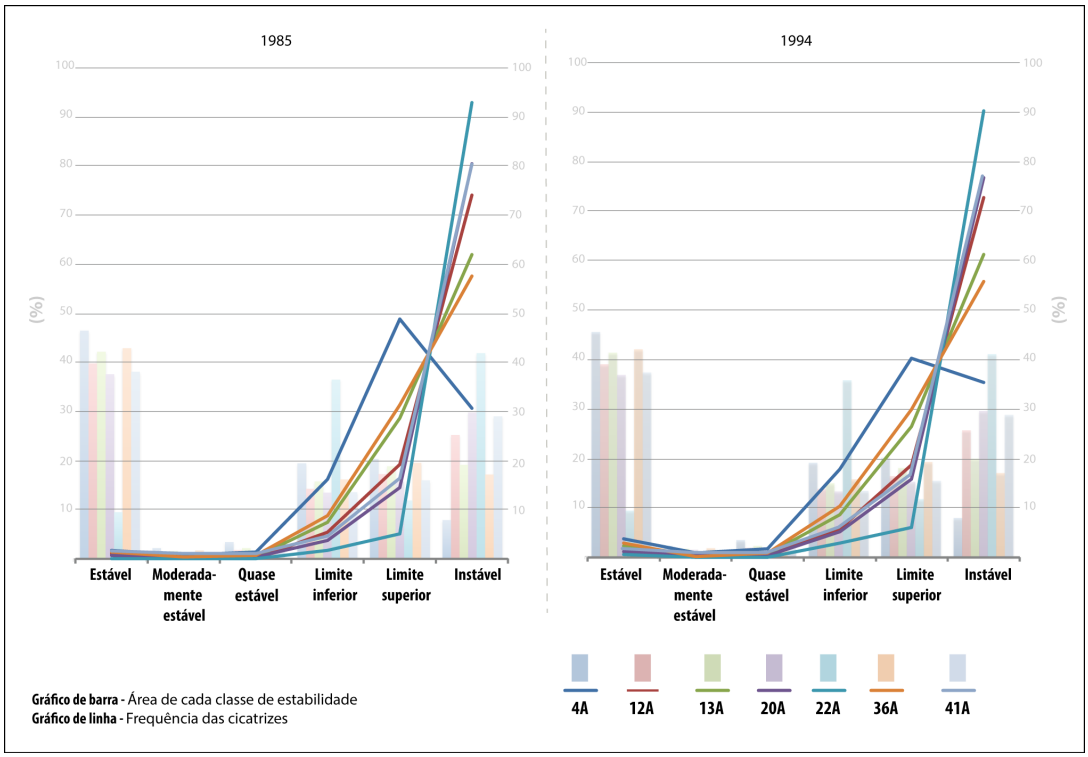
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 48: Mapa de suscetibilidade obtido com os parâmetros do cenário 1B - SINMAP.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 49: Performance dos diferentes cenários obtidos a partir dos ensaios geotécnicos nas amostras de solo da região, utilizando o SINMAP. Cenários 13A e 36A se destacam por apresentar maior frequência de cicatrizes em áreas instáveis, ao mesmo que estas não representam grande porcentagem em área.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 50: Comparação entre os cenários 13A e 36A, utilizando a taxa de sucesso e erro. Cenário 13A apresenta maior frequência de cicatrizes em áreas instáveis (success index) e menor frequência de cicatrizes em áreas estáveis (error index), logo melhor representa o comportamento geotécnico médio dos solos da região.

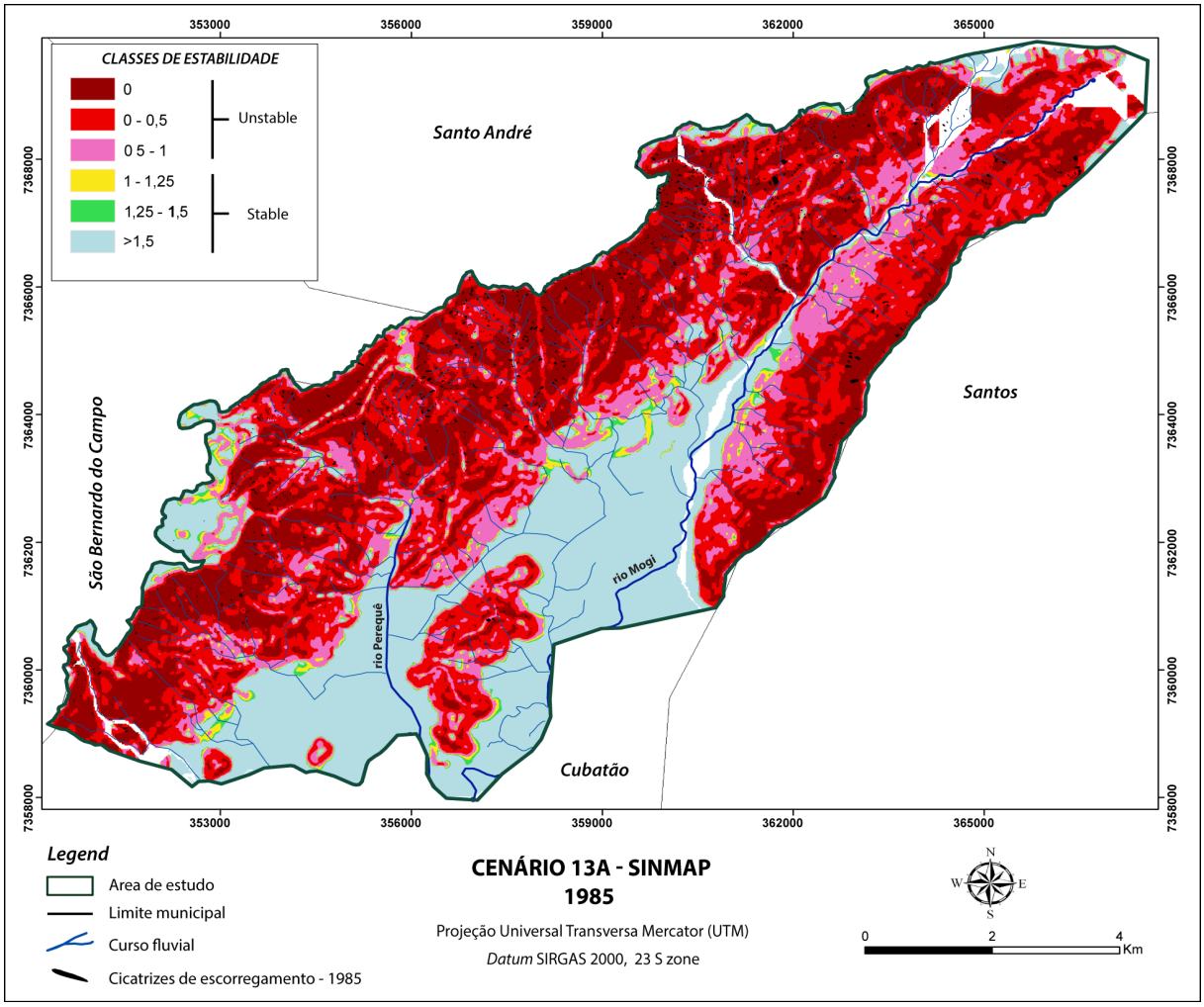
Área da região de estudo	Ano	Área total das cicatrizes	Área média das cicatrizes	No. cicatrizes áreas instáveis*	No. cicatrizes áreas estáveis*	Área instável* (%)	Área estável* (%)
86,9 km²	1994	2,9 km²	538,16 m²	515(13A) 513 (36A)	19 (13A) 21 (39A)	72,6 (13A) 76,6 (36A)	27,4(13A) 23,4 (36A)
	1985	5,7 km²	338,49 m²	1524 (13A) 1519(36A)	29 (13A) 39 (36A)		

CENÁRIO 13A		CENÁRIO 36A	
Success Index = 0,439%	Success Index = 0,819%	Success Index = 0,415%	Success Index = 0,774%
Error Index = 0,043%	Error Index = 0,0413%	Error Index = 0,056%	Error Index = 0,057%
Sul/El = 10,229	Sul/El = 19,834	Sul/El = 7,463	Sul/El = 13,648
1994	1985	1994	1985

* De acordo com cada cenário modelado pelo SINMAP.

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 51: Mapa de suscetibilidade obtido com base no cenário 13A, utilizando o modelo SINMAP.



Fonte: elaborado pelo autor

6.2 ESCALA DE DETALHE

A definição da região alvo a ser detalhada na escala de 1:10.000 dentro da área de estudo teve como base a compartimentação fisiográfica, análise das cicatrizes de escorregamentos e da distribuição de chuva na região de estudo, mostrados anteriormente. Desta forma, são selecionadas seis bacias hidrográficas dentro da unidade fisiográfica 5 para serem caracterizadas na escala de detalhe (figura 54). A unidade 5 é a região mais suscetível ao desencadeamento de escorregamentos, apresentando também maior risco à comunidade urbana e industrial de Cubatão. Essas seis bacias foram escolhidas devido ao direto impacto na comunidade e, principalmente, nas indústrias instaladas no município que escorregamentos podem causar.

A modelagem usando os modelos SHALSTAB e SINMAP na avaliação da suscetibilidade a escorregamentos na escala de 1:10.000 é importante, não somente para uma análise de maior detalhe em um área ambientalmente sensível como a unidade 5, mas também na verificação do efeito que a escala tem sobre o resultado das modelagens. Assim como na etapa geral, os parâmetros topográficos obtidos usados pelos modelos são obtidos pelo MDE, base para os mapas de declividade, contribuição hidrológica e direção de fluxo.

6.2.1 SHALSTAB

Os parâmetros geotécnicos utilizados pelo modelo SHALSTAB na escala de 1:10.000 são os mesmos que aqueles usados na etapa geral para solos saturados, de Wolle (1988), mostrados na tabela 2. No entanto, ao utilizar os parâmetros obtidos de amostras coletadas na região, foram utilizados somente das amostras recolhidas dentro do limite da unidade 5 – tabela 14.

Tabela 12: Parâmetros geotécnicos utilizados na modelagem do SHALSTAB na escala de 1:10.000, obtidos a partir de amostras de solo da região de interesse.

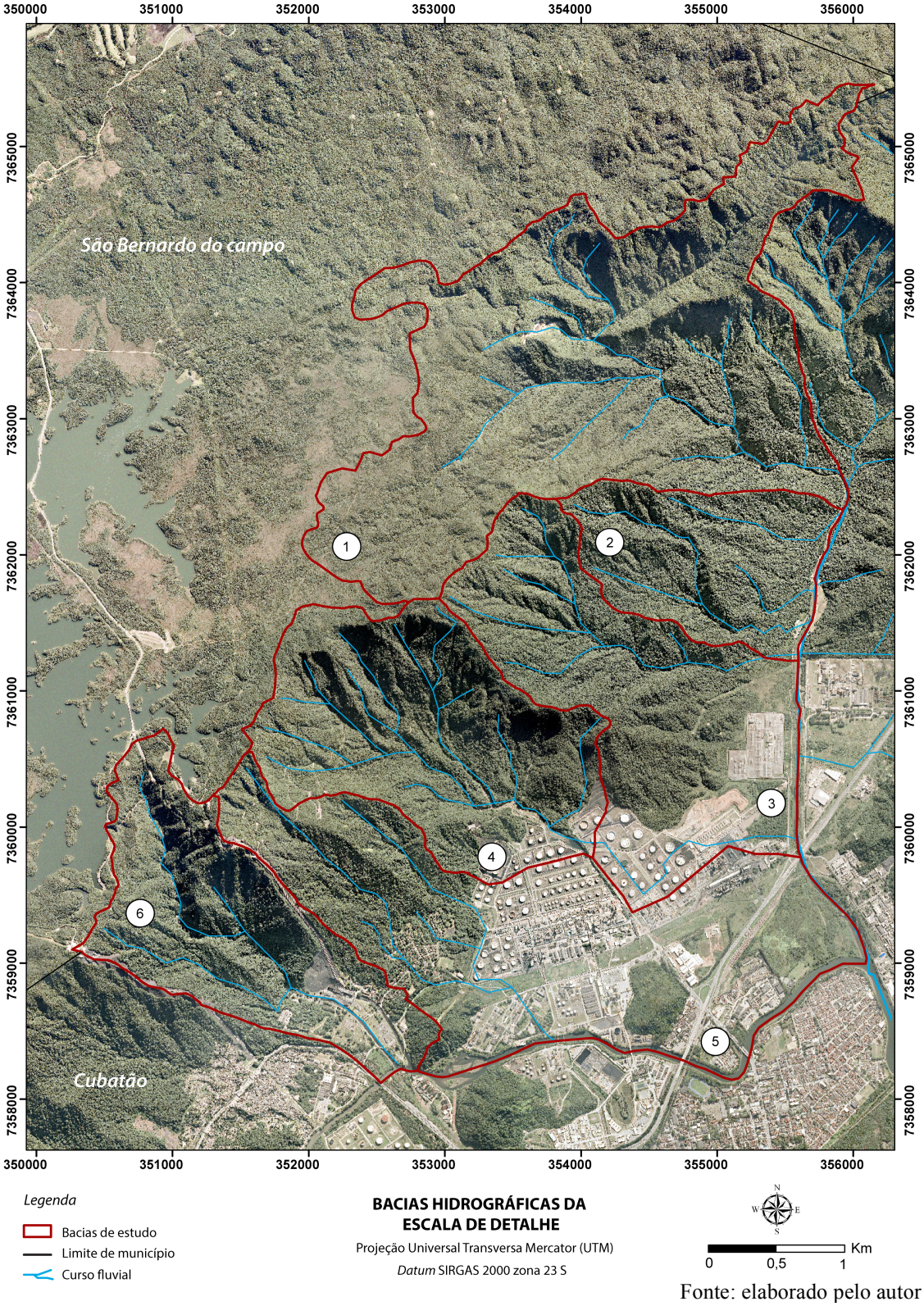
Amostra	**Peso específico (kg/m^3)**	**Coesão (KPa)**	**Ângulo de atrito (º)**	**Espessura do solo (m)**
36A	1450	0	29	2
38A	1360	1200	0	2
41A	1216	0	28	1

Fonte: elaborado pelo autor

Utilizando os parâmetros de Wolle (1988), os cenário 1B e 3B mostram-se mais eficientes em representar as instabilizações na região (figura 55), assim como ocorreu na etapa geral. No entanto, o cenário 3B, tanto para 1994 quanto 1985, mostra-se o mais representativo na escala de detalhe ao aplicar o método de Sorbino *et al*. (2010) (figura 56),

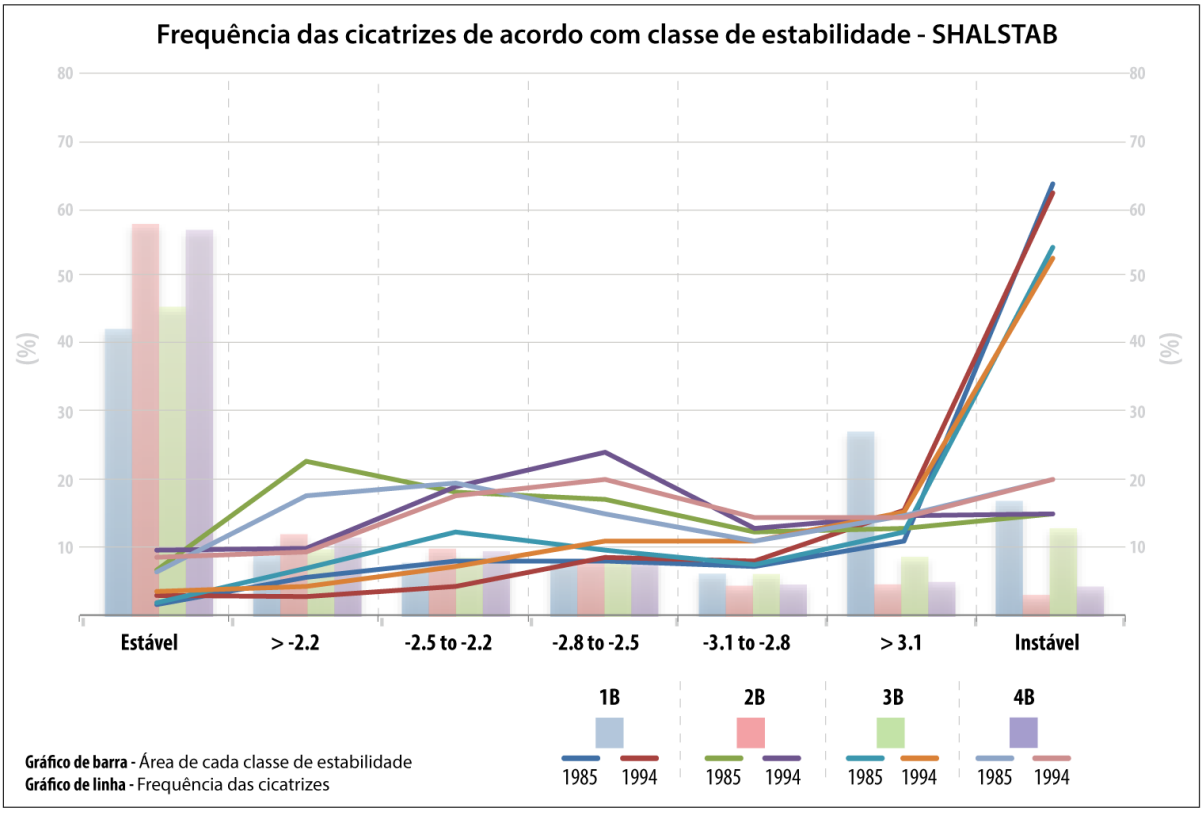
com maior taxa de sucesso e menor erro. A figura 57 mostra o cenário 3B, que apresenta melhor performance.

Figura 52: Localização das seis bacias hidrográficas selecionadas para a aplicação dos modelos na escala de detalhe.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 53: Frequência de cicatrizes de acordo com classes de estabilidade, a partir da modelagem usando SHALSTAB. Cenários 1B e 3B apresentam maior frequência de cicatrizes em áreas instáveis.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 54: Comparação entre os cenário 1B e 3B, por meio do método proposto por Sorbino et al. (2010). Cenário 3B mostra-se como o mais representativo do comportamento geotécnico médio dos solos na região, apresentando maior frequência de cicatrizes em áreas instáveis.

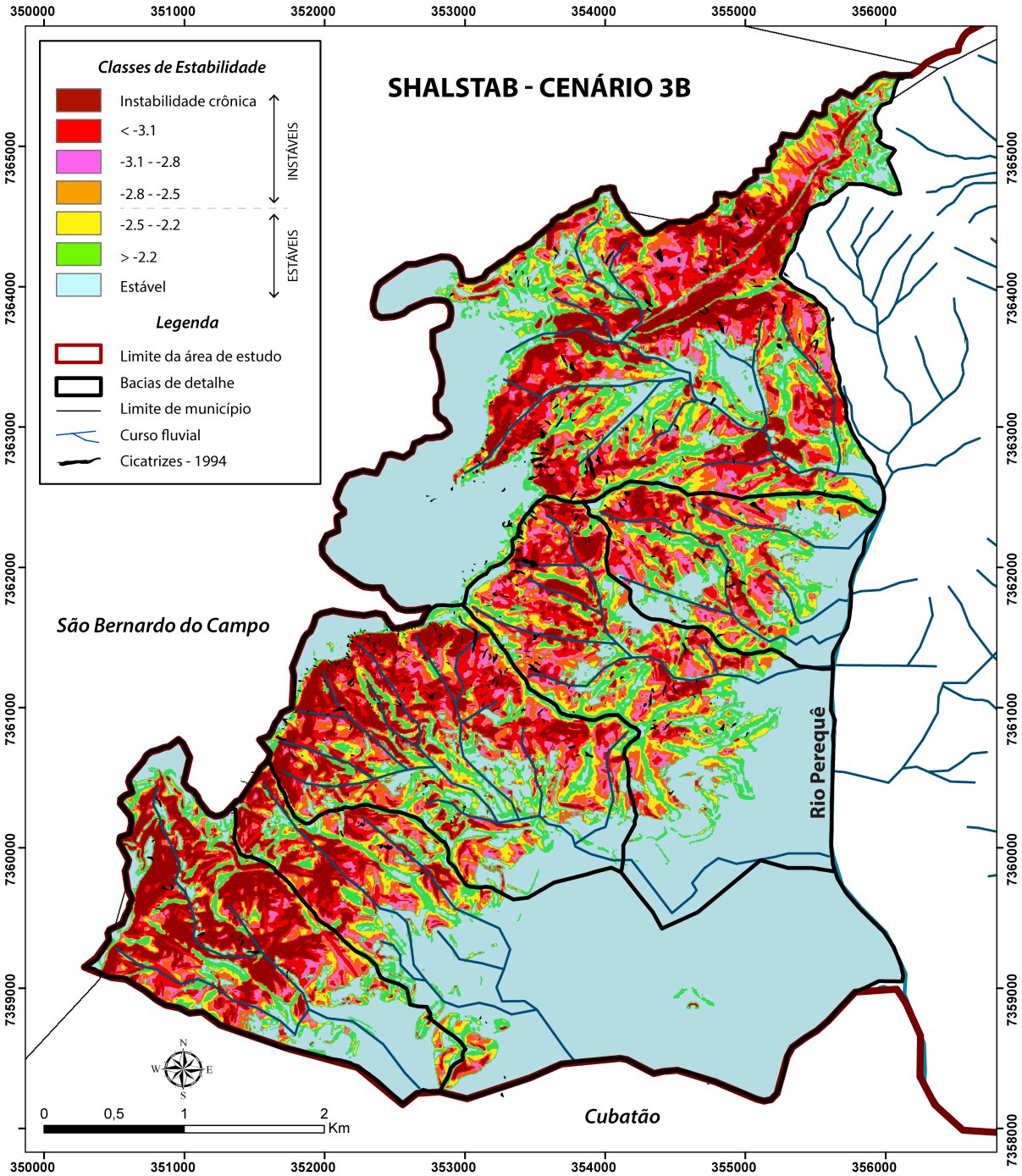
Área da região de estudo	Ano	Área total das cicatrizes	Área média das cicatrizes	No. cicatrizes áreas instáveis*	No. cicatrizes áreas estáveis*	Área instável* (%)	Área estável* (%)
18,8 km²	1994	2,9 km²	538,16 m²	373 (1B) 383 (3B)	9 (1B) 9 (3B)	68,1 (1B) 36,33 (3B)	41,77 (1B) 63,67 (3B)
	1985	5,7 km²	338,49 m²	371 (1B) 368 (3B)	8 (1B) 11 (3B)		

CENÁRIO 1B		CENÁRIO 3B	
Success Index = 2,393%	Success Index = 1,493%	Success Index = 4,581%	Success Index = 2,819%
Error Index = 0,174%	Error Index = 0,181%	Error Index = 0,198%	Error Index = 0,186%
Sul/EI = 13,777	Sul/EI = 8,26	Sul/EI = 23,187	Sul/EI = 15,193
1994	1985	1994	1985

* De acordo com cada cenário modelado pelo SINMAP.

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 55: Mapa de suscetibilidade obtido a partir dos parâmetros geotécnicos do cenário 3B - SHALSTAB.



Fonte: elaborado pelo autor

Ao utilizar os cenários com as amostras coletadas nas campanhas de campo, o cenário 41A mostra-se o mais representativo do comportamento geotécnico dos solos nessa escala de trabalho, como mostra a figura 58 com a aplicação do método de taxa de sucesso e erro. O cenário 38A não gerou resultados, por apresentar valor de ângulo de atrito nulo – semelhante ao que aconteceu na etapa regional. A figura 59 mostra o mapa de suscetibilidade gerado pelo SHALSTAB a partir do cenário 41A.

Figura 56: Comparação entre os cenários 36A e 41A, a partir do método proposto por Sorbino et al. (2010). Cenário 41A mostra-se o mais representativo do comportamento geotécnico médio do solo na região.

Área da região de estudo	Ano	Área total das cicatrizes	Área média das cicatrizes	No. cicatrizes áreas instáveis*	No. cicatrizes áreas estáveis*	Área instável* (%)	Área estável* (%)
18,8 km^2	1994	2,9 km^2	538,16 m^2	401 (36A) 394 (41A)	10 (36A) 7 (41A)	59,08 (1B)	40,92 (1B)
	1985	5,7 km^2	338,49 m^2	396 (36A) 389 (41A)	10 (36A) 7 (41A)	64,46 (3B)	35,54 (3B)

CENÁRIO 36A

Success Index = 1,948%
Error Index = 0,07%
Sul/EI = 27,774
1994

Success Index = 1,209%
Error Index = 0,044%
Sul/EI = 27,428
1985

CENÁRIO 41A

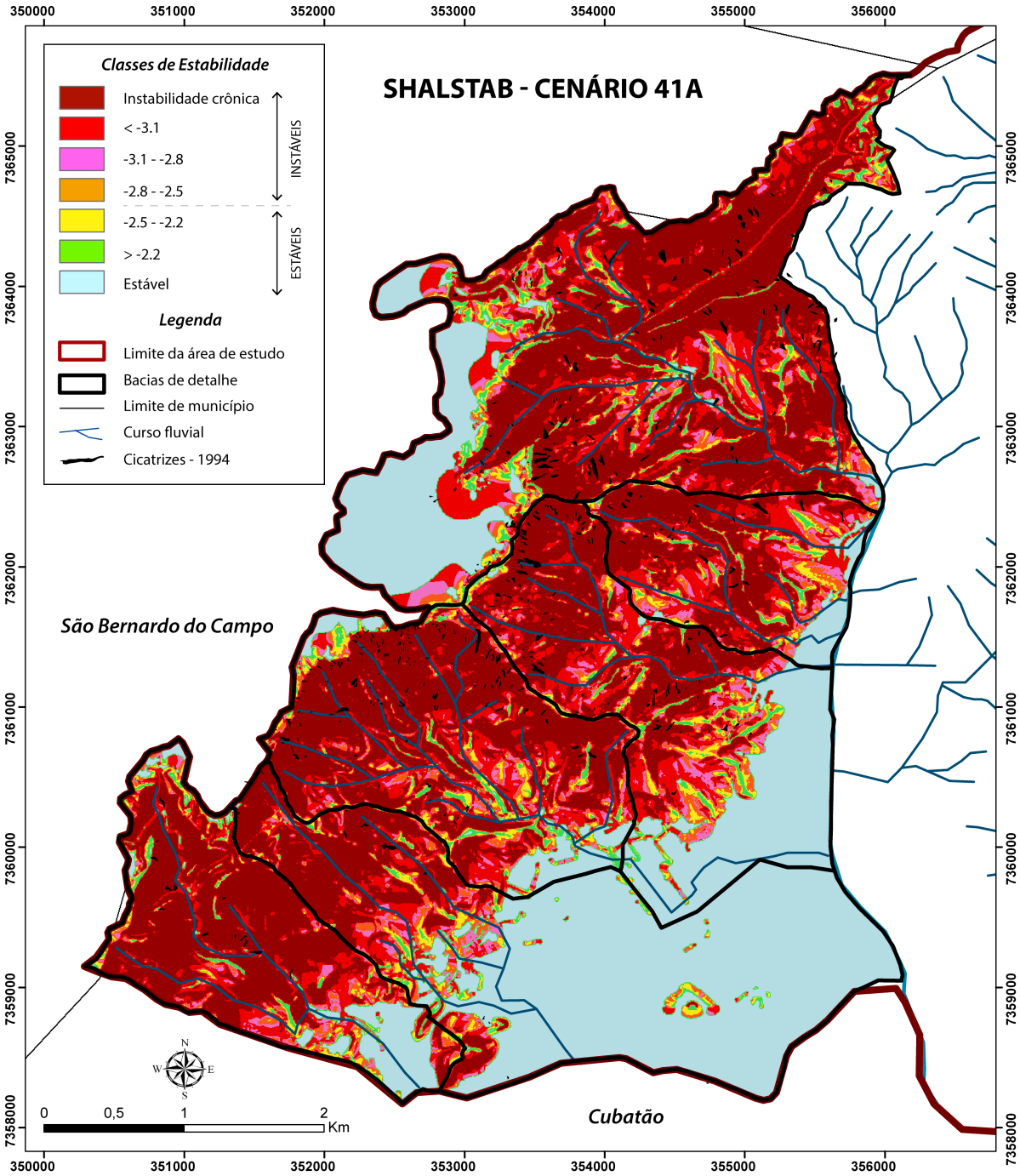
Success Index = 1,754%
Error Index = 0,0565%
Sul/EI = 31,033
1994

Success Index = 1,089%
Error Index = 0,036%
Sul/EI = 30,639
1985

* De acordo com cada cenário modelado pelo SHALSTAB.

Fonte: elaborado pelo autor

Figura 57: Mapa de suscetibilidade obtido a partir dos parâmetros geotécnicos do cenário 41A - SHALSTAB.



Fonte: elaborado pelo autor

6.2.2 SINMAP

Na escala de detalhe, assim como feito com o modelo SHALSTAB, são utilizados os parâmetros obtidos por Wolle (1988) para solos saturados, como feito na escala regional, e os parâmetros obtidos através das amostras coletadas em campo, dentro dos limites das bacias de detalhe (tabela 15). São utilizados somente os valores de T/R calculados para a região, de

acordo com os episódios de chuva de 1994 e 1985. Variação de 20% nos parâmetros de ângulo de atrito e T/R são adotados.

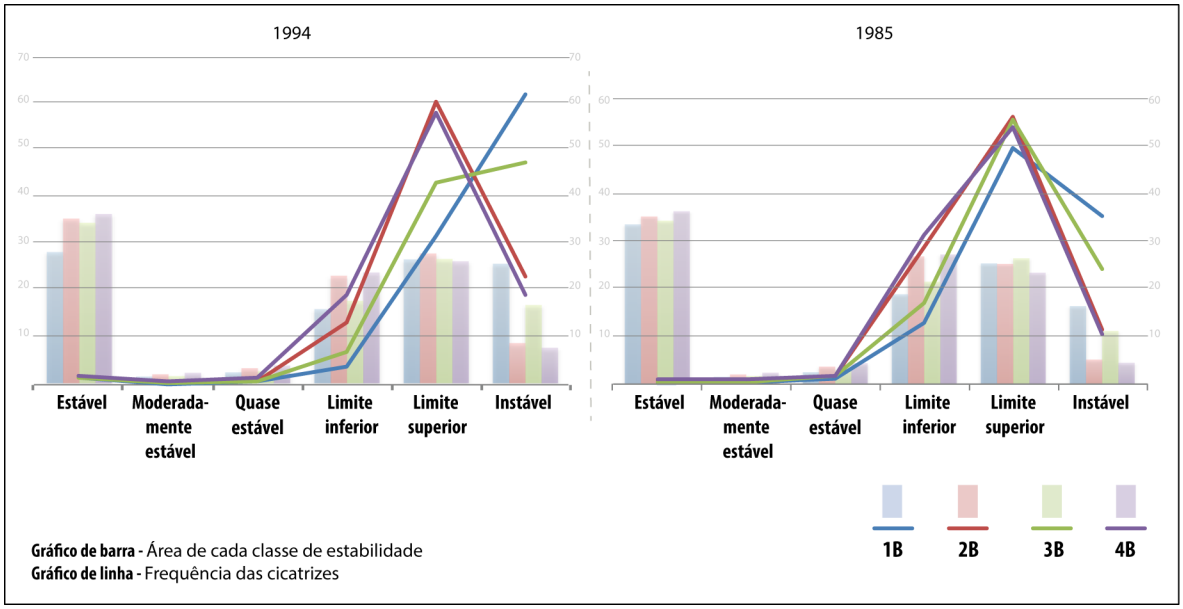
Tabela 13: Parâmetros geotécnicos utilizados na modelagem usando o SINMAP nas bacias da escala de detalhe. Parâmetros obtidos por meio de amostras de solos coletados dentro dos limites das bacias de estudo.

Amostra	Peso específico (Kg/m3)	Coesão adimensional	Ângulo de atrito (º)	T/R (m) 1994	T/R (m) 1985
36A	1450	0 - 0,25	29+/-20%	30+/-20%	76+/-20%
38A	1360	0 - 0,25	0	30+/-20%	76+/-20%
41A	1216	0 - 0,25	28+/-20%	30+/-20%	76+/-20%

Fonte: elaborado pelo autor

Dentre os parâmetros de Wolle (1988), os cenários 1B e 3B se destacam na frequência de cicatrizes em áreas classificados pelo modelo como instáveis (Figura 60), assim como ocorre na escala de 1:50.000. Da mesma forma que no SHALSTAB na escala de 1:50.000, o cenário 3B exibe maior taxa de sucesso e maior razão entre sucesso/erro que o cenário 1B para o ano de 1994, quando se aplica o método de Sorbino *et al.* (2010), e o contrário acontece quando se leva em consideração o ano de 1985 – com o cenário 1B se destacando (figura 61). A figura 62 mostra o mapa de suscetibilidade do cenário 1B, e a figura 63 do cenário 3B.

Figura 58: Concentração de cicatrizes em cada classe de estabilidade ao utilizar os parâmetros geotécnicos de Wolle (1988), na escala de 1:10.000.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 59: Taxa de sucesso e erro, método proposto por Sorbino *et al.* (2010), aplicado nos cenários 1B e 3B, que melhor representam o comportamento médio do solo na região de estudo.

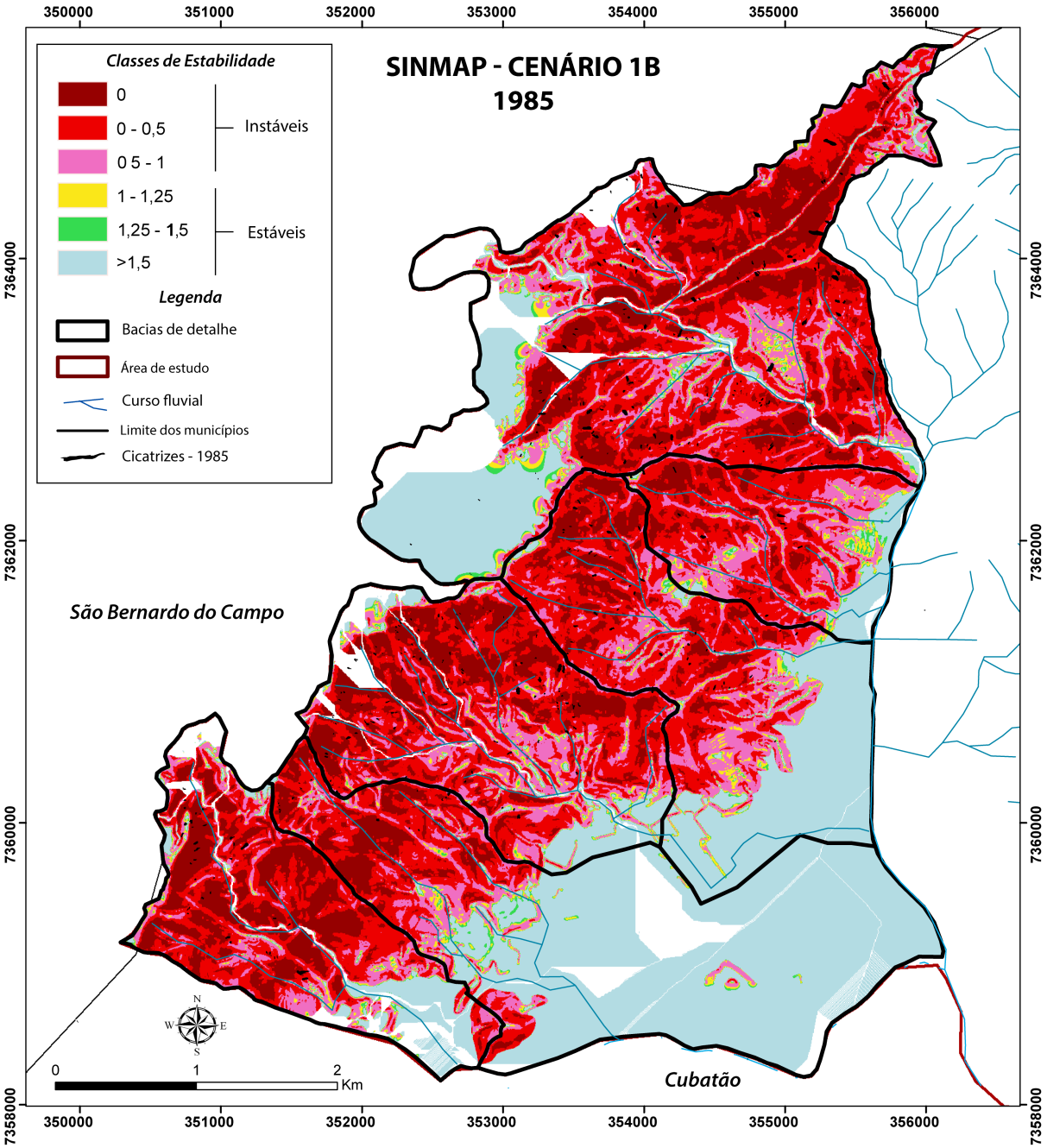
Área da região de estudo	Ano	Área total das cicatrizes	Área média das cicatrizes	No. cicatrizes áreas instáveis*	No. cicatrizes áreas estáveis*	Área instável* (%)	Área estável* (%)
18,8 km^2	1994	2,9 km^2	538,16 m^2	373 (1B) 383 (3B)	9 (1B) 9 (3B)	68,1 (1B) e 61,4 (3B)	31,9 (1B) 38,3 (3B)
	1985	5,7 km^2	338,49 m^2	371 (1B) 368 (3B)	8 (1B) 11 (3B)	61,7(1B) e 60,2 (3B)	38,6 (1B) e 39,8 (3B)

CENÁRIO 1B		CENÁRIO 3B	
Success Index = 1,572%	Success Index = 1,086%	Success Index = 1,790%	Success Index = 1,103%
Error Index = 0,081%	Error Index = 0,0377%	Error Index = 0,067%	Error Index = 0,049%
Sul/El = 19,414	Sul/El = 28,787	Sul/El = 26,753	Sul/El = 22,118
1994	1985	1994	1985

* De acordo com cada cenário modelado pelo SINMAP.

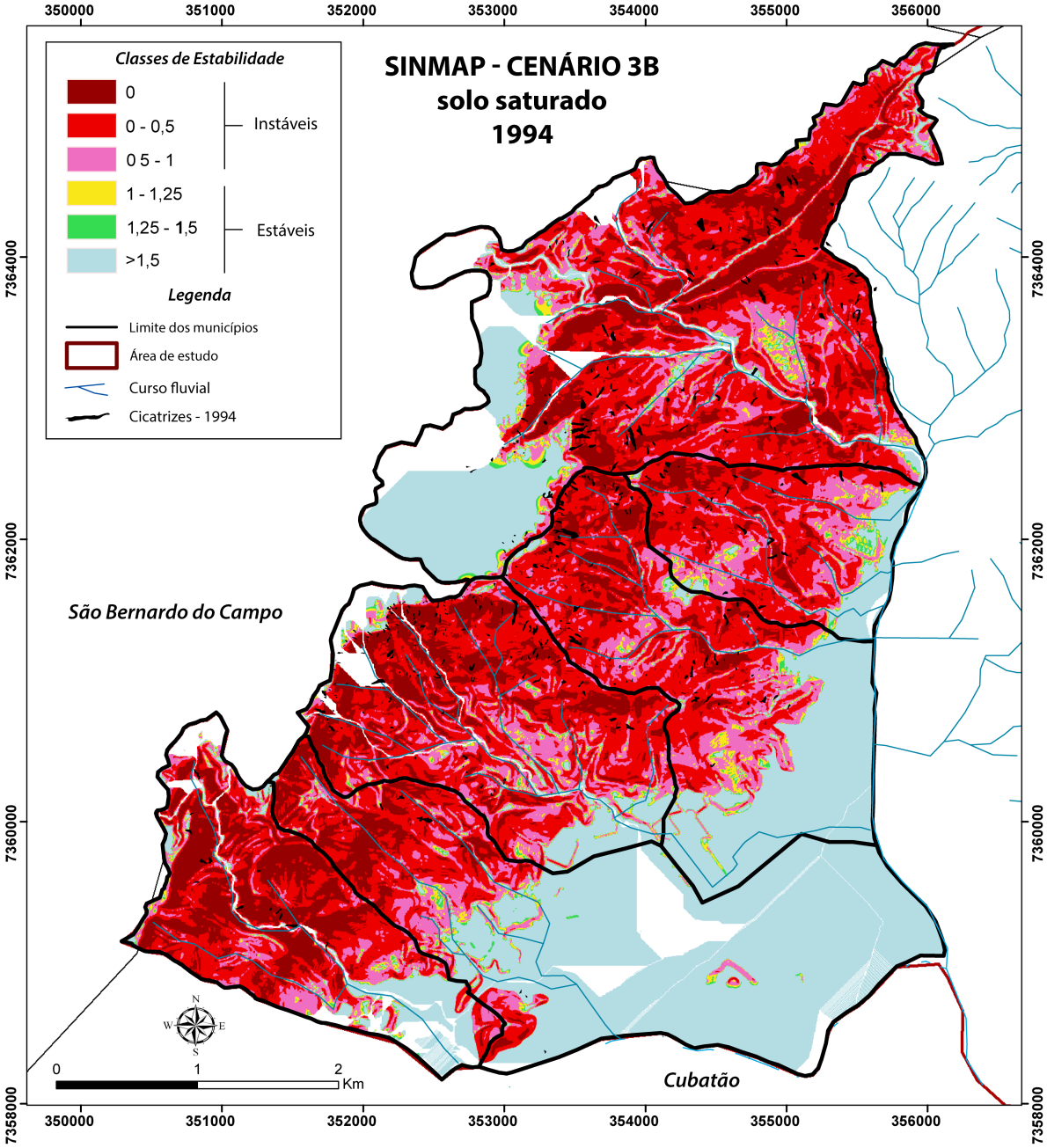
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 60: Mapa de suscetibilidade obtido a partir do cenário 1B, que melhor representa o comportamento geotécnico do solo calibrado a partir do episódio de 1985 - SINMAP.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 61: Mapa de suscetibilidade obtido a partir do cenário 3B, que melhor representa o comportamento geotécnico do solo calibrado a partir do episódio de 1994 - SINMAP.



Fonte: elaborado pelo autor

Já dentre os parâmetros obtidos por meio de ensaios feitos nas amostras coletadas em campo, o cenário 41A mostra-se o mais eficiente na representação das instabilizações nas encostas das bacias de estudo (figura 64). As figuras 65 e 66 mostram os mapas de suscetibilidade obtidos a partir do cenário 41A, calibrados de acordo com os episódios de 1985 e 1994, respectivamente.

Figura 62: Taxa de sucesso e erro, método proposto por Sorbino *et al.* (2006), aplicado nos cenários 36A, 38A e 41A que melhor representam as condições do solo da região.

Área da região de estudo	Ano	Área total das cicatrizes	Área média das cicatrizes	No. cicatrizes áreas instáveis*	No. cicatrizes áreas estáveis*	Área instável* (%)	Área estável* (%)
18,8 km^2	1994	2,9 km^2	538,16 m^2	387 (36A); 393 (38A); 391 (41A)	5 (36A); 0 (38A); 1 (41A)	66,1 (36A); 87,7 (38A); 71,4 (41A)	33,9 (36A); 12,3 (38A); 28,6 (41A)
	1985	5,7 km^2	338,49 m^2	377 (36A); 379 (38A); 378 (41A)	2 (36A); 0 (38A); 1 (41A)		

CENÁRIO 36A

Success Index = 1,680% **Success Index = 1,029%**

Error Index = 0,0423% **Error Index = 0,011%**

SuI/EI = 39,695 **SuI/EI = 96,674**

1994 1985

CENÁRIO 38A

Success Index = 1,286% **Success Index = 0,78%**

Error Index = 0,0% **Error Index = 0%**

SuI/EI = 0 **SuI/EI = 0**

1994 1985

CENÁRIO 41A

Success Index = 1,571% **Success Index = 0,956%**

Error Index = 0,0063% **Error Index = 0,0063%**

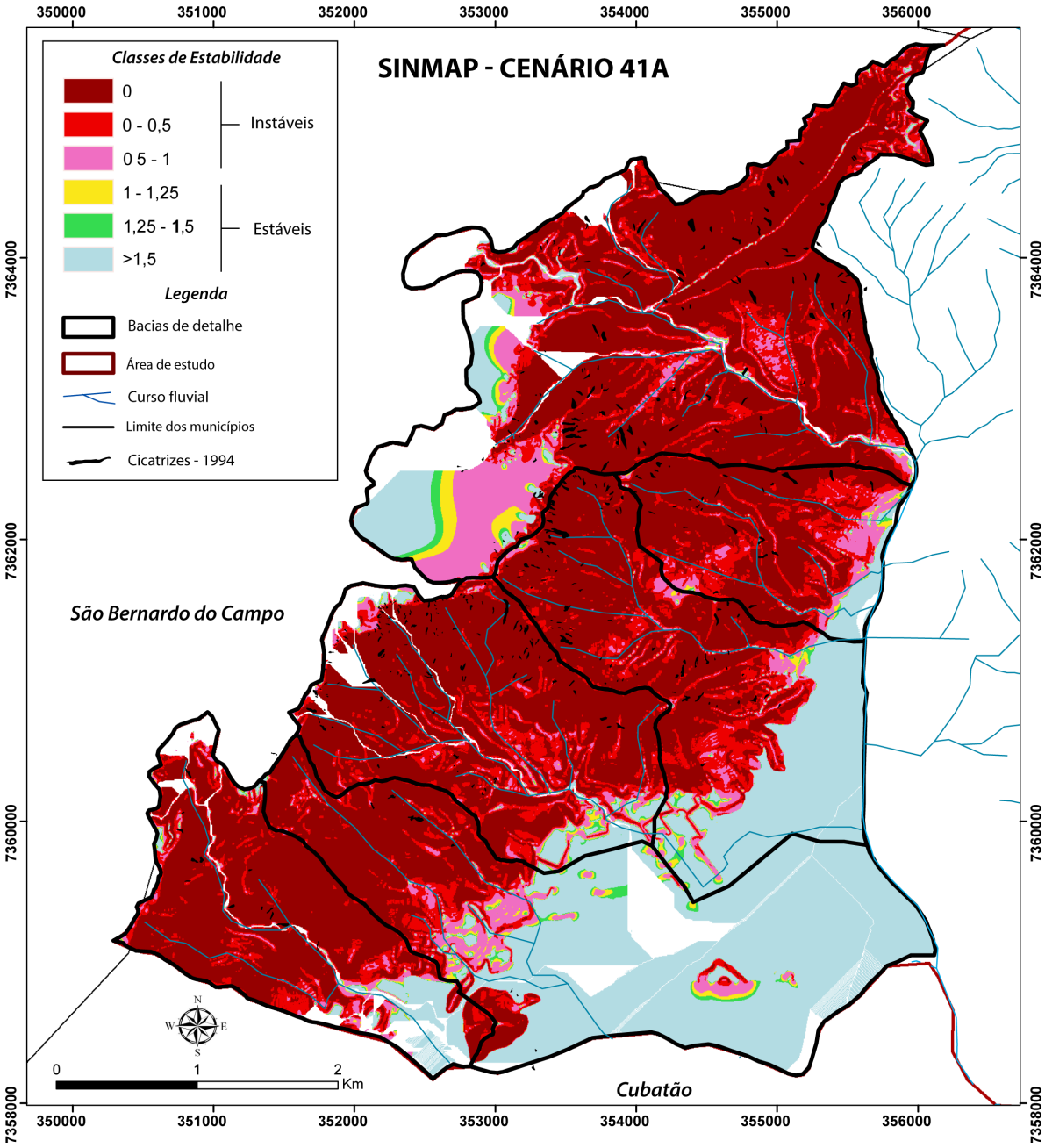
SuI/EI = 156,6 **SuI/EI = 151,4**

1994 1985

* De acordo com cada cenário modelado pelo SINMAP.

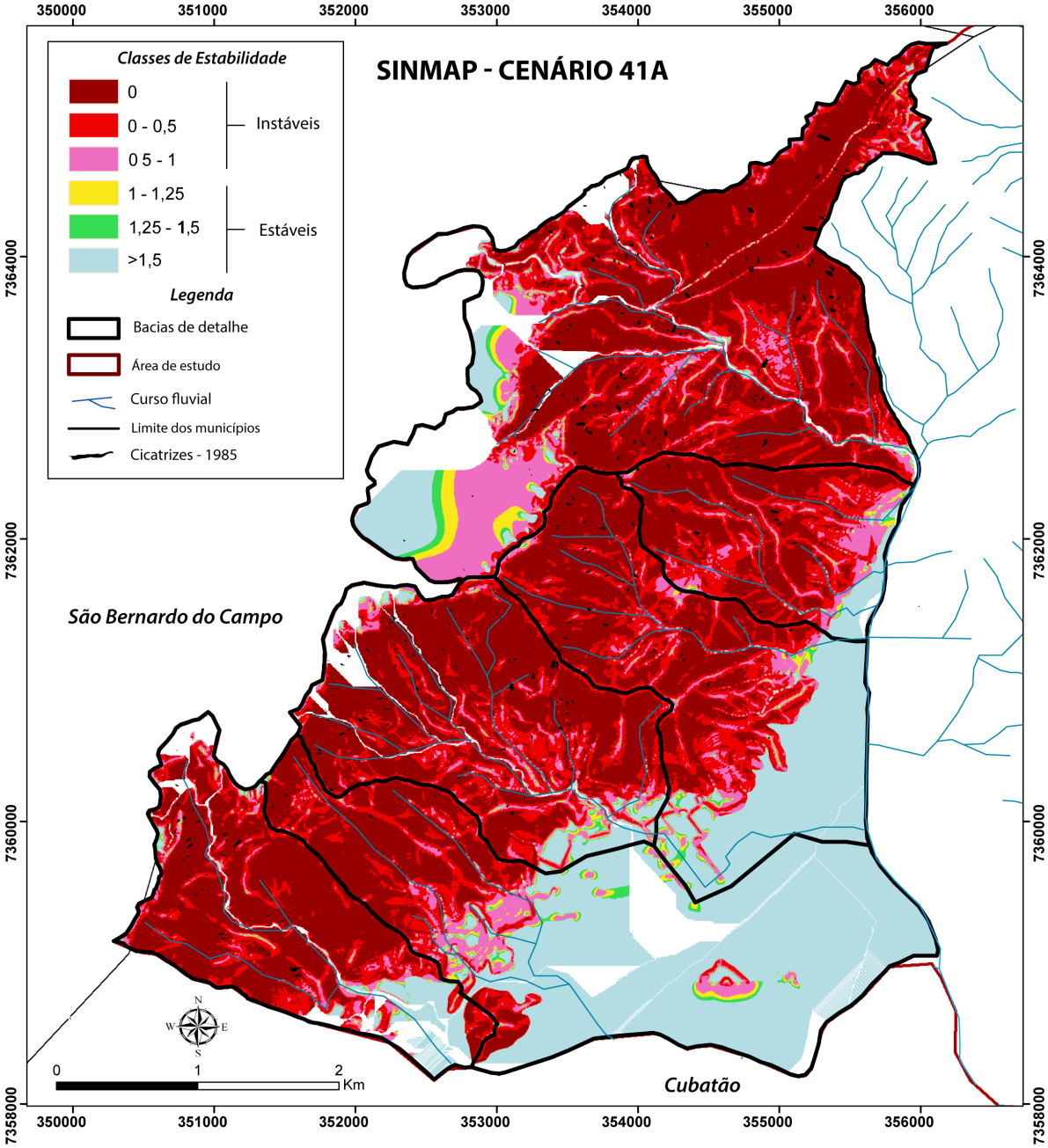
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 63: Mapa de suscetibilidade obtido a partir do cenário 41A, utilizando o parâmetro T/R calculado para o episódio de 1994.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 64: Mapa de suscetibilidade obtido a partir do cenário 41A, utilizando o parâmetro T/R calculado para o episódio de 1985.



Fonte: elaborado pelo autor

7 DISCUSSÃO

7.1 ASPECTOS FISIOGRÁFICOS E CLIMÁTICOS

A partir dos resultados obtidos pela caracterização geológica-geomorfológica, pelo mapeamento de cicatrizes e pela distribuição de chuvas na região, fica evidente a maior suscetibilidade a escorregamentos na vertente norte do rio Mogi, dentro da área de estudo. Como mostrado pela compartimentação fisiográfica, as unidades 4 e 5 estão compreendidas nesta vertente, sendo a unidade 5 a mais suscetível. Essa maior suscetibilidade pode estar relacionada ao impacto direto das chuvas provenientes do Oceano Atlântico na escarpa da unidade 5, sem a barreira orográfica do Bloco Costeiro que a unidade 4 apresenta, onde a unidade 2 está inserida.

Ademais, embora sejam parte do mesmo contexto geológico (Bloco Juquitiba), o relevo da unidade 5 difere bastante do da unidade 4, onde se destacam os anfiteatros coletores das sub-bacias hidrográficas, que podem estar ligados à maior potencialidade de geração de escorregamentos em suas encostas. O maior entalhe fluvial da unidade 5 está, provavelmente, relacionado às maiores taxas de erosão nas encostas dessa unidade, devido aos processos erosivos costeiros e, novamente, às chuvas. Isso se traduz na maior concentração de escorregamentos na região.

A unidade 5 ocupa cerca de 36% do total da área de estudo, sendo a maior das unidades fisiográficas. A maior concentração de cicatrizes nesta unidade, tanto para os episódios de 1985 quanto 1994, é alta mesmo quando as áreas são levadas em consideração, como mostra a figura 32. Como a unidade 5 é sujeita a maiores taxas de erosão, gerando maior de volume de transporte – o que pode estar associado a maior suscetibilidade a movimentos de massa. Mesmo quando as chuvas não estão exatamente concentradas na unidade, como foi o caso do episódio de 1985, a unidade é a mais afetada por escorregamentos.

A maior suscetibilidade a escorregamentos nessa porção da área de estudo também pode estar relacionado à ação antrópica que, por ser mais próxima das indústrias e do centro urbano da cidade, está mais sujeita a sofrer o impacto gerado pela poluição. Essa poluição afeta diretamente o solo e vegetação da região, diminuindo, por consequência, as forças de resistências às instabilizações. A combinação entre ações antrópicas, relevo e pluviometria fazem com que a unidade 5, portanto, seja a unidade mais suscetível ao desenvolvimento de escorregamentos e movimentos de massa.

Outro resultado que chama bastante atenção é a maior concentração de cicatrizes em encostas convexas (figura 23), indo contra a literatura para região que estabelece encostas retilíneas como mais predisponentes a escorregamentos. Essa maior concentração em encostas convexas podem estar relacionados aos depósitos de tálus, espalhados nas encostas da área de estudo, ou ao desenvolvimento não somente de escorregamentos translacionais rasos, mas também de escorregamentos rotacionais – mais profundos. Depósitos de tálus são altamente instáveis, formados por antigas falhas nas encostas, formadas por materiais heterogêneos, frequentemente saturados. Essa maior disponibilidade de materiais em depósitos de tálus pode propiciar o desenvolvimento de escorregamentos rotacionais juntamente com translacionais, logo a maior concentração de escorregamentos em encostas convexas.

O estabelecimento de padrões em processos erosivos, como escorregamentos, em ambientes tropicais úmido é uma tarefa difícil, muitas vezes imperfeita, e deve ser feita com cuidado, especialmente em escala regional como nesta etapa deste estudo. O desencadeamento de escorregamento é controlado, principalmente, pela disponibilidade de material para transporte, saturação do solo e declividade. Forma de encosta não é considerada, portanto, fator determinante no controle de escorregamentos, porém, devido à maior disponibilidade de materiais para transporte e devido aos dados históricos de episódios de escorregamentos anteriores, encostas convexas são consideradas aqui como mais suscetíveis ao desencadeamento de escorregamentos. O principal elemento desencadeador em ambientes tropicais úmidos, no entanto, é a pluviometria.

É inegável o papel da pluviosidade como agente deflagrador de escorregamentos em ambientes tropicais úmidos (TATIZANA *et al*., 1987; PETLEY, 2012; LOPES *et al*., 2007). A definição de valores índices de chuva que podem levar ao desencadeamento de movimentos de massa são úteis no desenvolvimento de sistemas de aviso em áreas predispostas a esses fenômenos (KEEFER *et al.,* 1987; FATHANI *et al.,* 2009; TAKARA E APIP BAGIAWAN. 2009; BAUM E GODT, 2010; CAPPARELLI E VERSACE, 2011). Wolle e Carvalho (1989) defendem que, para a Serra do Mar, chuvas diárias de no mínimo 180 mm podem deflagrar escorregamentos significativos, desde que nas semanas anteriores tenha chovido regularmente. Para Cubatão, Lacerda (2007) e Gramani (2001) definem que para chuvas com intensidades de 70 a 80 mm/h, há o perigo de que ocorra escorregamentos por toda a região, principalmente quando há chuva acumulada. Rodrigues (1992) defende que valores diários acima de 250-300 mm são capazes de desencadear movimentos de massa em qualquer circunstância, desde que esses valores sejam acima de 20% da pluviosidade média mensal.

No episódio de 1985 foram registradas chuvas com intensidade acima de 70 mm/h, com o acumulado em 24h de mais de 200 mm - o que desencadeou milhares de escorregamentos pela região. No evento de 1994 foi registrado chuva com intensidade máxima de 60 mm/h e, embora o limite sugerido por Lacerda (2007) de 70 mm/h não tenha sido atingido, a chuva acumulada em apenas 2 dias (6 e 7) foi acima do que o esperado para todo o mês. A implementação de um sistema de aviso é importante pois é uma ferramenta a mais na garantia da segurança das populações e o monitoramento das chuvas é fundamental na eficiência desses sistemas. Contudo, o estabelecimento de padrões de chuva que podem levar ao desencadeamento de movimentos de massa deve servir apenas como parâmetro de referência, pois muitas vezes chuvas menos intensas acabam desencadeando escorregamentos, como é observado na tabela 12, enquanto chuvas tão ou mais intensas quanto o padrão estabelecido podem não desencadear esses fenômenos. É necessário, portanto, constante acompanhamento pluviométrico e a definição de áreas prioritárias, mais sensíveis a esses fenômenos, é essencial na prevenção de danos socioeconômicos.

A análise de como o relevo, os processos erosivos e o clima interagem é muito importante na definição de áreas mais sensíveis a escorregamentos, especialmente em trabalhos de escala regional. A compartimentação fisiográfica, fruto dessa análise combinada, é excelente plataforma base para estudos detalhados pois é funciona como guia objetivo e prático na identificação de áreas mais sensíveis. Dentro da bacia do rio Mogi e Perequê, a unidade 5 emerge como a mais suscetível ao desenvolvimento de escorregamentos, além de apresentar grande risco à população e indústrias instalados no município. A presença da refinaria Presidente Bernardes, da hidroelétrica Henry Borden, além dos gasodutos da Petrobrás, fazem com que estudo mais detalhados nesta porção da área de estudo sejam de grande importância. Desta forma, os estudos em escala de detalhe se concentraram nessa região.

7.2 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MODELOS

Na análise comparativa dos resultados dos modelos SHALSTAB e SINMAP, é aplicada a matriz de contingência, em ambas as escalas, nos cenários geotécnicos mais representativos da região: 1B e 13A (escala regional); 3B e 41A (escala de detalhe). A figura 67 mostra a matriz de contingência dos resultados gerados a partir do cenário 1B, em que o SHALSTAB apresenta maior acurácia (cicatrizes de escorregamentos dentro de áreas instáveis) e, ao mesmo tempo, menor taxa de falso positivo (áreas instáveis sem cicatrizes de

escorregamentos). Resultado semelhante é obtido ao comparar os resultados utilizando o cenário 13A (figura 68).

Figura 65: Matriz de contingência dos resultados dos modelos SHALSTAB e SINMAP a partir do cenário 1B. SHALSTAB apresenta resultados mais acurados, sem grande estimação de áreas instáveis.

SCENARIO 1B

VP 233910 (m^2)	**FN** 62037 (m^2)	**VP** 141218 (m^2)	**FN** 52822 (m^2)
FP 38228030 (m^2)	**VN** 48376023 (m^2)	**FP** 38320722 (m^2)	**VN** 48385238 (m^2)
1985		1994	
SHALSTAB			

VP 501720 (m^2)	**FN** 24747 (m^2)	**VP** 268961 (m^2)	**FN** 19943 (m^2)
FP 56330880 (m^2)	**VN** 30067327 (m^2)	**FP** 56998139 (m^2)	**VN** 29612957 (m^2)
1985		1994	
SINMAP			

	SHALSTAB		*SINMAP*	
	1985	**1994**	**1985**	**1994**
Acurácia (VP + VN / P + N)	0,559	0,558	0,352	0,344
Precisão (VP / VP + FP)	0,006	0,004	0,009	0,005
Taxa de Verdadeiro Positivo (VP / P)	0,790	0,728	0,953	0,931
Taxa de Falso Positivo (FP / N)	0,441	0,442	0,65	0,66
TVP / TFP	**1,791**	**1,647**	**1,462**	**1,415**

Fonte: elaborado pelo autor

Convencionalmente, modelos determinísticos, como o SHALSTAB, são apontados como mais adequados quando aplicados em escalas de detalhe, como encostas localizadas e pequenas bacias hidrográficas, enquanto modelos estocásticos mais adequados em escala regional, como a da primeira etapa deste estudo. A tabela 16 mostra, de acordo com Aleotti e Chowdhury (1999), as vantagens e desvantagens de ambos os modelos estocásticos e determinísticos e sua melhor escala de trabalho. Modelos estocásticos, em teoria, têm melhor performance em escala regional pois permite variação em seus parâmetros de entrada com o objetivo de representar as heterogeneidades no comportamento geotécnico do solo, que não é constante – principalmente em climas tropicais.

Figura 66: Matriz de contingência dos resultados obtidos pelos modelos SHALSTAB e SINMAP a partir do cenário 13A. SHALSTAB apresenta maior frequência de cicatrizes em áreas instáveis (acurácia), ao mesmo tempo que não subestima áreas instáveis (menor taxa de falso positivo).

CENÁRIO 13A

VP 284082 (m^2)	FN 11865 (m^2)	**VP** 178948 (m^2)	FN 15092 (m^2)
FP 58877438 (m^2)	**VN** 27726615 (m^2)	FP 58982572 (m^2)	**VN** 27723388 (m^2)
1985		1994	
SHALSTAB			

VP 516636 (m^2)	FN 9831 (m^2)	**VP** 277585 (m^2)	FN 10241 (m^2)
FP 6308423364 (m^2)	**VN** 23800769 (m^2)	FP 62811815 (m^2)	**VN** 23800359 (m^2)
1985		1994	
SINMAP			

	SHALSTAB		*SINMAP*	
	1985	1994	1985	1994
Acurácia (VP + VN / P + N)	0,322	0,321	0,004	0,277
Precisão (VP / VP + FP)	0,0048	0,00302	0,0008	0,0044
Taxa de Verdadeiro Positivo (VP / P)	0,959	0,922	0,996	0,964
Taxa de Falso Positivo (FP / N)	0,679	0,680	0,981	0,725
TVP / TFP	**1,412**	**1,356**	**0,985**	**1,329**

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 14: Vantagens e desvantagens de modelos determinísticos e estocásticos e suas respectivas adequações de acordo com a escala de trabalho.

Método	**Análise**	**Vantagens**	**Desvantagens**	**Escala**	
				Detalhe	**Regional**
Indireto	Probabilístico	Permite a consideração de diferentes incertezas; Quantitativo em objetivo; Objetivo em escopo e metodologia; Fornece entradas que não são possíveis em modelos determinísticos	A distribuição de probabilidade dificulta identificar áreas de baixa suscetibilidade e risco.	Restrito	Adequado
	Determinístico	Objetivo em metodologia;	A necessidade de conhecer o comportamento geotécnico da	Adequado	Restrito

		Quantitativo em alcance; Necessita de investigações geotécnicas de detalhe	área de estudo em detalhe; Não leva em consideração variações no comportamento geotécnico do solo.		

Fonte: Aleotti e Chowdhury (1999)

No entanto, as modelagens com o SINMAP na região de estudo provaram não ser tão efetivos na representação de falhas na encosta como o SHALSTAB, apresentando resultados superestimados (alta taxa de falso positivo), que não é representativo do que o acontece naturalmente nas encostas. O SHALSTAB, independentemente do cenário geotécnico utilizado na comparação, apresentou respostas mais acuradas, e desta forma é o mais representativa para a região na escala regional.

Na escala de detalhe, resultado semelhante ao da escala regional foi obtido. As figuras 69 e 70 mostram a comparação entre os resultados obtidos pelos modelos a partir dos cenários 3B e 41A, respectivamente. Em ambas as comparações, o SHALSTAB emerge novamente como o mais acurado e o com menor estimação de áreas instáveis, evidenciado pela menor taxa de falsos positivos. O SINMAP, apesar de apresentar maior taxa de verdadeiros positivos (cicatrizes em áreas instáveis), também apresenta maior taxa de falso positivo, o que indica superestimação por parte do modelo.

A melhor performance do SHALSTAB quando aplicado em escala de detalhe já era esperado pois, como mostrado nos trabalhos de Michel et al. (2014); Andriola *et al*. (2009) e Meisina e Scarabelli (2007), o modelo se sai melhor que o SINMAP quando aplicado em bacias localizadas, apresentando resultados mais satisfatórios. Desta forma, o modelo de base física que melhor se aplica à área de estudo, dentre o SHALSTAB e o SINMAP, é o SHALSTAB pois foi capaz de melhor representar as instabilizações nas encostas da região, em ambas escala regional e escala de detalhe. Uma grande deficiência do SHALSTAB, no entanto, é a não incorporação de parâmetros pluviométricos customizáveis em suas modelagens, como o SINMAP faz a partir do parâmetro T/R. A chuva é o principal elemento desencadeador de escorregamentos em ambientes tropicais úmidos e, portanto, deve ser levada em consideração nas simulações.

7.3 INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS GEOTÉCNICOS NAS MODELAGENS

De acordo com a taxa de sucesso e erro, os cenários 13A e 1B para a escala regional melhor representam o comportamento geotécnico médio da região frente às instabilizações,

enquanto que na escala de detalhe os cenários 41A e 3B são os mais representativos. Os cenários 13A e 41A, especialmente, exibem alta taxa de sucesso e baixa taxa de erro, como foi mostrado nas figuras 52 e 64. Essa performance, no entanto, está intimamente relacionado à superestimação de áreas instáveis, que não é levada em consideração no método proposto por Sorbino et al. (2010). Ao analisar as matrizes de contingência do cenários 13A e 41A (figuras 68 e 70) com relação às matrizes dos cenários 1B e 3B (figuras 67 e 69), verifica-se que os primeiros apresentam alta taxa de falsos positivos (áreas classificadas como instáveis pelos modelos, no entanto sem cicatrizes de escorregamentos) sugerindo, assim, resultados superestimados. Resultados superestimados resultam em baixa taxa de erro do método proposto por Sorbino et al. (2010), logo suas melhores performances. A superestimação também pode ser observado por meio dos mapas de suscetibilidades dos cenários 13A e 41A, onde grande parte das encostas da região são consideradas como instáveis – o que não é observado naturalmente quando em estudo de estabilidade do talude. Resultados superestimados não são compatíveis com o que naturalmente ocorre na natureza, consequentemente não satisfazem os objetivos da análise de suscetibilidade a escorregamentos de uma região utilizando modelos de bases físicas.

A superestimação dos cenários geotécnicos obtidos a partir de amostras coletadas na região está provavelmente ligado à fidelidade dos desses dados, que devido à indisponibilidades técnicas os parâmetros de coesão e ângulo de atrito foram correlacionados indiretamente, diferentemente dos dados geotécnicos obtidos de Wolle (1988). Esses dois parâmetros são fundamentais no cálculo do Fator de Segurança da encosta, parte fundamental das equações usadas nos modelos, e, portanto, requerem grande acurácia.

Embora a qualidade dos parâmetros de entrada não tenha afetado na comparação da performance dos modelos, com o SHALSTAB se destacando frente ao SINMAP independente do cenário adotado, é fundamental que se garanta que esses parâmetros sejam representativos da área de estudo. Do contrário, o principal objetivo da aplicação de modelos de bases físicas é perdido pois os resultados não se aproximam do real potencial do desencadeamento de movimentos de massa. Para uma análise de suscetibilidade de uma região, a aplicação de parâmetros geotécnicos representativos é tão importante quando a escolha do melhor modelo para a região.

Figura 67: Comparação entre os resultados dos modelos SHALSTAB e SINMAP utilizando o cenário 3B. SHALSTAB apresenta maior acurácia em menor área instável.

SCENARIO 3B - 10:000

	VP	FN	FP	VN
SHALSTAB 1985	214587 (m^2)	81360 (m^2)	6608109,3 (m^2)	11931325,75 (m^2)
SHALSTAB 1994	131516 (m^2)	62524 (m^2)	6691180,3 (m^2)	11927983,75 (m^2)
SINMAP 1985	124752 (m^2)	3729 (m^2)	11180679,2 (m^2)	7470625,83 (m^2)
SINMAP 1994	206437 (m^2)	4851 (m^2)	11324351,6 (m^2)	7244146,4 (m^2)

	SHALSTAB		*SINMAP*	
	1985	**1994**	**1985**	**1994**
Acurácia (VP + VN / P + N)	0,644	0,640	0,404	0,397
Precisão (VP / VP + FP)	0,031	0,02	0,011	0,018
Taxa de Verdadeiro Positivo (VP / P)	0,725	0,678	0,971	0,977
Taxa de Falso Positivo (FP / N)	0,358	0,360	0,599	0,609
TVP / TFP	**2,028**	**1,883**	**1,619**	**1,602**

Fonte: elaborado pelo autor

Desta forma, os cenários geotécnicos obtidos por Wolle (1988) representam com maior fidelidade o comportamento geotécnico dos solos da região, com o cenário 1B se destacando na escala regional e o cenário 3B na escala de detalhe.

7.4 INFLUÊNCIA DA ESCALA NOS RESULTADOS DAS MODELAGENS

Ao comparar os resultados das modelagem a partir do cenário 1B, na escala regional, com os resultados cenário 3B, escala de detalhe, utilizando o SHALSTAB, fica evidente que as análises feitas em escala de maior detalhe apresentam maior eficiência na representação da estabilidade do talude. A figura 71 mostra a comparação dos resultados obtidos nas diferentes escalas, por meio da matriz de contingência, onde fica evidente que nas modelagens de escala de detalhe (cenário 3B), há maior acurácia, precisão, frequência de cicatrizes em áreas instáveis (verdadeiro positivo) e menor estimação de áreas instáveis pelo modelo (menor taxa de falsos positivos).

Figura 68: Comparação entre os resultados dos modelos SHALSTAB e SINMAP utilizando o cenário 41A. SHALSTAB apresenta maior acurácia em menor área instável.

CENÁRIO 41A- 10:000

	VP	FN	FP	VN
SHALSTAB 1985	131871 (m²)	2373 (m²)	11973579,1 (m²)	6671963,09 (m²)
SHALSTAB 1994	212366 (m²)	3773 (m²)	11893084,1 (m²)	6670563,09 (m²)
SINMAP 1985	128142 (m²)	339 (m²)	13280625,2 (m²)	5370679,91 (m²)
SINMAP 1994	210749 (m²)	539 (m²)	13198018,2 (m²)	5370479,91 (m²)

	SHALSTAB		*SINMAP*	
	1985	**1994**	**1985**	**1994**
Acurácia (VP + VN / P + N)	0,362	0,367	0,293	0,297
Precisão (VP / VP + FP)	0,011	0,018	0,009	0,0157
Taxa de Verdadeiro Positivo (VP / P)	0,982	0,983	0,997	0,997
Taxa de Falso Positivo (FP / N)	0,642	0,641	0,712	0,711
TVP / TFP	**1,523**	**1,534**	**1,401**	**1,403**

Fonte: elaborado pelo autor

Isso mostra, portanto, que estudos de análise de suscetibilidade a escorregamentos a partir de modelos de bases físicas são mais representativos do comportamento natural das encostas quando utilizados em escala de detalhe. No entanto, sua aplicação escala regional também possui grande importância, principalmente na identificação de áreas mais suscetíveis a escorregamentos em estudos preliminares de planejamento ambiental e também como auxílio em análises preliminares de risco em uma região mais ampla.

Existem poucos estudos aplicando os modelos SHALSTAB e SINMAP em escala regional e isto está diretamente relacionado a essa perda de eficiência do modelo em escalas de menor detalhe. No entanto, é interessante a avaliação dos resultados destes modelos em diferentes escalas e os resultados obtidos pelos modelos neste estudo foram bastante satisfatórios na análise da suscetibilidade a escorregamentos nas bacias dos rios Mogi e

Perequê. Análises em escala de detalhe, porém, devem ser escolhidas a escalas mais regionais devido à maior confiabilidade dos resultados.

Figura 69: Comparação da performance do modelo SHALSTAB nas diferentes escalas de trabalho deste estudo. Em escala de maior detalhe, o modelo apresenta maior acurácia, precisão, frequência de cicatrizes em áreas instáveis e menor superestimação de áreas instáveis.

COMPARAÇÃO ENTRE ESCALAS

1B (1:50000) 1985		1B (1:50000) 1994		3B (1:10000) 1985		3B (1:10000) 1994	
VP 1373,6 (m^2)	FN 1594,6 (m^2)	VP 807,85 (m^2)	FN 1118,15 (m^2)	VP 873,8 (m^2)	FN 472,6 (m^2)	VP 1417,75 (m^2)	FN 727,6 (m^2)
FP 18013,6 (m^2)	VN 63018,2 (m^2)	FP 18579,35 (m^2)	VN 63494,65 (m^2)	FP 3201,46 (m^2)	VN 14232,14 (m^2)	FP 2657,51 (m^2)	VN 13977,14 (m^2)

	1B		*3B*	
	1985	**1994**	**1985**	**1994**
Acurácia (VP + VN / P + N)	0,767	0,766	0,804	0,820
Precisão (VP / VP + FP)	0,071	0,042	0,214	0,348
Taxa de Verdadeiro Positivo (VP / P)	0,463	0,419	0,649	0,661
Taxa de Falso Positivo (FP / N)	0,222	0,226	0,184	0,160
TVP / TFP	**2,08**	**1,853**	**3,534**	**4,137**

Fonte: elaborado pelo autor

7.5 SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS NA REGIÃO

A partir dos resultados da análise da suscetibilidade a escorregamentos na escala de 1:10.000, as bacias 1 e 4 (Bacia do rio Perequê e Rio das Pedras, respectivamente) emergem como áreas prioritárias em estudos de maiores detalhes, pois, além da alta suscetibilidade a escorregamentos, apresentam risco alto à população e indústrias da região, especialmente a bacia 4. A tabela 17 mostra a frequência das cicatrizes de acordo com as bacias, onde se destacam as bacias 1 e 4 com as maiores densidades de acordo com o mapeamento dos eventos de 1985 e 1994. Análises em escalas de maior detalhe são esperadas de gerar resultados mais precisos quanto à predição do comportamento dos escorregamentos.

Tabela 15: Frequência de cicatrizes de acordo com bacia hidrográfica da etapa de escala de detalhe

Bacia	**Área (km2)**	**1985**		**1994**	
		No. De cicatrizes	**Densidade (cicatrizes/área)**	**No. De cicatrizes**	**Densidade (cicatrizes/área)**
6	1,9	30	15,79	27	14,2
5	4,4	12	2,72	17	3,86
4	**2,6**	**80**	**34,6**	**100**	**38,46**
3	3	35	11,7	70	23,3
2	1,2	11	9,16	30	25
1	**5,7**	**105**	**18,42**	**130**	**22,8**

Fonte: elaborado pelo autor

8 CONCLUSÕES

A partir do resultados obtidos neste estudo foi possível identificar as áreas mais suscetíveis a escorregamentos nas bacias hidrográficas de estudo, bem como a definição do modelo que melhor se aplica à região e o efeito da escala nas modelagens. A definição de áreas prioritárias para estudos de detalhe teve como base a compartimentação fisiográfica da região e a aplicação dos modelos de bases físicas na escala de 1:50.000. A compartimentação fisiográfica foi baseada na análise das características geológicas e geomorfológicas da região, além da análise do comportamento das cicatrizes de escorregamento e da distribuição de chuva. A partir da compartimentação, que separou a área de estudo em seis unidades, a unidade 5 mostra-se a mais suscetível ao desenvolvimento de escorregamentos e, desta forma, foi escolhida para caracterizações em maior de detalhe. A maior suscetibilidade da unidade 5 está diretamente ligada ao comportamento das chuvas da região e da influência antrópica, principalmente na forma de poluição do ar, que diminui as forças de resistências do solo e vegetação da região, favorecendo o desenvolvimento de movimentos de massa.

O modelo de base física SHALSTAB mostrou-se mais eficiente na representação da estabilidade da encosta na região em ambas as escalas de trabalho, em todos os cenários analisados neste estudo. Convencionalmente, modelos determinísticos são mais adequados em escalas de detalhe enquanto modelos estocásticos, como SINMAP, mais adequados em escala regional. No entanto, o SHALSTAB em escala regional mostrou resultados mais acurados e sem grandes superestimações de áreas instáveis, diferentemente do SINMAP. Na escala de detalhe, o SHALSTAB também mostrou resultados mais acurados que o SINMAP. Matrizes de contingência foram utilizadas na determinação do melhor modelo nas diferentes escalas e seu uso mostrou-se bastante satisfatório, pois foi capaz de avaliar objetivamente diferentes critérios utilizados na avaliação da performance dos modelos, como frequência de cicatrizes em áreas instáveis (verdadeiro positivo), taxa de estimação de áreas instáveis (falso positivo) e acurácia.

É notável a influencia de parâmetros geotécnicos do solo nos resultados das modelagens, especialmente os parâmetros de coesão e ângulo de atrito. Wolle (1988) em suas amostras realizou ensaios diretos de coesão e ângulo de atrito, resultando em respostas mais representativas do comportamento geotécnico médio do solo da região de estudo nas escalas de trabalho, apresentando resultados com maior acurácia (cicatrizes dentro de áreas instáveis) e menor taxa de falso positivo (áreas instáveis sem cicatrizes). Nos cenários modelados a partir dos ensaios geotécnicos feitos a partir de amostras coletadas em campanhas de campo, embora a taxa de verdadeiros positivos (cicatrizem em áreas instáveis) seja alta, a taxa de

falso positivo também é muito alta, indicando superestimação de áreas suscetíveis a instabilizações. Isto, muito provavelmente, está relacionado à falta de ensaios diretos de coesão e ângulo de atrito, essenciais na caracterização geotécnica dos solos. A qualidade dos parâmetros de entrada no SHALSTAB e SINMAP é fundamental para que se garanta resultados confiáveis e representativos.

Assim como a coesão e o ângulo de atrito, o Fator T/R (transmissividade do solo sobre a recarga), é de extrema importância na modelagem utilizando o SINMAP, afetando diretamente a eficiência do modelo. Como este estudo mostrou, ao utilizar a razão T/R calculada a partir dos dados de chuva específicos para a área de estudo, o modelo gera resultados mais acurados do que ao utilizar o valor T/R padrão. O método de taxa de sucesso e erro, proposto por Sorbino et al. (2010), foi responsável pela avaliação dos diferentes cenários geotécnicos e da performance de acordo com os diferentes parâmetros T/R, mostrando-se eficaz na avaliação das performances. No entanto, esse método não mostra com clareza se houve ou não superestimação de áreas instáveis nos resultados gerados pelos modelos, diferentemente da matriz de contingência.

Embora a diferença e variação entre os cenários geotécnicos do solo não tenham afetado o resultado da análise comparativa dos modelos, é imprescindível que se garanta parâmetros de entrada de qualidade, que representem de forma mais fiel possível o que ocorre na paisagem natural durante episódios de escorregamentos. Para uma análise de suscetibilidade de uma região, a aplicação de parâmetros geotécnicos representativos é tão importante quando a escolha do melhor modelo para a região.

O papel das chuvas no desencadeamento dos escorregamentos é inegável e o modelo SHALSTAB, por não permitir a customização dos parâmetros de chuva em suas modelagens, apresenta grande desvantagem nesse aspecto. Embora tenha se mostrado melhor, comparado ao SINMAP, na representação das instabilizações na área de estudo, é essencial considerar o papel das chuvas ao se analisar a suscetibilidade a escorregamentos de uma área declivosa. O estabelecimento de valores índices de chuva que podem levar ao desenvolvimento de escorregamentos, baseando-se nas peculiaridades climáticas de cada região, é importante no monitoramento de áreas de risco e no desenvolvimento de ferramentas de aviso a desastres naturais, embora estas sejam ainda incipiente no país e a tarefa de prever a ocorrência de escorregamentos se mostre ainda imperfeita, devido aos diversos e complexos fatores que controlam a estabilidade da encosta.

Por fim, a influência da escala nas modelagens é mostrada a partir da comparação entre os resultados obtidos por meio do cenário 1B, escala regional, e 3B, escala de detalhe,

utilizando o modelo SHALSTAB. Quanto maior o nível de detalhe, maior é a qualidade da previsão de áreas instáveis, atestada pela maior acurácia nos resultados e maior frequência de cicatrizes em menor porcentagem de área instável. A aplicação de modelos de bases físicas em escala regional é importante, não somente por ter poucos estudos nessa escala, mas também como auxílio em estudos preliminares de planejamentos ambientais e análises de risco. Análises em escala de detalhe, no entanto, devem ser escolhidas priorizadas devido à maior confiabilidade dos resultados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRIOLA, P et al. A comparison between physically based models and a semiquantitative methodology for assessing susceptibility to flowslides triggering in pyroclastic deposits of Southern Italy. **Geogr. Fisica Dinam. Quat**, v. 32, p. 213-26, 2009.

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. Parallelization of the TRIGRS model for rainfall-induced landslides using the message-passing interface. **Environmental Modeling & Software**, v. 81, p. 122-135, 2016.

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. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: **CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS - COBRAE**, 1, 1992, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: 1992, p.721-733.

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. p. 166. Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2001

BAUM, R.L.; SAVAGE, W.Z.; GODT, J.W. **TRIGRS- a Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-stability Analysis**. Open-File Report, p. 35, 2002

BAUM, R.L.; SAVAGE, W.Z.; GODT, J.W. **TRIGRS- a Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-stability Analysis**. Open-File Report, p. 75, 2008

BAUM, R.L., GODT, J.W. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. **Landslides** v.7, p. 259–272, 2010.

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.

BIASI, M. D. Cartas de declividade: confecção e utilização. **Geomorfologia**, São Paulo, v. 21, p. 8–13, 1970.

BOGAARD, T.A., GRECO, R. Landslide hydrology: from hydrology to pore pressure. **WIREs Water,** 2015.

CAPPARELLI, G. AND VERSACE, P. FLaIR and SUSHI: two mathematical models for early warning of landslides induced by rainfall. **Landslides**, v.8, p.67–79, 2011.

CERRI, L. E. S.; AKIOSSI, A.; AUGUSTO FILHO, O.; ZAINE, J. E. Cartas e mapas geotécnico de áreas urbanas: reflexões sobre as escalas de trabalho e proposta de elaboração com o emprego do método do detalhamento progressivo. In: **Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**. [S.l.: s.n.], 1996. v. 8, p. 537–548

CHANG, C. W.; LIN, P. S.; TSAI, C. L. Estimation of sediment volume of debris flow caused by extreme rainfall in Taiwan. **Engineering Geology**, v. 123, n. 1–2, p. 83–90, 2011.

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

CLAESSENS, L.; HEUVELINK, G.B.M.; SCHOORL, J.M.; VELDKAMP, A. DEM resolution effects on shallow landslide hazard and soil redistribution modeling. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 30, n. 4, p. 461-477, 2005

CROSTA, G. Introduction to the special issue on rainfall-triggered landslides and debris flows. **Engineering Geology**, v. 73, n. 3-4, p. 191-192, 2004

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

CRUDEN, D. M. A simple definition of a landslide. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology - Bulletin de l'Association Internationale de Geologie de l'Ingenieur**, v. 43, n. 1, p. 27–29, 1991.

DAVIS, C.; BORGES, K.; LAENDER, A. OMT-G: An object-oriented data model for geographic applications. **GeoInformatica**, 3, 2002.

DHAKAL, A. S.; R. SIDLE. Long-term modeling of landslides for different forest management practices. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 28, p.853-868, 2003.

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

DIETRICH, W. E.; ASUA, R.R.; TRSO, M. **A validation study of the shallow slope stability model, SHALSTAB, in forested lands of Northern California**. Department of Geology and Geophysics University of California, Berkeley, 1998.

DIETRICH, W.E.; BELLUGI, D.; ASUA, R. Validation of the shallow landslide model, SHALSTAB, for forest management**.** In: WIGMOSTA, M.S.; BURGES, S.J. (Eds.) **Land use and watersheds:**

human influence on hydrology and geomorphology in urban and forest areas. AGU, Washington DC, 2001,vol 2, p. 195–227

DOMINGUES, A.J.P *et al.* Serra da Araras - Os Movimentos coletivos do solo e aspectos da flora. **Revista Brasileira de Geografia**. v.3, p.3-51, 1971.

DOURADO F, ROIG H. **Mapas de susceptibilidade a escorregamentos rasos, usando os modelos shalstab e sinmap, da bacia do rio Paquequer-Teresópolis–rj**. Caderno de Estudos Geoambientais-CADEGEO. 2014 Apr 15;4(1).

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

FALEIROS, F. M.; FERRARI, V. C.; COSTA, V. S.; CAMPANHA, G. A. C. Geoquímica e petrogênese de metabasitos do grupo Votuverava (Terreno Apiaí, Cinturão Ribeira Meridional): evidências de uma bacia retroarco calimiana. **Geologia USP, Série científica** [online], v.11, n.2, p. 135-155, 2011

FATHANI, T. F., KARNAWATI, D., SASSA, K., FUKUOKA, H., AND HONDA, K. Development of landslide monitoring and early warning sys- tem in Indonesia. In: CASAGLI, N., FANTI, R., E TOFANI, V. (Ed.) **Proceedings of The First World Landslide Forum.** Tokyo, Japan, United Nations University, p. 95– 198, 2009.

FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recogn. Lett**. 27 (8), p. 861–874, 2006.

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

FERREIRA, C. C.; M. PASSERANI. **Cubatão: a Rainha das Serras**. Nova América, São Paulo, 2005

GERSCOVICH, D. M. S.. **Estabilidade de Taludes**. 1a. ed. São Paulo: Oficina de Texto, 158p, 2012.

GHESTEM, M., SIDLE, R.C., STOKES, A. The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability. **Bioscience** v. 61, p. 869–879, 2011.

GIANNECCHINI, R.; GALANTI, Y.; AVANZI, G.D.; BARSANTI, M. Probabilistic rainfall thresholds for triggering debris flows in a human-modified landscape. **Geomorphology**, v. 257, p. 94-107, 2016

GODOY, N. S. ***Fundações.*** Escola de Engenharia de São Carlos - USP, 1972. (Notas de classe, aula de graduação).

GODOY, N. S. ***Estimativa da capacidade de carga de estacas a partir de resultados de penetrômetro estático.*** Aula dada no curso de engenharia civil na Escola de Engenharia de São Carlos – USP. 1983.

GODT, J. W. et al. Transient deterministic shallow landslide modeling: Requirements for susceptibility and hazard assessments in a GIS framework. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3–4, p. 214–226, 2008.

GOETZ, J.; GUTHRIE, R.; BRENNING, A. Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models. **Geomorphology**, v. 129, n. 3-4, p. 376-386, 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

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

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.

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

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

GUIMARÃES, R. F., D. R. MONTGOMERY, H. M. GREENBERG, N. F. FERNANDES, R. A. T. GOMES and O. A. P. CARVALHO JR. 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.

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.

HASUI, Y. **Tectônica da área das folhas de São Roque e Pilar do Sul**. 1973. Tese (Livre docência) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo.

HASUI, Y.; SADOWSKI, G.R. Evolução geológica do Precambriano na região sudeste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geologia,** p. 182-200, 1976.

HASUI, Y. Sistema Orogênico Mantiqueira. In: **Geologia do Brasil**. São Paulo: Beca-BALL Edições Ltda, 2012, p. 331-371

HEILBRON, M.; PEDROSA-SOARES, A.C.; CAMPOS NETO, M.C.; SILVA, L.C.; TROUW, R.A.J.; JANASI, V.A. Província Mantiqueira. In: MANTESSO-NETO, V. et al. (Orgs) **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca Produções Culturais, 2004, p. 203-235

HUANG, J. ET AL. 3D WebGIS-based platform for debris flow early warning: A case study. **Engineering Geology**, v. 197, p. 57-66, 2015

IBGE. **Cidades: Cubatão**. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=351350>. Acesso em 12 de set. 2017.

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo 1:500.000**. São Paulo, v. 1 e 2, 1981

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. **Ocupação de encostas - Manual**. São Paulo, 216p, 1991.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Plano de Gerenciamento dos Recursos Hídricos do Litoral Norte**. São Paulo. 2001.

IVERSON, R. M. Landslide triggering by rain infiltration. **Water Resources Research** 36: 1897-1910. 2000.

INTRIERI, E. ET AL. Design and implementation of a landslide early warning system. **Engineering Geology**, v. 147-148, p. 124-136, 2012

JAKOB, M. A size classification for debris flows. **Engineering Geology**, v. 79, n. 3-4, p. 151-161, 2005

KANJI, M.A.; CRUZ, P.T.; MASSAD, F. Debris flow affecting the Cubatão oil refinery, Brazil. **Landslides 5**, no. 1, p. 71-82, 2008.

KATZ, O. ET AL. Controls on the size and geometry of landslides: Insights from discrete element numerical simulations. **Geomorphology**, v. 220, p. 104-113, 2014

KEEFER, D. K.; WILSON, R. C.; MARK, R. K.; BRABB, E. E.; BROWN, W. M.; ELLEN, S. D.; HARP, E. L.; WIECZOREK, G. F.; ALGER, C. S.; ZATKIN, R. S. Real-Time Landslide Warning During Heavy Rainfall. **Science**, v. 238, p. 921–925, 1987.

LACERDA, W. Landslide initiation in saprolite and colluvium in southern Brazil: Field and laboratory observations. **Geomorphology**, v. 87, n. 3, p. 104-119, 2007

LEPSCH, I. F. **Manual para levantamento utilitário do meio físico e classificação de terras no sistema de capacidade de uso**. 1983.

LIU, C. N.; WU, C. C. Integrating GIS and stress transfer mechanism in mapping rainfall-triggered landslide susceptibility. **Engineering Geology**, v. 101, n. 1–2, p. 60–74, 2008.

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, 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.; BENTS, C.M.; FERREIRA, M.V.; NALETO, J.L.C. Inventário de escorregamentos naturais em banco de dados geográfico – análise dos fatores condicionantes na região da Serra de Cubatão – SP. In: XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2007, Florianópolis. **Anais**: INPE, p. 2785-2796.

LUNA, B. ET AL. Analysis of debris flow behavior with a one-dimensional run-out model incorporating entrainment. **Engineering Geology**, v. 128, p. 63-75, 2012

MASSAD, F.; CRUZ, P.T.; KANJI, M.A.; ARAUJO FILHO, H.A. Characteristics and volume of sediments transport in debris flows in Serra do Mar, Cubatão, Brazil, Int. **Workshop on the Debris Flow Disaster of Dec**. 1999 in Venezuela, Caracas (CD ROM), p 12, 2000

MARTINEZ, O.C. 1999. **Importância dos aspectos geológico-geotécnicos em obras implantadas na Serra do Mar – uma metodologia de manutenção preventiva**. Dissertação de Mestrado (EPUSP) São Paulo. 197p.

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, G. P.; KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, n. 7, p. 1266–1277, 2014.

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

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

MOORE, I. D., GRAYSON, R. B., LADSON, A. R. Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. **Hydrological Processes**, vol. 5, p. 3-30, 1991.

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

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.

NIKOLOPOULOS, E. I.; BORGA, M.; CREUTIN, J.D.; MARRA, F. Estimation of debris flow triggering rainfall: Influence of rain gauge density and interpolation methods. **Geomorphology**, v. 243, p. 40–50, 2015.

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

PAULA, J.; ZAINE, J.; LIMA, M.; OLIVEIRA, E. Analise fisiográfica aplicada à elaboração de mapa geológico-geotécnico de região da Serra do Mar e Baixada Santista. **Geociências** (UNESP), v. 27, n. 2, p. 249-264, 2008.

PACK, R. T. The SINMAP Approach to Terrain Stability Mapping. **8th Congress of the International Association of Engineering Geology**, p. 8, 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.

PETLEY, D. Global patterns of loss of life from landslides. **Geology**, v. 40, n. 10, p. 927-930, 2012.

PONÇANO, V.L. (coord.) **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. 1981. Monografia, Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, São Paulo

PROCHASKA, A.; ET AL. Debris-flow run-out predictions based on the average channel slope (ACS). **Engineering Geology**, v. 98, n. 1-2, p. 29-40, 2008

RABACO, L. M. L. **Avaliação de Modelos de Susceptibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa numa Faixa de Dutos**. 2005. p. 162. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Engenharia de Computação/Geomática, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005

RAFAELLI, S. G.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H.R. A comparison of thematic mapping of erosional intensity to GIs-driven process models in an Andean drainage basin. **Journal of Hydrological Processes** v.244, p. 33-42, 2001

RAIA, S.; ALVIOLI, M.; ROSSI, M.; BAUM, R.L.; GODT, J.W.; GUZZETTI, F. Improving predictive power of physically based rainfall-induced shallow landslide models: a probabilistic approach. **Geoscientific Model Development journal**, v. 7, n. 2, 2014

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.

RIBEIRO, R.R. Evolução Geomorfológica da Serra de Cubatão, em São Paulo. 2003. 122f. Dissertação (Mestrado em Geologia Sedimentar) – IGC – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.

RODRIGUES, R. Características geológicas e geotécnicas intervenientes na estabilidade de massas coluviais da Serra do Cubatão – SP. 1992. 116f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

ROSS, J. L. S. Análise e síntese na abordagem geográfica da pesquisa para o planejamento ambiental. Revista do Departamento de Geografia, FFLCH, USP, v. 9, p. 65–75, 1995.

SADOWSKI, G.R. A megafalha de Cubatão no sudeste brasileiro. Boletim IG – USP: Série Científica, v. 22, p. 15-28, 1991.

SALCIARINI, D. et al. Modeling landslide recurrence in Seattle, Washington, USA**. Engineering Geology**, v. 102, n. 3–4, p. 227–237, 2008

SALOMÃO, F. X. T.; ANTUNES, F. S. **Solos em Pedologia**. Oliveira, A. M. S.; Brito, S. N. A. (Ed.); Associação Brasileira de Geologia de Engenharia: São Paulo, 1998

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, 2004, p. 122

SELBY, M. J. **Hillslope: materials and process**. Oxford, England: Oxford University Press, p 451, 1993.

SESTINI, M. F. **Variáveis Geomorfológicas no Estudo de Deslizamentos em Caraguatatuba-SP utilizando imagens TM-LANDSAT e SIG**. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). São José dos Campos. 2000

SCHUSTER, R.L. Socioeconomic significance of landslides. In: TURNER, A.K., SCHUSTER, R.L. (Eds.) **Landslides: Investigation and Mitigation.** National Academy Press, Washington D.C., 1996, p. 12–35.

SIDLE, R.C.; OCHIAI, H.Landslides: Processes, Prediction, and Land Use. Am. Geophys. Union **Water Resour. Monogr**. v.18, p. 312, 2006.

SORBINO, G.; SICA, C.; CASCINI, L.Susceptibility analysis of shallow landslides source areas using physically based models. **Natural Hazards,** v. 53, p. 313–332, 2010

TAKARA, K.; APIP BAGIAWAN, A. Study on early warning system for debris flow and landslide in the Citarum River Basin, Indonesia, In: CASAGLI, N., FANTI, R., AND TOFANI, V. (Eds.) **Proceedings of The First World Landslide Forum**. Tokyo, Japan, 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, 1987a ,v.2, p.225-236

TEIXEIRA, A. H., GODOY, N. S. Análise, projeto e execução de fundações rasas [Analysis, design and execution of shallow foundations]. In. HACHICH et al. (eds). ***Fundações: teoria e prática [Foundations: theory and practice].*** São Paulo: Pini, 1996. p. 227-264.

TSUTSUMI, D., KOSUGI, K., MIZUYAMA, T. Three-dimensional modeling of hydrotropism effects on plant root architecture along a hillslope. **Vadose Zone J**. v. 3, p. 1017–1030, 2004

UCHIDA, T., KOSUGI, K., MIZUYAMA, T. Effects of pipeflow on hydrological process and its relation to landslide: a review of pipeflow studies in forested headwater catch- ments. **Hydrol. Process**. V. 15, p. 2151–2174, 2001

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 de agosto de 2016.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. In S. KRIZEK (ed) **Slope movement types and processes**.Washington, p. 11-33, 1978.

VAN WESTEN, C. J. Geo-information tools for landslide risk assessment: an overview of recent development. In: **Landslides, Evaluation and Stabilization.** Rio de Janeiro: Taylor & Francis Group, 2004, p. 39-53

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.

WAWER, R.; NOWOCIEN, E. Application of SINMAP terrain stability model to Grodarz stream watershed. **Electronic Journal of Polish Agricultural Universities**, v. 6, n. 1, 2003.

WIECZOREK, G.F. (1987) – **Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, Califórnia**. In: COSTA, J.E.; WIECZOREK, G. (eds) – Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation. Geol.Soc.Am.Rev.Eng.Geol., VII, p.93-104.

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

WOLLE, C. M. **Análise dos escorregamentos translacionais numa região da Serra do Mar no contexto de uma classificação de mecanismos de instabilização de encosta**. 1988. P. 406. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1988

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, 1994. p. 180-203.

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

WU, Y. et al. A simplified physically based coupled rainfall threshold model for triggering landslides. **Engineering Geology**, v. 195, p. 63–69, 2015.

ZAINE, J. E. **Mapeamento Geológico-Geotécnico por Meio do Método de Detalhamento Progressivo: Ensaio de Aplicação na Área Urbana do Município de Rio Claro (SP)**. 2000. P.149. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual Paulista, Rio Claro

ZUQUETTE, L. V.; GANDOLFI, N. **Cartografia Geotécnica**. [S.l.]: Oficina de Textos, São Paulo, 2004. 190 p

ZUQUETTE, L.V; PEJÓN, O; GANDOLFI, N; PARAGUASSU, A.B. Considerações básicas sobre a elaboração de cartas de zoneamentos de probabilidade ou possibilidade de ocorrer eventos perigosos e de riscos associados. **Geociências**, São Paulo, V. 14, N. 2, pp. 9-39, 1995