



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/05.06.21.49-TDI

**MODELAGEM APLICADA AO ESTUDO DE  
ESTABILIDADE DE ENCOSTAS ANTROPIZADAS E DA  
VULNERABILIDADE SOCIOGEOAMBIENTAL DE SÃO  
JOSÉ DOS CAMPOS - SP**

Frederico Fernandes de Ávila

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Regina Célia dos Santos Alvalá, e Rodolfo Moreda Mendes, aprovada em 13 de maio de 2021.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44KURUS>

INPE  
São José dos Campos  
2021

**PUBLICADO POR:**

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Coordenação de Ensino, Pesquisa e Extensão (COEPE)  
Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
CEP 12.227-010  
São José dos Campos - SP - Brasil  
Tel.:(012) 3208-6923/7348  
E-mail: pubtc@inpe.br

**CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):**

**Presidente:**

Dra. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Coordenação-Geral de Ciências da Terra (CGCT)

**Membros:**

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação (CPG)  
Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia, Tecnologia e Ciência Espaciais (CGCE)  
Dr. Rafael Duarte Coelho dos Santos - Coordenação-Geral de Infraestrutura e Pesquisas Aplicadas (CGIP)  
Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**BIBLIOTECA DIGITAL:**

Dr. Gerald Jean Francis Banon  
Clayton Martins Pereira - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:**

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)

**EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:**

Ivone Martins - Divisão de Biblioteca (DIBIB)  
André Luis Dias Fernandes - Divisão de Biblioteca (DIBIB)



MINISTÉRIO DA  
CIÊNCIA, TECNOLOGIA  
E INOVAÇÕES



sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/05.06.21.49-TDI

**MODELAGEM APLICADA AO ESTUDO DE  
ESTABILIDADE DE ENCOSTAS ANTROPIZADAS E DA  
VULNERABILIDADE SOCIOGEOAMBIENTAL DE SÃO  
JOSÉ DOS CAMPOS - SP**

Frederico Fernandes de Ávila

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre, orientada pelos Drs. Regina Célia dos Santos Alvalá, e Rodolfo Moreda Mendes, aprovada em 13 de maio de 2021.

URL do documento original:

<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/44KURUS>

INPE  
São José dos Campos  
2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

---

Ávila, Frederico Fernandes de.

Av55m Modelagem aplicada ao estudo de estabilidade de encostas antropizadas e da vulnerabilidade sociogeoambiental de São José dos Campos - SP / Frederico Fernandes de Ávila. – São José dos Campos : INPE, 2021.

xxiv + 152 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2021/05.06.21.49-TDI)

Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2021.

Orientadores : Drs. Regina Célia dos Santos Alvalá, e Rodolfo Moreda Mendes.

1. Estabilidade de encosta. 2. Condicionantes antrópicos. 3. Deslizamentos de terra. 4. Vulnerabilidade. 5. Modelagem Matemática. I.Título.

CDU 551.4.037:614.823(815.6)

---



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).



**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**  
Serviço de Pós-Graduação - SEPGR

**DEFESA FINAL DE TESE DE FREDERICO FERNANDES DE ÁVILA**  
**BANCA Nº 103/2021 REG 134139/2016**

No dia 13 de maio de 2021, às 09h00min, por teleconferência, o(a) aluno(a) mencionado(a) acima defendeu seu trabalho final (apresentação oral seguida de arguição) perante uma Banca Examinadora, cujos membros estão listados abaixo. O(A) aluno(a) foi APROVADO(A) pela Banca Examinadora, por unanimidade, em cumprimento ao requisito exigido para obtenção do Título de Doutor em Ciência do Sistema Terrestre. O trabalho precisa da incorporação das correções sugeridas pela Banca Examinadora e revisão final pelo(s) orientador(es).

**Título: “Modelagem aplicada ao estudo de estabilidade de encostas antropizadas e da Vulnerabilidade Sociogeambiental de São José dos Campos - SP”**

Eu, Jose Antonio Marengo Orsini, como Presidente da Banca Examinadora, assino esta ATA em nome de todos os membros, com o consentimento dos mesmos.

Dr. Jose Antonio Marengo Orsini - Presidente - CEMADEN

Dra. Regina Célia dos Santos Alvalá - Orientador - CEMADEN

Dr. Rodolfo Moreda Mendes - Orientador - CEMADEN

Dr. Eduardo Soares de Macedo - Membro Externo - IPT

Dr. Silvio Jorge Coelho Simões - Membro Externo - UNESP

Dr. Pedro Ivo Mioni Camarinha - Membro Externo - CEMADEN



Documento assinado eletronicamente por **José Antônio Marengo Orsini, Coordenador-Geral de Pesquisa e Desenvolvimento**, em 20/05/2021, às 11:09 (horário oficial de Brasília), com fundamento no art. 6º do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <http://sei.mctic.gov.br/verifica.html>, informando o código verificador **7286246** e o código CRC **7927172D**.



*“A intervenção humana nos solos responde por complexas e sutis variações na fisiologia de uma determinada paisagem, imitando até certo ponto os acontecimentos de maior intensidade, relacionados às variações climáticas quaternárias”.*

*Aziz Nacib AB'SÁBER*



*Dedico este trabalho a minha querida mãe Sônia (in memoriam), por toda a sua luta e amor pela vida, nos deixou um grande legado de perseverança diante das dificuldades.*



## AGRADECIMENTOS

À Natureza, que nos dá a vida e a oportunidade de experimentar a existência, sou grato pela força, luz e encantos que me deram direcionamento para concluir mais essa importante etapa da minha vida.

À Dra. Regina por ter confiado e acreditado na minha proposta de pesquisa e por abrir as portas do INPE para mim. Sou grato pelas orientações, pelo apoio e atenção nestes anos de estudo e pesquisa.

Ao Dr. Rodolfo Mendes, pelos ensinamentos e discussões técnicas e científicas que me despertaram a ideia inicial desta pesquisa e que contribuíram para todo o desenvolvimento dela.

À minha mãe Sônia (*in memoriam*) e meu pai Ilson, por todo amor e dedicação que tiveram para criar a mim e meus irmãos, sempre apoiando as minhas decisões. Eles são os maiores incentivadores e exemplos que eu poderia ter para superar os desafios de uma pesquisa científica e também superar a mim mesmo.

À Nayara, minha querida e amada companheira de vida e parceira de todas as horas, grato pelo apoio, paciência e incentivo para eu perseverar diante dos desafios impostos por um estudo de doutorado.

Aos meus filhos Larissa e Davi pelo imenso amor, carinho e momentos de alegria e afeto que contribuíram fundamentalmente para a realização desta pesquisa.

A toda a minha família e amigos por me apoiar e incentivar em todos os momentos da pesquisa e por compreender as minhas ausências.

Ao amigo e colega de trabalho Marcio Moraes pelos ensinamentos e discussões a respeito do modelo TRIGRS.

Aos amigos e colegas de trabalho Rodrigo Stabile, Tullius Nery, Enos Sato e Leandro Casagrande pelo apoio e discussões nos trabalhos de campo.

Ao INPE e ao CCST por disponibilizar toda a estrutura física e científica a serviço da minha formação como doutor.

Ao Cemaden pelo apoio nos trabalhos de campo, disponibilização de estrutura computacional, TI, espaço físico e de softwares.

À Defesa Civil de São José dos Campos pelo apoio nos trabalhos de campo.

## RESUMO

As diversas atividades realizadas pelo homem, como desmatamentos, recortes nos terrenos, aterros, vazamentos e lançamentos de água sobre as superfícies, entre outras interferências inadequadas, estabelecem novas interações com os fatores condicionantes naturais (geologia, geomorfologia, pedologia, hidrologia), interferindo assim no equilíbrio das vertentes e induzindo a deflagração de deslizamentos de terra. Neste sentido, o presente estudo tem por objetivo desenvolver e adaptar métodos de previsão de suscetibilidade aos deslizamentos de terra, com base em técnicas de modelagem matemática e computacional, que possibilite a inserção de fatores antrópicos associando-os aos fatores físico-naturais que condicionam a instabilização das encostas. Para isso, técnicas de modelagem de estabilidade de encostas associadas a uma abordagem socioeconômica, foram aplicadas no município de São José dos Campos, SP e em duas bacias hidrográficas situadas na Região Norte do município. Em um primeiro momento foi trabalhado em uma escala regional, abrangendo todo o limite municipal de São José dos Campos, onde foi gerado ao Índice de Vulnerabilidade Sociogeoambiental (IVSGeo) por meio de modelagem híbrida que integrou os resultados de suscetibilidade aos deslizamentos de terra com as características socioeconômicas do município. Em um segundo momento, foi trabalhado em escala de bacia, realizando um estudo de retroanálise na bacia do Córrego Bengalar, localizado na Região Norte de São José dos Campos, para analisar um conjunto de fatores naturais e antrópicos que pode ter influenciado a instabilidade das encostas e consequentemente a deflagração de 65 deslizamentos de terra. Para isso foram utilizados dois modelos determinísticos, FS FIORI e TRIGRS. Por último, foi utilizado o modelo GEO-SLOPE para o estudo da estabilidade em escala de detalhe (escala de vertente) e em modo bidimensional, de duas seções transversais (encostas) da bacia do Córrego Rancho Alegre, também localizada na Região Norte do município. Buscou-se avaliar o quanto as atividades antrópicas, nas suas mais variadas formas, podem alterar o FS e contribuir para a instabilização das encostas. De forma geral, os resultados obtidos nesta pesquisa demonstram que a estabilidade das encostas é condicionada por complexas relações e interações entre diversos fatores físicos naturais e o processo de uso e ocupação da terra acabar por influenciar na estabilidade das encostas naturais. Algumas ações antrópicas, como taludes de corte e vazamento de água, causam maior impacto no fator de segurança das encostas, sendo importante considerar esses elementos nos métodos de previsão de deslizamentos de terra, principalmente nos modelos regionais.

Palavras-chave: Estabilidade de encosta. Condicionantes Antrópicos. Deslizamentos de terra. Vulnerabilidade. Modelagem Matemática. Equilíbrio – Limite.



**MODELING OF ANTHROPIZED SLOPE STABILITY AND  
SOCIOGEOENVIRONMENTAL ANALYSIS OF VULNERABILITY OF SÃO  
JOSÉ DOS CAMPOS – SP**

**ABSTRACT**

The various anthropic activities, such as deforestation, land cuts, landfills, leaks and surfaces water discharges, among other interferences, feedback against natural conditioning factors (e.g., geology, geomorphology, pedology, hydrology), thus, interfering on slope equilibrium and triggering landslides. In this sense, the present study aims to develop and adapt methods for predicting landslide susceptibility, based on mathematical and computational modeling techniques, which allows the association of anthropic factors with the physical-natural factors that condition slope instability. To this end, techniques for modeling slope stability linked with socioeconomic analysis were applied in the municipality of São José dos Campos, SP and in two hydrographic basins located in the northern region of the municipality. At first, the study covered a regional scale analysis (the entire municipal limit of São José dos Campos), generating a Sociogeoenvironmental Vulnerability Index (IVSGeo) through hybrid modeling which integrated the results of landslides susceptibility with the socioeconomic characteristics of the municipality. In a second step, the study covered a basin scale investigation, back-analysis the basin of the Bengalar Stream, located in the North Region of São José dos Campos to assess a set of natural and man-made factors that may have influenced the slope stability and, consequently, the onset of 65 landslides. In this regard, two deterministic models were used, FS FIORI and TRIGRS. Finally, the GEO-SLOPE model was used to evaluate the slope stability in detail (slope scale) and in two-dimensional mode, of two cross sections (slopes) of the Rancho Alegre stream basin, also located in the northern region of the municipality. We sought to evaluate how much anthropic activities, in their most varied forms, can alter the FS and contribute to slope stability. In general, results demonstrate that slope stability is conditioned by complex relationships and interactions among several natural physical factors. Also, land-use land-cover (LULC) was shown to influence natural slopes stability. Anthropic actions, such as cut slopes and water leakage, have substantial impact on slopes safety factor. Therefore, it is important to consider these elements in landslide forecasting methods, mainly in regional models.

Keywords: Slope stability. Anthropic Conditioners. Landslides. Vulnerability. Mathematical Modeling. Equilibrium – Limit.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 - Classificação dos movimentos de massa de acordo com o grau de umidade, velocidade e tipo de material. ....	10
Figura 2.2 - Tipologias de movimentos de massa em ambientes tropicais. ....	11
Figura 2.3 - Os quatro tipos básicos de vertentes, combinando concavidade e convexidade das linhas de fluxo e das curvas de nível. ....	17
Figura 2.4 - Forças atuantes em um potencial plano de cisalhamento. ....	26
Figura 3.1 - Mapas de isoietas de precipitação (A), MDT (B), geologia (C) e unidades geotécnicas (D) de São José dos Campos, SP. ....	39
Figura 3.2 - Esquema conceitual da modelagem híbrida aplicada para o IVSGeo. ....	40
Figura 3.3 - Mapas de declividade e de uso e cobertura do solo de São José dos Campos, SP. ....	45
Figura 3.4 – Setores censitários de São José dos Campos – SP, com base no Censo. de 2010. ....	46
Figura 3.5 – Vulnerabilidade Sociogeoambiental de São José dos Campos – SP. ....	54
Figura 3.6 – Vulnerabilidade Sociogeoambiental das áreas urbanizadas (edificadas) de São José dos Campos – SP. ....	55
Figura 3.7 – Mapa dos Indicadores socioeconômicos e da suscetibilidade aos deslizamentos para definição do IVSGeo. ....	56
Figura 3.8 – Frequência e Distribuição (FD) por meio de histogramas do IVSGeo das regiões de São José dos Campos. ....	58
Figura 3.9 – Composição dos indicadores do IVSGeo da célula raster selecionada no bairro Águas de Canindú. ....	61
Figura 3.10 – Composição dos indicadores do IVSGeo da célula raster selecionada no bairro Pinheirinhos. ....	62
Figura 3.11 – Composição dos indicadores do IVSGeo da célula raster selecionada no bairro Rio Comprido. ....	63

Figura 3.12 – Composição dos indicadores do IVSGeo da célula raster selecionada no bairro Santa Cecília II.....	64
Figura 3.13 – Composição dos indicadores do IVSGeo da célula raster selecionada no bairro Jardim Apolo I. ....	65
Figura 3.14 – Resultados de IVSGeo com ênfase em alguns setores de risco.	66
Figura 3.15 – Concentração de Risco (CR) das classes de IVSGeo para os três níveis de risco a escorregamentos e para a área total.....	66
Figura 4.1 – Localização da bacia do Córrego Bengalar no município de São José dos Campos.....	76
Figura 4.2 – Cicatrizes de deslizamentos de terra na bacia do Córrego Bengalar.....	79
Figura 4.3 – Dados da chuva diária entre 10 de novembro de 2015 a 6 de abril de 2016 e da chuva horária no período que deflagraram os 65 deslizamentos .....	80
Figura 4.4 – Imagens dos deslizamentos de encostas localizados na bacia do Córrego do Bengalar. ....	81
Figura 4.5 – Camada matricial do uso e cobertura do solo (A), e declividade (B) da bacia do Córrego do Bengalar.....	83
Figura 4.6 – Resultados do FS simulado pelo modelo FS FIORI. ....	90
Figura 4.7 – Resultados do FS simulado pelo modelo TRIGRS.....	92
Figura 4.8 – Curvas ROC dos resultados de suscetibilidade aos deslizamentos de terra dos modelos FS FIORI e TRIGRS. ....	95
Figura 4.9 – Associação dos deslizamentos de terra com as estradas presentes na bacia do Córrego do Bengalar.....	97
Figura 4.10 – Deslizamentos de terra induzidos por taludes de cortes em estradas na bacia do Bengalar. Setas vermelhas indicam as cicatrizes de deslizamentos de taludes. ....	98
Figura 5.1 – Localização, declividade e hipsometria da bacia do Córrego Rancho Alegre e dos bairros Chácaras do Havaí e Águas de Canindú. ....	102
Figura 5.2 – Aspectos do uso e ocupação (antropização) dos bairros Chácaras do Havaí e Águas de Canindú observados em trabalhos de campo. ....	105

Figura 5.3 - Plano bidimensional de uma encosta hipotética apresentando superfície de ruptura (em verde), fatias e forças atuantes em cada porção das fatias (em cinza) de acordo com o método Morgenstern-Price. ....	107
Figura 5.4 – Localização das seções transversais das encostas 4 e 55 estudadas na bacia do Córrego Rancho Alegre.....	108
Figura 5.5 – (A) Perfil de solo localizado em São José dos Campos e estudado por Mendes e Valério Filho (2015); (B) Perfil de solo representativo do deslizamento no Bairro Freitas e estudado por Mendes et al. (2017a). ....	109
Figura 5.6 – Curvas de retenção dos horizontes de solo. ....	111
Figura 5.7 – Função condutividade hidráulica obtida a partir das curvas de retenção das camadas de solo e aterro. ....	112
Figura 5.8 – Acumulado diário de chuva da estação pluviométrica Chácara Boa Vista/Cemaden para os 31 dias de avaliação. ....	114
Figura 5.9 – Imagens da Encosta 4 destacando as presenças de habitações sobrepostas e aterros.....	116
Figura 5.10 – Resultados da análise de estabilidade da Encosta 4 demonstrando o FS crítico para os cenários 1 e 2.....	117
Figura 5.11 – Resultados da análise de estabilidade da Encosta 4 demonstrando o FS crítico para os cenários 3 e 4.....	120
Figura 5.12 – Variação do FS em 31 dias dos quatros cenários avaliados da Encosta 4. ....	121
Figura 5.13 – Imagens da Encosta 55 com destaque para a caixa d’água em topo de talude de corte e edificação de baixo padrão construtivo.....	122
Figura 5.14 – Resultados da análise de estabilidade da Encosta 55 demonstrando o FS crítico para os cenários 1 e 2.....	124
Figura 5.15 – Resultados da análise de estabilidade da Encosta 55 demonstrando o FS crítico para os cenários 3 e 4.....	125
Figura 5.16 – Variação do FS em 31 dias dos quatros cenários avaliados da Encosta. 55. ....	126



## LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1 - Fatores condicionantes, características e processos associados dos movimentos de massa.....	14
Tabela 3.1 - Parâmetros de entrada do modelo FS FIORI com base no agrupamento das unidades geotécnicas de São José dos Campos – SP. ....	43
Tabela 3.2 - Agrupamento das unidades geotécnicas de São José dos Campos, SP. ....	44
Tabela 3.3: Indicadores e variáveis socioeconômicas para definição do IVSGeo.....	47
Tabela 3.4 - Pesos estatísticos atribuídos aos grupos temáticos para o IVSGeo.....	50
Tabela 3.5 – Índice Potencial de Risco (PR) para os setores de risco a escorregamentos.....	68
Tabela 4.1 – Parâmetros geotécnicos representativo dos perfis de solo da área de estudo (MENDES; VALÉRIO FILHO, 2015; MENDES et al., 2017a; MENDES et al., 2017b).....	83
Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados no modelo FS FIORI na bacia do Bengalar.....	84
Tabela 4.3 - Parâmetros de entrada no modelo TRIGRS. ....	87
Tabela 4.4 – Frequência e Distribuição (FD) das classes e dos grupos de classes do FS dos modelos FS FIORI e TRIGRS. ....	94
Tabela 5.1 - Parâmetros geotécnicos de entrada do modelo GEO-SLOPE...	110
Tabela 5.2 – Resultados dos FS's críticos e IAFS's para cada cenário analisado das encostas 4 e 55. ....	127



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 Justificativa .....	5
1.2 Hipótese.....	6
1.3 Objetivo.....	7
<b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>9</b>
2.1 Tipologias e classificação de movimentos de massa .....	9
2.2 Fatores condicionantes dos movimentos de massa .....	13
2.2.1 Geologia.....	14
2.2.2 Geomorfologia.....	15
2.2.3 Pedologia .....	18
2.2.4 Clima.....	18
2.2.5 Vegetação .....	20
2.2.6 Ação antrópica .....	22
2.3 Equilíbrio - Limite .....	23
2.4 Métodos de previsão .....	27
2.5 Métodos de validação .....	30
<b>3 USO DE MODELAGEM HÍBRIDA PARA A PROPOSIÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE SOCIOGEOAMBIENTAL DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, SP (IVSGEO – SJC).....</b>	<b>32</b>
3.1 Introdução.....	32
3.2 Conceito de vulnerabilidade.....	33
3.3 Área de estudo .....	36
3.4 Materiais e métodos .....	39
3.4.1 Modelagem determinística (FS FIORI).....	41
3.4.2 Modelagem heurística .....	45
3.4.2.1 <i>Indicadores socioeconômicos</i> .....	45
3.4.2.2 <i>Álgebra de mapas</i> .....	49
3.4.3 Validação dos modelos .....	51
3.5 Resultados e discussões .....	53
3.5.1 Avaliação geral do IVSGeo - SJC .....	53

3.5.2	Análise detalhada do IVSGeo - SJC .....	60
3.5.3	Validação dos resultados .....	65
3.5.4	Limitações e potencialidades do IVSGeo.....	68
3.6	Considerações finais .....	71
<b>4</b>	<b>A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO E DA INTENSIDADE DE CHUVA NA DEFLAGRAÇÃO DE DESLIZAMENTOS DE TERRA: UM ESTUDO DE RETROANÁLISE UTILIZANDO MODELOS DETERMINÍSTICOS .....</b>	<b>73</b>
4.1	Introdução.....	73
4.2	Area de estudo .....	75
4.2.1	Deslizamentos de terra - 7 e 8 de março de 2016 .....	78
4.3	Materiais e métodos .....	80
4.3.1	Modelo FS FIORI .....	81
4.3.2	Modelo TRIGRS.....	85
4.3.3	Métodos de análise e validação dos modelos.....	88
4.4	Resultados e discussões .....	89
4.4.1	Modelo FS FIORI .....	89
4.4.2	Modelo TRIGRS.....	91
4.4.3	Análise comparativa e validação dos modelos.....	93
4.5	Considerações finais .....	98
<b>5</b>	<b>IMPACTO DOS CONDICIONANTES ANTRÓPICOS NO FATOR DE SEGURANÇA (FS) DE DUAS ENCOSTAS NA BACIA DO CÓRREGO RANCHO ALEGRE, SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, SP .....</b>	<b>100</b>
5.1	Introdução.....	100
5.2	Área de estudo .....	101
5.3	Materiais e métodos .....	105
5.3.1	Aplicação do modelo GEO-SLOPE.....	105
5.3.2	Definição das seções transversais.....	108
5.3.3	Parâmetros de entrada do modelo.....	109
5.3.3.1	Características geotécnicas .....	109
5.3.3.2	Caracterização hidrológica.....	113
5.4	Resultados e discussões .....	114

5.4.1	Encosta 4 .....	115
5.4.2	Encosta 55 .....	121
5.4.3	IAFS - Índice de Alteração do Fator de Segurança .....	127
5.5	Considerações finais .....	130
6	CONCLUSÃO GERAL .....	132
6.1	Trabalhos futuros .....	136
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>138</b>



## 1 INTRODUÇÃO

As encostas integram o relevo em áreas continentais e diferentes processos atuam constantemente em sua dinâmica, destacando-se os movimentos gravitacionais de terra (movimentos de massa). Estes são fenômenos que ocorrem no material superficial (regolito) que se diferenciam das erosões laminar e linear (sulcos, ravinas e voçorocas) por se caracterizarem por movimento gravitacional, descendente e para fora da encosta de material em que o escoamento superficial (*runoff*) não é o agente de transporte (FERNANDES et al., 2001; ZAIDAN; FERNANDES, 2009). Apesar da magnitude e localização desses eventos muitas vezes estarem diretamente relacionados com a ação humana (cortes, aterros, lançamento de água servida, sobrecargas nos terrenos, etc.), é importante destacar que os movimentos de massa fazem parte do resultado de processos naturais de evolução do relevo no decorrer do tempo geológico.

Os movimentos de massa são responsáveis por significativa quantidade de mortes em diversas regiões do mundo, principalmente aquelas que se caracterizam por relevos montanhosos de encostas íngremes instáveis. De acordo com dados da WP/WLI (1993), os movimentos de massa são um dos fenômenos naturais que mais causam prejuízos financeiros e mortes no mundo. O Centro de Pesquisas sobre Epidemiologia de Desastres - CRED (*Centre for Research on the Epidemiology of Disasters*) criou um banco de dados globais de desastres, denominado Base de Dados de Emergência - EM-DAT (*Emergency Events Database*), que classifica os desastres naturais por tipo de risco capaz de provocá-los, destacando os desastres hidrológicos, meteorológicos e climatológicos, os quais são coletivamente denominados de desastres relacionados ao tempo (*weather-related disasters*) (CRED; UNISDR, 2018). Para essa classificação internacional, os deslizamentos são enquadrados como processos do tipo hidrológicos, os quais, entre os anos de 1998 e 2017, corresponderam por 5,2% das ocorrências de desastres naturais no mundo e por cerca de vinte mil pessoas mortas neste período.

O EM-DAT aponta ainda que no período de 1900 a 2006 mais de 70% dos desastres ocorreram em países em desenvolvimento (CRED; UNISDR, 2015). Estas características refletem as vulnerabilidades inerentes aos processos de crescimento populacional e expansão urbana desordenada que expõem, cada vez mais, os sistemas humanos ao risco. O Relatório Especial do IPCC do ano de 2012 destaca os riscos de eventos extremos e desastres naturais e indica que no período de 1970 a 2008, 95% das mortes causadas por desastres ocorreram em países em desenvolvimento (IPCC, 2012). Sepúlveda e Petley (2015) registraram na América Latina e no Caribe um total de 611 deslizamentos de terra entre os anos de 2004 e 2013 que causaram 11.631 mortes. Deste total, o Brasil foi o país da América Latina com mais ocorrências, totalizando 119 deslizamentos que culminaram em 2.264 mortes nos dez anos registrados.

Segundo Tominaga (2009), no ano de 2008 o Brasil esteve em 10º lugar entre os países do mundo em número de vítimas de desastres associados aos eventos geohidrológicos de inundações e deslizamentos, com 1,8 milhões de pessoas afetadas. No início de 2011, a Região Serrana do Rio de Janeiro foi atingida por chuvas extremas e deslizamentos generalizados, sendo considerado o maior desastre hidrometeorológico e geotécnico do Brasil, com 890 mortes e cerca de 35 mil pessoas desabrigadas (ABMS, 2011). O Anuário Brasileiro de Desastres Naturais aponta que no ano de 2013 foram reportados 493 desastres naturais no país, os quais causaram 183 óbitos, sendo 41 em decorrência de deslizamentos, o tipo de evento que mais causou mortes por desastres naturais (CENAD, 2014). De acordo com dados do REINDESC (Registro de Inundações e Deslizamentos do Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais - Cemaden), entre os anos de 2016 e 2020, foram registradas 1301 ocorrências relacionadas a movimentos de massa em municípios monitorados pelo Cemaden.

Guimarães et al. (2008) destacam que, devido às condições climáticas serem marcadas por verões de intensas chuvas em regiões de grandes maciços montanhosos, o Brasil pode ser considerado muito suscetível aos deslizamentos. A frequência de movimentos de massa no país é elevada em razão das condições naturais; porém, é agravada por intervenções antrópicas

em encostas íngremes, que muitas vezes se caracterizam por ocupações irregulares de infraestruturas precárias.

O Brasil, país em desenvolvimento e com características geográficas peculiares em razão da dimensão continental, apresenta elevado grau de vulnerabilidade a eventos extremos. Por um lado, a grande extensão do território brasileiro, localizado em regiões tropicais, faz com que o país seja afetado por diferentes tipos de eventos extremos climáticos que se desenvolvem na América do Sul e é altamente influenciado por anomalias de temperatura da superfície do mar (TSM) no Oceano Pacífico tropical (*El Niño* e *La Niña*), ou no Atlântico tropical e subtropical (MARENGO, 2009). Por outro lado, as características socioeconômicas e institucionais, a ocupação desordenada em centros urbanos, a falta de planejamento para o uso do solo e a escassez em setores de infraestrutura favorecem ainda mais a ocorrência dos desastres.

Segundo o Anuário do CENAD (2014), a avaliação da distribuição macrorregional dos desastres naturais no Brasil em 2013 apontou que na Região Sudeste, seguindo a tendência de anos anteriores, registrou a maior parte da ocorrência de movimentos de massa no país, aproximadamente 84% do total. O quantitativo de danos humanos vinculados aos desastres por movimentos de massa ainda contabilizou 233.356 afetados no período, estando eles predominantemente localizados na Região Sudeste, correspondendo por 96,27% do total no país. Para Ramos et al. (2020) no ano de 2019 a região ainda obteve o maior número de registros de movimentos de massa no país, porém com uma menor proporção, correspondendo por 45% de registros de todo o território brasileiro. O significativo número de afetados na região se deve a conjunção de três fatores: (i) maior incidência de precipitações; (ii) ocupação desordenada (áreas de risco); (iii) alta suscetibilidade aos movimentos de massa.

A previsão de ocorrência destes fenômenos, bem como a identificação de possíveis reações da sociedade em condições de pré e pós desastre, torna-se muito difícil (CUTTER et al., 2003), principalmente ao se considerar perspectivas de cenários futuros de eventos naturais cada vez mais extremos. Com isso, a

ampliação de estudos de estabilidade de encostas, que considerem tanto as características naturais do terreno, quanto as intervenções antrópicas associadas às condições socioeconômicas, tornam-se de grande importância para a previsão de suscetibilidade, risco e perigo aos movimentos de massa, para a definição da vulnerabilidade da população local e para o desenvolvimento de procedimentos metodológicos mais acurados que possam subsidiar o poder público para a proposição de ações mais diretas e efetivas que visem a mitigação dos desastres associados aos deslizamentos.

Neste contexto, o conceito de vulnerabilidade se apresenta como importante objeto de estudo, uma vez que aborda de forma integrada as características naturais do ambiente e as relações humanas entre si e com o território. Fatores como trabalho, renda, saúde, educação, infraestrutura, habitação, saneamento, entre outras, ganham espaço para análise juntamente com as características físico-naturais do lugar, no que tange à suscetibilidade natural do terreno aos processos de movimentos de massa. O estudo integrado permite estabelecer e quantificar a capacidade de determinadas sociedades em absorver, de se auto organizar e de se adaptar às condições de desastres (ADGER, 2006; ALVALÁ et al., 2019; ANAZAWA, 2012; ANAZAWA et al., 2013; CUTTER et al., 2003; DIAS et al., 2020; HUMMELL et al., 2016; PANDEY; BARDSLEY, 2015).

Na literatura, há consenso de que as ações antrópicas, principalmente aquelas relacionadas com intervenções inadequadas, interferem na estabilidade das encostas e favorecem o desencadeamento dos processos de movimentos de massa. Contudo, os estudos técnicos que consideram a intervenção antrópica para o cálculo do Fator de Segurança (FS) estão direcionados às obras de engenharias (construção civil e mineração), visando uma intervenção controlada da encosta (intervenções estruturantes) e seguindo normas técnicas e leis de uso e ocupação do solo.

Neste sentido, a pesquisa proposta visa, a partir de um estudo de modelagem, considerar as atividades antrópicas nos cálculos de FS e avaliar suas contribuições na geração de desequilíbrios em encostas de São José dos Campos, SP, município este impactado por deslizamentos de terra. Para isso,

buscou-se considerar, de forma interdisciplinar, os elementos antrópicos associados aos fatores físicos naturais nos métodos de previsão em três níveis de escala. Neste contexto, a pesquisa focou em abordagem que varia do geral ao local (macro ao micro), iniciando com uma análise regional, referente a todo município de São José dos Campos (Capítulo 3), perpassando por uma análise em escala de bacia hidrográfica, concernente à bacia do Córrego Bengalar (Capítulo 4) e finalizando com um estudo em escala de vertente em duas seções transversais na bacia do Córrego Rancho Alegre (Capítulo 5).

### **1.1 Justificativa**

Nos grandes centros urbanos, os deslizamentos de terra têm tomado proporções catastróficas, uma vez que os taludes de corte, aterros, depósitos de lixo, modificações na drenagem, desmatamentos, entre tantas outras intervenções antrópicas que muitas vezes ocorrem sem planejamento e infraestrutura adequada, têm gerado novas interações entre os condicionantes naturais relacionados à geomorfologia, geologia, pedologia e hidrologia, conforme destacado há décadas por Fernandes et al. (2001). Logo, a condução de estudos que foquem a estabilidade de encostas, considerando as características ambientais intrínsecas (resistência, condutividade hidráulica, declividade, chuva, etc.), as intervenções antrópicas (corte, aterro, sobrecargas, vazamentos de tubulações, etc.), os fatores socioeconômicos (trabalho, renda, saúde, educação, infraestrutura, habitação, saneamento, entre outras) e as interações entre eles têm se tornado premente, justificando, portanto, a pesquisa proposta.

Camarinha (2016) propôs um Índice de Vulnerabilidade aos Desastres Naturais relacionados aos deslizamentos (IVDDT) para o Estado de São Paulo. Ao considerar mudanças no clima futuro (aumento de eventos extremos de precipitação), verificou que para a Região do Vale do Paraíba, principalmente na porção da Serra da Mantiqueira, prevê-se um grande aumento da vulnerabilidade a partir do ano de 2040, destacando-se o município de São José dos Campos, SP que pode alcançar classe de vulnerabilidade extremamente alta. De acordo com o autor, esta região caracteriza-se como *hotspots* de vulnerabilidade dos desastres relacionados aos deslizamentos de terra em

decorrência da tendência futura de crescimento do município e, como consequência, a intensificação da degradação ambiental e de instabilização das encostas. Deste modo, a escolha do município como área de estudo se justifica pelo fato de que o conhecimento mais detalhado das condições de estabilidade das encostas nesta região, dos fatores de instabilização e das características socioeconômicas, contribui para um melhor entendimento da morfodinâmica e da vulnerabilidade socioambiental desta região.

## **1.2 Hipótese**

As intervenções antrópicas, em suas mais variadas formas (desmatamento, corte, aterro, sobrecarga, vazamento, etc.), interferem diretamente nos perfis de equilíbrio das encostas, modificando a interação e a correlação dos fatores naturais que condicionam a estabilidade das encostas, no que tange ao comportamento mecânico e hidráulico dos materiais superficiais, e, com isso, proporcionando a redução da resistência ao cisalhamento e aumentando as forças indutoras que desencadeiam os processos de movimentos de massa. Tais fatores afetam diretamente o estado de equilíbrio-limite das encostas, diminuindo consideravelmente o fator de segurança proporcionalmente com o aumento do grau de intervenção antrópica. Ou seja, parte-se do pressuposto de que os valores dos fatores de segurança (FS) das encostas e taludes são inversamente proporcionais ao nível de intervenção antrópica das vertentes, considerando as diversas especificidades dessas intervenções sobre os terrenos.

Neste escopo, os seguintes questionamentos são postulados: é possível acrescentar elementos das intervenções antrópicas que influenciam na estabilidade das encostas (desmatamentos, corte, aterro, sobrecarga, entre outros), juntamente com as condicionantes naturais (geologia, geomorfologia, pedologia, hidrologia) nos métodos tradicionais de previsão de deslizamentos de terra? É factível o desenvolvimento de um índice que integre questões relacionadas às condicionantes naturais, intervenções antrópicas associadas aos usos e ocupação da terra e fatores socioeconômicos para um melhor

detalhamento das porções das cidades onde a população se encontra mais vulnerável aos processos de deslizamentos de terra?

### **1.3 Objetivo**

Deste modo, visando comprovar a hipótese levantada anteriormente, o objetivo geral desta pesquisa consistiu em desenvolver e adaptar métodos de previsão de suscetibilidade aos deslizamentos de terra, com base em técnicas de modelagem matemática e computacional, que possibilitasse a inserção de fatores antrópicos associando-os aos fatores físico-naturais que promovem a instabilização das encostas. Para isso, técnicas de modelagem de estabilidade de encostas foram aplicadas ao município de São José dos Campos, em especial para avaliar duas bacias hidrográficas situadas na Região Norte do município. Foram avaliados também os dados socioeconômicos da população, os quais foram associados com a suscetibilidade natural aos deslizamentos de terra, visando estabelecer métricas de vulnerabilidade da população em relação aos processos de deslizamentos de terra.

Neste contexto, os seguintes objetivos específicos foram conduzidos:

- Propor um novo índice de vulnerabilidade para São José dos Campos, SP, com vistas a quantificar a capacidade da população de absorver, de se auto-organizar e de se adaptar às condições de desastres associados aos deslizamentos de terra.
- Desenvolver e aplicar o modelo FS FIORI, com base na equação de FS de Fiori (2015), que possibilite a inserção de parâmetros físico-naturais associados e de alguns condicionantes antrópicos e de cobertura arbórea com base no mapeamento de uso e cobertura da terra;
- Aplicar o modelo determinístico TRIGRS para avaliar, em nível de detalhe, a suscetibilidade natural aos deslizamentos translacionais rasos na bacia de estudo, e comparar com os resultados obtidos pelo modelo FS FIORI;
- Realizar um estudo de retroanálise para entender quais aspectos relacionados ao uso e cobertura da terra e a intensidade de precipitação

condicionaram a formação de dezenas de deslizamentos de terra na bacia do Córrego do Bengalar;

- Aplicar o modelo GEO-SLOPE em seções críticas de encostas, para melhor entendimento da estabilidade de encostas (em escala de vertente) marcadas por intervenções antrópicas críticas;
- Identificar o potencial que a intervenção antrópica tem para alterar o FS das encostas da bacia do Córrego Rancho Alegre, considerando diversos cenários de uso e ocupação do solo.

Portanto, visando atender os requisitos estabelecidos pelo Programa de Pós Graduação em Ciência do Sistema Terrestre (PG-CST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a presente tese está estruturada em formato de artigos (formato alternativo de Tese do INPE). Neste escopo, no Capítulo 2 apresenta-se o referencial teórico geral concernente à temática abordada na pesquisa. Os Capítulos 3, 4 e 5 são independentes, de forma que cada um inclui introdução, materiais e métodos, resultados, discussões e conclusões. No Capítulo 6, referente às conclusões da tese, são discutidos, de forma integrada, os resultados dos três capítulos anteriores; portanto, contempla uma síntese geral a respeito da relação das atividades antrópicas com o contexto socioeconômico e a instabilização de encostas no município de São José dos Campos, SP, focando em especial as bacias do Bengalar e do Rancho Alegre.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste tópico apresentam-se os vários aspectos relacionados à compreensão dos processos controladores dos movimentos de massa, principalmente em região de clima tropical e de estabilidade tectônica (ausência de terremotos significativos), marcada por intervenções antrópicas inadequadas sobre as encostas e as características socioeconômicas explicitadas pela desigualdade. Para tanto, torna-se de suma importância avaliar a estabilidade das encostas, os mecanismos de ruptura para cada tipologia de movimentos de massa, os fatores condicionantes e métodos de previsão e validação, e, também, o conceito de vulnerabilidade aplicado à temática de desastres naturais, fatores esses abordados a seguir.

### 2.1 Tipologias e classificação de movimentos de massa

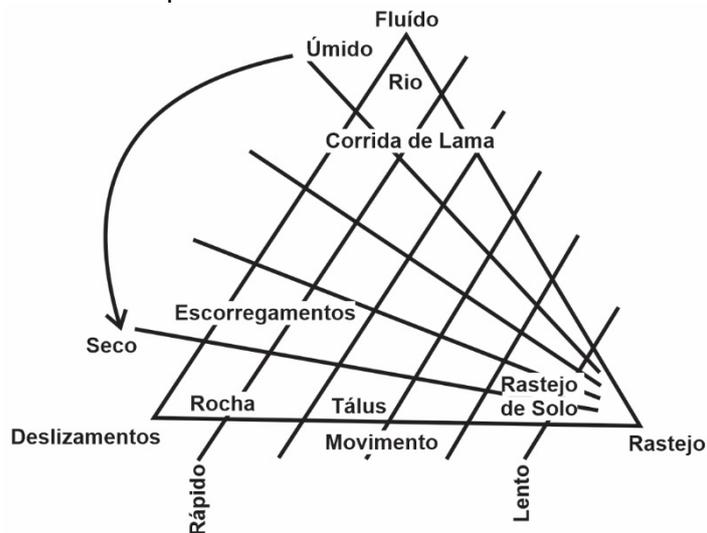
Os movimentos de massa, também denominados por deslizamentos (de terra, rocha ou fluxo de lama e detritos), em razão da grande variedade de materiais, processos e fatores condicionantes, podem ser classificados em diversos tipos. Os múltiplos fatores envolvidos e as ilimitadas possibilidades de enfoques na análise do fenômeno contribuíram para o surgimento de uma grande diversidade de sistemas classificadores (GUIDICINI; NIEBLE, 1983). A maioria das classificações tem influência do contexto ambiental em que o autor/pesquisador a desenvolveu, se restringindo, muitas vezes, a uma aplicabilidade regional. As diferenças no modo de avaliar os diversos fatores que contribuem para o desenvolvimento dos movimentos de massa levam a uma grande variação dos termos taxonômicos empregados (FREIRE, 1965).

Hungr et al. (2013) revisaram vários aspectos da classificação de deslizamentos (*landslides*) desenvolvida por Varnes (1978) e Varnes e Savage (1996), a qual é conhecida e difundida internacionalmente. Com a revisão, alteraram a definição dos materiais formadores para compatibilizar com as terminologias da geotecnia e geologia, no que se refere a rochas e solos, e assim aumentaram de 29 para 32 tipos de deslizamentos que se agrupam em 6 tipos de movimentos: **queda** (rocha, gelo e solo); **tombamento** (rocha e solo); **escorregamentos** (rocha e

solo); **espalhamento** (rocha e solo); **fluxo** (rocha, solo e neve); e **deformação** (rocha, solo e solifluxão).

Para Guidicini e Nieble (1983), os sistemas classificatórios baseados essencialmente nas características físico-mecânicas dos movimentos de massa fornecem os melhores critérios de análise e sistematização. Carson e Kirkby (1972), Selby (1982), Guimarães et al. (2008) e Pizzato e Gramani (2017) consideram que as classificações devem seguir alguns critérios de diferenciação: o tipo de material mobilizado, a velocidade e o mecanismo de movimento, o modo de deformação, a geometria da massa movimentada e o conteúdo de água (Figura 2.1).

Figura 2.1 - Classificação dos movimentos de massa de acordo com o grau de umidade, velocidade e tipo de material.

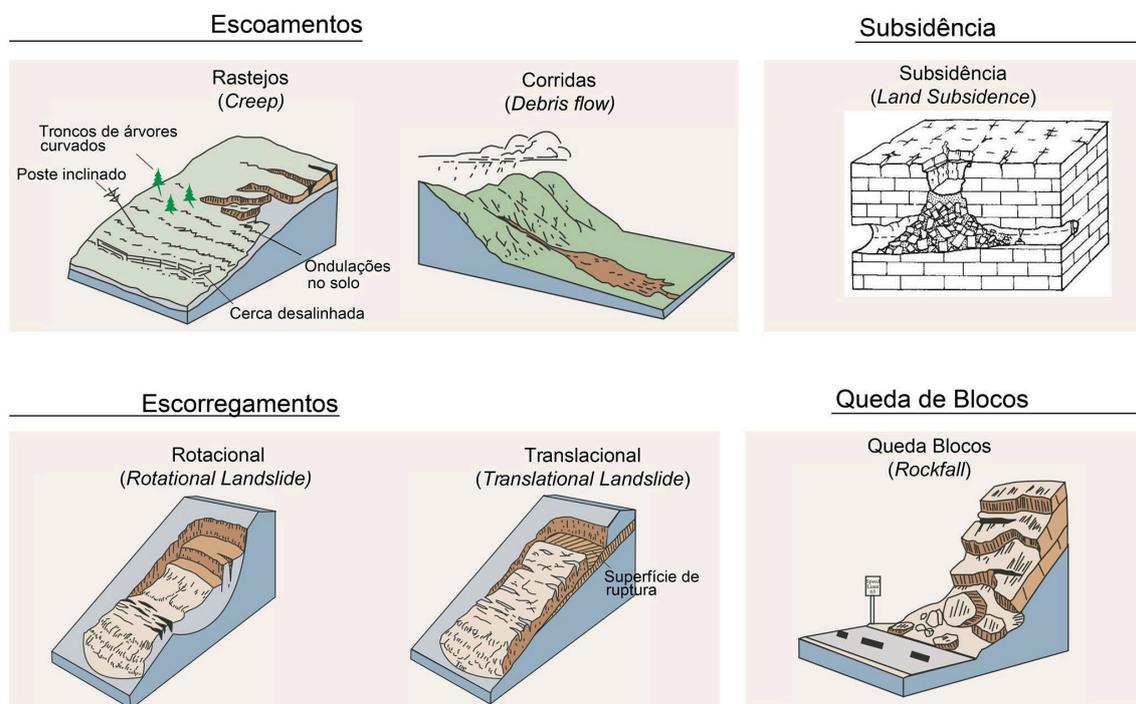


Fonte: Guimarães et al. (2008).

No Brasil, destacam-se as tipologias propostas por Guidicini e Nieble (1983) e IPT (1991), baseados em Freire (1965). Este último autor desenvolveu uma visão sintética das tipologias, a partir da unificação e harmonização de diversas outras abordagens propostas por diversos especialistas. Assim, procurou associar os aspectos geológicos aos físicos-mecânicos dos movimentos de massa no contexto dos ambientes tropicais. Neste sentido, os movimentos de massa, de acordo com esses trabalhos, podem ser classificados simplificada para o contexto brasileiro em: **quedas de blocos**, **subsidiências**, **escoamentos**

(rastejos e corridas) e **escorregamentos** (rotacionais e translacionais) (Figura 2.2).

Figura 2.2 - Tipologias de movimentos de massa em ambientes tropicais.



Fonte: Adaptada de Highland e Bobrowsky (2008).

As **quedas de blocos** (*rockfalls*) são movimentos rápidos em queda livre pela ação da gravidade e associadas a encostas íngremes de paredões rochosos. A presença de descontinuidades nas rochas (fraturas e bandamentos), intensificadas pelos processos de dilatação e contração, devido à oscilação da temperatura, e à percolação de água no maciço fraturado, favorece a movimentação de blocos rochosos.

O movimento do tipo **subsidiência** (*land subsidence*) corresponde ao deslocamento vertical da massa (solo e/ou rocha) e caracteriza-se pela ausência de movimentação horizontal. Na literatura, também é denominado de colapso de terreno. A origem pode estar associada à movimentação do substrato rochoso (epirogenia), falhamentos, ou até mesmo por causas antrópicas, como a retirada de material subterrâneo (água, petróleo, gás, minério) (GUIMARÃES et al., 2008). Este processo também é comum em regiões cársticas, em que a infiltração de água permeia as fraturas de rochas calcárias e causa dissoluções,

gerando acomodações de camadas rochosas e, conseqüentemente, afundamentos nos terrenos, correspondentes a subsidências.

Os **escoamentos** são movimentos contínuos que podem ou não apresentar uma superfície de movimentação bem definida. São classificados em **rastejos** (*creep*) quando o material superficial se desloca lentamente pela encosta (cm/ano), se deformando plasticamente e com velocidade tendendo a reduzir com a profundidade (GUIDICINI; NIEBLE, 1983; IPT, 1991). Quando os movimentos são rápidos e os materiais se comportam como fluídos altamente viscosos, o movimento de massa é classificado como escoamento do tipo **corridas** (*debris-flow*). Esses processos ocorrem em curto período de tempo, com grande velocidade e capacidade de transporte, alcançando grandes distâncias (GUIMARÃES et al., 2008). Apesar de catastróficos, ocorrem raramente na paisagem por estarem associados a chuvas intensas com elevados períodos de recorrência (VIEIRA, 2007).

Os **escorregamentos** são movimentos de massa que ocorrem de forma rápida (m/h a m/s) e com plano de ruptura e volume de massa bem definidos. São processos que podem ser divididos conforme o plano de ruptura (rotacional ou translacional) (GUIDICINI; NIEBLE, 1983; IPT, 1991). Os **escorregamentos rotacionais** (*rotational*) caracterizam-se por um plano de ruptura curvo, côncavo, e por um grande volume de material deslocado de forma rotacional. Geralmente estão associados a superfícies com solos mais desenvolvidos e profundos, e são desencadeados por desgastes naturais ou antrópicos da base da encosta (GUIDICINI; NIEBLE, 1983; IPT, 1991; VIEIRA, 2007). Os **escorregamentos translacionais** (*translational*) apresentam um plano de ruptura abrupto e com a forma planar, geralmente condicionada por estruturas geológicas, depósitos de encostas, contatos entre solos e rocha, e entre horizontes do solo que apresentam grande variação no gradiente textural (VIEIRA, 2007). Estão geralmente associados a solos rasos, encostas íngremes e chuvas de grande intensidade, que eleva a poropressão em uma superfície caracterizada por descontinuidade (GUIMARÃES et al., 2008).

Fernandes et al. (2001) consideram que os escorregamentos rasos de solo, sob a forma de escorregamentos translacionais, são os mais importantes devido a sua grande representatividade espacial. Amaral (1997) e Amaral e Feijó (2004) verificaram, por exemplo, que os escorregamentos translacionais representaram 80% dos movimentos de massa ocorrentes na cidade do Rio de Janeiro nas décadas de 1980 e de 1990. Essa é uma tendência que se estende a todo escarpamento da Serra do Mar e às encostas da Serra da Mantiqueira, estando muitas vezes associada às encostas urbanas devido a ação humana (ZAIDAN; FERNANDES, 2009).

## **2.2 Fatores condicionantes dos movimentos de massa**

Apesar da magnitude e localização dos eventos de movimentos de massa atualmente estarem, muitas vezes, diretamente relacionados com a ação humana, é importante destacar que tais fenômenos inicialmente fazem parte do resultado de processos naturais de evolução do relevo no decorrer do tempo geológico. Fernandes et al. (2001) apontaram evidências desses eventos na Serra do Mar, onde é possível observar recorrências de deslizamentos de terra por meio de espessos depósitos de antigas corridas de massa, em que em muitos deles são observadas várias fases de retrabalhamento. Neste sentido, os deslizamentos podem ser entendidos como a busca por um novo perfil de equilíbrio para as encostas, representando um importante agente modelador do relevo.

Os movimentos de massa são condicionados por complexas relações e interações entre diversos fatores físicos naturais e antrópicos. A deflagração dos movimentos de massa é controlada por uma cadeia de eventos, em que uma série de condições atua individualmente ou em conjunto, refletindo no aumento ou redução das tensões cisalhantes (VIEIRA, 2007). Os diferentes tipos de processos dependem das condições locais, como: fatores geológicos, geomorfológicos, pedológicos, climáticos, vegetacionais e antrópicos (FERNANDES et al., 2001; GUIDICINI; NIEBLE, 1983; GUIMARÃES et al., 2008; SELBY, 1982; VIEIRA, 2007). A Tabela 2.1 apresenta uma síntese dos fatores condicionantes, suas características e processos.

Tabela 2.1 - Fatores condicionantes, características e processos associados dos movimentos de massa.

Fatores Condicionantes	Propriedades/Características	Processos Associados
Geologia	Composição (Mineralogia e Textura) Falhas Fraturas Foliação Bandamento Composicional Planos de Acamamento	Descontinuidades Mecânicas e Hidráulicas
Geomorfologia	Declividades Acentuadas Morfologias Côncavas Orientação das Encostas	Convergência de fluxos superficiais e subsuperficiais; saturação dos solos; posição na paisagem de maior recepção de águas pluviais, velocidade de fluxo; Fator tangencial no sentido da declividade.
Pedologia	Textura Estrutura Permeabilidade Densidade dos Solos	Capacidade de infiltração; Condicionam as poropressões; Plasticidade dos materiais superficiais.
Clima	Intensidade da Chuva Duração da Chuva Oscilação da Temperatura	Influência direta na infiltração, saturação, coesão e fricção dos solos; Variação do comportamento hidráulico devido a altas temperaturas.
Vegetação	Sistema solo-raiz Peso da cobertura vegetal Força de arrasto do vento na copa das árvores	Maior resistência do solo ao cisalhamento; Aumento da tensão normal pelo peso da planta; Aumento das forças cisalhantes; Força mobilizante dos ventos nas copas das árvores.
Ação Antrópica – Preventiva/Corretiva	Muros de Contenção Atirantamentos Ancoramentos Drenos subsuperficiais Retaludamento	Diminuição da poropressão; Diminuição da declividade; estabilização do material superficial
Ação Antrópica - Negativa	Desmatamento Recortes no terreno Aterros e depósitos de lixo Construção	Retirada do sistema radicular; aumento da declividade; descontinuidade mecânica e hidráulica entre aterro e solo; sobrecarga da encosta; remoção do suporte da base da encosta.

Fonte: Próprio autor.

### 2.2.1 Geologia

Os condicionantes geológicos aos movimentos de massa são representados pelas propriedades internas da rocha, no que se refere à textura e mineralogia; e pelas estruturais, tais como, falhas, fraturas, foliação, bandamento composicional, planos de acamamento (AUGUSTO FILHO; VIRGILI, 2004; FERNANDES; AMARAL, 1996; FIORI, 2015). Esses fatores representam

importantes discontinuidades no maciço rochoso e no manto de intemperismo, tanto em termos mecânicos, quanto hidráulicos.

Escorregamentos rotacionais podem ser predominantes em encostas em que os embasamentos se encontram bastante fraturados, condicionando para que o saprolito (rocha decomposta situada na base dos solos) se comporte como um material granular de baixa resistência ao cisalhamento. Escorregamentos translacionais podem predominar em encostas em que o embasamento esteja marcado pela presença de fraturas paralelas à declividade da encosta, originadas da ação de alívio de tensão ou da alteração de bandas composicionais.

As discontinuidades atuam como caminhos preferenciais para o fluxo subterrâneo e para o avanço da frente de intemperismo (alteração), gerando individualizações de blocos nas encostas e, conseqüentemente, gerando heterogeneidade no maciço rochoso. Tais fatores contribuem para a diminuição da resistência mecânica da rocha devido ao movimento da água através das discontinuidades, gerando pressões neutras e hidrostáticas (FIORI, 2015).

### **2.2.2 Geomorfologia**

Fatores de cunho geomorfológico, muitas vezes denominados de parâmetros topográficos, tratam as relações entre a forma e a hidrologia da encosta, englobando parâmetros tais como: declividade, morfologia da encosta, área de contribuição, orientação das encostas, espessura do solo, comprimento da encosta, assimetria dos vales e elevação (FERNANDES et al., 2001).

Fernandes e Amaral (1996) consideraram que a morfologia da encosta pode condicionar a geração de movimentos de massa pela correlação entre declividade da encosta e a frequência de movimentos, ao considerar que o aumento do ângulo da encosta implica na diminuição do fator de segurança (FS). Os autores revelam, no entanto, que é preciso ter cuidado em tal correlação, uma vez que estudos realizados na Nova Zelândia apontaram que, após chuvas intensas, o maior número de movimentos de massa não ocorre, necessariamente, em encostas íngremes, pois movimentos anteriores já teriam removido os solos nestas porções das encostas.

Neste contexto, Fernandes et al. (2001) afirmaram que a declividade ficou sendo utilizada por algum tempo como o principal, ou mesmo o único, parâmetro geomorfológico nos estudos de previsão de áreas instáveis. Como consequência dessa interpretação, áreas de menor declividade, inicialmente definidas como de baixa susceptibilidade mostraram, com frequência, a presença de deslizamentos no campo. Com isso, os autores consideraram que tal fato evidencia que outros fatores condicionantes devem ser também considerados para a interpretação e mapeamentos da suscetibilidade aos processos de movimentos de massa.

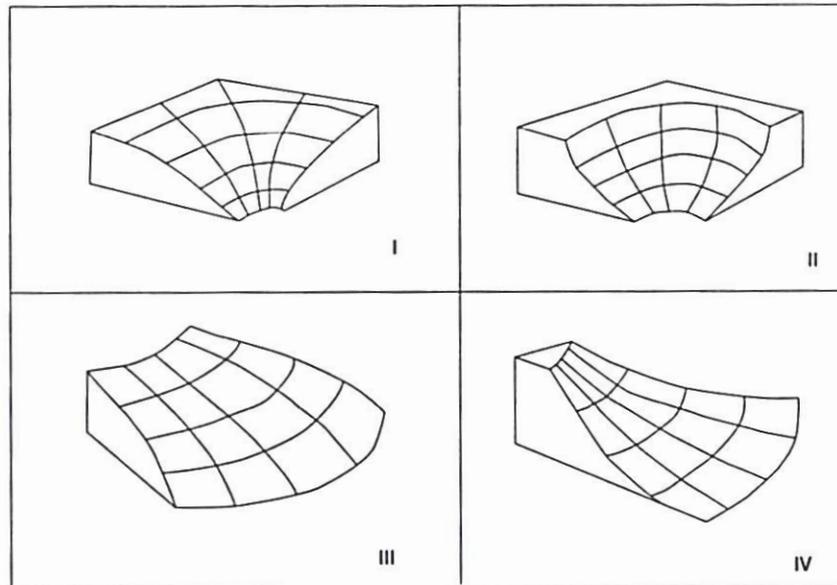
Dessa forma, a caracterização das encostas quanto à declividade, orientação e forma deve ser considerada como um conjunto de fatores atuantes na estabilidade das encostas (VIEIRA, 2007). A orientação espacial da encosta (aspecto) define a sua exposição perante fatores climáticos. Em regiões úmidas, encostas situadas em regiões de barlavento tendem a barrar massas de ar úmido e, conseqüentemente, o material de alteração sofre maior ciclo de umedecimento e maior acréscimo de água e elevação das pressões no seu interior, podendo estar mais suscetíveis à ruptura. A orientação espacial também influenciará a exposição da encosta à insolação, contribuindo para a variação da temperatura da superfície e aos ciclos de secamento do solo; fatores que também contribuem para estabilidade e/ou instabilidade.

No que tange à forma das encostas, podem ser estabelecidas quatro combinações, levando-se em conta as curvas de nível em um mapa e combinando-as com as formas côncavas e convexas e as linhas de fluxo (Figura 2.3). Tais características têm importante papel na distribuição do conteúdo de água no solo durante episódios chuvosos. Nos modelos I e II, evidenciam-se concentração de fluxos na direção do sopé da encosta, enquanto que os modelos III e IV, apontam a dispersão do fluxo na mesma direção (FIORI, 2015).

Diversos estudos de cunho geomorfológico têm chamado a atenção para o papel desempenhado pelas porções côncavas do relevo (*hollows*) na convergência dos fluxos de água (modelos I e II da Figura 2.3), tanto em superfície quanto em subsuperfície (COELHO NETTO, 1985; DIETRICH; DUNNE, 1993; DUNNE, 1970), favorecendo o desenvolvimento de condições de saturação nos solos e a

geração de deslizamentos nas encostas (COELHO NETTO, 1985; FERNANDES; AMARAL, 1996; FERNANDES et al., 2001).

Figura 2.3 - Os quatro tipos básicos de vertentes, combinando concavidade e convexidade das linhas de fluxo e das curvas de nível.



- I - vertentes com linhas de fluxo convexas e curvas de nível côncavas
- II - vertentes com linhas de fluxo côncavas e curvas de nível côncavas
- III - vertentes com linhas de fluxo convexas e curvas de nível convexas
- IV - vertentes com linhas de fluxo côncavas e curvas de nível convexas

Fonte: Fiori (2015).

Devido ao crescente uso de modelos digitais do terreno (MDT's) e de sistemas de informações geográficas (SIG's), os estudos direcionados ao entendimento da morfologia da encosta como condicionante da formação de movimentos de massa ganhou um grande impulso nas geociências (FERNANDES; AMARAL, 1996; FERNANDES et al., 2001; GUIMARÃES et al., 2008; VIEIRA, 2007; Z Aidan; FERNANDES, 2009). As previsões de locais na paisagem onde possam ocorrer os deslizamentos estão sendo realizados a partir da identificação de zonas de saturação do solo extraídas de parâmetros morfológicos, que foram obtidos através de modelos digitais do terreno. Essas informações, associadas a equações matemáticas de fluxos de água nos solos, têm o potencial de apontar em qual local da paisagem pode ocorrer movimentos de massa em decorrência de um evento pluviométrico específico (BAUM et al.,

2002, 2008; DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; DIETRICH et al., 1998; FERNANDES; AMARAL, 1996; FERNANDES et al., 2001; GUIMARÃES et al., 2008; MONTGOMERY; DIETRICH, 1994; MONTGOMERY et al., 1998).

### **2.2.3 Pedologia**

A textura, estrutura, permeabilidade e densidade dos solos influenciam diretamente na capacidade de infiltração e absorção de água da chuva e, conseqüentemente, a possibilidade de ocorrência de deslizamentos. Fernandes e Amaral (1996) destacam que várias descontinuidades podem estar presentes dentro do saprolito (rocha decomposta) e do solo residual e podem atuar de modo decisivo no condicionamento das poropressões no interior da encosta e, portanto, na sua estabilidade.

As características químicas e mineralógicas do solo são importantes propriedades para a definição do grau de estabilidade da encosta, uma vez que os argilominerais predominantes no solo influenciam em sua maior ou menor estabilidade (VIEIRA, 2007). Devido às fortes ligações de pontes de hidrogênio, a caulinita se apresenta geralmente como um argilomineral bastante estável. Deste modo, solo rico em caulinita é menos plástico e com baixa capacidade de troca catiônica e com isso considerado mais estável. Contrariamente, solo rico em argilominerais como haloisita, vermiculita e montmorilonita, devido à capacidade de incorporar água entre suas lâminas, é considerado instável.

Contudo, a relação composição do solo e estabilidade de encosta se dá mais efetivamente em processos tais como escorregamentos rotacionais, corridas de lama e rastejo (VIEIRA, 2007). Em processos de movimentação rápida e de solos rasos, como os escorregamentos translacionais, são controlados principalmente por questões hidráulicas dos solos, no que se refere à geração de poropressão positiva e redução da coesão.

### **2.2.4 Clima**

Os fatores climáticos são representados pelos processos de precipitação e variação da temperatura da atmosfera que aquece e resfria a superfície terrestre. A precipitação pluviométrica é o agente principal no desencadeamento dos movimentos de massa, principalmente em ambiente tropical sem atividades

sísmicas (IPT, 1991; VIEIRA, 2007). Peloggia (1998) considera que a chuva é o agente deflagrador por excelência dos movimentos de massa, pois a saturação do solo por meio de eventos chuvosos reduz o efeito coesivo e a fricção entre as partículas do solo, condicionando um ambiente favorável à ocorrência dos deslizamentos.

De acordo com IPT (1991), embora os movimentos de massa de grandes proporções estejam relacionados aos períodos de alta intensidade pluviométrica, esses processos também ocorrem em menores proporções, associados a volumes pluviométricos não tão expressivos. Desta forma, a intensidade, a duração e a recorrência das chuvas são alguns dos parâmetros considerados em análises da distribuição espaço-temporal das rupturas em encostas tropicais (VIEIRA, 2007).

Tatizana et al. (1987) consideraram que a tipologia das chuvas influencia diretamente em como se avançam as frentes de saturação no interior do solo. As chuvas de baixa intensidade e longa duração apresentam porcentagem de infiltração maior, enquanto que chuvas de alta intensidade e curta duração favorecem o escoamento superficial. A textura e estrutura do substrato, declividade da encosta, cobertura vegetal e o estado prévio de saturação do solo também terão influência no avanço das frentes de saturação. Guzzetti et al. (2008), ao avaliarem uma correlação entre a intensidade e a duração de eventos de precipitação que deram origem a escorregamentos translacionais e corridas de detritos pelo mundo, verificaram que processos múltiplos de deslizamentos de encostas são mais recorrentes quando associados a chuvas abundantes e de longos períodos, confirmando a importância da duração da chuva para a iniciação de deslizamentos de terras, principalmente para a ocorrência de eventos generalizados.

Importante destacar também que existe uma relação inversamente proporcional entre intervenção antrópica e quantidade volumétrica de chuva para o desencadeamento dos movimentos de massa. Altos níveis de intervenção urbana sobre encostas naturais (cortes, aterros, lançamento de águas, sobrecarga, etc.) reduz o montante de precipitação acumulada requerida para o

desencadeamento dos movimentos de massa. Conseqüentemente, em encostas com baixos níveis de intervenção antrópica serão necessários maiores acumulados de chuva para o início do processo de deslizamentos.

Oscilações térmicas diárias e sazonais, associadas diretamente a questões climáticas, provocam variações volumétricas em massas rochosas e de solo, contribuindo para a individualização de blocos na porção superficial das encostas (GUIDICINI; NIEBLE, 1983; MACIEL FILHO, 1994). Contrações e dilatações de origem térmica sobre um bloco de material (solo ou rocha), associado a um plano inclinado e a componente tangencial da força peso, provocam tensões de cisalhamento na superfície de contato com o plano. Se a resistência ao cisalhamento for ultrapassada, haverá deslocamento do material.

Mendes e Valério Filho (2015) descreveram também a relação existente entre altas temperaturas em camadas superficiais do solo e o desencadeamento de deslizamentos nas regiões da Serra da Mantiqueira e da Serra do Mar. Esta relação pode ocorrer por causa da variação do comportamento hidráulico do solo diretamente proporcional à variação da temperatura, podendo verificar o aumento da permeabilidade com o aumento da temperatura do solo. Importante destacar que esta relação é diretamente dependente da temperatura do ar, porém dependerá também das características de cobertura e uso do solo.

### **2.2.5 Vegetação**

A cobertura vegetal exerce uma importante função na dinâmica hidrológica das encostas, bem como o nível de influência na estabilidade das encostas está estreitamente relacionado com a espécie da vegetação, proporção da área vegetada e tipologia do sistema radicular (CHIARADIA et al., 2016; CISLAGHI et al., 2018; DIETRICH et al., 2007;). Fiori (2015) considera difícil avaliar as influências da cobertura vegetal natural na estabilidade das encostas, mas ressalta que alguns aspectos são importantes e merecem ser estudados: resistência do sistema solo-raiz, peso da cobertura vegetal e força de arrasto do vento na copa das árvores.

As raízes promovem um aumento da resistência ao cisalhamento por se integrar ao solo e produzir um material composto, em que as raízes desempenham a

função de fibras flexíveis e elásticas de resistência relativamente alta. As raízes consideradas finas (1 a 20 mm) contribuem mais significativamente para o aumento da resistência ao cisalhamento, enquanto que raízes maiores não tem tanta eficiência neste sentido. Gramíneas, leguminosas e pequenos arbustos produzem um reforço do solo entre 0,75 e 1,5 metros de profundidade e as árvores aumentam a resistência do solo de 3 metros ou mais. Os sistemas de raízes produzem um aumento da resistência do solo devido ao aumento da coesão, na ação de ligamento nas fibras que compõem o solo e também pela adesão das partículas de solo nas raízes (FIORI, 2015; MAFFRA et al., 2019; MICHEL, 2013).

As árvores podem aumentar a pressão normal em uma vertente em até 5 KPa e, de acordo com Fiori (2015), menos da metade contribui efetivamente para o aumento do esforço cisalhante. A sobrecarga produzida pelo peso das árvores aumenta as forças cisalhantes de uma vertente; mas, ao mesmo tempo, aumenta a resistência do solo por causa das raízes.

A pressão exercida pelo vento sobre uma cobertura vegetal na direção da inclinação da vertente é adicionada às forças mobilizantes, reduzindo a resistência à ruptura. Estudos apontam que para uma velocidade de vento de 90 km/h sobre uma floresta é adicionado um esforço cisalhante de até 1,49 kPa. Para Fiori (2015), esse valor é pequeno e não exerce grande influência na estabilidade das vertentes. No entanto, o autor destaca que o vento poderá derrubar a árvore, e a cicatriz deixada no solo, devido ao levantamento das raízes, aumenta a infiltração da água e, com isso, diminui a resistência local do solo ao movimento de massa.

Fiori (2015) aponta ainda que alguns estudos estimaram o declínio da resistência do solo ao cisalhamento por unidade de área de 17 kN/m<sup>2</sup> para 2kN/m<sup>2</sup> após a retirada de áreas florestadas. A magnitude do reforço na estabilidade do solo contra deslizamentos desempenhados pelas raízes diminui rapidamente após o desmatamento. Sidle (1992) assinala que após a retirada da vegetação a resistência total das raízes é retornada após algumas décadas, depois da recuperação da vegetação e da floresta madura.

### **2.2.6 Ação antrópica**

O processo de uso e ocupação da terra influencia na dinâmica natural de evolução das encostas. Em alguns casos, a intervenção humana se dá no sentido de diminuir os movimentos de massa e seus efeitos (intervenções estruturantes - muros de contenção, ancoramentos, drenos subsuperficiais, etc). No entanto, geralmente as diversas atividades realizadas pelo homem, como desmatamentos, recortes nos terrenos, aterros para construção, depósitos de lixo, retilinização de canais fluviais, entre outras interferências, acabam por gerar novas relações com e entre os fatores condicionantes naturais (geologia, geomorfologia, pedologia, hidrologia), interferindo assim no equilíbrio das vertentes e induzindo a ocorrência desses processos, por vezes culminando em efeitos catastróficos (BRUNSDEN; PRIOR 1984; CARRARA et al., 1999; FERNANDES et al., 2001; FERNANDES; AMARAL, 1996; GUIDICINI NIEBLE, 1983; KIM et al., 2013; KÖNING et al., 2019; MACIEL FILHO, 1994; MENDES et al., 2017a; PELLOGIA, 1998; PERSICHILLO et al., 2017; SCHMALTZ et al., 2017; SCHMIDT et al., 2001; SIDLE et al., 1985; VIEIRA 2007).

Na Região Metropolitana de São Paulo, por exemplo, é comum a ocorrência de movimentos de massas associados a taludes de aterros, em que a atividade humana tem promovido modificações no comportamento hidrodinâmico e da estabilidade das encostas (PELOGGIA, 1998). Camadas superficiais de solos que são porosos por natureza, devido aos processos de lixiviação dos componentes solúveis, quando submetido à carga de aterro, torna-se bastante impermeável no contato aterro-solo natural devido à redução da porosidade pela compressão acarretada pela carga do aterro. No contato aterro – solo forma-se uma película impermeável que gera uma descontinuidade hidráulica e torna-se linha preferencial de ruptura da encosta, sendo a causa comum de movimentos de massa em áreas urbanas.

O desmatamento provoca a retirada do sistema radicular, que atua como fibras de resistência relativamente alta do solo, levando à redução da resistência da encosta e à ruptura (CHIARADIA et al., 2016; CISLAGHI et al., 2018; DIETRICH et al., 2007; FIORI, 2015; VIEIRA, 2007). Já a construção de estradas e rodovias,

considerando as condições locais e as técnicas de construção, poderão influenciar na deflagração de rupturas por meio do aumento do peso da encosta, da alteração da declividade da encosta tanto no corte quanto no preenchimento do talude, da remoção do suporte da base da encosta e da reorganização da rede de drenagem (VIEIRA, 2007).

Agentes como explosões, tráfegos pesados, cravação de estacas e operação de maquinários pesados provocam vibrações de alta frequência ao substrato, acelerando assim o processo de instabilização de encostas. O rebaixamento rápido do nível d'água (razão de pelo menos 1 m/dia), comum em reservatórios de barragens, desencadeia a formação de movimentos de massa devido o nível piezométrico do talude não acompanhar a velocidade de rebaixamento da represa, mantendo os materiais das encostas com altas pressões e com maior vulnerabilidade ao rompimento (GUIDICINI; NIEBLE, 1983; MACIEL FILHO, 1994).

Neste contexto, cabe a abordagem da ação humana como um agente geológico/geomórfico, em que os impactos desta ação sobre a superfície terrestre são comparáveis, em magnitude, às mudanças de origem natural (OLIVEIRA, 1999; PELOGGIA, 1998). Ab'Saber (1969) afirmou que a intervenção humana nos solos responde por complexas e sutis variações na fisiologia da paisagem, assemelhando às modificações provocadas pelas variações climáticas quaternárias.

### **2.3 Equilíbrio - Limite**

A avaliação quantitativa da estabilidade de encostas se faz necessária, a fim de fornecer um dado relativo que possa ser usado como referência para a compreensão e comportamento da vulnerabilidade das encostas às mudanças em suas características hidráulicas e mecânicas. No entanto, a estabilidade das encostas envolve uma complexidade de dados e muitas variáveis, e, com isso, torna-se importante que os elementos geométricos, geológico-geotécnicos e hidrológicos das encostas sejam simplificados em termos numéricos.

A análise baseada no equilíbrio-limite é bastante difundida nos estudos de estabilidade dos taludes, devido à simplificação realizada na definição da

estabilidade. A análise de equilíbrio-limite considera que as forças que tendem a induzir a ruptura do talude são neutralizadas pelos esforços resistentes (COLANGELO, 1995; COLANGELO, 2005; COLANGELO, 2012; FIORI, 2015; GUIDICINI; NIEBLE, 1983; GUIMARÃES et al., 2008; SELBY, 1982). Em um sistema de encosta natural, a força de cisalhamento é gerada pela interação entre a força gravitacional, a carga sobrejacente ao ponto considerado e a declividade da vertente. Em contrapartida, a força de resistência ao cisalhamento é estreitamente dependente das características dos materiais superficiais (COLANGELO, 1995; COLANGELO, 2005, COLANGELO, 2012).

Nesse sentido, Guimarães et al. (2008) ressaltaram que a ocorrência dos deslizamentos de terra está vinculada ao conjunto de tensões existentes nos materiais das encostas. A coesão e o atrito são propriedades inerentes dos materiais, constituindo a força de resistência ao cisalhamento. A coesão é proveniente da cimentação química das micropartículas dos solos, referente à fração argila e aos compostos orgânicos (coesão eletroquímica), e da capilaridade, que é a tensão superficial em lâminas de águas entre as micropartículas dos materiais superficiais (coesão aparente/sucção matricial). O atrito está associado principalmente com a fração arenosa dos materiais superficiais e sua efetividade é diretamente proporcional à tensão normal (COLANGELO, 2005; SELBY, 1982). Embora o atrito seja uma característica intrínseca do material superficial, ele se manifesta a partir de aplicação de tensão externa cisalhante (COLANGELO, 2012).

Se a tensão de cisalhamento (gravidade, sobrecarga e declividade) ultrapassar a força de resistência (coesão e atrito), os materiais perdem a estabilidade, geram superfícies de ruptura e assim desencadeiam os movimentos de massa. Neste contexto, a movimentação dos materiais superficiais pode ser entendida como a busca por um novo perfil de equilíbrio para as encostas.

Em 1776, o engenheiro francês Coulomb propôs uma função que correlaciona as duas componentes da resistência ao cisalhamento (coesão e atrito) expresso pela Equação 2.1 (COLANGELO, 2005; FIORI, 2015; SELBY, 1982):

$$S = C + \sigma \cdot \tan \phi \quad (2.1)$$

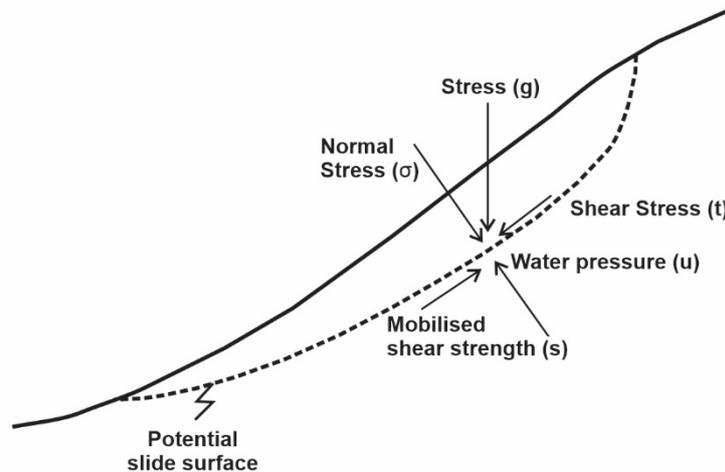
em que:  $S$  = resistência ao cisalhamento,  $C$  = coesão,  $\sigma$  = tensão normal ao plano de cisalhamento,  $\phi$  = ângulo de atrito interno.

No entanto, em 1950 Terzaghy alterou a equação original de Coulomb, contemplando a influência da tensão neutra da água ( $\mu$ ) sobre a coesão e a tensão normal. O modelo de Terzaghy indica que as pressões da água nos poros reduzem a resistência ao cisalhamento, devido à redução do atrito e da coesão aparente dos materiais do solo. Essa nova concepção é expressa pela Equação 2.2:

$$S = C + (\sigma - \mu) \cdot \tan \phi \quad (2.2)$$

A poropressão positiva da água sobre o plano de ruptura contribui para alterar a estabilidade da encosta, por reduzir a tensão normal efetiva e também a força de coesão e atrito do solo (GUIMARÃES et al., 2008; SELBY, 1982). Ao analisar as forças que agem sobre um ponto no plano de ruptura de um potencial escorregamento translacional (Figura 2.4), é possível observar que a força gravitacional ( $g$ ) atua verticalmente, a tensão normal ( $\sigma$ ) é perpendicular ao plano de cisalhamento ( $t$ ) e sofre um esforço contrário devido ao efeito de fluviabilidade (subida) promovido pela poropressão positiva da água ( $u$ ) no material superficial saturado da encosta (SELBY, 1982). A pressão de poros (poropressão), por ser exercida por um líquido, tem como característica principal atuar com igual intensidade em todas as direções (FIORI, 2015). Esse esforço contrário, exercido em todas as direções, tende a anular as forças de coesão, atrito e tensão normal, forçando a desagregação e ruptura do material superficial que se caracteriza pela homogeneidade.

Figura 2.4 - Forças atuantes em um potencial plano de cisalhamento.



Fonte: Selby (1982).

Para analisar a estabilidade de encostas em diferentes condições de equilíbrio-limite, define-se o FS, estabelecido pela relação entre a resultante das forças indutoras e das forças de resistência ao escorregamento (FIORI, 2015; GUIDICINI; NIEBLE, 1983; GUIMARÃES et al., 2008; SELBY, 1982):

$$FS = \frac{\text{Forças Resistentes}}{\text{Forças Indutoras}}$$

As forças que promovem a estabilidade são equivalentes às forças que provocam a instabilidade, em que  $FS = 1$ . Quando o  $FS < 1$  a encosta está em condição de se romper. Em contrapartida, quando o  $FS > 1$  é provável que o talude esteja em condição de estabilidade. No entanto, é importante ressaltar a complexidade das variáveis envolvidas nos cálculos de estabilidade de encostas, não sendo possível afirmar a existência da estabilidade absoluta, em que o FS é utilizado apenas como um valor de referência (SELBY, 1982).

Deste modo, para fins práticos, os especialistas sempre adotam estimativas muito conservadoras de estabilidade. Ao avaliar os procedimentos da NBR 11682/2009 – Estabilidade de Encostas (ABNT, 2009), que fixa as condições exigíveis no estudo e controle da estabilidade de taludes no Brasil, verifica-se que na avaliação do grau estabilidade das encostas através dos métodos baseados no equilíbrio-limite são exigidos acréscimos mínimos de segurança.

Quando o grau de segurança necessário ao local é considerado baixo, acrescentam-se 15 % ao FS, médio 30 % e alto 50 %.

## **2.4 Métodos de previsão**

A previsão de movimentos de massa envolve uma conjuntura de procedimentos que visa determinar um índice ou uma grandeza numérica que permita quantificar o quão próximo uma determinada encosta está de se romper em decorrência da atuação de um conjunto de fatores (VIEIRA, 2007). Uma variedade de métodos tem sido desenvolvida, principalmente em ambiente SIG, para a análise de predição dos movimentos de massa, envolvendo variadas escalas de análises, desde unidades elementares, como uma encosta, a recortes espaciais mais amplos, como bacias hidrográficas ou regiões político-administrativas (GUZZETTI et al., 1999; VIEIRA; RAMOS, 2015; ZAIDAN; FERNANDES, 2009).

Colângelo (2012) considerou que os modelos aplicados à estabilidade das encostas têm um tempo de evolução de 240 anos, desde as concepções iniciais de Coulomb, em 1776, acerca da ocorrência de rupturas nos materiais terrígenos. A partir da adoção de modelos matemáticos na década de 1970 e uso mais difundido do computador na década de 1980, a modelagem tornou-se uma das mais importantes linhas de pesquisa da geomorfologia (CHRISTOFOLLETI, 1999), desempenhando importante papel como método de predição de processos na superfície terrestre. Modelos podem ser entendidos como estruturas simplificadas da realidade, tendo com uma das principais funções a simulação e prevenção de cenários de mudanças ambientais e, com isso, contribuir para a geração de respostas e auxiliar para a tomada de decisões (ZAIDAN; FERNANDES, 2009).

Deste modo, de acordo com a literatura, os principais métodos de previsão de movimentos de massa podem ser agrupados em quatro categorias: abordagem probabilística; modelagem heurística; modelagem estatística; e modelagem determinística (FERNANDES et al., 2001; GUZZETTI et al., 1999; GUIMARÃES et al., 2008; VIEIRA, 2007; VIERIA; RAMOS, 2014; VIEIRA et al., 2017). Estes métodos visam processar e analisar um conjunto de informações e elaborar

mapas de suscetibilidade ou até mesmo de risco de movimentos de massa sob a população, a partir de diferentes abordagens. Existem também os que trabalham em escala de encosta e apresentam os resultados por meio de perfis topográficos e estratigráficos, apontando a superfície de ruptura. Ainda é importante considerar os modelos híbridos, que é a combinação entre modelos de categorias diferentes, visando resultados mais acurados.

Os modelos matemáticos determinísticos ganham destaque, frente aos outros métodos, por considerarem relações exatas de causa e efeito, e consistirem em um conjunto de afirmações matemáticas que deduzem em respostas únicas e objetivas (CHORLEY; HAGGET, 1975). Ou seja, os modelos determinísticos consideram que leis físicas (leis da natureza) controlam a estabilidade das encostas e a subjetividade neste método só pode existir se estiver relacionada à escolha dos parâmetros de entrada, não no resultado final (FERNANDES et al., 2001; GUIMARÃES et al., 2008; GUZZETTI et al., 1999; VIEIRA; RAMOS, 2015; ZAIDAN; FERNANDES, 2009).

O conhecimento ainda incompleto dos processos envolvidos nos movimentos de massa e a baixa densidade de dados (propriedades dos materiais das encostas), com pouca distribuição geográfica, obtendo assim pequena representatividade das áreas estudadas, são as maiores limitações da modelagem determinística (FERNANDES et al., 2001).

De acordo com Vieira (2007); Vieira e Ramos (2015) e Vieira et al. (2017), a modelagem determinística enquanto método para previsão de deslizamentos tem como característica básica o uso acoplado de equações de estabilidade de encostas e hidrológicas. Vários estudos para a previsão de deslizamentos têm sido desenvolvidos recentemente, obtendo assim muitos progressos. A aplicação de tecnologias geoespaciais, tais como o sensoriamento remoto e sistemas de informação geográfica (SIGs), tem contribuído muito para o aprimoramento dos métodos de mapeamento da suscetibilidade aos deslizamentos nos últimos anos (CHAE et al., 2017).

Neste contexto, alguns modelos existentes, tais como SINMAP (PACK et al., 1998, 2001), SHALSTAB (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; MONTGOMERY;

DIETRICH, 1994;) e TRIGRS (BAUM et al., 2002, 2008) têm sido bastante usados e aprimorados em países como Estados Unidos, Brasil, China e Itália (TEIXEIRA et al., 2015) e destacam-se pela significativa eficiência na indicação de áreas instáveis, mesmo em ambientes de contexto geomorfológico e climáticos diversificados (MICHEL et al., 2014; VIEIRA; RAMOS, 2015; ZAIDAN; FERNANDES, 2009).

O modelo TRIGRS destaca-se por ter sido desenvolvido para modelar a ocorrência potencial de deslizamentos rasos (escorregamentos) em função das mudanças de pressão no solo que se dá em resposta aos volumes de chuva e às taxas de infiltração no decorrer do tempo (CHAE et al., 2017). Ou seja, o TRIGRS se trata de um modelo transiente que tem sido adotado para avaliar a previsão espaço-temporal de ocorrência de deslizamentos. Modelos transientes são capazes de melhorar a eficácia da análise de suscetibilidade, mas geralmente precisam de informações espaciais mais robustas e precisas (SORBINO et al., 2010; CHAE et al., 2017).

O modelo GEOSLOPE também ganha evidência entre os modelos determinísticos, por trabalhar em escala de vertente e poder ser utilizado para modelar diferentes materiais superficiais, estratigrafias complexas, diversas formas de encosta e em diferentes condições de poro-pressão (GEO-SLOPE, 2015; MENDES et al., 2017a; SANTOS, 2004).

No que tange aos modelos heurísticos, o princípio de análise é de que um mapa de suscetibilidade aos movimentos de massa é obtido a partir da combinação de vários mapas (álgebra de mapas), aos quais são atribuídos notas e pesos aos diversos fatores condicionantes da instabilização das encostas (geologia, geomorfologia, pedologia, uso do solo). Os pesos e notas são definidos a partir de critérios lógicos determinados por especialistas nas áreas relacionadas (geotecnia, geografia, geologia, etc.) (CAMARINHA, 2016). Embora este método de previsão da suscetibilidade de movimentos de massa tenha se tornado bastante difundido com o advento dos SIG's, é preciso ter cuidado no seu uso, pois, apesar de lógico, existe uma enorme subjetividade na atribuição de pesos e notas. Fernandes et al., (2001) destacaram que os critérios de instabilidade e

as regras de combinação dos dados são subjetivos e pode apresentar diferentes resultados para cada especialista em uma mesma área de estudo. Ou seja, cada especialista poderá dar ênfase no que acha mais importante, de acordo com a sua especialidade.

## **2.5 Métodos de validação**

Os mapeamentos de suscetibilidade a deslizamentos necessitam da aplicação de técnicas que avaliem a qualidade e representatividade dos resultados, configurando-se assim na etapa de validação (CAMARINHA, 2016). Esta etapa pode ser realizada através da intersecção entre dados reais de cicatrizes de deslizamentos pretéritos e o resultado da suscetibilidade a deslizamentos.

O mapeamento de cicatrizes pode ser obtido por técnicas de sensoriamento remoto através da interpretação de fotografias aéreas e imagens de satélite. Dados de sensores remotos podem também ser utilizados para a identificação e quantificação da área de abrangência desses processos. A relação espacial entre os mapas de cicatrizes e as classes de suscetibilidade pode ser realizada por meio de técnicas de geoprocessamento, permitindo identificar e quantificar as classes de suscetibilidade que se relacionam com as cicatrizes mapeadas.

Para essa quantificação, é bastante difundido na literatura o estabelecimento de dois índices: Concentração de Cicatrizes (CC), dado pela razão entre o número de células de cada classe afetada pelas cicatrizes e o total de células afetadas na área estudada; e o Potencial de Escorregamento (PE), razão entre o número de células de cada classe afetada pelas cicatrizes e o total de células dessa mesma classe. Outra forma de apresentar a intersecção das cicatrizes com as classes é a conversão dos resultados de suscetibilidade em polígono, permitindo assim quantificar os índices através da área (m<sup>2</sup>) e não por número de pixels (CAMARINHA, 2016). Este mesmo autor apresenta também a possibilidade de validar os resultados de suscetibilidade através da relação com setores de risco aos deslizamentos previamente mapeados, obtendo-se bons resultados na validação.

A acurácia do modelo também pode ser realizada usando o método da curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*). Este método permite avaliar a

precisão geral de um modelo de forma contínua, evitando erros devido à divisão do mapa em classes de susceptibilidade. As curvas ROC representam a proporção de áreas com deslizamentos corretamente classificados como suscetíveis (taxa de verdadeiro positivo) contra a proporção de unidades de terreno estáveis classificadas como suscetíveis (taxa de falsos positivos) (BRITO et al., 2017; CISLAGHI et al., 2018; FRATTINI et al., 2010).

### **3 USO DE MODELAGEM HÍBRIDA PARA A PROPOSIÇÃO DO ÍNDICE DE VULNERABILIDADE SOCIOGEOAMBIENTAL DE SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, SP (IVSGEO – SJC)**

#### **3.1 Introdução**

A previsão de ocorrência e a localização precisa de eventos relacionados a deslizamentos de terra, bem como a preparação da sociedade em condições de pré e pós desastre são desafios ainda não totalmente equacionados. Portanto a condução de estudos focando a proposição de índices de vulnerabilidade que considerem as características ambientais intrínsecas relacionadas à tipologia dos desastres deflagrados por fenômenos hidrometeorológicos, associadas às características socioeconômicas, são de fundamental relevância. Neste contexto, o conceito de vulnerabilidade tem se tornado importante objeto de estudo, uma vez que deve contemplar uma abordagem das características naturais do ambiente e das relações humanas entre si e com o território. Dados como renda, educação, condições das habitações/moradias, estrutura familiar, entre outras, devem ser considerados na análise de vulnerabilidades, juntamente com as características físico-naturais das localidades suscetíveis a deslizamentos. A partir de avaliação integrada pode-se estabelecer e quantificar a capacidade de determinadas sociedades de absorver, de se auto-organizar e de se adaptar às condições de desastres.

O município de São José dos Campos, SP, em razão das suas especificidades geológicas e geomorfológicas, caracteriza-se pela suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos de terra. Mapeamentos elaborados por Valério Filho et al. (2014) e pelo IPPLAN (2018) apontam a existência de áreas de risco a escorregamentos no município, bem como indicam um aumento significativo no número de moradias em risco a escorregamentos.

Em razão do exposto, o objetivo deste trabalho foi desenvolver um índice que permitisse avaliar a exposição da cidade de São José dos Campos aos deslizamentos de terra, a partir da integração de dados relacionados às condições naturais, no que tange ao contexto geomorfológico, de infraestrutura urbana e habitacional, com as características sociais e econômicas da

população. Neste contexto, propõe-se o Índice de Vulnerabilidade Sociogeambiental (IVSGeo), o qual baseia-se no uso de modelagem híbrida, permitindo a integração dos resultados de análise de suscetibilidade aos deslizamentos gerados pelo modelo determinístico FS FIORI com as características socioeconômicas do município, estas obtidas a partir dos dados do Censo sociodemográfico de 2010 do IBGE, o mais recente disponível até a realização deste trabalho.

A seguir apresenta-se uma discussão do conceito de vulnerabilidade considerando-se diferentes abordagens propostas por diversos autores; posteriormente são apresentadas as características naturais e socioeconômicas do município de São José dos Campos; seguido pelos procedimentos metodológicos implementados para o estudo; e, por último, são apresentados os resultados, considerando uma discussão das diferentes características (geomorfológicas e socioeconômicas) do espaço intra-urbano, bem como a espacialização do Índice de Vulnerabilidade Sociogeambiental de São José dos Campos (IVSGeo – SJC).

### **3.2 Conceito de vulnerabilidade**

O conceito de vulnerabilidade é uma importante ferramenta analítica proposta para descrever o estado de suscetibilidade aos prejuízos, impotência e marginalidade de sistemas físicos e sociais, além de servir de guia de análise normativa de ações para o aumento do bem estar, através da redução do risco (ADGER, 2006). Para Cutter et al. (2003), por muito tempo as pesquisas consideravam principalmente as componentes da vulnerabilidade biofísica e do ambiente construído, ignorando os aspectos de cunho social. Isso ocorreu devido, principalmente, à dificuldade em quantificar as questões sociais, as quais ficavam muitas vezes restritas aos registros de estimativas pós-desastre. Contudo, estudos associados aos índices de vulnerabilidade social têm sido cada vez mais propostos, os quais buscam explicitar a desigualdade social e local, e contribuir para o entendimento de como grupos sociais distintos são impactados diferentemente pelos desastres (HUMMELL et al., 2016).

Cutter et al. (2003) desenvolveram uma metodologia pioneira para avaliar a vulnerabilidade social de todos os condados americanos com base em dados censitários, gerando o Índice de Vulnerabilidade Social (SoVI). Este índice incluiu indicadores multidimensionais de população e resiliência e os resultados destacaram os principais componentes capazes de aumentar a vulnerabilidade da população a desastres (DIAS et al., 2020). Recentemente, diversos estudos (DINTWA et al., 2019; GAUTAM, 2017; HUMELL et al., 2016; MENDES J. et al., 2020) adotaram a mesma metodologia proposta por Cutter et al. (2003), enquanto outros estudos têm destacado/focado no diagnóstico da vulnerabilidade integrado à análise de risco para apoiar o planejamento de emergência, bem como para a emissão de alerta às populações em áreas de risco (ALVALÁ et al., 2019; DIAS et al., 2020; HOSSAIN, 2015; MOGHADAS et al., 2019; MOHANTY et al., 2019; SALVATI et al., 2018).

A interação entre características sociais e ambientais determina o nível de exposição e sensibilidade de um determinado local, em que as características sociais, políticas, culturais e econômicas formam a capacidade de adaptação da população (SMIT; WANDEL, 2006). Neste contexto, é importante destacar os conceitos de resiliência, que é a capacidade dos grupos sociais de absorverem perturbações, de se auto organizar e de se adaptar às circunstâncias emergenciais (ADGER, 2006).

A interação entre a vulnerabilidade social e a biofísica (aspectos naturais do lugar), a qual se caracteriza por uma análise híbrida de dados de diferentes origens, pode receber algumas denominações. Cutter et al. (2003) classificaram como vulnerabilidade geral do lugar, enquanto Freitas et al. (2012) consideraram como vulnerabilidade socioambiental e, em outros estudos, são referenciadas como vulnerabilidade socioecológica (ADGER, 2006; ANAZAWA et al. 2013; ANAZAWA, 2012; PANDEY; BARDSLEY, 2015).

Freitas et al. (2012) consideraram a vulnerabilidade como resultante de processos sociais e mudanças ambientais, em que estruturas socioeconômicas produzem simultaneamente condições de vida precárias e ambientes deteriorados, a qual eles denominam de vulnerabilidade socioambiental. Os

autores ainda afirmam que os processos sociais relacionados ao trabalho, renda, saúde, educação, infraestrutura, habitação e saneamento, associados às características físicas e ambientais do lugar, são determinantes para definir o nível de vulnerabilidade a alguma ameaça, como, por exemplo, eventos naturais extremos.

Anazawa et al. (2013) construíram um conjunto de representações que possibilitou a operacionalização do conceito de vulnerabilidade socioecológica, explicitando o território através da associação de feições naturais e ambientes construídos pelo homem. O território, suas dinâmicas e relações sociais foram reconsiderados, permitindo assim uma releitura do conceito de vulnerabilidade, em que observa as cidades em um contexto de sistemas socioecológicos.

O conceito de vulnerabilidade socioambiental abordado por Freitas et al. (2012) trata da questão biofísica/ambiental associada às mudanças ambientais resultantes da degradação, enquanto que a abordagem socioecológica enfatiza as características naturais do ambiente, em termos de suscetibilidade natural e capacidades de resiliência e adaptação. No entanto, o conceito socioecológico é também abordado em outras áreas do conhecimento, como, por exemplo, na biologia marinha, que estuda a vulnerabilidade socioecológica das populações marinhas associadas aos ambientes de corais.

Apesar das diferenças e diversidades conceituais de vulnerabilidade, não há uma definição mais representativa que outra no campo científico, podendo assim colocar o termo vulnerabilidade como um conceito mediador, utilizado para facilitar e mediar o diálogo entre profissionais de diferentes áreas (ANAZAWA et al., 2013). Marandola Jr. e Hogan (2006) apontaram para a necessidade de buscar um olhar multidimensional e de esforços interdisciplinares para a abordagem da vulnerabilidade. Eles afirmam a importância de reconhecer que a vulnerabilidade envolve uma gama de fenômenos de natureza multidimensional e multifacetada, que torna imperativo o diálogo e um olhar mais abrangente diante do tema.

Neste sentido, no presente estudo propõe-se o Índice de Vulnerabilidade Sociogeambiental (IVSGeo) que integra alguns aspectos relacionados às

questões socioeconômicas da população e do lugar com as características morfodinâmicas que definem a estabilidade das encostas. A ciência geomorfológica dá sustentação conceitual e técnica para a avaliação da suscetibilidade natural e da influência antrópica aos deslizamentos de terra.

Florezano (2008) considerou a análise do relevo importante não só para a Geomorfologia, mas também para auxiliar na definição da fragilidade/vulnerabilidade do meio ambiente. De acordo com esta autora, entre as décadas de 1940 e 1960, com a evolução da abordagem quantitativa (Revolução Quantitativa e Teorética), da computação e da teoria de sistemas, que influenciaram significativamente os estudos geomorfológicos, foi criado por Hack (1960) o conceito de “equilíbrio dinâmico”, cujo relevo é reconhecido como um sistema aberto e com constantes trocas de energia e matéria com os demais sistemas terrestres. Com isso, iniciaram-se o desenvolvimento e a difusão do uso de modelos quantitativos que pudessem simular os balanços de energia nos sistemas naturais, destacando os modelos em geomorfologia, principalmente aqueles voltados à previsão dos deslizamentos de terra (BASS, 2017; CHORLEY, 1962; CHORLEY; HAGGETT, 1967, 1974, 1975; CHRISTOFOLLETI, 1999; FERNANDES et al., 2001; FERNANDES, 2016; VIEIRA; MARTINS, 2016).

### **3.3 Área de estudo**

O Censo Demográfico do ano de 2010, conduzido pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE, contabilizou a população de São José dos Campos, SP, em 629.921 habitantes, sendo que deste total 97,7% correspondem à população vivendo em área urbana e somente 2,3% da população vivendo na área rural. O Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil aponta que São José dos Campos tem uma densidade demográfica de aproximadamente 572 habitantes/km<sup>2</sup>, um Índice de Desenvolvimento Humano Municipal (IDHM) para o ano de 2010 de 0,807, considerado como muito alto e ocupando a 24<sup>a</sup> posição no país (PNUD, 2015). O município é marcado positivamente por uma elevação do IDHM de 0,739 no ano 2000 para 0,807 em

2010, destacando-se a Educação, Longevidade e Renda como os índices que mais cresceram nesse período.

Alvares et al. (2013) destacaram que no município de São José dos Campos predomina um clima oceânico, sem estação seca e com verão quente na porção sul associado à superfícies topograficamente rebaixadas, enquanto na porção norte predomina o mesmo, com verão temperado em decorrência de altitudes mais elevadas (Figura 3.1A e 3.1B). As precipitações são influenciadas por sistemas meteorológicos sinóticos e de grande escala, tais como frentes frias e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (SELUCHI; CHOU, 2009). Importante ressaltar que, somado a estes sistemas, destacam-se as chuvas convectivas de verão que contribuem significativamente para o aumento da umidade dos solos e para a instabilização das encostas (MENDES et al., 2017a).

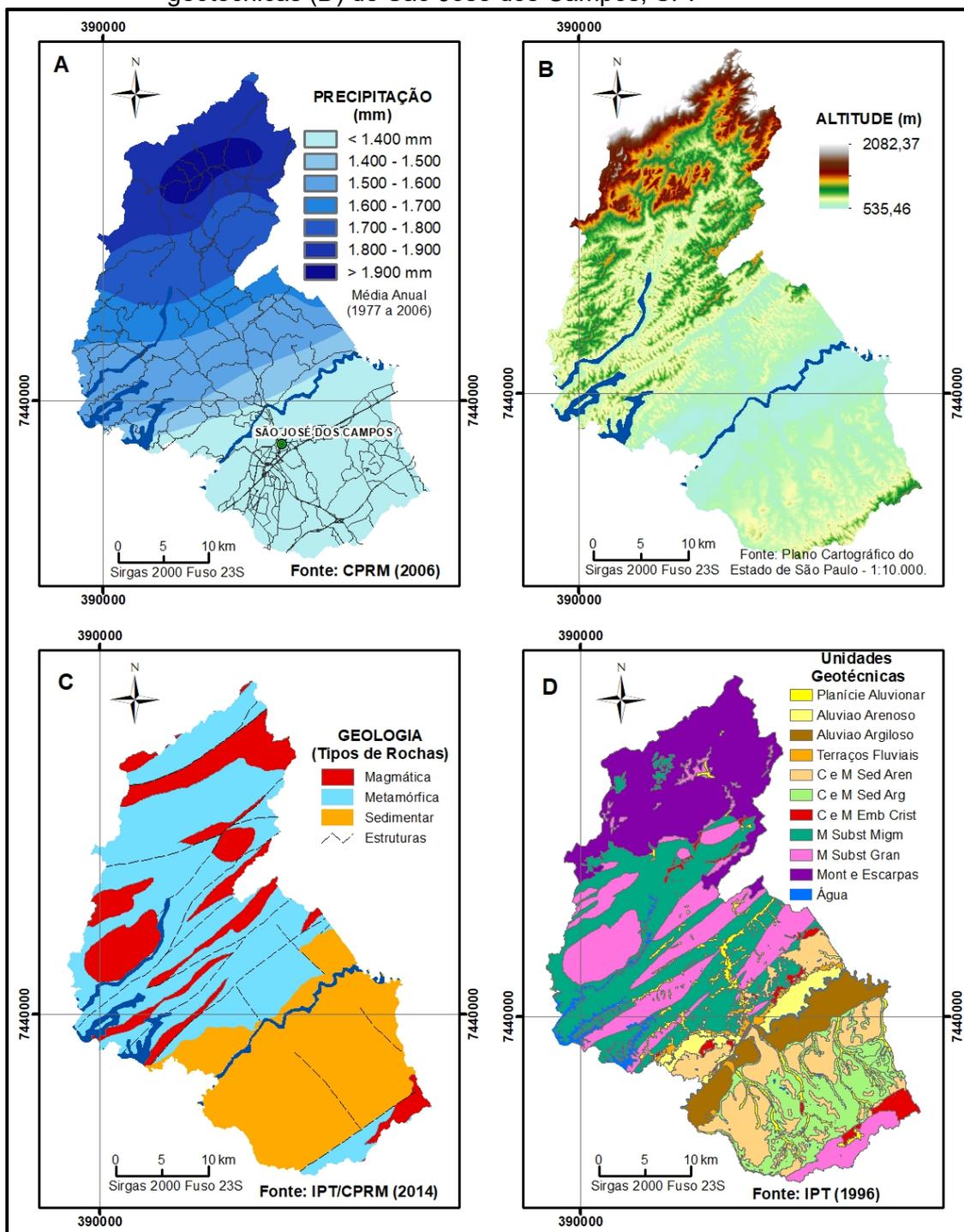
As características físicas do município de São José dos Campos culminam em um quadro de fatores que indicam o potencial natural para a ocorrência de deslizamentos. O município é constituído por dois conjuntos geológicos/geomorfológicos distintos: terrenos cristalinos formados por rochas ígneas e metamórficas, com destaque na Região Norte, associado a relevo do tipo morrotes, morros e escarpas (Serra da Mantiqueira, ao norte); e cobertura sedimentar predominante na Região Central e Sul associada a planície do rio Paraíba do Sul, além de colinas e tabuleiros (Figura 3.1C). As características geológicas e geomorfológicas condicionam a existência de áreas com alta suscetibilidade à ocorrência de escorregamentos na região, com formação geológica magmática e metamórfica; também havendo áreas de risco em encostas íngremes relacionadas com a formação geológica sedimentar, mas em menor quantidade (MENDES et al., 2017a).

A Carta Geotécnica de São José dos Campos delimita 8 unidades, conforme o desempenho esperado das superfícies para o uso e ocupação (IPT, 1996). As unidades geotécnicas foram cartografadas na escala 1:50.000 para todo o município; porém, sendo detalhado os terraços associados à planície aluvionar do rio Paraíba do Sul em escala de 1:25.000, onde há extensas áreas urbanizadas (Figura 3.1D).

O comportamento dos terrenos situados no extremo norte do município, onde predomina relevo escarpado vinculado à topografia acidentada (Unidade 8 – Montanhas e Escarpas), é bastante suscetível aos deslizamentos, sendo comum a presença de afloramentos rochosos devido à baixa estabilidade da cobertura superficial que se acomoda em cima das rochas. Na Região Norte há ainda locais que predominam morros, em que a variação litológica condiciona diferentes tipos de movimentos de massa: nos locais sustentados pelo embasamento granitóide (Unidade 7), há predominância de queda e rolamento de blocos; nos terrenos com substrato de rochas bastante orientadas, como os migmatitos, gnaisses e xistos/filitos (Unidade 6), destacam os deslizamentos de terra no contato solo/rocha.

Nas superfícies onde a topografia é menos acidentada, como as colinas/morrotos (Unidades 5, 4 e 3) associadas ao embasamento cristalino ou depósitos sedimentares e terraços/planícies aluvionares (Unidades 2 e 1), as características geotécnicas naturalmente são menos suscetíveis aos deslizamentos de terra; no entanto há, em menor quantidade, áreas de risco, principalmente associadas às áreas antropizadas.

Figura 3.1 - Mapas de isoietas de precipitação (A), MDT (B), geologia (C) e unidades geotécnicas (D) de São José dos Campos, SP.



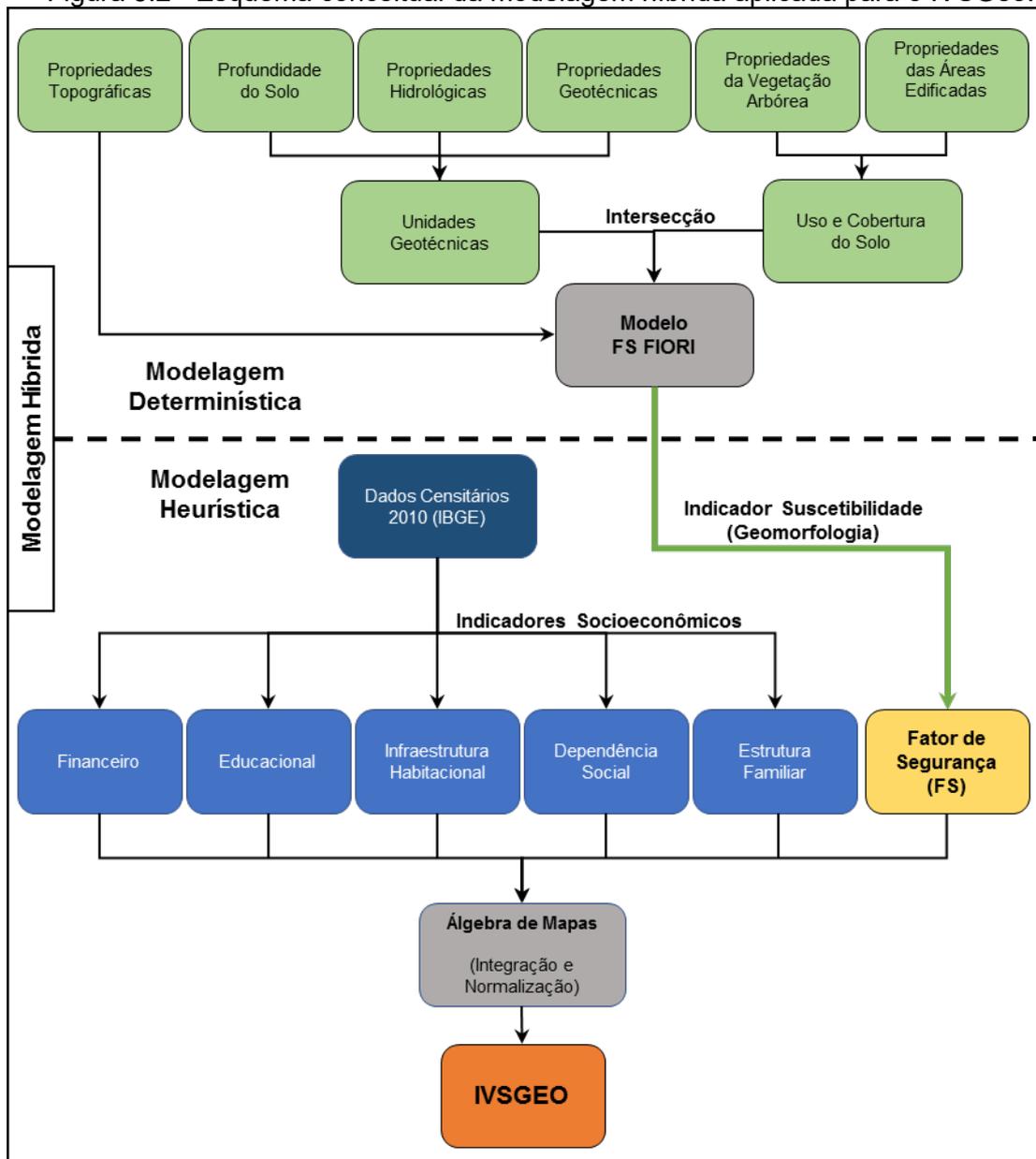
Fonte: Próprio autor.

### 3.4 Materiais e métodos

O Índice de Vulnerabilidade Sociogeambiental (IVSGeo) de São José dos Campos – SP proposto foi desenvolvido por meio de um processo de modelagem

híbrida, que buscou aderir satisfatoriamente informações acerca da suscetibilidade natural aos deslizamentos de terra e dados socioeconômicos do município. A suscetibilidade natural aos deslizamentos foi definida a partir de um modelo determinístico (matemático) que, posteriormente, foi associado aos indicadores socioeconômicos por um processo de modelagem heurística, para qual cada grupo temático de indicadores adquiriu um peso percentual que possibilitou a geração do IVSGEO (Figura 3.2).

Figura 3.2 - Esquema conceitual da modelagem híbrida aplicada para o IVSGEO.



Fonte: Próprio autor.

A caracterização da suscetibilidade natural aos deslizamentos de terra do município foi obtida aplicando-se o modelo determinístico FS FIORI implementado nesta pesquisa (ÁVILA et al., 2020) e os indicadores socioeconômicos foram adquiridos a partir dos dados censitários de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. A periodicidade decadal é uma recomendação do Departamento de Economia e Assuntos Sociais das Nações Unidas, por permitir a comparação de informações e a descrição do presente e a previsão do futuro do país. No contexto do tema risco de desastres, o ideal seria coletar dados sociodemográficos com maior regularidade (a cada 2 anos, por exemplo); porém, o alto custo dos estudos censitários é um fator limitante (ALVALÁ et al., 2019).

### 3.4.1 Modelagem determinística (FS FIORI)

O Modelo de Suscetibilidade – FS FIORI permite determinar a suscetibilidade aos deslizamentos de terra utilizando o método determinístico e o conceito de equilíbrio-limite por meio da equação de Fiori (2015), que calcula o Fator de Segurança (FS) das encostas. O cálculo é expresso pela Equação 3.1 e aplicado para cada célula do grid da área de estudo. O FS representa a razão entre as forças de resistência (porção superior da equação) pelas forças de cisalhamento (parte inferior da equação).

$$F_s = \frac{(C_s + S_r) + \left[ \left( \gamma_{nat} - \frac{h_w}{h} \gamma_a \right) h \cos i + \sigma_a \cos i + T \sin \theta \right] \operatorname{tg} \phi + T \cos \theta}{(h \gamma_{sat} + \sigma_a) \sin i + \sigma_{ve}} \quad (3.1)$$

em que:  $F_s$  é o Fator de segurança,  $C_s$  é a Coesão do solo,  $S_r$  é a Coesão das raízes,  $\gamma_{nat}$  é o Peso específico do solo,  $\gamma_a$  é o Peso específico da água,  $h_w$  é a Espessura do lençol freático (Solo Saturado),  $h$  é a Profundidade do solo,  $i$  é a Inclinação da vertente,  $\sigma_a$  é a Sobrecarga (árvores; edificações),  $T$  é a Tensão das raízes,  $\theta$  é o Ângulo de rotação das raízes,  $\phi$  é o Ângulo de atrito do solo,  $\gamma_{sat}$  é o Peso específico do solo saturado,  $\sigma_{ve}$  é a Força do vento sobre a vegetação.

A caracterização das propriedades geotécnicas e hidrológicas foi baseada em estudos prévios realizados com foco na região do município, especialmente nos trabalhos de Vieira et al. (2010), Listo (2015), Mendes e Valério Filho (2015) e Mendes et al. (2017a), que estudaram as características de materiais superficiais

de encostas declivosas relacionadas ao embasamento cristalino das serras da Mantiqueira e do Mar. Estes estudos incluíram testes em amostras deformadas e indeformadas como: textura do solo, peso específico do solo saturado e não saturado e limites de Atterberg (plasticidade e limite de liquidez). As rochas e depósitos sedimentares foram caracterizados com base no estudo de Gurgueira (2013), em que dados de sondagem e de ensaios geotécnicos (peso específico, coesão, ângulo de atrito interno, coeficiente de permeabilidade) provenientes de estudos para construção de estradas e linhas de Metrô foram utilizados (CMSP, 1994; 2011), sendo também importantes para a definição dos parâmetros de entrada do modelo (Tabela 3.1).

A espacialização dos parâmetros de entrada do modelo FS FIORI foi realizada com base em uma camada vetorial desenvolvida entre a intersecção do mapa de uso e cobertura do solo (fotointerpretação) com a Carta Geotécnica de São José dos Campos (IPT, 1996).

O mapeamento de uso e cobertura da terra permitiu a inserção de novos parâmetros associados a alguns condicionantes antropogênicos e cobertura vegetal, como a sobrecarga das edificações, ausência e presença de vegetação arbórea, componentes importantes para a definição de áreas suscetíveis aos deslizamentos (ÁVILA et al., 2020). A carta geotécnica permitiu abranger a diversidade dos materiais superficiais predominantes no município, e, devido à semelhança de alguns materiais, algumas unidades foram agrupadas; portanto, foram considerados seis grupos geotécnicos, como apresentado na Tabela 3.2.

O Modelo Digital de Terreno (MDT) do município foi obtido a partir de curvas de nível com espaçamentos de 5 e 10 metros da base topográfica, em escala de 1:10.000, o qual foi adquirido a partir de aerolevanteamento pela empresa TERRAFOTOS/S.A, em 1977, e disponibilizada pelo Plano Cartográfico do Estado de São Paulo. O MDT permitiu a elaboração do mapa de declividade das encostas de São José dos Campos – SP, do qual se extraiu os dados de inclinação das vertentes para inserção no modelo determinístico (Figura 3.3 A).

Tabela 3.1 - Parâmetros de entrada do modelo FS FIORI com base no agrupamento das unidades geotécnicas de São José dos Campos – SP.

<b>Agrupamento Unidades Geotécnicas</b>	<b>cs (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>sr (kN/m<sup>2</sup>)*</b>	<b>γnat (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>hw (m)</b>	<b>h (m)</b>	<b>γa (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>σa (kN/m<sup>2</sup>)*</b>	<b>σa (kN/m<sup>2</sup>)</b>	<b>T (kN/m)*</b>	<b>θ (graus°)*</b>	<b>ø (graus°)</b>	<b>γsat (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>σve (kPa)*</b>
<b>Montanhas e Escarpas no Embasamento Cristalino</b>	15.3	13	18	1	1	10	5	10	5	48	35	20	1
<b>Colinas, Morros e Morrotes no Embasamento Cristalino</b>	15.3	13	18	1	1,5	10	5	10	5	48	35	20	1
<b>Colinas e Morrotes em Sedimentos Argilosos</b>	25.0	13	19	1	2	10	5	10	5	48	27	21	1
<b>Colinas e Morrotes em Sedimentos Arenosos</b>	5	13	19	1	2	10	5	10	5	48	30	21	1
<b>Superfícies Aluvionares Arenosas</b>	5	13	17	1	3	10	5	10	5	48	28	19	1
<b>Superfícies Aluvionares Argilosas</b>	8	13	16	1	3	10	5	10	5	48	20	18	1

\*Parâmetros associados à vegetação arbórea.

Fonte: Próprio autor.

Tabela 3.2 - Agrupamento das unidades geotécnicas de São José dos Campos, SP.

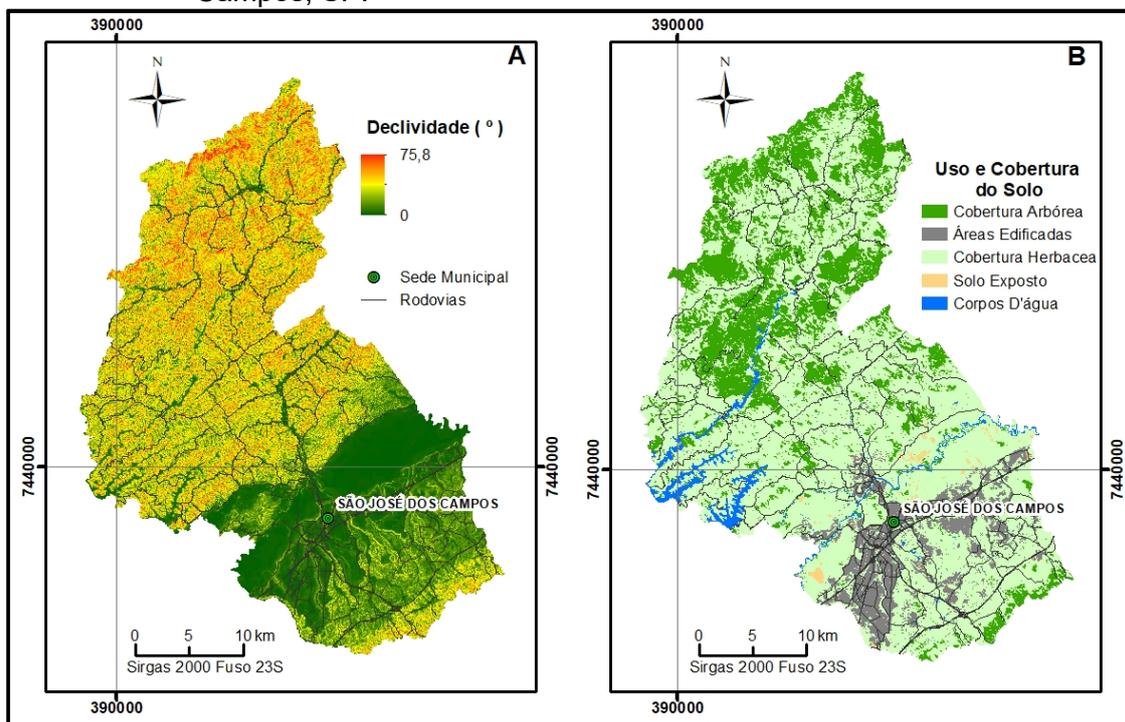
<b>Unidades Geotécnicas (IPT, 1996)</b>	<b>Agrupamento</b>
Montanhas e Escarpas	<b>Montanhas e Escarpas no Embasamento Cristalino</b>
C e M Embasamento Cristalino	<b>Colinas, Morros e Morrotes no Embasamento Cristalino</b>
Morros com Substrato de Rochas Graníticas	
Morros com Substrato de Migmatito e Gnaisses	
C e M Sedimentos Argilosos (argila arenosa - argilitos e folhelhos) C e M Sedimentos Argilosos (argila expansiva - argilitos e folhelhos)	<b>Colinas e Morrotes em Sedimentos Argilosos</b>
C e M Sedimentos Arenosos (Arenitos, argilitos e folhelhos)	<b>Colinas e Morrotes em Sedimentos Arenosos</b>
Aluvião Arenoso	<b>Superfícies Aluvionares Arenosas</b>
Terraços Fluviais	
Planície Aluvionar	
Aluvião Argiloso	<b>Superfícies Aluvionares Argilas</b>

Fonte: Próprio autor.

O mapeamento de uso e cobertura da terra de São José dos Campos foi realizado com base no *software* ArcGis 10 (ESRI, 2011), o qual permitiu a classificação supervisionada de imagens de satélite Landsat 5 do ano de 2010 (resolução de 30 metros). Foram definidas quatro classes de uso e cobertura da terra: vegetação arbórea; pastagem; áreas edificadas; e solo exposto (Figura 3.3 B).

Os dados referentes às áreas recobertas por vegetação arbórea, no que tange a coesão, tensão e ângulo de rotação das raízes e a sobrecarga e força de arrasto do vento atuando nas copas das árvores, foram estabelecidos com base nos estudos desenvolvidos por Michel (2013), Fiori (2015) e Mafra et al. (2019). No que se refere ao valor de sobrecarga adicionada ao modelo nas porções mapeadas como áreas edificadas, este foi definido com base nos valores das cargas verticais estabelecidas pela NBR 6120 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações (ABNT, 1980), que define para edifícios residenciais uma carga mínima de 3,5 kN/m<sup>2</sup> (1 pavimento). Pelo fato de ser considerada toda a região urbana de São José dos Campos, que se singulariza por uma quantidade significativa de prédios residenciais e comerciais, decidiu-se atribuir um valor médio de 10 kN/m<sup>2</sup> (3 pavimentos).

Figura 3.3 - Mapas de declividade e de uso e cobertura do solo de São José dos Campos, SP.



Fonte: Próprio autor.

O mapa de suscetibilidade resultante da aplicação do modelo FS FIORI é apresentado no tópico resultados da pesquisa, incluindo cinco classes de estabilidade, as quais representam intervalos do FS, classificados em: < 1; 1 a 1,25; 1,25 a 1,5; 1,5 a 2; e > 2.

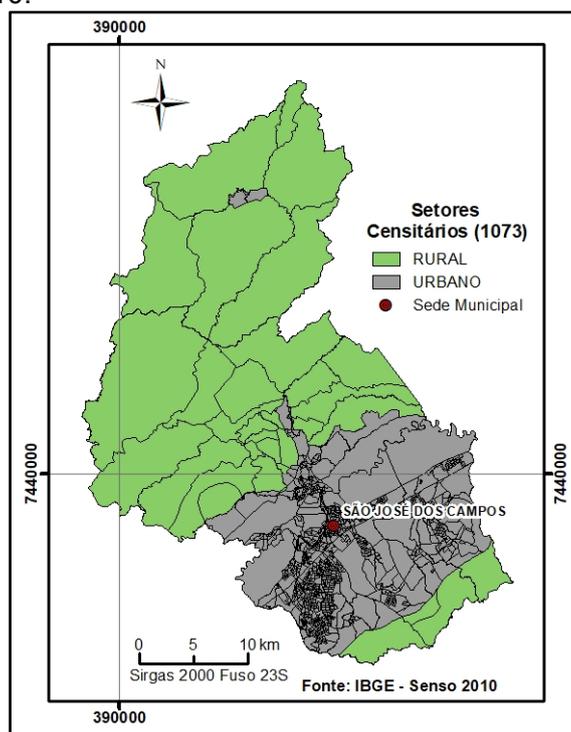
### 3.4.2 Modelagem heurística

#### 3.4.2.1 Indicadores socioeconômicos

Os indicadores socioeconômicos foram definidos a partir dos dados censitários de 2010 do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE e as variáveis foram selecionadas e espacializadas para cada um dos 1073 setores censitários de São José dos Campos, considerando-se a malha censitária de 2010 (Figura 3.4).

Onze indicadores socioeconômicos foram considerados para a proposição do IVSGeo e sintetizados em 5 grupos temáticos, os quais são apresentados na Tabela 3.3, juntamente com as variáveis e a descrição dos cálculos aplicados. Em seguida é apresentada uma descrição mais detalhada dos critérios utilizados para a definição de cada grupo temático.

Figura 3.4 – Setores censitários de São José dos Campos – SP, com base no Censo de 2010.



Fonte: Próprio autor.

**Econômico:** O grupo econômico foi estabelecido considerando-se a renda domiciliar e a concentração de baixa renda. A renda domiciliar foi estratificada em 5 categorias: sem rendimento; até 2 salários mínimos; entre 2 e 5 salários mínimos; entre 5 e 10 salários; e maior que 10 salários. Foi adotada uma escala evolutiva para os rendimentos e, posteriormente, realizada uma ponderação matemática. O rendimento domiciliar indica a capacidade de cobertura do orçamento doméstico, de aquisição de bens e consumo e, quando avaliado espacialmente, indica a distribuição de renda domiciliar pelo município (ANAZAWA 2012; ANAZAWA et al., 2013; DFID, 1999; KAZTMAN, 2000; LAMPIS, 2010). O maior acesso a renda permite melhorar a situação de bem-estar das famílias, evitar a deterioração de suas condições de vida ou diminuir sua vulnerabilidade (KAZTMAN, 2000). O indicador concentração de baixa renda foi calculado para os domicílios com até 3 salários mínimos, sendo importante para agregar peso ao grupo econômico e também indicar espacialmente onde se concentram as famílias de baixa renda. Domicílios com maior renda tendem a ser munidos por melhores infraestruturas e, assim, caracterizam-se por melhores condições de suportar eventos naturais extremos.

Tabela 3.3: Indicadores e variáveis socioeconômicas para definição do IVSGeo.

GRUPOS TEMÁTICOS	INDICADORES	VARIÁVEIS	CÁLCULOS
<b>Econômico</b>	Renda Domiciliar	Renda dos domicílios <sup>1</sup>	Estratificação do Indicador em faixas de rendimento
	Concentração de baixa renda	Renda dos domicílios <sup>1</sup>	Proporção de domicílio com renda até 3 salários
<b>Educacional</b>	Alfabetização > 5 anos	Alfabetização, total <sup>1</sup>	Proporção da população alfabetizada com mais de 5 anos
<b>Infraestrutura Habitacional</b>	Abastecimento de Água	Domicílio, características gerais <sup>1</sup>	Proporção de domicílios com acesso a rede de abastecimento de água
	Rede Coletora de Esgoto	Domicílio, características gerais <sup>1</sup>	Proporção de domicílios com acesso a rede coletora de esgoto
	Serviço de Coleta de Lixo	Domicílio, características gerais <sup>1</sup>	Proporção de domicílios atendidos pela coleta pública de lixo
	Pavimentação	Domicílio, características gerais <sup>1</sup>	Proporção de domicílios em ruas pavimentadas
	Bueiros	Domicílio, características gerais <sup>1</sup>	Proporção de domicílios com bueiros próximos
<b>Dependência Social</b>	Razão de Dependência	Idade, total <sup>1</sup>	Razão entre: População de 0 a 14 anos + População de 60 anos ou mais pela População de 15 a 59 anos
<b>Estrutura Familiar</b>	Mulher Chefe de Família	Responsável pelo domicílio, mulheres <sup>1</sup>	Proporção de domicílios chefiados por mulheres em relação ao total de domicílios
	Pessoas por habitação	Domicílio, moradores <sup>1</sup>	Média entre o número total de habitantes pelo número de domicílios

Fonte: Próprio autor.

**Educacional:** São José dos Campos, por se tratar de uma cidade com bom índice de desenvolvimento municipal (IDHM) e grande produção científica e desenvolvimento tecnológico, se singulariza por índices de educação geralmente altos. Na grande maioria dos setores censitários, a taxa da população acima de 5 anos alfabetizada é superior a 90%. Indivíduos que frequentam a escola desde criança contribuem para aumentar a chance na formação de cidadãos mais capazes de atuarem social, econômica e politicamente (ANAZAWA, 2012 e ANAZAWA et al., 2013), além de ter uma maior percepção do risco associado aos deslizamentos. Assim, a proporção de pessoas alfabetizadas com mais de 5 anos foi o indicador adotado para a abordagem do tema educação.

**Infraestrutura Habitacional:** O grupo foi definido considerando-se indicadores relacionados às qualidades físicas das habitações e do bairro, além do acesso a serviços públicos de limpeza e saneamento. Abastecimento de água tratada e

rede coletora de esgoto são fundamentais para a manutenção das condições de saúde e higiene da população e favorece a regularização das estruturas hidráulicas das habitações, minimizando a existência de vazamentos que possam contribuir para a saturação do solo e maximizar o risco de desencadeamento de movimentos gravitacionais de massa (MENDES; VALÉRIO FILHO, 2015; MENDES et al., 2017a). Os serviços de coleta de lixo também contribuem efetivamente para as melhores condições de saúde e higiene, e ainda reduz a possibilidade da formação de aterros construídos próximos às habitações. Depósito de aterros formam camadas bastante instáveis nas encostas, constituindo locais preferencias para a ocorrência dos deslizamentos (PELOGGIA, 1998). A presença de vias pavimentadas e bueiros próximos às habitações são indicadores de maior regularização e disciplinamento das águas pluviais nas encostas, em que a ausência pode contribuir efetivamente para os deslizamentos de encostas (KÖNING et al., 2019), sendo fatores que contribuem para a maior vulnerabilidade no local.

**Dependência Social** foi definida partir da razão entre a população de crianças (0 a 14 anos) e idosos (maior que 59 anos) pela população economicamente ativa (15 a 59 anos). Apesar do caráter econômico associado, esse grupo também foi considerado por abranger casos em que seja necessária uma rápida evacuação dos domicílios, em que crianças e idosos geralmente têm maior dificuldade na rápida remoção dos locais potenciais de ocorrer um desastre (BRITO JUNIOR et al., 2014).

**Estrutura Familiar**: O grupo estrutura familiar considerou a proporção de mulheres que chefiam famílias e também o número de pessoas por habitação. Chefe de família mulher indica uma estrutura familiar complexa, devido muitas vezes ao fato de as mulheres ocuparem-se de atividades domésticas não remuneradas (ANAZAWA et al., 2013), além de, geralmente, terem salários mais baixos e darem maior assistência à família. Essas situações condicionam as mulheres a terem mais dificuldades em reagir e recuperarem-se de desastres (CUTTER et al., 2003). O maior número de pessoas por habitação também contribui para a maior dificuldade de evacuação, bem como tende a ocorrer uma

maior concentração de atingidos por habitação quando do desencadeamento de desastres.

#### 3.4.2.2 Álgebra de mapas

Os dados censitários associados aos indicadores socioeconômicos foram trabalhados por meio de um banco de dados no *software* TerraView (Terraview, 2016), estando integrados a uma base georreferenciada correspondente à malha de setores censitários de São José dos Campos do ano de 2010.

Os dados foram calculados e normalizados por transformações lineares (0 a 1), gerando índices adimensionais que permitiram espacializar os indicadores de vulnerabilidade a partir de uma representação de natureza relacional (Equação 3.2). Quanto mais próximo a 1, maior a vulnerabilidade, e quanto mais próximo a 0, menor a vulnerabilidade. Em alguns casos, para que a variação 0 a 1 continuasse a indicar respectivamente menor e maior vulnerabilidade, foi necessário aplicar uma inversão dos valores do indicador (Equação 3.3).

$$\frac{V(ob)-V(mn)}{V(mx)-V(mn)} \quad (3.2)$$

$$1 - \frac{V(ob)-V(mn)}{V(mx)-V(mn)} \quad (3.3)$$

em que: V(ob) é o valor observado, V(mx) é o valor máximo e V(mn) é o valor mínimo.

Após a realização dos cálculos e as devidas transformações numéricas (normalização), os dados foram transportados para o *software* ArcGis 10, em que cada grupo de indicador foi convertido para um espaço celular (imagem *raster*).

A suscetibilidade aos deslizamentos de terra do município, obtida pelo modelo FS FIORI, também foi gerada como imagem *raster*, cujas cinco classes de estabilidade, referentes aos valores de FS, foram normalizadas. Posteriormente, os cinco grupos de indicadores socioeconômicos foram integrados e associados à suscetibilidade aos deslizamentos de terra (formando seis grupos temáticos) por meio de um procedimento de modelagem heurística, utilizando o método de álgebra de mapas no ArcGis 10. Assim, cada grupo temático recebeu um peso

estatístico (Tabela 3.4), que possibilitou a formação do índice sintético final, correspondente ao Índice de Vulnerabilidade Sociogeambiental de São José dos Campos (IVSGeo – SJC) (rever Figura 3.2).

Tabela 3.4 - Pesos estatísticos atribuídos aos grupos temáticos para o IVSGeo.

<b>GRUPOS TEMÁTICOS</b>	<b>Peso</b>
<b>Econômico</b>	7%
<b>Educacional</b>	8%
<b>Infraestrutura Habitacional</b>	35%
<b>Dependência Social</b>	5%
<b>Estrutura Familiar</b>	5%
<b>Geomorfológico (Susceptibilidade FS)</b>	40%

Fonte: Próprio autor.

O peso dado a cada grupo temático foi definido por um grupo de pesquisadores de diferentes áreas do conhecimento (multidisciplinar), de forma que pudesse ser coerente com o contexto de estudos de previsão de deslizamentos de encostas. Assim, os grupos susceptibilidade e infraestrutura habitacional receberam os maiores pesos (40 e 35%, respectivamente), devido a influência direta no desencadeamento dos deslizamentos das encostas. O grupo temático educacional foi associado ao terceiro maior peso (8%), pelo fato de que o maior desenvolvimento educacional propicia maior percepção da população ao risco em que pode estar inserido e, portanto, ter maior possibilidade de uma reação a um desastre.

A associação de resultados de um modelo determinístico a um modelo heurístico caracteriza este trabalho como de modelagem híbrida, por abranger dois tipos de modelos na obtenção de um resultado final.

Após gerar o IVSGeo para todo o limite municipal, os resultados foram extraídos somente para os ambientes construídos do município (área urbanizada), utilizando a informação de uso do solo do zoneamento ecológico econômico do estado de São Paulo (SMA/CPLA, 2012). Para uma melhor visualização dos resultados, a resolução da imagem *raster* de IVSGeo gerada para as áreas

construídas foi alterada de 30 para 200 metros e, posteriormente, gerado uma estatística zonal que extraiu o dado de maior valor da imagem *raster* de maior resolução.

### **3.4.3 Validação dos modelos**

Para a validação dos mapeamentos de suscetibilidade a deslizamentos de terra e do IVSGeo gerados a partir dos trabalhos de modelagem, é importante a aplicação de técnicas que avaliem a qualidade e a representatividade dos resultados. Com isso, optou-se pela aplicação da metodologia proposta por Listo e Vieira (2010) e adaptada por Camarinha (2016), que utilizaram setores de risco previamente mapeados como unidades de validação de modelos de suscetibilidade a deslizamentos de terra em regiões habitadas, sobretudo áreas urbanizadas. Na ausência de dados satisfatórios de cicatrizes de deslizamentos, os autores utilizaram áreas de risco a deslizamentos de terra previamente mapeadas para a aplicação dos índices Concentração de Risco (CR) e Potencial de Risco (PR).

A prefeitura de São José dos Campos, juntamente com o Instituto de Pesquisa, Administração e Planejamento (IPPLAN), atualizou o levantamento das áreas de risco de deslizamentos de encostas e inundações do município. Foram mapeadas 55 áreas de riscos, com 109 setores de risco médio (R2), alto (R3) e muito alto (R4) a escorregamentos, que totalizaram uma área de 5,8 km<sup>2</sup> e 3.037 moradias presentes (IPPLAN, 2018). Especialistas em geotecnia e da defesa civil fizeram observações de campo e definiram os setores de risco aos movimentos de massa através de polígonos espacialmente delimitados nas áreas urbanas e periurbanas. Essa base de dados foi utilizada para a etapa de validação.

A relação espacial entre os setores de risco e os de vulnerabilidade foi realizada por meio de técnicas de geoprocessamento no *software* ArcGIS 10, permitindo identificar e quantificar a área total de cada classe de estabilidade no interior dos setores de risco de deslizamentos.

Para a avaliação geral do IVSGeo foi calculado o índice Frequência de Distribuição (FD), que indica a proporção de células das classes de

vulnerabilidade em relação a área total de São José dos Campos e, para comparação, foi calculado também a proporção de células de cada classe do IVSGeo em relação a área urbanizada do município. A definição das áreas urbanizadas foi realizada utilizando a informação de uso do solo do zoneamento ecológico econômico do estado de São Paulo (SMA/CPLA, 2012).

O índice Concentração de Risco (CR) é dado pela razão entre o número de células de cada classe de vulnerabilidade no interior dos setores de risco de escorregamentos e o número de células afetadas no total das áreas edificadas do município. Este índice é definido como a frequência (percentagem) de cada classe mapeada considerando o número de células *rasters* no interior dos setores de risco.

O índice Potencial de Risco (PR) é a razão entre o número de células de cada classe no interior dos setores de risco e o total de células na área urbanizada dessa mesma classe. Este índice indica a precisão do método utilizado, pois sintetiza a taxa de precisão entre todas as áreas apontadas pelos modelos e aquelas que realmente estão no interior dos setores de risco (CAMARINHA, 2016).

Estes dois índices de validação (CR e PR) são similares àqueles adotados em outros trabalhos, mas que utilizaram polígonos que delimitaram cicatrizes de deslizamentos. Por mais preciso que seja, os mapeamentos para definir suscetibilidade, vulnerabilidade e risco ainda não têm a capacidade para expressar de forma fidedigna a criticidade e a realidade por completo das áreas mapeadas. Com isso, na literatura tem sido destacados valores de referência para definir a acurácia, eficiência e satisfação dos resultados dos modelos, cujos valores superiores a 5% para o índice PR são considerados como satisfatórios (CAMARINHA, 2016; GAO, 1993; GUIMARÃES et al., 2003; LISTO; VIEIRA, 2010, 2012; LISTO et al., 2018; TEIXEIRA et al., 2015; VIEIRA et al., 2017; VIEIRA et al., 2010).

### **3.5 Resultados e discussões**

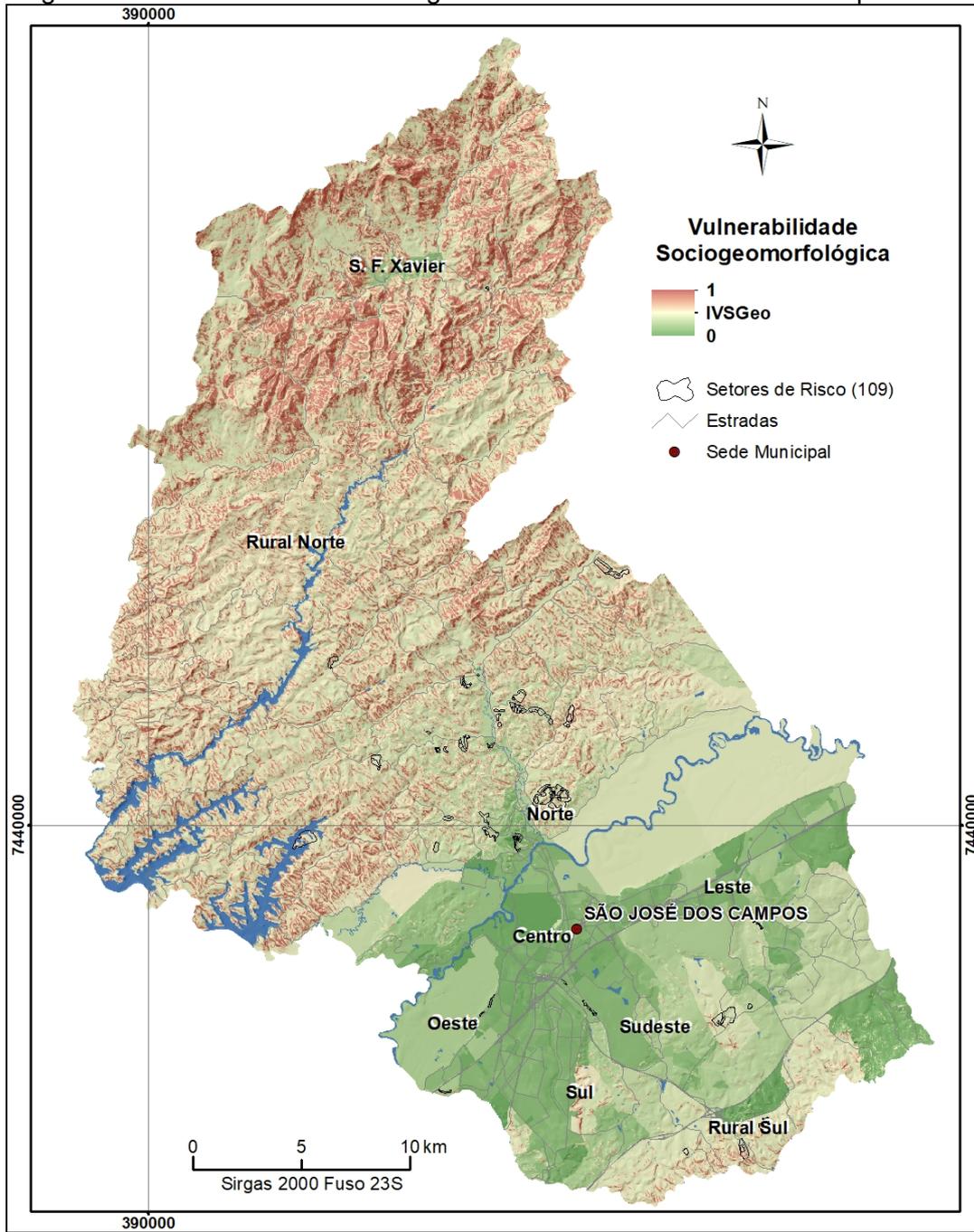
#### **3.5.1 Avaliação geral do IVSGeo - SJC**

O Índice de Vulnerabilidade Sociogeoambiental de São José dos Campos (IVSGeo - SJC) é apresentado espacialmente para todo o limite municipal no mapa da Figura 3.5, bem como especificamente para as áreas edificadas por meio de uma grade estatística de menor resolução (200 metros), para uma melhor localização e visualização dos pontos críticos de IVSGeo do município (Figura 3.6).

As variações no IVSGeo do município refletem as diferenciações das características geomorfológicas, geotécnicas, variação dos usos e cobertura da terra e dos fatores socioeconômicos, sendo estes últimos correspondentes a 2010, ano de obtenção dos dados censitários mais recentes disponíveis até o presente desenvolvimento deste trabalho. Deste modo, a realidade atual das áreas estudadas possivelmente foi alterada; contudo, os resultados obtidos permitem apresentar de forma satisfatória uma tendência significativa e regionalizada do IVSGeo para São José dos Campos - SP.

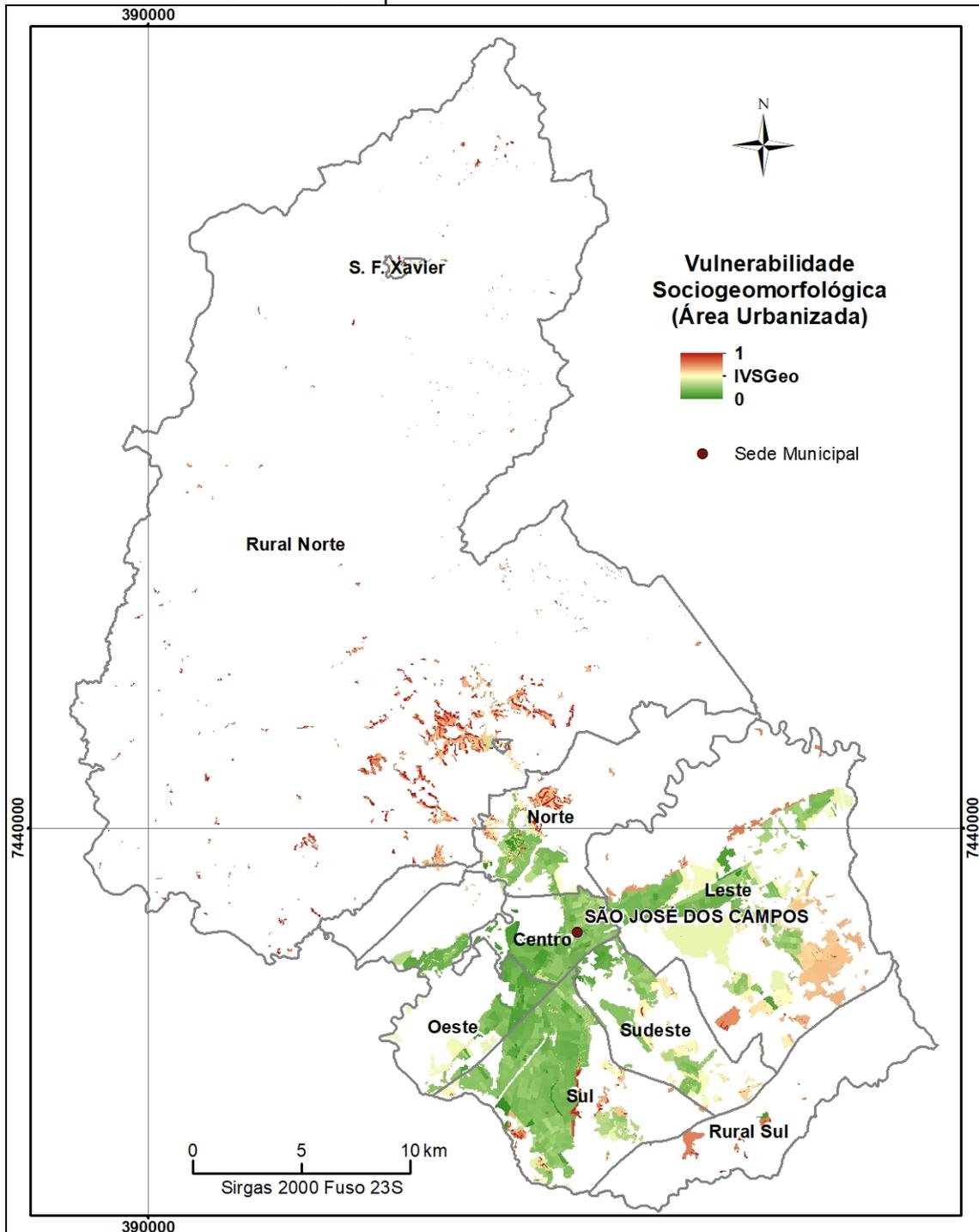
Os bairros que estão no entorno da Região Central da cidade apresentaram, em geral, os melhores indicadores socioeconômicos (Figura 3.7). As regiões centro, sul, oeste, sudeste e leste do município estão associadas com as áreas urbanas mais antigas, consolidadas e de melhor estrutura da cidade. Nestes locais há uma melhor qualidade física das habitações e dos bairros; maior acesso a serviços de limpeza, saneamento, água tratada e regularização de estruturas hidráulicas; e, também, a população tem renda e nível educacional mais elevados. Esses fatores se associam à condição geomorfológica de superfícies planas a suave onduladas das colinas em rochas sedimentares. Essas regiões foram classificadas pelo processo de modelagem híbrida como as de menor vulnerabilidade dentro do limite municipal de São José dos Campos.

Figura 3.5 – Vulnerabilidade Sociogeomorfológica de São José dos Campos – SP.



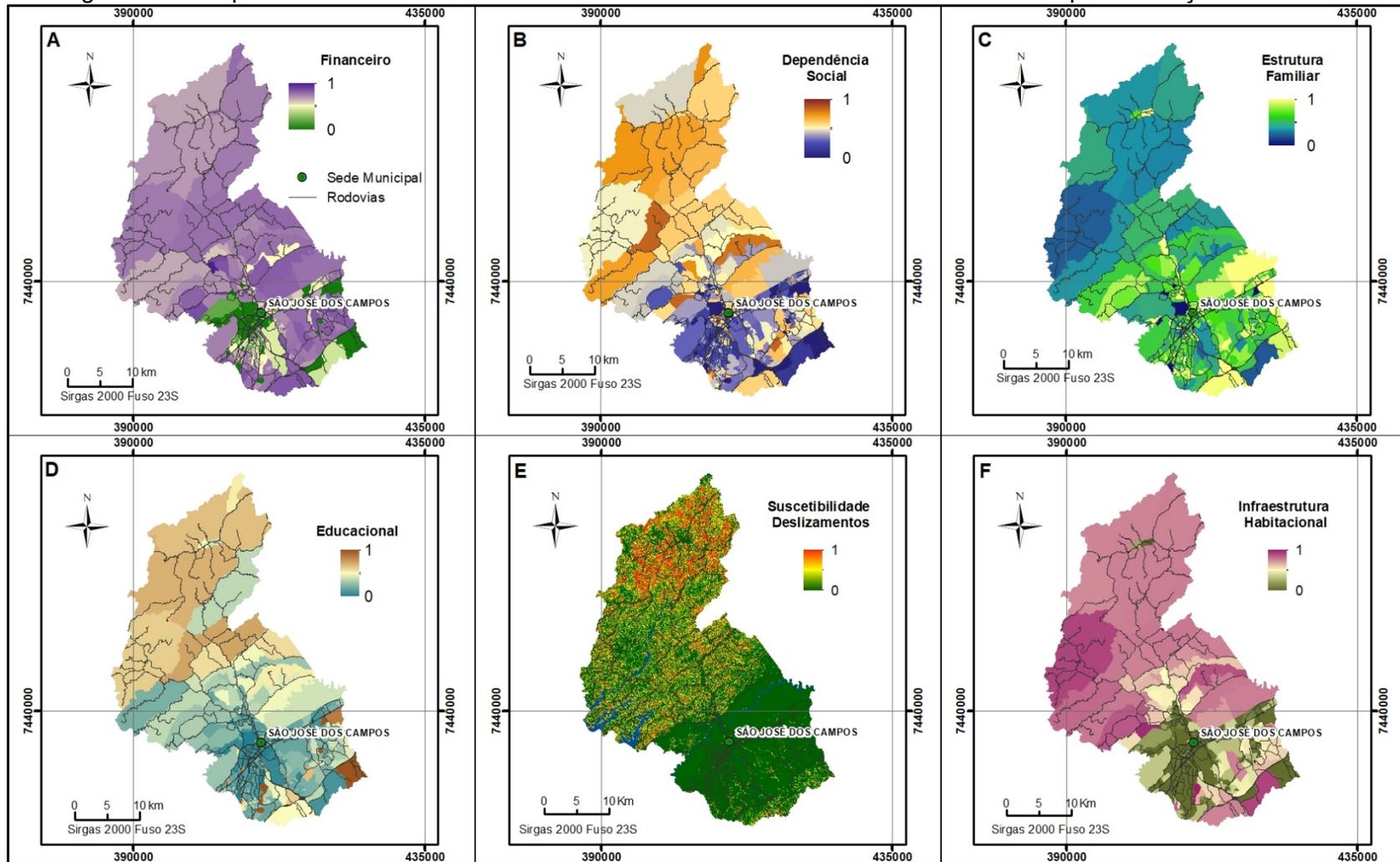
Fonte: Próprio autor.

Figura 3.6 – Vulnerabilidade Sociogeomorfológica das áreas urbanizadas (edificadas) de São José dos Campos – SP.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.7 – Mapa dos Indicadores socioeconômicos e da suscetibilidade aos deslizamentos para definição do IVSGeo.

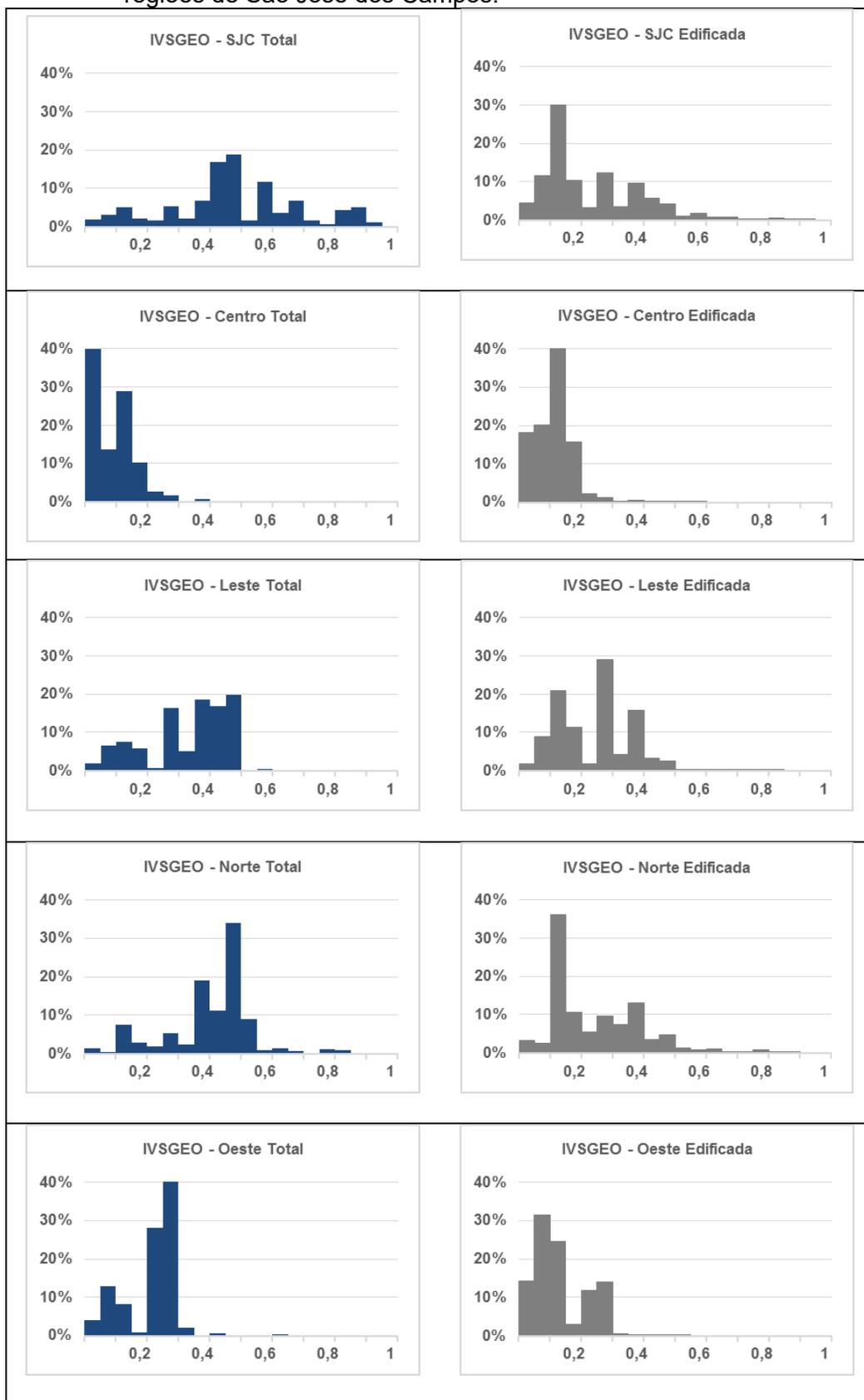


Fonte: Próprio autor.

Em contrapartida, as regiões mais afastadas das áreas urbanas consolidadas, como a norte, extremo sul, extremo sudeste e regiões rurais norte e sul, apresentam os piores indicadores, onde concentram as populações de menor renda, habitações e bairros com infraestruturas mais precárias (ausência de pavimentação, rede de água tratada, coleta de esgoto, drenagem urbana e coleta de lixo), associados com superfícies de topografia onduladas a montanhosas, onde o relevo se caracteriza por morros, serras e escarpas em formação geológica magmática e metamórfica naturalmente suscetíveis à ocorrência de escorregamentos.

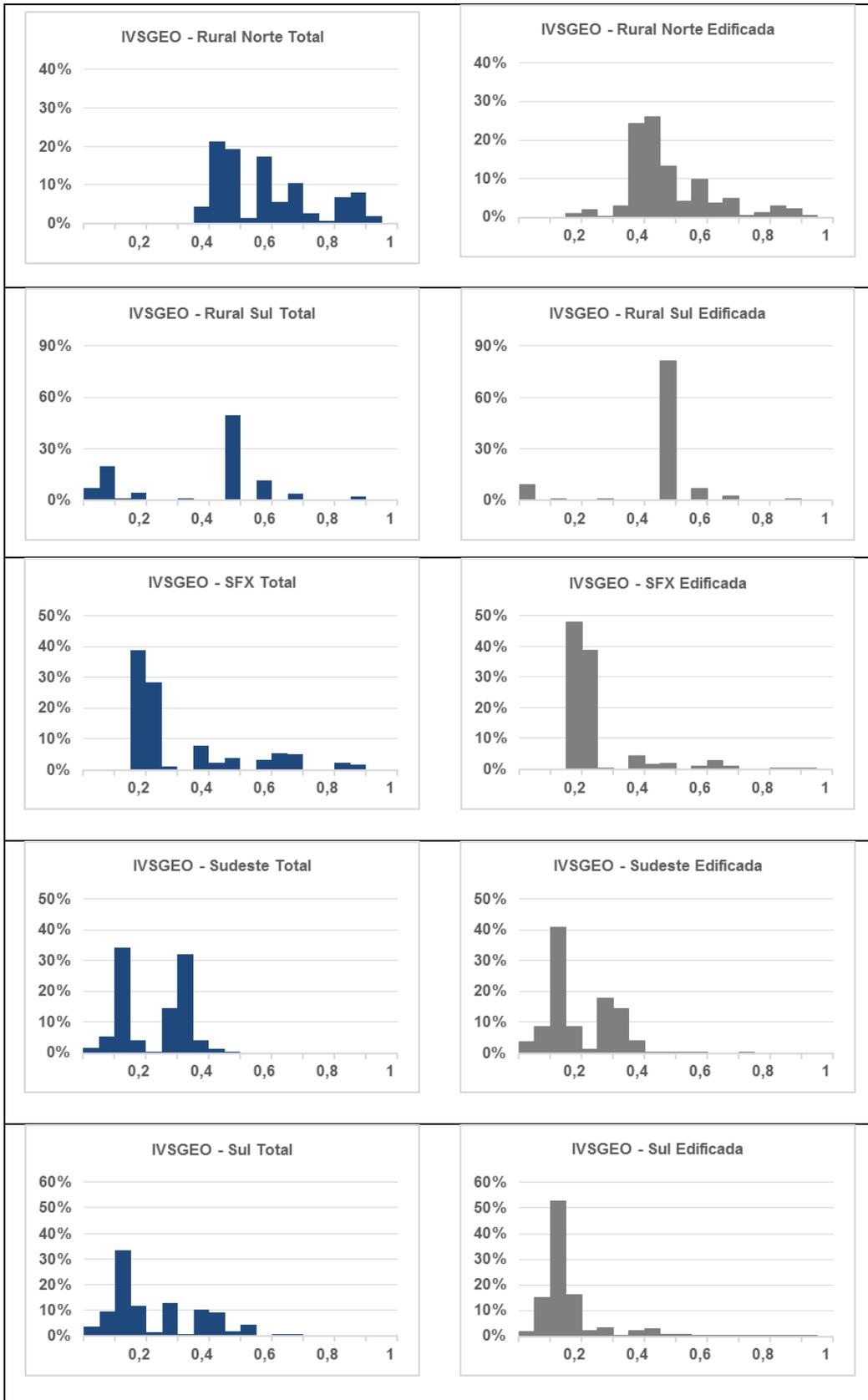
Ao observar a Frequência e Distribuição das células classificadas por IVSGeo no município (FD) (Figura 3.8), verifica-se que, de forma geral, São José dos Campos caracteriza-se pela média a baixa vulnerabilidade aos deslizamentos, principalmente quando é observado o recorte das células associadas às áreas urbanizadas/edificadas. Quando a observação da FD é realizada regionalmente, nota-se que nas regiões Rural Norte, Rural Sul, Norte e Leste, pela configuração dos histogramas, mesmo considerando a área total ou edificada, há maior concentração de células classificadas com IVSGeo um pouco mais elevados. Contudo, o número de células tende a concentrar em valores entre 0,4 e 0,6, considerados índices intermediários. Nessa mesma observação, nas regiões Centro e Oeste de São José dos Campos há concentração de células em valores bem baixos de IVSGeo, confirmando as regiões mais centralizadas da cidade como as que têm os melhores indicadores em todos os grupos temáticos.

Figura 3.8 – Frequência e Distribuição (FD) por meio de histogramas do IVSGeo das regiões de São José dos Campos.



continua

Figura 3.8 – Conclusão.



Fonte: Próprio autor.

Os resultados do IVSGeo refletiram a tendência de um município com alto IDH, como São José dos Campos, com possibilidade de expandir as áreas urbanas em direção a regiões menos suscetíveis aos deslizamentos e de forma planejada, tal que seja possível implementar infraestruturas habitacionais necessárias. Contudo, deslizamentos de encostas muitas vezes ocorrem pontualmente e, mesmo sendo um município estruturado e com bom nível organizacional, ainda se singulariza por condições típicas de cidades de país em desenvolvimento, como o Brasil. Mesmo que em pequena proporção, ainda existem habitações em áreas irregulares com infraestruturas precárias, o que demanda intervenções do poder público e, em alguns casos, até mesmo a remoção da população. Isso é melhor observado quando se efetua uma análise mais detalhada de alguns bairros do município onde foram identificadas vulnerabilidades mais pronunciadas.

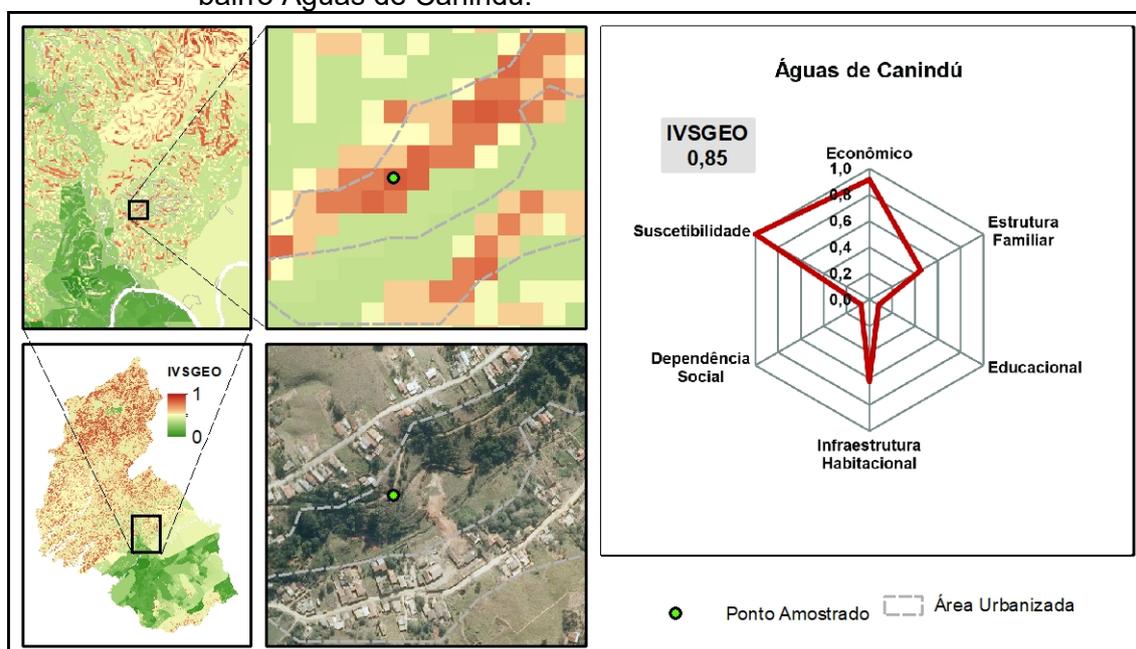
### **3.5.2 Análise detalhada do IVSGeo - SJC**

Alguns bairros foram selecionados para uma avaliação do IVSGeo - SJC de forma mais detalhada, por meio dos valores dos indicadores que definiram a vulnerabilidade sociogeoambiental do local. Os bairros selecionados foram: Águas de Canindú, localizado na Região Norte, onde existem várias casas em áreas de risco de escorregamentos; Pinheirinhos, no extremo sul do município; Rio Comprido, localizado no extremo oeste da Região Sul; Jardim São Judas Tadeu na Região Rural Sul; e Jardim Apolo I situado na Região Central. Estes bairros correspondem a diferentes características de vulnerabilidade sociogeoambiental e também permite uma maior representação espacial da cidade, abrangendo diferentes regiões.

**Os bairros Havaí e Canindú** são núcleos de expansão habitacional a norte da mancha urbana original de São José dos Campos, caracterizados por terrenos altamente suscetíveis aos escorregamentos. Os bairros ganham destaque por contar com 500 moradias em setores de risco geotécnico Alto e Muito Alto (VALÉRIO FILHO et al., 2014). O IVSGeo mais alto da região é de até 0,85, podendo ser considerado um valor elevado em decorrência dos indicadores suscetibilidade natural aos deslizamentos de terra, econômico e infraestrutura

habitacional (Figura 3.9). Os bairros foram mapeados pelo modelo FS FIORI com porções habitadas marcadas por valor de FS das encostas próximo a 1, indicando alta suscetibilidade aos deslizamentos. Os dados censitários indicaram baixo poder aquisitivo da população e infraestrutura habitacional precária, com pequena extensão de ruas pavimentadas e com bueiros, e, também, por contar com um número elevado de habitações que não são atendidas por abastecimento de água tratada, rede coletora de esgoto e serviços de coleta de lixo.

Figura 3.9 – Composição dos indicadores do IVSGeo da célula raster selecionada no bairro Águas de Canindú.

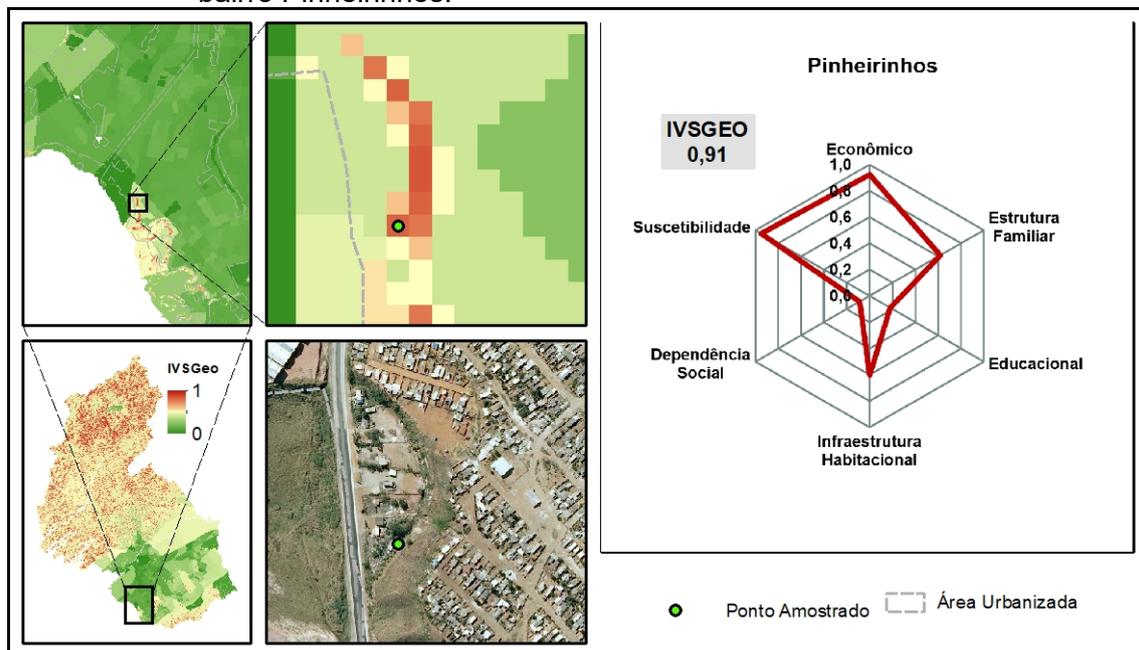


Fonte: Próprio autor.

O **bairro Pinheirinhos**, situado no extremo sul de São José dos Campos, se caracterizava no ano de 2010 como ocupação irregular (invasão), de infraestrutura urbana inadequada. O bairro se localizava em um contexto geomorfológico marcado por um rebordo erosivo, situado na transição de uma superfície mais rebaixada formada pela unidade geotécnica de Colinas e Morrotes em Sedimento Argilosos para uma superfície mais elevada correspondente as Colinas e Morrotes em Sedimentos Arenosos, caracterizando o bairro por encostas declivosas. O maior valor de IVSGeo do bairro foi igual a 0,91 (Figura 3.10) e os indicadores que influenciaram são: Suscetibilidade - alta suscetibilidade aos escorregamentos de encosta; Econômico - baixa renda dos

domicílios e alta concentração de domicílios com renda abaixo de 3 salários; Infraestrutura Habitacional - ausência de pavimentação, bueiros, e baixo acesso a distribuição de água tratada, de rede coletora de esgoto e de coleta de lixo. Todos esses fatores são preponderantes para caracterizar o bairro com alto valor de vulnerabilidade sociogeoambiental. Importante destacar que, atualmente, o bairro foi desapropriado judicialmente para reintegração de posse, não existindo habitações no local.

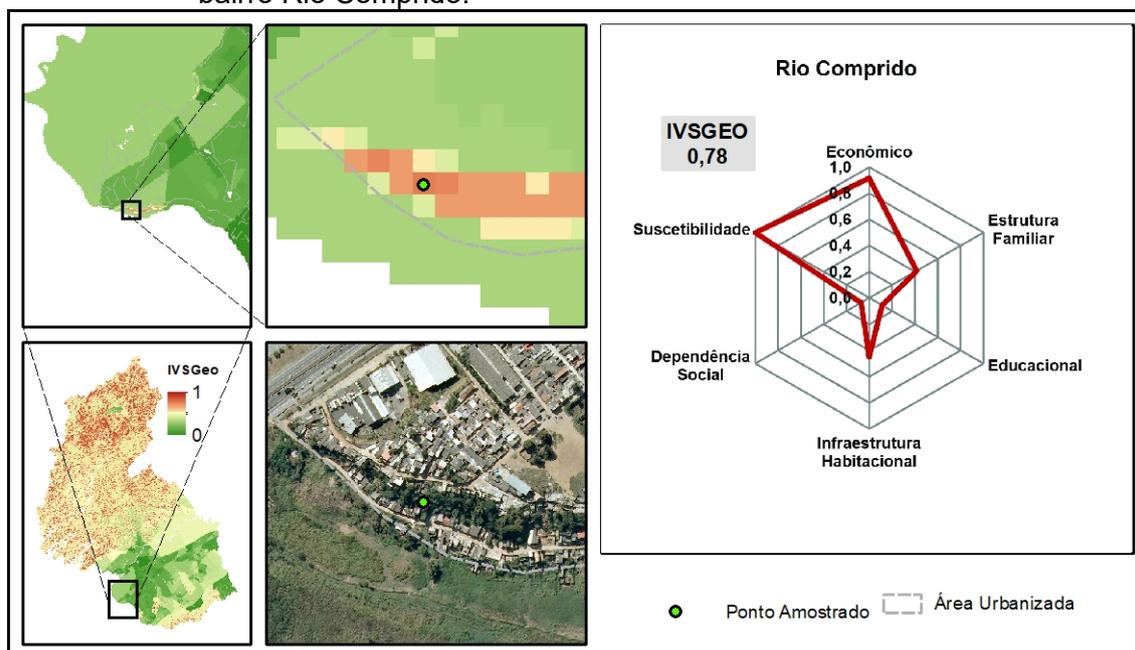
Figura 3.10 – Composição dos indicadores do IVSGeo da célula raster selecionada no bairro Pinheirinhos.



Fonte: Próprio autor.

O **bairro Rio Comprido** está alocado na transição das Colinas e Morrotes em Sedimentos Arenosos (maior altitude) e Colinas e Morrotes em Sedimentos Argilosos (porção inferior) onde forma uma superfície geomorfológica marcada por encostas declivosas formadas no rebordo erosivo entre essas duas unidades geotécnicas. O IVSGeo de maior valor identificado no bairro foi igual a 0,78 (Figura 3.11), em detrimento principalmente aos indicadores: Suscetibilidade – presença de encostas mapeadas com baixo FS e, portanto, naturalmente suscetíveis aos deslizamentos de terra; e Econômico – predominância de domicílios sem rendas e com rendas de até 2 salários mínimos.

Figura 3.11 – Composição dos indicadores do IVSGeo da célula raster selecionada no bairro Rio Comprido.



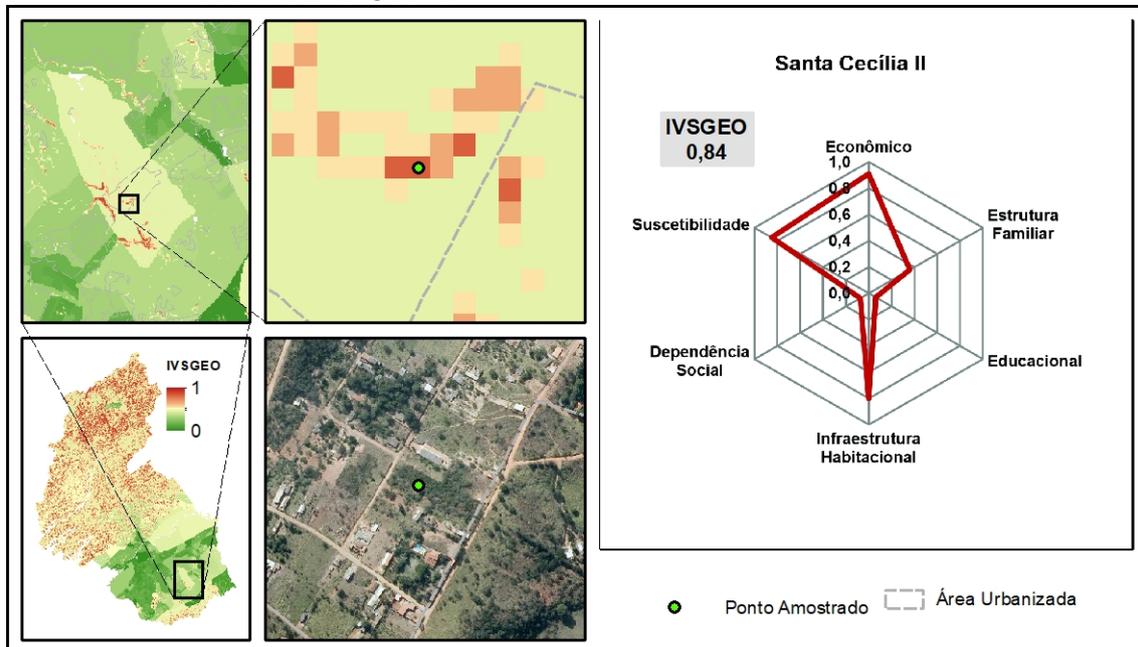
Fonte: Próprio autor.

O **bairro Santa Cecília II**, localizado na Região Sudeste do município, se caracteriza geomorfologicamente pela presença de encostas medianamente declivosas situadas na transição de superfícies em Colinas e Morrotes em Sedimentos Argilosos para Colinas e Morrotes em Sedimentos Arenosos. O IVSGeo mais pronunciado no bairro é de 0,84 (Figura 3.12) e os indicadores que influenciam principalmente esse valor são: Econômico – a renda domiciliar no bairro é baixa, com predominância de até 3 salários mínimos; Infraestrutura Habitacional - ausência de pavimentação e de bueiros, e baixo acesso das residências à distribuição de água tratada e de rede coletora de esgoto.

Interessante destacar que a suscetibilidade máxima do bairro Santa Cecília II não é muito alta, com o FS mapeado pelo modelo FS FIORI estando entre 1 e 1,25. Neste aspecto, os fatores socioeconômicos foram preponderantes para caracterizar o bairro com valor de vulnerabilidade socioambiental relativamente alto. Para a definição do valor do IVSGeo, o indicador infraestrutura habitacional tem um peso importante, e, com isso, a ausência de pavimentação, de bueiros, e de rede coletora de esgoto contribuem efetivamente para a saturação das encostas, devido à falta de disciplinamento das águas pluviais e ao favorecimento para a não regularização da estrutura de

saneamento das habitações e, assim, influenciando diretamente para que o esgoto seja esvaziado nas encostas.

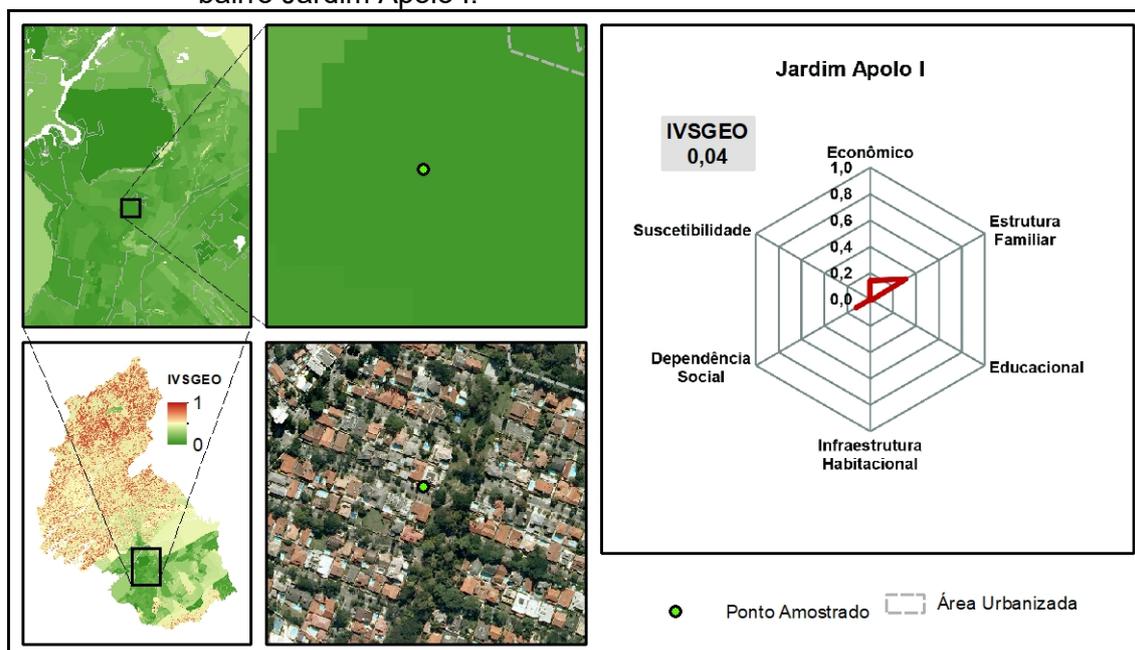
Figura 3.12 – Composição dos indicadores do IVSGeo da célula raster selecionada no bairro Santa Cecília II.



Fonte: Próprio autor.

O **Jardim Apolo I**, um bairro antigo de São José dos Campos, está localizado na Região Central e se caracteriza por um valor de IVSGeo bastante baixo, de apenas 0,04 (Figura 3.13). O bairro reflete o que já foi destacado na avaliação geral do município, ou seja, que as porções mais centrais se caracterizam por uma condição geomorfológica de baixíssima suscetibilidade aos deslizamentos de terra devido as superfícies planas em rochas sedimentares com melhor infraestrutura habitacional e urbana, maior acesso aos serviços públicos de saneamento e água tratada, além de renda e nível educacional bastante elevados. Todos esses fatores favorecem uma estabilidade das encostas e uma condição de vida da população que permite melhor reação frente a eventos extremos de clima que possam deflagrar desastres naturais, caracterizando uma baixa vulnerabilidade sociogeoambiental.

Figura 3.13 – Composição dos indicadores do IVSGeo da célula raster selecionada no bairro Jardim Apolo I.



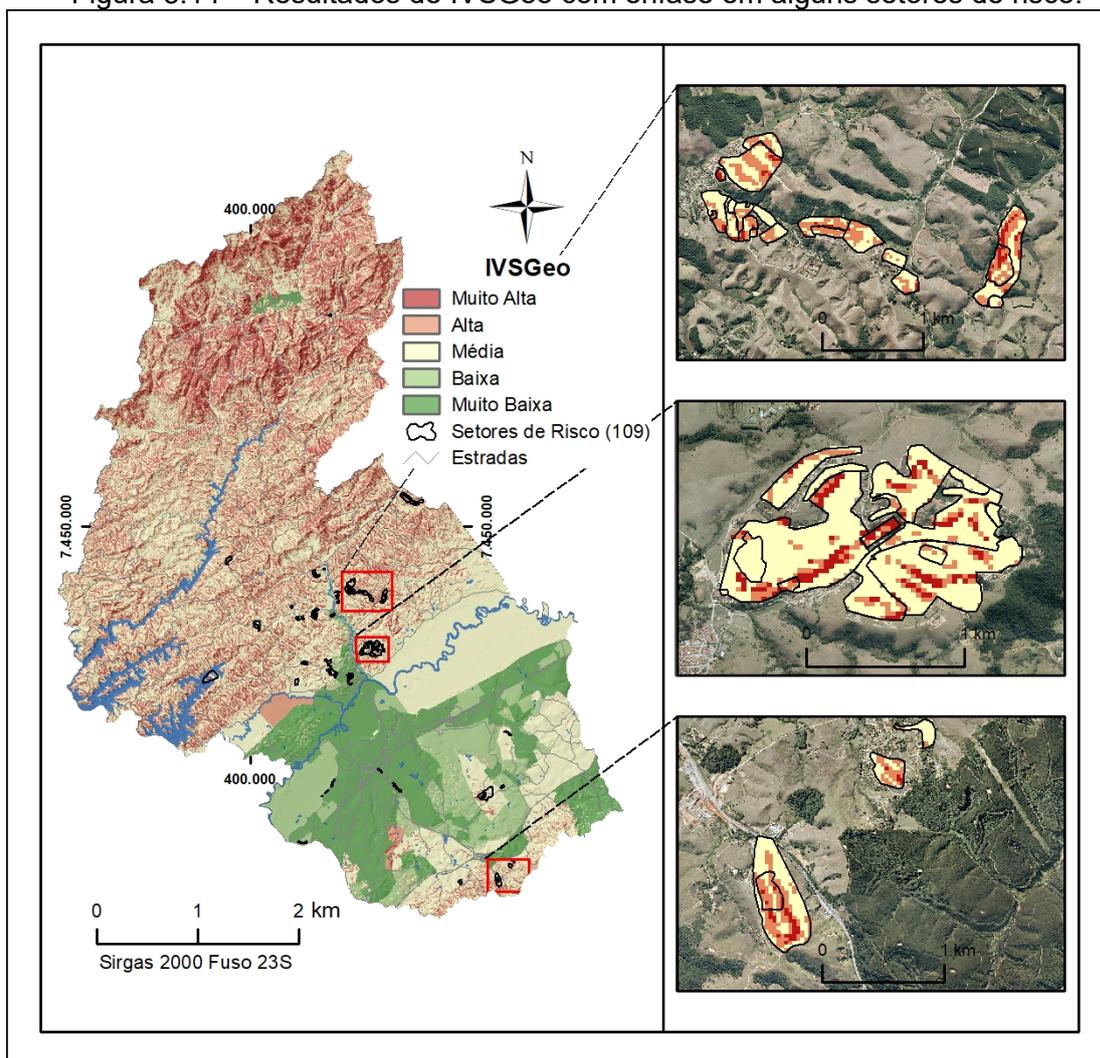
Fonte: Próprio autor.

### 3.5.3 Validação dos resultados

Os resultados de IVSGeo foram validados com base nos 109 setores de riscos a escorregamentos de São José dos Campos que são classificados em três tipos: médio (R2), com uma área de 2,9 km<sup>2</sup>; alto (R3), com 1,8 km<sup>2</sup>; e muito alto (R4), com 1,1 km<sup>2</sup>. No total, os setores de risco correspondem a uma área de 5,8 km<sup>2</sup>. Para melhor avaliação do processo de validação, os valores do IVSGeo no interior dos setores de risco foram distribuídos estatisticamente, de forma que representassem 5 classes de vulnerabilidade: 0 a 0,25 (muito baixa); 0,25 a 0,35 (baixa); 0,35 a 0,50 (média); 0,50 a 0,75 (alta); 0,75 a 1 (muito alta) (Figura 3.14).

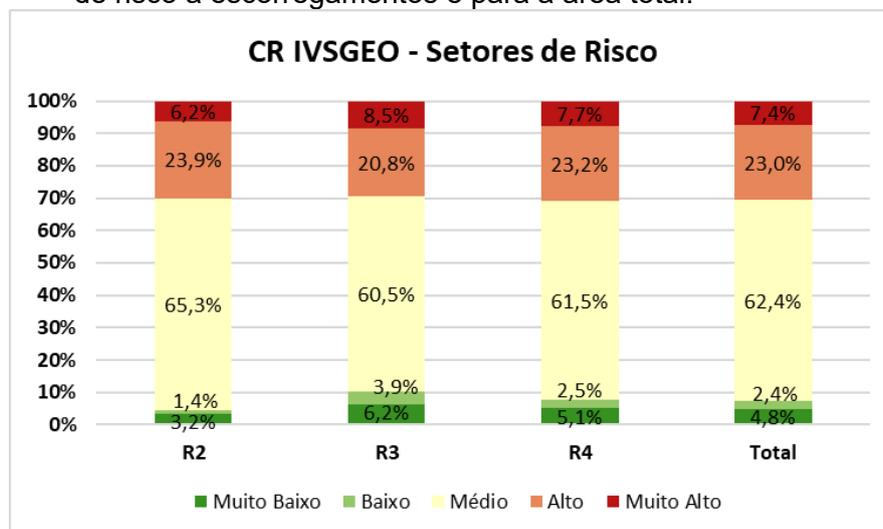
A Concentração de Risco (CR) das classes de vulnerabilidade socioambiental dos setores de risco a escorregamentos é apresentada na Figura 3.15. O objetivo desta análise foi encontrar correlações entre os níveis de risco e as classes de IVSGeo. A CR demonstra pequena proporção de áreas mapeadas como muito baixo a baixo IVSGeo, existindo uma predominância nos setores de risco de áreas com vulnerabilidade média (62,4% no total).

Figura 3.14 – Resultados de IVSGeo com ênfase em alguns setores de risco.



Fonte: Próprio autor.

Figura 3.15 – Concentração de Risco (CR) das classes de IVSGeo para os três níveis de risco a escorregamentos e para a área total.



Fonte: Próprio autor.

A categoria de risco R3 foi a que apresentou a maior proporção de áreas com IVSGeo muito alto (8,5%), seguido por R4 (7,7%) e R2 (6,2%), apontando para a consistência e coerência dos resultados. Contudo, não foi possível observar o mesmo padrão nas classes de vulnerabilidade alta, existindo uma pequena aleatoriedade nos resultados (R2 = 23,9%, R3 = 20,8% e R4 = 23,2%); porém, não podendo considerar que existe discrepância nos valores.

A classe “muito alto” de IVSGeo se caracterizou por valores que indicam pequena proporção em se tratando de porções mapeadas como áreas de risco (7,4% no total dos setores de risco). Isso pode ser reflexo, como já descrito anteriormente na análise geral, das características do município com alto IDH; portanto, com moradias com condições mais estruturadas. Há uma tendência de expansão das áreas urbanas em direção a regiões menos suscetíveis aos deslizamentos e de forma planejada. A expressiva capacidade financeira do município permite implementar infraestruturas habitacionais que tendem minimizar os indicadores de suscetibilidade aos deslizamentos. Isso associado também a bons índices socioeconômicos nos setores censitários, refletiu em menores taxas nos cálculos do IVSGeo e contribuiu para a proporção expressiva de vulnerabilidade média nos setores de risco.

O Potencial de Risco (PR) é um importante índice para validação do IVSGeo, por demonstrar o quão preciso é o método. Trata-se de uma métrica que sintetiza a taxa de precisão entre todas as áreas apontadas pelo modelo e aquelas que estão dentro das áreas de risco (CAMARINHA, 2016). Considerando as áreas de risco e que a vulnerabilidade sociogeoeambiental visa avaliar as encostas em áreas urbanizadas de São José dos Campos, o PR foi calculado pela razão entre o número de células no interior dos setores de risco e o total de células na área urbanizada para cada classe de IVSGeo. Os resultados são apresentados na Tabela 3.5.

Os resultados do Potencial de Risco para os setores de risco apresentaram valores muito satisfatórios, uma vez que 10,5%, 11,7% e 12,4% para as classes médio, alto e muito alto de IVSGeo, respectivamente, indicam que o método desenvolvido nesta pesquisa tem ótima capacidade de detecção de áreas e

populações vulneráveis aos deslizamentos. O PR encontrado para a classe “muito alto”, por exemplo, aponta para que em todas as áreas urbanizadas mapeadas com esse IVSGeo, 12,4% correspondem aos setores de risco a escorregamentos mapeados pelo PMRR (IPLAN, 2018). Este valor da classe “muito alto” caracteriza a modelagem híbrida aplicada para a obtenção do índice vulnerabilidade sociogeambiental de São José dos Campos com uma ótima acurácia, estando consideravelmente acima do valor de 5% avaliado na literatura como satisfatório.

Tabela 3.5 – Índice Potencial de Risco (PR) para os setores de risco a escorregamentos.

IVSGEO	Potencial de Risco (PR)
Muito Baixo	0,3%
Baixo	0,4%
Médio	10,5%
Alto	11,7%
Muito Alto	<b>12,4%</b>

Fonte: Próprio autor.

### 3.5.4 Limitações e potencialidades do IVSGeo

Por ter sido gerado com os dados socioeconômicos do ano de 2010, referente ao último censo disponível até o momento que se realizou a presente pesquisa, o IVSGeo apresenta limitações temporais nos dados de entrada. No ano de 2010 a cidade de São José dos Campos tinha uma população de 629.921 habitantes contabilizada pelo Censo Demográfico de 2010 - IBGE. As projeções do próprio IBGE estimaram um crescimento populacional de 100 mil habitantes em 10 anos, estimando uma população de 729.737 habitantes para o ano de 2020 (IBGE, 2021). Ou seja, a estimativa é de que população de São José dos Campos tenha apresentado uma ascensão de 15,8% em 10 anos.

Esse acréscimo populacional projetado tem potencial de acarretar mudanças nas características socioeconômicas do município, que, por consequência, pode refletir nos resultados do IVSGeo. Soma-se a isso também mudanças na faixa etária das crianças, que atualmente já são adultas, parte da população

economicamente ativa que hoje se tornou não ativa (idosos), alterações na infraestrutura habitacional devido às intervenções do poder público municipal (asfaltamento, drenagem, ampliação da rede de coleta de lixo e esgoto, maior acesso à água tratada ou até mesmo regressão em alguns casos). Todos esses fatores contribuem para as limitações do índice de vulnerabilidade gerado, que no contexto do tema de risco de desastres, o ideal seria coletar dados sociodemográficos regularmente, porém o alto custo dos estudos censitários é um fator limitante, conforme destacado em Alvalá et al. (2019).

Contudo, o IVSGeo de São José dos Campos é um índice inovador que integrou as características geomorfológicas e socioeconômicas e que, apesar de apresentar uma defasagem temporal nos dados de entrada, o estudo resultou em um diagnóstico da vulnerabilidade municipal aos deslizamentos de terra com bons resultados de validação. Além do diagnóstico de vulnerabilidade gerado para a cidade, a metodologia criada tem importante relevância e potencialidade para contribuir para uma melhor gestão do poder público em ações de prevenção, de pré e pós desastres naturais associados a estes eventos. Não obstante, assim que os dados censitários mais recentes forem disponibilizados, o IVSGeo pode facilmente ser atualizado com a integração dos atuais dados socioeconômicos.

O IVSGeo permite subsidiar a melhor identificação de prioridades intramunicipais para as ações da defesa civil em casos, por exemplo, de diferentes áreas que obtenha a mesma suscetibilidade natural aos deslizamentos, porém com diferenças nas características socioeconômicas e habitacionais. Importante destacar que essa metodologia pode ser replicada para outros municípios, principalmente aqueles onde os recursos financeiros são limitados e o poder municipal tem pouca capacidade de investimento para a elaboração de programas de prevenção e redução de riscos mais complexos e que exija maior número de profissionais especializados.

A aplicação do IVSGeo para outras regiões do Brasil que se singularizam por impactos associados a processos de movimentos de massa pode contribuir também para subsidiar o monitoramento conduzido pelo Cemaden/MCTI, que

envia alerta de desastres naturais, principalmente para aqueles municípios que tenham poucos dados disponíveis. Esse novo índice pode auxiliar também para que a população mais vulnerável seja priorizada no envio de alertas e para o apoio em caso de chuvas fortes que possam provocar deslizamentos de terra. Pode também contribuir para melhores tomadas de decisões na implementação de políticas públicas para a gestão do risco de desastres associados aos deslizamentos de terra.

A prefeitura de São José dos Campos, juntamente com o Instituto de Pesquisa, Administração e Planejamento (IPPLAN), está elaborando o Plano Municipal de Redução de Riscos (PMRR) e está atualizando o levantamento das áreas de risco de deslizamentos de encostas e inundações no município. O plano visa dar suporte ao poder público municipal na tomada de decisões e ser um instrumento de planejamento que permita dimensionar o problema, nortear as ações necessárias para reduzir ou anular as situações de risco de deslizamentos de encostas e inundações (IPPLAN, 2018). Neste sentido, o IVSGeo pode servir de referência para a proposição de medidas estruturais (asfaltamento, melhoria de drenagem, limpeza urbana) e não estruturais (monitoramento, mobilização das comunidades, informação pública, controle) e ao mesmo tempo as cartas geotécnicas previstas no PMRR podem contribuir no processo ainda mais acurado de validação do IVSGeo, para o aperfeiçoamento do índice.

Ressalta-se, contudo, que o Índice de Vulnerabilidade Sociogeoambiental de São José dos Campos – SP (IVSGeo – SJC) é um avanço no desenvolvimento de uma metodologia que visa integrar as características do terreno, associadas ao uso e ocupação do solo, infraestrutura habitacional e aos dados socioeconômicos de um município, para o monitoramento e prevenção de deslizamentos de encostas. Outrossim, a metodologia tem potencial de avançar ainda mais. Ou seja, visando a continuidade da pesquisa, algumas iniciativas estão sendo planejadas para um maior detalhamento na geração do IVSGeo, como considerar dados censitários do IBGE em face de quadra (os dados são disponibilizados em nível de detalhe de logradouro e quadra), em concordância com as metodologias associadas às Bases Territoriais de Áreas de Riscos-BATER, e do Índice Operacional de Vulnerabilidade-InOV desenvolvidos por

Assis Dias et al. (2018), Alvalá et al. (2019) e Dias et al. (2020). Além disso, gerar MDT e mapa de uso e ocupação do solo em escala de centímetros, a partir de sobrevoo de drones (VANTs); bem como gerar mapa de suscetibilidade aos deslizamentos de terra por meio de modelos transientes, como o TRIGRS, para permitir a inserção de dados de precipitação, taxas de infiltração e poropressão do solo como novas variáveis inseridas no IVSGeo, além de contribuir para que o índice seja dinâmico temporalmente (transiente). Os dados censitários do IBGE em face de quadra são restritos ao público e é necessário adquiri-los via parcerias institucionais, o que tem sido feito entre o Cemaden e o IBGE. Para o uso do modelo transiente serão necessários adaptações na forma de inserção dos parâmetros de entrada, para permitir que os dados referentes às atividades antrópicas e vegetação arbórea sobre as encostas (sobrecarga de edificações, vazamento de água e esgoto de tubulações, presença/ausência de vegetação entre outros) sejam considerados. Todas essas inserções futuras no IVSGeo permitirão a aplicação da metodologia em escala de detalhe e, assim, quando em caso de chuvas que podem provocar deslizamentos de terra, o método terá potencial de apontar para a defesa civil especificamente as ruas e até mesmo quadras onde se farão necessárias intervenções prioritárias para a prevenção de perdas de vidas associados aos movimentos de massa.

### **3.6 Considerações finais**

O estudo sobre a vulnerabilidade sociogeambiental de São José dos Campos (IVSGeo – SJC) foi desenvolvido por meio da aplicação de um processo metodológico de modelagem híbrida (modelo determinístico e heurístico), o que permitiu obter valores de validação muito satisfatórios. Apesar das limitações temporais dos indicadores socioeconômicos advindos dos dados censitários de 2010, o IVSGeo apresentou um grande potencial para ser replicado para outras regiões, por permitir o conhecimento da vulnerabilidade sociogeambiental intramunicipal. Portanto, tem potencial para subsidiar o poder público municipal em ações para a implementação de políticas públicas para a gestão do risco de desastres associados aos deslizamentos de terra.

Apesar do município ser classificado com IDHM muito alto, um dos maiores do Brasil (24ª posição), os resultados do IVSGeo - SJC apontaram para a existência de desigualdades socioeconômicas que coincidem com as variações das características geomorfológicas. Observa-se que as partes norte e sul do município são caracterizadas por regiões de alta suscetibilidade a deslizamentos de terra e ocupadas por populações de menor renda, estruturas habitacionais mais precárias e, conseqüentemente, com vulnerabilidade mais alta.

Em contrapartida, as regiões mais centrais estão mais associadas às superfícies planas e de baixa suscetibilidade natural e ocupadas por domicílios com rendas mais altas e maior acesso às infraestruturas habitacionais, sendo classificada em sua maioria com valores baixos de vulnerabilidade.

Os resultados obtidos provavelmente refletem a desigualdade socioeconômica existente no Brasil e a lógica do mercado imobiliário que, ao longo dos anos, teve uma tendência a valorizar as regiões centrais e afastar as pessoas de baixa renda para as áreas periféricas e de menor valor de mercado, como os terrenos de maior tendência aos deslizamentos de terra, e, com isso configurando-se as áreas de risco.

## **4 A INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO USO E COBERTURA DO SOLO E DA INTENSIDADE DE CHUVA NA DEFLAGRAÇÃO DE DESLIZAMENTOS DE TERRA: UM ESTUDO DE RETROANÁLISE UTILIZANDO MODELOS DETERMINÍSTICOS<sup>1</sup>**

### **4.1 Introdução**

Deslizamentos de terra são processos que contribuem diretamente para a formação e evolução das paisagens geomorfológicas e são causados pela interação de fatores internos e externos. Fatores internos, tais como topografia, geologia, pedologia, hidrologia e características da vegetação, são intrínsecas as propriedades ambientais de uma região específica e tem uma significativa participação na formação dos deslizamentos de terra; enquanto que os fatores externos, tais como as precipitações, são o gatilho para desencadear os deslizamentos (CARRARA et al., 1999; KIM et al., 2013).

Fatores antropogênicos, tais como desmatamentos, recortes nos terrenos, aterros para construção, depósitos de lixo, entre outras, causam mudanças no uso e cobertura do solo e geram novas relações com e entre os fatores naturais internos e externos. Conseqüentemente, estas alterações geram instabilidade nas encostas e induzem os processos de deslizamentos de terra, por vezes culminando em efeitos catastróficos (BRUNSDEN; PRIOR 1984; CARRARA et al., 1999; FERNANDES; AMARAL 1996; FERNANDES et al., 2001; GUIDICINI; NIEBLE 1983; KIM et al., 2013; KÖNIG et al., 2019; MACIEL FILHO, 1994; MENDES et al., 2017a; PELLOGIA, 1998; PERSICHILLO et al., 2017; SCHMALTZ et al., 2017; SCHMIDT et al., 2001; SIDLE et al., 1985; VIEIRA, 2007).

Modelos que avaliam a suscetibilidade aos deslizamentos de terra consideram os fatores indutores e têm potencial para prever a distribuição espacial das encostas instáveis. Os modelos regionais baseados fisicamente têm sido

---

<sup>1</sup> Este capítulo é uma versão adaptada do artigo: Ávila, F.F., Alvalá, R.C., Mendes, R.M., Amore, D.J. The influence of land use/land cover variability and rainfall intensity in triggering landslides: a back-analysis study via physically based models. *Natural Hazards*, v.105, p.1139–1161, 2021.

amplamente utilizados por causa da sua maior capacidade preditiva e porque são os mais adequados para avaliação quantitativa dos efeitos dos parâmetros individuais que contribuem para a deflagração dos deslizamentos (ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999; CHAE et al., 2017; FERNANDES, 2016). Estes modelos reproduzem os processos físicos que regem a ocorrência de deslizamentos e, com isso, estimam a instabilidade das encostas levando em conta as características geométricas e geotécnicas das superfícies (FELL et al., 2008). Mendes et al. (2017a) apontam que modelos numéricos são uma alternativa à falta de dados de ocorrência, fundamental para a análise empírica de limiares críticos de chuva para prever deslizamentos em sistemas de alerta de desastres, especialmente em encostas urbanas.

Devido a ampla rede de Sistema de Informações Geográficas (SIG) disponível, que oferece estruturas baseadas em *grid* (células *rasters*), modelos têm sido implementados e permitem a análise da estabilidade das encostas de forma que os resultados estejam espacialmente distribuídos, podendo ser representados em escala de bacia hidrográfica (modelos regionais). Alguns modelos publicados, tais como SINMAP (PACK et al., 1998), SHALSTAB (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; MONTGOMERY; DIETRICH, 1994) e TRIGRS (BAUM et al., 2002, 2008), se destacam por terem sido amplamente utilizados em países como os Estados Unidos, China, Brasil e Itália (TEIXEIRA et al., 2015). No entanto, nestes modelos as variáveis utilizadas para determinar o fator de segurança (FS) se restringem as características geométricas, geotécnicas e hidrológicas das encostas (variáveis associadas aos fatores condicionantes naturais). Para melhor representar a realidade das superfícies estudadas, modelos que permitem a inserção de um maior número de variáveis se tornam necessários. Assim, a inclusão de parâmetros associados a processos antropogênicos (sobrecarga de edificações, taludes de corte e aterros) e cobertura arbórea (reforço das raízes, por exemplo), pode melhorar a forma como as características atuais da encosta são representadas (CHIARADIA et al., 2016; CISLAGHI et al., 2018; DIETRICH et al., 2007). Estes parâmetros podem ser representados nos modelos, permitindo uma aderência das variáveis físicas

que influenciam a estabilidade das encostas às categorias adquiridas pelos mapeamentos de uso e cobertura do solo.

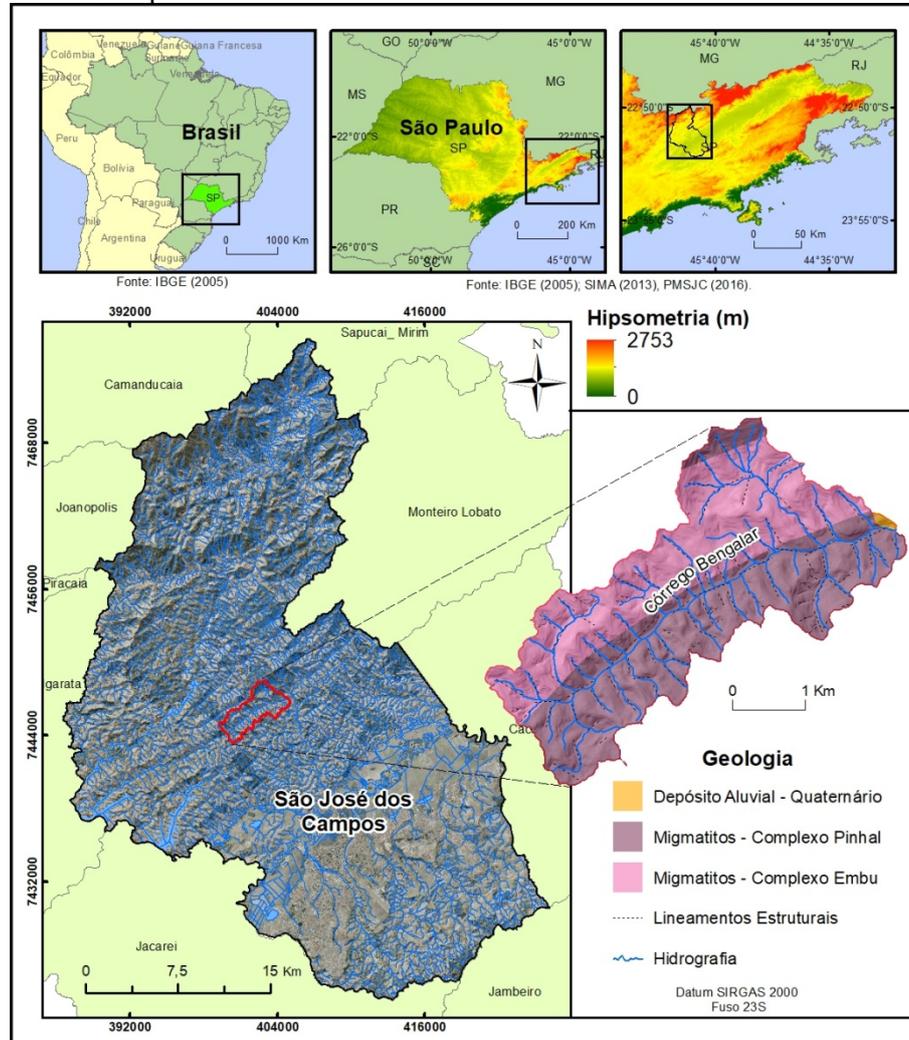
O objetivo deste estudo foi aplicar modelos determinístico (bases físicas) para realizar um estudo de retroanálise na bacia do Córrego Bengalar, localizado na Região Norte de São José dos Campos, para analisar um conjunto de fatores que podem ter influenciado a instabilidade das encostas e conseqüentemente a deflagração de 65 deslizamentos de terra associados com uma forte precipitação entre os dias 7 e 8 de março de 2016. Uma análise comparativa foi também realizada entre um modelo determinístico estático (FS FIORI) e um modelo transiente (TRIGRS - *Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability*), sendo que este último utilizou dados de precipitação ao longo do tempo. Para essa finalidade, um modelo em ambiente SIG foi desenvolvido para calcular o FS das encostas com base na equação de Fiori (2015) e no método de Silveira et al. (2012), gerando o modelo de suscetibilidade aos deslizamentos de terra FS FIORI. Este modelo permitiu uma flexibilização na inserção dos parâmetros de entrada e possibilitou a incorporação de algumas variáveis associadas aos usos e cobertura do solo, tais como: sobrecarga de edificações e árvores; presença ou ausência de vegetação arbórea; coesão de raízes; força do vento sobre as árvores; a força de ancoramento das raízes. O modelo TRIGRS, desenvolvido pelo serviço geológico dos Estados Unidos (*United States Geological Survey – USGS*), foi utilizado para analisar a influência das precipitações intensas de curto prazo e das precipitações acumuladas de longo prazo sobre a estabilidade das encostas.

#### **4.2 Area de estudo**

A área de estudo é a bacia do Córrego Bengalar que ocupa um território de 11,9 km<sup>2</sup>, um perímetro de 20,8 km e está localizado na zona rural ao norte do município de São José dos Campos – SP (Figura 4.1). A bacia é ocupada por pastagem, com alguns remanescentes de vegetação arbórea, correspondente à Mata Atlântica e matas ciliares, e algumas edificações de sedes de sítios e fazendas. No que tange à rede hidrográfica, o curso principal do Córrego Bengalar flui no sentido SW – NE, mesmo sentido predominante dos lineamentos

estruturais rochosos (falhas, fraturas e contato litológico) - e deságua no rio Buquira, afluente do Rio Paraíba do Sul.

Figura 4.1 – Localização da bacia do Córrego Bengalar no município de São José dos Campos.



Fonte: Próprio autor.

Regionalmente, a bacia está situada em um contexto geomorfológico cujo arranjo e a distribuição espacial das formas de relevo foi condicionada por atividade tectônica Pré-Cambriana, dando origem as Formas Estruturais – Denudacionais caracterizadas por Serras Médias esculpidas em migmatitos, gnaisses, xistos e filitos, com predomínio de suítes graníticas (CAMARGO et al., 2011). Estas formas estão inseridas no sistema montanhoso da Serra da Mantiqueira, cuja característica geomorfológica é marcada por formas muito dissecadas, com vales entalhados, associado a alta densidade de drenagem e

favorece a formação de processos erosivos agressivos e alta suscetibilidade aos deslizamentos das encostas (ROSS; MOROZ, 2011).

Geologicamente, a bacia do Bengalar é composta, principalmente por rochas cristalinas, destacando os migmatitos ofalmiticos e policíclicos do Complexo Pinhal e os migmatitos heterogêneos e homogêneos do Complexo Embu. Ocorrem também, em menor proporção, depósitos quaternários (aluviões) compostos por areias, argilas e conglomerados de depósitos aluviais (IPT/CPRM, 2014). A altimetria da bacia varia entre 562 a 904 metros e as formações superficiais estão condicionadas diretamente aos nivelamentos topográficos da região, onde nas áreas de alta declividade, semelhante à bacia do Córrego Bengalar, ocorrem solos pouco evoluídos originados das rochas cristalinas. Considerando o mapa de classificação climática de Köppen para o Brasil (ALVARES et al., 2013), O município de São José dos Campos – SP é caracterizado por um clima oceânico, com estação seca (Cf) e um verão com temperaturas temperadas (Cfb) nas porções mais elevadas topograficamente da Região Norte, associado a Serra da Mantiqueira, e quente (Cfa) nas porções mais rebaixadas, próximas às planícies do Rio Paraíba do Sul e a área urbana. A precipitação média anual é de 1437 mm e é influenciada por sistemas meteorológicos sinóticos e de grande escala, tais como frentes frias e a Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZACAS) (SELUCHI; CHOU, 2009). Importante ressaltar que somado a estes sistemas, destacam-se as chuvas convectivas de verão, contribuindo significativamente para o aumento da umidade dos solos e para a instabilização das encostas (MENDES et al., 2017a; 2017 b).

Devido às características geológica, geomorfológica e socioeconômica do município, foram mapeadas 16 áreas de risco que correspondem por 87 setores de risco alto a muito alto aos deslizamentos. Um total de 2016 casas que se encontram nestas áreas que podem ser afetadas por estes processos. Fatores antrópicos indutores estão associados com regiões de alta suscetibilidade natural aos deslizamentos. Em São José dos Campos estas áreas predominam mais ao norte do município, onde superfícies acidentadas da Serra da Mantiqueira são localizadas, e onde as áreas de risco estão concentradas (VALÉRIO FILHO et al., 2014). Atividades antrópicas nestes locais, tais como

taludes de corte, aterros, sobrecarga de edificações e vazamentos de tubulações sobre as encostas, aumentam significativamente a instabilidade geotécnica (MENDES; VALÉRIO FILHO, 2015).

#### **4.2.1 Deslizamentos de terra - 7 e 8 de março de 2016**

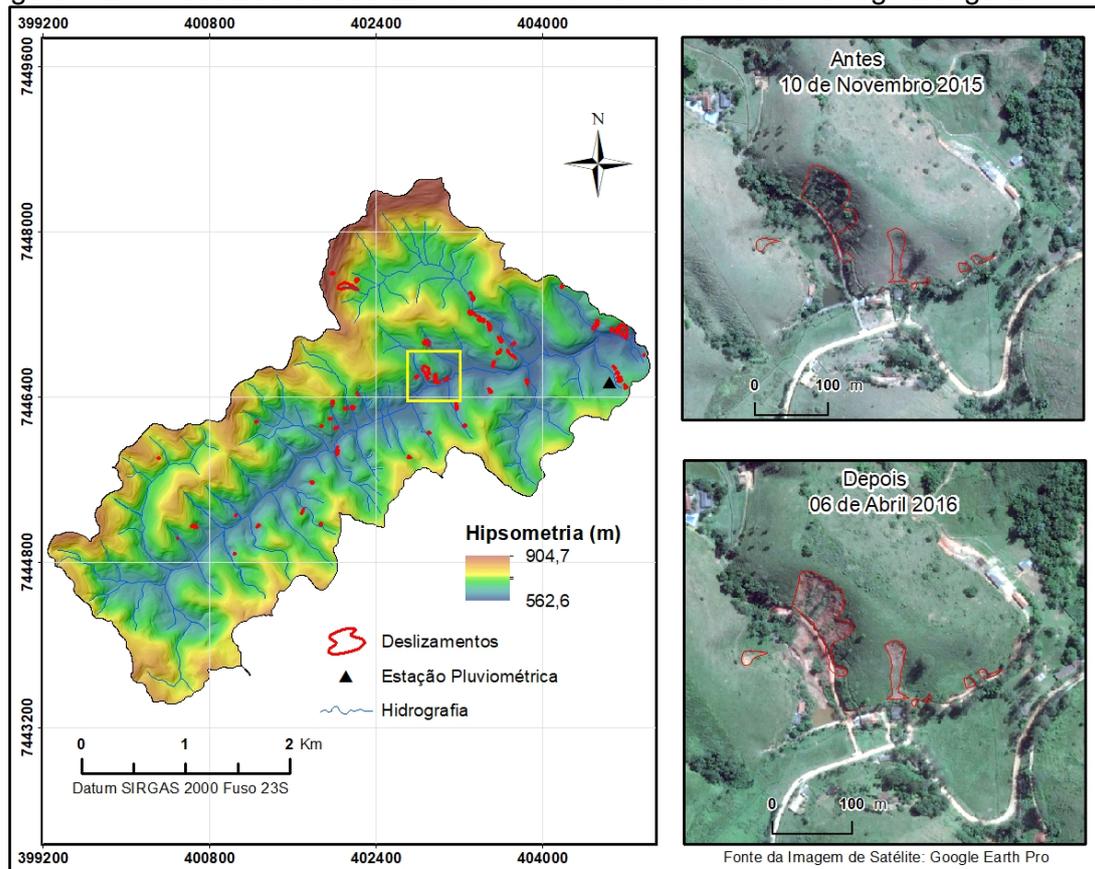
Entre os dias 7 e 8 de março de 2016 ocorreu uma chuva de cerca de 80 mm em 15 horas, no período da madrugada, na Região Norte do município de São José dos Campos – SP, acarretando diversos eventos associados como quedas de árvores e postes, alagamentos, inundações e deslizamentos. O bairro Chácara da Boa Vista, situado no interior da bacia do Córrego Bengalar, ficou isolado devido ao grande número de deslizamentos sobre as vias de acesso, impedindo a circulação de veículos. Segundo informações disponibilizadas na imprensa, a Defesa Civil municipal apontou que do total das chuvas precipitadas durante a noite e madrugada, 69 mm foram em apenas duas horas, volume este considerado alto pelo órgão, deixando três bairros isolados, provocando “quedas de barreiras” e interditando a rodovia SP-50 (CHUVA, 2016 G1).

O impacto deste evento de chuva, em termos de deslizamentos de encostas, foi observado por meio de imagens de Satélite no *software Google Earth Pro*, o qual permitiu a verificação de uma concentração de cicatrizes situada próximo ao bairro Chácara da Boa Vista, na Estrada do Bengalar, no interior da bacia do Córrego do Bengalar. Foram utilizadas duas imagens de satélite de datas mais próximas ao evento precipitante que o *software* disponibilizou para consultas: a primeira do dia 10 de novembro de 2015 (anterior aos deslizamentos); e a segunda imagem do dia 4 de abril de 2016 (posterior aos deslizamentos). Foram identificadas 65 cicatrizes de deslizamentos na segunda imagem e apenas 1 na primeira imagem (Figura 4.2), verificando-se assim a origem de 65 pontos de deslizamentos na bacia do Córrego Bengalar em curto período de tempo (5 meses aproximadamente).

Ao observar os dados de acumulados de chuva da estação pluviométrica Chácaras da Boa Vista/Cemaden (localizada dentro da bacia), no intervalo de tempo das duas imagens, é possível observar um grande pico de chuva (74,8 mm) no dia 8 de março, valor esse bem acima ao da média se comparado aos

dos outros dias (Figura 4.3). Esse acumulado de chuvas permite associação com origem das 65 cicatrizes de deslizamentos da bacia do Córrego Bengalar em decorrência das intensas chuvas registradas na noite e madrugada dos dias 7 e 8 de março de 2016, respectivamente. Informações apresentadas na imprensa também corroboraram para a associação entre o número de deslizamentos com o evento chuvoso de 7 e 8 de março de 2016 (CHUVA, 2016 G1).

Figura 4.2 – Cicatrizes de deslizamentos de terra na bacia do Córrego Bengalar.

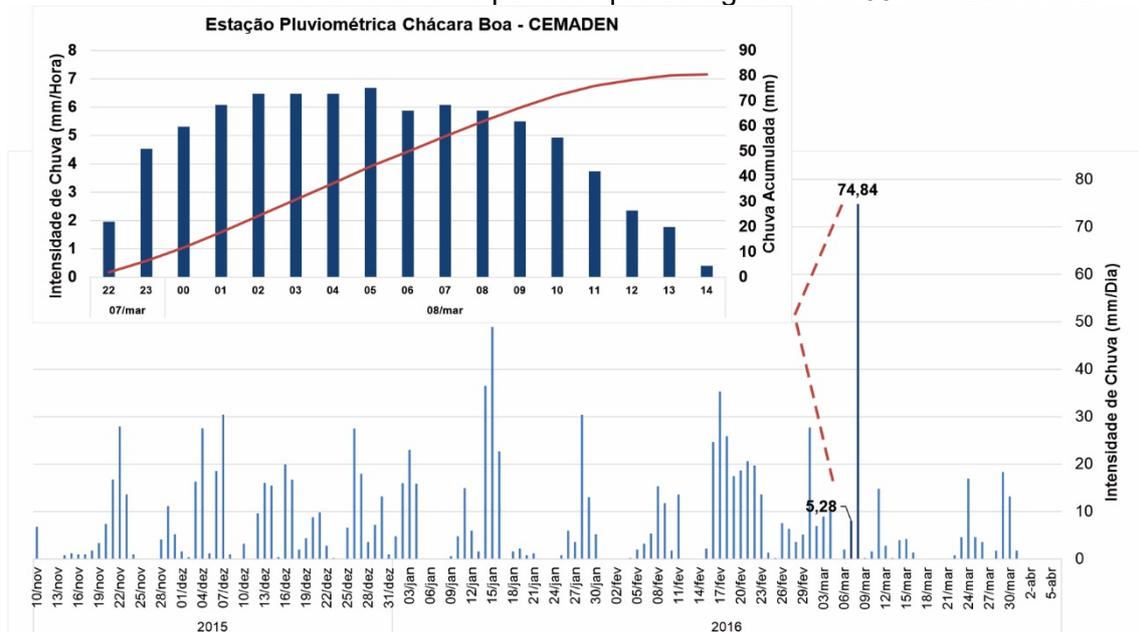


Fonte: Próprio autor.

Trabalhos de campo realizados na região permitiram a visualização *in loco* (Figura 4.4) de algumas cicatrizes de deslizamentos, verificando que no geral eles são do tipo translacionais raso, gerados no solo residual e ao longo da linha de contato solo e saprolito (profundidade de ruptura entre 0,5 e 2,0 m), que marca uma descontinuidade textural, onde geralmente o perfil pedológico se rompe. As cicatrizes geralmente estão associadas a encostas de morfologia côncavas a retilíneas, em áreas de pastagem (Figura 4.4B e 4.4C), edificadas e em cortes de estradas (Figura 4.4D). No entanto, foi encontrado também, com

maior raridade, cicatrizes em áreas caracterizadas por vegetação arbórea (Figura 4.4A).

Figura 4.3 – Dados da chuva diária entre 10 de novembro de 2015 a 6 de abril de 2016 e da chuva horária no período que deflagraram os 65 deslizamentos.



Fonte: Próprio autor.

### 4.3 Materiais e métodos

Para analisar a suscetibilidade a deslizamentos de encostas na bacia do Córrego do Bengalar e realizar o estudo de retroanálise dos deslizamentos ocorridos em março de 2016, foram utilizados dois modelos de bases físicas: FS FIORI desenvolvido para este trabalho, a partir da equação do FS de Fiori (2015) e caracterizado por ser estático; e o TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability*), desenvolvido por Baum, Savage e Godt (2002, 2008) e caracterizado como transiente devido o FS e a pro-pressão estarem em função dos valores de precipitação e da taxa de infiltração.

Figura 4.4 – Imagens dos deslizamentos de encostas localizados na bacia do Córrego do Bengalar.



Fonte: Próprio autor.

#### 4.3.1 Modelo FS FIORI

O Modelo FS FIORI foi implementado para determinação da suscetibilidade a deslizamentos em encostas. Este modelo se baseia em método determinístico e utiliza o conceito de equilíbrio-limite e a equação de Fiori (2015) para calcular o FS das encostas. O modelo FS FIORI considera numericamente as características das encostas, dos solos, sobrecarga das edificações e árvores, ação das forças dos ventos na copa das árvores, a hidrologia das vertentes e o efeito de atirantamento (ancoramento) e coesão das raízes. O cálculo é expresso pela Equação 4.1 e foi aplicado para cada célula do grid da área de estudo. O FS representa a razão entre as forças de resistência (porção superior da equação) pelas forças de cisalhamento (parte inferior da equação)

$$F_s = \frac{(C_s + S_r) + \left[ \left( \gamma_{nat} - \frac{h_w}{h} \gamma_a \right) h \cos i + \sigma_a \cos i + T \sin \theta \right] \operatorname{tg} \phi + T \cos \theta}{(h \gamma_{sat} + \sigma_a) \sin i + \sigma_{ve}} \quad (4.1)$$

em que:  $F_s$  é o Fator de segurança,  $C_s$  é a Coesão do solo,  $S_r$  é a Coesão das raízes,  $\gamma_{nat}$  é o Peso específico do solo,  $\gamma_a$  é o Peso específico da água,  $h_w$  é a Espessura do lençol freático (Solo Saturado),  $h$  é a Profundidade do solo,  $i$  é a Inclinação da vertente,  $\sigma_a$  é a Sobrecarga

(árvores; edificações),  $T$  é a Tensão das raízes,  $\theta$  é o Ângulo de rotação das raízes,  $\phi$  é o Ângulo de atrito do solo,  $\gamma_{\text{sat}}$  é o Peso específico do solo saturado,  $\sigma_{\text{ve}}$  é a Força do vento sobre a vegetação.

A implementação do modelo FS Fiori consistiu na espacialização das equações do FS por meio de um Sistema de Informações Geográficas (SIG). O *software* ArcGIS 10 (ESRI, 2011) foi utilizado para a aplicação de procedimentos para organização da base de dados, armazenamento e realização das operações para o equacionamento do FS das encostas. A ferramenta *raster calculator* do pacote *Spatial Analyst Tools* foi utilizada para a aplicação, integração e cálculo dos parâmetros de entrada do modelo, por meio de camadas matriciais (imagens *rasters*) em ambiente SIG.

Além das características hidrológicas, geométricas e geotécnicas, o cálculo do FS das encostas considerou também aspectos relacionados à presença ou ausência de vegetação arbórea e edificações. Com isso, uma nova abordagem para estudos de modelagem de estabilidade de taludes foi desenvolvida, considerando algumas características antropogênicas sobre as encostas.

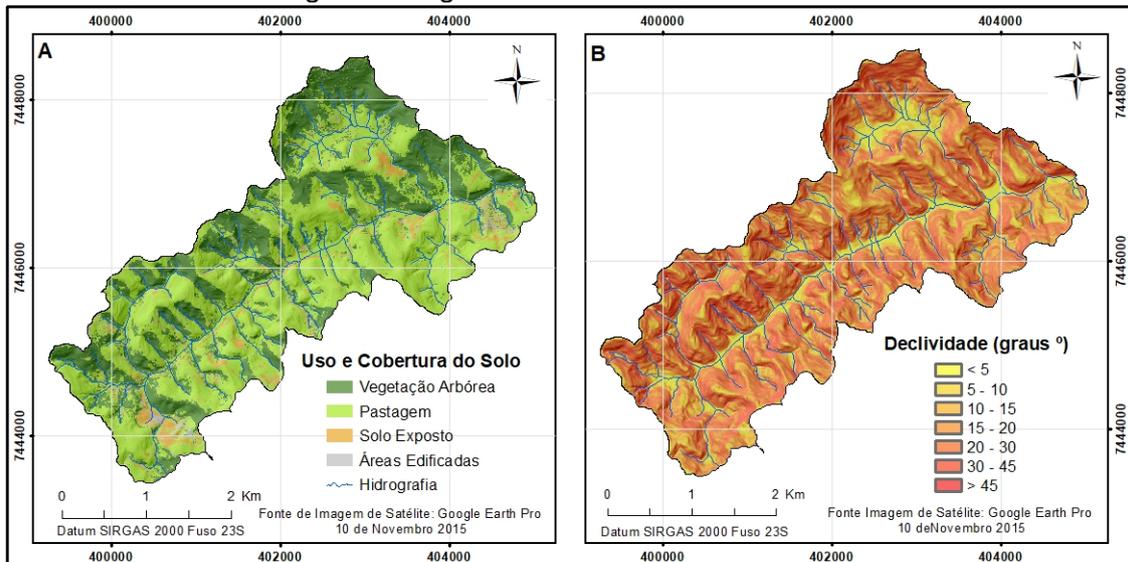
O uso e cobertura do solo da bacia do Bengalar foi mapeado aplicando técnicas de fotointerpretação, que possibilitou a classificação de imagem de satélite de 10 de novembro de 2015, extraída do *software Google Earth Pro* (classificação supervisionada). A classificação permitiu o mapeamento de quatro classes de usos e cobertura do solo: vegetação arbórea; pastagem; edificações; e solo exposto (Figura 4.5 A).

Os dados de declividade das encostas da bacia do Córrego do Bengalar, representado pelo mapa de declividade (Figura 4.5 B), foram extraídas do modelo digital de elevação (MDE) com resolução de 5 metros. A base topográfica (escala 1:10.000) foi adquirido a partir de aerolevanteamento pela empresa TERRAFOTOS/S.A, em 1977, e disponibilizada pelo Plano Cartográfico do Estado de São Paulo.

A caracterização das propriedades geotécnicas e hidrológicas dos solos se baseou em trabalhos aplicados para a região de estudo, em especial os trabalhos de Mendes e Valério Filho (2015), Mendes et al. (2017a) e Mendes et

al. (2017b). As amostragens de solos para esses estudos incluíram amostras deformadas e indeformadas e realizaram os seguintes testes: textura do solo; peso específico do solo; peso específico do grão; limites de Atteberg (plasticidade e limites de liquidez). Resultados destes testes são apresentadas na Tabela 4.1.

Figura 4.5 – Camada matricial do uso e cobertura do solo (A), e declividade (B) da bacia do Córrego do Bengalar.



Fonte: Próprio autor.

Tabela 4.1 – Parâmetros geotécnicos representativo dos perfis de solo da área de estudo (MENDES; VALÉRIO FILHO, 2015; MENDES et al., 2017a; MENDES et al., 2017b).

Perfil de solo	Profundidade (m)	Tamanho do grão (%)			Peso Específico do Solo (kN/m <sup>3</sup> )	Coesão Efetiva (kPa)	Ângulo Atrito do solo (kN/m <sup>3</sup> )	Condutividade Hidráulica (m/dia)	Poropressão (kPa)
		Areia	Silte	Argila					
H1	0,5	56	18	27	17	10	33	0,25	-10
H2	3,0	36	8	57	18	15	35	0,10	-15
H3	6,5	57	34	9	19	21	37	1,13	-20

Fonte: Próprio autor.

Dadas as semelhanças entre as características geológicas, geomorfológicas e pedológicas da área de amostragem nesses estudos anteriores e a área de estudo atual (bacia do Bengalar), esses parâmetros foram considerados adequados para uso no presente estudo. Os planos de ruptura de escorregamentos mapeados na bacia de estudo estão, principalmente até 0,5 metros de profundidade, podendo chegar até 2,0 metros em alguns casos. Com

isso, definiu-se que os valores utilizados no presente estudo correspondem às amostras coletadas na camada H1. Esses valores foram adaptados e extrapolados para toda a bacia, e os dados são apresentados na Tabela 4.2, juntamente com os dados referentes aos parâmetros relacionados às áreas mapeadas com vegetação arbórea e edificadas.

Tabela 4.2 - Parâmetros utilizados no modelo FS FIORI na bacia do Bengalar.

Parâmetros de Entrada	Unidade de Medida	Valores
Coesão do Solo ( $C_s$ )	(kN/m <sup>2</sup> )	10
Coesão das Raízes ( $S_r$ )	(kN/m <sup>2</sup> )	13
Peso Específico do solo ( $\gamma_{nat}$ )	(kN/m <sup>3</sup> )	17
Sobrecarga das Árvores ( $\sigma_a$ )	(kN/m <sup>2</sup> )	5
Sobrecarga das Edificações ( $\sigma_a$ )	(kN/m <sup>2</sup> )	4
Tensão das Raízes (T)	(kN/m)	5
Ângulo de Rotação das Raízes ( $\theta$ )	(degree°)	48
Ângulo de Atrito Interno do solo ( $\phi$ )	(degree°)	33
Peso Específico do Solo Saturado ( $\gamma_{sat}$ )	(kN/m <sup>3</sup> )	20
Força do Vento ( $\sigma_{ve}$ )	(kPa)	1
Condição Hidrológica do Solo	-	Saturado

Fonte: Próprio autor.

Dado ao alto acumulado de precipitação que antecedeu o dia do evento que desencadeou os processos de deslizamentos, o solo foi considerado saturado. Portanto, na equação do FS (rever Equação 4.1), a razão  $hw/h$  foi considerada unitária. Em outras palavras, com relação à profundidade estimada do solo residual, a altura da zona do solo saturado ( $hw$ ) e a altura da zona do solo não saturado ( $h$ ) foram ambos considerados com 2 m.

Dados relacionados com as áreas cobertas por vegetação arbórea, tais como coesão, tensão e ângulo de rotação das raízes, e força de arrasto do vento sobre a copa das arvores, foram estabelecidos com base nos estudos desenvolvidos por Michel (2013), Fiori (2015) e Mafra et al. (2019). Os valores de sobrecarga, os quais foram adicionados à porção mapeada dos modelos como área edificadas, foram definidos baseados nos valores de cargas verticais estabelecidos pela NBR 6120 Cargas para o cálculo de estruturas de edificações

(ABNT, 1980), que define para edifícios residenciais uma carga mínima de 3,5 kN/m<sup>2</sup> (1 pavimento), a qual foi arredondada para 4 kN/m<sup>2</sup> neste trabalho.

#### 4.3.2 Modelo TRIGRS

O modelo TRIGRS (*Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability*) foi desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (*Geological Survey – USGS*) e desenhado para ser um modelo determinístico transiente. Ele calcula a variação do Fator de Segurança (FS) conforme mudanças da carga de pressão ao longo de um evento pluviométrico e numa determinada variação de tempo (BAUM et al., 2002, 2008; KIM et al., 2013; VIEIRA et al., 2017). Este modelo é de base física e calcula as mudanças da poropressão do solo durante os eventos precipitantes. Para isso, o TRIGRS consiste da junção de um modelo de infiltração que simula os fluxos hidrológicos verticais e paralelos às encostas (BAUM et al., 2002, 2008; IVERSON, 2000) e um modelo de estabilidade de encosta com base no conceito de equilíbrio limite utilizado para avaliar a suscetibilidade a deslizamentos translacionais (BAUM et al., 2002, 2008; VIEIRA et al., 2017).

O modelo de infiltração utilizado neste trabalho considera uma condição de embasamento impermeável (profundidade finita) representada pela Equação 4.2, em que o primeiro termo se refere à parte estática do modelo e o restante representa a porção transiente (BAUM et al., 2002, 2008; KIM et al., 2013).

$$K(Z,t) = \sum_{n=1}^N H(t-t_n) \left\{ \begin{array}{l} I_{nz} - [I_{nz} - K_s \exp(\alpha_1 \psi_0)] \exp[-\alpha_1 (d_u - Z)] \\ -4(I_{nz} - I_{zlt}) \exp\left(\frac{\alpha_1 Z}{2}\right) \exp\left[-D_\psi \frac{(t-t_n)}{4}\right] \\ \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin[\Lambda_m \alpha_1 (d_u - Z)] \sin(\Lambda_m \alpha_1 d_u)}{1 + \frac{\alpha_1 d_u}{2} + 2\Lambda_m^2 \alpha_1 d_u} \exp[-\Lambda_m^2 D_\psi (t-t_n)] \end{array} \right\} \\ - \sum_{n=1}^N H(t-t_n) \left\{ \begin{array}{l} I_{nz} - [I_{nz} - K_s \exp(\alpha_1 \psi_0)] \exp[-\alpha_1 (d_u - Z)] \\ -4(I_{nz} - I_{zlt}) \exp\left(\frac{\alpha_1 Z}{2}\right) \exp\left[-D_\psi \frac{(t-t_{n+1})}{4}\right] \\ \cdot \sum_{m=1}^{\infty} \frac{\sin[\Lambda_m \alpha_1 (d_u - Z)] \sin(\Lambda_m \alpha_1 d_u)}{1 + \frac{\alpha_1 d_u}{2} + 2\Lambda_m^2 \alpha_1 d_u} \exp[-\Lambda_m^2 D_\psi (t-t_{n+1})] \end{array} \right\} \quad (4.2)$$

em que:  $\psi$  é a poro pressão (m),  $Z$  é a profundidade do solo (m),  $t$  é o tempo (s),  $d$  é a profundidade do lençol freático medido na direção vertical (m),  $\beta = \cos^2\theta - (I_{zLT}/K_s)$ ,  $\theta$  é a declividade das encostas (graus°),  $I_{zLT}$  é o fluxo de superfície estável inicial,  $K_s$  é a condutividade hidráulica saturada,  $N$  é o total do intervalo de tempo,  $I_{nz}$  é o fluxo de superfície devido a intensidade por intervalo de tempo,  $H(t - t_n)$  é a função *Heaviside*, e  $t_n$  é o intervalo de tempo da infiltração da chuva,  $D_1 = D_0/\cos^2\theta$ ,  $D_0$  é a difusividade hidráulica saturada,  $d_{iz}$  – profundidade do limite basal impermeável.

O modelo de estabilidade do TRIGRS calcula o FS como índice de estabilidade de encosta em células independentes, levando em conta um modelo de estabilidade de talude infinito, que calcula a relação entre as forças de resistência e da gravidade que condiciona o rompimento das encostas. Para isso utiliza a Equação 4.3 para calcular o FS. A estabilidade é definida como estável quando o FS >1 e instável quando < 1.

$$FS(Z,t) = \frac{c' + \{\gamma_s Z \cos^2\theta - \psi(Z,t)\gamma_w\} \tan \phi'}{\gamma_s Z \sin \theta \cos \theta} \quad (4.3)$$

em que: FS é o fator de segurança,  $C'$  é a coesão efetiva do solo (kPa),  $\gamma_s$  é o peso específico do solo (kNm<sup>-3</sup>),  $\theta$  é a declividade das encostas (graus°),  $\psi$  é a poro pressão (m),  $\gamma_w$  é o peso específico da água (kNm<sup>-3</sup>),  $\phi'$  é o ângulo de atrito do solo (graus°).

Semelhante ao modelo FS Fiori, os parâmetros geotécnicos da bacia do Córrego do Bengalar utilizados no modelo TRIGRS, como coesão do solo ( $C$ ), peso específico do solo ( $\gamma_s$ ) e ângulo de atrito interno ( $\phi$ ), foram definidos com base em estudos realizados por Mendes e Valério Filho, 2015, Mendes et al. 2017A e Mendes et al. 2017b considerando solos da Região Norte de São José dos Campos. Os valores amostrais foram espacialmente extrapolados para toda a bacia, cujos dados são apresentados na Tabela 4.3. Concernente aos parâmetros hidrológicos, referente à taxa de infiltração inicial ( $I_{zlt}$ ) e à de difusividade hidráulica ( $D_0$ ), foram utilizados os valores padrões (*Default*) do próprio modelo TRIGRS, que são consistentes na ausência de dados coletados *in situ* (LISTO, 2015).

Tabela 4.3 - Parâmetros de entrada no modelo TRIGRS.

Parâmetros de Entrada	Unidade	Valores
Coesão do Solo (C)	(kN/m <sup>2</sup> )	10
Peso Específico do solo (Ys)	(kN/m <sup>3</sup> )	17
Ângulo de Atrito Interno do solo (Ø)	(degree°)	33
Unidade de Peso da água (γw)	(kN/m <sup>3</sup> )	9,8
Taxa de Infiltração inicial (IzIt)	(m/s)	1,0 x 10 <sup>-9</sup>
Hydraulic Diffusivity (D0)	(m <sup>2</sup> /s)	5,5 x 10 <sup>-4</sup>
Hydraulic Conductivity (Ks)	(m/s)	2.9 x 10 <sup>-6</sup>

Fonte: Próprio autor.

Os parâmetros de profundidade do solo (Z) e altura inicial do lençol freático (d) foram utilizados de acordo com Baum, et al. (2002, 2008), Listo (2015) e Listo et al. (2018), que indicam que sejam considerados iguais para representar o solo em condição inicial como não saturado (seco). Baum et al. (2008) ressaltaram também que os resultados do TRIGRS são muito sensíveis às condições iniciais, destacando o componente constante do campo de fluxo (taxa de infiltração inicial) e a altura inicial do lençol freático. Assim, para a profundidade do lençol freático e do solo, o mesmo valor foi utilizado (2 metros), o qual se refere a maior profundidade do plano de ruptura dos deslizamentos de terra identificados em campo.

Os dados pluviométricos foram adquiridos a partir de registros da estação Chácaras da Boa Vista, esta integrante da rede de monitoramento de desastres naturais do Cemaden (Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais), instalada no interior da bacia do Córrego do Bengalar (rever a Figura 4.3). O modelo TRIGRS foi rodado considerando-se dois cenários, com base nos dados pluviométricos: o primeiro considerou, além do tempo inicial (0 mm), apenas o evento precipitante de 80,12 mm em 15,5 horas (55.800 segundos), correspondendo a uma chuva de  $1,44 \times 10^{-6}$  m/s durante a noite do dia 7 e início do dia 8 de março de 2016, quando ocorreram os deslizamentos de encostas mapeados na bacia estudada; no segundo cenário foram considerados os mesmos dados geotécnicos, acrescentando-se um tempo intermediário do

evento precipitante de 258,46 mm em 21 dias ( $1,42 \times 10^{-7}$  m/s) que antecederam os deslizamentos e contribuíram para a saturação dos solos.

#### **4.3.3 Métodos de análise e validação dos modelos**

Para a obtenção dos mapas de suscetibilidade a deslizamentos gerados a partir dos modelos é importante a aplicação de técnicas que avaliem e validem a qualidade e a representatividade dos resultados (CAMARINHA, 2016; DIETRICH et al., 2001; FRATTINI et al., 2010). Para isso, em cada cenário obtido a partir dos modelos FS FIORI e TRIGRS foi calculado o índice Frequência de Distribuição (FD), que indica a proporção de células de cada classe de estabilidade mapeada pelos modelos em relação à área total da bacia de estudo.

A validação foi realizada através da intersecção entre dados reais das 65 cicatrizes de deslizamentos identificadas e associadas aos dias 7 e 8 de março de 2016 e os resultados da suscetibilidade a deslizamentos da bacia do Córrego do Bengalar. O mapeamento de cicatrizes, conforme já explicitado, foi obtido por técnicas de sensoriamento remoto através da interpretação de imagens de satélite diretamente a partir do *software Google Earth Pro*. As cicatrizes foram identificadas nas imagens por meio da diferença de cores, texturas e considerando o formato alongado a arredondado, característicos dos deslizamentos de terra (CAMARINHA, 2016; GAO, 1993; GUIMARÃES et al., 2003; LISTO; VIEIRA, 2012; LISTO et al., 2018; TEIXEIRA et al., 2015; VIEIRA et al., 2010; VIEIRA et al., 2017). Observações das cicatrizes em campo foram importantes para a confirmação dos critérios utilizados. A relação espacial entre os mapas de cicatrizes e os resultados foi realizada por meio de técnicas de geoprocessamento no *software ArcGIS 10*, permitindo identificar e quantificar a área total de cada classe de estabilidade no interior das cicatrizes de deslizamentos mapeadas.

Uma avaliação geral da acurácia dos modelos foi realizada utilizando o método da Curva ROC (*Receiver Operating Characteristic*), que representa graficamente o desempenho de um classificador binário (regressão logística) em um determinado conjunto de dados, variando os valores de limiar do classificador. Este método compara a proporção de áreas classificadas corretamente como

suscetíveis a deslizamentos (taxa de verdadeiros positivos) com a proporção de áreas estáveis classificadas como suscetíveis a deslizamentos (taxa de falsos positivos) (BRITO et al., 2017; CISLAGHI et al., 2018; FRATTINI et al., 2010).

A Curva ROC foi aplicada aos modelos usados neste estudo por meio de linguagem de programação R. Um conjunto de dados de vetor binário consistindo de locais sem cicatrizes (atribuído um valor de zero) e com cicatrizes de deslizamentos (atribuído um valor de um) foram usados como verdadeiras. Os resultados da curva ROC possibilitaram a determinação da Área Sob a Curva (AUC – *Area Under the Curve*), que avalia o desempenho dos modelos em uma escala de 0 a 1. Quanto mais próximo de 1, melhor é o desempenho do modelo (BRITO et al., 2017; CISLAGHI et al., 2018; HASEKIOĞULLARI; ERCANOGLU, 2012).

#### **4.4 Resultados e discussões**

Os resultados dos modelos FS FIORI e TRIGRS são apresentados a seguir por meio de mapas de suscetibilidade, do índice de frequência e distribuição (FD) das classes de estabilidade (fator de segurança) e dos valores de AUC gerados pela curva ROC. Os mapas de suscetibilidade gerados pelos modelos foram caracterizados por seis classes de estabilidade. Cada classe representa um intervalo referente ao fator de segurança (FS) e em cada pixel é atribuído um valor que pode ser classificado entre uma das seguintes categorias: < 0,8; 0,8 a 1; 1 a 1,25; 1,25 a 1,5; 1,5 a 2, e > 2. Para realizar uma análise estatística e obter melhores valores de referência, as classes FS foram agrupadas em três tipos: Instáveis (< 0,8 a 1); Média Instabilidade (1 a 1,5); e Estáveis (1,5 a >2).

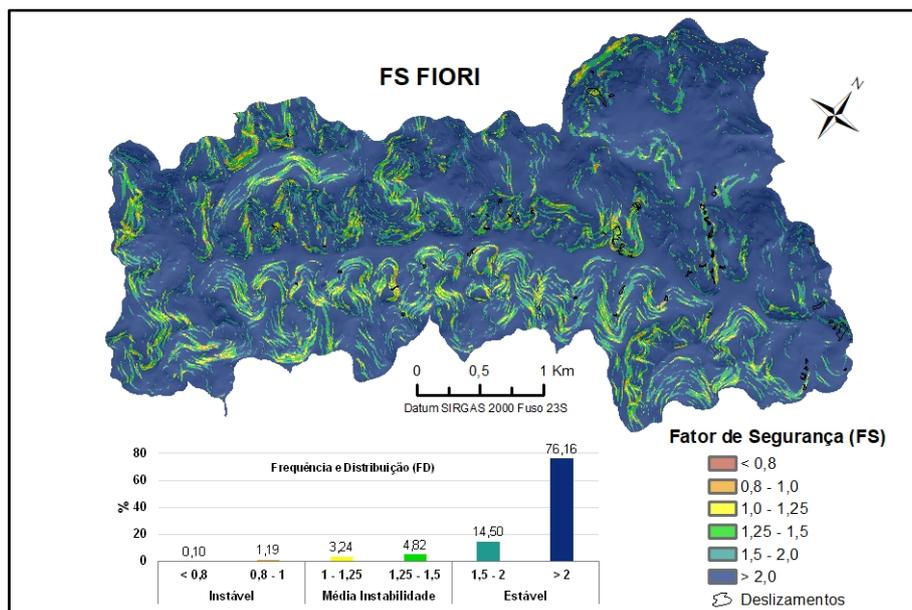
##### **4.4.1 Modelo FS FIORI**

O modelo FS FIORI está nos parâmetros de entrada associados com o uso e cobertura do solo (vegetação arbórea, pastagem e edificações), que podem influenciar a estabilidade das encostas. Dado ao grande acumulado dos eventos pluviométricos registrado anteriormente aos deslizamentos de terra, a condição inicial do modelo foi considerada como de solo saturado. No geral, os resultados do modelo FS FIORI demonstraram que a bacia do Bengalar baixa suscetibilidade natural aos deslizamentos de terra. A Frequência e Distribuição

(FD) das classes de estabilidade caracterizaram 90,7% do total da área da bacia como áreas estáveis ( $FS > 1,5$ ), 8,1% como de média instabilidade ( $1 \leq FS \leq 1,5$ ) e apenas 1,3% como áreas instáveis ( $FS \leq 1$ ) (Figura 4.6).

Os solos da região da bacia de estudo são caracterizados por altas taxas de coesão ( $10 \text{ kN/m}^2$ ) e, quando associados com as porções mapeadas com a presença de cobertura arbórea, estas taxas se somam com a coesão das raízes ( $13 \text{ kN/m}^2$ ). Somado a isso, apesar do contexto geomorfológico regional, que se caracteriza por morfologias muito dissecadas (Serra da Mantiqueira), na bacia do Bengalar há uma predominância de superfícies com declividade baixa a intermediárias, representando por 70% da área da bacia (rever Figura 4.5 B). Estes fatores (alta coesão e declividade intermediária das encostas) conjuntamente contribuem para o modelo FS FIORI responder com uma tendência de predominância de estabilidade das encostas.

Figura 4.6 – Resultados do FS simulado pelo modelo FS FIORI.



Fonte: Próprio autor.

A presença de árvores é um fator condicionante natural que contribui diretamente para o aumento da estabilização das encostas por adicionar maior força de coesão devido a raízes das árvores (coesão das raízes –  $S_r$ ), as quais se somam com a coesão do solo ( $C_s + S_r$ ). As raízes se entrelaçam com as partículas do solo e aumenta as forças de resistência ao cisalhamento e produz uma força de

tensão (T) de um material composto por fibras elásticas e flexíveis de alta resistência (FIORI, 2015; KIM et al., 2013; MICHEL, 2013; SIDLE, 1992).

#### **4.4.2 Modelo TRIGRS**

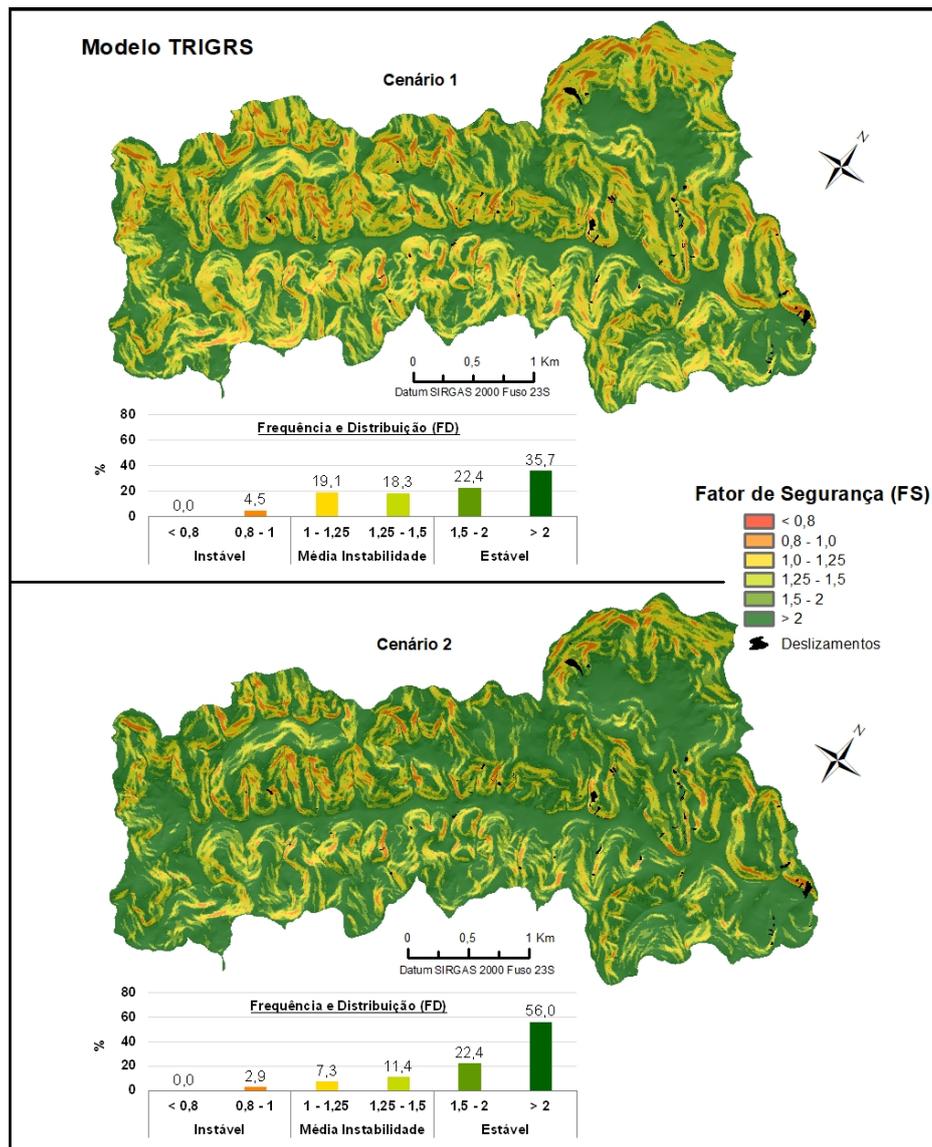
O TRIGRS é um modelo transiente em que o tempo é considerado constante nos cenários analisados. Assim, com o modelo TRIGRS, a variação do FS na bacia do Bengalar foi analisada durante chuvas com diferentes características e em de acordo com a variação do Tempo.

O mapa de suscetibilidade foi gerado pelo modelo TRIGRS para o tempo final de cada um dos dois cenários (Figura 4.7). No cenário 1 dois passos de tempo foram considerados: Tempo Inicial (ausência de chuva – 0mm) e o Tempo Final (80 mm em 15 horas). No cenário 2 os mesmos dados geotécnicos do cenário 1 foram considerados, e um passo de tempo intermediário foi acrescentado: Tempo Inicial (ausência de chuva – 0 mm), Tempo Intermediário (258 mm em 21 dias – 504 horas) e Tempo Final (80 mm em 15 horas). Aspectos relacionados ao uso e cobertura do solo não foram considerados no modelo TRIGRS, pelo fato da estrutura original do modelo não permitir a inserção destes parâmetros.

No cenário 1 do modelo TRIGRS, o índice FD para o Tempo Final das áreas classificadas como instáveis ( $FS \leq 1$ ) corresponde por 4,5% do total da bacia, as áreas de média instabilidade ( $1 \leq FS \leq 1,5$ ) correspondem por 37,4%, e as áreas estáveis ( $FS \geq 1,5$ ) correspondem por 58,1%. O índice FD para o cenário 2 (Figura 4.7) classificou apenas 2,9% da área da bacia como instável ( $FS \leq 1$ ), 18,7% como média instabilidade ( $1 \leq FS \leq 1,5$ ), e 78,4% como estável ( $FS \geq 1,5$ ).

Como observado nos resultados do modelo FS FIORI, a alta taxa de coesão do solo da bacia do Bengalar (10 kN/m<sup>2</sup>) também influenciou os resultados do modelo TRIGRS. Os dois cenários revelaram uma predominância de encostas estáveis. No entanto, é interessante notar que, ao considerar o tempo intermediário, que adicionou 258 mm de chuva em um período de 21 dias, a proporção de áreas estáveis aumentou 20% e de áreas instáveis diminuíram 2% no cenário 2 em comparação com o cenário 1.

Figura 4.7 – Resultados do FS simulado pelo modelo TRIGRS.



Fonte: Próprio autor.

A chuva leve a moderada que se caracterizou por ser bem distribuída, representou no tempo intermediário do cenário 2 uma adição de  $1,42 \times 10^{-7}$  m/s de água no solo, enquanto a condutividade hidráulica definida na condição inicial do modelo foi de  $2,9 \times 10^{-6}$  m/s, evidenciando assim um déficit hídrico de  $2,76 \times 10^{-6}$  m/s. O modelo TRIGRS interpretou estes valores como sendo uma saída de água do sistema (bacia hidrográfica) através do fluxo de base (lençol freático), deixando assim o solo mais seco ao longo dos 21 dias do que foi estabelecido na condição inicial.

A presença de água no solo tende a anular as forças de resistência aos deslizamentos de terra (coesão e atrito) e o déficit hídrico tende a aumentar essas forças. Assim, a perda de água no solo no tempo intermediário do cenário 2 resultou no aumento das taxas de sucção e, com isso, maior força de resistência. Este aumento das taxas de sucção contribuiu para que o resultado geral do modelo identificar uma maior extensão de superfícies classificadas como estáveis no cenário 2 em relação ao cenário 1.

Uma chuva de  $1,44 \times 10^{-6}$  m/s foi adicionada no tempo final dos dois cenários (80 mm em 15 horas). No entanto, no cenário 1, com o déficit hídrico no solo, a chuva foi totalmente assimilada pelo modelo, indicando assim que a chuva forte em curto espaço de tempo teve importante contribuição para a classificação das áreas como instáveis no cenário 2.

Deste modo, os resultados do modelo TRIGRS indicam que as chuvas fortes em curto espaço de tempo tendem a ter um maior impacto no FS associado aos deslizamentos das encostas da área de estudo, do que as chuvas fracas e bem distribuídas (chuva acumulada em 21 dias). Estes resultados corroboram com os estudos desenvolvidos por Guidicini e Iwasa (1976), AU (1998), Quinta Ferreira et. al. (2005) e Mendes et al. (2015) em outras regiões do Brasil, China e Portugal, que correlacionou os dados de precipitação e deslizamentos de terra e concluiu que a chuva horária ao longo do dia (chuva forte de curto prazo) desempenha um papel mais proeminente na deflagração de deslizamentos de terra do que a chuva acumulada em dias (chuva leve a moderada de longo prazo).

#### **4.4.3 Análise comparativa e validação dos modelos**

A comparação dos produtos dos modelos FS FIORI e TRIGRS revelou que os resultados foram relativamente semelhantes e, quando comparados, os índices de estabilidade foram coerentes de acordo com as características de cada modelo, mesmo considerando as diferentes características do modelo e dados de entrada para o cálculo do FS das encostas.

Em geral, os resultados do modelo FS FIORI indicaram um menor grau de suscetibilidade para a bacia do Bengalar do que os resultados do modelo

TRIGRS (Tabela 4.4). Na bacia do Bengalar, 34,5% (4,1 km<sup>2</sup>) da área é coberta por vegetação arbórea. Com isso, a adição de taxas de coesão radicular (Sr) e reforço radicular (T) contribuíram para reduzir a proporção de áreas em condições instáveis. Assim, os resultados do modelo FS FIORI corroboraram com a literatura anteriormente citada que afirma que a vegetação arbórea promove aumento da resistência ao cisalhamento (CHIARADIA et al., 2016; CISLAGHI et al., 2018; DIETRICH et al., 2007; FIORI, 2015; KIM et al., 2013; Michel, 2013; SIDLE, 1992). No que se refere às áreas edificadas, por ocuparem uma pequena área espacial da bacia do Bengalar (2,7% - 0,3 km<sup>2</sup>), a tendência de sobrecarga das edificações influenciar para redução do FS e alteração do índice FD, foi minimamente detectada pelo Modelo FS FIORI.

Tabela 4.4 – Frequência e Distribuição (FD) das classes e dos grupos de classes do FS dos modelos FS FIORI e TRIGRS.

FS	Grupos FS	FS FIORI %		TRIGRS %			
				Cenário 1		Cenário 2	
< 0,8	Instável	0,1	1,3	0,0	4,5	0,0	2,9
0,8 - 1		1,2		4,5		2,9	
1 - 1,25	Média Instabilidade	3,2	8,1	19,1	37,5	7,3	18,7
1,25 - 1,5		4,8		18,3		11,4	
1,5 - 2	Estável	14,5	90,7	22,4	58,1	22,4	78,4
> 2		76,2		35,7		56,0	

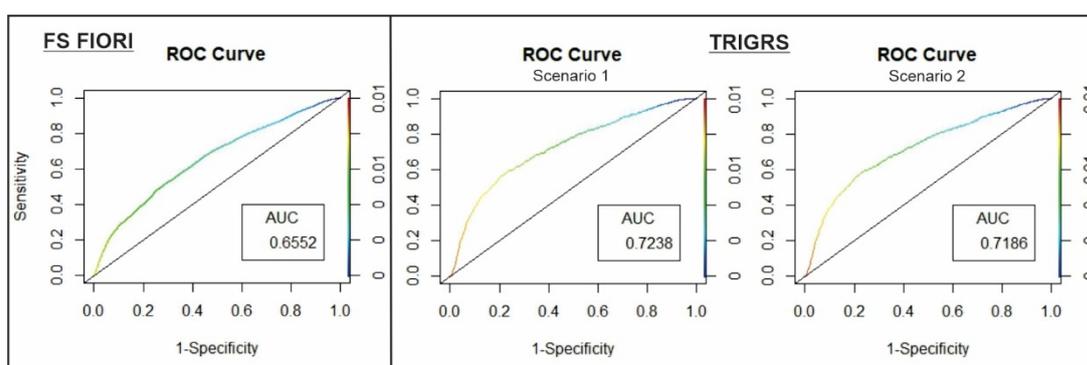
Fonte: Próprio autor.

A validação foi realizada comparando os mapas de susceptibilidade dos dois modelos com os 65 deslizamentos de terra (cicatrices) identificados, através de sobreposição. O grau de acurácia dos resultados dos modelos foi verificado através da análise da curva ROC, que é um método utilizado para avaliar a qualidade dos classificadores do modelo de suscetibilidade a escorregamentos (BRITO et al., 2017; CISLAGHI et al., 2018; HASEKIOĞULLARI; ERCANOGLU, 2012). A área sob a curva, ou seja, a AUC da curva ROC, foi usada como uma métrica para avaliar a capacidade geral dos modelos preverem a ocorrência de deslizamentos de terra. De acordo com Fawcett (2006) e Aditian et al. (2018), um modelo bem calibrado deve ter um valor de AUC entre 0,5 e 1, em que quanto mais próximo a 0,5 indica imprecisão no modelo (ajuste aleatório). Cislighi et al. (2018) consideram que um valor de AUC próximo a 1 indica um ajuste perfeito,

um valor próximo a 0,5 indica um modelo impreciso, um valor 0,7 indica um modelo aceitável e um valor  $> 0,8$  indica um modelo excelente.

Os mapas de suscetibilidade a deslizamentos de terra da bacia do Bengalar, que correspondem aos resultados do modelo FS FIORI e dos cenários 1 e 2 do modelo TRIGRS, obtiveram os seguintes valores de AUC, respectivamente: 0,6552; 0,7238 e 0,7186 (Figura 4.8). As curvas ROC apresentaram bom desempenho do modelo, com valores considerados aceitáveis.

Figura 4.8 – Curvas ROC dos resultados de suscetibilidade aos deslizamentos de terra dos modelos FS FIORI e TRIGRS.



Fonte: Próprio autor.

O modelo TRIGRS obteve os maiores valores de AUC, apesar de possuir um número menor de variáveis que o modelo FS FIORI (ausência de parâmetros associados ao uso e cobertura do solo). Isso indica que os modelos transientes são mais eficientes do que os modelos estáticos. Os modelos transientes, especificamente o TRIGRS, consideram alguns importantes fatores deflagradores de deslizamentos, como as variações e intensidade de chuva e fatores associados: infiltração e condutividade hidráulica do solo. A dinâmica dos modelos transientes considera um balanço hídrico que influencia as taxas de sucção do solo, estimando melhor os fatores naturais que condicionam as instabilidades das encostas.

Porém, apesar de obter um valor de AUC ligeiramente inferior, por ser um simplificado e estático, o modelo FS FIORI se destaca por demonstrar boa eficiência quando aplicado a estudos de modelagem de estabilidade de encostas. Os valores de validação foram próximos aos valores do TRIGRS, que é um modelo robusto e bem difundido em estudos de modelagem de taludes.

No entanto, esses valores de AUC estão um pouco abaixo das expectativas de um desempenho excelente do modelo ( $AUC > 0,8$ ). Os resultados dos modelos são muito sensíveis aos valores de coesão, profundidade do solo e lençol freático (condições iniciais) e estão sujeitos a limitações impostas por simplificações e suposições. Os dados de entrada foram adquiridos por medição indireta, e os parâmetros foram definidos com base em dados secundários (MENDES; VALÉRIO FILHO, 2015; MENDES et al., 2017a; e MENDES et al., 2017b) e observações de campo (profundidade do solo).

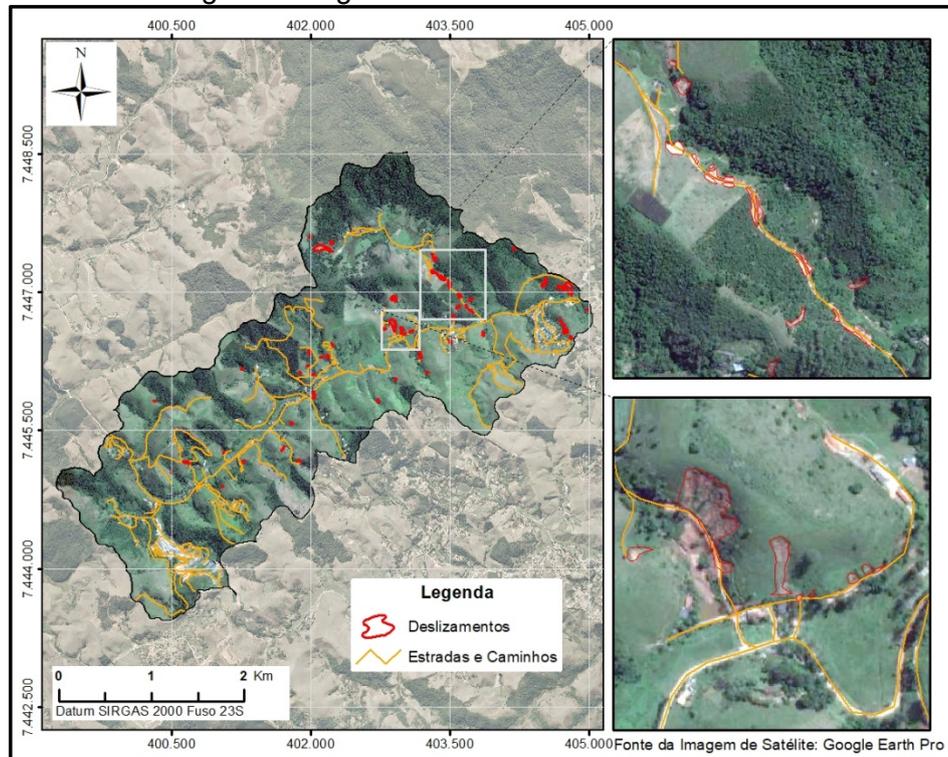
Além das estimativas e simplificações dos dados de entrada, os valores da AUC indicam, em geral, que os 65 deslizamentos mapeados na bacia do Bengalar não foram predominantemente gerados por causas naturais. Algumas nuances nas condições antrópicas que causaram os deslizamentos não foram possíveis de serem consideradas nos modelos. Uma análise da posição das cicatrizes indica que 38 dos 65 pontos afetados por deslizamentos, que correspondem a 58,4% das cicatrizes mapeadas, estão diretamente associados a estradas (Figura 4.9), onde a presença de cortes verticais é bastante comum.

O modelo FS FIORI buscou abordar questões antrópicas e considerou algumas variáveis, como: áreas construídas, pastagens e ausência de vegetação arbórea. No entanto, a base de dados topográficos (MDE) é de 1977 e não contempla de forma satisfatória as nuances da topografia recente da bacia de estudo, como taludes de corte em estradas e outras características, como depósitos de aterro. Essas características são fatores determinantes nos processos de deslizamento, mas não puderam ser incluídas nos modelos como dados de entrada, e esse fato pode ter contribuído para que os resultados do índice AUC fossem abaixo de excelente ( $AUC < 0,8$ ).

A topografia influenciou diretamente nos resultados da equação FS no modelo FS FIORI. Nesse modelo, variáveis como solo, sobrecarga de árvores e edificações e a força do vento sobre as árvores foram calculadas de acordo com os ângulos de inclinação. Superfícies remodeladas por ações antrópicas, como taludes de corte e até mesmo depósitos de aterros, devem ser consideradas no MDE das áreas de estudo. Essas superfícies podem alterar as características

morfológicas e declividade original das encostas e, conseqüentemente, a infiltração e drenagem das águas pluviais.

Figura 4.9 – Associação dos deslizamentos de terra com as estradas presentes na bacia do Córrego do Bengalar.



Fonte: Próprio autor.

Uma análise conjunta dos resultados dos modelos FS FIORI e TRIGRS indicou que na noite de 7 para 8 de março de 2016, na bacia do Córrego Bengalar, uma precipitação acumulada de 258 mm em 21 dias associada a uma precipitação intensa de curto prazo no último dia de 80 mm ao longo de 15,5 horas, juntamente com ações antrópicas inadequadas relacionadas aos taludes de cortes em estradas (Figura 4.10), desencadearam 65 deslizamentos de terra, a maioria dos quais pode ser considerada induzida (58,4%).

Os resultados desta pesquisa demonstram um avanço nos estudos de modelagem de estabilidade de encostas. O desenvolvimento e a aplicação do modelo FS FIORI expandiram as variáveis usadas para calcular a estabilidade de taludes por incluir alguns fatores condicionantes associados ao uso e cobertura da terra (fatores antrópicos e da vegetação arbórea). O modelo TRIGRS bem estabelecido nos estudos de modelagem de taludes permitiu

avaliar a influência da precipitação no FS das encostas e os seus resultados de validação contribuíram para validar o modelo FS FIORI.

Figura 4.10 – Deslizamentos de terra induzidos por taludes de cortes em estradas na bacia do Bengalar. Setas vermelhas indicam as cicatrizes de deslizamentos de taludes.



Fonte: Próprio autor.

A análise dos resultados dos modelos FS FIORI e TRIGRS também revelou a importância de continuar a pesquisar e desenvolver métodos que expandam ainda mais o número e a diversidade dos parâmetros de entrada nos modelos. Além de estudos gerais de estabilidade de taludes (características geotécnicas, topográficas e hidrológicas), modelos robustos devem ser desenvolvidos para incluir dados de uso e cobertura do solo e que ao mesmo tempo sejam transientes para permitir a inserção de dados precipitação ao longo do tempo. No geral, os resultados deste estudo estabelecem as bases para desenvolver um modelo de estabilidade de taludes ainda mais completo que possibilite a integração das características do modelo FS FIORI e TRIGRS.

#### **4.5 Considerações finais**

A análise comparativa dos resultados obtidos com os modelos FS FIORI e TRIGRS revelou semelhanças e indicou coerência em seus índices de estabilidade de encostas, que podem ser considerados geralmente satisfatórios.

Os índices FD em ambos os modelos indicaram um predomínio da estabilidade das encostas e sugeriram que os 65 deslizamentos na bacia do riacho Bengalar foram deflagrados na noite de 7 de março de 2016 por uma combinação de

fatores: chuva acumulada; chuvas intensas de curto prazo; e encostas íngremes marcadas por ações antrópicas inadequadas relacionadas aos taludes de corte em estradas.

O grau de acurácia dos resultados dos modelos foi verificado por meio da análise da curva ROC, que indicaram um bom desempenho, com valores considerados aceitáveis. O modelo TRIGRS demonstrou melhor eficiência, conforme indicado pelos maiores valores de AUC, indicando que os modelos transientes são mais eficientes do que os modelos estáticos.

Os resultados deste estudo demonstram um avanço nos estudos de modelagem de estabilidade de taludes. O desenvolvimento e a aplicação do modelo FS FIORI permitiram uma expansão das variáveis usadas para abordar os cálculos de estabilidade de taludes, incluindo fatores condicionantes associados ao uso e cobertura do solo. O modelo TRIGRS foi capaz de avaliar a influência da precipitação no FS das encostas.

Assim, os resultados dos modelos têm potencial para aumentar a capacidade de monitoramento e alerta de movimentos de massa, podendo contribuir para os trabalhos realizados pelo poder público, como o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais do Brasil (Cemaden).

No entanto, este estudo também demonstra apesar a evolução do método de previsão, a necessidade e a viabilidade de desenvolver um modelo de estabilidade de taludes mais robusto que integre características geotécnicas, topográficas e hidrológicas, que são comuns em modelos de base física, e inclui variáveis associadas ao uso e cobertura do solo e à precipitação acumulada ao longo do tempo. Ou seja, o desenvolvimento de um modelo que integre as características do modelo FS FIORI e do TRIGRS.

## **5 IMPACTO DOS CONDICIONANTES ANTRÓPICOS NO FATOR DE SEGURANÇA (FS) DE DUAS ENCOSTAS NA BACIA DO CÓRREGO RANCHO ALEGRE, SÃO JOSÉ DOS CAMPOS, SP**

### **5.1 Introdução**

As ações antrópicas, principalmente aquelas relacionadas com a ausência de manutenção de infraestrutura urbana (redes de água tratada, rede de esgoto, sistema de drenagem urbana), interferem na estabilidade das encostas e favorecem o desencadeamento dos processos de deslizamentos de terra. Contudo, os estudos técnicos que quantificam o nível de intervenção antrópica em um talude, através do cálculo do fator de segurança (FS), estão, em sua maioria, direcionados às obras de engenharias (construção civil e mineração), visando uma intervenção controlada da encosta (intervenções estruturantes) e seguindo normas técnicas e leis de uso e ocupação do solo.

A análise da estabilidade de taludes, principalmente aqueles alterados pela ação antrópica combinada (cortes, aterros, fossas, vazamentos em tubulações, lançamentos de águas servidas, sobrecargas nos terrenos), pode encontrar na modelagem numérica limiares críticos de chuvas mais adequados, sobretudo quando acoplada a resultados de análise de fluxo transiente em solo não saturado. O avanço decorrente desse conhecimento tem potencial de contribuir para envio de alertas para processos de deslizamentos em encostas urbanas mais assertivos, considerando os condicionantes naturais e antrópicos, e com isso podem auxiliar na operacionalidade de instituições como o Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Cemaden) e, também, para o desenvolvimento do Plano Preventivo de Defesa Civil (PPDC) que envolve ações de monitoramento dos índices pluviométricos e de áreas de riscos associados a escorregamentos (MACEDO et al., 1999, 2006; MACEDO et al., 2002; MENDES et al., 2015).

O software da GEO-SLOPE é um modelo probabilístico e determinístico que trabalha conjuntamente as análises de fluxo das águas subterrâneas e de estabilidade de taludes (GEO-SLOPE, 2015). Assim, o módulo SEEP/W analisa os processos de infiltração adotando uma solução numérica com base na

equação de Darcy (Lei de Darcy) em condições de fluxo saturados e não saturados, descrevendo a poro-pressão de água e os padrões de movimento em meio poroso. Em seguida, o módulo SLOPE/W, um modelo de análise de estabilidade de taludes, utiliza os resultados da análise de fluxo (modelo hidrológico - SEEP/W) e permite o uso de diferentes métodos (Fellenius, Bishop, Janbu, Spencer, Morgenstern-Price, Corps of Engineers), para calcular o FS ao longo do tempo, ou seja, em modo transiente (MENDES et al., 2017a).

A aplicação do software GEO-SLOPE para a avaliação de encostas naturais e artificiais para analisar a possibilidade de deflagração de processos como deslizamentos translacionais, rotacionais, corridas de lama, corridas de detritos e rastejos, tem sido adotado em estudos conduzidos na Europa (CAMERA et al., 2014; CASAGLI et al., 2006; CASCINI et al., 2015; NOCENTINI et al., 2015; PAGANO et al., 2010), na Ásia (HUANG et al., 2015; LI et al., 2015), na América do Sul (DYKES; WELFORD, 2007) e no Brasil (MENDES et al., 2017a; MENDES et al., 2017b; PRIETO 2018), ressaltando-se, nestes últimos trabalhos, que os fatores antrópicos se destacam como condicionantes para a instabilização das encostas e a deflagração de deslizamentos de terra em ambientes urbanos e periurbanos com habitações de baixo padrão construtivo.

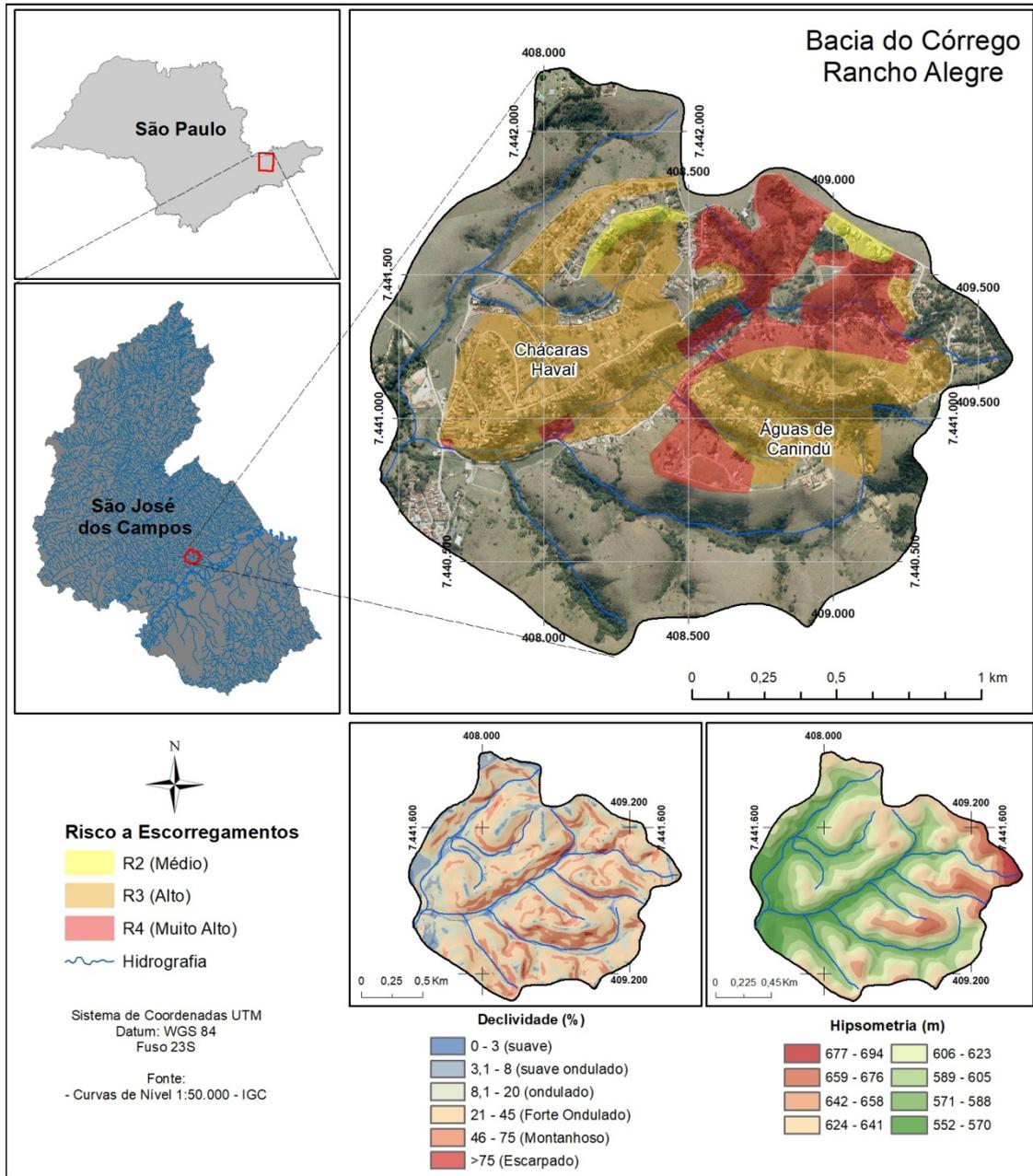
Neste escopo, visando ampliar o conhecimento do impacto das intervenções antrópicas na estabilidade das encostas, essa pesquisa objetiva avaliar o quanto as atividades antrópicas, nas suas mais variadas formas, podem alterar o FS e contribuir para a instabilização das encostas. Para isso, foi utilizado o modelo GEO-SLOPE para o estudo da estabilidade em escala de detalhe (escala de vertente) e em modo bidimensional, de duas seções transversais (encostas) da bacia do Córrego Rancho Alegre, localizada na Região Norte do município de São José dos Campos, SP. Esta bacia se caracteriza pela presença de áreas de risco Alto e Muito Alto (R3 e R4) aos movimentos de massa (IPPLAN, 2018).

## **5.2 Área de estudo**

O Córrego Rancho Alegre, que corresponde a uma pequena bacia hidrográfica com uma área de 2,86 km<sup>2</sup>, drena suas águas no sentido sudoeste e deságua no Rio Buquira, afluente do Rio Paraíba do Sul, caracterizando-se por uma

amplitude topográfica de 142 metros, variando a altimetria entre 552 e 694 metros em relação ao nível do mar (Figura 5.1).

Figura 5.1 – Localização, declividade e hipsometria da bacia do Córrego Rancho Alegre e dos bairros Chácara do Havaí e Águas de Canindú.



Fonte: Próprio autor.

Geomorfologicamente, a bacia está situada em região pré-montanhosa, em referência a Serra da Mantiqueira, e se caracteriza por superfícies onduladas a fortemente onduladas de morros alongados/arredondados sustentados por

rochas cristalinas do tipo migmatitos do Complexo Embu, e recobertas predominantemente por Argissolos.

O solo é classificado como Latossolo associado com Cambissolo (EMBRAPA, 2013) com um horizonte superficial marcado por solo residual com matéria orgânica, um horizonte intermediário latossólico (textura argilo-siltosa), e um horizonte subsuperficial marcado por característica saprolítica (textura areno-siltosa), expondo rocha alterada mole (MENDES et al., 2017a). A variação da espessura dos horizontes de solo está diretamente relacionada com a posição do perfil de solo na encosta e com a característica morfológica. As maiores profundidades se localizam nas regiões de topo e as menores nas porções da base da encosta.

O município de São José dos Campos – SP é caracterizado por um clima oceânico, com estação seca (Cf) e um verão com temperaturas temperadas (Cfb) nas porções mais elevadas topograficamente da Região Norte, associado a Serra da Mantiqueira, e quente (Cfa) nas porções mais rebaixadas, próximas às planícies do Rio Paraíba do Sul e a área urbana (ALVARES et al., 2013). A precipitação média anual é de 1437 mm; no entanto, dados de diferentes estações distribuídas espacialmente na cidade demonstram significativa compartimentação da média anual de precipitação entre a porção sul e a porção norte do município, com valores iguais a 1309 e 1912 mm, respectivamente. Nas porções intermediárias, onde se concentram os deslizamentos de encostas e localiza-se a bacia do Córrego Rancho Alegre, a média anual é de 1592 mm (MENDES et al., 2017b).

No que tange ao uso e ocupação do solo, a bacia do Córrego Rancho Alegre é marcada pela presença dos bairros Chácaras Havaí e Águas de Canindú, correspondentes a núcleos de expansão habitacional a norte da mancha urbana original de São José dos Campos, os quais são caracterizados por terrenos altamente suscetíveis aos escorregamentos e predominantemente ocupados por pastagens, com algumas manchas de cobertura arbórea remanescente e com habitações esparsas, porém concentradas em alguns pontos da bacia.

Na bacia do Rancho Alegre é comum a existência de encostas íngremes desflorestadas e com a presença de habitações no topo, sopé e meia encosta, demonstrando não existir uma regularização urbana que defina os limites de cada propriedade, fazendo com que algumas casas estejam bem próximas umas das outras formando degraus e aumentando a sobrecarga na encosta (Figura 5.2A). É comum também, associado a essas habitações, a presença de cortes de talude (Figura 5.2B) e aterros (Figura 5.2C), de caixas d'água para abastecimento no topo dos taludes (Figuras 5.2D e 5.2E) e de tubulações utilizadas para abastecimento e saneamento expostas na superfície das encostas (Figura 5.2F) e não é raro que haja vazamentos. Todos esses fatores são fortes indutores aos deslizamentos de terra, principalmente quando associados à alta suscetibilidade natural; portanto, é importante que sejam considerados nos métodos de previsão e estudo de estabilidade de encostas.

Mendes et al. (2015) com base nos dados cadastrados pela operação do PPDC da defesa civil de São José dos Campos, no período de 2009 a 2013, identificaram 49 escorregamentos planares rasos induzidos na bacia de estudo, sendo 35 no bairro Águas de Canindú e 14 no Chácaras do Havaí. Os autores identificaram um rápido adensamento urbano entre os anos de 2009 e 2012 e fatores indutores instalados em moradias pré-existentes, como execução de taludes de corte e aterro para ampliação de moradias, podem ter se associado a precipitações, o que possibilitou a deflagração dos deslizamentos de terra na bacia de estudo.

De acordo com o Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR), estes bairros se destacam pela combinação de ocupações precárias em terrenos com alta declividade e, com isso, contam com aproximadamente 532 moradias em setores de risco Médio (R2), Alto (R3) e Muito Alto (R4) (IPPLAN, 2018; VALÉRIO FILHO et al., 2014).

Figura 5.2 – Aspectos do uso e ocupação (antropização) dos bairros Chácaras do Havaí e Águas de Canindú observados em trabalhos de campo.



**A:** Casas sobrepostas umas às outras em encosta de declividade alta. **B:** Cortes em taludes. **C:** Aterros. **D:** Caixas D'água no topo de taludes em cortes. **E:** Tubulação exposta usada para abastecer uma caixa d'água em talude de corte. **F:** Tubulação exposta com potencial de vazamento. Setas em azul apontam as caixas d'água. Setas em amarelo, as tubulações expostas.

Fonte: Próprio Autor.

### 5.3 Materiais e métodos

#### 5.3.1 Aplicação do modelo GEO-SLOPE

A partir do mapeamento das áreas de risco aos deslizamentos dos bairros Havaí e Águas de Canindú foram selecionadas duas seções transversais de encostas

localizadas em áreas mapeadas com risco muito alto (R4) aos escorregamentos de terra. A estabilidade das encostas foi analisada através do modelo GEO-SLOPE com o objetivo de entender melhor como os condicionantes antrópicos (cortes, aterros, sobrecarga, retirada de árvores e vazamento) em associação com os limiares críticos de chuva da região influenciam o FS das encostas selecionadas para o estudo.

O modelo GEO-SLOPE permitiu viabilizar o estudo de estabilidade das encostas em escala de vertente e foi integrado com a análise de fluxo de água no interior dos solos por meio dos programas SLOPE/W e SEEP/W do pacote GEOSTUDIO (GEO-SLOPE, 2015).

O programa SEEP/W (modelo hidrológico) foi utilizado para modelar o movimento e a distribuição de pressão da água dentro de materiais porosos tais como solo e aterros. Através da análise de fluxo transiente foi possível obter a distribuição de poropressão de água (positivo e negativo) no interior das duas encostas estudadas.

O módulo SLOPE/W (modelo de estabilidade) possibilitou a importação da distribuição de poro-pressão de águas atuantes nas duas encostas, utilizando-o para analisar a influência da variação da poropressão (sucção matricial do solo) na resistência ao cisalhamento do solo e, conseqüentemente, no FS. Os resultados obtidos com o programa SEEP/W foram importados ao SLOPE/W, possibilitando uma integração do modelo de estabilidade de encosta com o modelo hidrológico.

Toda a análise de estabilidade foi conduzida considerando a teoria geral do equilíbrio limite de forças e momento, e desenvolvida em plano bidimensional. O programa SLOPE/W utilizou o método das fatias que delimita a superfície de ruptura na região do material superficial e, com base no trabalho de Spencer (1967), considerou-se duas equações para calcular o FS das fatias: a Equação 5.1 calculou o FS em relação ao equilíbrio de momento ( $F_m$  – movimento rotacional), enquanto a Equação 5.2 forneceu o FS em relação ao equilíbrio de força horizontal ( $F_f$  – movimento planar). Para calcular as forças de cisalhamento

entre fatias e com base no limite geral de equilíbrio, o módulo utilizou a equação 5.3, proposta por Morgenstern e Price (1965) (GEO-SLOPE, 2015).

$$F_m = \frac{\sum (c' \beta R + (N - u \beta) R \tan \phi')}{\sum W x - \sum N f \pm \sum D d} \quad (5.1)$$

$$F_f = \frac{\sum (c' \beta \cos \alpha + (N - u \beta) \tan \phi' \cos \alpha)}{\sum N \sin \alpha - \sum D \cos \omega} \quad (5.2)$$

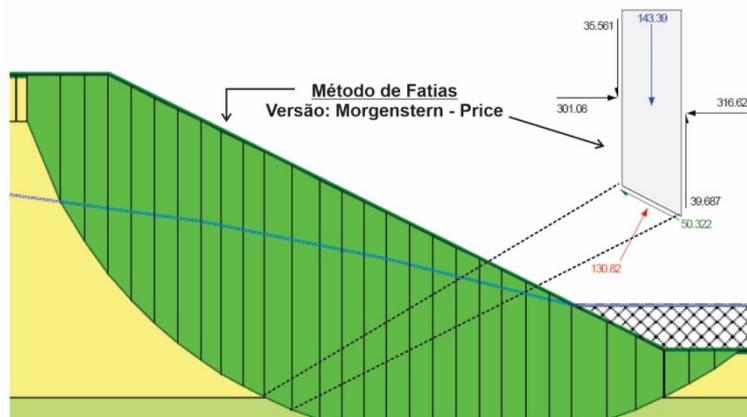
Em que  $c'$  é a coesão efetiva do solo,  $\phi'$  é ângulo de atrito efetivo do solo,  $u$  é poro-pressão de água,  $N$  é a força normal da base das fatias,  $W$  é o peso da fatia,  $D$  é o ponto de concentração de carga,  $\beta$ ;  $R$ ;  $x$ ;  $f$ ;  $d$ ;  $\omega$  são os parâmetros geométricos,  $\alpha$  é inclinação da base da fatia.

$$X = E \lambda f(x) \quad (5.3)$$

Em que  $f(x)$  é uma função,  $\lambda$  é a porcentagem (em forma decimal) da função usada,  $E$  é a força normal entre fatias e  $X$  é a força de cisalhamento entre fatias.

Para o presente trabalho, o FS foi calculado usando os parâmetros de coesão efetiva ( $c$ ) e ângulo de atrito interno do solo, utilizando a versão Morgenstern-Price do método de fatias (Figura 5.3), o qual considerou tanto as superfícies de ruptura circular e não circular, ou seja, podendo ser aplicado em qualquer forma de superfície de ruptura (MENDES et al., 2017a; PRIETO, 2018).

Figura 5.3 - Plano bidimensional de uma encosta hipotética apresentando superfície de ruptura (em verde), fatias e forças atuantes em cada porção das fatias (em cinza) de acordo com o método Morgenstern-Price.

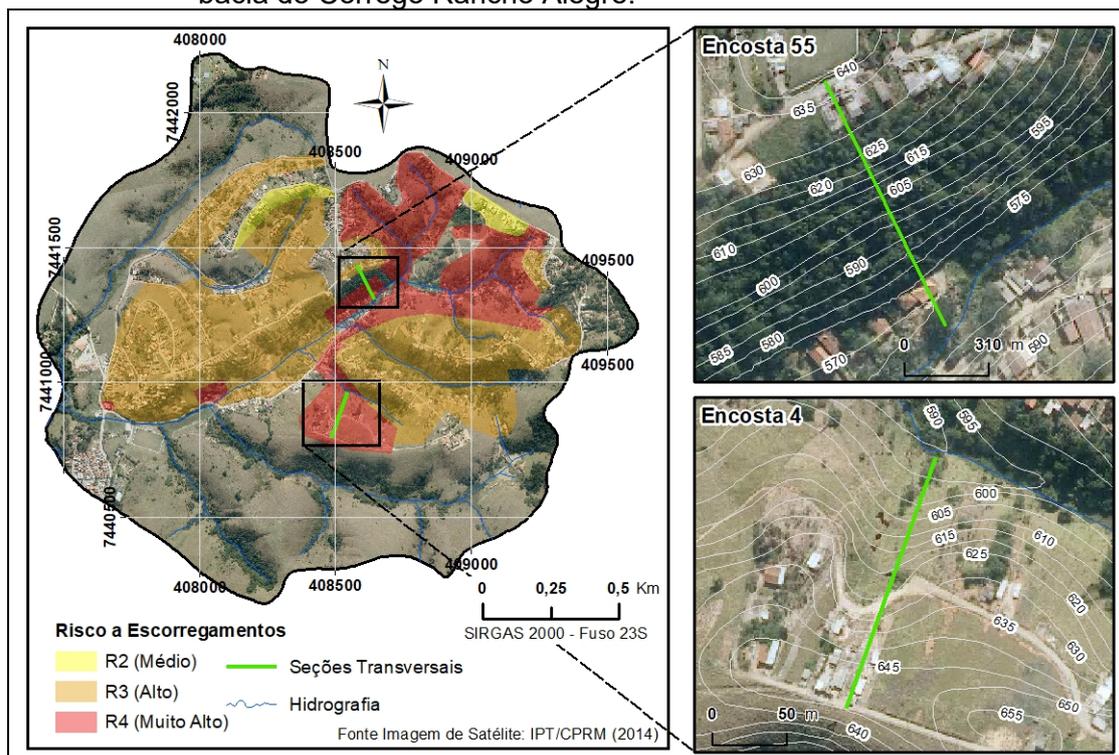


Adaptado de GEO-SLOPE (2015).

### 5.3.2 Definição das seções transversais

Foram definidas duas seções transversais em áreas de maior instabilidade, as encostas 4 e 55 (denominadas de acordo com o número dos pontos de campo) utilizando-se como referência as áreas de risco de nível muito alto (R4) aos escorregamentos (IPPLAN, 2018) (Figura 5.4). A topografia das seções transversais dos cenários considerados como encostas naturais foi estabelecida com base no MDE da bacia elaborado a partir das curvas de nível com espaçamento de 5 metros da base topográfica em escala 1:10.000 adquirida pelo aerolevanteamento da empresa TERRAFOTO/S.A no ano de 1977 e disponibilizada pelo Plano Cartográfico do Estado de São Paulo. Esta topografia foi levantada antes do processo de urbanização da bacia estudada.

Figura 5.4 – Localização das seções transversais das encostas 4 e 55 estudadas na bacia do Córrego Rancho Alegre.



Fonte: Próprio Autor.

Para os cenários implementados no modelo em que consideram as encostas impactadas por fatores antrópicos, os desenhos topográficos das seções transversais foram definidos com base na integração das características da topografia original com as características antrópicos observadas e interpretadas *in loco*. Elementos antrópicos como cortes de talude, aterros, desmatamento,

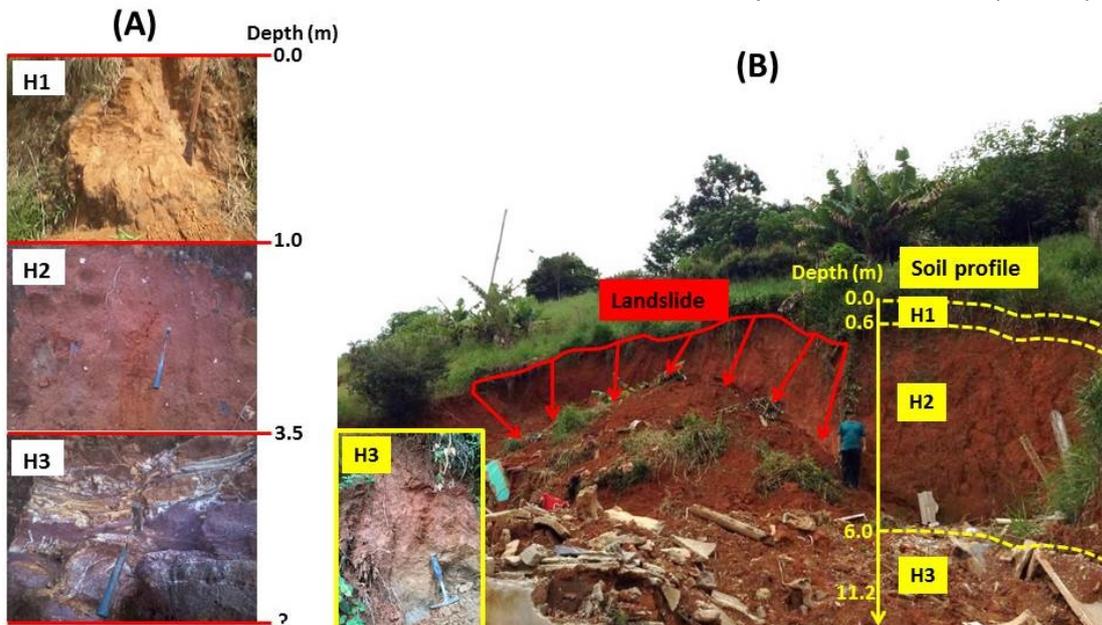
arruamentos, edificações, presença de caixas d'água sobre taludes de corte e tubulações com vazamentos foram observados em trabalhos de campos e a identificação e medição para serem projetados na plataforma do GEO-SLOPE foram auxiliados por meio do *software* ArcGis, utilizando técnicas de fotointerpretação com uso de ortofotos de São José dos Campos – SP, disponibilizadas pelo mapeamento de suscetibilidade (IPT; CPRM, 2014).

### 5.3.3 Parâmetros de entrada do modelo

#### 5.3.3.1 Características geotécnicas

A caracterização das propriedades geológicas, geotécnicas e geomorfológicas da bacia do Córrego Rancho Alegre são similares àquelas encontradas no perfil de solo de São José dos Campos estudado por Mendes e Valério Filho (2015), Mendes et al. (2017a), e Mendes et al. (2017b). Desta forma, optou-se por considerar os mesmos parâmetros geotécnicos obtidos por estes trabalhos para os perfis de solo das encostas 4 e 55. Na Figura 5.5 é possível observar o perfil pedológico de um deslizamento ocorrido no bairro Freitas, próximo a bacia do Córrego Rancho Alegre e estudado por Mendes et al. (2017a), o qual se assemelha com as características pedológicas definidas no presente estudo.

Figura 5.5 – (A) Perfil de solo localizado em São José dos Campos e estudado por Mendes e Valério Filho (2015); (B) Perfil de solo representativo do deslizamento no Bairro Freitas e estudado por Mendes et al. (2017a).



Fonte: Mendes et al. (2017a).

As amostragens de solos para esses estudos incluíram amostras deformadas e indeformadas e realizaram os seguintes testes: textura do solo; peso específico do solo; peso específico do grão; limites de Atterberg (plasticidade e limites de liquidez). No que se referem aos aterros, os parâmetros foram adquiridos com base nos estudos de Ahrendt (2005) e de Prieto (2018), realizados no município de Campos de Jordão, também no mesmo contexto geológico/geomorfológico e padrões de uso e ocupação semelhantes. Os parâmetros dos materiais superficiais, juntamente com a profundidade das amostras de solo e o tipo de material, são apresentados na Tabela 5.1, enquanto que as curvas de retenção e a função da condutividade hidráulica dos solos e aterros são apresentadas nas figuras 5.6 e 5.7, respectivamente. A função condutividade hidráulica foi estimada por meio das curvas de retenção utilizando a equação proposta por Van Genuchten (1980).

Tabela 5.1 - Parâmetros geotécnicos de entrada do modelo GEO-SLOPE.

Camadas de Solo	Profundidade das Amostras (m)	Tamanho dos Grãos %			Tipo de Material
		Areia	Silte	Argila	
H1	0,5	56	18	27	Silte Areia
H2	3	36	8	57	Silte Argila
H3	6,5	57	34	9	Silte Areia
Aterro	*	48	52	0	Silte Areia

Camadas de Solo	Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	Coesão Efetiva (kPa)	Coesão das raízes (kPa)	Ângulo de Atrito (°)	Condutividade Hidráulica (m/dia)
H1	17	10	0	33	0,25
H2	18	15	13	35	0,10
H3	19	21	13	37	1,13
Aterro	14,9	9,8	0	28,9	11,9

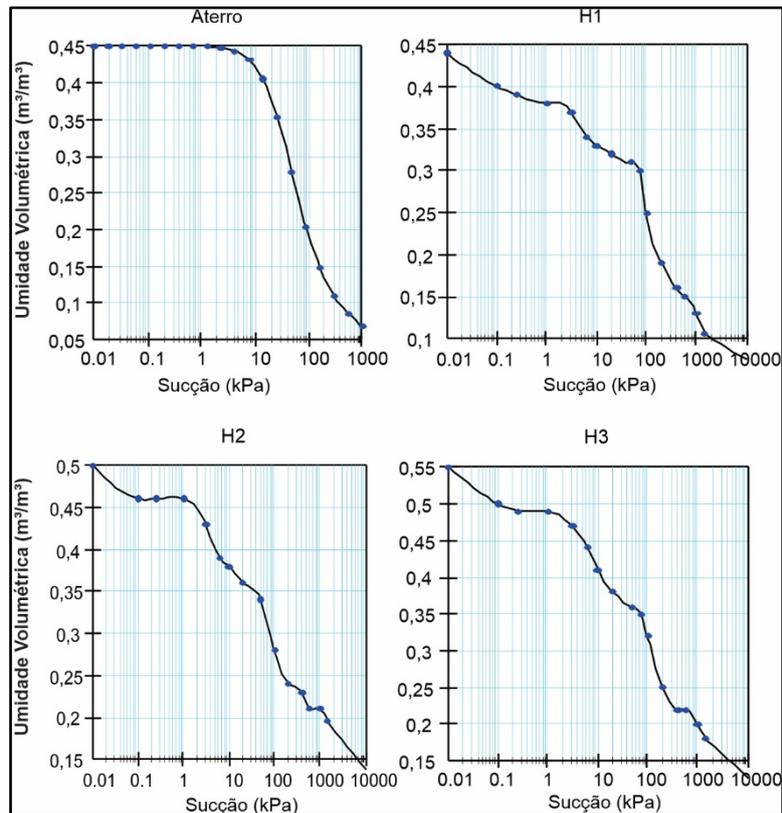
\* Aterro encontrado em um ponto específico da encosta 4 no topo da camada H1.

Fonte: Próprio Autor.

A espessura das camadas de solo utilizada no modelo GEO-SLOPE foi definida com base nos valores das profundidades dos solos amostrados pelos estudos citados e também com base em observações de campo. Com isso, definiu-se para as encostas 4 e 55 as seguintes camadas de solo: Camada H1 – solo superficial resultante da pedogênese com espessura da ordem de 1,0 m; Camada H2 – solo residual maduro (perdeu toda a estrutura da rocha matriz, tornando-se relativamente homogêneo) com espessura da ordem de 3,0 m e

Camada H3 – solo saprolítico (resultante de alteração do embasamento rochoso e que manteve a estrutura original rocha matriz) com espessura maior que 3,0 m.

Figura 5.6 – Curvas de retenção dos horizontes de solo.

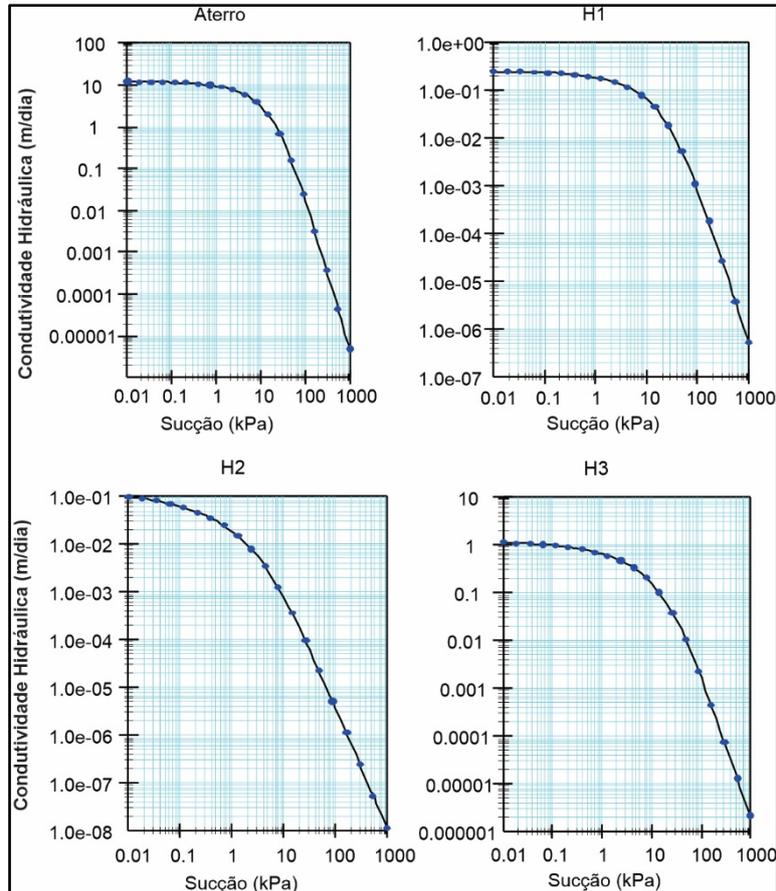


Fonte: Próprio Autor.

Os dados referentes às áreas recobertas por vegetação arbórea, no que tange a coesão das raízes ( $13 \text{ kN/m}^2$ ) e a sobrecarga das árvores ( $5 \text{ kN/m}^2$ ), foram estabelecidos com base nos estudos desenvolvidos por Michel (2013), Fiori (2015), Mafra et al. (2019) e Ávila et al. (2020). Fiori (2015) afirma que as raízes de pequenos arbustos até as de árvores de maior porte reforçam os solos entre 0,75 a 3 metros de profundidade, podendo atingir maiores profundidades em solos mais desenvolvidos e com árvores de maior porte. Deste modo, foi estabelecido que nos cenários dos modelos que as encostas estavam recobertas por vegetação arbórea nativa (floresta estacional semidecidual), mesmo que remanescente, a adição da coesão das raízes se deu a partir da camada de solo H2 (profundidade  $\geq$  a 1 metro), estando a camada H1 ausente de coesão das raízes em todos os cenários. Importante destacar que quando o cenário de

avaliação se reporta a encostas antropizadas, as porções que se encontram sem vegetação arbórea, a coesão das raízes deve ser retirada dos parâmetros de entrada, juntamente com a sobrecarga das árvores.

Figura 5.7 – Função condutividade hidráulica obtida a partir das curvas de retenção das camadas de solo e aterro.



Fonte: Próprio Autor.

No que se refere ao valor de sobrecarga adicionada ao modelo nas porções edificadas, este foi definido com base nos valores das cargas verticais estabelecidas pela NBR 6120 – Cargas para o cálculo de estruturas de edificações (ABNT, 1980), que define para edifícios residenciais uma carga mínima de 3,5 kN/m<sup>2</sup>, sendo utilizado o valor arredondado de 4 kN/m<sup>2</sup>. Deste modo, nas superfícies que foram identificadas com a presença de edificações, foi adicionado no modelo uma sobrecarga de 4kN/m<sup>2</sup>.

### 5.3.3.2 Caracterização hidrológica

Os dados pluviométricos foram adquiridos a partir de registros da estação Chácaras da Boa Vista que integra a rede de monitoramento ambiental do Cemaden (Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais) e se encontra a 6 km de distância dos bairros Chácaras do Havaí e Águas de Canindú. Essa estação está situada na bacia do Córrego do Bengalar, a qual registrou o volume de precipitação que desencadeou nesta mesma bacia 65 deslizamentos de terra no dia 8 de março de 2016 (ÁVILA et al., 2020).

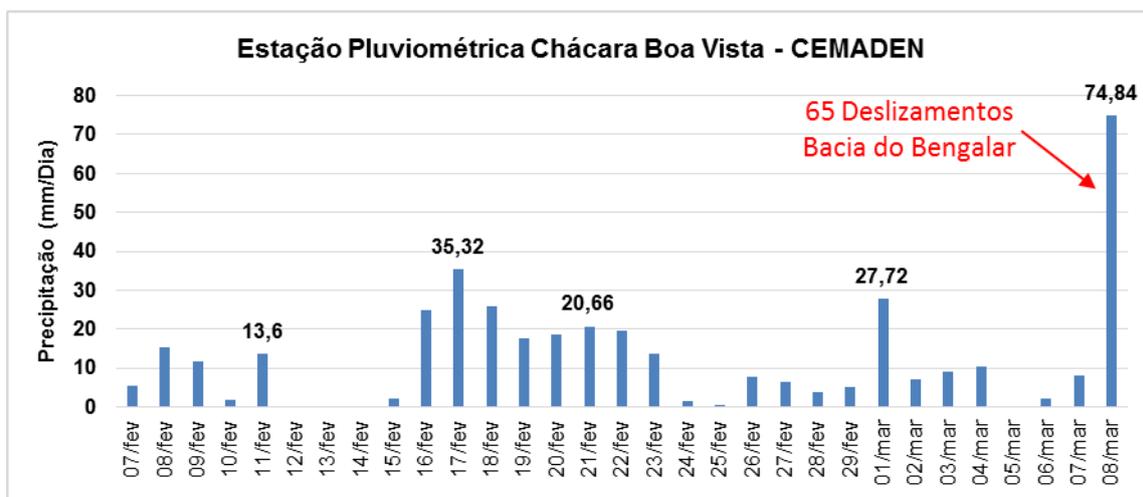
Deste modo, devido à grande semelhança das condições naturais das duas bacias, decidiu-se usar os dados do regime de chuva de 31 dias que desencadeou os deslizamentos de terra da bacia do Bengalar para as simulações dos cenários modelados de estabilidade das encostas da bacia do Rancho Alegre. Os dados de chuva antecedente de 31 dias (período de 07/02 a 08/03/2016) foram utilizados na modelagem de análise de fluxo transiente em meio não saturado (módulo SEEP/W) para obtenção da distribuição de porosidade de água nas duas encostas estudadas.

O período de 31 dias avaliado tem uma somatória de 389,26 mm de chuva, com destaques para o último dia (08 de março) com uma pancada forte de 74,8 mm, quando desencadeou os deslizamentos de terra (Figura 5.8). Destaca-se também que os deslizamentos foram deflagrados após acumulados de 85 mm em 72 horas (6, 7 e 8 de março), ultrapassando o limiar operacional de chuva estabelecido pelo PPDC que é de 80 mm neste mesmo período, definido para a Região Vale do Paraíba (SANTORO et al., 2010). Os valores das intensidades diárias das chuvas foram adicionados ao programa SEEP/W em função transiente. A precipitação foi aplicada e distribuída igualmente sobre toda a superfície para as duas encostas e em todos os cenários (natural e antropizados).

Nas análises de fluxo também se considerou para alguns cenários implementados, além da precipitação acumulada em 31 dias de chuva, vazamentos pontuais de caixas d'água presentes em topos de talude de corte. Essa foi uma característica bastante comum observada nos trabalhos de campo

nos bairros Chácaras do Havaí e Águas de Canindú. Foi adotada uma vazão das caixas d'água de forma constante, com uma vazão mínima de 0,5 m<sup>3</sup>/dia a partir do 15º dia do período analisado, conforme os valores de vazamentos recomendados pela SABESP (1993; 2006). O objetivo foi analisar a influência do vazamento pontual, juntamente com os acumulados de chuva observados nos 31 dias de análise, na estabilidade dos taludes de corte e edificados.

Figura 5.8 – Acumulado diário de chuva da estação pluviométrica Chácara Boa Vista/Cemaden para os 31 dias de avaliação.



Fonte: Próprio Autor.

#### 5.4 Resultados e discussões

A análise do FS em escala de vertente realizado para a bacia do Córrego Rancho Alegre abrange duas seções transversais, referentes às encostas 4 e 55, nas quais foram aplicados os módulos SEEP/W e SLOPE/W em quatro cenários de uso e cobertura do solo para cada seção transversal estudada:

- **Cenário 1:** Encosta natural, com topografia original e recoberta por vegetação arbórea (Hipotético). Nos horizontes de solo H2 e H3 foram adicionadas a coesão das raízes da vegetação arbórea (13 kPa) que se somou a coesão efetiva do solo e uma sobrecarga vertical das árvores em toda a superfície da vertente de 5 kN/m<sup>2</sup>;
- **Cenário 2:** Encosta com topografia original, sem vegetação arbórea e recoberta por pastagem (Hipotético); Ausência de parâmetros geotécnicos relacionados a vegetação arbórea e edificações.

- **Cenário 3:** Encosta antropizada com cortes e presença de edificações (Atual – observado em campo); Adição de uma sobrecarga de 4 kN/m<sup>2</sup> relacionadas as porções edificadas. Na Encosta 55, onde se verifica a presença de vegetação arbórea na porção intermediária da encosta, foi adicionado o fator coesão das raízes e sobrecarga das árvores nesta mesma porção.

- **Cenário 4:** Encosta antropizada com cortes, presença de edificações (Atual) e vazamentos de água (Hipotéticos). Adicionado a sobrecarga de edificações onde se verificaram residências e também vazamento constante de 0,5 m<sup>3</sup>/dia em alguns pontos específicos onde se verificaram caixas d'água e potencial vazamento de tubulação. Os vazamentos foram incrementados nas análises de fluxo somente a partir do 15º dia.

Os resultados foram analisados considerando-se uma comparação da variação do FS das encostas à medida que foi intensificada a antropização e alterado o regime de poropressão de água no solo de acordo com a precipitação de 31 dias e os vazamentos de água simulados no cenário 4. Com isso foi possível gerar o índice de Alteração do Fator de Segurança (IAFS), uma referência numérica de quanto o fator antrópico pode ampliar a instabilização das encostas das seções estudadas. Importante destacar que, pelo fato de ter trabalhado com o método de Morgenstern-Price, o modelo permitiu que definisse as superfícies de ruptura tanto planar, quanto circular. Deste modo, os resultados apresentaram variação no tipo de superfície de ruptura para a mesma seção transversal, porém em cenários diferentes.

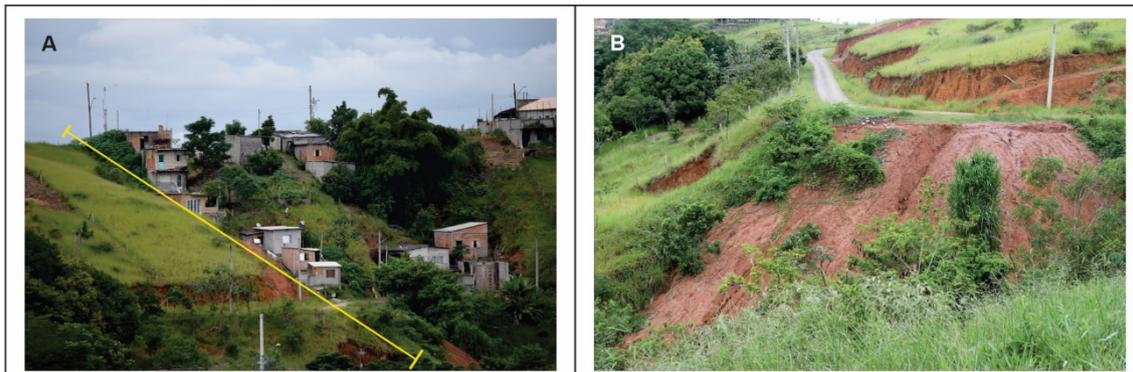
#### **5.4.1 Encosta 4**

A encosta 4 está localizada na porção centro – sul da bacia do Rancho Alegre, no bairro Águas de Canindú de São José dos Campos - SP e mapeada como risco alto (R4) aos deslizamentos de terra (IPPLAN, 2018). O comprimento total da encosta é de 140 m, a amplitude topográfica é de 55 m e a inclinação média da porção mais crítica (porção superior) é de 31º graus.

Atualmente a encosta encontra-se altamente antropizada, cuja porção superior da vertente se caracteriza por topografia bastante recortada em razão da construção de oito residências com baixo padrão construtivo, as quais estão

sobrepostas de forma que os taludes de cortes se encontram a poucos metros das paredes dos fundos de algumas casas (Figura 5.9 A). Há também uma rua na porção superior das casas, no divisor de água da encosta, e outra rua na porção intermediária, logo abaixo das residências. A jusante dessa rua encontra-se um depósito de aterro (Figura 5.9 B).

Figura 5.9 – Imagens da Encosta 4 destacando as presenças de habitações sobrepostas e aterros.



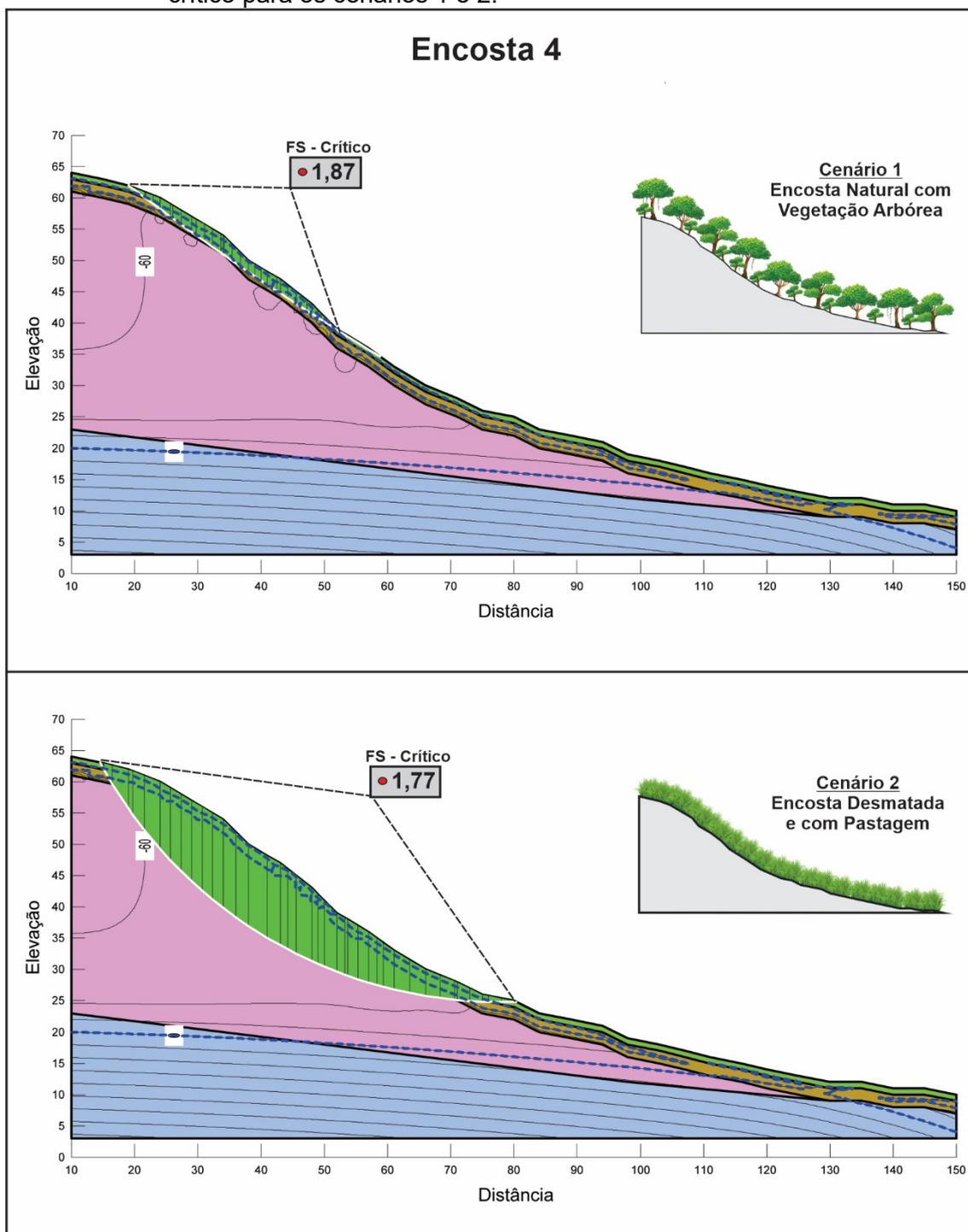
**Foto A:** linha amarela demonstrando o transecto que definiu a seção transversal de entrada no modelo. **Foto B:** Aterro localizado no sopé na encosta.

Fonte: Próprio Autor.

A análise global da Encosta 4 indicou que as superfícies de rupturas dos cenários 1 e 2 são circulares, típicos de deslizamentos rotacionais, e situadas na porção superior da seção transversal, onde a declividade é mais acentuada (Figura 5.10). No Cenário 1, a superfície de ruptura, apesar de circular, é rasa e abrange as camadas de solo H1 e H2 (3,0 m de profundidade) e com FS crítico igual a 1,87. No Cenário 2 a linha de ruptura atingiu camadas de solos mais profundos, com profundidade máxima de 14 metros e FS crítico de 1,77.

Observa-se que no Cenário 2, com topografia original e com presença apenas de pastagem (ausência de árvores), não foi considerado o efeito da coesão das raízes como fator que se soma com a resistência ao cisalhamento do solo, principalmente nos horizontes mais profundos (H2 e H3). Esse fator pode ter contribuído para o aprofundamento da superfície de ruptura e também para a redução do FS do Cenário 2 em relação ao Cenário 1.

Figura 5.10 – Resultados da análise de estabilidade da Encosta 4 demonstrando o FS crítico para os cenários 1 e 2.



**Cenário 1:** Considerando somente os condicionantes naturais mais a chuva acumulada (Encosta natural). **Cenário 2:** Considerando a topografia original mais a chuva acumulada, porém sem a vegetação arbórea (com pastagem).

Fonte: Próprio Autor.

Contudo, no Cenário 1, além da coesão das raízes, também foi considerado o peso da cobertura vegetal sobre a encosta, exercendo assim uma força no sentido da declividade da vertente que contribui efetivamente para o aumento do esforço cisalhante (FIORI, 2015). Deste modo, apesar da remoção da cobertura vegetal arbórea que exerce importante influência na estabilidade das encostas devido ao reforço que raízes promovem no solo, a ausência do peso das árvores no Cenário 2 influenciou para que o FS apresentasse uma pequena redução.

No que tange aos cenários 3 e 4 que caracterizam a Encosta 4 por alto impacto da antropização nas características originais, onde foram simuladas alterações na topografia como taludes de cortes e aterros, ausência de vegetação arbórea e sobrecargas de edificações, as superfícies potenciais de ruptura se caracterizaram por ser do tipo planares e diretamente associadas ao talude de corte (Figura 5.11) que se encontra ao fundo de uma residência na porção superior da seção transversal analisada. Nos dois cenários a superfície de ruptura ocorreria no mesmo local e abrangeria as camadas H1 e H2, em um talude de corte de 3 m de altura.

No cenário 3 o FS crítico encontrado foi de 1,04. No Cenário 4, além da precipitação acumulada considerada também nos outros cenários, um vazamento pontual de 0,5 m<sup>3</sup>/dia foi adicionado nos topos de alguns taludes de corte, a partir do 15º dia de análise, com o modelo apontando uma superfície de ruptura com FS crítico de 0,92. Esse valor está abaixo do limite de equilíbrio da encosta, o que se caracterizaria na possibilidade efetiva de um deslizamento de terra que, devido à localização, provavelmente atingiria uma residência e por consequência poderia atingir moradores.

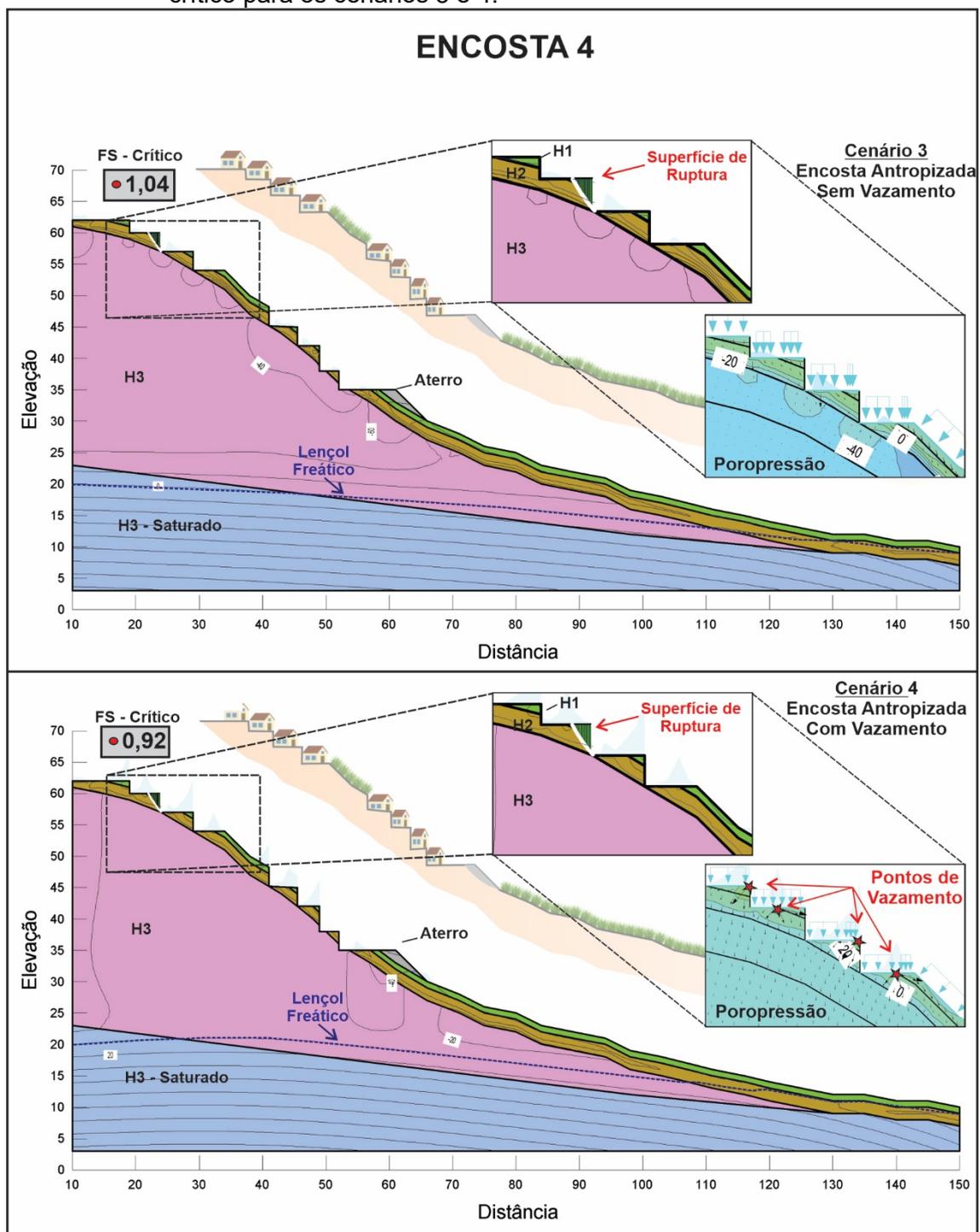
Na Figura 5.11 também é possível observar os resultados da análise de fluxo transiente não-saturado dos cenários 3 e 4, referente à distribuição da poro-pressão de água ao longo dos taludes de corte, para o momento mais crítico do FS da Encosta 4. Observa-se que no Cenário 4, no talude onde o modelo definiu a superfície de ruptura (indicado pela seta vermelha) há a geração de poro-pressão positiva de água, representada por uma estrela vermelha e setas pretas radiais (padrão de representação do SEEP/W para poro-pressão positiva),

ocasionada pelo eventual vazamento pontual. Quando se observa o mesmo local no Cenário 3, a representação gráfica do SEEP/W demonstra a poro-pressão ainda negativa, cujas setas estão em paralelo e apontam o fluxo no sentido vertical e infiltrando no solo.

No gráfico da Figura 12 é possível observar nos quatro cenários de avaliação da estabilidade da Encosta 4 que há uma pequena tendência de elevação do FS no início dos 31 dias avaliados. Isso se deve ao fato de que para a condição inicial do modelo, o solo se encontra seco e quando inicia o processo de infiltração, os valores de sucção matricial adotados na condição de contorno são ativados e assim aumenta a poro-pressão negativa que contribui efetivamente para aumentar a resistência ao cisalhamento dos solos e conseqüentemente para o aumento dos valores do FS das encostas.

Observa-se também que a cada incremento dos fatores antrópicos sobre a encosta, a tendência é de redução do FS. No Cenário 3, a encosta estava bastante antropizada e o FS oscilou na faixa de 1,1 e quando no 31º dia de análise, considerou-se uma pancada de chuva de 78 mm, o FS atingiu o menor valor, igual a 1,04. Contudo, o comportamento do FS no Cenário 4 se assemelhou bastante com o Cenário 3 até o 14º dia, porém quando se considerou um vazamento pontual de 0,5 m<sup>3</sup>/dia, no 15º dia o FS extrapolou o limite de equilíbrio (FS abaixo de 1) e permaneceu nessa condição até o 31º dia, quando se somou com a pancada de chuva e atingiu o menor valor (0,92).

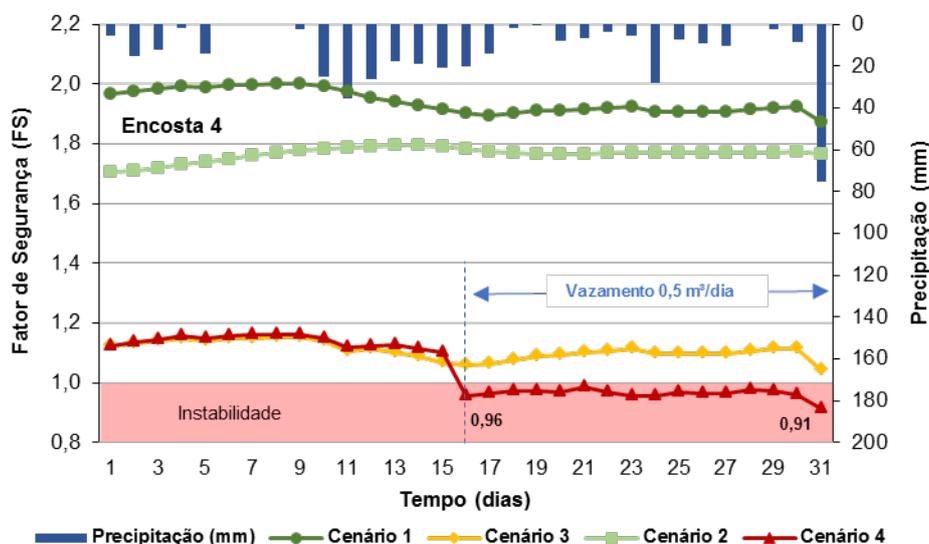
Figura 5.11 – Resultados da análise de estabilidade da Encosta 4 demonstrando o FS crítico para os cenários 3 e 4.



**Cenário 3:** Considerando cortes de talude, sobrecarga de edificações, ausência de vegetação arbórea mais a chuva acumulada. **Cenário 4:** Considerando cortes de talude, sobrecarga de edificações, ausência de vegetação arbórea, chuva acumulada mais vazamento de  $0,5 \text{ m}^3/\text{dia}$ .

Fonte: Próprio Autor.

Figura 5.12 – Variação do FS em 31 dias dos quatro cenários avaliados da Encosta 4.



Fonte: Próprio Autor.

#### 5.4.2 Encosta 55

A Encosta 55 está localizada ao centro-sul da bacia do Córrego Rancho Alegre, no bairro Chácaras do Havaí em São José dos Campos, SP e também classificada como risco de muito alto (R4) aos escorregamentos pelo IPPLAN (2018). A encosta tem um comprimento total de 140 m, amplitude topográfica de 75 m e uma declividade média de 36 ° graus.

O uso e a cobertura do solo da Encosta 55 se caracteriza atualmente por estar parcialmente antropizada, com um corte horizontal no topo da encosta onde há uma rua e uma residência. Na porção intermediária há cobertura vegetal densa, remanescente de floresta estacional semidecidual, em que árvores de grande porte são identificadas. O sopé da encosta é caracterizado por um talude de corte vertical com 7 m de altura e uma residência de baixo padrão construtivo, em que a parede dos fundos se encontra praticamente encostada no talude de corte (Figura 5.13 A). Outro aspecto relevante é que no topo do talude de corte tem a instalação de uma caixa d'água de 1.000 litros utilizada para o abastecimento residencial (Figura 5.13 B).

Figura 5.13 – Imagens da Encosta 55 com destaque para a caixa d'água em topo de talude de corte e edificação de baixo padrão construtivo.



**Fotos A:** Visão do alto do talude de corte. **B:** Visão de baixo do talude de corte. Setas azuis demonstrando a caixa d'água no topo de talude de corte; Linhas pontilhadas brancas delimitando a edificação de baixo padrão construtivo e localizada bem próxima do talude de corte que está destacada em linhas pontilhadas vermelhas.

Fonte: Próprio Autor.

Similar ao observado na Encosta 4, ao se efetuar a análise global da Encosta 55, as superfícies de rupturas geradas pelo módulo SLOPE/W para os cenários 1 e 2 são circulares, com uma profundidade máxima de 14 m e localizadas no terço médio-baixo da seção transversal, onde nota-se uma quebra de relevo marcada por uma declividade pontualmente mais acentuada (Figura 5.14).

No Cenário 1 o FS crítico identificado foi de 1,65, enquanto que no Cenário 2 foi de 1,53. Interessante destacar que os mesmos cenários 1 e 2 avaliados anteriormente para a Encosta 4, apesar dos parâmetros geotécnicos de entrada dos modelos serem os mesmos, culminaram em valores de FS superiores (1,87 e 1,77, respectivamente). A maior instabilidade inicial da Encosta 55, correspondente aos cenários em que as características morfológicas das encostas estavam originalmente preservadas, se dá devido à declividade média mais acentuada.

Nos cenários 3 e 4 as simulações foram realizadas considerando-se a encosta impactada por fatores antrópicos mais pronunciados, como taludes de corte, sobrecarga de edificações, remoção parcial da vegetação arbórea. As superfícies de ruptura se caracterizaram nesses dois cenários como do tipo planar e, similar ao que se identificou na Encosta 4, estão diretamente associadas ao talude de corte vertical, porém no sopé da encosta. O plano de

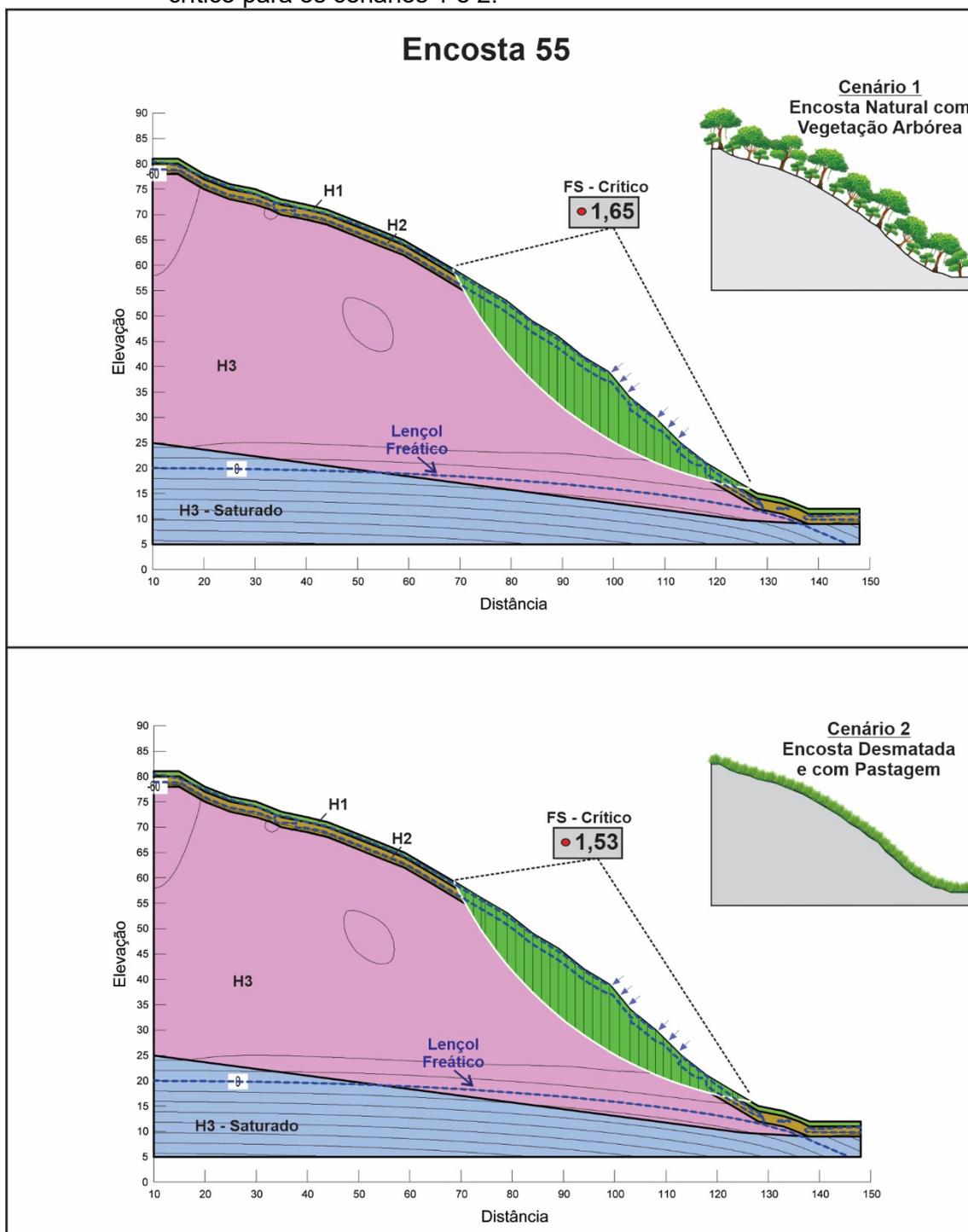
ruptura foi definido pelo modelo abrangendo as camadas de solo H1, H2 e H3, onde o material seria mobilizado projetando-o para a jusante do talude e assim atingindo a residência (Figura 5.15).

No Cenário 3 o FS crítico identificado foi de 1,07, enquanto que no Cenário 4 foi de 0,91. Além da precipitação acumulada, no Cenário 4 foi também considerado, a partir do 15º dia de análise, um vazamento pontual de 0,5 m<sup>3</sup>/dia no topo do talude de corte vertical (onde se localiza a caixa d'água) e deste modo o modelo apontou uma superfície de ruptura com FS crítico de 0,91. Esse valor está abaixo do limite de equilíbrio da encosta, o que se caracterizaria na possibilidade de um deslizamento de terra que, devido à localização, provavelmente atingiria a residência logo a jusante e por consequência poderia atingir moradores.

Um processo semelhante aconteceu no bairro do Freitas, também em São José dos Campos e próximo à área de estudo, onde uma casa foi atingida por um escorregamento em corte de talude e culminou em quatro vítimas fatais soterradas. Mendes et al. (2017a), em um estudo de retroanálise, buscaram identificar os fatores preponderantes para o acidente, tendo verificado que o vazamento da caixa d'água se somou a uma chuva e, assim, induziu a deflagração do escorregamento.

Os resultados da análise de fluxo transiente não-saturado dos cenários 3 e 4, referente à distribuição de poro-pressão de água ao longo do talude de corte também poder ser observado na Figura 5.15. Para o Cenário 4, no local onde o modelo definiu a superfície de ruptura (indicado pela seta vermelha) formou-se a poro-pressão positiva de água (representada por uma estrela vermelha e setas pretas radiais) e a localização denota que o vazamento pontual de 0,5 m<sup>3</sup>/dia teve contribuição efetiva para sua deflagração. O mesmo não foi observado no Cenário 3, em que a ausência de vazamento levou a poro-pressão se manter negativa e o não rompimento do talude.

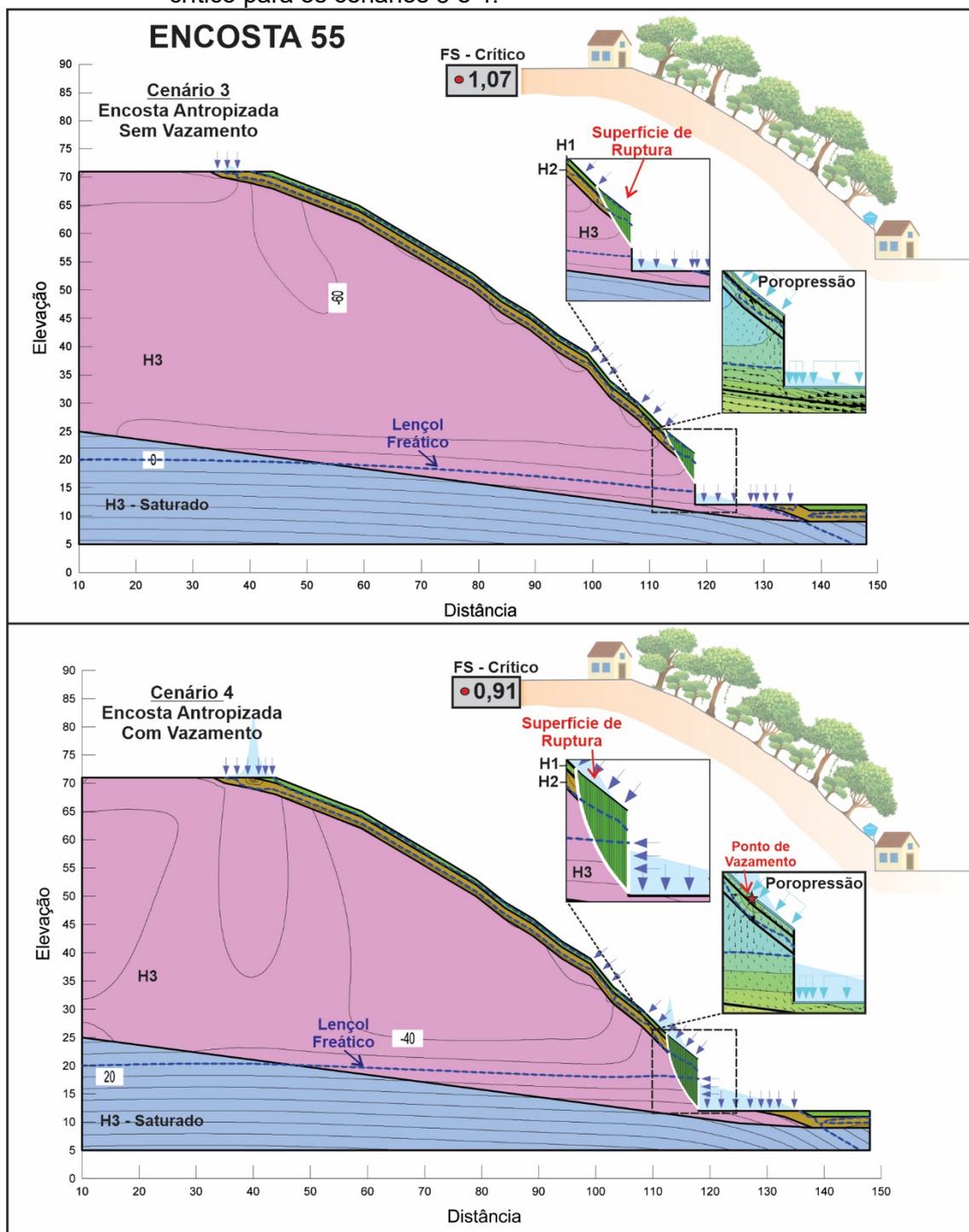
Figura 5.14 – Resultados da análise de estabilidade da Encosta 55 demonstrando o FS crítico para os cenários 1 e 2.



**Cenário 1:** Considerando somente os condicionantes naturais mais a chuva acumulada (Encosta natural). **Cenário 2:** Considerando a topografia original mais a chuva acumulada, porém sem a vegetação arbórea (com pastagem).

Fonte: Próprio Autor.

Figura 5.15 – Resultados da análise de estabilidade da Encosta 55 demonstrando o FS crítico para os cenários 3 e 4.

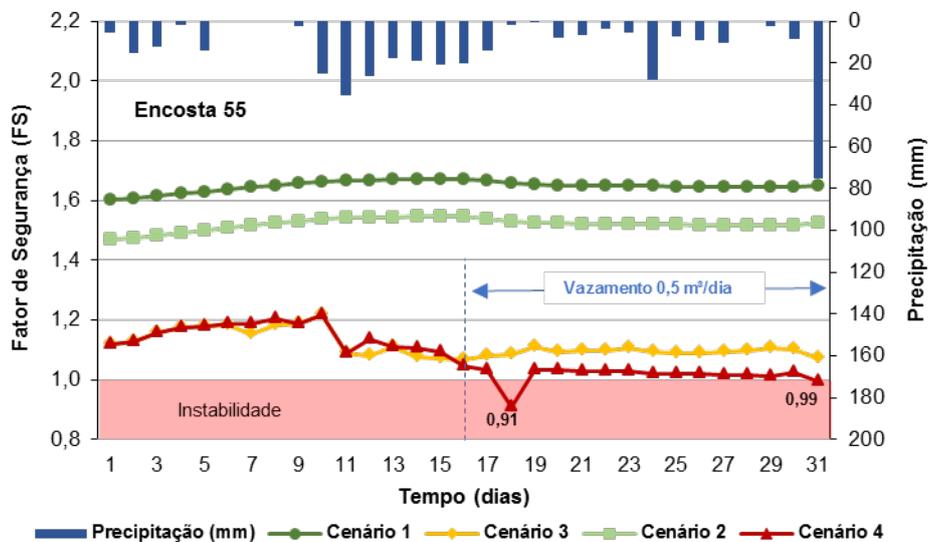


**Cenário 3:** Considerando cortes de talude, sobrecarga de edificações, ausência de vegetação arbórea mais a chuva acumulada. **Cenário 4:** Considerando cortes de talude, sobrecarga de edificações, ausência de vegetação arbórea, chuva acumulada mais vazamento de 0,5 m<sup>3</sup>/dia.

Fonte: Próprio Autor.

Ao se observar o comportamento do FS nos quatro cenários da Encosta 55 nos 31 dias de avaliação, semelhante a Encosta 4, há uma pequena tendência de elevação do FS no início das chuvas, até por volta do décimo dia (Figura 5.16), devido ao início de atuação das poropressões negativas (sucção matricial). Contudo, no decorrer do tempo, quando os acumulados de chuva aumentam e o solo começa a se umedecer, levando a tendência de redução da estabilidade.

Figura 5.16 – Variação do FS em 31 dias dos quatro cenários avaliados da Encosta 55.



Fonte: Próprio Autor.

Entre os cenários 1 e 2, observou-se o comportamento paralelo das curvas do FS ao longo do tempo, indicando um valor de 0,2 maior no Cenário 1 que perdurou por todos os dias analisados em razão, provavelmente, dos efeitos da coesão das raízes arbóreas. Similar também a Encosta 4, a cada incremento dos fatores antrópicos sobre as características naturais da vertente, a tendência foi de redução da estabilidade. No Cenário 3, a encosta estava bastante antropizada e o FS se manteve na faixa de 1,1 e 1,2 e quando no 31º dia de avaliação, considerou-se uma pancada de chuva de 78 mm, o FS atingiu o menor valor de 1,04. No Cenário 4, o FS registrou 1,1 no primeiro dia de análise e diminuiu para 0,91 no 17º, dois dias após iniciar o vazamento de 0,5 m³/dia da caixa d'água localizada em cima do talude, voltando a romper o limite de equilíbrio no 31º dia, após a pancada de chuva de 78 mm.

### 5.4.3 IAFS - Índice de Alteração do Fator de Segurança

O Índice de Alteração do Fator de Segurança (IAFS) foi criado para avaliar numericamente o quanto as intervenções antrópicas podem impactar a estabilidade das encostas, tendo como referência o valor do FS das encostas em condição original (sem intervenção antrópica). Assim, para as encostas 4 e 55 foi avaliado quais as proporções (percentual) de redução do FS dos cenários 2, 3 e 4 (condições antropizadas) em relação ao Cenário 1 (condição original/natural). Os resultados numéricos dos FS's e IAFS's são apresentados na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Resultados dos FS's críticos e IAFS's para cada cenário analisado das encostas 4 e 55.

Cenário	Encosta 4		Encosta 55	
	FS Crítico	IAFS %	FS Crítico	IAFS %
1	1,87	-	1,65	-
2	1,77	5,8	1,53	7,7
3	1,04	44,3	1,07	35,2
4	0,91	51,2	0,91	44,9

Fonte: Próprio Autor.

Os IAFS's das encostas 4 e 55 no Cenário 2 indicaram uma redução de apenas 5,8% e 7,7%, respectivamente, no FS em relação ao Cenário 1. A retirada da vegetação arbórea (desmatamento) foi determinante para essa redução. Porém, quando avaliada a proporção de redução do FS no Cenário 3, observa-se valores mais expressivos, com 44,3% e 35,2%, respectivamente. Isso demonstra como os taludes de cortes, sem as intervenções estruturantes (muros de contenção, ancoramentos, drenos subsuperficiais), impactam o FS das encostas. Esse impacto é consideravelmente maior do que apenas a exposição da superfície do solo devido a remoção das árvores, bem como ainda colocam em risco habitações e populações que nelas habitam.

Porém, quando se associou os taludes de corte aos vazamentos de caixas d'água e tubulações (0,5 m<sup>3</sup>/dia), os IAFS's no Cenário 4 tiveram valores ainda mais expressivos, 51,2% e 44,9%, respectivamente para encostas 4 e 55, reduzindo o FS a ponto de romper o limite de equilíbrio de ambas as vertentes. O que chama atenção nestes resultados é que os dois fatores antrópicos que

mais impactaram a estabilidade das encostas (taludes de corte e vazamentos) são geralmente desconsiderados nos métodos de previsão de deslizamentos de terra, referentes aos modelos regionais amplamente utilizados. Isso se dá, provavelmente, devido ao fato de que a grande parte dos modelos foi desenvolvida para ambientes naturais e também devido à dificuldade de obtenção de parâmetros de entrada que expressam corretamente as características antrópicas sobre as superfícies estudadas.

O PPDC referente aos deslizamentos em encostas, levando em consideração também aspectos de indução antrópica, estabeleceu um limiar crítico de precipitação de 80 mm em 72 horas para a Região Vale do Paraíba, onde se encontra o município de São José dos Campos (MENDES et al., 2020; SANTORO et al., 2010). Quando o volume de chuva ultrapassa esse valor o nível operacional da Defesa Civil é alterado de “Observação” para “Atenção” e equipes são enviadas a campo para avaliação do terreno. Se constatadas movimentações do terreno, o nível operacional se eleva para “Alerta” e com isso a população é removida de suas moradias (MENDES et al., 2020; MENDES et al., 2015).

Para a análise de fluxo de água no interior dos solos das encostas 4 e 55 o módulo SEEP/W considerou um acumulado de precipitação em 31 dias de 389 mm, destacando um acumulado de 85 mm em 72 horas nos últimos três dias das análises. Os resultados obtidos com o módulo SLOPE/W para as duas encostas, quando considerados os aspectos de indução antrópica como talude de corte e sobrecargas de edificações (Cenário 3), esse volume de chuva de 85 mm em 72 horas não teria potencial de alterar o FS a ponto de romper o equilíbrio limite das encostas (FS abaixo de 1). Contudo, como visto no Cenário 4 das duas encostas, essa mesma condição de indução antrópica associada com vazamentos de água e com a precipitação acumulada, a análise demonstrou potencial de ruptura de taludes de corte.

Ou seja, os resultados aqui apresentados, demonstram que em caso de vazamentos de caixas d'água e tubulações, o limiar crítico estabelecido pelo PPDC para a Região Vale do Paraíba seria capaz de anteceder possíveis

desastres associados aos deslizamentos de terra na bacia do Córrego do Rancho Alegre. Deste modo, observa-se que os resultados obtidos corroboram com o limiar crítico de chuva adotado atualmente para o PPDC da Região Vale do Paraíba que é de 80 mm em 72 horas, recomendando-se complementarmente que promova ações preventivas de fiscalização e campanhas de conscientização para manutenções em caixas d'água e tubulações que evitem vazamentos.

Neste contexto, os resultados obtidos com o modelo GEO-SLOPE em escala de vertentes (escala de detalhe) demonstram que para maior adequação do uso de modelos de previsão de movimentos de massa em ambientes urbanos e periurbanos, é importante que sejam transientes. Isto é, devem considerar a precipitação associada a possíveis vazamentos e que também tenha como entrada modelos de terrenos (MDT) atualizados e que representem de forma mais detalhada as características naturais e, principalmente, as remodelações antrópicas da superfície (cortes e aterros) que alteram as características morfológicas e morfométricas das encostas. Para isso destaca-se o uso de imageamentos por veículos aéreos não tripulados (VANT's) que têm capacidade de gerar MDT's em escala de centímetros e de forma dinâmica, que aborde a transformação do relevo ao longo do tempo devido às interferências antrópicas.

Os resultados apresentados no presente estudo, obtidos com modelo GEO-SLOPE, se somam aos trabalhos prévios efetuados considerando-se o bairro Freitas, por Mendes et al. (2017a), e também pelos resultados dos modelos FS FIORI e TRIGRS aplicados na bacia do Bengalar, por Ávila et al. (2020). A partir deles verifica-se o grande impacto que as intervenções antrópicas, principalmente os taludes de corte e aumento da umidade do solo induzido por vazamentos, têm na instabilização de encostas urbanas e periurbanas.

Nos bairros Águas de Canindú, Chácaras do Havaí (bacia do Rancho Alegre) e Freitas o rompimento do limite de equilíbrio das encostas (FS abaixo de 1) ocorreram entre a associação dos taludes de corte e a precipitação elevada, juntamente com os vazamentos de tubulações e caixas d'água. Contudo, a bacia do Bengalar está situada mais ao norte de São José dos Campos, SP, em região

caracterizada por terrenos mais acidentados, obtendo assim encostas mais declivosas que na bacia do Rancho Alegre. Assim os resultados da presente análise indicam que as altas declividades da topografia original se somaram aos cortes de estradas e à precipitação intensa e com isso tiveram importante impacto na formação dos deslizamentos induzidos, mesmo sem a existência de vazamentos e ou lançamentos de águas servidas.

Diante do apresentado, ressalta-se que o modelo GEO-SLOPE se destacou por possibilitar incluir as nuances da topografia antropizada das encostas (taludes de corte e aterros), bem como por considerar outras especificidades dos usos e cobertura do solo, como sobrecarga das árvores e edificações, coesão das raízes, remoção da vegetação arbórea, precipitação variando ao longo dos dias e inserção de vazamentos pontuais de caixas d'água e tubulações. Contudo, por ser caracterizado como modelo bidimensional e em escala de vertente, a sua aplicação torna-se limitada por não ser possível utilizá-lo como método de previsão de deslizamentos de terra espacialmente distribuídos (modelos regionais) e com isso dar apoio em sistemas de monitoramento e alerta de movimentos de massa.

Contudo, o nível elevado de detalhamento do GEO-SLOPE permite o aprofundamento de características associadas aos condicionantes naturais e antrópicos que os modelos de previsão espacialmente distribuídos ainda não têm e com isso possibilita realizar estudos de retroanálise e definição de limiares de chuva mais acurados e realísticos, de acordo com as características específicas das encostas a serem monitoradas.

## **5.5 Considerações finais**

Os resultados obtidos a partir do uso do modelo GEO-SLOPE encontrados para as encostas 4 e 55 demonstram que as alterações antrópicas mais pronunciadas identificadas em campo (corte de talude, sobrecarga de edificações, ausência de vegetação arbórea e vazamentos), tem o potencial de reduzir consideravelmente a estabilidade natural dos solos em até 51,2% na Encosta 4 e romper o limite de equilíbrio e gerar deslizamentos de terra.

A aplicação do GEO-SLOPE demonstrou o quão impactante os taludes de cortes sem as intervenções estruturantes (muros de contenção, ancoramentos, drenos subsuperficiais, etc), necessárias para a estabilização, afetam o FS e coloca em risco habitações e a população que nelas habita.

Destaca-se a importância do desenvolvimento de métodos e modelos de previsão cada vez mais acurados e que considerem as características topográficas típicas de ambientes antrópicos construídos de baixo padrão construtivo (cortes de talude e aterros). Para isso ficou evidente a necessidade de gerar MDT's cada vez mais atualizados para a inserção nos modelos.

Por fim, considerando que um dos principais agentes que influenciou a queda do FS foi o vazamento sobre as encostas, este trabalho demonstra a necessidade de ações preventivas por parte do poder público no sentido de proceder à fiscalização e campanhas de conscientização para a execução de manutenções em caixas d'água e tubulações que evitem a ocorrência de problemas similares nas áreas de risco de deslizamentos existentes nos demais municípios brasileiros.

## 6 CONCLUSÃO GERAL

O presente estudo contribuiu para o esforço de entender, de forma mais aprofundada, como e quanto as intervenções antrópicas interferem nas relações e interações dos fatores naturais que condicionam a estabilidade das encostas e com isso deflagram os movimentos de massa e geram novas condições de equilíbrio. Deste modo, os resultados obtidos com a pesquisa apresentam avanços na fronteira do conhecimento científico, no que tange ao estudo de estabilidade de encostas. A partir do estudo, novos métodos foram usados, o que permitiu, de diferentes formas, a inclusão dos fatores antrópicos juntamente com os fatores físico-naturais como parâmetros de entrada dos modelos de previsão de suscetibilidade aos deslizamentos de terra.

Procurou-se considerar os elementos antrópicos nos métodos de previsão e avaliação do fator de segurança (FS) das encostas em três níveis de escala:

1 - Regional, referente ao município de São José dos Campos (Capítulo 3);

2 - Escala de bacia, correspondente à bacia do Córrego Bengalar (Capítulo 4) e;

3 - Escala de vertente, considerando duas encostas situadas na bacia do Córrego Rancho Alegre (Capítulo 5).

Buscou-se também integrar os elementos antrópicos que contribuem significativamente para a deflagração dos deslizamentos de terra e expõem a população ao risco em diferentes formas, que puderam ser caracterizadas em três modos de inserção:

1 - Através dos dados censitários, os quais permitiram considerar elementos antrópicos por meio de indicadores socioeconômicos como: infraestrutura habitacional; econômico; educacional; dependência social; e estrutura familiar. A integração desses indicadores aos resultados de modelagem determinística (modelo FS FIORI) permitiu considerar, além das questões físicas e estruturais, também aspectos relacionados às questões sociais e econômicas, avaliando as características da população e a sua

exposição ao risco de deslizamentos de terra, gerando assim o IVSGeo (Índice de Vulnerabilidade Sociogeoambiental).

2 - Por meio do mapeamento de uso e cobertura da terra e, assim, considerando aspectos antrópicos como desmatamento, sobrecarga de edificações e também aspectos da cobertura vegetal, como coesão das raízes, sobrecarga de árvores e ação do vento na copa das árvores que transmite ao solo através de forças de torção. Isso foi possível através do desenvolvimento do modelo determinístico FS FIORI com base na equação do FS de Fiori (2015).

3 - Implementação em escala de detalhe e com base em observações de campo de questões relacionadas às intervenções antrópicas inadequadas e como elas afetaram o FS de duas encostas. O uso do modelo GEO-SLOPE permitiu abordar aspectos da ação antrópica sobre as encostas que os outros modelos não possibilitaram, como: cortes de talude, aterros e vazamentos de caixa d'água e tubulações.

No Capítulo 3, o processo de modelagem híbrida (modelo determinístico integrado com modelo heurístico) possibilitou gerar o Índice de Vulnerabilidade Sociogeoambiental de São José dos Campos – SP (IVSGeo – SJC), demonstrando ser um avanço metodológico por integrar as características do terreno (físico-natural), associadas ao uso e cobertura da terra (modelagem determinística) com os aspectos da infra-estrutura habitacional relacionada aos dados socioeconômicos (modelagem heurística).

As validações aplicadas ao IVSgeo apresentaram valores muito satisfatórios, destacando-se o índice PR (Potencial de Risco) que apontou que 12,4% da área urbanizada do município classificada com IVSGeo “muito alto” correspondem a setores de risco a escorregamentos, indicando que o método tem ótima capacidade de detecção de áreas e populações vulneráveis aos deslizamentos. O IVSGeo pode ser replicado em outras regiões do Brasil e, por permitir o conhecimento da vulnerabilidade sociogeoambiental intramunicipal, tem potencial de dar subsídio ao poder público municipal para a implementação de políticas públicas para a gestão do risco de desastres associados aos deslizamentos de terra. Em situações de chuvas críticas sobre superfícies com

a mesma suscetibilidade natural, em razão da inclusão das variáveis sociais o IVSGeo tem potencial para subsidiar a Defesa Civil onde ações de remoção precisam ser priorizadas, permitindo contemplar os locais onde a população se caracteriza em situação de maior vulnerabilidade (menor renda, maior presença de idosos e crianças, precária infraestrutura habitacional). O IVSGeo tem grande potencial também para subsidiar a capacidade de monitoramento e emissão de alertas de deslizamentos de terra, podendo contribuir para trabalhos como os realizados no Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais (Cemaden).

O Capítulo 4 abordou a influência da variação do uso e cobertura da terra e da intensidade de chuvas para a formação de 65 deslizamentos de terra na bacia do Córrego Bengalar. Para isso foi implementado o modelo determinístico e estático FS FIORI, que permitiu a geração do mapa de suscetibilidade aos deslizamentos de terra levando em consideração também aspectos do uso e cobertura da terra. Os resultados do modelo FS FIORI puderam ser comparados com os do modelo TRIGRS, sendo este último transiente, o que permitiu avaliar o FS no decorrer do tempo e de acordo com a variação da intensidade da precipitação.

Os resultados dos dois modelos discutidos no Capítulo 4 apontaram que os deslizamentos identificados na bacia do Bengalar deflagraram em decorrência de uma combinação de acumulados de chuva, associado com uma pancada forte de chuva sobre superfícies marcadas principalmente por intervenções antrópicas inadequadas referentes a cortes de talude em estradas. A validação dos resultados, por meio do método de curva ROC, demonstrou que ambos os modelos obtiveram bons desempenhos e que podem ser considerados aceitáveis. Contudo, o TRIGRS, modelo já consagrado na literatura, demonstrou um desempenho um pouco melhor, com valores de AUC de 0,7238 no cenário 1 e de 0,7186 no cenário 2 em relação ao valor de 0,6552 do modelo FS FIORI, demonstrando a maior capacidade dos modelos transientes em comparação aos estáticos.

No Capítulo 5, o modelo GEO-SLOPE permitiu estudar o impacto das intervenções antrópicas inadequadas sobre duas encostas, demonstrando que a medida que as intervenções se intensificam sobre a cobertura vegetal e a topografia, a tendência é de redução do FS das encostas. Destaca-se que a associação entre taludes de corte e vazamentos afetaram fortemente o FS das duas encostas analisadas, fazendo com que elas rompessem o limite de equilíbrio e atingisse valores de FS abaixo de 1, indicando possivelmente a ruptura dos taludes, cujo material removido afetaria habitações próximas. A aplicação deste método representou um avanço nos estudos de modelagem considerando a estabilidade de encostas antropizadas, provendo assim uma referência numérica do quanto a atividade antrópica pode alterar o FS das encostas e taludes. A associação entre desmatamento, formação de taludes de cortes e vazamentos de tubulações e caixas d'água determinou a redução do FS em até 51,2% e 44,9% no cenário 4 das encostas 4 e 55, respectivamente.

O que chama atenção nos resultados obtidos com o modelo GEO-SLOPE é que os dois fatores antrópicos que mais impactaram a estabilidade das encostas (talude de corte e vazamentos) são geralmente desconsiderados nos métodos de previsão de deslizamentos de terra, referentes aos modelos regionais. Isso demonstra que para maior satisfação do uso de modelos de previsão de movimentos de massa em ambientes urbanos e periurbanos, é importante que se caracterizem como transientes para considerar a precipitação associada a possíveis vazamentos e também tenha como entrada modelos de terrenos (MDT) atualizados e que representem as remodelações antrópicas da superfície (cortes e aterros) que alteram as características morfológicas e morfométricas das encostas.

Deste modo, os resultados obtidos a partir dos modelos aplicados corroboram outros resultados da literatura. A estabilidade das encostas é condicionada por complexas relações e interações entre diversos fatores físicos naturais e o processo de uso e ocupação da terra acabam por influenciar na dinâmica natural de evolução das encostas. As diversas atividades realizadas pelo homem, como desmatamentos, recortes nos terrenos, aterros, vazamentos e lançamentos de água sobre as superfícies, entre outras interferências inadequadas, estabelecem

novas interações com os fatores condicionantes naturais (geologia, geomorfologia, pedologia, hidrologia), interferindo assim no equilíbrio das vertentes e induzindo a ocorrência de deslizamentos de terra, que por vezes culminam em efeitos catastróficos (BRUNSDEN; PRIOR 1984; CARRARA et al., 1999; FERNANDES; AMARAL, 1996; FERNANDES et al., 2001; GUIDICINI; NIEBLE, 1983; KIM et al., 2013; KÖNING et al., 2019; MACIEL FILHO, 1994; MENDES et al., 2017a; PELLOGIA, 1998; PERSICHILLO et al., 2017; SCHMALTZ et al., 2017; SCHMIDT et al., 2001; SIDLE et al., 1985; VIEIRA, 2007).

Em um contexto mais amplo, ao avaliar todos os procedimentos metodológicos adotados, a pesquisa permitiu ainda, na área temática de Modelagem do Sistema Terrestre (MOD) e em especial na linha de pesquisa de Desastres Naturais, realizar um estudo interdisciplinar de forma a contribuir para um avanço no entendimento das interações dos componentes do sistema natural (representado pelo meio físico) com os sistemas sociais, como objetiva a Pós-Graduação em Ciência do Sistema Terrestre.

### **6.1 Trabalhos futuros**

Os aspectos metodológicos considerados neste estudo têm potencial de avançar ainda mais e, visando a continuidade da pesquisa, algumas questões estão planejadas para um maior aprofundamento e integração aos métodos desenvolvidos:

- Gerar MDT e mapa de uso e cobertura da terra em escala de centímetros, a partir de sobrevoo de veículos aéreos não tripulados (VANTs - Drones). Isso vai possibilitar inserir, no modelo de previsão de deslizamentos de terra, aspectos referentes ao talude de corte e relacionados ao uso e cobertura (sobrecarga de vegetação e de edificações; coesão das raízes de árvores);
- Adaptar o código do modelo TRIGRS de forma que seja possível também integrar aspectos geotécnicos relacionados ao uso e cobertura da terra e, com isso, gerar resultado dinâmico (transiente) de suscetibilidade aos deslizamentos de terra;

- Adquirir dados censitários do IBGE, na escala de face de quadra (os dados são disponibilizados em nível de detalhe de logradouro e quadra), que possibilitem gerar dados de vulnerabilidade social em concordância com as metodologias da BATER (Base Territorial Estatística de Áreas de Risco) e do InOV (Índice Operacional de Vulnerabilidade a Deslizamentos de Terra) desenvolvidas por Alvalá et al. (2019) e por Dias et al. (2020), respectivamente.

- Integrar as informações de vulnerabilidade social geradas a partir da metodologia de BATER com os resultados transientes de suscetibilidade do modelo TRIGRS.

Os trabalhos futuros acima mencionados têm potencial de se concretizar, de modo que toda a metodologia desenvolvida na presente tese seja integrada e desenvolvida em nível de maior detalhe (escala de centímetros) e, com isso, permita a inserção de dados de precipitação, taxas de infiltração e poropressão de água no solo como novas variáveis consideradas no IVSGeo. Com estes complementos, o índice se tornará dinâmico temporalmente (transiente) e com perspectiva de apontar para a defesa civil especificamente as ruas e até mesmo quadras onde se farão necessárias intervenções prioritárias para a prevenção de perdas de vidas em áreas de risco associadas aos deslizamentos de terra.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AB'SÁBER, A. A. Um conceito de geomorfologia a serviço das pesquisas sobre o quaternário. **Geomorfologia**, n.18, 1969.
- ADGER, W. N. Vulnerability. **Global Environmental Change**, v. 16, n. 3, p. 268-281, 2006.
- ADITIAN, A.; KUBOTA, T.; SHINOHARA, Y. Comparison of GIS-based landslide susceptibility models using frequency ratio, logistic regression, and artificial neural network in a tertiary region of Ambon, Indonesia. **Geomorphology**, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.06.006>.
- AHRENDT, A. **Movimentos de massa gravitacionais – proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP**. 2005. 364p. Tese (Doutorado em Geotecnia) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2005.
- ALEOTTI, P.; CHOWDHURY, R. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v.58, p. 21-44, 1999.
- ALVALÁ, C.S.R.; DIAS, C.M.A.; SILVIA, M.S.; STENNER, C.; FRANCO, C.; AMADEU, P.; RIBEIRO, J.; SANTANA, R.A.S.M.; NOBRE, C.A. Mapping characteristics of at-risk population to disasters in the context of Brazilian early warning system. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v.41, p. 1-14, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101326>.
- ALVARES C.A.; STAPE J.L.; SENTELHAS P.C.; GONÇALVES J.L.M.; SPAROVEK G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- AMARAL, C. Landslides disasters management in Rio de Janeiro. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 2., 1997. **Anais...** Rio de Janeiro, 1997. p. 209-212.
- AMARAL, C.; FEIJÓ, R. L. Aspectos ambientais dos escorregamentos em áreas urbanas. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (Ed.). **Reflexões sobre a geografia física no Brasil**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004. p.193-224.
- ANAZAWA, T.M. **Vulnerabilidade e território no litoral norte de São Paulo, indicadores, perfis de ativos e trajetórias**. 2012. 190 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos, 2012.

ANAZAWA, T.M.; FEITOSA, F.F.; MONTEIRO, A.M.V. Vulnerabilidade socioecológica no litoral norte de São Paulo: medidas, superfícies e perfis de ativos. **Geografia**, Rio Claro, v. 38, n. 1, p. 189-208, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MECÂNICA DO SOLO - ABMS. **Região serrana do Rio de Janeiro**: lições de nossa maior tragédia. 2011. Disponível em: [www.abms.com.br](http://www.abms.com.br). Acesso em: 14 mar. 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 6120**: cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, 1980.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NBR 11682**: estabilidade de encostas. Rio de Janeiro, 2009.

AU, S.W.C. Rain-induced slope instability in Hong Kong. **Engineering Geology**, v. 51, p. 01 – 36, 1998.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J. C. Estabilidade de taludes. In: OLIVEIRA, A. M. D. S.; BRITO, S. N. A. D. (Ed.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, 2004. p.243-269.

ÁVILA, F.F. et al. The influence of land use/land cover variability and rainfall intensity in triggering landslides: a back-analysis study via physically based models. **Natural Hazards**, v.105, p. 1139–1161, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04324-x>.

BAAS A.C.W. Models in geomorphology. **International Encyclopedia of Geography People the Earth, Environment and Technology**, v.6, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/9781118786352.wbieg0882>.

BAUM; R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. **TRIGRS**: a Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. [S.I.]: U.S.Geological Survey, 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, version 2.0. [S.I.]: U.S.Geological Survey, 2008. 75 p.

BRITO JUNIOR, I. et al. Proposta de um programa de treinamento de desastres naturais considerando o perfil das vítimas. **Ambiente e Sociedade**, São Paulo, v. 17, n. 4, p. 153-176, Dec. 2014 . Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1414-753X2014000400009&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2014000400009&lng=en&nrm=iso). Acesso em: 13 Apr. 2021.

BRITO, M.M.; WEBER, E.J.; SILVA FILHO, L.C.P. Multi-criteria analysis applied to landslide susceptibility mapping. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 18, n. 14, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20502/www.ugb.org.br/rbg.v18i4.1117>.

BRUNSDEN, D.; PRIOR, D.B. **Slope instability**. Chichester: John Wiley, 1984. 620 p.

CAMARGO, F.F. et al. Mapeamento geomorfológico com imagens estereoscópicas digitais do sensor ASTER/Terra. **Geociências**, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 95-104, 2011.

CAMARINHA, P. I. M. **Vulnerabilidade aos desastres naturais decorrentes de deslizamentos de terra em cenários de mudanças climáticas na porção paulista da Serra do Mar**. 2016. 252 p. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos – SP, 2016.

CAMERA, C.A.S.; APUANI, T.; MASETTI, M. Mechanisms of failure on terraced slopes: the Valtellina case (northern Italy). **Landslides**, v. 11, p. 43–54, 2014. doi:10.1007/s10346-012-0371-3.

CARRARA, A.; GUZZETTI, F.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard, **Natural Hazard**, v. 20, p. 117–135, 1999.

CARSON, M. A.; KIRKBY, M. J. **Hillslope form and process**. Cambridge: Cambridge University Press, 1972. 475 p.

CASAGLI, N.; DAPPORTO, S.; IBSEN, M.L.; TOFANI, V.; VANNOCCI, P. Analysis of the landslide triggering mechanism during the storm of 20th–21st November 2000, in Northern Tuscany. **Landslides**, v. 3, p.13–21, 2006. doi:10.1007/s10346-005-0007-y.

CASCINI, L.; CIURLEO, M.; NOCERA, S. Soil depth reconstruction for the assessment of the susceptibility to shallow landslides in fine-grained slopes. **Landslides**, 2015. doi:10.1007/s10346-016-0720-8.

CENTRO NACIONAL DE GERENCIAMENTO DE RISCOS E DESASTRES - CENAD. **Anuário brasileiro de desastres naturais**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2014. 106 p.

CENTER FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS – CRED; UN OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION – UNISDR. **The human cost of weather-related disasters 1995-2015**. Brussels, BELGIUM: CRED, 2015. 27 p.

CENTER FOR RESEARCH ON THE EPIDEMIOLOGY OF DISASTERS – CRED; UN OFFICE FOR DISASTER RISK REDUCTION – UNISDR. **Economic losses, poverty and disasters 1998-2017**. Brussels, BELGIUM: CRED, 2018. 30 p.

CHAE, B. G.; PARK, H. J.; CATANI, F.; SIMONI, A.; BERTI, M. Landslide Landslide prediction, monitoring and early warning: a concise review of state-of-the-art. **Geosciences Journal**, v. 21, n. 6, p. 1033 – 1070, 2017.

CHIARADIA E.A., VERGANI C., BISCHETTI G.B. Evaluation of the effects of three European forest types on slope stability by field and probabilistic analyses and their implications for forest management. **Forest Ecology and Management**, v.370, p. 114-129, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.03.050>.

CHRISTOFOLLETI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher, 1999. 257 p.

CHORLEY, R.J. **Geomorphology and general systems theory**. [S.l.]: U. S. Geological Survey, 1962.

CHORLEY, R.J.; HAGGETT, P. (Ed.). **Models in geography**. Londres: Methuen, 1967. 816 p.

CHORLEY, R.J.; HAGGETT, P. (Org.). **Modelos integrados em geografia**. São Paulo: EDUSP/Livro Técnico, 1974. p. 1-22.

CHORLEY, R.J.; HAGGETT, P. **Modelos físicos e de informação em Geografia**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975. 260p.

CISLAGHI A.; RIGON E.; LENZI M.A.; BISCHETTI G.B. A probabilistic multidimensional approach to quantify large wood recruitment from hillslopes in mountainous-forested catchments. **Geomorphology**, v.306, p. 108-127, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.01.009>.

COELHO NETTO, A. L. **Surface hydrology and soil erosion in a tropical mountainous rainforest drainage basin, RJ**. 1985. Tese (Doutorado) - Katholieke University Leuven, Bélgica, 1985.

COLÂNGELO, A.C. Os mecanismos de compensação e o equilíbrio de forças na dinâmica dos materiais de vertente. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 9, p.13 – 20, 1995.

COLÂNGELO, A.C. Sobre os modelos de magnitude –frequência e de estabilidade de vertentes. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 16, p.11-23, 2005.

COLÂNGELO, A.C. Os parâmetros de resistência ao cisalhamento e a estabilidade das encostas no Planalto de Paraibuna e Serra de Caraguatatuba. **Revista do Departamento de Geografia**, v. esp., p.112-129, 2012.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SABESP. **Water reduction program not charged**. São Paulo: SABESP, 1993.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO – SABESP. **Leak tests**. 2016. Disponível em: <http://site.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaold=244>.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM. **Mapa geológico do Estado de São Paulo**: carta geológica do Brasil ao milionésimo – programa geológico do Brasil. São Paulo: Serviço Geológico do Brasil, 2006. Escala 1:750.000.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO - CMSP. **Memorial justificativo dos parâmetros geotécnicos do Projeto Básico da Linha 4 – Amarela**. São Paulo: Promon Engenharia, 1994.

COMPANHIA DO METROPOLITANO DE SÃO PAULO - CMSP. **Relatórios geológico-geotécnicos do projeto básico da Linha 6 – Laranja**. São Paulo: Empresa Brasileira de Engenharia de Infra-estrutura, 2011.

CUTTER, S.L.; BORUFF, B.J.; SHIRLEY, W. L. Social vulnerability to environmental hazards. **Social Science Quarterly**, v. 84, n. 2, p. 242-261, 2003.

DIAS, M.C.A.; SAITO, S.M.; ALVALÁ, R.C.S.; SELUCHI, M.E.; BERNARDES, T.; CAMARINHA, P.I.M.; NOBRE, C.A. Vulnerability index related to populations at risk for landslides in the Brazilian Early Warning System (BEWS). **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 49, e 101742, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2020.101742>.

DIETRICH, W. E.; DUNNE, T. The channel head. In: BEVEN, K.; KIRKBY, M. (Ed.). **Channel network hydrology**. Chichester: John Wiley, 1993. p.175-219.

DIETRICH, W.; MONTGOMERY, D. **SHALSTAB**: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential. [S.l.]: National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement (NCASI), 1998. p. 26 p.

DIETRICH, W. et al. A validation study of the shallow slope stability model, SHALSTAB, in forested lands of Northern California. **Watershed and Riverine Sciences Stillwater Ecosystem**, p. 59, 1998.

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

DIETRICH, W.E.; MCKEAN, J.; BELLUGI, D.; PERRON, T. The prediction of shallow landslide location and size using a multidimensional landslide analysis in a digital terrain model. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON DEBRIS FLOW HAZARDS MITIGATION: MECHANICS, PREDICTION, AND ASSESSMENT, 4., 2007, Chengdu, China. **Proceedings...** 2007. p. 10-13.

DINTWA, G.K.F.; LETAMO, K.N. Quantifying social vulnerability to natural hazards in Bostwana: na application of cutter model. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 37,2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101189>.

DUNNE, T. **Runoff production in a humid area**. [S.l.]: United Stated Department of Agriculture Report, 1970. 160p.

DYKES, A.P.; WELFORD, M.R. Landslides in the Tandayapa Valley, northern Andes, Ecuador: implications for landform development in humid and tectonically active mountain ranges. **Landslides**, v. 4, p.177–187, 2007. doi:10.1007/s10346-006-0076-6.

EMPRESA BRAISLEIRA DE PESQUISA AGROPECUPARIA – EMBRAPA. **Brazilian soil classification system**. 3.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Soils, 2013. 353p.

ESRI. **ArcGis Desktop, version 10.1**. Redlands, 2011.

FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis.**Patterns Recognition Letters**, v.27, n.8, p.861-874, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W.Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. **Engineering Geology**, v.102, p. 85–98, July 2008.

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

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

FERNANDES, N. F. Modelagem em geografia física: teoria, potencialidades e desafios. **Espaço Aberto**, v. 6, p. 1 – 25, 2016.

FIORI, A. P.; **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas:** aplicações na estabilidade de taludes. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. 576 p. ISBN 85-79-75184-5.

FRATTINI, P.; CROSTA, G.; CARRARA, A. Techniques for evaluating the performance of landslide susceptibility models. **Engineering Geology**,v. 111, p. 62-72, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.004>.

FREIRE, E. S. M. Movimentos coletivos de solos e rocha e sua moderna sistemática. **Construção**, v.8, p. 10-18, 1965.

FREITAS, C.M. et al. Vulnerabilidade socioambiental, redução de riscos de desastres e construção da resiliência: lições do terremoto no Haiti e das chuvas fortes na Região Serrana, Brasil. **Ciência e Saúde Coletiva**, v. 17, n. 6, p. 1577-1586, 2012.

G1. **Chuva deixa bairros isolados na zona norte e interdita SP-50 em São José**. G1, São José dos Campos, 8 mar. 2016. Disponível em: <http://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2016/03/chuva-deixa-bairros-isolados-na-zona-norte-e-interdita-sp-50-em-sao-jose.html>. Acesso em: 24 jan. 2019.

GAO, J. Identification of topographic settings conducive to landsliding from DEM in Nelson County, Virginia, U.S.A. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 18, p. 579 – 591, 1993.

GAUTAM, D. Assessment of social vulnerability to natural hazards in Nepal. **Natural Hazards in Earth Systems and Science**, v. 17, p. 2313–2320, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/nhess-17-2313-2017>.

GEO-SLOPE. **Slope/W for slope stability analysis: user's manual**. Alberta, Canada: GEO-SLOPE, 2015.

GUIDICINI, G., IWASA, O.Y. **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido**. São Paulo: 1976. 48p. (IPT nº 1080).

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 2.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1983. 194p.

GUIMARÃES, R.F.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. M.; FERNANDES, N.F.; GOMES, R.A.T.; CARVALHO JÚNIOR, O. A. Parametrization 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.

GUIMARÃES, R. F. et al. Movimentos de massa. In: FLORENZANO, T. G. (Ed.). **Geomorfologia: conceitos e tecnologias atuais**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008. Cap. 6, p. 159 - 184.

GURGUEIRA, M.D. **Correlação de dados geológicos e geotécnicos na bacia de São Paulo**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geotectônica) - Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2013.

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

GUZZETTI, F., PERUCCACCI, S.; ROSSI, M.; STARK, C. P. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. **Landslides**, v.5, n.1, p. 3–17, 2008.

GUZZETTI, F.; PERUCCACCI, S., ROSSI, M., AND STARK, C. P. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update, **Landslides**, v.5, n.1, p. 3–17, 2008.

HUMMELL, B. M. L.; CUTTER, S. L.; EMRICH, C.T. Social vulnerability to natural hazards in Brazil. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 7, p. 111 – 122, 2016.

HASEKIOĞULLARI, G.D.; ERCANOGLU, M. A new approach to use AHP in landslide susceptibility mapping: a case study at Yenice (Karabuk, NW Turkey). **Natural Hazards**, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0218-1>.

HIGHLAND, L.M., BOBROWSKY, P. **The landslide handbook: a guide to understanding landslides**. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2008. 129p.

HOSSAIN, M.N. Analysis of human vulnerability to cyclones and storm surges based on influencing physical and socioeconomic factors: evidences from coastal Bangladesh, **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 13, p. 66–75, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2015.04.003>.

HUANG, Q.X.; WANG, J.L.; XUE, X. Interpreting the influence of rainfall and reservoir infilling on a landslide. **Landslides**, 2015. doi:10.1007/s10346-015-0644-8.

HUMMELL, B.M.L.; CUTTER, S.L.; EMRICH, C.T. Social vulnerability to natural hazards in Brazil. **International Journal of Disaster Risk Science**, v. 7, p. 111 – 122, 2016.

HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. **Landslides**, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y>.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATISTICA - IBGE. **População estimada (2020) de São José dos Campos – SP**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-jose-dos-campos/panorama>. Acesso em: 13 jan. 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS - INPE. **TERRAVIEW 4.2.2**. São José dos Campos, SP: INPE, 2016. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/terraview>. Acesso em: 01 ago. 2016.

INSTITUTO DE PESQUISA, ADMINISTRAÇÃO E PLANEJAMENTO - IPPLAN. **Avaliação de áreas de risco do município de São José dos Campos: produto final**. São Paulo: IPT, 2018. 99p. Relatório completo do Plano Municipal de Redução de Risco (PMRR) Fase I e Fase II.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT (Org.). **Relatório técnico acerca da carta geotécnica do município de São José dos Campos**. São Paulo: IPT, 1996. (Relatório nº 34.645).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT (Org.). **Manual de ocupação de encostas**. São Paulo: IPT, 1991. 216 p.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT/CPRM. **Carta de suscetibilidade aos deslizamentos de terra e inundações do município de São José dos Campos – SP**. 2014. Disponível em: [http://www.sidec.sp.gov.br/producao/map\\_risco/pesqpdf3.php](http://www.sidec.sp.gov.br/producao/map_risco/pesqpdf3.php).

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation**: a special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK; New York, NY, USA: Cambridge University Press, s.d. 582 p.

IVERSON, R.M. Landslide triggering by rain infiltration. **Water Resources Research**, v. 36, n. 7, p. 1.897-1.910, 2000.

KAZTMAN, R. Notas sobre la medición de la vulnerabilidad social: borrador para discusión. In: TALLER REGIONAL, LA MEDICIÓN DE LA POBREZA, MÉTODOS Y APLICACIONES, 5., 2000. **Anales...** Mexico: BID-BIRF-CEPAL, 2000.

KIM, D.; IMA, S.; LEE, C.; WOOC, C. Modeling the contribution of trees to shallow landslide development in a steep, forested watershed. **Ecological Engineering**, v.61, p. 658-668, 2013.

KÖNING, T.; KUX, H. J. H.; MENDES, R. M. Shalstab mathematical model and WorldView-2 satellite images to identification of landslide-susceptible áreas. **Natural Hazards**, v. 97, n.3, p. 1127 – 1149, 2019.

LAMPIS, A. **Pobreza y riesgo medioambiental**: un problema de vulnerabilidad y desarrollo. 2010. Disponível em: [http://www.desenredando.org/public/varios/2010/2010-08-30\\_Lampis\\_2010\\_Pobreza\\_y\\_Riesgo\\_Medio\\_Ambiental\\_Un\\_Problema\\_de\\_De\\_sarrollo.pdf](http://www.desenredando.org/public/varios/2010/2010-08-30_Lampis_2010_Pobreza_y_Riesgo_Medio_Ambiental_Un_Problema_de_De_sarrollo.pdf).

LI, W.C.; DAI, F.C.; WEI, Y.Q.; WANG, M.L.; MIN, H.; LEE, L.M. Implication of subsurface flow on rainfall-induced landslide: a case study. **Landslides**, 2015. Doi:10.1007/s10346-015-0619-9.

LISTO, F.L.R.; VIEIRA, B.C.: Análise de condicionantes topográficos como subsídio para avaliação de áreas de risco a escorregamentos rasos. **Revista de Geografia**, p. 174–187, 2010.

LISTO, F.L.R.; VIEIRA, B.C. Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil. **Geomorphology**, v. 169 – 170, p. 30 – 44, 2012.

LISTO, F. L. R. **Propriedades geotécnicas dos solos e modelagem matemática de previsão a escorregamentos translacionais rasos**. 2015, 167 p. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 2015.

LISTO, F.L.R.; GOMES, M. C. V.; VIEIRA, B. C. Avaliação da variação do fator de segurança com o modelo TRIGRS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, n.1, p. 207 – 220, 2018.

MACEDO, E.S.; OGURA, A.T.; SANTORO, J. Defesa civil e escorregamentos: o plano preventivo do litoral paulista. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 9., 1999, São Pedro. **Anais eletrônicos...** 1999. CD-ROM.

MACEDO, E.S.; OGURA, A.T.; SANTORO, J. O que é um plano de contingência ou plano preventivo de defesa civil. In: CARVALHO, C.S.; GALVÃO, T. (Org.). **Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas: guia para elaboração de políticas municipais**. Brasília: Ministério das Cidades, 2006. p. 78-91.

MACEDO, E.S.; SANTORO, J.; CERRIL, L.E.S.; OGURA, A.T.; SANTORO, J. Plano preventivo de defesa civil (PPDC) para escorregamentos no trecho paulista da Serra do Mar, SP. In: SANTOS, A.R. (Org.). **Geologia de engenharia: conceitos, métodos e prática**. São Paulo: ABGE/IPT, 2002. p. 42-46.

MACIEL FILHO, C.L. **Introdução à geologia de engenharia**. Santa Maria/RS - Brasília/DF: UFSM – CPRM., 1994. 284p.

MAFFRA, C.; SOUSA, R.; SUTILI, F.; PINHEIRO, R. The effect of roots on the shear strength of texturally distinct soils. **Floresta Ambiente**, v.26, n.3, p.11, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.101817>.

MARANDOLA JUNIOR, E.; HOGAN, D.J. As dimensões da vulnerabilidade. **São Paulo em Perspectiva**, v. 20, n. 1, p. 33-43, 2006.

MARENGO, J. A. **Impactos de extremos relacionados com o tempo e o clima: impactos sociais e econômicos**. São José dos Campos: INPE, 2009.

MENDES, R. M.; VALÉRIO FILHO, M. Real-time monitoring of climatic and geotechnical variables during landslides on the slopes of Serra do Mar and Serra da Mantiqueira (São Paulo State, Brazil). **Engineering**, v. 7, p. 140 - 159, 2015.

MENDES, R. M.; ANDRADE, M. R. M.; GRAMINHA, C. A.; PRIETO, C. C.; ÁVILA, F. F.; CAMARINHA, P. I. M. Stability analysis on urban slopes: case study of na anthropogenic-induced landslide in São José dos Campos, Brazil. **Geotechnical and Geological Engineering**, July 2017a.

MENDES, R. M.; ANDRADE, M. R. M.; TOMASELLA, J.; MORAES, M. A. E.; SCOFIELD, G. B. Understanding shallow landslides in Campos do Jordão Municipality – Brazil: disentangle the anthropic effects from natural causes in the disaster of 2000. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, 2017b.

MENDES, R.M. et al. Proposição de limiares críticos ambientais para uso em sistema de alertas de deslizamentos. **Revista do Departamento de Geografia**, v..40, p. 61-77, 2020.

MENDES, J.S.; TAVARES, A.; SANTOS, P. Social vulnerability and local level assessments: a new approach for planning, **International Journal of Disaster Resilience In the Built Environment**, v.11, n.1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1108/IJDRBE-10-2019-0069>.

MICHEL, G.P. **Modelagem de estabilidade de encostas com consideração do efeito da vegetação**. 2013. 152 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Florianópolis, SC, 2013.

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**, 2014.

MOGHADAS, M.; ASADZADEH, A.; VAFEIDIS, A.; FEKETE, A.; KOTTER, T. A multi-criteria approach for assessing urban flood resilience in Tehran, Iran. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 35, e101069, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2019.101069>.

MOHANTY, M.; HUSSAIN, M.; MISHRA, M.; KATTEL, D.B.; PAL, I. Exploring community resilience and early warning solution for flash floods, debris flow and landslides in conflict prone villages of Badakhshan, Afghanistan, **International Journal of Disaster Risk Reduction**, v. 33, p. 5–15, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.07.012>.

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.; SULLIVAN, K.; GREENBERG, H. Regional test of a model for shallow. **Hydrological Processes**, v. 12, p. 943 - 955, 1998.

NOCENTINI, M.; TOFANI, V.; GIGLI, G.; FIDOLINI, F.; CASAGLI, N. Modeling debris flows in volcanic terrains for hazard mapping: the case study of Ischia Island (Italy). **Landslides**, v. 12, p. 831–846, 2015. doi:10.1007/s10346-014-0524-7.

OLIVEIRA, J.B.; CAMARGO, M.N.; ROSSI, M.; CALDERANO FILHO, B. **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas, Instituto Agrônomo/EMBRAPASolos, 1999. 64p. Inclui mapas.

PACK, R.T.; TARBOTON, D.G.; GOODWIN, C.N. The SINMAP approach to terrain stability mapping. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION OF ENGINEERING GEOLOGY, 8., 1998, British Columbia, Vancouver. **Proceedings...** 1998.

PACK, R.T.; TARBOTON, D.G.; GOODWIN; C.N. Assessing terrain stability in a GIS using SINMAP. In: ANNUAL GIS CONFERENCE, 15., 2001, Vancouver, British Columbia. **Proceedings...** 2001.

PAGANO, L.; PICARELLI, L.; RIANNA, G.; URCIUOLI, G. A simple numerical procedure for timely prediction of precipitation induced landslides in unsaturated pyroclastic soils. **Landslides**, v.7, p.273–289, 2010. doi:10.1007/s10346-010-0216-x.

PANDEY, R.; BARDSLEY, D.K. Social-ecological vulnerability to climate change in the Nepali Himalaya. **Applied Geography**, v. 64, p. 74-86, 2015.

PELOGGIA, A. **O homem e o ambiente geológico: geologia, sociedade e ocupação urbana no município de São Paulo**. São Paulo: Xamã, 1998.

PERSICHILLO, M.G.; BORDONI, M.; MEISINA, C. The role of land use changes in the distribution of shallow landslides. **Science of th Total Environment**, v. 574, p. 924-937, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.125>.

PRIETO, C.C. **Previsão de deslizamentos em encostas por meio de modelagem matemática: estudo de caso na bacia do córrego Piracuama no município de Campos do Jordão, SP**. Tese (Doutorado em Ciência do Sistema Terrestre) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

PIZZATO, E.; GRAMANI, M. F. Mapeamento geotécnico aplicado aos riscos geológicos de movimentos gravitacionais de massa. In: GUNTHER, W. R.; CICCOTTI, L.; RODRIGUES, A. C (Org.). **Desastres: múltiplas abordagens e desafios**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. Cap. 13, p. 211 – 220.

PROGRAMA DAS NAÇÕES UNIDAS PARA O DESENVOLVIMENTO - PNUD. **Atlas do desenvolvimento humano nas regiões metropolitanas brasileiras: Baixada Santista, Campinas, Maceió e Vale do Paraíba**. [S.l.: s.n.], 2015. 67 p.

QUINTA FERREIRA, M.; LEMOS, L.J.L.; PEREIRA, L.F.M. Influência da precipitação na ocorrência de deslizamentos em Coimbra, nos últimos 139 anos. **Revista Portuguesa de Geotecnia**, Lisboa, n 104, p. 17 – 30, 2005.

RAMOS, A. M.; ALVES, L; MARENGO, J. A.; LUIZ. R. A. F.; DINIZ, A. F. **Anuário climático do Brasil – 2019**. São José dos Campos: INPE, 2020.

ROSS, J. S.; MOROZ, I. C. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 10, p. 41-58, 2011.

SÃO PAULO. SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. COORDENADORIA DE PLANEJAMENTO AMBIENTAL E ESTRATÉGICO E EDUCAÇÃO AMBIENTAL - SMA/CPLA. **ZEE zoneamento ecológico-econômico**: base para o desenvolvimento sustentável do estado de São Paulo. 2012. Disponível em: [http://www.ambiente.sp.gov.br/cpla/files/2013/03/Seminario\\_ZEE\\_web.pdf](http://www.ambiente.sp.gov.br/cpla/files/2013/03/Seminario_ZEE_web.pdf).

SELUCHI M.E.; CHOU S.C. Synoptic patterns associated with landslides events in the Serra do Mar, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 98, p. 67–77, 2009.

SALVATI, P.; PETRUCCI, O.; ROSSI, M.; BIANCHI, C.; PASQUA, A.A.; GUZZETTI, F. Gender, age and circumstances analysis of flood and landslide fatalities in Italy. **Science of the Total Environment**, n. 610/611, p.867–879, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.064>.

SANTORO, J.; MENDES, R. M.; PRESSINOTTI, M. M. N.; MANOEL, G. R. Correlação entre chuvas e deslizamentos ocorridos durante a operação do plano preventivo de defesa civil em São Paulo, SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA E AMBIENTAL, 7, 2010. **Anais...** Maringá, p. 1 – 15.

SANTOS, C. R. **Análise paramétrica da infiltração e sua influência na estabilidade de taludes em solo não saturado**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) - Universidade de São Paulo, São Carlos - SP, 2004.

SCHMALTZ, E.M.; STEGER, S.; GLADE, T. The influence of forest cover on landslide occurrence explored with spatio-temporal information. **Geomorphology**, v. 290, p. 250-264, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.04.024>.

SCHMIDT, K.M.; ROERING, J.J.; STOCK, J.D.; DIETRICH, W.E.; MONTGOMERY, D.R.; SCHAUB, T. The variability of root cohesion as an influence on shallow landslide susceptibility in the Oregon Coast Range. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 38, n. 5, 2001. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1139/t01-031>.

SELBY, M. J. **Hillslope materials and processes**. New York: Oxford University Press, 1982. 451 p.

SELUCHI, M.E.; CHOU, S.C. Synoptic patterns associated with landslides events in the Serra do Mar, Brazil. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 98, p. 67–77, 2009.

SEPÚLVEDA, S. A.; PETLEY, D. N. Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 15, p. 1821-1833, 2015.

SIDLE, R.C.; PEARCE, A.J.; O'LOUGHLIN, C.L. **Hillslope stability and land use**. London: American Geophysical Union, 1985.

SIDLE, R.C. A theoretical model of the effects of timber harvesting on slope stability. **Water Resources Research**, v.28. p. 1897–1910, 1992.

SILVEIRA, C. T.; FIOIR, A. P.; FERREIRA, A. M.; FELIPE, R. S.; KEPEL FILHO, J. L.; FOLADOR, R. M. Análise do fator de segurança da estabilidade das vertentes na bacia do Rio Jacareí, Serra do Mar Paranaense. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v. 13, n. 3, p. 287 - 297, 2012.

SMIT, B.; WANDEL, J. Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. **Global Environmental Change**, v. 16, n. 3, p. 282-292, 2006.

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. E. S.; ROCHA, M. C. M. Modelamento numérico da análise de correlação entre chuvas e escorregamentos aplicado às encostas da Serra do Mar no município de Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5., 1987. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1987. p. 237-248.

TEIXEIRA, M.; BATEIRA, C; MARQUES, F.; VIEIRA, B. Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo catchment, NW of Portugal. **Landslides**, v. 12, p. 455 - 468, 2015.

TOMINAGA L. K. Desastres naturais: por que ocorrem? In: TOMINAGA, L.K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (Org.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. Cap. 1, p. 11-24.

U. K. DEPARTMENT FOR INTERNATIONAL DEVELOPMENT - DFID. **Sustainable livelihoods guidance sheets**. London: DFID, 1999.

VALÉRIO FILHO M.; MENDES R. M.; FARIA D. G. M.; FANTIN M.; BERTOLDO M. A.; MELO F. N.; SILVA M. F.; CUNHA R. P. **Mapeamento das áreas de riscos associados a escorregamentos de encostas no município de São José dos Campos - SP**. São José dos Campos: UNIVAP/PMSJC, 2014. 60 p. Relatório final.

VAN GENUCHTEN, M.T.h. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 44, p. 892–898, 1980.

VARNES, D.J. Slope movement types and processes. In: SCHUSTER, R.L.; KRIZEK, R.J. (Org.). **Landslides, analysis and control, special report 176**: Transportation research board, National Academy of Sciences. Washington, DC, 1978, p. 11 – 33.

VARNES, D.J.; SAVAGE, W. **The slungullion earth flow: a large-scale natural laboratory**. U.S. Geological Survey Bulletin 2130. 1996.

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

VIEIRA, B.C.; FERNANDES, N.F.; AUGUSTO FILHO, O. Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 10, p. 1829 – 1837, 2010.

VIEIRA, B. C.; 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 a 174, 2015.

VIEIRA, B. C.; MARTINS, T. D. Modelos em geografia física: conceitos e aplicações na previsão de escorregamentos. **Geosp – Espaço e Tempo**, v. 20, n. 1, p. 194- 206, 2016. ISSN 2179-0892.

VIEIRA, B. C.; MARTINS, T. D.; LISTO, F. L. R. Previsão de escorregamentos rasos utilizando modelos matemáticos em bases físicas. In: GUNTHER, W. R.; CICCOTTI, L.; RODRIGUES, A. C. **Desastres: múltiplas abordagens e desafios**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017. Cap. 14, p. 231 – 242.

WORKING PARTY ON WORLD LANDSLIDE INVENTORY - WP/WLI. **Multilingual landslide glossary**. Richmond, B. C., Canada: BiTech Publishers, 1993. 59 p.

ZAIDAN, R. T.; FERNANDES, N. F. Zoneamento de susceptibilidade a escorregamentos em encostas aplicado à bacia de drenagem urbana do Córrego do Independência - Juiz de Fora (MG). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 10, p. 57-76, 2009.