

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA

BIANCA CARVALHO VIEIRA

**Dinâmica Espacial dos Processos de Escorregamentos e de
Corridas de Detritos na Serra do Mar**

São Paulo
2022

BIANCA CARVALHO VIEIRA

**Dinâmica Espacial dos Processos de Escorregamentos e de
Corridas de Detritos na Serra do Mar**

Tese apresentada ao Departamento de Geografia da
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas
da Universidade de São Paulo, como requisito parcial
para obtenção do título de Livre Docente.

São Paulo
2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na Publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo

V657d VIEIRA, Bianca Carvalho
Dinâmica Espacial dos Processos de Escorregamentos
e de Corridas de Detritos na Serra do Mar / Bianca
Carvalho VIEIRA - São Paulo, 2022.
154 f.

Livre-docência- Faculdade de Filosofia, Letras e
Ciências Humanas da Universidade de São Paulo.
Departamento de Geografia. Área de concentração:
Geografia Física.

1. Geografia Física. 2. Geomorfologia Aplicada. 3.
Modelos Matemáticos. 4. Geografia do Solo. 5.
Geoprocessamento.

BIANCA CARVALHO VIEIRA

**Dinâmica Espacial dos Processos de Escorregamentos e de
Corridas de Detritos na Serra do Mar**

Tese apresentada ao Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo como requisito parcial a obtenção do título de Livre Docência

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Dedico esta Tese à Professora Lylian Coltrinari.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos não serão nominais para não cometer nenhuma falha ou injustiça. São 15 anos entre o final do Doutorado e esta Tese. Muito tempo, muitas pessoas, muitos amigos, muitos lugares, muitas expectativas e frustrações.

Tenho certeza que a pesquisa científica não se faz individualmente. Ela é um processo coletivo, de troca de ideias, de informações e de conhecimento. Por isso, agradeço aos meus colegas, pesquisadores, amigos e especialmente meus alunos de graduação, iniciação científica, mestrado e doutorado. Obrigada pela confiança, parceria e troca.

Agradeço o apoio financeiro que recebi nos últimos anos por meio de auxílios e bolsas de estudo da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico e da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

Meu especial agradecimento aos funcionários e professores do Departamento de Geografia e do Programa de Pós-Graduação em Geografia Física (PPGF) da Universidade de São Paulo.

Tiago ❤️, Lucy 🐶, Apolo 🐶 e Lino 🐶. Meus amores!

RESUMO

BIANCA CARVALHO VIEIRA. Dinâmica Espacial dos Processos de Escorregamentos e de Corridas de Detritos na Serra do Mar. 2022. 154f. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 2022.

Esta Tese apresenta as pesquisas realizadas como docente do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo. Pesquisas estas que tiveram como eixo norteador o entendimento da dinâmica espacial dos escorregamentos translacionais rasos e das corridas de detritos na Serra do Mar. Inicialmente foi feita uma breve descrição dos principais métodos de avaliação da suscetibilidade considerando, por exemplo, diferentes escalas de análise. Posteriormente é apresentado um histórico das principais políticas públicas de redução de desastres no Brasil, com exemplos de estudos de mapeamento e de análise da suscetibilidade, risco e vulnerabilidade, culminando com uma revisão sobre os modelos matemáticos em bases físicas mais utilizados no Brasil. Soma-se a isso uma apresentação de todas as pesquisas desenvolvidas em quatro principais áreas de estudo: Serra de Cubatão; Serra de Caraguatatuba; Vale do Ribeira de Iguape e Planalto de Paraitinga-Paraibuna, onde foram utilizados modelos em bases físicas, estatísticos e heurísticos em conjunto com investigações em campo das propriedades físicas e hidrológicas dos solos. Nos capítulos finais são feitas considerações sobre os resultados desse conjunto de estudos e uma análise crítica sobre as pesquisas, com o apontamento de lacunas e indicação de trabalhos futuros.

Palavras-Chave: Modelos matemáticos em bases físicas. modelos heurísticos. propriedades físicas dos solos.

ABSTRACT

BIANCA CARVALHO VIEIRA. *Spatial dynamics of shallow landslides and debris flows in Serra do Mar*. 2022. 154f. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, 2022.

This Thesis presents the research carried out as a professor at the Department of Geography of the University of São Paulo. These researches were guided by the understanding of the spatial dynamics of shallow landslides and debris flows in Serra do Mar. Initially, a brief description of the main susceptibility assessment methods was conducted, considering, for example, different scales of analysis. Subsequently, a history of the main public policies for disaster reduction in Brazil is presented, with examples of mapping studies and analysis of susceptibility, risk and vulnerability, culminating in a review of the mathematical physically based models most applied in Brazil. Added to this is a presentation of all the research carried out in four main study areas: Serra de Cubatão; Serra de Caraguatatuba; Vale do Ribeira de Iguape e Planalto de Paraitinga-Paraibuna, where physically based mathematical model, as well statistical and heuristic models were used in conjunction with field investigations of the physical and hydrological soil properties. In the final chapters, considerations are made on the results of this set of studies and a critical analysis of the research, pointing out gaps and future works.

Keywords: Physically based mathematical model. heuristic models. physical soil properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Eventos de maior magnitude na Serra do Mar. Destacam-se as áreas apresentadas nesta Tese.	15
Figura 2: Esquema simplificado da avaliação espacial do risco a escorregamentos. Adaptado de Van Westen; Van Asch; Soeters (2006)	19
Figura 3: Linha do tempo de ações, programas e políticas públicas criadas em níveis municipal, estadual e federal para redução de desastres naturais, além de ações internacionais propostas e lideradas pelas Nações Unidas. Elaborada pela autora.	27
Figura 4: (A) Estados com municípios com setorização de risco geológico. (B) Estados com Cartas de Suscetibilidade a Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações. Fonte: http://www.cprm.gov.br	37
Figura 5: Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação do município de Caraguatatuba, SP (CPRM, 2014a). Carta Original em alta resolução https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22116	38
Figura 6: Exemplo de uma setorização de risco no município de São Luiz do Paraitinga. Fonte: (CPRM, 2014a).....	40
Figura 7: Seções esquemáticas das condições limites do modelo TRIGRS. (A) profundidade infinita (condutividade hidráulica satura vertical é relativamente uniforme com a profundidade), e (B) condição limite de profundidade finita (horizonte superficial é mais permeável que os inferiores). Modificada de Baum; Savage; Godt (2002).	46
Figura 8: Mapa de Suscetibilidade das bacias dos Rios Quitite e Papagaio desenvolvido por Guimarães (2000). Fonte: Fernandes et al. (2004)	50
Figura 9: Chuvas diárias e chuvas acumuladas do evento dos dias 22 e 23 de janeiro de 1985 nas Serras de Cubatão e de Paranapiacaba. Fonte de dados: DAEE. Posto E3-153.	56
Figura 10: Escorregamentos generalizados na Serra do Mar em Cubatão. Fonte: IPT.....	56
Figura 11: Exemplo da técnica de mapeamento utilizada para definição das cicatrizes dos escorregamentos, desconsiderando as áreas de transporte e de deposição (B e C). Fonte: Vieira et al. (2018).....	57
Figura 12: Mapas de Suscetibilidade gerados pelo modelo TRIGRS. Fonte: Vieira et al. (2018)	59
Figura 13: Chuvas diárias e chuvas acumuladas do evento dos dias 17 e 18 de março de 1967 na Serra de Caraguatatuba. Fonte de dados: DAEE. Postos E2-042 e E2-043	62
Figura 14: Imagens de alguns pontos mais afetadas no município de Caraguatatuba em 1967. (A) Visão geral dos escorregamentos nas encostas e depósitos de corridas de detritos; (B) e (C) escorregamentos na Rodovia dos Tamoios; (D) Ponte provisória no Rio Santo Antônio (E) Santa Casa; (F) e (G) Escorregamentos junto à Rodovia. Fonte: Acervos Olga Cruz e Prefeitura municipal de Caraguatatuba.	63
Figura 15: Coleta das amostras deformadas e indeformadas e valores da condutividade hidráulica saturada. Fonte: Vieira; Ferreira; Gomes (2015).....	65
Figura 16: Perfil com variação da K_{sat} e da granulometria na bacia do rio Guaxinduba. Fonte: Gomes (2012); Gomes e Vieira (2016).	66

Figura 17: Mapa litológico e de coesão da bacia do rio Santo Antônio. Fonte dos dados litológicos (CPRM) Fonte: Autora.	68
Figura 18: Mapas de suscetibilidade das bacias BSA, BG e MG nos cenários 1 e 2. Fonte: Autora.....	69
Figura 19: Frequência e Concentração das Cicatrizes nos cenários 1 e 2 das bacias dos rios Guaxinduba, Santo Antônio e Massaguaçu. Fonte Autora.....	70
Figura 20: Mapa de suscetibilidade da Bacia do Rio Santo Antônio (Cenário 3). Fonte: Autora.	71
Figura 21: Mapa de Suscetibilidade a escorregamentos rasos do município de Caraguatatuba. Fonte: Dias (2019); Dias et al. (2021). Escorregamento ocorrido em março de 2017 na encosta do morro Santo Antônio que foi identificada como alta suscetibilidade.....	73
Figura 22: Inventário dos depósitos das bacias dos rios Santo Antônio, Guaxinduba, Ribeirão da Aldeia e Pau d'Alho. Fonte de dados: Dias (2021, 2018).	75
Figura 23: Mapa da vulnerabilidade dos elementos de risco às corridas de detritos na bacia do Guaxinduba. Fonte: Matos (2014); Matos; Vieira; Ferreira (2017).	79
Figura 24: Localização das bacias hidrográficas e dos pontos onde foram coletadas amostras para determinação das taxas de denudação por meio do ¹⁰ Be. Fonte de dados: Gomes (2016) e Gomes et al. (2022).	80
Figura 25: Chuvas diárias e chuvas acumuladas do evento do dia 13 de janeiro de 2014 nos municípios de Itaóca e Apiaí. Fonte de dados: DAEE. Posto F5-019.....	83
Figura 26: Escorregamentos rasos e fluxos de detritos entre os municípios de Itaóca e Apiaí. (B) depósitos contendo sedimentos mais finos e lenhosos e (C) depósitos de contendo blocos e material lenhoso. Fonte: Prefeitura Municipal de Itaóca.....	83
Figura 27: Inventário semi-automático dos escorregamentos e das corridas de detritos de 2014. Fonte de dados Bonini; Vieira; Martins, [s.d.].....	85
Figura 28: Levantamentos das propriedades físicas e químicas dos mantos de intemperismo.	87
Figura 29: Perfil de intemperismo em granito com definição de três zonas (residual maduro, residual jovem e saprolito). Fonte: Coelho; Gramani; Vieira (2022).....	89
Figura 30: Vulnerabilidade final dos municípios de Apiaí, Itaóca e Ribeira. Fonte dos dados: Souza (2021).....	96
Figura 31: Centro do município de Itaóca fortemente afetado pelas inundações bruscas em 2014 e a mesma localização em 2019. Fonte: Prefeitura do município de Itaóca (2014) e Autora. .	97
Figura 32: Chuvas diárias e chuvas acumuladas do evento do dia 01 de janeiro de 2010 nos municípios de São Luiz do Paraitinga e Lagoinha. Fonte de dados: Agência Nacional de Águas. Posto 2345065.	99
Figura 33: (A) Escorregamentos nas encostas em São Luiz do Paraitinga. (B) solapamento de margens; (C) e (D) inundações na parte central do município. Fonte: IPT (2010).....	100
Figura 34: Inventário dos escorregamentos nos municípios de São Luiz do Paraitinga e Lagoinha. Fonte dos dados: Oliveira (2019); Oliveira; Vieira; Ross (2018).	101
Figura 35: Mapa de fragilidade ambiental de base heurística, Curva ROC e Taxa de sucesso para o modelo heurístico (BONINI, 2020).	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Métodos de avaliação da suscetibilidade, perigo e risco, suas características principais, vantagens e desvantagens.	20
Tabela 2: Exemplos de métodos quantitativos apropriados para cada escala, dados que podem ser incluídos na avaliação do perigo e tipo de resultado do perigo.	21
Tabela 3: Combinações mais usadas para avaliações de perigo e risco (utilizando SIG) para escalas 1:10.000 e 1:50.000.	25
Tabela 4: Informações básicas dos dados topográficos, geotécnicos e hidrológicos dos modelos SHALSTAB, SINMAP e TRIGRS.	44
Tabela 5: Aplicação dos modelos TRIGRS, SHALSTAB e SINMAP no Brasil, considerando a escala, a resolução do Modelo Digital de Elevação e o índice de acerto.	48
Tabela 6: Valores de parâmetros geotécnicos usados nas simulações de cenários de suscetibilidade.	58
Tabela 7: Valores dos parâmetros do solo utilizados na geração de cenários de suscetibilidade das bacias dos rio Santo Antônio (BSA), Guaxinduba (BG) e Massaguaçu (BM).	68
Tabela 8: Classificação da magnitude das corridas de detritos	77
Tabela 9: Seleção dos critérios que afetam a vulnerabilidade.	78
Tabela 10: Valores de Pico de vazão e velocidade para as seções da bacia do rio Guarda-Mão.	91
Tabela 11: Índices para avaliação da vulnerabilidade final nos municípios de Itaóca, Apiaí e Ribeira.	95

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E EIXO NORTEADOR	13
2. ESTRUTURA DA TESE.....	17
3. PRINCIPAIS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE	18
4. SUSCETIBILIDADE, PERIGO, RISCO E VULNERABILIDADE NO BRASIL.....	26
4.1 Políticas Públicas de Redução de Desastres	26
4.2 Mapas de Suscetibilidade, Perigo e Vulnerabilidade.....	37
4.3 Modelos em Bases Físicas	43
4.3.1 Aspectos Gerais.....	43
4.3.2 Modelos em Bases Físicas utilizados no Brasil	47
4.3.3 Modelo SHALSTAB no Brasil	49
4.3.5 Modelo TRIGRS no Brasil.....	53
5. MOVIMENTOS DE MASSA NA SERRA DO MAR PAULISTA	55
5.1 Serra de Cubatão	55
5.1.1 Aspectos Gerais do Evento de 1985.....	55
5.1.2 Mapas de Suscetibilidade a Escorregamentos Rasos	58
5.2 Serra de Caraguatatuba	61
5.2.1 Aspectos Gerais do Evento de 1967.....	61
5.2.2 Escorregamentos Rasos: Propriedades Pedológicas e Hidrológicas.....	64
5.2.3 Mapas de Suscetibilidade a Escorregamentos	66
5.2.4 Corridas de Detritos: Inventário e Avaliação da Suscetibilidade	74
5.2.5 Corridas de Detritos: Vulnerabilidade das Construções	78
5.2.6 Corridas de Detritos: Taxas de Denudação a longo-termo	80
5.3 Vale do Rio Ribeira: Itaóca e Apiaí	82
5.3.1 Aspectos Gerais do Evento de 2014.....	82
5.3.2 Inventários de Escorregamentos Rasos e de Corridas de Detritos	84
5.3.3 Escorregamentos Rasos: Propriedades Físicas e Químicas dos Solos	86
5.3.4 Corridas de Detritos: Suscetibilidade e Magnitude.....	90
5.3.5 Corridas de Detritos: Vulnerabilidade da População	93

5.4 São Luiz do Paraitinga	98
5.4.1 Aspectos Gerais do Evento de 2009/2010.....	98
5.4.2 Suscetibilidade a Escorregamentos	100
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
7. ANÁLISE CRÍTICA E PERSPECTIVAS FUTURAS.....	107
REFERENCIAS	109
ARTIGOS PUBLICADOS.....	135

1. INTRODUÇÃO, OBJETIVOS E EIXO NORTEADOR

Movimentos de massa, inundações e secas extremas são os principais processos associados às áreas de risco no Brasil, sendo que o número de mortes e os maiores danos estão relacionados à ocorrência de movimentos de massa. De acordo com a Base Territorial Estatística de Área de Risco (BATER), cerca de 8,2 milhões de pessoas vivem em áreas de risco no Brasil, concentradas em grande parte nas regiões Sudeste (4,2 milhões) e Nordeste (2,9 milhões) (IBGE, 2018). Em relação à vulnerabilidade, são cerca de 6 milhões de pessoas em condições de vulnerabilidade no país. Deste total, mais de 70% vivem em vulnerabilidade muito alta e/ou alta, sendo que as principais capitais das regiões sudeste e nordeste respondem por 40% da população estimada para estas maiores vulnerabilidades (ASSIS DIAS et al., 2020).

Embora muitas das áreas de risco a movimentos de massa se concentrem em cidades e grandes capitais, em função da associação entre o uso do solo e condições naturais (p. ex. relevo, solos, elevados índices pluviométricos), a Serra do Mar ainda se apresenta como um dos domínios geomorfológicos com maior ocorrência de escorregamentos e corridas de detritos e, por isso, concentra também maior volume de pesquisas sobre a temática.

De acordo com a compartimentação geológico-estrutural proposta por HEILBRON et al. (2004), a Serra do Mar faz parte do chamado Sistema Orogênico da Mantiqueira, um cinturão orogênico Neoproterozóico situado no sul e sudeste do Brasil, com altitudes superiores a 2.000m. Trata-se de um conjunto de escarpas festonadas que constitui um relevo montanhoso da borda atlântica da América do Sul, com mais de 1,500 km de extensão e orientação predominante ENE (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998; GONTIJO-PASCUTTI et al., 2012). Devido suas singulares e imponentes feições geomorfológicas, resultado de um conjunto de processos geológicos desde o Cretáceo, foi chamado de “relevo mais atormentado do país” (ALMEIDA; CARNEIRO, 1998).

Os processos erosivos estão diretamente vinculados aos eventos de altas pluviosidades e/ou episódios prolongados de chuvas, envolvendo intensa participação de movimentações de massa, sobretudo escorregamentos rasos e corridas de detritos. Sobre movimentos de massa propriamente ditos, muito pouco havia sido pesquisado até meados da década de 1940, embora vários acidentes já tivessem ocorrido, como por exemplo, nos morros de Santos, em 1928, e durante e após a construção de estradas de ferro e rodovias (p. ex. Santos-Jundiaí) (VARGAS, 1999; VIEIRA; GRAMANI, 2015). A partir da década de 1960 foram registrados importantes

eventos generalizados que causaram transtornos em nível nacional, gerando milhões de dólares em prejuízos econômicos, milhares de vítimas fatais e desabrigados (**Figura 1**).

Entre os anos de 1960 e 2014 foram registrados eventos pontuais e generalizados em diferentes setores da Serra do Mar em São Paulo (CERRI et al., 2017; DE PLOEY; CRUZ, 1979; KANJI; CRUZ; MASSAD, 2008; MASSAD et al., 2000; SELUCHI; CHOU, 2009; TATIZANA et al., 1975), no Rio de Janeiro (AVELAR et al., 2013; BARATA, 1969; COELHO NETTO et al., 2011; COSTA NUNES, 1969; JONES, 1973; MARQUES; COELHO NETTO; SATO, 2018), em Santa Catarina (VIANNA, 2009), na Serra do Mar Paranaense (MARTINS et al., 2017a) e no litoral sul paulista (BATISTA; JULIEN, 2019; BROLLO et al., 2015; FERREIRA et al., 2016).

Diante deste cenário, várias áreas do conhecimento buscam o melhor entendimento sobre a dinâmica, sobretudo espacial, dos movimentos de massa. Sabe-se que tais processos são intrínsecos a própria evolução do relevo, atuando como agentes exógenos que modelam a paisagem, modificando formas do relevo e criando outras (CROZIER, 2010; PENCK, 1953). Ao mesmo tempo, são “responsáveis” por inúmeros danos sociais. Deste modo, é necessário conhecer previamente os aspectos físicos de um determinado terreno para sua ocupação, com avaliações precisas de suas características, na tentativa de mitigar e evitar ocupações em áreas que apresentam perigo (TRICART, 1977).

Buscando compreender a dinâmica espacial dos escorregamentos e das corridas de detritos na Serra do Mar, esta Tese apresenta uma síntese das pesquisas realizadas nos últimos 17 anos como docente do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo. São aqui descritas pesquisas desenvolvidas em quatro áreas de estudo (Serra de Cubatão; Serra de Caraguatatuba; Vale do Ribeira e Planalto de São Luiz do Paraitinga), que envolveram alunos da graduação e da pós-graduação¹, professores e pesquisadores de institutos e universidades no Brasil e no exterior. Grande parte dos projetos teve apoio financeiro do Departamento de Geografia, do Programa de Pós-Graduação em Geografia Física da USP e das principais agências de fomento (FAPESP, CNPq e CAPES). Os resultados de projetos de pesquisas foram divulgados nos principais eventos científicos (nacionais e internacionais) e publicados em periódicos indexados e capítulos de livros.

¹ 30 iniciações científicas/Trabalhos Graduação Individuais; 5 doutorados e 14 mestrados sob a minha orientação.

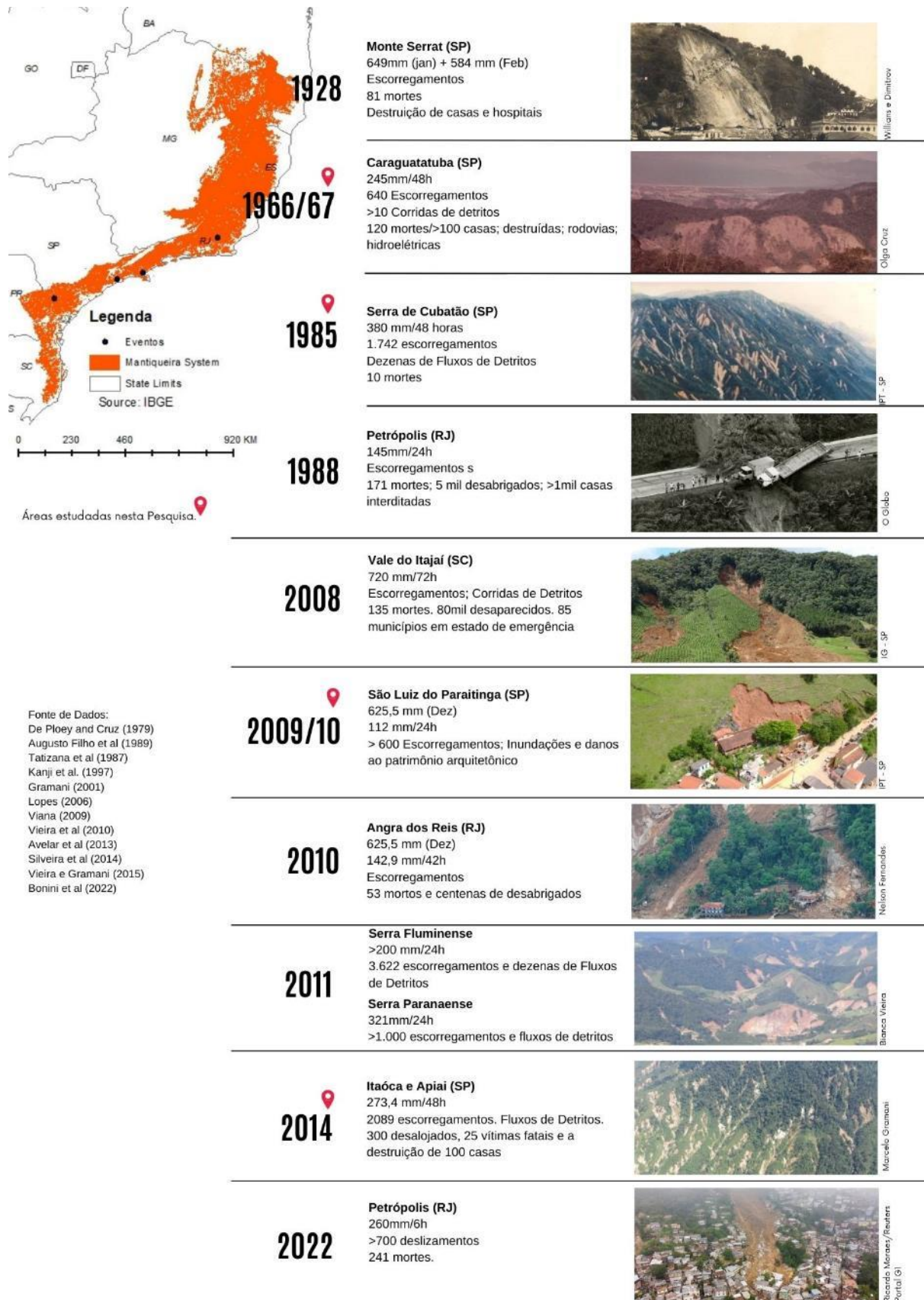


Figura 1: Eventos de maior magnitude na Serra do Mar. Destacam-se as áreas apresentadas nesta Tese.

As pesquisas aqui apresentadas tiveram como **eixo norteador** o entendimento da dinâmica e da distribuição espacial dos escorregamentos translacionais rasos e das corridas de detritos na Serra do Mar. Nesta perspectiva, procurou-se avaliar a influência dos fatores geomorfológicos e pedológicos na suscetibilidade tendo como escala de análise a bacia hidrográfica e utilizando métodos diretos e indiretos, de acordo com a tipologia de cada processo. Tais pesquisas, foram orientadas por uma ou mais perguntas centrais, como recurso essencial para a seleção de métodos, abordagens, escalas e materiais mais adequados.

Embora sejam classificados como movimentos de massa (ou deslizamentos), escorregamentos e corridas de detritos possuem diferentes mecanismos de ruptura, deflagração e propagação, portanto, conforme ampla literatura, devem ser avaliados sob distintas escalas.

As perguntas que orientaram esta Tese foram baseadas no processo avaliado (escorregamentos rasos ou corridas de detritos), no tipo de análise (suscetibilidade ou vulnerabilidade) e nos métodos diretos ou indiretos de investigação (modelos em bases físicas, heurística ou estatística com levantamentos das propriedades físicas, químicas e geotécnicas). São elas:

- a. Quais são os parâmetros geomorfológicos e pedológicos mais importantes para avaliação da suscetibilidade?
- b. Modelos matemáticos em bases físicas podem contribuir na identificação das principais variáveis topográficas e físicas do solo na estabilidade das encostas na Serra do Mar?
- c. Qual o grau de predição dos modelos em bases físicas para o mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos?
- d. Quais parâmetros morfológicos/morfométricos são mais importantes na definição da suscetibilidade a corridas de detritos em bacias na Serra do Mar?
- e. Quais bacias hidrográficas mais suscetíveis a corridas de detritos e como suas características geomorfológicas podem influenciar em sua magnitude?
- f. Qual a importância das corridas de detritos na evolução do relevo da Serra do Mar?
- g. Quais as variáveis devem ser consideradas na avaliação da vulnerabilidade às construções e da população nas áreas mais suscetíveis a corridas de detritos?

2. ESTRUTURA DA TESE

No **capítulo 3** são apresentados os principais métodos e ferramentas para o mapeamento da suscetibilidade, considerando principalmente escalas de abordagem e disponibilidade de dados. O foco deste capítulo é apresentar de maneira breve as vantagens e limitações de cada um dos principais métodos utilizados no mapeamento da suscetibilidade.

O **capítulo 4** traz uma discussão sobre os “Mapeamentos da Suscetibilidade no Brasil”. No subcapítulo **4.1** é apresentado um resumo das principais políticas públicas, ações e programas no Brasil, importantes para a inclusão dos mapeamentos de suscetibilidade/risco na pauta de gestão territorial. No subcapítulo seguinte (**4.2**) são apresentados alguns exemplos de mapeamento da suscetibilidade, perigo e vulnerabilidade, sobretudo com base nos programas desenvolvidos pelo CPRM e pelo IBGE. Por fim, no subcapítulo **4.3** é feito um diagnóstico atualizado do uso dos modelos matemáticos em diferentes estados e municípios brasileiros, apresentando de maneira sucinta os resultados mais importantes destes estudos.

O **capítulo 5** é dedicado às pesquisas realizadas por mim e pelo Grupo de Pesquisa em quatro áreas (Serra de Cubatão, Serra de Caraguatatuba, Vale do Rio Ribeira e Planalto de São Luiz do Paraitinga). Nos subcapítulos dedicados a cada uma destas áreas, são apresentados e discutidos os resultados de projetos de pesquisas que tiveram como objetivos centrais a compreensão da dinâmica espacial dos movimentos de massa a partir de uma abordagem geomorfológica. Em cada uma destas áreas buscou-se avaliar a suscetibilidade (em algumas também a vulnerabilidade), utilizando modelos matemáticos em bases físicas, modelos estatísticos, modelos heurísticos, parâmetros morfométricos das bacias e o levantamento e coletas de dados pedológicos, hidrológicos e geotécnicos.

Ressalto que outras áreas e temáticas, como análises da evolução de processos erosivos em municípios do centro-oeste paulista (p. ex. São Pedro e Bauru), também foram desenvolvidas nos últimos anos, mas não são apresentadas nesta Tese.

No **capítulo 6** são descritas as principais considerações finais sobre as pesquisas desta Tese e, no **capítulo 7**, os principais avanços, limitações e novos desafios para pesquisas futuras. Por fim, são citados artigos publicados em periódicos indexados e capítulos de livros, em sua maioria, nos últimos dez anos, especialmente aqueles com importante volume de citações nas plataformas *Web of Science*, *Scopus* e *Google Scholar*.

3. PRINCIPAIS MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE

“A exposição de um país a um perigo natural e aos efeitos das mudanças climáticas não é o único fator responsável pelo risco de desastres, mas também as condições do quadro social e as capacidades de ação que se refletem em suscetibilidade.”

(WELLE; BIRKMANN, 2015)

Embora a literatura apresente diferentes definições dos conceitos de suscetibilidade, perigo, risco e vulnerabilidade, é importante que uma pesquisa sobre a temática indique, sempre, a definição utilizada e autoria dos conceitos.

A *suscetibilidade* é aqui tratada como probabilidade espacial de rupturas dadas as condições geoambientais do terreno, desconsiderando, portanto, a probabilidade temporal da ruptura, a magnitude do processo e o seu trajeto, ou seja, a sua capacidade de destruição. Por outro lado, o *risco* é definido como “o número esperado de perdas de vidas, feridos, danos a propriedades e interrupções das atividades econômicas para uma dada área em um período de tempo”, sendo um produto dado pela relação entre perigo (p), vulnerabilidade (v) e dano (d) (**Figura 2**) (HUNGR et al., 2001).

O perigo (p) consiste na probabilidade de ocorrência em um período (p. ex. ano), sendo uma função entre a probabilidade espacial (relacionada aos fatores estáticos como padrões de encosta e propriedades mecânicas dos solos) e a probabilidade temporal (relacionada diretamente aos fatores dinâmicos como chuva e drenagem) (FELL et al., 2008; VAN WESTEN; VAN ASCH; SOETERS, 2006; VAN WESTEN; CASTELLANOS; KURIAKOSE, 2008).

A vulnerabilidade refere-se à propensão de elementos expostos (bens físicos ou de capital, seres humanos e seus meios de subsistência), de sofrer danos e perdas quando impactados por eventos de perigo (CUTTER; BORUFF; SHIRLEY, 2003; UNDRO, 1980). Resumidamente, pode ser conceituada como o grau de perda/dano de um elemento em risco (p. ex. casa ou pessoa) devido à ocorrência de um processo natural (STÄHLI et al., 2015). Muitas pesquisas caracterizam a

vulnerabilidade de acordo com o grau de suscetibilidade das comunidades, sistemas ou elementos em risco e sua capacidade de lidar com condições perigosas (ADGER, 2006; KIENBERGER; LANG; ZEIL, 2009).

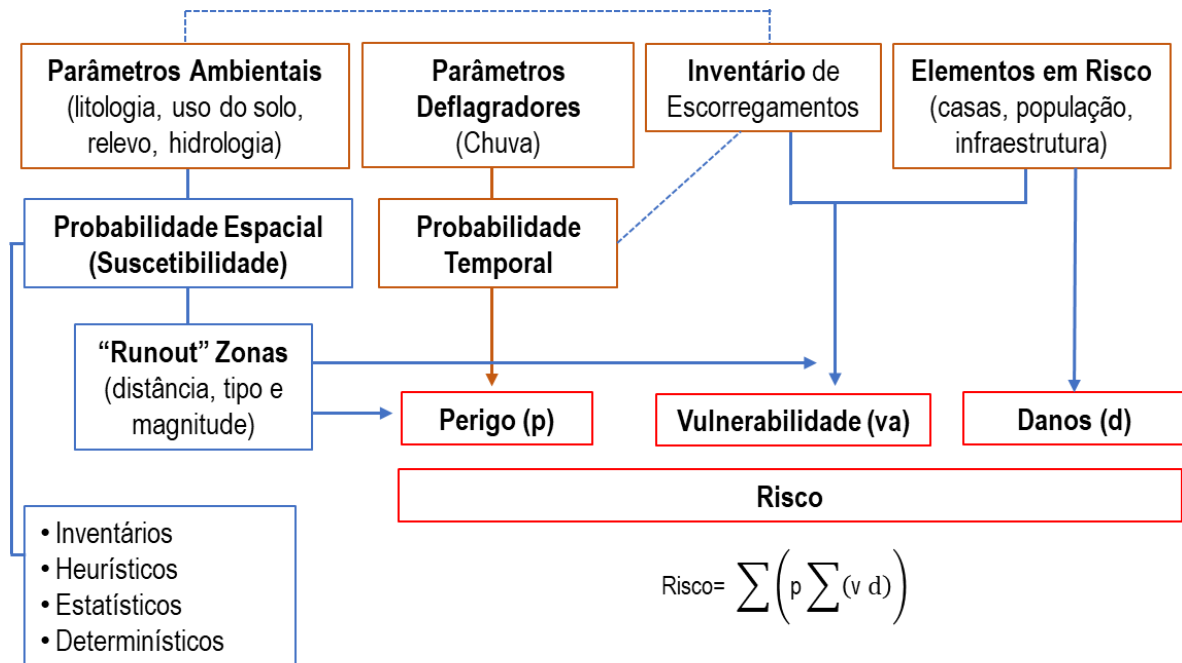


Figura 2: Esquema simplificado da avaliação espacial do risco a escorregamentos. Adaptado de Van Westen; Van Asch; Soeters (2006)

Em relação à suscetibilidade, foco principal desta Tese, em termos gerais, o principal objetivo dos mapeamentos é identificar na paisagem áreas instáveis e estáveis, considerando os fatores condicionantes naturais tais como solo, vegetação natural, geologia e forma da encosta. Neste tipo de mapeamento não são consideradas, por exemplo, as perdas sociais, econômicas e ambientais, que são identificadas por meio de mapeamentos e avaliações posteriores do perigo, do risco e/ou da vulnerabilidade (COROMINAS et al., 2003).

A seleção do método mais adequado precisa ser precedida pelo levantamento de algumas questões, como por exemplo, quais os objetivos da análise de suscetibilidade a esses processos? quais os tipos de movimentos gravitacionais de massa que estão sendo investigados? quais os principais parâmetros envolvidos direta e/ou indiretamente nos processos em análise? qual o principal mecanismo de ruptura responsável? qual a escala de análise (p. ex. bacia hidrográfica ou encosta)? (FELL et al., 2008; FERNANDES, 2016; GUZZETTI, 2005).

Embora ainda existam diferentes abordagens e visões sobre os métodos e ferramentas mais adequados para o mapeamento da suscetibilidade, a literatura mostra uma concordância em relação aos seguintes itens: a) rupturas de movimentos de massa deixam feições nítidas que podem ser mapeadas e classificadas; b) movimentos de massa são controlados por leis mecânicas que podem ser determinadas, no tempo e no espaço, empiricamente, estatisticamente ou deterministicamente; c) condições que causam escorregamentos direta ou indiretamente vinculados às rupturas podem ser usadas na construção de modelos; d) futuros movimentos de massa podem ocorrer sob mesmas condições de processos pretéritos (CARRARA et al., 1999; GUZZETTI, 2005; GUZZETTI et al., 1999). Deste modo, os métodos podem ser divididos em quatro grupos principais: inventários, heurísticos, estatísticos e determinísticos (**Tabela 1**).

Tabela 1: Métodos de avaliação da suscetibilidade, perigo e risco, suas características principais, vantagens e desvantagens.

Método	Descrição	Vantagens	Desvantagens
Inventário	O mapa com informações sobre os locais onde ocorreram os processos de remoção	Integração direta com fatores condicionantes; Usado para validação de modelos matemáticos e em modelos estatísticos	Previsão baseada em escorregamentos pretéritos
Qualitativo/Heurístico	Combinação entre mapas temáticos (ex. encosta, forma de encosta) e a classificação baseada em critérios do pesquisador	Baixo custo; “Rápido” Aplicado em grandes áreas	A falta do conhecimento do pesquisador pode prejudicar a análise Subjetivo Aplicável somente para uma área específica
Estatísticos	Método indireto que se baseia em análises estatísticas para estimar áreas onde os processos podem ocorrer	Baixo custo; “Rápido” Aplicado em grandes áreas; Pouca/nenhuma subjetividade	Aplicado preferencialmente em áreas com grande variação geoambiental
Determinístico	Método indireto baseado na combinação de mapas e no cálculo da estabilidade de taludes a partir de um princípio físico	Simulação de cenários/“Nenhuma” subjetividade	Complexo Demanda tempo Necessidade de muitos valores de entrada

Fonte: modificado de VAN WESTEN; RENGERS; SOETERS (2003).

A seleção do método mais adequado também dependerá diretamente da *escala* e da *disponibilidade de dados* (quantidade e qualidade) e, como consequência desta seleção, os dados de entrada (*inputs*) são também selecionados conforme seu grau de relevância (COROMINAS et al., 2013; VAN WESTEN; VAN ASCH; SOETERS, 2006). Segundo estes autores, para escalas locais (1:5.000 a 1:25.000), os métodos estatísticos e os modelos físicos são mais adequados, sendo possível também calcular a trajetória (*runout*), espacializar sua magnitude e calcular a probabilidade anual do perigo (**Tabela 2**).

Tabela 2: Exemplos de métodos quantitativos apropriados para cada escala, dados que podem ser incluídos na avaliação do perigo e tipo de resultado do perigo.

Escalas	Métodos				Descrição o Perigo
	Métodos Estatísticos	Modelos em Bases Físicas	<i>Runout</i>	Intensidade (Magnitude)/ Frequência	
Escala nacional (<1:250.000)	Não	Não	Não incluído	Não considerada	nº de escorregamentos /unidade administrativa/ano
Escala regional (1:25.000-1:250.000)	Sim	Não	Usualmente incluído	Geralmente um valor fixo e constante	nº de escorregamentos /unidade administrativa/ano
Escala local (1:5.000-1:25.000)	Sim	Sim	Incluído	Espacialização da Magnitude	Probabilidade anual das ocorrências dada uma magnitude/frequência
Áreas específicas (>1:5.000)	Não	Sim	Incluído	Espacialização da Intensidade	Probabilidade anual das ocorrências dada uma intensidade (magnitude)

Fonte: modificado de COROMINAS et al. (2013)

Os **inventários** se apresentam como métodos mais “simples” de mapeamento, podendo ser preparados por diferentes técnicas, dependendo da sua finalidade, da área de estudo, das escalas dos mapas base e dos recursos disponíveis (ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999; COROMINAS et al., 2013). Juntamente com as informações sobre o processo (p. ex. tipologia, forma), subsidiam os demais métodos, tais como heurísticos e estatísticos e, apoiam diretamente a validação dos modelos em bases físicas. São considerados, portanto, componentes-chave (*key component*) das avaliações do perigo e do risco (FELL et al., 2008; FERNANDES, 2016; VAN WESTEN; RENGERS; SOETERS, 2003; VAN WESTEN; VAN ASCH; SOETERS, 2006). Segundo estes autores, um inventário “irreal” pode resultar em avaliações incorretas da suscetibilidade, do perigo e do risco.

Os inventários podem ser classificados com base em sua escala e no tipo de mapeamento: inventários de arquivos; inventários geomorfológicos; inventários de evento e inventários multi-temporais (GUZZETTI, 2005).

Os **inventários de arquivos** são “bancos de dados” nos quais é reportada a localização das áreas afetadas, exigindo para sua formação dados coletados da literatura, consultas as organizações públicas ou privadas ou pesquisas em jornais (GUZZETTI, 2005). Neles, são registrados todos os eventos conhecidos ou pela simples ocorrência e/ou pelos danos gerados, abrangendo períodos que variam de alguns anos a vários séculos (GUZZETTI, 2005).

Os **inventários geomorfológicos** apresentam a soma de muitos eventos durante um período mais extenso (dezenas, centenas ou mesmo muitos milhares de anos). São tipicamente preparados por meio de interpretação sistemática de fotografias aéreas ou imagens de satélite com verificações de campo (GUZZETTI, 2005).

Devido às mudanças da cobertura vegetal (p. ex.), inventários geomorfológicos, geralmente, subestimam a dimensão das cicatrizes, tornando-os menos completos e, portanto, inadequados. O volume de informações contido nestes mapas depende diretamente da extensão da área, da disponibilidade de dados, da escala das fotografias aéreas ou imagens orbitais, da complexidade de estudo da área e do tempo e recursos disponíveis para realização do projeto (GUZZETTI, 2005). Destaca-se, ainda, que poucos lugares no mundo possuem registros históricos entre 50 e 100 anos. Apenas países como Itália, Suíça, Canadá e Colômbia possuem dados históricos de qualidade em nível nacional (CROVELLI, 2000; FELL et al., 2008).

Nos **inventários de eventos** são mapeadas todas as cicatrizes de escorregamentos deflagrados por um único evento pluviométrico (ou evento geológico) ou, ainda, por um período prolongado de chuva. Estes inventários são geralmente mais completos que os anteriores, devido às prováveis mudanças na paisagem após certo tempo do evento, entretanto, cobrem apenas uma parte da área geográfica associada ao evento deflagrador (GUZZETTI, 2005). Esta tipologia de inventário é, provavelmente, a mais comum no Brasil, devido ao histórico de eventos de chuvas mais intensas e prolongadas que causam, em um único episódio, dezenas, centenas e até milhares de escorregamentos, que podem ser acompanhados pela deflagração de outras tipologias, como corridas de detritos e inundações.

No segundo grupo de métodos de avaliação da suscetibilidade, destacam-se os **métodos heurísticos**, nos quais são feitas combinações qualitativas de diferentes mapas temáticos (p. ex. pedológico, geológico) e, com base no conhecimento *a priori* do investigador, são determinadas as classes de suscetibilidade (ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999; GLASSEY et al., 2003). São ferramentas mais diretas de classificação da suscetibilidade, porém os resultados finais podem retratar apenas o grau equivalente da experiência do pesquisador (COROMINAS et al., 2013; VAN WESTEN; VAN ASCH; SOETERS, 2006).

Em relação aos métodos indiretos, naqueles com bases **estatísticas**, a suscetibilidade é calculada por meio da combinação entre fatores condicionantes e o inventário, assumindo-se que estes processos ocorrem sob as mesmas condições ambientais anteriores (REICHENBACH et al., 2018; VAKHSHOORI; ZARE, 2018). Esses métodos podem ser divididos em bivariados ou multivariados (GUZZETTI et al., 2020).

Dentre os métodos bivariados, se destaca o Valor Informativo (VI), que relaciona a área afetada por escorregamentos nas classes de cada parâmetro condicionante (p. ex. morfológico/ uso do solo) e área total, assumindo que os fatores condicionantes possuem independência condicional entre si (AFUNGANG; BATEIRA; NKWEMOH, 2017; BONINI, 2019; CASCINI et al., 2015; JADE; SARKAR, 1993; PEREIRA; ZÊZERE; BATEIRA, 2012; YIN; YAN, 1988; ZÊZERE et al., 2017; ZHANG et al., 2016).

O VI (Equação 1) determina pesos (VI_{ij}) em função da razão entre o número de unidades de mapeamento e as cicatrizes em uma classe j de um parâmetro i (S_j) e o total de unidades de mapeamento da classe j do parâmetro i (N_j), em relação ao total de unidades de mapeamento com cicatrizes (S) e o total de unidades de mapeamento (N). Portanto, valores positivos de VI_{ij} indicam que a classe j de um parâmetro i favorece a instabilidade e valores negativos indicam que a classe j do parâmetro i não favorece a instabilidade (BONINI, 2019; YIN; YAN, 1988; ZÊZERE et al., 2017).

$$VI_{ij} = \ln \frac{S_j/N_j}{S/N} \quad (1)$$

Nos **métodos determinísticos** os resultados gerados são uma consequência direta dos valores usados de entrada das variáveis, ou seja, os valores numéricos dos *inputs* determinam aqueles que serão obtidos nos *outputs* (FERNANDES, 2016). Especificamente os modelos determinísticos em bases físicas descrevem o comportamento das relações (físicas, químicas ou mecânicas) para determinar os valores numéricos das propriedades envolvidas, sejam elas constantes ou variáveis no espaço e/ou no tempo. São, portanto, baseados nas noções matemáticas clássicas de relações exatamente previsíveis entre variáveis independentes e dependentes (CHORLEY, 1967).

Grande parte dos modelos em bases físicas² determina a suscetibilidade a escorregamentos rasos a partir da combinação de modelos de estabilidade e modelos hidrológicos (MONTGOMERY; SULLIVAN; GREENBERG, 1998a; PACK; GOODWIN; TARBOTON, 2001).

Dentre todos os métodos citados anteriormente, a literatura aponta estes como sendo os mais objetivos, devido a sua base física no cálculo da estabilidade, porém também são os mais complexos por exigirem, sobretudo, um maior volume de dados de entrada, tais como pedológicos e pluviométricos (FERNANDES, 2016). Além da maior objetividade, ressalta-se sua capacidade de previsão de áreas instáveis independentemente da situação atual ou pretérita, simulando cenários futuros sob diferentes alterações climáticas ou hidrológicas (FELL et al., 2008). Por não dependerem de inventários, os modelos matemáticos podem ser utilizados em áreas mais remotas sem registros históricos, ou onde os escorregamentos são identificados de maneira pontual e, em muitos casos, sem critérios bem definidos para o seu registro (FERNANDES, 2016; GUZZETTI, 2005).

Por fim, é importante destacar que estes mapas de suscetibilidade apoiam as avaliações de risco, perigo e vulnerabilidade. Cada tipo de método utilizado para identificação da suscetibilidade pode influenciar diretamente no grau de risco.

² O detalhamento da estrutura e do funcionamento de alguns destes modelos são apresentados no subcapítulo 4.3 e nas pesquisas realizadas na Serra de Cubatão e de Caraguatatuba, no estado de São Paulo (subcapítulos 5.1 e 5.2).

Segundo van Westen et al. (2006), a execução de mapas de riscos é mais complexa devido à ausência de inventários completos e às dificuldades da avaliação das probabilidades espacial e temporal. Estes autores apontam que algumas combinações entre métodos heurísticos, determinísticos e estatísticos podem ser mais adequadas e mais comuns, conforme as escalas de análise (**Tabela 3**). Na avaliação quantitativa do risco, o emprego de modelos determinísticos é mais comum e mais adequado, enquanto na avaliação qualitativa, são mais frequentes os métodos estatísticos e heurísticos (VAN WESTEN; VAN ASCH; SOETERS, 2006).

Tabela 3: Combinações mais usadas para avaliações de perigo e risco (utilizando SIG) para escalas 1:10.000 e 1:50.000.

	Avaliação de Risco		
	Qualitativo	Semi-qualitativa	Quantitativo
Avaliação de perigo baseado em inventário	2	2	2
Heurístico/geomorfológica/ mapeamento direto/ baseado na experiência do pesquisador	3	3	0
Métodos Estatísticos (Bivariados, Multivariados e <i>Machine Learning</i>)	3	2	2
Modelos determinísticos e dinâmicos	0	1	3

0: Método de perigo não é apropriado para avaliação de risco.

1: Combinação moderadamente usada. O método de perigo é pouco apropriado para avaliação de risco.

2: Combinação altamente usada. O método de perigo pode ser o melhor método para avaliação do risco, mas depende da disponibilidade de dados (ex. histórico de eventos).

3: Combinação muito usada. O resultado da avaliação de risco poderá ser a melhor, dada a disponibilidade dos dados.

Fonte: Modificado de van Westen et al. (2006).

4. SUSCETIBILIDADE, PERIGO, RISCO E VULNERABILIDADE NO BRASIL

“Tornar as cidades e comunidades mais inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis”.

“Até 2030, reduzir significativamente o número de mortes e o número de pessoas afetadas por catástrofes e substancialmente diminuir as perdas econômicas diretas causadas por elas em relação ao produto interno bruto global, incluindo os desastres relacionados à água, com o foco em proteger os pobres e as pessoas em situação de vulnerabilidade”

(Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, ODS 11, Nações Unidas)

4.1 Políticas Públicas de Redução de Desastres

Embora relatos sobre movimentos de massa no Brasil remontem ao século XVIII, apenas no final da década de 1960 estes estudos começaram a ser sistematizados. Somente a partir da década de 1980, surgem, de maneira mais significativa, as primeiras políticas públicas, programas, planos e ações em níveis estadual e municipal focados na prevenção e redução dos danos causados por eventos naturais em encostas ou associados à hidrodinâmica fluvial, como inundações e enchentes. A partir daí, a gestão de riscos e o conhecimento das áreas suscetíveis passam a ser pensados, debatidos e incluídos, mesmo que timidamente, em projetos de gestão territorial.

Muitos destes programas, geralmente em escala municipal, deram suporte técnico-científico e antecederam a organização mais concreta das políticas públicas na esfera nacional, como a criação do Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD), em 1995, e do Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN), em 2012. Entretanto, é importante ressaltar que quase todas as ações políticas foram em resposta aos eventos catastróficos que marcaram a história brasileira, deixando centenas ou milhares de vítimas fatais, desabrigados e prejuízos econômicos diretos e indiretos na ordem de bilhões de reais (**Figura 3**).

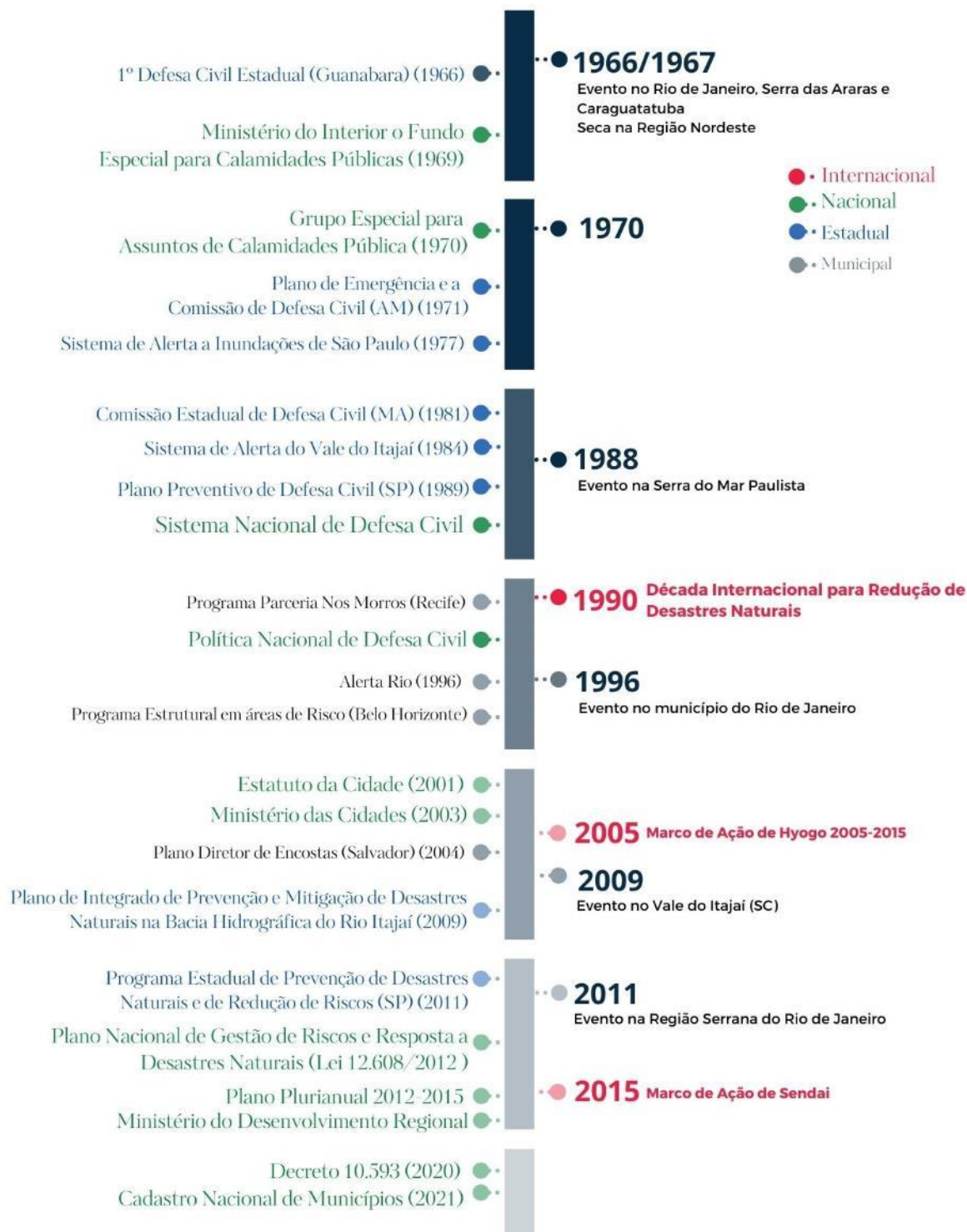


Figura 3: Linha do tempo de ações, programas e políticas públicas criadas em níveis municipal, estadual e federal para redução de desastres naturais, além de ações internacionais propostas e lideradas pelas Nações Unidas. Elaborada pela autora.

A primeira Defesa Civil Estadual do Brasil foi criada no então Estado da Guanabara (Decreto Estadual 722, de 18.11.1966) após movimentos de massa generalizados que afetaram diversos municípios do estado do Rio de Janeiro. Neste momento, também foi elaborado o Plano Diretor de Defesa Civil do Estado da Guanabara, definindo atribuições para cada órgão componente do Sistema Estadual de Defesa Civil e a criação das primeiras Coordenadorias Regionais de Defesa Civil no Brasil.

Nacionalmente, também nesta década, foram criados o Plano Permanente de Defesa Civil Contra as Calamidades Públicas (Decreto nº 64.568 de 22 de maio de 1969³), o Grupo Especial para Assuntos de Calamidades Públicas (GEACAP) e o Fundo Especial para Calamidades Públicas (FUNCAP) (Decreto-Lei 950 de 12 de outubro de 1969). Todos subordinados ao então Ministério do Interior, para auxiliar entidades públicas ou privadas, nacionais, internacionais ou estrangeiras, destinadas ao auxílio das populações atingidas em caso de desastre.

Nas décadas 1970 e 1980 foram implementados, p. ex., alguns programas e estruturadas defesas civis estaduais como: o “Plano de Emergência e a Comissão de Defesa Civil do Estado do Amazonas” para atender as populações ribeirinhas vítimas de desastres das inundações (1971); o Grupo Especial de Socorro às Vítimas de Calamidade Pública no estado do Ceará (1971); o Sistema Estadual de Defesa Civil (1976); o Sistema de Alerta a Inundações de São Paulo (SAISP) (1977) e o Plano Preventivo de Defesa Civil (PPDC) (1989), no estado de São Paulo; o Sistema de Alerta do Vale do Itajaí, em Santa Catarina, e a Comissão Estadual de Defesa Civil no estado do Maranhão (1981).

No estado de São Paulo, se destacam dois decretos estaduais fundamentais para atividades de políticas de redução de desastres. Devido aos eventos de movimentos de massa generalizados que afetaram algumas cidades do Litoral Norte e da Baixada Santista e, com base nas recomendações do Relatório “Instabilidade da Serra do Mar no Estado de São Paulo – Situações de Risco” de 1988, foi criado o Plano Preventivo de Defesa Civil (PPDC) por meio do Decreto Estadual 30.860 de 04 de dezembro de 1989⁴, redefinido pelo Decreto Estadual 42.565 (01/12/1997)⁵. Atualmente, fazem parte deste Plano municípios da Baixada Santista, Litoral

³ <https://legis.senado.leg.br/norma/487568>

⁴ <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1989/decreto-30860-04.12.1989.html>

⁵ <https://www.al.sp.gov.br/repositorio/legislacao/decreto/1997/decreto-42565-01.12.1997.html>

Norte, Vale do Ribeira, Serra da Mantiqueira e Vale do Paraíba, região de Campinas, ABCD Paulista e Sorocaba, perfazendo um total de 175 municípios⁶.

O PPDC é um conjunto de medidas que visa a redução da possibilidade de perda de vidas e de prejuízos econômicos e sociais, criando condições para a convivência com as situações de risco, em níveis relativamente seguros para a população ameaçada (MACEDO; OGURA; SANTORO, 2006). A Coordenadoria Estadual de Defesa Civil (CEDEC) é responsável pela coordenação geral dos Planos Preventivos de Defesa Civil, operados por meio das Regionais de Defesa Civil (REDECs) e das Coordenadorias Municipais de Defesa Civil (COMDECs), com apoio técnico do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e do Instituto Geológico (IG) (CARVALHO; GALVÃO, 2006; IG, 2017; MARCHIORI-FARIA; SANTORO, 2009).

O sistema é estruturado em quatro etapas de trabalho: elaboração, implantação, operação/acompanhamento e avaliação (TOMINAGA, 2009). Na etapa de *elaboração* são realizados, por exemplo, estudos dos principais condicionantes naturais e antrópicos e identificados diferentes graus de risco; na *implementação* há definição de atribuições e responsabilidades e também do sistema de informação e da participação da população. A etapa de *operação* engloba a execução das atividades programadas e o acompanhamento técnico do plano preventivo. Na última etapa, de *avaliação*, são identificadas eventuais falhas na fundamentação técnica, na estrutura ou no sistema operacional (MACEDO; OGURA; SANTORO, 2006).

O PPDC funciona em quatro níveis (observação, atenção, alerta e alerta máximo) definidos com base nos índices de chuvas, em valores pluviométricos acumulados em três dias (72 horas), na previsão meteorológica e em vistorias de campo (MACEDO; OGURA; SANTORO, 2006). Em 2015 foi instituído o Grupo de Trabalho com objetivo de revisar e reformular os Planos Preventivos de Defesa Civil específicos para escorregamentos no estado de São Paulo (Resolução nº CMil-02/610, de 4/02/2015), de forma a adequá-los aos estudos de correlação entre índices pluviométricos e escorregamentos aos alertas emitidos pelo CEMADEN. A principal alteração refere-se ao valor do índice de acumulado de chuva de três dias para os municípios atendidos pelo Plano: 60mm (Sorocaba, Campinas, Vale do Ribeira, Itapeva, Serra da Mantiqueira e São Luiz do Paraitinga e Capital); 80mm (Guarulhos, Osasco, ABC e

⁶ <https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/institutogeologico/2017/01/plano-preventivo-de-defesa-civil/>

municípios do Vale do Paraíba e da Baixada Santista) e 100mm (municípios do Litoral Norte) (IG, 2017).

Ainda na esfera estadual, em **2011** é criado o “Programa Estadual de Prevenção de Desastres Naturais e de Redução de Riscos” (Decreto 57.512/2011)⁷, posteriormente reorganizado pelo Decreto Estadual 64.673/2019, que tem como alguns objetivos (a) promoção de “diagnóstico atualizado dos perigos e de riscos de escorregamentos, inundações, erosão e colapso de solo, estabelecendo prioridades para mapeamento de áreas de risco existentes no estado de São Paulo”; e (b) sistematização de “ações institucionais e procedimentos operacionais para redução, mitigação e erradicação do risco, em sintonia com as políticas em andamento no âmbito das Secretarias de Estado e dos municípios” (SÃO PAULO, 2011).

Além do Comitê Deliberativo, coordenado pela Casa Militar, atuam neste programa representantes de diferentes institutos e órgãos como a Secretaria do Meio Ambiente, o Departamento de Águas e Energia Elétrica, a Companhia Ambiental do estado de São Paulo e Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, que juntos formam o Grupo de Articulação de Ações Executivas (GAAE) (SÃO PAULO, 2011).

Em escalas municipais, destacam-se os programas criados na década de **1990** para as cidades do Recife, “Programa Parceria nos Morros”, do Rio de Janeiro, “Alerta Rio” (Decreto 15142 de 25 de setembro de 1996) e o “Programa Estrutural em áreas de Risco”, que atua desde 1997 no município de Belo Horizonte (MG) (MARCHIORI-FARIA; SANTORO, 2009).

O “Programa Parceria nos Morros” da Prefeitura do Recife, tem como objetivo a difusão de tecnologias alternativas em substituição aos tradicionais (p. ex. muros de arrimo), buscando formas simplificadas de execução e a qualificação das intervenções. Em 2005, foi considerado uma das vinte melhores experiências inovadoras de gestão pública em todo o país (ALHEIROS, 2006). O sistema “Alerta Rio” visa a emissão de boletins de alerta de chuvas que podem gerar inundações e movimentos de massa na cidade do Rio de Janeiro, contando, atualmente com uma rede de 33 estações telemétricas que enviam dados em tempo real, a cada 15 minutos, para a central do Alerta Rio⁸.

⁷ <https://governo-sp.jusbrasil.com.br/legislacao/1029931/decreto-57512-11>

⁸ <http://www.sistema-alerta-rio.com.br/>

Em **2003** é criado o Plano de Prevenção e Redução de Vulnerabilidade em Desastres para alguns municípios de Santa Catarina; em **2004** é implementado o Plano Diretor de Encostas no município de Salvador e, em **2013**, o Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil para escorregamentos, rolamentos de blocos, alagamentos e/ou inundação no município de Vitória (ES) (MARCHIORI-FARIA; SANTORO, 2009).

Na esfera Nacional, apenas em **1988** há uma organização sistemática da defesa civil, com a criação do Sistema Nacional de Defesa Civil (SINDEC) (Decreto nº 97.274⁹) e, por meio da Resolução nº 2, de 12.12.1994, foi instituída a Política Nacional de Defesa Civil, reformulada posteriormente em 2005 (Decreto 5.376) que organizou as Coordenadorias Estaduais de Defesa Civil (CEDECs) e os Núcleos Comunitários de Defesa Civil (NUDECs); prevendo a criação de uma série de instrumentos para coleta de informações, sistemas de alerta e atendimento à população.

A Política Nacional de Defesa Civil do Brasil define a Defesa Civil como “o conjunto de ações de prevenção e de socorro, assistenciais e reconstrutivas, destinadas a evitar ou minimizar os desastres, preservar a integridade física e moral da população, bem como restabelecer a normalidade social” (BRASIL, 2012). A instituição desta Política foi fortemente influenciada a partir da criação da “Década Internacional para a Redução de Desastres Naturais” pela Organização das Nações Unidas (ONU)¹⁰.

O Sistema Nacional de Defesa Civil¹¹, coordenado por estruturas institucionais, tem o “objetivo de congregar todas as competências para a gestão dos riscos e desastres sempre com ênfase na prevenção”, sendo constituído por “órgãos e entidades da administração pública federal, dos Estados, do Distrito Federal e dos Municípios, por entidades públicas e privadas de atuação significativa na área de proteção e defesa civil e por organizações da sociedade civil” (BRASIL, 2010).

Dentro do Sistema Nacional de Defesa Civil foi criado o Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD) (Decreto nº 5.376)¹², responsável pelas ações de coordenação federal de resposta a desastres no âmbito do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil. O CENAD tem a função de receber e “gerenciar informações de diversos órgãos responsáveis

⁹ http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d97274.htm

¹⁰ Resolução 44/236 (<https://www.undrr.org/about-undrr/history#idndr>)

¹¹ http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/d97274.htm

¹² http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2005/decreto/d5376.htm

pela predição de tempo e temperatura; avaliação de condições geológicas de áreas de risco; acompanhamento das bacias hidrográficas; controle de queimadas e incêndios florestais; e transporte e armazenamento de produtos perigosos” (BRASIL, 2010).

Em **2001** foi criado o Estatuto da Cidade (Lei Federal 10.257 de 10 de julho de 2001)¹³ que forneceu uma nova base jurídica para a política urbana no Brasil, regulamentando os artigos 182 e 183, referentes ao tema urbano da Constituição Federal (BRASIL, 2001). Em parágrafo único “estabelece normas de ordem pública e interesse social que regulam o uso da propriedade urbana em prol do bem coletivo, da segurança e do bem-estar dos cidadãos, bem como do equilíbrio ambiental” (BRASIL, 2001).

Em **2003** surge o Ministério das Cidades que teve como objetivos centrais: (a) melhorar as condições de habitabilidade de assentamentos humanos precários e reduzir riscos mediante sua urbanização e regularização fundiária, integrando-os ao tecido urbano; (b) apoiar e incentivar os municípios a estabelecer programas estratégicos de prevenção de riscos nas vilas, favelas e loteamentos irregulares, de forma a reduzir gradativamente o número de vítimas fatais nessas áreas (BRASIL, 2001; LEMOS; DAMANGE, 2016; MINISTÉRIO DAS CIDADES, 2006).

Dentro do Programa de Urbanização, Regularização e Integração de Assentamentos Precários foi instituída “Ação de Apoio à Prevenção e Erradicação de Riscos em Assentamentos Precários” com as seguintes metas: (a) treinamento de equipes municipais, com o objetivo de capacitar técnicos das prefeituras para a elaboração de diagnóstico, prevenção e gerenciamento de risco; (b) apoio financeiro para elaboração, pelo município, do plano de redução de risco, instrumento de planejamento que contempla o diagnóstico de risco, as medidas de segurança necessárias, a estimativa de recursos necessários, o estabelecimento de prioridades e a compatibilização com os programas de urbanização de favelas e regularização fundiária; e, (c) apoio financeiro para elaboração de projetos de contenção de encostas em áreas de risco consideradas prioritárias nos Planos Municipais de Redução de Riscos (BRASIL, 2012).”

Em 1º de janeiro de **2019**, o Ministério das Cidades e o Ministério da Integração Nacional foram fundidos e transformados em Ministério do Desenvolvimento Regional. Posteriormente, por meio do Decreto 10.773, de 23 de agosto de 2021,¹⁴ são criadas a Secretaria Nacional de Mobilidade e Desenvolvimento Regional e Urbano e a Secretaria de Coordenação Estrutural e

¹³ Regulamenta os arts. 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.

¹⁴ <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/decreto-n-10.773-de-23-de-agosto-de-2021-340160640>

Gestão Corporativa. Esta última, com a função de “planejar, coordenar e promover atividades de desenvolvimento organizacional e de modernização administrativa no âmbito da Pasta”, que inclui também a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (BRASIL, 2021).

Em 2011, foi instaurado o Plano Plurianual 2012-2015, que inclui o Programa Temático Gestão de Riscos e Resposta a Desastres, com os principais objetivos a “ampliação do conhecimento público sobre as áreas de risco nos municípios mais críticos, por meio do mapeamento da suscetibilidade geológica-geotécnica aos fenômenos de deslizamentos, inundações e enxurradas; do mapeamento de riscos nas áreas ocupadas; da definição de diretrizes para a ocupação urbana segura; e do monitoramento para reduzir a ocupação de áreas de maior fragilidade natural” (BRASIL, 2011).

Em 10 de abril de 2012 é promulgada a Lei 12.608/2012¹⁵, que incorpora avanços no ordenamento jurídico nacional sobre a gestão de desastres, abrangendo ações de prevenção, mitigação, preparação, resposta e recuperação, instituindo, também, o Plano Nacional de Gestão de Riscos e Resposta a Desastres Naturais (PNPDC) (BRASIL, 2012).

Dentro deste contexto, foi também criado o Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) (Decreto MCTI nº 7.513, de 01 de julho de 2011¹⁶), cuja principal missão é “realizar o monitoramento das ameaças naturais em áreas de riscos em municípios brasileiros suscetíveis à ocorrência de desastres naturais, além de realizar pesquisas e inovações tecnológicas que possam contribuir para a melhoria de seu sistema de alerta antecipado, com o objetivo final de reduzir o número de vítimas fatais e prejuízos materiais em todo o país (BRASIL, 2012).”

Os objetivos centrais PNPDC consistem na redução dos riscos de desastres; prestação de socorro e assistência às populações atingidas por desastres; recuperação das áreas afetadas por desastres; incorporação da redução do risco de desastre e as ações de proteção e defesa civil entre os elementos da gestão territorial e do planejamento das políticas setoriais; promoção de ações contínuas de proteção e defesa civil; estímulo ao desenvolvimento de cidades resilientes e aos processos sustentáveis de urbanização; identificação das ameaças, **suscetibilidades** e **vulnerabilidades** a desastres, de modo a **evitar** ou reduzir sua ocorrência; monitoramento dos

¹⁵ dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nºs 12.340, de 1º de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996; e dá outras providências (BRASIL, 2012).

¹⁶ <http://www2.cemaden.gov.br/missao-do-cemaden/>

eventos meteorológicos, **hidrológicos**, geológicos, biológicos, nucleares, químicos e outros potencialmente causadores de desastres; produção de alertas antecipados sobre a possibilidade de ocorrência de desastres naturais; estímulo ao **ordenamento** da ocupação do solo urbano e rural, tendo em vista sua conservação e a proteção da vegetação nativa, dos recursos hídricos e da vida humana; combate à ocupação de áreas ambientalmente **vulneráveis** e de **risco** e realocação da população residente nessas áreas; estímulo de iniciativas que resultem na destinação de moradia em local seguro; desenvolvimento de consciência nacional acerca dos riscos de desastre; orientação das comunidades a adotar comportamentos adequados de prevenção e de resposta em situação de desastre e promover a autoproteção e a integração de informações em sistema capaz de **subsidiar** os órgãos do Sistema Nacional De Proteção E Defesa Civil (SINPDEC) na previsão e no controle dos efeitos negativos de eventos adversos sobre a população, os bens e serviços e o meio ambiente (BRASIL, 2012).

Sobre as competências a Lei 12.608/2012 atribui à União (Artigo 6º) a realização e manutenção de um cadastro nacional de municípios com áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos; e a realização do monitoramento meteorológico, hidrológico e geológico das áreas de risco e produção de alertas.

Por meio do Decreto 10.692 de 3 de maio de 2021¹⁷ se instituiu o Cadastro Nacional de Municípios com Áreas Suscetíveis à Ocorrência de Deslizamentos de Grande Impacto, Inundações Bruscas ou Processos Geológicos ou Hidrológicos Correlatos. Neste, as inscrições são realizadas pelo município, ou mediante indicação dos demais entes federados, tendo o município que comprovar a existência de áreas de risco de desastres por meio de inventário ou de outros documentos expedidos por órgãos ou entidade federais, estaduais ou municípios (BRASIL, 2012).

¹⁷ http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2021/decreto/D10692.htm

Conforme a Lei 12.608/2012, os Municípios (Artigo 8º) devem, portanto (BRASIL, 2012):

- I - Elaborar mapeamento contendo as **áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos** de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos;
- II - Elaborar Plano de Contingência de Proteção e Defesa Civil e instituir órgãos municipais de defesa civil, de acordo com os procedimentos estabelecidos pelo órgão central do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC;
- III - elaborar plano de implantação de obras e serviços para a redução de riscos de desastre;
- IV - Criar mecanismos de controle e fiscalização para evitar a edificação em **áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos** de grande impacto, inundações bruscas ou processos geológicos ou hidrológicos correlatos; e
- V - Elaborar carta geotécnica de aptidão à urbanização, estabelecendo diretrizes urbanísticas voltadas para a segurança dos novos parcelamentos do solo e para o aproveitamento de agregados para a construção civil.

Em 2020, o Governo Federal por meio do Decreto 10.593¹⁸, dispõe sobre a organização e o funcionamento do Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil (SINPDEC) e do Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil (CONPDEC), sobre o Plano Nacional de Proteção e Defesa Civil e o Sistema Nacional de Informações sobre Desastres (S2iD), e sobre os critérios e as condições para declaração e reconhecimento da situação de emergência ou do estado de calamidade pública (BRASIL, 2020).

O Sistema Nacional de Informações sobre Desastres (S2iD) é a plataforma que integra diversos produtos com o “objetivo de qualificar e dar transparência à gestão de riscos e desastres no Brasil, por meio da informatização de processos e disponibilização de informações sistematizadas”. Atualmente cerca de 88% dos municípios estão cadastrados no sistema (total de 4.913 municípios). As regiões Sul e Nordeste possuem, respectivamente 97% e 93% de municípios cadastrados, seguidas das regiões Sudeste (85%), Norte (71%) e Centro-Oeste (58%)¹⁹.

¹⁸ http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2019-2022/2020/Decreto/D10593.htm#art44

¹⁹ <https://www.gov.br/mdr/pt-br/assuntos/protecao-e-defesa-civil/sistema-integrado-de-informacoes-sobre-desastres>

Diante deste breve relato sobre as políticas públicas em níveis municipal, estadual e federal, culminando na Lei Federal 12.608/2012, nota-se a necessidade e obrigatoriedade de estudos sobre a suscetibilidade a deslizamentos, inundações e eventos correlatos. Soma-se o fato das demais ferramentas de gestão da redução dos riscos terem como base um conhecimento prévio dos fatores predisponentes locais que podem aumentar a suscetibilidade de algumas áreas.

Finalmente, vale evidenciar a gestão da redução dos riscos a desastres naturais a partir dos **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS)**, especificamente o ODS 11 sobre “cidades e comunidades sustentáveis”, incluindo duas metas relacionadas ao tema desenvolvido nesta Tese²⁰:

“Até 2030, reduzir significativamente o número de mortes e o número de pessoas afetadas por catástrofes e substancialmente diminuir as perdas econômicas diretas causadas por elas em relação ao produto interno bruto global, incluindo os desastres relacionados à água, com o foco em proteger os pobres e as pessoas em situação de vulnerabilidade”

“Até 2020, aumentar substancialmente o número de cidades e assentamentos humanos adotando e implementando políticas e planos integrados para a inclusão, a eficiência dos recursos, mitigação e adaptação às mudanças climáticas, a resiliência a desastres; e desenvolver e implementar, de acordo com o Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030, o gerenciamento holístico do risco de desastres em todos os níveis”

²⁰ <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs/11>

4.2 Mapas de Suscetibilidade, Perigo e Vulnerabilidade

A partir da promulgação da Lei de 2012, mencionada anteriormente, além da criação do CEMADEN, é importante enfatizar os programas e projetos nacionais desenvolvidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), como as Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações; Setorização de Áreas de Risco Geológico (**Figura 4**), Cartas de Perigo, Diagnóstico da População em Áreas de Risco, Avaliação Técnica Pós-Desastre e Cartas Geotécnicas²¹.

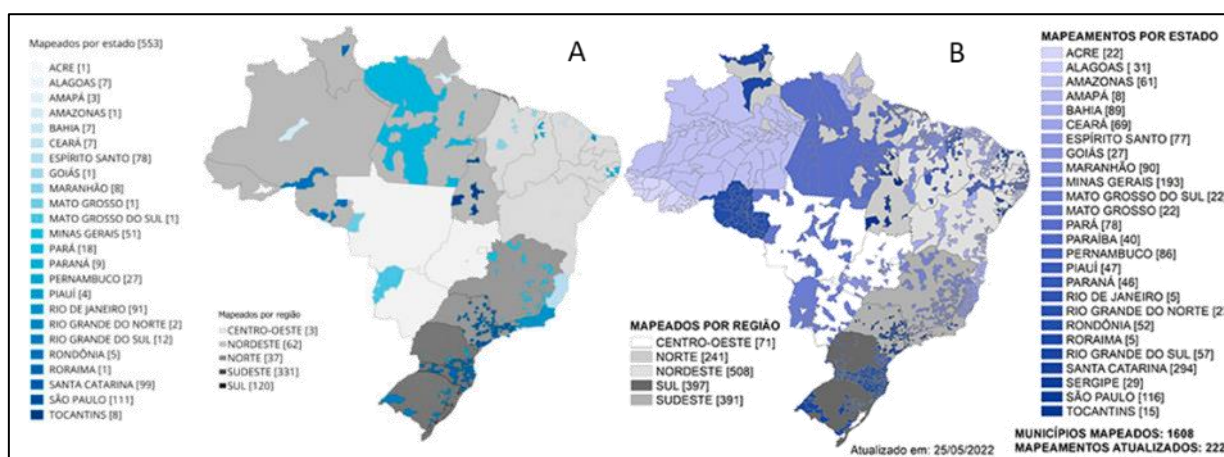


Figura 4: (A) Estados com municípios com setorização de risco geológico. (B) Estados com Cartas de Suscetibilidade a Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações. Fonte: <http://www.cprm.gov.br>

Em 2013, por meio de uma parceria técnica entre a CPRM e o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do estado de São Paulo (IPT), foram mapeados 75 municípios nos estados do Espírito Santo, Santa Catarina e São Paulo, na escala de referência 1:25.000. Atualmente, estas cartas abrangem 553 municípios brasileiros²², sendo três na região Centro-Oeste, 62 na região Nordeste, 37 na região Norte, 331 na região Sudeste e 120 na região Sul. Estas cartas de suscetibilidade (**Figura 5**) “indicam áreas propensas ao desenvolvimento de processos do meio físico que podem gerar desastres naturais, em face da presença de fatores predisponentes básicos em terrenos ocupados e não ocupados” (CPRM, 2014a). Se apresentando, portanto, como importantes ferramentas na revisão de planos diretores, na elaboração de cartas geotécnicas de aptidão urbana e de áreas de risco e outros instrumentos de planejamento e gestão territorial (CPRM, 2014a).

²¹ <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Prevencao-de-Desastres-38>

²² Dados atualizados pela Plataforma em 20.05.2022

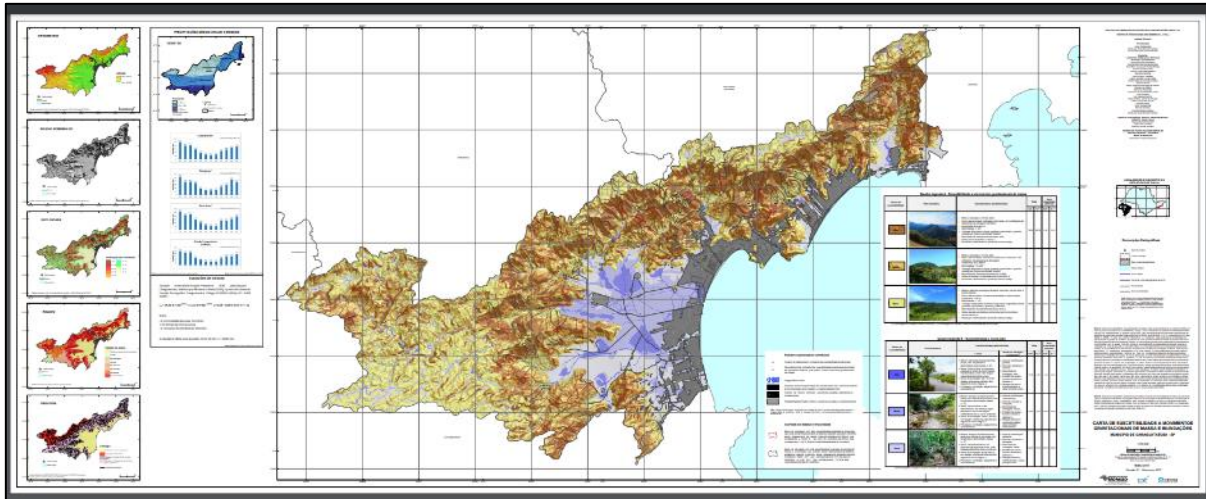


Figura 5: Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação do município de Caraguatatuba, SP (CPRM, 2014a). Carta Original em alta resolução <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22116>

Entre os objetivos específicos deste mapeamento destacam-se: geração de cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e a processos hidrológicos tanto em relação às áreas não ocupadas quanto às ocupadas, em bases cartográficas similares e em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG); elaboração de “carta síntese” com a sistematização dos principais resultados do mapeamento, contendo o zoneamento das suscetibilidades e com linguagem acessível ao público em geral; destacar a suscetibilidade nas áreas urbanizadas e/ou edificadas; estabelecer indicadores que forneçam uma estimativa da magnitude dessa incidência em relação às populações residentes e facilitem a comunicação com os tomadores de decisão e as comunidades envolvidas (BITAR et al., 2021; CPRM, 2014a)

Neste projeto, as suscetibilidades (alta, média e baixa) foram analisadas para cada processo individualmente (escorregamentos, inundações, corridas de detritos e enxurradas), envolvendo fatores predisponentes e métodos específicos de análise; estabelecimento de critérios para classificação e zoneamento segundo distintos graus e formas incidentes; definição da apresentação; e desenvolvimento de métodos para validação dos resultados (CPRM, 2014a)

O mapeamento de áreas suscetíveis a **inundações** se baseou nas características geológicas, topográficas e morfológicas das bacias estudadas, sendo utilizados índices morfométricos (área de contribuição, relação de relevo, densidade de drenagem, índice de circularidade e índice de sinuosidade) e o modelo HAND (*Height Above Nearest Drainage*) para classificação e zoneamento das inundações (CPRM, 2014a).

Para os processos de **corridas de detritos**, foram utilizados os seguintes critérios: unidades de relevo serrano; terrenos com alta suscetibilidade a deslizamentos; amplitude topográfica > 500 metros; bacias de drenagem com área < 10 km²; e relação entre amplitude e área da bacia dada pelo Índice de Melton > 0,3 (CPRM, 2014a). Já para classes de **escorregamentos** foram considerados fatores predisponentes como declividade, curvatura de encosta e densidade de lineamentos estruturais (p. ex. fraturas, juntas, zonas de falhas e outras descontinuidades), sendo o Índice de Suscetibilidade a Deslizamentos (ISD) de cada parâmetro calculado pelo método do Valor Informativo (VI) (CPRM, 2014a).

A **Setorização de Áreas de Risco Geológico (Figura 6)** consiste na identificação e caracterização das porções urbanizadas do território municipal sujeitas as perdas ou danos causados por eventos adversos de natureza geológica (MINISTÉRIO DAS CIDADES; IPT, 2007). De acordo com a plataforma do CPRM, já foram mapeados 1607 municípios, sendo 71 na região Centro-Oeste, 241 na Região Norte, 508 na região Nordeste, 397 na região Sul e 390 na região Sudeste. Os estados de Santa Catarina, Minas Gerais e São Paulo possuem o maior número de municípios mapeados, 294, 193 e 115, respectivamente²³.

Nesta abordagem, *o zoneamento compreende a identificação dos processos destrutivos atuantes, a avaliação do risco de ocorrência de acidentes e a delimitação e distribuição espacial de setores homogêneos em relação ao grau de probabilidade de ocorrência do processo ou mesmo ocorrência de risco, estabelecendo tantas classes quantas necessárias* (MINISTÉRIO DAS CIDADES; IPT, 2007).

²³ <http://www.cprm.gov.br/publique/Gestao-Territorial/Prevencao-de-Desastres/Setorizacao-de-Risco-Geologico-5389.html>. Consulta 23.05.2022



Figura 6: Exemplo de uma setORIZAÇÃO de risco no município de São Luiz do Paraitinga. Fonte: (CPRM, 2014a)

A primeira etapa deste método consiste em uma pré-setorização da área com base em alguns parâmetros, tais como declividade, tipologias do processo e da ocupação e qualidade da ocupação (madeira, alvenaria ou mista) (CERRI, 2006; CERRI et al., 2007). Em campo, são reconhecidos processos geomorfológicos atuantes (deslizamentos e/ou solapamentos de margens fluviais) e realizadas observações, sistematizadas em fichas, para identificação dos condicionantes dos processos de instabilização, evidências (feições) de instabilidade e indícios do desenvolvimento de processos. Nestas fichas são anotadas a presença de evidências de movimentação, presença de água e vegetação (CERRI, 2006; TOMINAGA, 2009).

Faz-se também o uso de fotografias aéreas, imagens de satélite e fotografias oblíquas de baixa altitude que ajudam na setORIZAÇÃO da área. Ao final é atribuído um grau de probabilidade de ocorrência do processo, considerando o período de um ano, para cada setor mapeado, variando do Risco Baixo (R1) até o Risco Muito Alto (R4) (CERRI, 2006; MINISTÉRIO DAS CIDADES; IPT, 2007).

Em 2013, a partir do acordo de Cooperação Técnica entre o IBGE e o CEMADEN, se inicia a construção da Base Territorial Estatística de Áreas de Risco (BATER), que consiste em um conjunto de polígonos definidos especificamente para permitir a associação dos dados demográficos do Censo 2010, por meio do uso das feições censitárias, às áreas de risco do banco de dados do CEMADEN (IBGE, 2018).

Para esta associação entre os resultados do Censo Demográfico e as áreas de risco foram compatibilizadas as geometrias das áreas de risco, dos setores censitários, dos assentamentos populares e das faces de quadra²⁴, criando, portanto, um novo recorte espacial por meio de uma interpretação visual (IBGE, 2018).

Para construção da Base Territorial foram selecionadas 183 variáveis disponíveis no Censo Demográfico, relacionadas ao número de moradores em domicílios particulares permanentes, e 135 variáveis associadas ao número de domicílios particulares permanentes, incluindo informações sobre idade, sexo, alfabetização, rendimento, abastecimento de água, esgotamento sanitário, coleta de lixo e energia elétrica (IBGE, 2018). De acordo com o (IBGE, 2018), para os 872 municípios foram utilizadas 27.660 áreas de risco, 4.272 setores censitários em área urbana e 193.377 faces de quadra, formando 8.309 polígonos para a Base Territorial Estatística de Áreas de Risco, com cerca de 78% destes com dados associados ao Censo Demográfico 2010 (ALVALÁ et al., 2019).

Além dos mapeamentos da suscetibilidade e risco se destacam alguns estudos que buscaram, em território nacional, avaliar a **vulnerabilidade** da população aos diferentes processos geomorfológicos utilizando tanto a BATER (ASSIS DIAS et al., 2018, 2020; DE ALMEIDA; WELLE; BIRKMANN, 2016; SAITO et al., 2019, 2021), quanto outros métodos e ferramentas (DE LOYOLA HUMMELL; CUTTER; EMRICH, 2016; DEBORTOLI et al., 2017; MARCHEZINI; WISNER, 2017; MATOS et al., 2018; RIBEIRO; SAITO; ALVALÁ, 2022).

Assis Dias et al. (2020) avaliaram a vulnerabilidade da população de 27.116 áreas de risco em 443 municípios a partir de um Índice Operacional de Análise de Vulnerabilidade, que considerou quatro indicadores de exposição: crianças e idosos, indivíduos sem renda e/ou renda inferior a meio salário mínimo e indivíduos em domicílios com saneamento inadequado. Em

²⁴“quadra é geralmente uma área retangular bem definida da zona urbana, limitada por ruas e/ou estradas; contudo, pode ter forma irregular e ser limitada por elementos, como ferrovias, cursos d’água ou encostas. Logo, a face de quadra é um dos lados da quadra, contendo ou não domicílios. Embora as faces de quadra constituam as menores unidades territoriais com dados do Censo Demográfico associados, esses dados não são divulgados em razão de restrições relativas ao sigilo estatístico” (IBGE, 2018).

2010²⁵, de acordo com os autores, 42% das pessoas residiam em áreas classificadas como vulnerabilidade muito alta, enquanto 35% e 23% viviam em áreas classificadas como alta e média vulnerabilidade, respectivamente. Na região Sudeste, com maior número de municípios avaliados na pesquisa, cerca de 38% e 37,5% da população viviam em áreas de vulnerabilidade muito alta e alta, respectivamente. Neste estudo, 18 capitais apresentaram cerca de 40% da sua população em alta vulnerabilidade, dentre elas Salvador, São Paulo, Rio de Janeiro e Belo Horizonte, com os maiores valores absolutos da população em classe muito alta de vulnerabilidade (ASSIS DIAS et al., 2020).

No estado de São Paulo foi confeccionado o Mapa de vulnerabilidade das áreas urbanas de uso “residencial/comercial/serviços” para atender aos pressupostos da Política Estadual de Mudanças Climáticas (Lei Estadual 13.798/2009) e da Lei Federal 12.608/2012. Para o Índice de Vulnerabilidade foram selecionados os atributos físicos da ocupação urbana e os atributos socioeconômicos e de infraestrutura urbana tendo como base o Sistema de classificação do uso e padrão de ocupação urbana (UHCT).

Com o objetivo de avaliar, em escala nacional, pontos críticos de **vulnerabilidade** a desastres naturais, especialmente deslizamentos e inundações, Debortoli et al. (2017) desenvolveram dois índices a partir do conjunto de dados *climáticos* (índices climáticos extremos calculados a partir de projeções do modelo regional ETA-20km dentro dos modelos HadGEM2-ES e MIROC5); *ambientais* (uso do solo, sistemas de drenagem, relevo, declividade, densidade de estradas e hidrografia) e *socioeconômicos* (Índice de Desenvolvimento Humano, condições de moradia e índice relacionado à pobreza).

De acordo com Debortoli et al. (2017), a partir da projeção pelo modelo climático MIROC5 para dois períodos (1961-1990 e 2071-2100), haverá um aumento da vulnerabilidade para os processos de movimentos de massa da ordem de 40% até o final do século, sendo que algumas áreas, já consideradas de alta vulnerabilidade, se tornarão ainda mais vulneráveis, como a região serrana do Rio de Janeiro, parte da serra da Mantiqueira, interior e sul de Minas Gerais e diversas localidades do litoral brasileiro (DEBORTOLI et al., 2017).

²⁵ Último Censo Demográfico realizado pelo IBGE.

4.3 Modelos em Bases Físicas

4.3.1 Aspectos Gerais

Conforme anteriormente apresentado, dentre os métodos determinísticos em bases físicas se destacam os modelos **dSLAM** (*distributed, physically based slope stability model*) (WU; SIDLE, 1995); **SHALSTAB** (*Shallow Landsliding Stability Model*) (MONTGOMERY; DIETRICH, 1994; MONTGOMERY; SULLIVAN; GREENBERG, 1998); **SINMAP** (*Stability Index MAPping*) (PACK; TARBOTON; GOODWIN, 1999) e **TRIGRS** (*Transient Rainfall Infiltration And Grid-Based Regional Slope Stability*).

Estes modelos identificam a suscetibilidade a escorregamentos do tipo translacionais rasos, em escala de bacia de drenagem, a partir do acoplamento de um modelo de estabilidade e um modelo hidrológico, que pode ser de caráter transiente, como o caso do modelo **TRIGRS**, ou *steady-state* como os modelos **SHALSTAB** e **SINMAP**. Para geração destes mapas de suscetibilidade são necessários ao menos dois conjuntos de dados de entrada: topográficos (p. ex. ângulo da encosta e área de contribuição) e físicos e hidrológicos (p. ex. coesão, ângulo de atrito e condutividade hidráulica) (**Tabela 4**).

O principal avanço na identificação mais efetiva de áreas instáveis a escorregamentos, em relação às demais ferramentas, foi a inclusão matemática/física das respostas hidrológicas dos solos, em escalas de bacias hidrográficas. Esta incorporação, conforme apontam Fernandes et al. (2001), permite uma representação mais fiel do papel exercido pela topografia no condicionamento destes processos, pois incorpora o efeito de convergência dos fluxos de água, sobretudo durante o período de chuvas mais intensas e contínuas, considerado o principal fator deflagrador dos escorregamentos em ambientes tropicais e subtropicais úmidos.

Ressalta-se que, em função da importância dos parâmetros geomorfológicos no cômputo final da instabilidade das áreas, é imprescindível a seleção de um Modelo Digital de Elevação com qualidade e resolução compatíveis com o tamanho da área a ser avaliada. Neste sentido, alguns estudos apontam uma relação direta entre a resolução do MDE e o índice de acerto dos mapas de suscetibilidade, quando estes são validados por inventários ou setores de risco (BONINI et al., 2019; DIETRICH; BELLUGI; ASUA, 2001; DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; GUIMARÃES et al., 2003a; MARTINS et al., 2020).

Tabela 4: Informações básicas dos dados topográficos, geotécnicos e hidrológicos dos modelos SHALSTAB, SINMAP e TRIGRS.

MODELO/DADOS	SHALSTAB	SINMAP	TRIGRS
Topográficos (MDE)	Ângulo da Encosta Área de Contribuição	Ângulo da Encosta/ Área de Contribuição	Ângulo da Encosta/ Direção de Fluxo
Condições limites	Paralelo a Encosta	Paralelo a Encosta	Paralelo ou vertical
Modelo de Estabilidade	Talude Infinito Mohr-Coulomb		
Modelo Hidrológico	<i>Steady-State</i>	<i>Steady-State</i>	Transiente
<i>Coesão</i>	X	X	X
<i>Ângulo de atrito interno</i>	X	X	X
<i>Massa específica do solo</i>	X	X	X
<i>Massa específica da água</i>	X	X	X
<i>Lençol Freático</i>	-	X	X
<i>Espessura do Solo</i>	X	X	X
<i>Condutividade Hidráulica ou Transmissividade</i>	X	X	X
<i>Coesão das raízes</i>	-	X	-
<i>Infiltração/ Difusividade hidráulica</i>	-	-	X
Pluviométricos	-	X	X
Plataforma	SAGA	ARCGIS	arquivos asc.
Saída	Log Q/T ou carga de chuva (mm)	Índice de Estabilidade	Fator de Segurança

O modelo **SHALSTAB** (Equação 2) desenvolvido, ainda na década de 1990 (DIETRICH et al., 1993, 1995; DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; MONTGOMERY; DIETRICH, 1994), foi um dos primeiros modelos em bases físicas voltados a avaliação da suscetibilidade a escorregamentos rasos. É amplamente utilizado, sobretudo na última década, apresentando resultados bastante satisfatórios em diferentes áreas no Canadá (GOETZ; GUTHRIE; BRENNING, 2011), Coreia do Sul (KIM et al., 2016; PRADHAN; KIM, 2016), Índia (SARKAR; ROY; RAHA, 2016), Taiwan (SHOU; CHEN, 2021), Itália (MEISINA; SCARABELLI, 2007) e Portugal (FARIA et al., 2017; TEIXEIRA et al., 2015).

A condição de suscetibilidade é compreendida a partir da quantidade de chuva crítica (Q) necessária para a deflagração de escorregamentos, considerando o fluxo d'água em subsuperfície paralelo à superfície, assumindo um estado *steady-state* (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998). O modelo hidrológico utilizado baseia-se no trabalho de O'Loughlin (1986), que afirma que a saturação do solo está condicionada ao balanço entre a área de contribuição a montante (a), a transmissividade do solo (T) e o ângulo da encosta (θ). Neste modelo, considera-se que há um processo de infiltração até um plano com reduzida

condutividade hidráulica (p. ex. contato solo-rocha), seguindo então, um caminho determinado pela topografia (DIETRICH; MONTGOMERY, 1998; MONTGOMERY; DIETRICH, 1994).

$$\log \frac{Q}{T} = \frac{\text{sen}\theta}{a/b} \left(\frac{c'}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} + \frac{\rho_s}{\rho_w} \left(1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right) \right) \quad (2)$$

Onde,

Q = chuva crítica necessária para a ruptura [mm]

T = transmissividade do solo [m²/dia]

a = área de contribuição [m²]

b = comprimento do contorno da célula [m]

c = coesão efetiva do solo [Pa]

θ = o ângulo da encosta [°]

ρ_w = densidade da água [kN/m³]

ρ_s = densidade global do solo [kN/m³]

g = gravidade [m/s²]

z = espessura do solo

φ = ângulo de atrito interno [°]

O modelo **TRIGRS**, de caráter transiente, calcula a variação do fator de segurança (FS) em diferentes profundidades (z), conforme mudanças da carga de pressão (ψ) ao longo de um evento pluviométrico e num determinado tempo (Equação 3) (BAUM; SAVAGE; GODT, 2002; IVERSON, 2000).

$$FS'(Z, t) = - \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \frac{\tan \phi}{\sin \alpha \cos \alpha} \frac{I_z}{K_z} \quad (3)$$

Onde,

FS = Fator de Segurança

Z = coordenada vertical ($Z = x \sin \alpha + z \cos \alpha$) usada para calcular a carga de elevação

T = tempo de início da chuva (s)

γ_w = densidade da água [kN/m³]

γ_s = densidade do solo [kN/m³]

φ = ângulo de atrito interno [°]

I_z = taxa de intensidade de infiltração [m/s]

K_z = condutividade hidráulica saturada vertical do solo [m/s]

Este modelo permite realizar simulações considerando tanto uma condição limite de profundidade infinita, na qual a condutividade hidráulica saturada vertical pode ser considerada relativamente uniforme com a profundidade, quanto uma condição limite de profundidade finita com redução da condutividade hidráulica saturada vertical em profundidade (**Figura 7**) (BAUM; SAVAGE; GODT, 2002; IVERSON, 2000).

Assim como os demais modelos, a entrada de dados no **TRIGRS** é feita, primeiramente, por meio do Modelo Digital de Elevação, a partir do qual são derivadas as informações de declividade e de direção de fluxo. Especificamente são necessários também valores das propriedades hidráulicas, mecânicas e pluviométricas e algumas informações adicionais que controlam o modelo, como, por exemplo, o número de intervalos ao longo de uma espessura de solo, a partir dos quais são calculados os valores da carga de pressão e do Fator de Segurança (BAUM; SAVAGE; GODT, 2002).

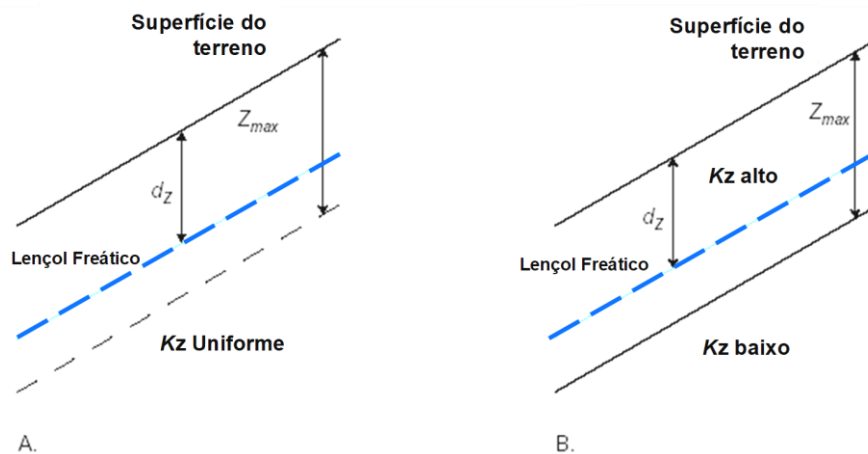


Figura 7: Seções esquemáticas das condições limites do modelo TRIGRS. (A) profundidade infinita (condutividade hidráulica saturada vertical é relativamente uniforme com a profundidade), e (B) condição limite de profundidade finita (horizonte superficial é mais permeável que os inferiores). Modificada de Baum; Savage; Godt (2002).

De acordo com suas bases teóricas, deve-se considerar as principais condições de contorno do modelo: (a) o modelo assume fluxo homogêneo saturado ou perto da saturação e solo isotrópico, não podendo, portanto, ser aplicado em áreas sob condições iniciais muito secas e anisotrópicas ou heterogêneas; (b) os resultados finais são sensíveis às condições iniciais, principalmente, profundidade do lençol freático e taxa de infiltração; (c) é desconsiderado o papel da

evapotranspiração, devido à sua baixa taxa durante eventos pluviométricos intensos; (d) a variação da carga de pressão ocorre apenas em função da profundidade e do tempo; (e) o modelo de estabilidade (Talude Infinito) assume como uniforme a profundidade e as propriedades físicas do solo, sendo aplicado somente para previsão de movimentos de massa do tipo escorregamento translacional raso (BAUM; SAVAGE; GODT, 2002).

O modelo **TRIGRS** e suas versões posteriores vêm sendo aplicado com sucesso em diferentes paisagens do mundo, como nos **EUA** (BAUM et al., 2005; BORDONI et al., 2015; DIKSHIT; SATYAM; PRADHAN, 2019; GODT; BAUM; CHLEBORAD, 2006; LIAO et al., 2011; MINDER; ROE; MONTGOMERY, 2009; MORRISSEY; WIECZOREK; MORGAN, 2001; YATHEENDRADAS et al., 2019), na **Itália** (BORDONI et al., 2015; CIURLEO; MANDAGLIO; MORACI, 2019; CUOMO; IERVOLINO, 2016; MONTRASIO; VALENTINO; LOSI, 2011; SALCIARINI et al., 2006; SALCIARINI; FANELLI; TAMAGNINI, 2017), **Coreia do Sul** (CHEN et al., 2019; PARK et al., 2016; PARK; NIKHIL; LEE, 2013; TRAN et al., 2017; VIET et al., 2017), **Colômbia** (MARIN; GARCÍA; ARISTIZÁBAL, 2021), **Canadá** (AL-UMAR; FALL; DANESHFAR, 2020) e **Índia** (DIKSHIT; SATYAM; PRADHAN, 2019; WEIDNER et al., 2018).

4.3.2 Modelos em Bases Físicas utilizados no Brasil

No caso de estudos realizados no Brasil, nota-se que os modelos mais usualmente utilizados são o **SINMAP**, o **SHALSTAB** e o **TRIGRS** (**Tabela 5**), aplicados, sobretudo, em bacias hidrográficas com baixa ou nenhuma ocupação urbana e localizadas majoritariamente na Serra do Mar nos estados de São Paulo (NERY; VIEIRA, 2015; VIEIRA; FERNANDES; FILHO, 2010), Rio de Janeiro (DOURADO; ARRAES; SILVA, 2013; FERNANDES et al., 2001; GOMES et al., 2013a, 2005; RABACO, 2005; VIEIRA et al., 2018), Santa Catarina (MICHEL; KOBIYAMA; GOERL, 2014) e Paraná (MARTINS et al., 2017b).

Deve-se notar a aplicação destes modelos também em bacias hidrográficas no Rio Grande do Sul (RIFFEL et al., 2016), Minas Gerais (FARIA; ZAIDAN, 2014; GUIMARAES et al., 2003; PECHINCHA; ZAIDAN, 2013; QUINA et al., 2020; RAMOS et al., 2007; ZAIDAN; FERNANDES, 2009), Espírito Santo (SILVA et al., 2013) e Ceará (BISPO et al., 2018; SOUSA et al., 2018).

Tabela 5: Aplicação dos modelos TRIGRS, SHALSTAB e SINMAP no Brasil, considerando a escala, a resolução do Modelo Digital de Elevação e o índice de acerto.

Modelo	Referência	Área	Escala	MDE (m)	Acerto (%)
SHALSTAB	Fernandes et al (2001)	Rio de Janeiro (RJ)	1:10.000	2	79
	Guimarães et al. (2003)	Rio de Janeiro (RJ)	1:10.000	2	79
	Ramos et al. (2002)	Quadrilátero Ferrífero (MG)	1:50.000	20	-
	Gomes et al. (2005)	Rio de Janeiro (RJ)	1:10.000 1:50.000	2 10	82 12
	Zaidan e Fernandes (2009)	Juiz de Fora (MG)	1:2.000	-	100
	Listo e Vieira (2012)	São Paulo (SP)	1:10.000	4	88
	Silva et al. (2012)	Santa Catarina	1:50.000	10	15-80
	Silva et al (2013)	Vitória (ES)	1:5.000	2	-
	Michel et al. (2014)	Rio Cunha (SC)	-	5	100
	Vestena e Kobiyama (2014)	Santa Catarina (SC)	-	20	-
	Vieira e Ramos (2015)	Caraguatatuba (SP)	1:10.000	5	40
	Sbroglia et al (2016)	Santa Catarina	1:10.000 1:50:000	1 10	100 90
	Riffel et al (2016)	Rio Grande do Sul	-	30	82
	Martins et al. (2017)	Serra do Mar (PR)	1:10.000	1/LiDAR	50
	Bonini et al (2020)	Vale do Ribeira (SP)	1:10.000	10	0.75*
	Bispo et al. (2018)	Ceará	1:50.000	12,5/ALOS	97
	Souza et al. (2018)	Ceará	-	30	-
	Santos e Listo (2019)	Recife (PE)	-	2,5	20
	König et al (2019)	Campos do Jordão	-	30 (SRTM)	-
	Effgen et al (2020)	Vitória (ES)	-	3	-
	Zimmerann e Higashi (2021)	Joinville (SC)	1:5.000	-	100
	Oliveira et al (2021)	Rio de Janeiro (RJ)	-	-	-
Cabral et al (2022)	Cubatão (SP)	1:10.000	5	-	
SINMAP	Marés et al (2010)	Rio Sagrado (PR)	-	10	~60
	Bueno et al. (2020)	Serra do Mar (PR)	-	5-100	-
	Pechincha e Zaidan (2013)	Juiz de Fora (MG)	-	1/LiDAR	~80
	Silva (2006)	Paquequer (RJ)	1:10.000 1:50.000	10	~10 ~37
	Nery e Vieira (2014)	Cubatão (SP)	1:10.000	2	>70
	Cardozo et al (2019)	Serra do Mar (RJ)	-	10	68
	Quina et al (2020)	Juiz de Fora (MG)	-	1	-
TRIGRS	Vieira et al. (2010)	Cubatão (SP)	1:10.000	5	66
	Listo et al (2015)	Caraguatatuba (SP)	-	25	67
	Vieira et al (2018)	Cubatão (SP)	1:10.000	5	90
	Guimarães et al (2019)	Rio de Janeiro	-	2	97
	Ávila et al (2020)	São José dos Campos (SP)	1:10.000	5	0.72*
	Pinho (2019)	Itaóca/Apiáí (SP)	-	2/LiDAR	-

Foram priorizadas as pesquisas publicadas no formato de artigos de periódicos indexados. *Curva ROC. Os dados não preenchidos não foram informados pelos autores ou não avaliados na pesquisa.

4.3.3 Modelo SHALSTAB no Brasil

Este modelo ainda é um dos mais utilizados no Brasil (MELO; KOBAYAMA, 2018; VIEIRA; MARTINS; LISTO, 2017; VIEIRA; MARTINS, 2016). As primeiras pesquisas foram desenvolvidas em duas bacias hidrográficas (Quitite e Papagaio), localizadas no maciço da Tijuca no município do Rio de Janeiro, afetadas por escorregamentos e corridas de detritos em 1996 (FERNANDES et al., 2001; FERNANDES et al., 2004; GOMES et al., 2013; GUIMARÃES, 2000; GUIMARÃES et al., 2003). Os autores analisaram diferentes procedimentos para obtenção do MDE²⁶ e da área de contribuição, apontando os melhores resultados do módulo *Topogrid*. Além disso, avaliaram a sensibilidade do modelo, por meio de simulação de cenários, referente à variação dos valores geotécnicos (p. ex. coesão) e verificaram que o valor de coesão nulo produziu resultados mais satisfatórios, em que 79% das 92 cicatrizes coincidiram com as três primeiras classes instáveis (**Figura 8**).

Na mesma área de estudo, Gomes et al. (2013, 2005) compararam os resultados dos modelos a partir do emprego de dados topográficos em distintas escalas (1:10.000 e 1:50.000). Os autores apontaram resultados eficientes, na escala 1:10.000, com 70% das cicatrizes coincidindo com a classe instável. Entretanto, utilizando 1:50.000, houve um forte decréscimo deste índice para apenas 12%.

Na região do Quadrilátero Ferrífero (MG), o modelo foi aplicado em escala 1:50.000, sendo adotados os valores de 2 g/cm³ para densidade do solo e 45° para o ângulo de atrito e desconsiderando a coesão do solo. Os resultados foram considerados satisfatórios, com destaque para as áreas de maior instabilidade na porção leste da região, abrangendo principalmente os municípios de Ouro Preto, Santa Bárbara, Itabirito e Mariana (GUIMARAES et al., 2003).

No município de Petrópolis (RJ), Silva (2006) aplicou o **SHALSTAB** no intuito de avaliar a eficácia de acordo com o cenário local, que apresenta tanto fatores naturais de instabilidade quanto antrópicos. Foram realizadas três simulações diferentes por meio de ensaios geotécnicos *in situ*. Conforme a autora, as cicatrizes sobrepostas ao mapa de suscetibilidade se localizam em áreas previstas como instáveis. Também na região serrana do Rio de Janeiro, no Parque Nacional da Serra dos Órgãos, Guimarães et al. (2009) utilizaram a pluviosidade média mensal

²⁶ Nesse exemplo trata-se de um Modelo Digital de Terreno – MDT, pois baseava-se exclusivamente em curvas-de-nível

com intuito de identificar a variabilidade espacial dos locais suscetíveis a escorregamentos rasos ao longo do ano. Segundo os autores, o uso de valores dos eventos de chuva mais significativos para cada mês, possibilitou a determinação de zonas suscetíveis e a avaliação da dinâmica sazonal dos escorregamentos.

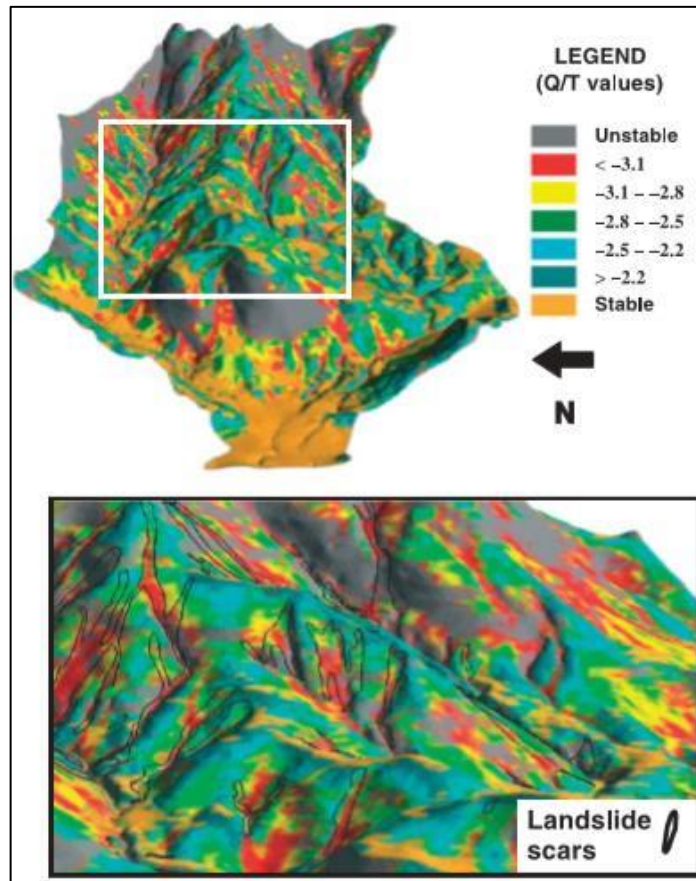


Figura 8: Mapa de Suscetibilidade das bacias dos Rios Quitite e Papagaio desenvolvido por Guimarães (2000). Fonte: Fernandes et al. (2004)

Mesmo que o **SHALSTAB** desconsidere a influência humana, destacam-se trabalhos que testaram o modelo em bacias hidrográficas densamente urbanizadas nos municípios de Juiz de Fora (MG) (FARIA; ZAIDAN, 2014; ZAIDAN; FERNANDES, 2009) e Vitória (ES) (SILVA et al., 2013); na região metropolitana de São Paulo (LISTO; VIEIRA, 2012a); nos municípios de Camaragibe (PE) (SANTOS; LISTO, 2019) Campos do Jordão (SP) (KÖNIG; KUX; MENDES, 2019).

Em uma bacia hidrográfica da região metropolitana de São Paulo, diferente das pesquisas realizadas em paisagens menos antropizadas, a validação dos cenários foi feita a partir do mapa de risco, envolvendo cerca de 2.000 moradias, baseado no método do MINISTÉRIO DAS CIDADES; IPT (2007). Os resultados foram bastante eficientes, uma vez que dos 16 setores de risco, 12 foram “concordantes” com mapa de suscetibilidade gerado pelo modelo. Por exemplo, em um dos setores mapeados como R2 (risco médio), cerca de 50% da área foi considerada estável pelo modelo (LISTO; VIEIRA, 2012b). Nesta mesma linha de pesquisa, em uma bacia urbana no município de Juiz de Fora (MG), foi realizado um zoneamento de risco tendo como base uma análise conjunta entre os resultados da suscetibilidade gerados pelo modelo SHALSTAB e o mapa de uso ocupação da terra (ZAIDAN; FERNANDES, 2015, 2009).

Na bacia do rio Paquequer em Teresópolis (RJ), SILVA (2006) comparou os resultados dos modelos **SHALSTAB** e **SINMAP** nas escalas 1:10.000 e 1:50.000. De acordo com a autora, utilizando a escala 1:50.000, o modelo **SINMAP** apresentou uma correlação de até 47%, enquanto o **SHALSTAB** apresentou no máximo 10%. Porém, em ambos os modelos, na escala 1:10.000, houve um incremento de até dez pontos percentuais entre as áreas mais instáveis e as cicatrizes mapeadas.

Na Serra do Mar Paranaense o modelo foi aplicado em duas bacias hidrográficas afetadas por escorregamentos em 11 de março de 2011, durante um período de precipitação pluvial acumulado de 263 mm nos primeiros onze dias do mês (MARTINS et al., 2016, 2017a, 2017b). Considerando a importância da qualidade dos dados topográficos no mapeamento final da suscetibilidade, os autores utilizaram dados gerados tanto por cartas topográficas quanto por pontos LiDAR, com o objetivo de avaliar a resposta do **SHALSTAB** quando comparados estes dois conjuntos de dados para a geração do MDT (MARTINS et al., 2017a). Segundo os autores, ao validarem os mapas gerados pelo SHALSTAB por meio de um inventário de cicatrizes de 2011, a identificação das áreas instáveis foi bastante similar.

Na região Nordeste o modelo foi utilizado na borda oriental da Chapada do Araripe, tendo como entrada topográfica o MDE (12,5 m), ALOS PALSAR RTC, e dados geotécnicos secundários obtidos em área próxima (BISPO; LISTO; DA SILVA, 2018). Utilizando um inventário com 34 cicatrizes, segundo os autores, 97% dos escorregamentos foram identificados nas áreas previstas como instáveis pelo modelo.

Em uma bacia afetada por escorregamentos rasos em 2014 no Litoral Sul de São Paulo (Vale do Ribeira), Bonini et al. (2020) compararam o desempenho dos mapas de suscetibilidade gerados pelo **SHALSTAB** e pelo modelo estatístico do Valor Informativo (YIN; YAN, 1988). Os autores utilizaram um MDT com resolução de 10m, tendo como base de validação e comparação a Taxa de Sucesso e a Matriz de Contingência (CHUNG; FABBRI, 2003; FAWCETT, 2006a). Segundo os autores, cerca de 75% das cicatrizes dos escorregamentos de 2014 se concentraram nas áreas classificadas como instáveis pelo **SHALSTAB** (55% de área instável), enquanto pelo VI, 79% das cicatrizes se concentraram nas classes instáveis (44%). Neste sentido, considerando a Taxa de Sucesso, o modelo VI apresentou-se aproximadamente 10% mais eficiente em relação ao **SHALSTAB** (BONINI et al., 2020) .

No estado de Santa Catarina, se destacam as pesquisas realizadas por MICHEL; KOBIYAMA; GOERL (2014); VESTENA; KOBIYAMA (2014). Os primeiros autores compararam os resultados do SHALSTAB e do modelo SINMAP, afirmando que o SHALSTAB apresentou melhor desempenho na identificação de áreas suscetíveis, sobretudo para estimativa do volume de sedimentos produzido por estes processos. O estudo foi realizado em uma bacia no município de Rio dos Cedros (SC) afetada pelos escorregamentos em novembro de 2008, em que 100% das cicatrizes mapeadas coincidiram com classes de maior instabilidade do modelo. Assim, como estes autores, Cabral et al. (2022) também identificaram a melhor performance do modelo **SHALSTAB**. A partir da curva ROC, verificaram que os cenários gerados pelo modelo apresentaram maior quantidade de cicatrizes em áreas instáveis (verdadeiros positivos) e também maior acurácia global (taxa entre resultados verdadeiros positivos e falsos positivos) (CABRAL et al., 2022).

Na área ao entorno do Morro do Baú (SC), o modelo foi mais uma vez aplicado para geração de mapas de suscetibilidade (SBROGLIA et al., 2016, 2017). Foram gerados cenários variando a resolução dos dados topográficos (1m e 10m) e os valores das propriedades geotécnicas obtidas em campo, ora homogêneas ora baseadas em unidades geotécnicas (SBROGLIA et al., 2016). A partir da validação, com base em um inventário de 527 cicatrizes, os autores concluem sobre a importância da resolução do MDE, pois houve um aumento do acerto do modelo considerando a maior resolução do MDE (mais de 60%). Nesta mesma linha de trabalho, SILVA et al. (2021) geraram cenários utilizando diferentes espessuras de solo (A1 = 2 m, A2 = 5 m, A3 = 10 m e A4 = 15 m) e um MDE de 10 m de resolução. Segundo os autores, no cenário A1, 90% da bacia foi classificada como incondicionalmente estável e, com o aumento da espessura do solo, tal valor sofreu um decréscimo, chegando a 40% no cenário A4.

Mais recentemente, em uma bacia hidrográfica no município de Vitória (ES), o **SHALSTAB** foi empregado considerando diferentes valores geotécnicos coletados em campo (condutividade hidráulica saturada, coesão, ângulo de atrito, densidade aparente do solo úmido e profundidade) em Argissolos desenvolvidos a partir de colúvio, Latossolos e Cambissolos, e adotando um MDE com resolução de 3m. Os autores encontraram os seguintes índices críticos para a bacia: 5-10mm (23,11%), 15-25mm (17,36%) e 10-15mm (15,76%), sendo que nas duas primeiras foram identificados registros de escorregamentos por meio de laudos técnicos de vistorias municipais (EFFGEN et al., 2020).

4.3.5 Modelo TRIGRS no Brasil

No Brasil, Rabaco (2005) foi uma das primeiras autoras a utilizar o modelo TRIGRS. A autora, em um trecho na Serra do Mar fluminense cortada por oleodutos, comparou modelos matemáticos em bases físicas (SHALSTAB e TRIGRS) e modelos empíricos (SMORPH - *Slope Morphology Model* e do IPT). Segundo a autora, os resultados mostraram que os modelos SHALSTAB e TRIGRS superestimaram as áreas propensas a escorregamentos, mas identificaram exatamente a área destes processos. Entretanto, neste trabalho, os depósitos de tálus foram mapeados como cicatrizes e por isso, conforme a autora, pode ter ocorrido a superestimação (RABACO, 2005). Seguindo a mesma linha de pesquisa, outros estudos nacionais também buscaram comparar os resultados obtidos pelo modelo TRIGRS e métodos estatísticos, como o Fator de Segurança (ÁVILA et al., 2021), e os modelos SHALSTAB (VIEIRA, 2007; VIEIRA et al., 2018) e SINMAP (PINHO, 2019).

Ávila et al. (2021), no município de São José do Campos (SP), compararam os resultados do modelo TRIGRS e do modelo de Fator de Segurança (FS), considerando mudanças no uso e cobertura da terra. Resultados baseados na validação pela curva ROC, utilizando um inventário de 65 escorregamentos, mostraram similaridades nos mapas finais de suscetibilidade, mas com o desempenho superior do modelo TRIGRS (0.72) em relação ao FS (0.65).

Diferentemente dos demais modelos que avaliam a suscetibilidade a escorregamentos rasos, o **TRIGRS** gera um conjunto de informações que pode ser utilizado na avaliação da distribuição espacial das áreas instáveis. Listo; Vieira (2015) avaliaram a variação do Fator de Segurança em profundidade a partir dos resultados do modelo **TRIGRS** e em investigações de campo realizadas por Gomes; Vieira (2016); Vieira, Ferreira; Gomes (2015). 67% das cicatrizes dos

escorregamentos ocorridos em 1967, em uma bacia hidrográfica no município de Caraguatatuba (SP), foram identificadas nas classes com $FS < 1$, sugerindo uma profundidade potencial de ruptura entre 2 e 2,5m (LISTO; VIEIRA, 2015).

O uso do modelo **TRIGRS** associado à outras ferramentas, pode ser uma contribuição importante para a previsão de escorregamentos em regiões montanhosas. Guimarães (2019) utilizou o modelo numérico de previsão de tempo e simulação atmosférica de mesoescala *Weather Research and Forecasting* (WRF), para indicar os valores de intensidades de chuva para cada período (início e fim de cada período de chuva), conforme a estrutura do modelo TRIGRS. Também foi analisado o percentual de acerto dos mapas de suscetibilidade considerando diferentes alturas iniciais do lençol freático (0, 1 e 2m), um dos parâmetros mais sensíveis do modelo (BAUM et al., 2002).

Para a previsão de áreas suscetíveis em bacias hidrográficas nos os municípios de Itaóca e Apiaí, litoral sul do estado de São Paulo, PINHO (2019) utilizou os modelos SHALSTAB, SINMAP e TRIGRS a partir de cenários com variações de chuva, parâmetros hidrogeológicos e profundidades das superfícies de ruptura. Segundo o autor, embora a eficiência dos modelos tenha sido muito semelhante entre eles, os melhores resultados nas simulações, considerando a precipitação associada ao evento, foram obtidos pelo modelo TRIGRS (PINHO, 2019).

Por fim, vale reforçar que, mesmo considerando o grande potencial do TRIGRS, o modelo ainda tem um uso muito incipiente no Brasil. O modelo, de fato, apresenta inúmeras vantagens sobre os demais, como por exemplo, a saída de resultados mais facilmente interpretada, por meio dos valores absolutos do FS; a possibilidade de alteração das condições de contorno; a inclusão de diferentes intensidades e duração do evento pluviométrico; definição das condições iniciais de infiltração; indicação da variação da condutividade hidráulica em profundidade, entre outras.

Por outro lado, como qualquer outro modelo em bases físicas, existe uma maior complexidade da sua modelagem hidrológica e a exigência, portanto, de um volume maior de dados geotécnicos e hidrológicos de entrada. Outro ponto que pode desencorajar uma aplicação mais ampla é a interação com a entrada e saída dos dados, uma vez que exige um conhecimento em linguagem Fortran e o uso de linhas de comando, além da necessidade de importação dos dados finais da suscetibilidade em ambiente SIG.

5. MOVIMENTOS DE MASSA NA SERRA DO MAR PAULISTA

“A vertente Atlântica de São Paulo, constituiu uma espécie de província geomórfica e paleogeográfica sobremaneira à parte no conjunto do território paulista. Representa um campo complexo das interferências de processos geológicos-tectônicos, estáticos e erosivos – na história do relevo do Brasil Sudeste.”

(Ab’Saber, 1965)

5.1 Serra de Cubatão

5.1.1 Aspectos Gerais do Evento de 1985

Entre os dias 23 e 24 de janeiro de 1985 encostas e fundos de vale das Serra de Cubatão e Paranapiacaba foram amplamente afetadas por escorregamentos e corridas de detritos. Nesse evento, postos pluviométricos registraram índices acima de 100mm diários, valores estes que são cerca de 40 a 60% superior ao volume total do mês de janeiro (IPT, 1986; TATIZANA et al., 1975; WOLLE, 1985; WOLLE; HACHICH, 1989). O posto localizado na bacia do rio Moji, à 820m de altitude, registrou 379,4mm/48h (**Figura 9**).

Como consequência destas chuvas, foram deflagrados cerca de 1742 escorregamentos (**Figura 10**) que se concentraram nos setores médios e altos da Serra (acima de 300 m), em encostas com ângulos entre 34° e 39° e curvatura retilínea, e em três unidades litológicas: migmatitos estromatíticos de neossoma dominante (56%), migmatitos estromatíticos com paleossoma de biotita-muscovita-clorita xistos (27%) e migmatitos com teores variáveis de quartzo (10%) (LOPES, 2006; LOPES et al., 2007). Algumas bacias hidrográficas foram mais intensamente afetadas, dentre elas as bacias da Copebrás²⁷ (3,6 km²) e da Ultrafértil (2,5 Km²) nas quais foram mapeadas, respectivamente, 356 e 216 escorregamentos (NERY; VIEIRA, 2015; VIEIRA; FERNANDES; AUGUSTO FILHO, 2009).

²⁷ Nomeada bacia da COPEBRÁS em função da setorização de parte da Serra do Mar realizada pelo IPT (1984)

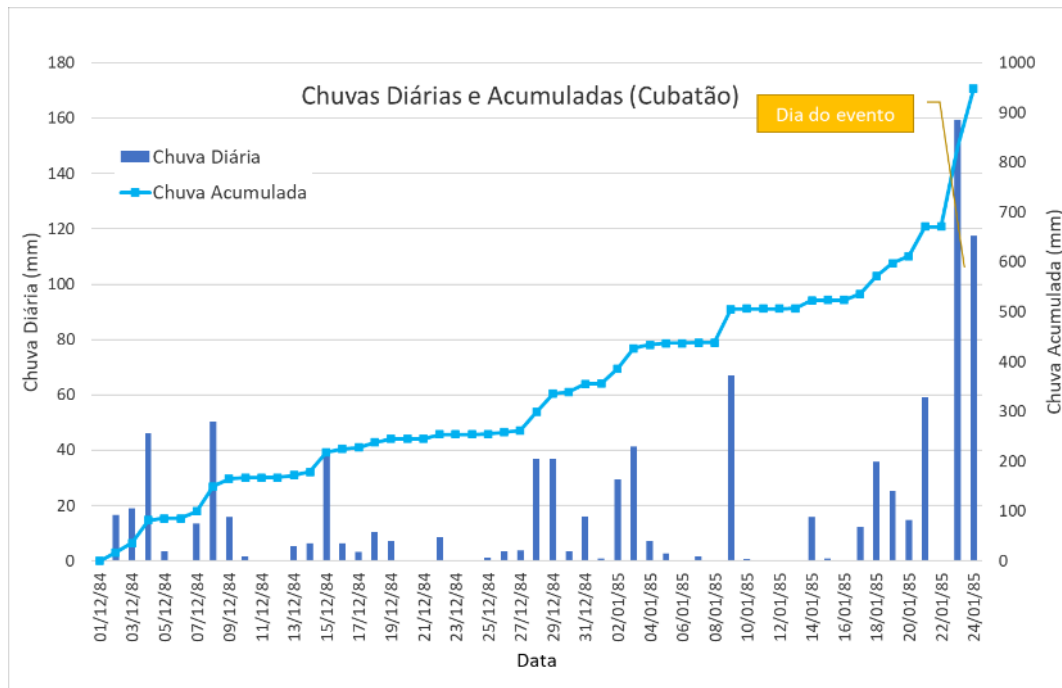


Figura 9: Chuvas diárias e chuvas acumuladas do evento dos dias 22 e 23 de janeiro de 1985 nas Serras de Cubatão e de Paranapiacaba. Fonte de dados: DAEE. Posto E3-153.

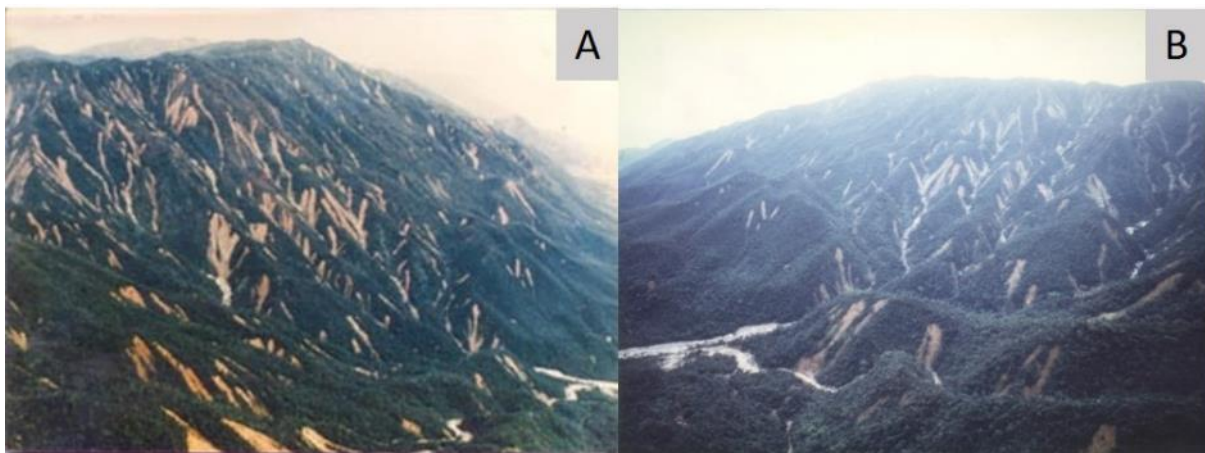


Figura 10: Escorregamentos generalizados na Serra do Mar em Cubatão. Fonte: IPT.

Os inventários das duas bacias foram feitos por meio de fotointerpretação a partir de um levantamento aerofotogramétrico²⁸ realizado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) em agosto de 1985 (1:25.000), utilizando como principal critério a “ausência de vegetação” para delimitação dos polígonos das cicatrizes de escorregamentos. Especificamente

²⁸ Fotografias digitalizadas em scanner com 900dpi em 24bits (RGB) e posteriormente ortoretificadas por meio do programa ENVI 4.1.

para a bacia da Copebrás foi considerado apenas o terço superior das cicatrizes, descartando as zonas de transporte e de deposição (**Figura 11**), enquanto na bacia da Ultrafértil todos os setores foram mapeados, pois o modelo aplicado (**SINMAP**) faz a validação dos cenários por meio de pontos e não polígonos.

É importante ressaltar as dificuldades encontradas nestas pesquisas durante a elaboração dos mapas de inventários de cicatrizes. Em alguns setores das bacias, encostas voltadas para L e NE (Bacia da Ultrafértil) e voltadas para S e SW (Bacia da Copebrás), o forte sombreamento topográfico gerou incertezas quanto à delimitação e a própria identificação temporal da sua deflagração (NERY; VIEIRA, 2015; VIEIRA, 2007).

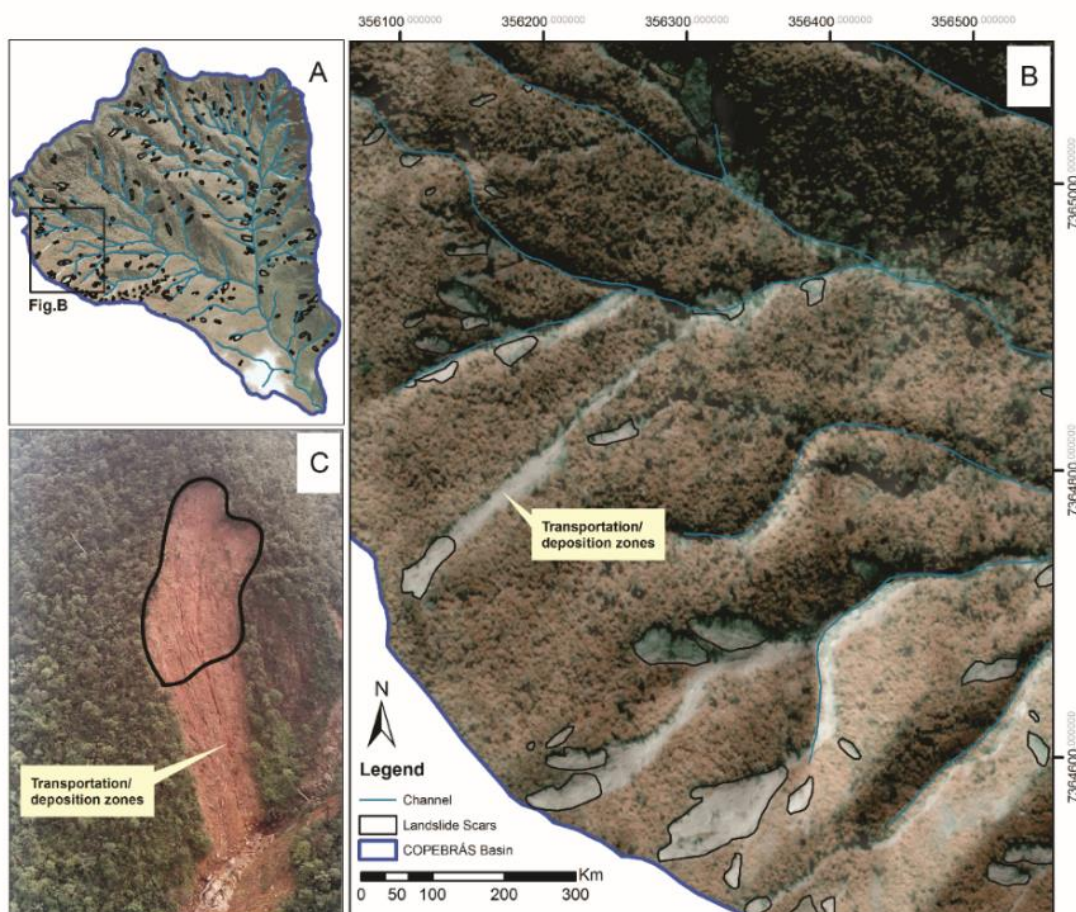


Figura 11: Exemplo da técnica de mapeamento utilizada para definição das cicatrizes dos escorregamentos, desconsiderando as áreas de transporte e de deposição (B e C). Fonte: Vieira et al. (2018).

5.1.2 Mapas de Suscetibilidade a Escorregamentos Rasos

Os mapas de suscetibilidade foram elaborados por meio da aplicação dos modelos **SHALSTAB** e **TRIGRS** (Bacia da Copebrás) e **SINMAP** (Bacia da Ultrafértil). Durante o processo de elaboração dos mapas foram gerados alguns cenários de suscetibilidade, com base em diferentes valores dos parâmetros geotécnicos, hidrológicos e pluviométricos, considerando as estruturas matemáticas de cada um dos modelos (**Tabela 6**). Detalhes sobre a seleção dos valores usados nos cenários podem ser consultados em Vieira (2007); Nery e Vieira (2009); Nery (2011); Vieira et al. (2018). Paralelamente, os resultados dos mapas de suscetibilidade puderam ser interpretados não apenas com base na sua validação, mas também por meio da avaliação entre as áreas com diferentes classes de suscetibilidade e as características das encostas (curvatura, ângulo da encosta e orientação das encostas) e da litologia.

Tabela 6: Valores de parâmetros geotécnicos usados nas simulações de cenários de suscetibilidade.

Bacias	Cenário	Parâmetros								
		c (Pa)	ρ_s (kN/m ³)	z (m)	Φ (°)	d (m)	I_{LT} (m/s)	D_0 (m ² /s)	K_s (m/s)	TR
Copebrás	A1	1000	17,1	1	34	1	1.0×10^{-9}	5.5×10^{-4}	1.0×10^{-6}	-
	A2	1000	17,1	2	34	2	1.0×10^{-9}	5.5×10^{-4}	1.0×10^{-6}	-
	A3	1000	17,1	3	34	3	1.0×10^{-9}	5.5×10^{-4}	1.0×10^{-6}	-
	B1	6000	14,3	1	34	1	1.0×10^{-9}	5.5×10^{-4}	1.0×10^{-6}	-
	B2	6000	14,3	2	34	2	1.0×10^{-9}	5.5×10^{-4}	1.0×10^{-6}	-
	B3	6000	14,3	3	34	3	1.0×10^{-9}	5.5×10^{-4}	1.0×10^{-6}	-
Ultrafértil	C1	0,07 - 0,96	17,1	1	34-39	-	-	-	$1,3 \times 10^{-5}$	46-142
	C2	0,06 - 0,83	13,5	1,5	34-39	-	-	-	$1,3 \times 10^{-5}$	68-213
	C3	0,15 - 0,43	13,30	3,4	34-39	-	-	-	$1,3 \times 10^{-5}$	159-497

Números AS Plot 1000; Linha de Umidade 20%

Fonte dos Dados: (NERY; VIEIRA, 2015; VIEIRA et al., 2018)

Os mapeamentos, assim como os dados topográficos de entrada dos dois modelos, foram realizados pelo Modelo Digital de Elevação com resolução de 2m, construído por meio de cartas topográficas digitais, com equidistância de 5 m em escala de 1:10.000.

Nas duas bacias a distribuição espacial das áreas instáveis e estáveis foi bastante controlada pelas variáveis topográficas, principalmente pelo ângulo da encosta, aspecto e curvatura. As áreas estáveis aparecem nos topos mais suaves dos principais interflúvios, em encostas convexas com ângulos inferiores a 30°, e as áreas instáveis em porções mais elevadas (acima

de 400m) e íngremes (ângulos $> 40^\circ$) (NERY; VIEIRA, 2015; VIEIRA; FERNANDES; AUGUSTO FILHO, 2009; VIEIRA et al., 2018).

Na Bacia da Copebrás, os modelos **TRIGRS** e **SHALSTAB** apresentaram resultados satisfatórios quando validados pelo inventário do evento de 1985. Os mapas de suscetibilidade dos diferentes cenários avaliados (A1, A2 e A3) foram semelhantes entre os modelos quanto à distribuição espacial das classes de suscetibilidade, mas o cenário A3 foi mais eficiente, pois obteve um percentual acumulado da concentração das cicatrizes de 90% na classe incondicionalmente instável pelo modelo SHALSTAB, e os maiores valores do Potencial de Escorregamentos nas classes com $FS < 1$ (**Figura 12**).

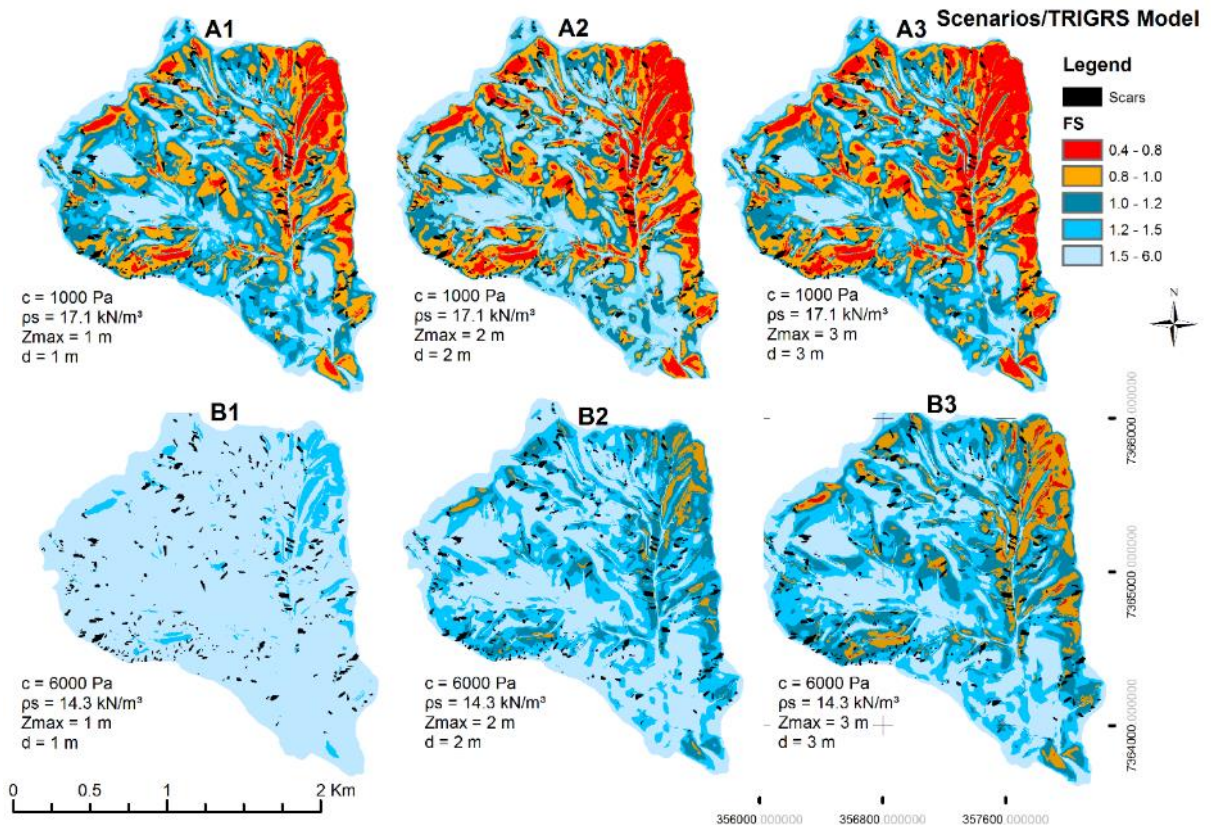


Figura 12: Mapas de Suscetibilidade gerados pelo modelo TRIGRS. Fonte: Vieira et al. (2018)

Assim como os modelos anteriores, em relação a bacia da Ultrafértil, o modelo **SINAMP** apresentou-se eficiente, pois cerca de 90% dos escorregamentos deflagrados em 1985 foram identificados nas classes mais instáveis (NERY; VIEIRA, 2015).

Embora não existam dados mais completos sobre as condições hidrológicas durante o processo de ruptura das encostas, a partir da aplicação destes três modelos, foi possível inferir sobre este tema. Os resultados do SINMAP apontam que a maior parte dos escorregamentos ocorreu sob condições não saturadas (NERY; VIEIRA, 2015), e os cenários de suscetibilidade mais eficientes, gerados pelo modelo TRIGRS, consideraram o aumento da condutividade hidráulica em profundidade. Condições similares àquelas identificadas em outras pesquisas na Serra do Mar (WOLLE, 1985; WOLLE; HACHICH, 1989; WOLLE; MELLO; ALTRICHTER, 2001).

Segundo Carvalho (1989, p.36), em estudos realizados em cicatrizes de escorregamentos de 1985 na Serra de Cubatão, “o nível freático, localizado abaixo dos horizontes de solo, não foi detectado em nenhuma das sondagens e as superfícies de ruptura dos escorregamentos desenvolveram-se nas proximidades da base do horizonte superficial, expondo apenas esporadicamente o horizonte saprolítico.”

Neste contexto, cenários de suscetibilidade gerados por modelos em bases físicas e, devidamente validados, permitiram indicar não apenas parâmetros pedológicos (p. ex. coesão) e geomorfológicos (p. ex. ângulo da encosta), mas valores limites críticos (ou intervalos) da estabilidade das encostas. Nestas pesquisas, verificou-se que a espessura dos solos, a coesão e a altura inicial do lençol freático são os parâmetros mais sensíveis.

Considerando os melhores cenários, ou seja, aqueles que maximizaram a concordância entre a área prevista dos escorregamentos e aquela inventariada, minimizando a área prevista como instável (SALCIARINI et al., 2006), foi possível apontar que as áreas de maior instabilidade possuem entre 1 e 3 metros de espessura de solos, coesão entorno de 1000Pa e altura inicial do lençol freático entre 2 e 3 metros.

Portanto, estes modelos podem ser, de fato, utilizados em áreas remotas com grande deficiência de dados de campo ou naquelas onde existe uma significativa variabilidade espacial dos parâmetros pedológicos que dificultam o levantamento mais detalhado. A sua aplicação não substituiu, de forma alguma, a investigação e o conhecimento do processo em campo, mas pode ser usado como mais um instrumento de apoio na compreensão da distribuição espacial dos escorregamentos.

5.2 Serra de Caraguatatuba

A lama vermelha, amolecida por três dias de chuva forte, deslizou sobre a cidades, encobriu as casas ao pé da serra, por cima vieram arvores inteiras, derrubando paredes e se amontando na estrada. Dez minutos depois Caraguatatuba quase não existia mais (...)

Depois da tromba-d'água, os desabamentos foram se sucedendo nos morros (...). Eles continuaram no sábado à noite e madrugada de ontem, encobrindo mais casas e fazendo vítimas. Hoje de manhã, num semicírculo de uns vinte quilômetros em torno da cidade, toneladas de terra e madeira haviam deslizado para as baixadas.

(Jornal da Tarde - O Estado de São Paulo, 20 de março de 1967)

5.2.1 Aspectos Gerais do Evento de 1967

O município de Caraguatatuba ocupa uma área aproximada de 480km², com variação altimétrica entre 0 e 1318m entre o topo da escarpa e a planície litorânea. Cerca de 60% da sua área está acima de 200m, onde predominam encostas com ângulos entre 15 e 40° e curvaturas côncavas e convexas. Nestes setores da Serra do Mar predomina a Floresta Ombrófila Densa (dossel contínuo entre 15 e 50m) que pertence ao Bioma da Mata Atlântica.

As precipitações médias anuais podem ultrapassar 2.000mm devido, sobretudo, a atuação das Massas Tropical Atlântica e Equatorial Continental, que aumentam ainda mais a umidade da área, provocando chuvas prolongadas e que podem ser ainda mais intensas devido ao efeito orográfico da escarpa da Serra do Mar. Entre os meses de outubro de 1966 e março de 1967, postos pluviométricos na área registraram volumes em torno de 2.000mm, com médias mensais acima de 300mm. Chuvas constantes se iniciaram ainda no mês de novembro, alcançando valores elevados no mês de março (545mm/mês). Entre os dias 1 e 18 de março houve acumulados de chuvas acima de 260mm nos três principais postos pluviométricos, com destaque para os dias 17 e 18 em que foram registrados 245mm (**Figura 13**).

Como consequência deste evento chuvoso 640 escorregamentos foram deflagrados e corridas de detritos que alcançaram um raio entre 7 e 15Km (DE PLOEY; CRUZ, 1979; FÚLFARO et al., 1976). Os materiais oriundos dos escorregamentos e das corridas de detritos atingiram as porções mais suaves do relevo, chegando até a área urbana do município. Estima-se que mais de 2 milhões de toneladas de materiais foram transportados, provocando a morte de 120 pessoas, a destruição de cerca de 400 casas e danos à Rodovia Tamoios (CRUZ, 1974) (**Figura 14**). As características destes processos foram devidamente descritas na tese de doutoramento da Profa. Olga Cruz, intitulada “A Serra do Mar e o litoral na área de Caraguatatuba – SP. Contribuição à geomorfologia litorânea tropical” (CRUZ, 1974, 1990; DE PLOEY; CRUZ, 1979).

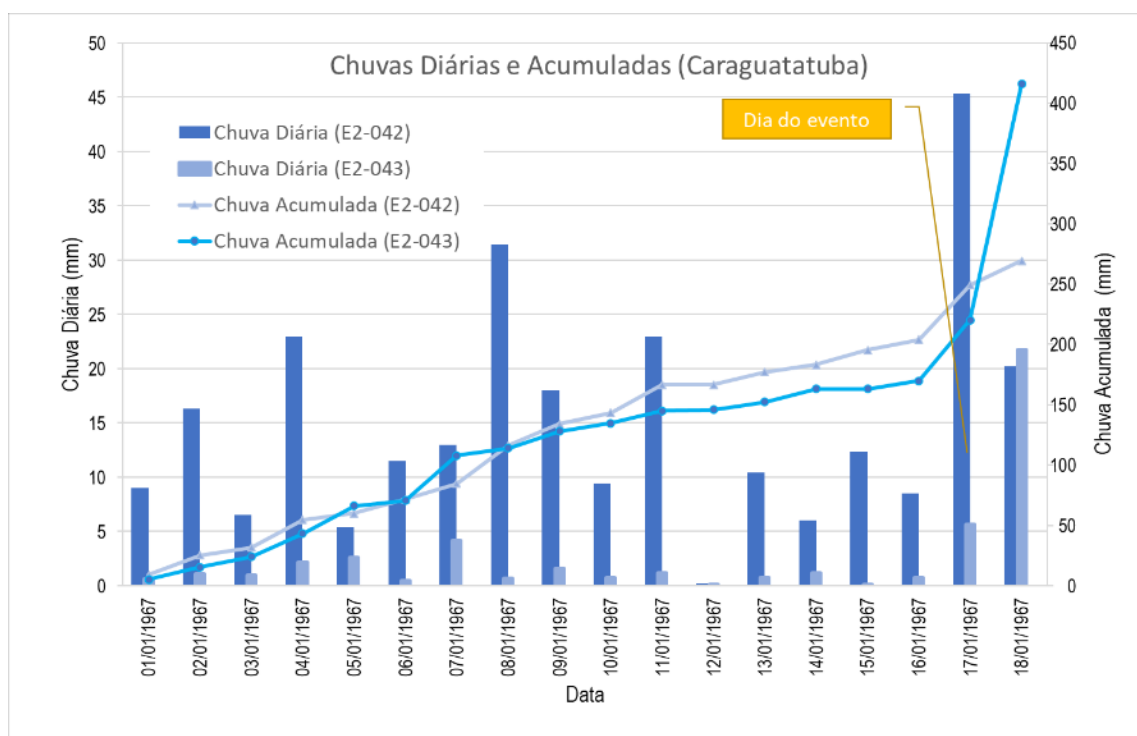


Figura 13: Chuvas diárias e chuvas acumuladas do evento dos dias 17 e 18 de março de 1967 na Serra de Caraguatatuba. Fonte de dados: DAEE. Postos E2-042 e E2-043

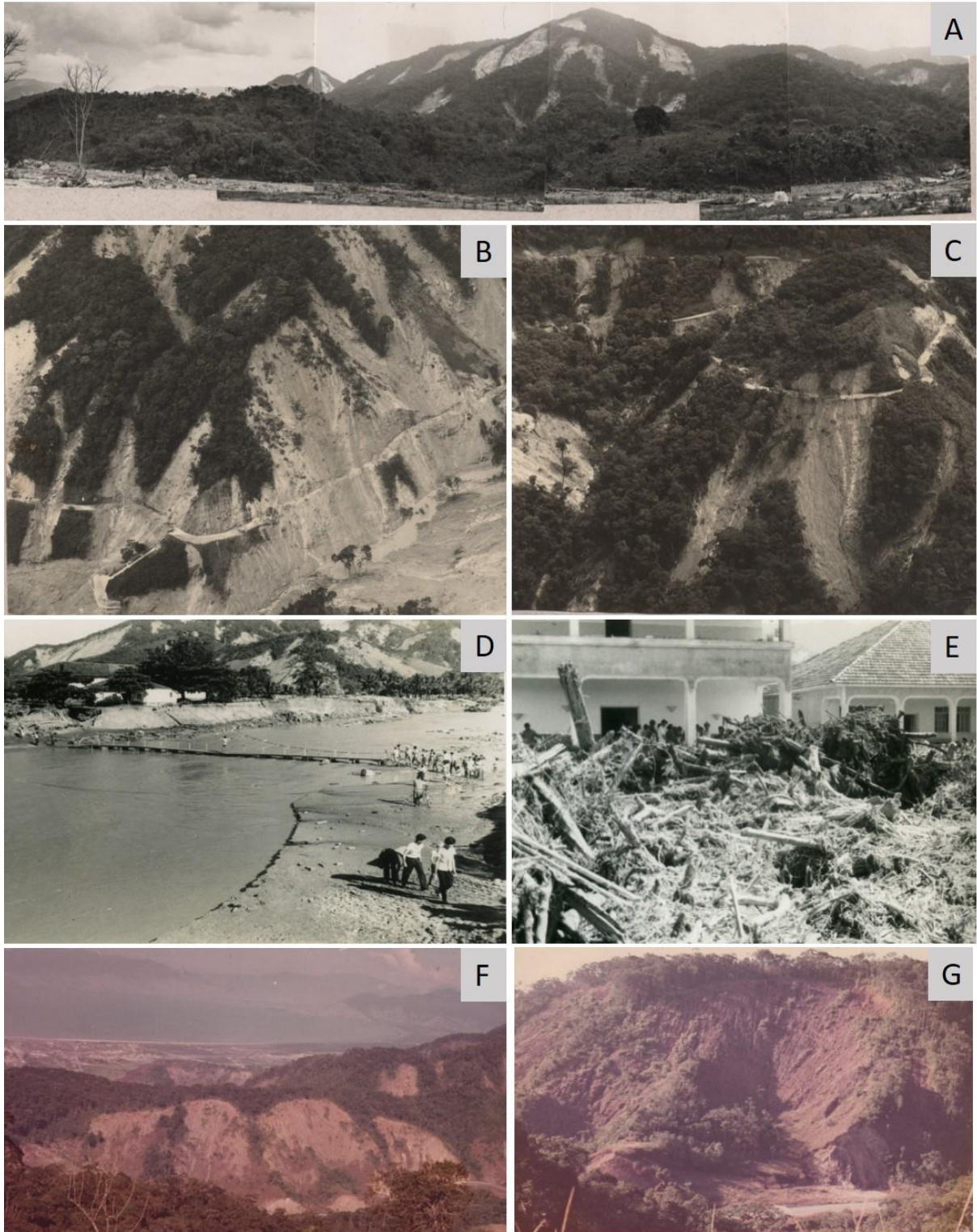


Figura 14: Imagens de alguns pontos mais afetadas no município de Caraguatatuba em 1967. (A) Visão geral dos escorregamentos nas encostas e depósitos de corridas de detritos; (B) e (C) escorregamentos na Rodovia dos Tamoios; (D) Ponte provisória no Rio Santo Antônio (E) Santa Casa; (F) e (G) Escorregamentos junto à Rodovia. Fonte: Acervos Olga Cruz e Prefeitura municipal de Caraguatatuba.

5.2.2 Escorregamentos Rasos: Propriedades Pedológicas e Hidrológicas

As primeiras pesquisas realizadas na área por de Ploey e Cruz (1979); Furian et al. (1999) identificaram potenciais superfícies de ruptura entre o material coluvionar-saprolito e o solo residual-saprolito (1 e 2,5m), associadas às mudanças texturais e da condutividade hidráulica saturada.

Tendo como base estes trabalhos pioneiros na Serra de Caraguatatuba, foram realizados levantamentos geotécnicos por Gomes e Vieira (2016); Vieira et al. (2015), na bacia do rio Guaxinduba, uma das mais afetadas por escorregamentos e corridas de detritos. Os autores coletaram dados de espessura, coesão, ângulo de atrito e condutividade hidráulica saturada em três cicatrizes de escorregamentos de 1966/1967, onde foram abertos três perfis de até 2 m de profundidade: no topo, na lateral e no centro da cicatriz (**Figura 15**).

A localização destes perfis em cada uma das cicatrizes se baseia na premissa de que o material mobilizado se assemelha ao existente à montante e na lateral da cicatriz. Para obtenção de um perfil de alteração, mais completo possível, foram feitas duas sobreposições utilizando os perfis do topo (P1), portanto contendo material não mobilizado, e o perfil no centro da cicatriz (P1+P2). Para composição de um segundo perfil completo do manto de alteração, foram sobrepostos os perfis localizados na lateral da cicatriz (material não mobilizado) e o mesmo perfil central (P3 +P2) Ao sobrepor estes dois conjuntos dos perfis, foram realizadas coletas de amostras até 5 metros de profundidade.

Para o levantamento da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) utilizou-se o Permeâmetro de Guelph (REYNOLDS; ELRICK, 1985), nas profundidades 0,25, 0,50, 1,00, 1,50, 2,00 e 2,50 m, definidas a partir da caracterização morfológica tátil-visual. Nas mesmas cicatrizes, foram coletadas 37 amostras deformadas para avaliação da granulometria e do índice de plasticidade, 6 amostras indeformadas para a obtenção dos valores de coesão e ângulo de atrito interno e 24 amostras para densidade (aparente e real), porosidade e curva de retenção (FERREIRA, 2013; VIEIRA; FERREIRA; GOMES, 2015).

De maneira geral, as amostras apresentaram valores altos da fração de areia com valores variando entre 60% e 70%, porém com percentuais bem mais altos (>80%) a partir de 2,55m de profundidade. Em geral, os horizontes mais superficiais (~1m) apresentaram um percentual maior da fração argila, que alcançou quase 55% em 1m em uma das cicatrizes (VIEIRA; FERREIRA; GOMES, 2015).



Figura 15: Coleta das amostras deformadas e indeformadas e valores da condutividade hidráulica saturada.
Fonte: Vieira; Ferreira; Gomes (2015)

Em relação à condutividade hidráulica saturada (K_{sat}), embora os valores tenham variado três ordens de grandeza (10^{-6} m/s a 10^{-4} m/s), mais de 80% se concentraram entre 10^{-6} m/s e 10^{-5} m/s. Em perfil, este parâmetro apresentou variações distintas, mas com a tendência de aumento em profundidade e a fortes discontinuidades hidráulicas que podem justificar a formação de zonas de rupturas (GOMES; VIEIRA, 2012, 2016) (**Figura 16**).

Os valores de coesão variaram entre 0kPa e 11kPa e o ângulo de atrito interno entre $25,8^\circ$ e $36,8^\circ$, sendo ambos mais elevados nas maiores profundidades, exceto na cicatriz 3, em que foi verificado valor de 0 kPa para ambas as profundidades (GOMES; VIEIRA, 2016; VIEIRA; FERREIRA; GOMES, 2015). Valores de coesão bem próximos foram encontrados em diferentes partes da Serra do Mar (AMARAL JUNIOR, 2007; SILVA, 2013; WOLLE, 1985; WOLLE; HACHICH, 1989).

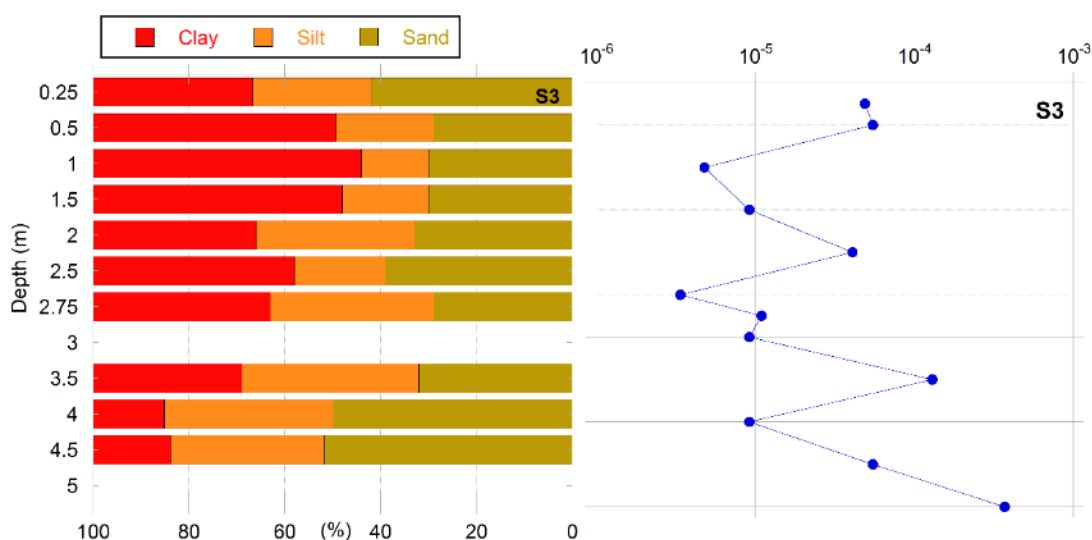


Figura 16: Perfil com variação da K_{sat} e da granulometria na bacia do rio Guaxinduba. Fonte: Gomes (2012); Gomes e Vieira (2016).

5.2.3 Mapas de Suscetibilidade a Escorregamentos

O primeiro mapeamento da suscetibilidade no município de Caraguatatuba utilizando um modelo em base física foi realizado por Vieira e Ramos (2015)²⁹. Os autores aplicaram o modelo **SHALSTAB** na bacia do rio Guaxinduba, utilizando um Modelo Digital de Terreno (MDT), com resolução de 5 m, gerado a partir da digitalização de cartas topográficas (escala 1.10.000). Para entrada dos dados pedológicos foram usados valores coletados por pesquisas anteriores tanto na Serra de Caraguatatuba quanto na Serra de Cubatão (DE PLOEY; CRUZ, 1979; WOLLE, 1985; WOLLE; HACHICH, 1989). Posteriormente, o mapa de suscetibilidade foi validado por meio de um inventário contendo 131 cicatrizes. Os resultados apontaram que 55% das cicatrizes se concentraram nas classes mais instáveis, sendo elas: 16,2% (incondicionalmente instável), 12,7% ($\log Q/T < -3,1$), 11,7% ($\log Q/T -3,1$ à $-2,8$) e 14,4 ($\log Q/T -2,8$ à $-2,5$).

Em uma segunda pesquisa, também na bacia do Rio Guaxinduba, foi aplicado o modelo **TRIGRS** para geração de mapas de suscetibilidade tendo a entrada dos dados topográficos a partir do MDT com resolução de 25m fornecido pela EMPLASA³⁰. Foram gerados cenários

²⁹ Resultados publicados a partir da pesquisa de iniciação científica do aluno Henrique Ramos, sob minha orientação.

³⁰ Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A. Contrato de Licença de uso CLU n° 049/14.

com parâmetros geotécnicos oriundos tanto de outras bacias hidrográficas da Serra do Mar, quanto aqueles coletados na própria bacia por Gomes e Vieira (2016); Vieira et al. (2015). Para o primeiro cenário, Listo; Gomes; Vieira (2018)³¹ utilizaram os valores do mapa de suscetibilidade mais eficiente produzido por Vieira; Fernandes e Oswaldo Filho (2010) na bacia da Copebrás. Em um segundo cenário, foi calculada uma média dos valores obtidos em campo. A partir da validação resultados mostraram um maior acerto a partir dos cenários gerados com os dados coletados na própria área de estudo (LISTO; GOMES; VIEIRA, 2018).

Uma terceira e mais recente pesquisa teve como objetivo central a identificação de índices críticos de chuva utilizando dados de coesão distribuídos³². Para alcançar estes objetivos centrais, foram selecionadas além da bacia do rio Guaxinduba (BG), outras duas bacias, Santo Antônio (BSA) e Massaguaçu (BM), também com um volume significativo de cicatrizes de escorregamentos de 1967. A entrada dos parâmetros topográficos (ângulo da encosta e direção de fluxo) foi obtida pelo MDE SRTM (resolução de 30m).

Em relação aos parâmetros geotécnicos foram usados valores homogêneos para as três bacias baseados nos trabalhos de Vieira et al. (2015) e Vieira et al. (2018), com variação entre aqueles considerados mais sensíveis do modelo (coesão, ângulo de atrito e espessura dos solos) (**Tabela 7**). No cenário 1 considerou-se a espessura do solo igual a 2m; um ângulo de atrito de 30° e uma coesão mais elevada (5Kpa) e, no cenário 2, os valores utilizados foram: 2,5m (espessura dos solos), 45° (ângulo de atrito) e uma coesão igual a zero kPa.

Por fim, para o cenário 3, foi gerado um mapa de coesão, considerando valores representativos das principais unidades litológicas mapeadas em escala 1:50.000 (SF-23-Y-D-VI-1) pelo CPRM (**Figura 17**). Considerando a área com maior concentração de cicatrizes, predominam, com quase 70% da bacia, os Granitóides Caraguatatuba, seguidos pelas rochas parametamórficas (Quartzitos). No trecho superior, já no Planalto, há presença dos micaxistos e gnaisses do Complexo Paraibuna, e no setor da planície fluviomarina são identificados os sedimentos inconsolidados. Portanto, foram usados os valores de coesão de 2 kPa para área correspondente aos granitoides, de 5 kPa para a área correspondente dos quartzitos e 45 kPa para as demais unidades.

³¹ Resultados publicados a partir da pesquisa de doutoramento do aluno Fabrizio de Luiz de Rosito Listo, sob minha orientação.

³² Pesquisa de Pós-Doutorado desenvolvida no GIS Research Laboratory (Department of Earth and Space Sciences - University of Washington) sob a supervisão do Prof. David R. Montgomery e financiada pela FAPESP (Processo: 2014/10109-2). Resultados inéditos não publicados.

Tabela 7: Valores dos parâmetros do solo utilizados na geração de cenários de suscetibilidade das bacias do rio Santo Antônio (BSA), Guaxinduba (BG) e Massaguaçu (BM).

Parâmetros/Cenários	Cenário 01 (BSA, BG e BM)	Cenário 02 (BSA, BG e BM)	Cenário 03 (BSA)
Transmissividade (m ² /day)	1.8	1.8	1.8
Peso Específico do solo (g/cm ³)	1.2	1.2	1.2
Espessura do solo (m)	2.0	2.5	1.5
Ângulo de atrito (°)	30	45	31
Coesão (kPa)	5	0	5.0 (Granito) 2.0 (Gnaise)
K _{sat} (m/dia)	0.864	0.864	0.864
Ângulo da encosta e direção de fluxo	SRTM	SRTM	SRTM
Total	3	3	1

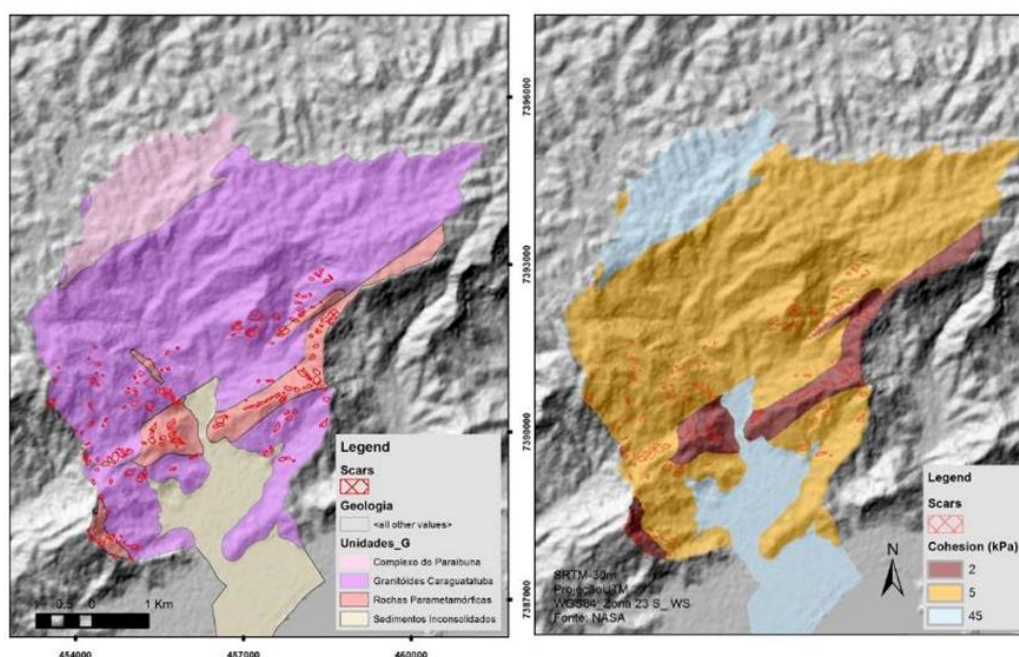


Figura 17: Mapa litológico e de coesão da bacia do rio Santo Antônio. Fonte dos dados litológicos (CPRM) Fonte: Autora.

O inventário das cicatrizes de 1967, para validação dos cenários de suscetibilidade, foi elaborado a partir de duas bases cartográficas: Levantamento Aerofotogramétrico em escala 1:25.000 (2010-2011)³³ e fotografias aéreas de 1973 em escala 1:20.000. Ressalta-se que o inventário anterior foi reavaliado e foram desconsideradas as cicatrizes presentes na área de Planalto. Devido às características geomorfológicas deste setor da bacia, como relevo mais suave e perfis de intemperismos mais profundo, são mais comuns e frequentes os

³³ Cedidas pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A (contrato de licença de uso CLU N° 049/14).

escorregamentos rotacionais, não avaliados pelo modelo SHALSTAB. Foram mapeadas 146, 55 e 21 cicatrizes, respectivamente nas bacias rio Santo Antonio (BSA), Guaxinduba (BG) e Massaguaçu (BM). Entretanto, nesta última, a área média (11.761,9m²) e área máxima (50.555,7m²) foram maiores. Considerando a espessura de solo de 2m, a BSA gerou cerca de 1.600m³ de sedimentos, enquanto BG e BM cerca de 820m³ e 517m³, respectivamente. Grande parte das cicatrizes em todas as bacias, sobretudo em BSA, ficou com áreas abaixo de 10.000m², destacando a BSA em que as cicatrizes se distribuíram quase como um todo no intervalo até 5.000m².

Todas as bacias tiveram comportamento semelhante em relação à distribuição das classes de instabilidade nos cenários 1 e 2 (**Figura 18**). Conforme esperado e, corroborando resultados obtidos na literatura nacional, a redução da coesão (de 5 kPa para 0 kPa), mesmo com o aumento da espessura do solo (de 2m para 2,5m) e do ângulo de atrito (de 30° para 45°), acarretou no aumento da concentração das cicatrizes na classe de 50mm/dia, com destaque para a bacia do Massaguaçu. Paralelamente, houve a redução deste índice nas classes de estabilidade (**Figura 19**). Entretanto, na bacia do rio Santo Antônio, quando utilizados valores de coesão correspondentes às unidades litológicas, há uma redução do grau de acerto das classes de estabilidade, devido ao aumento da concentração das cicatrizes de escorregamentos, com cerca de 27% (**Figura 20**).

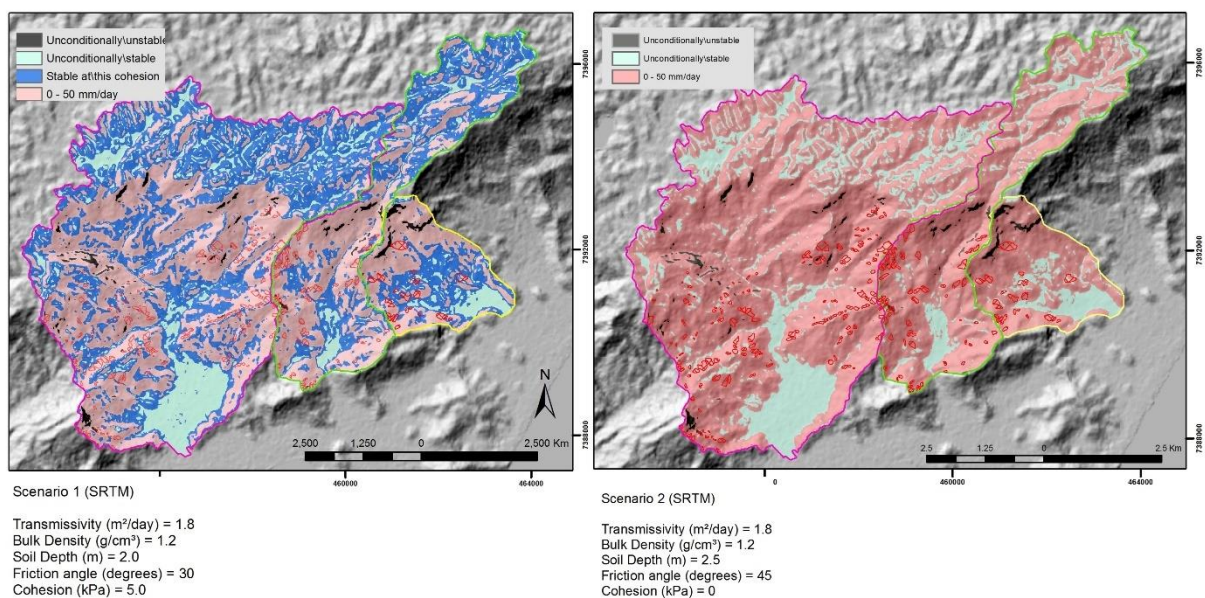


Figura 18: Mapas de suscetibilidade das bacias BSA, BG e MG nos cenários 1 e 2. Fonte: Autora

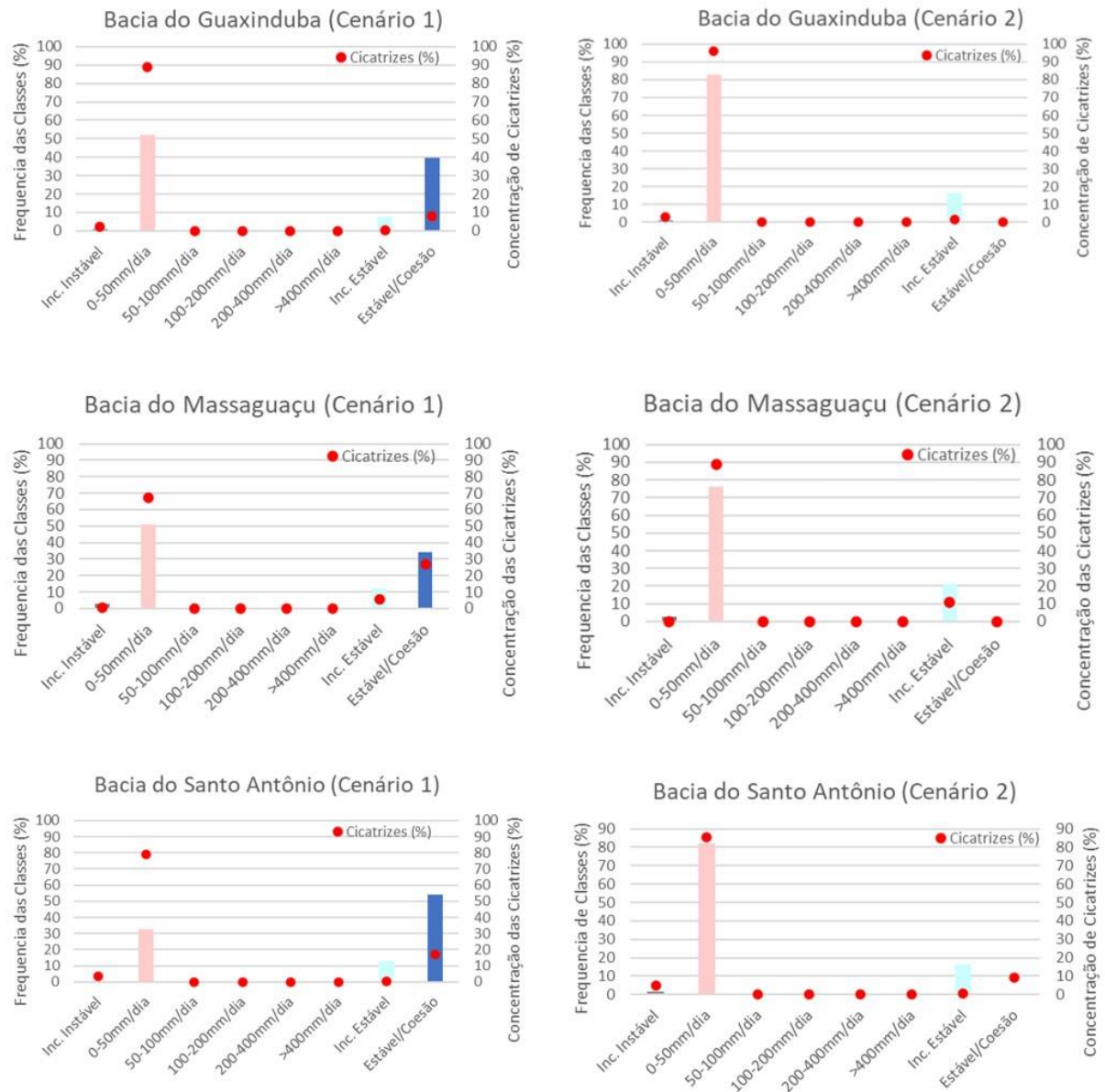


Figura 19: Frequência e Concentração das Cicatrizes nos cenários 1 e 2 das bacias dos rios Guaxinduba, Santo Antônio e Massaguaçu. Fonte Autora

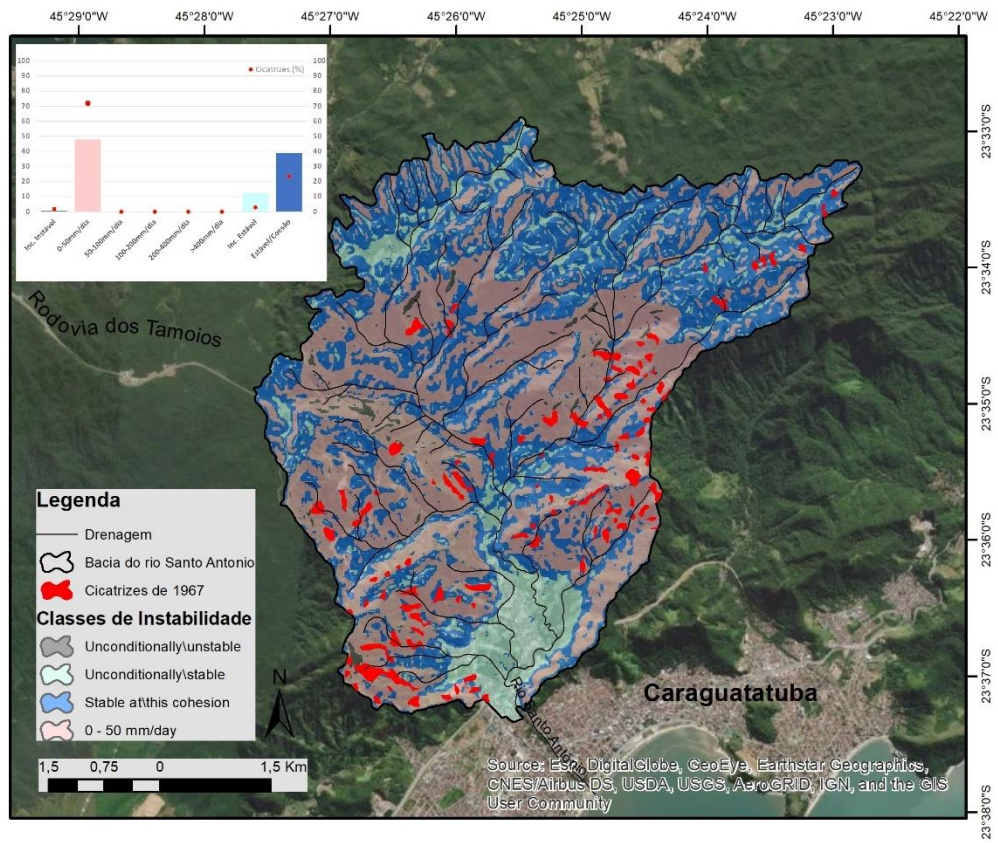


Figura 20: Mapa de suscetibilidade da Bacia do Rio Santo Antônio (Cenário 3). Fonte: Autora.

Utilizando outro método, agora em base estatística, foi realizado um mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos para todo o município de Caraguatatuba, empregando o Valor Informativo (VI), considerando os condicionantes litológicos/estruturais e morfológicos (curvatura, elevação, ângulo de encostas e aspecto) (DIAS et al., 2021)³⁴. Nesta pesquisa, o inventário de cicatrizes (com partição aleatória) foi utilizado tanto para cálculo da Taxa de Sucesso quanto da Taxa de Predição, permitindo avaliar a qualidade dos cenários e indicar aqueles condicionantes mais relevantes para o mapeamento final de suscetibilidade.

Resultados obtidos por Dias et al. (2021, 2018), mostraram que as áreas mais suscetíveis a escorregamentos rasos apresentam rochas quartzíticas e graníticas, intervalos altimétricos entre 200 e 600 m, encostas com ângulos entre 30° e 55°, orientações voltadas para Sul e proximidade de falhas e fraturas. Em ordem decrescente, os autores identificaram que a litologia, elevação e ângulo de encosta apresentaram-se como os condicionantes mais relevantes, com os maiores valores da AAC (Área Abaixo da Curva) da Taxa de Sucesso, 0.793, 0.706 e 0.701, respectivamente (DIAS, 2019; DIAS et al., 2021).

Outro resultado importante desta pesquisa foi a avaliação da qualidade dos mapas de suscetibilidade a partir da geração de cenários com diferentes combinações de parâmetros condicionantes: Cenário 1 (elevação, aspecto, ângulo, curvatura, litologia, densidade de lineamentos); Cenário 2 (aspecto, ângulo, curvatura, litologia, densidade de lineamentos); Cenário 3 (elevação, aspecto, curvatura, litologia, densidade de lineamentos) e Cenário 4 (elevação, ângulo e litologia). Embora todos os cenários tenham apresentado elevados valores da taxa de predição (>0.809), o cenário gerado com apenas três condicionantes (elevação, ângulo e litologia) se mostrou mais adequado, apresentando cinco classes de suscetibilidade a partir das curvas AAC da taxa de predição, na qual as classes de maior suscetibilidade validaram 62% dos escorregamentos de 1967 (DIAS et al., 2021) (**Figura 21**).

A eficácia do mapeamento da suscetibilidade foi ratificada em escorregamentos deflagrados posteriormente. Cinquenta anos depois do evento de 1967 um escorregamento raso de grande proporção foi deflagrado no Morro Santo Antônio, área mapeada na classe de maior instabilidade nesta pesquisa (**Figura 21**).

³⁴ Artigo publicado com base nos resultados obtidos na dissertação de mestrado da aluna Helen Cristina Dias, sob minha orientação.

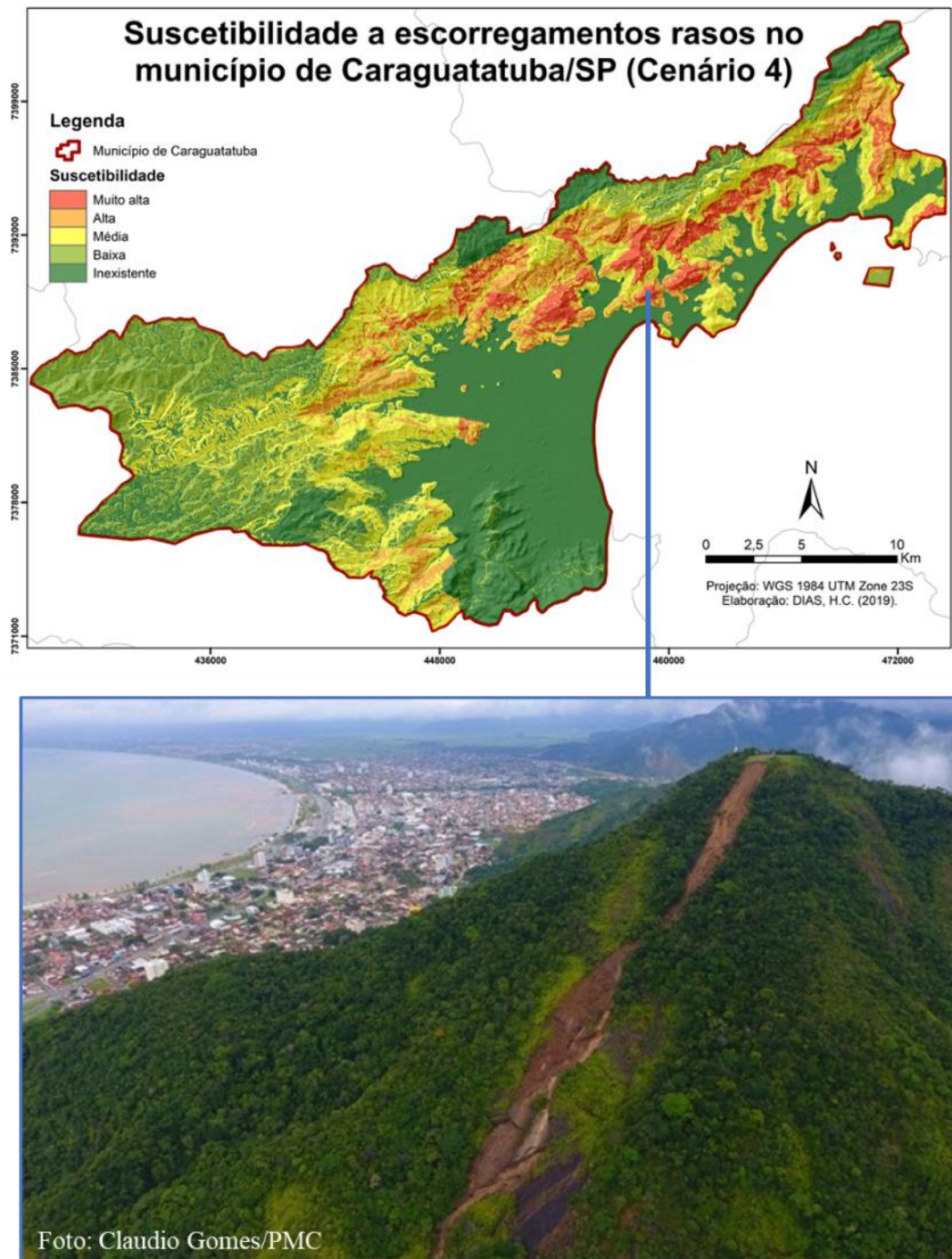


Figura 21: Mapa de Suscetibilidade a escorregamentos rasos do município de Caraguatatuba. Fonte: Dias (2019); Dias et al. (2021). Escorregamento ocorrido em março de 2017 na encosta do morro Santo Antônio que foi identificada como alta suscetibilidade.

5.2.4 Corridas de Detritos: Inventário e Avaliação da Suscetibilidade

“Os deslizamentos de barreiras causaram 70% das mortes, os outros morreram nas enchentes. Agora, corpos são recolhidos do mar. Uma moça apareceu hoje em Ilhabela. Quatro Homens foram recolhidos em Ubatuba por pescadores. (...) Os engenheiros calculam que haja mais de 60 cadáveres no mar, porque os corpos da população ribeirinha de Caraguatatuba, no bairro Caputera, desceram pelo rio Santo Antonio.”

(Jornal da Tarde – O Estado de São Paulo. 22 de março de 1967)

Corridas de detritos são fluxos de sedimentos sólidos e fluídos que se movem como “ondas” no eixo do canal pré-existente ou mesmo pré-estabelecido pelo próprio fluxo. Em sua parte frontal (nariz e lóbulo) são depositados materiais mais grosseiros (p. ex. blocos, troncos), enquanto o fluxo propriamente dito é dominado pela presença de sedimentos mais finos e denominado “cauda” (IVERSON; REID; LAHUSEN, 1997; JOHNSON; MCCUEN; HROMADKA, 1991). O tamanho dos blocos é uma informação base para associação com a magnitude do evento, enquanto a morfologia pode indicar, de fato, a ocorrência destes processos. Considerando esta dinâmica busca-se em campo as seguintes informações: materiais mal selecionados e de granulometrias diversas e presença de blocos muito grandes e imbricados em uma mesma direção e a inversão granulométrica, com materiais mais grosseiros sobrepostos a sedimentos mais finos (JAKOB, 2009, 2005).

Neste sentido, considerando a ocorrência de corridas de detritos durante o evento de 1967, Dias (2018) e Dias et al. (2016)³⁵ realizaram um inventário dos depósitos de corridas de detritos de quatro bacias hidrográficas: Santo Antônio, Guaxinduba, Ribeirão da Aldeia e Pau d’Alho (**Figura 22**). O inventário foi elaborado com base em Cruz (1974), mas sobretudo a partir de um levantamento de campo em que foi possível averiguar o tamanho dos blocos e a morfologia dos depósitos (DIAS; VIEIRA; GRAMANI, 2016). De acordo com estes autores, em todas as bacias foi identificada uma variação grande de blocos, com inversão granulométricas,

³⁵ Resultados publicados a partir das pesquisas de Iniciação Científica (FAPESP) e Mestrado da aluna Vivian Cristina Dias, sob minha orientação.

localizados, principalmente, junto à drenagem principal e com ampla deposição nos trechos mais suaves (ângulos entre 0° e 10°).



Figura 22: Inventário dos depósitos das bacias dos rios Santo Antônio, Guaxinduba, Ribeirão da Aldeia e Pau d'Alho. Fonte de dados: Dias (2021, 2018).

De acordo com Jakob (1996), a frequência das corridas de detritos está associada tanto à ocorrência de um evento climático extremo quanto à disponibilidade de sedimentos, que por sua vez pode ser influenciada diretamente pelas características morfológicas do canal principal e da bacia hidrográfica. Neste sentido, muitos autores correlacionam tais parâmetros com a magnitude e frequência das corridas de detritos, incluindo aqui a avaliação das zonas de

iniciação, transporte e deposição destes fluxos (AUGUSTO FILHO, 1993; DIAS, 2014; DIAS; VIEIRA; GRAMANI, 2016; GOMES; DIAS; VIEIRA, 2017; JAKOB, 1996; KANJI; GRAMANI, 2001; VIEIRA et al., 1997; WILFORD et al., 2004).

Dias (2018); Dias et al. (2016), tendo como base alguns parâmetros morfológicos, avaliaram a suscetibilidade e a magnitude de bacias hidrográficas a corridas de detritos. Os índices de rugosidade, circularidade, relação de relevo, densidade de drenagem, perfil longitudinal, declividade média do canal, amplitude altimétrica, área acima de 25°, ângulo e curvatura, foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação com resolução de 30 m (SRTM) e da base hidrográfica 1:50.000 (IBGE). De acordo com os autores, todas as bacias são suscetíveis a corridas de detritos. Entretanto, alguns parâmetros morfológicos, como o perfil longitudinal, a hierarquia de drenagem e a área da bacia acima de 25° tiveram uma relação mais direta, uma vez que bacias com maior magnitude também apresentaram valores mais críticos destes parâmetros.

Utilizando o inventário e os parâmetros morfológicos foi possível realizar algumas proposições de classificação para magnitude destas corridas de detritos. A primeira classificação proposta por Dias et al. (2016) e Dias (2018) teve como base o método desenvolvido por Jakob (2005), em que os autores consideraram as consequências potenciais baseadas no volume total mobilizado, no pico máximo de vazão e/ou a área de inundação. Para este trabalho, optou-se apenas pela área de inundação afetada e, segundo estes autores, as bacias possuem as seguintes áreas de inundação: 0,61 Km² (Pau D'Alho), 0,32 Km² (Ribeirão da Aldeia), 3,55 Km² (Santo Antônio) e 1,12 Km² (Guaxinduba) (DIAS, 2018).

A corrida de detritos da bacia Santo Antônio apresentou maior magnitude (nível 3), seguida pelas bacias do Guaxinduba e Pau d'Alho (nível 2) e Ribeirão da Aldeia (nível 1) (DIAS et al., 2022, 2016b; GOMES et al., 2017). Estes autores também destacam que a maior magnitude das duas primeiras bacias está diretamente relacionada ao maior raio de alcance, enquanto na bacia Ribeirão da Aldeia houve maior confinamento da área atingida pelas corridas. O nível 3 (Santo Antônio) representa as consequências potenciais mais críticas como a destruição de grandes construções, pontes de concretos e bloqueios ou danos a obras lineares, como estradas e dutos. O nível 2 indica arraste/soterramento de carros, destruição de construções de madeiras, queda de árvores. Por fim, no nível 1 (Ribeirão Aldeia), apenas consequências localizadas em pequenas construções foram identificadas (DIAS; VIEIRA; GRAMANI, 2016) (**Tabela 8**).

Tabela 8: Classificação da magnitude das corridas de detritos**CLASSIFICAÇÃO DE MAGNITUDE DE CORRIDAS DE DETRITOS**

Nível	Área inundada (m²)	Consequências Potenciais	Bacia
1	$< 4 \times 10^2$	Dano muito localizado em pequenas construções.	Ribeirão da Aldeia
2	$4 \times 10^2 - 2 \times 10^3$	Pode enterrar/arrastar carros, destruir pequenas construções de madeira, derrubar árvores, bloquear dutos e descarrilar trens.	Guaxinduba Pau d'alto
3	$2 \times 10^3 - 9 \times 10^3$	Pode destruir grandes construções, destruir pontes de concreto, bloquear ou danificar estradas e dutos.	Santo Antônio

Fonte: Modificado de Gomes et al. (2017).

Por último foi proposto um índice para cada bacia e feita a classificação da importância do parâmetro morfológico baseada na magnitude. Parâmetros com valores mais críticos nas bacias de maior magnitude foram considerados de importância “Muito Forte”; já os parâmetros com valores menos críticos foram considerados como de importância “Fraca” ou “Muito Fraca”, e assim por diante (DIAS, 2018; SAATY, 1987). Com isso, o índice de potencial de magnitude/suscetibilidade foi composto pela magnitude e os valores críticos com uma atribuição de pesos aos parâmetros mais relevantes. Com base em uma **avaliação qualitativa** e também na proposta de ponderação de Kanji; Gramani (2001), foi feita a classificação dos parâmetros em **intervalos** (valores mais críticos a menos críticos) e a **atribuição de nota** (variando de 2,5 a 10) para cada intervalo, para posterior ponderação e classificação final das bacias segundo o índice de potencial de magnitude e suscetibilidade (DIAS, 2018, 2021; GOMES; DIAS; VIEIRA, 2017).

5.2.5 Corridas de Detritos: Vulnerabilidade das Construções

Para a avaliação da vulnerabilidade a corridas de detritos no município de Caraguatatuba, Matos; Vieira; Ferreira, 2017)³⁶ aplicaram o método PTVa (*Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment*), que determina a vulnerabilidade física dos elementos de risco expostos aos diferentes eventos naturais sob uma abordagem qualitativa (DALL’OSSO et al., 2010, 2016; PAPATHOMA-KÖHLE, 2016).

Na primeira etapa desta pesquisa utilizou-se o mapa de depósitos de corridas de detritos produzido por Dias (2014) e Dias et al. (2016b). Em uma segunda etapa, foi feita a seleção dos critérios que afetam a vulnerabilidade das construções com base nos trabalhos realizados por Dall’Osso et al. (2009); Papathoma and Dominey-Howes (2003) e Papathoma-Köhle et al. (2007) e levantamentos de campo (**Tabela 9**).

Tabela 9: Seleção dos critérios que afetam a vulnerabilidade.

Crítérios	Descrição dos critérios
Material de Construção	Material menos resistente (Madeira); Composição mista (Madeira, Alvenaria); Material mais resistente (Alvenaria, Concreto)
Muros altos envolvendo as construções	Sim / Não
Número de pavimentos	1/ > 1
Presença de portas e janelas grandes/ largas	Sim / Não
Terrenos largos (Campos, Clubes, terrenos baldios)	Sim / Não
Presença de blocos	Sim / Não
Tamanho dos blocos	< 1 m - 2,5 m (Pequenos); > 2,5 m - 5 m (Médios); < 5 m - 10 m (Grandes); > 10 m (Muito Grandes)

Fonte de dados: Matos (2014); Matos; Vieira; Ferreira (2017).

Para o cálculo da vulnerabilidade das construções utilizou-se a Avaliação Multicritérios (DEVOS; VAN DE VEN, 1997), e ordenamento dos critérios e a atribuição dos pesos foram organizados de forma decrescente. Critérios com pesos maiores (7, 6, 5) representaram maior facilidade de gerenciamento do risco, porque reúnem as melhores condições de alteração em cada construção; ao passo que critérios com pesos menores (4, 2, 3 e 1) envolveram

³⁶ Resultados publicados a partir da pesquisa Mestrado da aluna Luzia de Jesus Matos, sob minha orientação.

características do entorno das construções ou que indicaram situações mais complexas de gerenciamento do risco.

Esta abordagem permitiu identificar a relevância de cada critério, sendo alguns responsáveis pelo aumento da vulnerabilidade final (p. ex. falta de muros altos envolvendo as construções, presença de blocos no entorno) e outros para a redução da vulnerabilidade final (p. ex. construções em alvenaria e a ausência de blocos de corridas pretéritas). Ao todo foram mapeadas 38 áreas (unidades de análise) com cerca de 250 construções que foram selecionadas como elemento em risco (**Figura 23**), sendo 8% das construções classificadas com vulnerabilidade alta, 69% como vulnerabilidade média e 23% vulnerabilidade baixa (MATOS, 2014; MATOS; VIEIRA; FERREIRA, 2017).

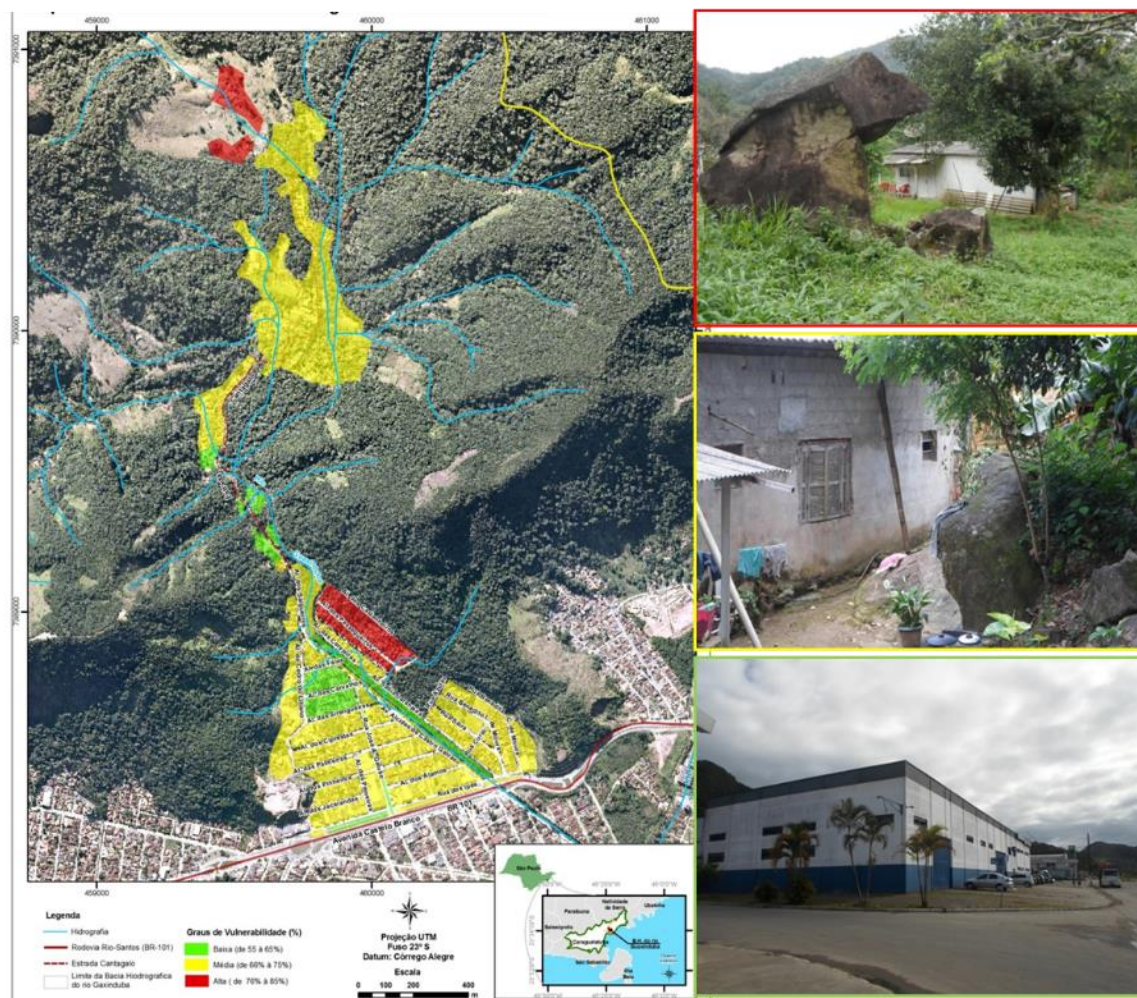


Figura 23: Mapa da vulnerabilidade dos elementos de risco às corridas de detritos na bacia do Guaxinduba. Fonte: Matos (2014); Matos; Vieira; Ferreira (2017).

5.2.6 Corridas de Detritos: Taxas de Denudação a longo-termo

Buscando compreender a importância e o significado das corridas de detritos nas taxas de denudação do relevo a longo-termo, em escarpamentos de margem passiva em zona tropical úmida, Gomes (2017) e Gomes et al. (2022), realizaram mensurações da concentração do isótopo cosmogênico ^{10}Be em sedimentos fluviais em 10 bacias hidrográficas³⁷ no município de Caraguatatuba (Figura 24). Tais processos, especialmente na Serra do Mar, apresentam grande magnitude, alta capacidade de transporte de material, com amplo raio de alcance (AVELAR et al., 2013; DE PLOEY; CRUZ, 1979; FREITAS; SILVA; COELHO NETTO, 2020; KANJI; CRUZ; MASSAD, 2008). Mesmo com uma vasta literatura sobre corridas de detritos no Brasil, são escassas as pesquisas que discutem a importância desses processos nas taxas de denudação a longo-termo.



Figura 24: Localização das bacias hidrográficas e dos pontos onde foram coletadas amostras para determinação das taxas de denudação por meio do ^{10}Be . Fonte de dados: Gomes (2016) e Gomes et al. (2022).

³⁷ Selecionadas a partir dos seguintes critérios, exigidos pelo método: registro confiável de corridas de detritos eventos pretéritos de diferentes magnitudes; morfologia típica desse escarpamento; mínima perturbação antrópica e inexistência de cicatrizes de movimentos de massa profundos próximo ao local de coleta.

Segundo Gomes et al. (2022), a taxa média de denudação a longo-termo variou entre 25.0 ± 1.4 m/My. Valores estes, segundo os autores, inferiores àqueles encontrados em outros escarpamentos de margens passiva (BIERMAN; CAFFEE, 2001; MANDAL et al., 2015; VANACKER et al., 2007), sobretudo em zonas tropicais úmidas (SALGADO et al., 2014, 2016; SOUZA et al., 2019).

De acordo com Gomes et al. (2022), foi observado um certo padrão entre a denudação média das bacias hidrográficas e a magnitude do evento de 1967. Bacias classificadas com alta magnitude apresentaram elevadas taxas de denudação: 35.2 m/My (Bacia do Pau d'Alho) e 33.3 m/My (Ribeirão da Aldeia) e bacias com baixa magnitude apresentaram também valores menores das taxas de denudação: 15.9 m/My (Piraçununga) e Rio Claro (15.6 m/My) (GOMES et al., 2022).

Todavia, resultado inverso também foi observado nas bacias do rio Guaxinduba e Mococa. A primeira com baixas taxas de denudação (10.9 m/My), porém com a presença de depósitos de corridas de detritos de alta magnitude, enquanto a segunda apresentou altas taxas de denudação (32.6 m/My), mas foi classificada com baixa magnitude. Este resultado inverso é justificado pelos autores pela “ausência” de depósitos pretéritos, que não são identificados atualmente em campo em função do próprio retrabalhamento do canal fluvial, e do rápido reestabelecimento da cobertura vegetal (GOMES, 2017; GOMES et al., 2022).

Nesta pesquisa, Gomes et al. (2022) concluem, portanto, que eventos infrequentes que atingem a Serra do Mar são responsáveis pelo fornecimento de um volume sedimentar à planície costeira muito superior ao esperado a partir das taxas de denudação medidas com ^{10}Be e que, em termos de denudação, os movimentos de massa, sobretudo as corridas de detritos, são os principais processos responsáveis pela dinâmica evolutiva das vertentes oceânicas da Serra do Mar (GOMES, 2017; GOMES et al., 2022).

5.3 Vale do Rio Ribeira: Itaóca e Apiaí

O temporal em Itaóca começou por volta das 19h do último domingo (12) e durou até o amanhecer da segunda-feira (13). As avaliações técnicas do Instituto Geológico da Secretaria Estadual do Meio Ambiente, realizadas após a enchente, mostraram que o nível do rio Palmital subiu entre 4 e 5 metros e acabou transbordando. No mesmo local e período, estima-se que, em 6 horas, choveu 150 milímetros em Itaóca.”

(Portal G1. 16 de Janeiro de 2014)

5.3.1 Aspectos Gerais do Evento de 2014

Assim como no município de Caraguatatuba, no Vale do Ribeira de Iguape os valores médios anuais de chuva são altos (>2.000mm) e concentrados nos meses de outubro a março. Entretanto, ressalta-se a ausência de uma rede pluviométrica adequada na região, que permita uma análise melhor quantificada. No município de Itaóca, com uma área de 180km², há apenas uma estação pluviométrica, com registros disponibilizados apenas até o ano de 2000.

Considerando valores de chuvas diárias da estação mais próxima, houve um aumento expressivo nos valores acumulados desde o dia 9 (144,0mm) até o dia 14 de janeiro, quando foram registrados 273,4mm (acumulado entre 01 de dezembro de 2013 a 14 de janeiro de 2014) (**Figura 25**). Entretanto, merecem destaque as chuvas diárias dos dias 11 (48,2mm), 12 (12,5mm) e 13 (63mm), um acumulado de mais de 123mm em 72 horas. Neste dia foram deflagradas centenas de escorregamentos nas encostas e corridas de detritos que causaram mais de 300 desalojados, 25 vítimas fatais e destruição de 100 casas, áreas agrícolas, pontes e estradas (**Figura 26**). Além disso, houve mobilização de inúmeros blocos de rocha e intensa erosão lateral e do leito de eixos de drenagem, com trechos nos quais a remoção do depósito aluvionar atingiu entre 3 e 4 m de espessura (BROLLO et al., 2015; FERREIRA et al., 2018).

Chama a atenção para este evento específico, a concentração de escorregamentos e corridas de detritos em apenas três bacias hidrográficas: Gurutuba (33 Km²); Guarda-Mão (7 Km²) e Alto Palmital (70 Km²). Com isso, as pesquisas que se desenvolveram neste trecho da Serra do Mar buscaram identificar e compreender o papel dos condicionantes geológicos, geomorfológicos e pedológicos destas duas tipologias de movimentos de massa.

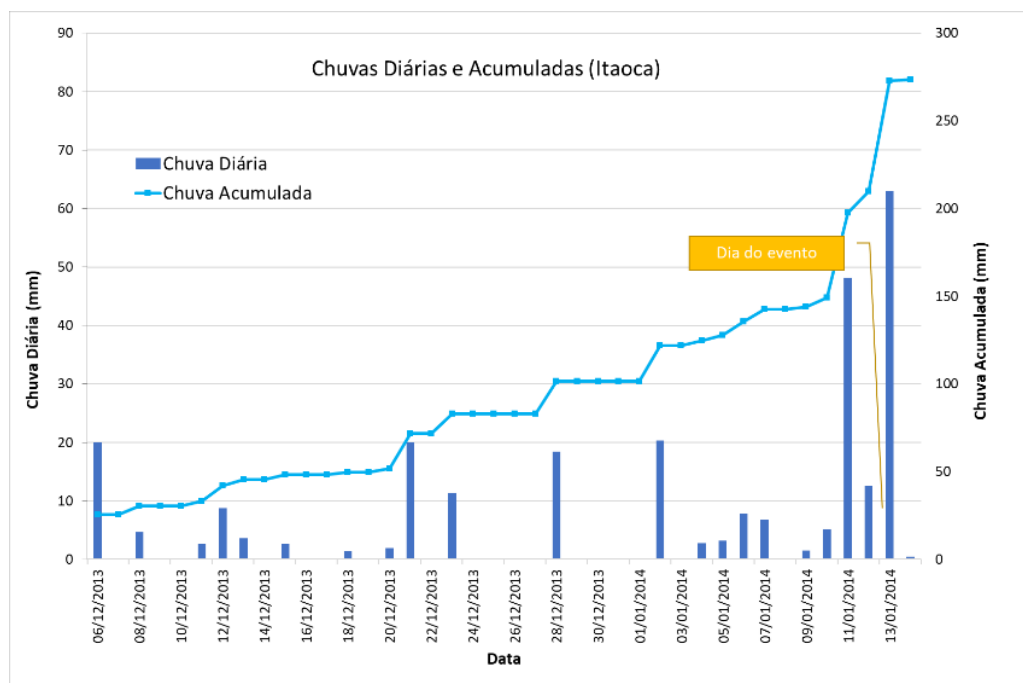


Figura 25: Chuvas diárias e chuvas acumuladas do evento do dia 13 de janeiro de 2014 nos municípios de Itaóca e Apiaí. Fonte de dados: DAEE. Posto F5-019.



Figura 26: Escorregamentos rasos e fluxos de detritos entre os municípios de Itaóca e Apiaí. (B) depósitos contendo sedimentos mais finos e lenhosos e (C) depósitos de contendo blocos e material lenhoso. Fonte: Prefeitura Municipal de Itaóca.

5.3.2 Inventários de Escorregamentos Rasos e de Corridas de Detritos

O primeiro mapa de cicatrizes dos escorregamentos foi elaborado a partir da interpretação de imagem do Google Earth Pro georeferenciada e datada de 10/08/2014, com base em uma análise visual das cicatrizes, com ajuda da sobreposição de curvas de nível oriundas de cartas topográficas em escala 1:10.000 (Folha Rio das Pedras e Palmital, do Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo), utilizando-se a ausência de vegetação e a posição da encosta como principais critérios para a identificação das mesmas (CAROU, 2019; CAROU et al., 2017). Em campo muitas das cicatrizes, sobretudo aquelas localizadas no setor inferior da bacia, foram validadas para o inventário final.

De um total de 336 cicatrizes, houve maior concentração na margem esquerda do rio principal, com baixa incidência na porção noroeste da bacia e nenhum registro na porção norte. As cicatrizes, de modo geral, estão associadas aos canais intermitentes ou perenes. A maior parte das cicatrizes possui áreas em torno de 300m², mas muitas possuem áreas superiores a 5.000m². Utilizando mapas de curvatura, ângulo, áreas de contribuição, gerados por meio de um MDE de 10m de resolução (a partir da digitalização de cartas topográficas 1:10.000), observou-se que os escorregamentos foram mais frequentes em encostas com ângulos entre 25° e 35°, com curvatura convexa e área de contribuição entre 100 e 200 m² (CAROU, 2019; CAROU et al., 2017).

Um segundo e mais completo inventário foi realizado para as bacias dos rios Gurutuba, Guarda-Mão e Alto Palmital (**Figura 27**). Este foi construído de maneira semiautomática a partir do cálculo diferencial *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) de imagens multiespectrais antes e após o evento de janeiro de 2014 (*RapidEye*, 5 m de resolução) (BONINI; VIEIRA; MARTINS, [s.d.]).

Neste inventário foram diferenciadas as cicatrizes dos escorregamentos, em sua grande maioria, rasos e translacionais, dos depósitos das corridas de detritos, deflagradas ao longo dos principais canais de drenagem. Com base em estudos preliminares (DIAS; MCDOUGALL; VIEIRA, 2022; MATOS et al., 2018), os depósitos de corridas foram associados às áreas com ângulos inferiores a 6°, área de contribuição superior a 50.000 m² e Índice Topográfico de Umidade (TWI) superior a 14.0 (BONINI; VIEIRA; MARTINS, [s.d.]).

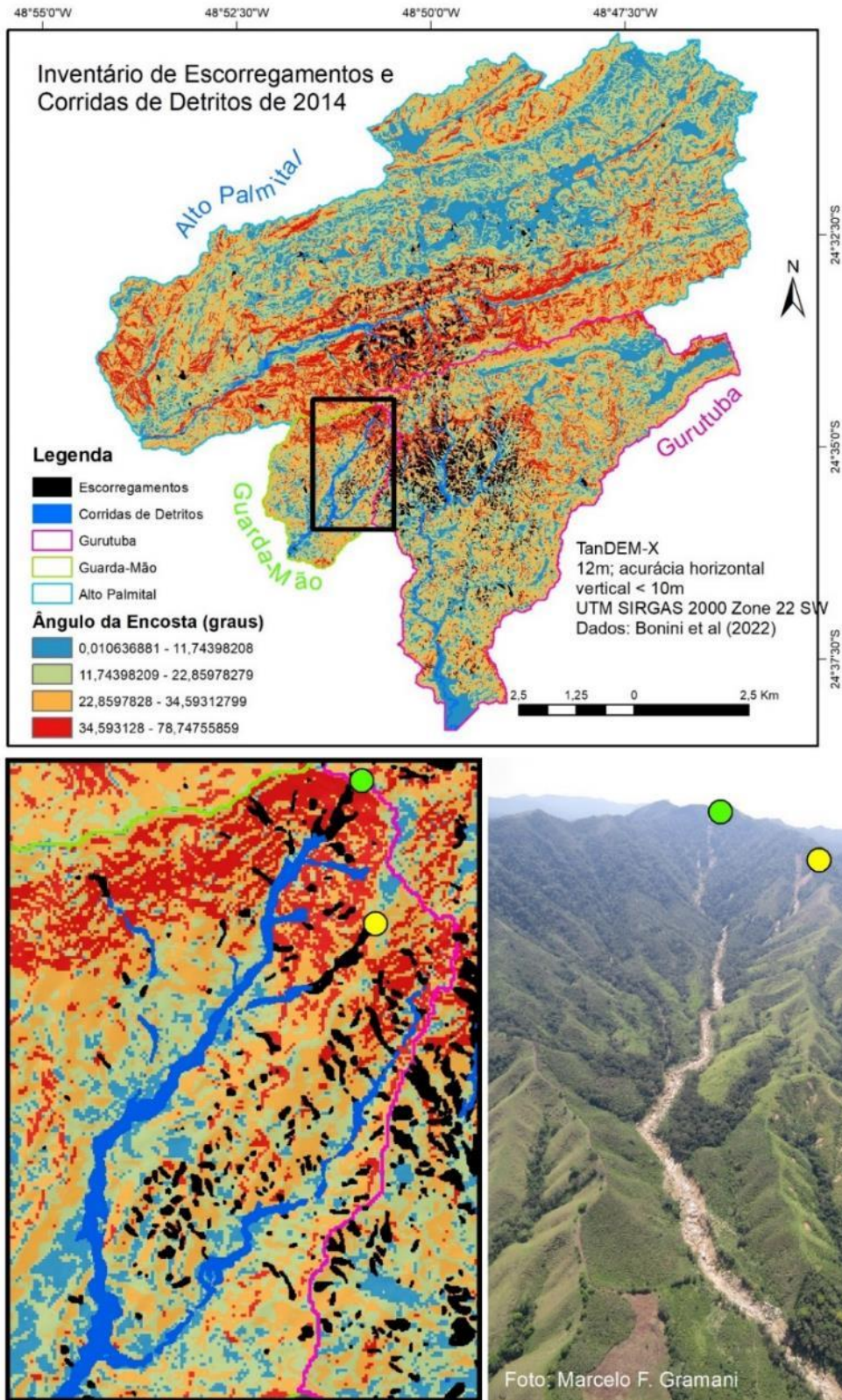


Figura 27: Inventário semi-automático dos escorregamentos e das corridas de detritos de 2014. Fonte de dados Bonini; Vieira; Martins, [s.d.]

A análise do NDVI permitiu o mapeamento de 2089 cicatrizes de escorregamentos, sendo 1179 na bacia do Gurutuba, 189 na bacia do Guarda-Mão e 721 na bacia do rio Palmital. Grande parte dos escorregamentos ocorreu em encostas com ângulos entre 20° e 40°, com TWI entre 5.0 e 9.0 e curvaturas côncavas. A maior parte dos escorregamentos deflagrados nas bacias (89.7%) ocorreu em áreas com valores de NDVI superiores a 0.80, com marcada cobertura florestal (BONINI; VIEIRA; MARTINS, [s.d.]).

É importante ressaltar que a combinação de índices de vegetação derivados de imagens multiespectrais de alta resolução obtidas poucos dias antes e após o evento, minimizou as interferências decorrentes da rápida regeneração da cobertura vegetal, que se apresenta como um grande desafio para construção de inventários mais fidedignos em ambientes tropicais úmido e subtropicais. Fato este corroborado pela grande diferença (cerca de 3 vezes) do número de cicatrizes identificadas na bacia do rio Gurutuba neste inventário semi-automático (1179 cicatrizes) e aquele realizado por interpretação de imagens de agosto de 2014 e trabalhos de campo (336 cicatrizes), 8 meses após o evento (BONINI; VIEIRA; MARTINS, [s.d.]).

5.3.3 Escorregamentos Rasos: Propriedades Físicas e Químicas dos Solos

Em dois pontos da bacia do rio Gurutuba, Carou (2019); Coelho et al. (2022, 2020)³⁸ buscaram compreender o papel exercido por algumas propriedades físicas e mineralógicas nos escorregamentos rasos a partir da caracterização de perfis de intemperismo desenvolvidos em granitos, litologia predominante e mais afetada por estes processos (**Figura 28**). Estes granitos estão inseridos regionalmente no Cinturão Ribeira, dominado por terrenos de origens distintas, separados por zonas de cisalhamento, constituído por unidades arqueanas a neoproterozoicas que compreendem núcleos de alto grau metamórfico, faixas milonito-gnáissicas, sequências metavulcanossedimentares e alguns corpos metabásicos (FALEIROS, 2008; FALEIROS; MORAIS; COSTA, 2012; GONTIJO-PASCUTTI et al., 2012; HEILBRON et al., 2004).

³⁸ Resultados das pesquisas de mestrado desenvolvidas pelas alunas Camila B. Carou e Rebeca Durço Coelho, sob minha orientação.

A seleção dos locais de coleta e do levantamento foi baseada no inventário das cicatrizes dos escorregamentos realizado por Carou et al. (2017) e mapas morfológicos de ângulo da encosta, curvatura e área de contribuição (BONINI et al., 2020)³⁹.

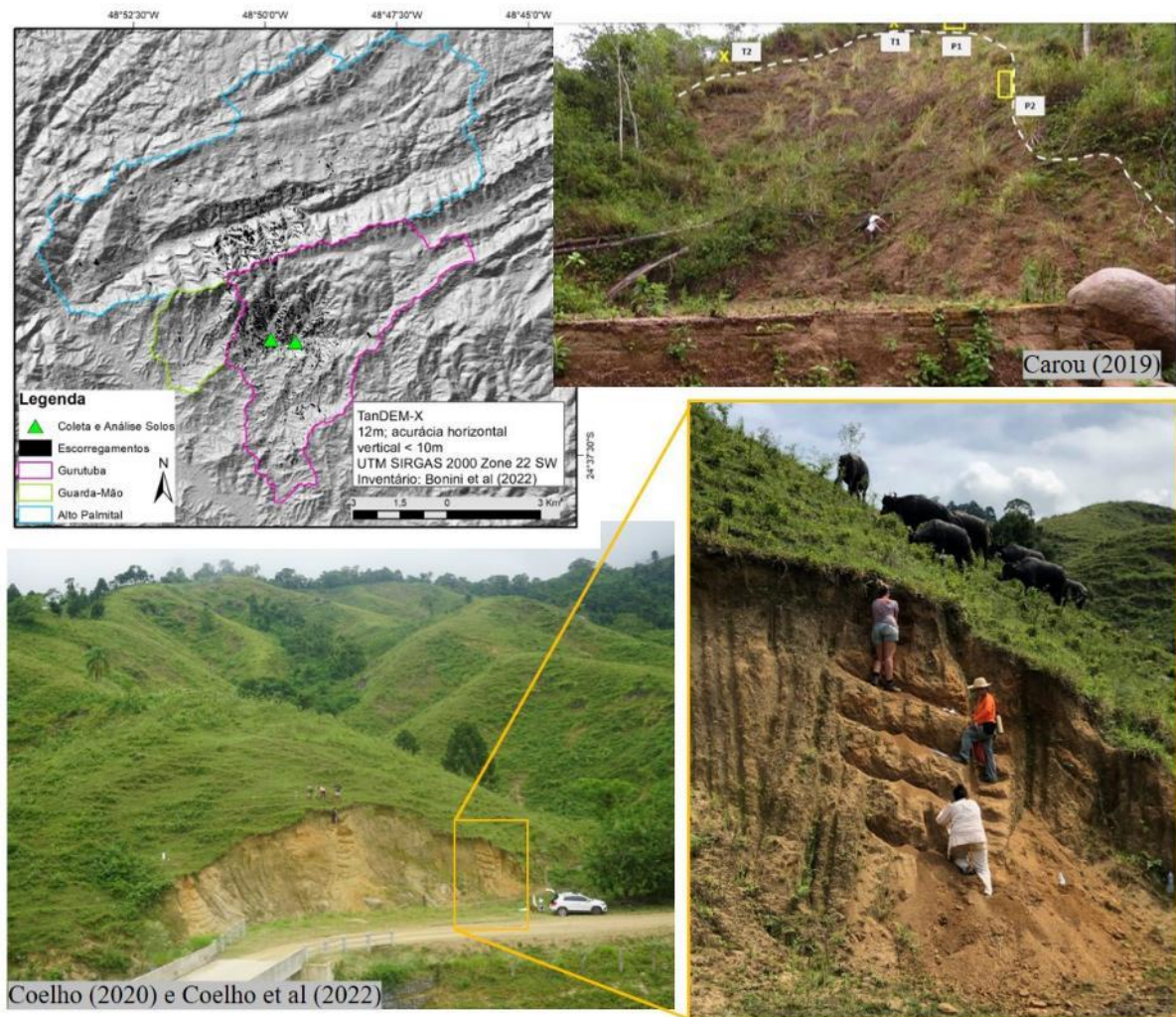


Figura 28: Levantamentos das propriedades físicas e químicas dos mantos de intemperismo.

Assim como as pesquisas realizadas em Caraguatatuba, parte-se da premissa que o material mobilizado possui características similares ao material das laterais e do topo (não mobilizado), sendo possível então uma retroanálise do perfil completo antes da ruptura. Carou (2019) realizou a coleta/descrição em dois setores de uma cicatriz de escorregamentos de 2014 (topo e terço médio da cicatriz). Resultados dos perfis classificados como Neossolos Litólicos

³⁹ Resultados da pesquisa de Iniciação Científica desenvolvida pelo aluno José Eduardo Bonini, sob minha orientação (bolsista FAPESP).

mostraram o predomínio de uma textura franco arenosa, com porcentagem acima de 60% de areia, composta majoritariamente de feldspato, seguido de quartzo, biotita, poliminerálicos e poucos minerais acessórios (p. ex. hornblenda), com aumento significativo de biotita nas frações areia média até areia muito fina (CAROU, 2019).

Quanto à variação dos minerais nas assembleias de argila, observou-se um aumento da caulinita e da esmectita e redução da vermiculita, hidrobiotita e illita com a profundidade. A soma das porcentagens dos minerais, possivelmente transformados a partir das micas (hidrobiotita, illita e vermiculita) também diminuiu com a profundidade, indicando um aumento na alteração de micas conforme aumento da pedogênese (CAROU, 2019).

Com base nesta pesquisa, embora não tenham sido realizados levantamentos de outras propriedades relevantes nos estudos de instabilidade de vertentes (p. ex. coesão, ângulo de atrito interno, limite de liquidez), algumas considerações sobre a relação entre estabilidade e mineralogia podem ser apontadas: (i) redução do atrito interno e da coesão em função da combinação entre a individualização de minerais primários e formação de minerais secundários laminares e o predomínio da estrutura maciça; (ii) redução da coesão em profundidade devido ao aumento do volume de esmectita entre os horizontes mais superficiais e no contato solo-rocha; e (iii) relação entre a rocha pouco alterada e a formação de uma zona sobrejacente com baixo limite de liquidez (alta presença de caulinita), gerando uma descontinuidade mineralógica (CAROU, 2019).

Em um segundo ponto de análise, Coelho; Gramani; Vieira (2022) avaliaram três perfis de intemperismo a partir de descrições morfológicas, do levantamento da condutividade hidráulica saturada (K_{sat}) e da coleta de amostras deformadas (granulometria) e indeformadas (porosidade) que levou à identificação de três camadas principais (**Figura 29**). São elas: solo residual maduro, com espessura média entre 0.7 e 1m, forte presença de matéria orgânica e textura silto arenosa; solo residual jovem, com aproximadamente 1.3m de espessura (2.3 – 2.6m de profundidade), textura mais arenosa e estrutura maciça; e saprolito com cerca de 3.5m de espessura (~6m) com textura grosseira e presença de minerais primários (COELHO, 2020; COELHO; GRAMANI; VIEIRA, 2022).

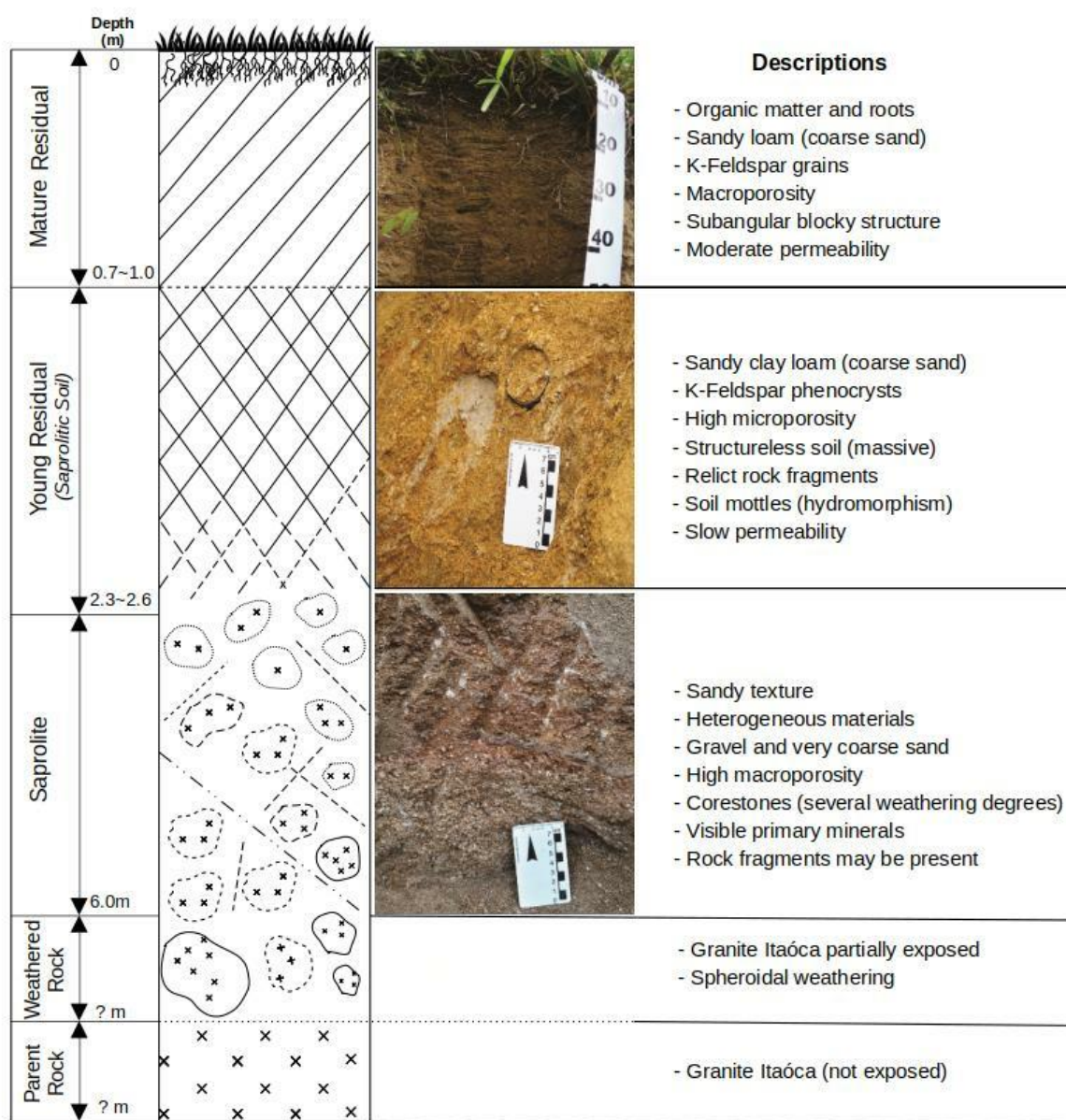


Figura 29: Perfil de intemperismo em granito com definição de três zonas (residual maduro, residual jovem e saprolito). Fonte: Coelho; Gramani; Vieira (2022).

Conforme apontam os autores, o perfil é, de maneira mais ampla, texturalmente mais arenoso, com predomínio da areia grossa e significativa redução do percentual de argila em profundidade: 12% de argila no residual maduro, 18% residual jovem e 7% saprolito (COELHO, 2020; COELHO; GRAMANI; VIEIRA, 2022).

Variações verticais da textura e da porosidade (macro e microporosidade) nos contatos entre as zonas Residual Maduro/Jovem e Residual Jovem/Saprolito podem influenciar diretamente a dinâmica hidrológica destes perfis e, durante eventos chuvosos, criarem zonas de ruptura

potencial que aumentam a instabilidade. Este aspecto também já foi mostrado em outras pesquisas conduzidas na Serra do Mar e em paisagens geomorfológicas similares (BRUGGER; EHRLICH; LACERDA, 1997; CAMAPUM; GITIRANA, 2021; CLEMENTINO; LACERDA, 1992; COUTINHO et al., 2019; EHRLICH; DA COSTA; SILVA, 2018; GOMES et al., 2017; GOMES; VIEIRA, 2016; MENDES; MARINHO; VALÉRIO FILHO, 2015; VIEIRA; FERREIRA; GOMES, 2015; WOLLE, 1985).

5.3.4 Corridas de Detritos: Suscetibilidade e Magnitude

Com o objetivo central de avaliar os principais fatores geomorfológicos condicionantes de algumas corridas de detritos, recentemente deflagradas na Serra do Mar, Dias et al. (2022) utilizaram um inventário tanto dos escorregamentos quanto dos depósitos das corridas de detritos e calcularam as vazões, velocidades e volumes estimados. Os resultados da bacia do rio Guarda-Mão (Itaóca) foram comparados com as corridas de detrito deflagradas em março de 2011 na bacia do rio Tingidor (Morretes, PR)⁴⁰.

Ao longo de seis sessões foram calculados os picos de vazão (Q) e as velocidades (U), usando a Equação de Manning. Devido à forte ligação entre a ocorrência de escorregamentos generalizados nas encostas e a deflagração de corridas de grande poder destrutivo, DIAS; MCDOUGALL; VIEIRA (2022) fizeram uma estimativa do volume inicial dos escorregamentos rasos (V_i), multiplicando a área das cicatrizes pela profundidade potencial média das rupturas na Serra do Mar (considerado o valor de 1m).

Ainda nesta pesquisa, outros três volumes foram calculados: Volume de arrastamento (V_a), que considera também sedimentos que podem ser incorporados ao fluxo ao longo do trajeto (Equação 4), em que L_s é o comprimento do canal, B é a largura média do canal, e H a profundidade média do canal. O Volume do Depósito Principal (V_{dp}) (Equação 5) considera área do depósito, onde A_d (m^2) é a espessura média dos depósitos. Neste caso considerado o

⁴⁰ Resultados da pesquisa de doutoramento desenvolvida pela aluna Vivian Cristina Dias, sob a minha orientação e supervisão do Prof. Scott McDougall (*Faculty of Science, Department of Earth, Ocean and Atmospheric Sciences, University of British Columbia*).

valor igual a 3m, conforme as observações de campo. Por fim, o Volume Total (V_t) igual ao somatório do V_i e V_a (DIAS, 2021; DIAS; MCDOUGALL; VIEIRA, 2022).

$$V_a = L_s \cdot B \cdot H \quad (4)$$

$$V_{dp} = A_d \cdot 3,0 \quad (5)$$

Os resultados mostraram que apenas um único escorregamento, com área total de 1.247 m², contribuiu diretamente para deflagração da corrida de detritos. Em relação à caracterização dos depósitos, picos de vazão (Q) e velocidade, na zona de transporte, com cerca de 500 m de amplitude e 2.364 m comprimento, foi possível identificar, apesar da área de difícil acesso, material grosseiro, blocos de grandes dimensões, forte presença de material orgânico, barramentos naturais, compostos majoritariamente por blocos e confluência de canais tributários e presença de *Levees* (DIAS, 2021; DIAS; MCDOUGALL; VIEIRA, 2022). Segundo os autores, os pontos desta zona apresentaram uma tendência de redução nos valores de pico de vazão (de 2.056,97 para 895,08) e de velocidade (de 8,4 para 7,2) em direção a jusante (**Tabela 10**).

Tabela 10: Valores de Pico de vazão e velocidade para as seções da bacia do rio Guarda-Mão.

Zona	Seção	PARÂMETROS		
		Distância (m)	Q (m ³ /s)	U (m/s)
Transporte	P1	1.300	2.056,97	8,4
	P2	1.350	2.489,78	8,6
	P3	1.400	1.033,27	6,8
	P4	1.450	895,08	7,2
Deposição	P5	2.600	7.139,99	11,42
	P6	2.720	624,19	4,14
	P7	2.900	475,71	6,68
	P8	3.000	113,59	3,9

Fonte: DIAS (2021)

Na zona de deposição, com 55 m de amplitude e 922m de comprimento, a drenagem principal, contrariamente à zona anterior, percorre um vale mais amplo (~100m de largura), onde foram identificados depósitos de blocos de grandes dimensões e inversões granulométricas, assim como sedimentos mais finos recobrando os blocos maiores e indicando a altura da lâmina d'água durante o evento de 2014 (DIAS; MCDOUGALL; VIEIRA, 2022).

Quando avaliados os volumes (inicial, depósito final, de arrastamento e total), embora o V_i na bacia Tingidor (Serra do Mar Paranaense) tenha sido quase 30 vezes maior, o V_t estimado na Guarda-mão (Serra do Mar Paulista) foi mais alto, com destaque para significativa contribuição do elevado volume de arrastamento e a maior distância da zona de transporte (DIAS, 2021; DIAS et al., 2022).

Assim como realizado em algumas bacias no município de Caraguatatuba, os parâmetros morfométricos foram empregados por Dias (2021); Dias e Vieira (2022) para avaliação da suscetibilidade a corridas de detritos, considerando bacias afetadas e não afetadas por eventos mais recentes na Serra do Mar. De acordo com os autores, a bacia do Guarda-Mão apresentou seis parâmetros com valores mais críticos que podem ter contribuído diretamente para maior magnitude do processo. Os maiores valores do Gradiente Altimétrico (ΔPI) e da área acima de 25° (A25) contribuíram para a iniciação do processo. A Hierarquia de Drenagem (Hd) e a Densidade de Drenagem (Dd) favoreceram o maior escoamento e intensidade dos processos; e o valor mais crítico do Índice de Rugosidade (Ir) indicou a maior produção e disponibilidade de sedimentos (DIAS, 2021).

5.3.5 Corridas de Detritos: Vulnerabilidade da População

Nesta mesma área, mas agora envolvendo limites administrativos municipais (Apiáí, Itaóca e Ribeira), foi realizada uma pesquisa⁴¹ com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade da população a processos de corridas de detritos e inundações bruscas (MATOS et al., 2018; SOUZA, 2021). Para tal, foi utilizado o modelo SAVE (*Spatial Approach to Vulnerability Assessment*), que considera três componentes básicos na avaliação final da vulnerabilidade: sensibilidade, exposição e falta de resiliência (BIRKMANN et al., 2013). O modelo foi construído no contexto do projeto MOVE (*Methods for the Improvement of Vulnerability Assessment in Europe*), que tem como um dos principais objetivos *fornecer uma conceituação aprimorada da natureza multifacetada da vulnerabilidade*, considerando os fatores de exposição, suscetibilidade e resiliência e as diferentes dimensões temáticas da vulnerabilidade (física, social, ecológica, econômica, cultural e institucional) (BIRKMANN et al., 2013).

Para componente de **sensibilidade** devem ser considerados, p. ex, aspectos como densidade demográfica, idade, gênero e grau de escolaridade, pois algumas populações dependem mais diretamente de auxílio durante um evento de desastre, como os grupos de maior idade, com limitações e necessidades especiais (BIRKMANN et al., 2013; RUFAT et al., 2015). Especificamente no caso da população feminina, em países com fortes desigualdade entre gêneros, é maior o número de mortes em cenários de risco (RUFAT et al., 2015). Os autores também ressaltam que quanto menor o grau de instrução (p. ex. analfabetos), maiores são as dificuldades em compreender alertas, símbolos e orientações das equipes especializadas em situações de risco.

Na componente de **exposição** é fundamental utilizar parâmetros envolvendo características como a distribuição da população ou de suas construções, as condições de transporte (p. ex. integração de estradas e rodovias) e o período de permanência das pessoas em áreas de risco (FUCHS; KUHLCHE; MEYER, 2011).

⁴¹ Resultados da pesquisa de doutoramento desenvolvida pela aluna Luzia Matos de Souza, sob a minha orientação e supervisão do Prof. Carlos Valdir de Menezes Bateira (Universidade do Porto).

Finalmente, a componente **resiliência** corresponde a capacidade do elemento em risco (p. ex. comunidade ou sociedade) em resistir, absorver, adaptar-se e recuperar-se de sua exposição às ameaças externas e seus efeitos, em tempo hábil e de forma eficiente (UNDRO, 1980). Birkmann et al. (2013) descrevem duas variáveis: *déficit de resiliência*, que reflete a capacidade do elemento em risco em lidar ou se recuperar; e *melhoria da resiliência*, indicando as características de sua adaptação. A quantificação desta componente pode-se basear em variáveis econômicas, tais como número de pessoas empregadas e renda e acesso a seguros que indenizem as perdas e os danos relacionados (BIRKMANN et al., 2013; FUCHS; KUHLCHE; MEYER, 2011).

É fundamental ressaltar que, mesmo diante da importância de todas as variáveis citadas anteriormente, muitos trabalhos utilizando o modelo **SAVE**, não consideraram os três componentes devido, muitas vezes, à ausência de dados (GUILLARD-GONÇALVES; ZÊZERE, 2018).

Nesta pesquisa, o modelo **SAVE** foi utilizado para o cálculo da vulnerabilidade da população a processos de corridas de detritos e inundações bruscas em três municípios: Ribeira, Itaóca e Apiaí. Para construção dos índices de cada um dos três componentes do modelo, exposição, sensibilidade e déficit de resiliência, foram utilizados os dados censitários do IBGE (2010), envolvendo 70 setores censitários, sendo 53 em Apiaí, 9 em Itaóca e 8 em Registro (**Tabela 11**). Foi utilizada uma média aritmética para o cálculo de cada um dos índices e posteriormente os valores foram padronizados para obtenção do intervalo entre 0 (baixa vulnerabilidade) e 1 (alta vulnerabilidade) (MATOS et al., 2018; SOUZA, 2021).

Os resultados do modelo **SAVE** indicaram 17 setores com vulnerabilidade baixa (0,21 – 0,40), 27 com vulnerabilidade média (0,41 a 0,60), 24 setores com vulnerabilidade alta (0,61 a 0,80) e apenas dois setores com vulnerabilidade muito alta (0,81 a 0,83) (**Figura 30**). Estes limites foram baseados em estudos de Guillard-Gonçalves and Zêzere (2018) Murillo-García et al. (2015) (MATOS et al., 2018; SOUZA, 2021).

Tabela 11: Índices para avaliação da vulnerabilidade final nos municípios de Itaóca, Apiaí e Ribeira.

	Índices	Equação
Sensibilidade	Densidade Demográfica (DD)	$DD = \frac{ps}{as} / (add)$
	População Jovem (PIJ)	$PIJ = p \leq 13/ps$
	População Idosa (PI)	$PI = p \geq 65/ps$
	População Feminina (PF)	$PF = \left(\frac{pf}{ps}\right)$
	População Analfabeta (PA)	$PA = \left(\frac{pa}{ps}\right)$
Exposição	População Total (PT)	$PT = \frac{(ps)}{(pab)}$
	Exposição Temporária da População (ET)	$EP = \left(\left(\frac{c}{ps}\right) \times \left(1 - \left(\frac{h}{24}\right)\right)\right) + \left(\left(\frac{i}{os}\right) \times \left(1 - \left(\frac{h}{24}\right)\right)\right) + \left(\left(\frac{sr}{ps}\right) \times \left(1 - \left(\frac{h}{24}\right)\right)\right)$
	Ocorrência dos Processos (OP)	$OP = \frac{(op)}{(ot)}$
Déficit de resiliência	População Economicamente Ativa	$PEA = \frac{(pea)}{(ps)}$
	Condição de Moradia (CM)	$CM = \left(3 \left(\frac{ca}{ds}\right) + \left(1 - \left(\frac{dcs}{ds}\right)\right) + \left(\frac{dss}{ds}\right)\right)$
	Situação da Renda (SR)	$SR = \left(\left(\frac{pat}{ps}\right) + \left(1 - \left(\frac{pcr}{ps}\right)\right) + \left(\frac{psr}{ps}\right)\right)$

Legenda: população de cada setor (ps); área de cada setor (as); valor mais alto da densidade demográfica (add); população absoluta (pab); crianças (c); Idosos (i); população sem renda (sr); horas fora da residência (h); ocorrência dos processos (op); ocorrência no setor (os); ocorrência total (ot). (ca); domicílios no setor (ds); domicílios com serviços (dcs); domicílios sem serviços (dss); população atingida (pat); população com renda (pcr); (DA) domicílio atingido; (dt) domicílio total

A população atingida (pat) = $\left(\frac{pt}{dt}\right) \times DA$

Fonte: modificado de (GUILLARD-GONÇALVES; ZÊZERE, 2018; MURILLO-GARCÍA et al., 2015)

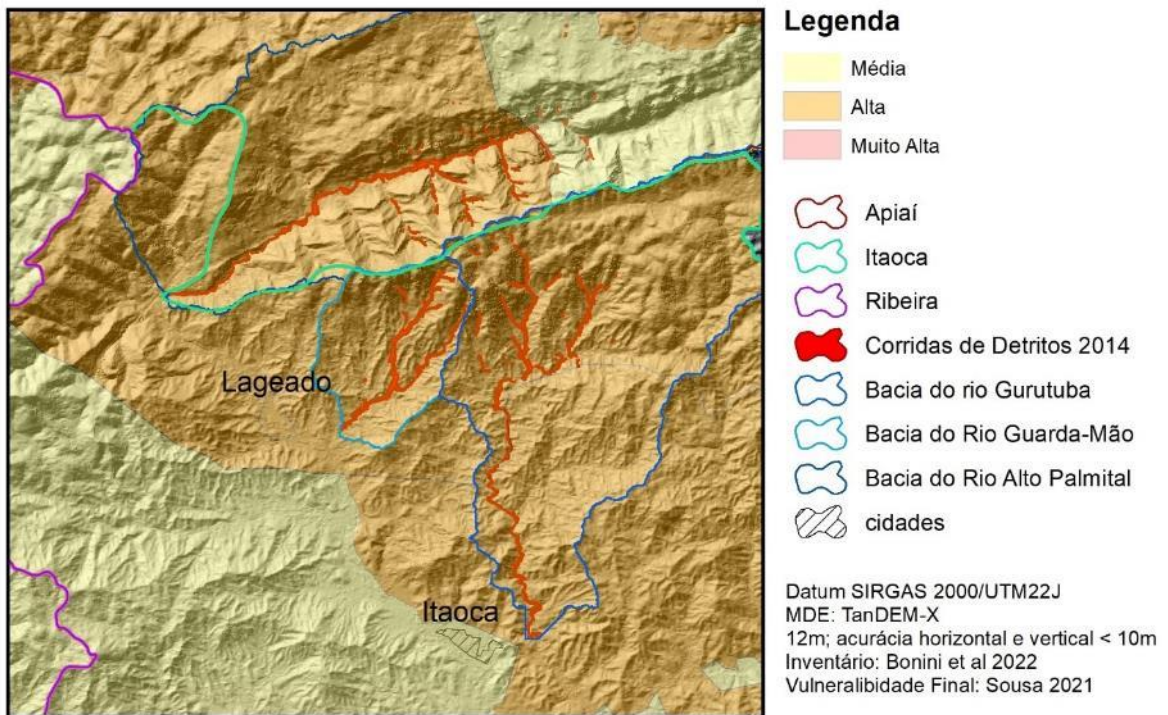
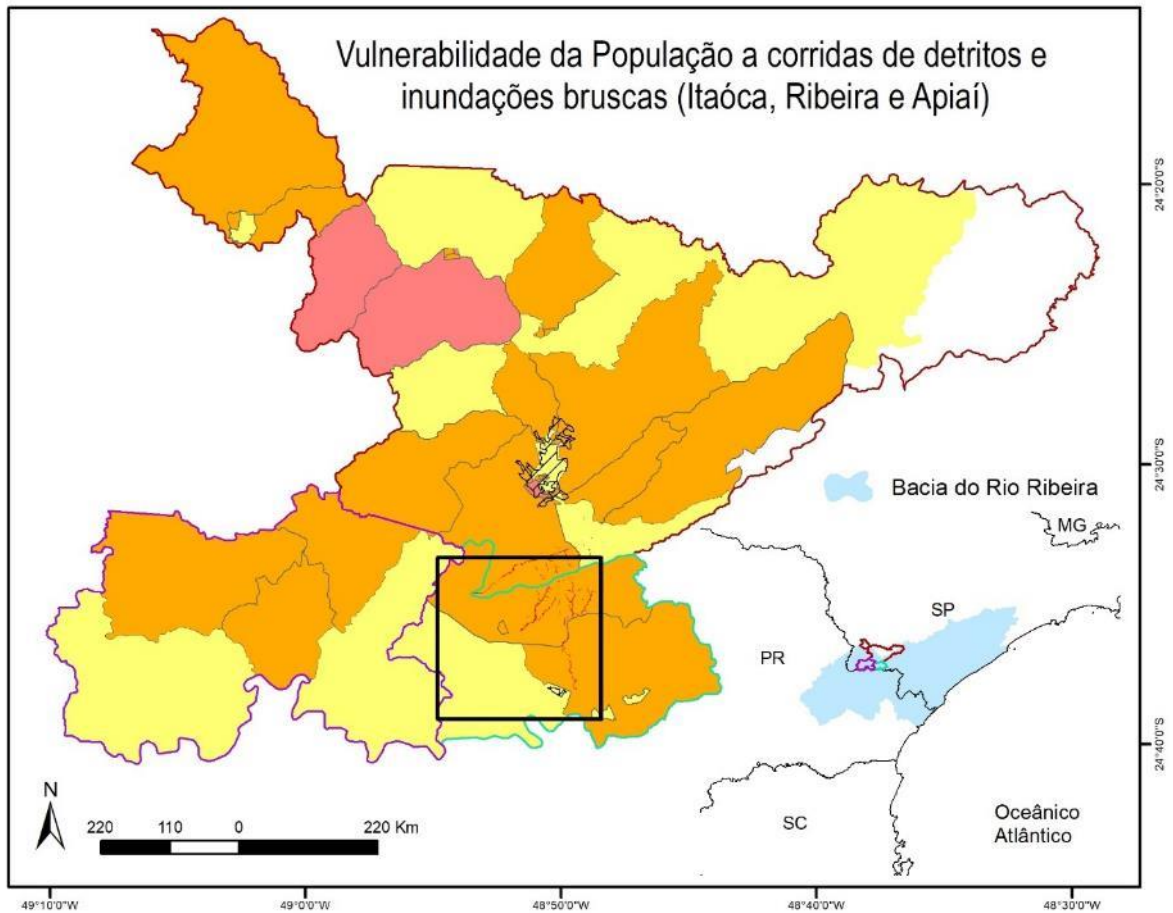


Figura 30: Vulnerabilidade final dos municípios de Apiaí, Itaóca e Ribeira. Fonte dos dados: Souza (2021)

O maior valor foi identificado em um núcleo urbano no município de Apiaí. Este setor, mesmo apresentando bons índices quanto à condição das moradias (déficit de resiliência), os baixos índices da população analfabeta, população idosa e sem renda (sensibilidade) geraram classes de alta vulnerabilidade. Contrariamente, um setor rural do mesmo município, apresentou vulnerabilidade baixa, devido aos índices mais reduzidos da condição da moradia (déficit de resiliência) e da população idosa (sensibilidade) (MATOS et al., 2018; SOUZA, 2021).

Embora tenham sido consideradas as corridas de detritos e as inundações bruscas de 2014, por meio do mapeamento da área destas ocorrências e do total de moradias e pessoas afetadas, alguns setores que não foram afetados neste evento (ou muito pouco afetados, apenas 0.2% do município de Apiaí), indicaram vulnerabilidade final média, condicionada sobretudo pelos altos índices de déficit de resiliência (**Figura 30**). Por outro lado, setores mais afetados por estes processos hidrodinâmicos, como o distrito de Lageado e a parte central do município de Itaóca (**Figura 31**), foram classificadas como de alta vulnerabilidade devido aos elevados índices dos três componentes (exposição, sensibilidade e falta de resiliência) (MATOS et al., 2018; SOUZA, 2021).



Figura 31: Centro do município de Itaóca fortemente afetado pelas inundações bruscas em 2014 e a mesma localização em 2019. Fonte: Prefeitura do município de Itaóca (2014) e Autora.

5.4 São Luiz do Paraitinga

No dia 1º, o Rio Paraitinga, que atravessa a cidade, transbordou e ficou cerca de 10 metros acima de seu nível normal. A cheia invadiu metade dos imóveis. Pelo menos seis dos 24 edifícios integralmente tombados pelo Conselho de Defesa do Patrimônio Histórico, Arqueológico, Artístico e Turístico do Estado de São Paulo (Condephaat) foram destruídos, incluindo a igreja matriz, que tinha cerca de 200 anos

(Veja-SP. 8 de janeiro de 2010)

5.4.1 Aspectos Gerais do Evento de 2009/2010

Os municípios de São Luiz do Paraitinga e Lagoinha possuem registros de inundações que atingiram, sobretudo, o seu centro histórico em eventos de 1863, 1967 e 1971. Nestes dois últimos, o nível do rio Paraitinga atingiu 5,80m e 6,30m, respectivamente. Em 1996 novas ocorrências de inundações causaram prejuízos materiais e três vítimas fatais (ALLICCI; SCHICCHI, 2019; MORADEI, 2017).

Estes municípios estão inseridos no Planalto de Paraitinga – Paraibuna, cujo contexto geológico regional é marcado pelo Cinturão Orogênico do Atlântico (Orógeno Ribeira), composto por gnaisses, migmatitos, rochas metamórficas de baixo a médio grau, de idade arqueana a neoproterozoica e suítes de rochas granitoides intrusivas de idade neoproterozoica. Apresenta zonas de cisalhamento dúcteis de orientação ENE a E – W; destrais, subverticais e profundas (EIRADO; HEILBRON; ALMEIDA, 2006; HEILBRON et al., 2004; RICCOMINI, 1990; RICCOMINI; SANT’ANNA; FERRARI, 2004).

Se destacam nesta área as serras de Quebra Cangalha (alto estrutural dissecado com altitudes entre 800 e 1000 m, com granitoides sintectônicos e migmatitos estromatíticos homogêneo); *Paraitinga* (morros dissecados, vales fechados, encostas de alta declividade, serras alinhadas na direção ENE e altitudes entre 1000 e 1500 m) e o Gráben Paraitinga-Paraibuna (constituído pela planície do rio Paraitinga, colinas baixas, morros paralelos e pequenas serras, com altitudes variando entre 400 e 700 m e baixos ângulos de encosta) (GONTIJO-PASCUTTI et al., 2012; HASUI et al., 1978a, 1978b; OLIVEIRA; VIEIRA; ROSS, 2018; ROSS; MOROZ, 1996).

Entre os anos de 2000 e 2006 também ocorreram dois eventos de inundação que atingiram o centro urbano de São Luiz do Paraitinga (BROLLO et al., 2010). Entretanto, o episódio de maior repercussão ocorreu entre dezembro de 2009 e janeiro de 2010, tendo sido registrado, no mês de dezembro, um acumulado de chuva de 625,5mm, com valores de 112mm/24h no dia 31/12/2009 o que, além de inundar a área urbana, deflagrou mais de 2 mil escorregamentos (HORTA, 2018; STABILE; COLÂNGELO, 2017) (**Figura 32**).

Somente no município de São Luiz do Paraitinga 5.163 pessoas foram afetadas (desabrigados, desalojados, deslocados e feridos), resultando em uma morte, 97 moradias destruídas, 134 moradias e 6 edifícios públicos danificados, 220km de vias urbanas danificadas e 80 pontes destruídas (**Figura 33**), onde contabilizou-se cerca de R\$ 141 milhões em prejuízos (BROLLO et al., 2010).

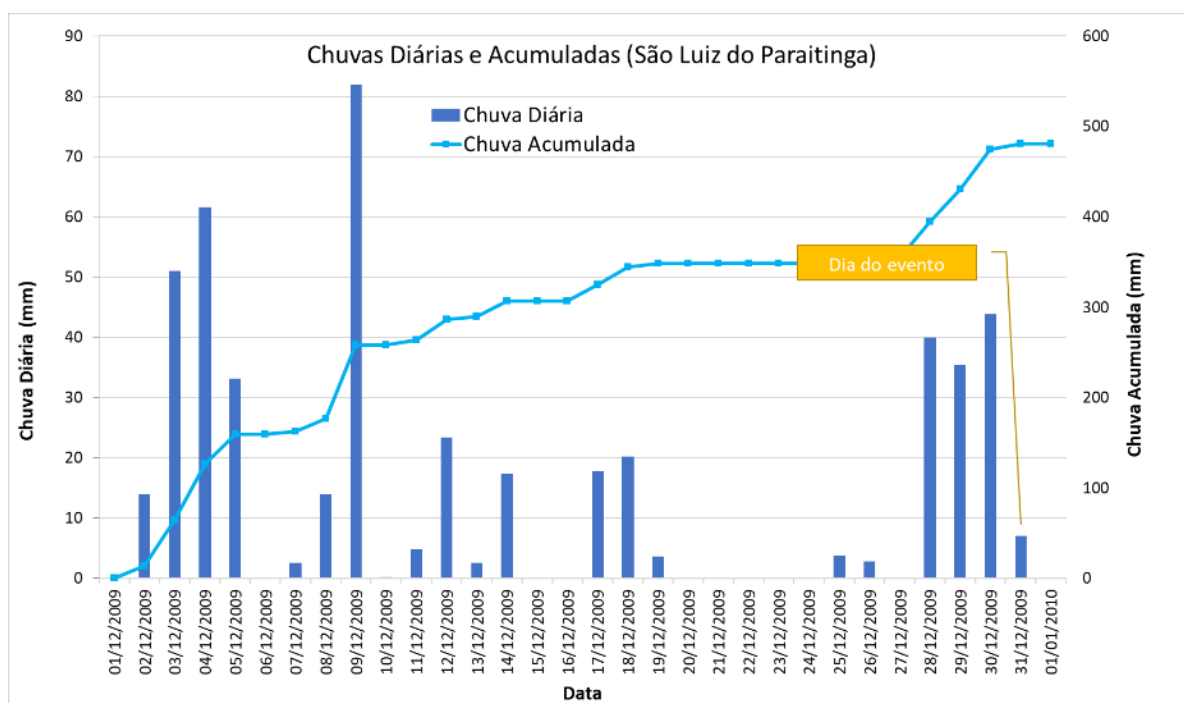


Figura 32: Chuvas diárias e chuvas acumuladas do evento do dia 01 de janeiro de 2010 nos municípios de São Luiz do Paraitinga e Lagoinha. Fonte de dados: Agência Nacional de Águas. Posto 2345065.



Figura 33: (A) Escorregamentos nas encostas em São Luiz do Paraitinga. (B) solapamento de margens; (C) e (D) inundação na parte central do município. Fonte: IPT (2010).

5.4.2 Suscetibilidade a Escorregamentos

Duas pesquisas foram desenvolvidas nas bacias hidrográficas mais afetadas por escorregamentos, com o objetivo central de avaliar o papel da litologia, da estrutura das rochas e dos parâmetros morfométricos na distribuição espacial dos escorregamentos de 2009/2010.

Oliveira; Vieira; Ross (2018)⁴² construíram um inventário com 567 cicatrizes (131 no município de Lagoinha e 436 em São Luís do Paraitinga), a partir do mapeamento realizado no município de São Luís do Paraitinga (CPRM, 2014b), da interpretação de ortofotos da EMPLASA dos anos de 2010-2011 (1m de resolução), de imagens *Google Earth*; e validações em campo (**Figura 34**).

⁴² Resultados da pesquisa de mestrado desenvolvida pela aluna Maria Rita Pelegrin de Oliveira, sob minha orientação.

Em campo foi recoberta uma área de 200km², sendo validadas 22 cicatrizes por meio de fichas de controle contendo informações sobre características de uso e ocupação do solo; tipo de encosta (natural, corte/aterro, rochosa); tipologia do processo; tipos de materiais (p. ex. residual, saprolito) e principais atributos geomorfológicos do plano de ruptura e do sedimento deslocado. Também em campo foram analisados 20 afloramentos com descrições sobre a mineralogia, textura e estrutura e medições de atitude de feições planares (OLIVEIRA, 2019; OLIVEIRA; VIEIRA; ROSS, 2018).

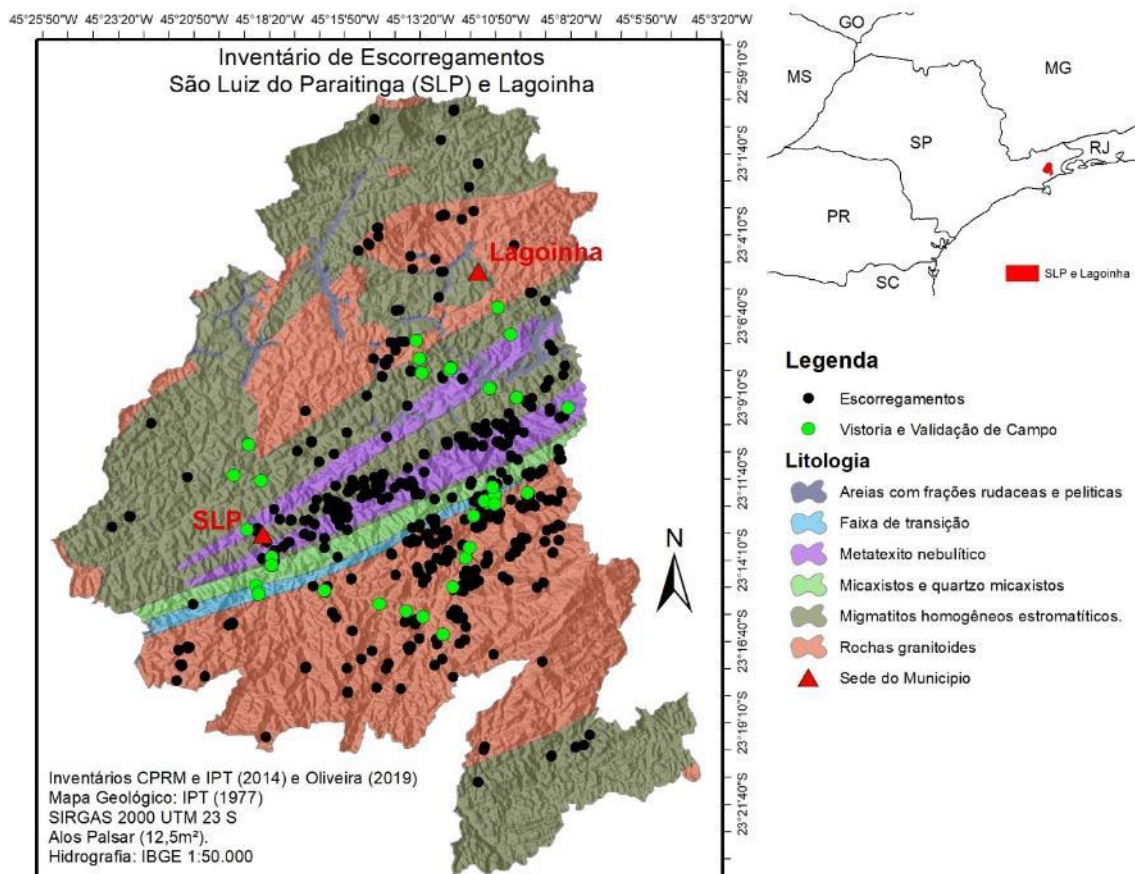


Figura 34: Inventário dos escorregamentos nos municípios de São Luiz do Paraitinga e Lagoinha. Fonte dos dados: Oliveira (2019); Oliveira; Vieira; Ross (2018).

Em outras pesquisas⁴³, realizadas por Bonini (2020); Bonini et al., 2020), o inventário inicial foi revisado, e a suscetibilidade a escorregamentos foi avaliada por meio de dois modelos, sendo um estatístico - Valor Informativo (**VI**) (YIN; YAN, 1988) e outro heurístico – Fragilidade Ambiental (ROSS, 1994). Tais métodos foram aplicados em três bacias: córrego dos Pintos (15 km²), córrego da Fazendinha (13 km²) e do Alto rio Chapéu (29 km²), totalizando 57 km² (BONINI, 2020). Os autores utilizaram mapas de ângulo, orientação e curvatura das encostas e do Índice Topográfico de Umidade, gerados a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) TanDEM-X1 (12m de resolução), mapas de litotipos (HASUI et al., 1978b) e de uso da terra de 2010 e 2011 (EMPLASA) (BONINI, 2020).

Para validação e avaliação do desempenho e da capacidade preditiva dos modelos foram usados a curva ROC (FAWCETT, 2006b) e Taxas de Sucesso das Áreas Abaixo das Curvas de Sucesso e Predição (CHUNG; FABBRI, 1999). Paralelamente, a similaridade pixel-a-pixel entre os mapas finais de fragilidade foi avaliada pelo índice Kappa de Cohen (κ) (COHEN, 1960).

Os resultados de Bonini (2020); Bonini et al. (2020) mostraram que as maiores fragilidades foram identificadas em encostas orientadas para N, NW e E, com ângulos entre 25° e 37°, curvaturas côncavas e retilíneas, com baixo Índice Topográfico de Umidade ($< 7.4m^2$) e embasadas por metatextos nebulítico. Embora tenham apresentado diferenças na espacialização das classes de fragilidade ambiental, sobretudo as intermediárias, a validação mostrou que os cenários gerados, tanto pelo VI e quanto pelo modelo heurístico, possuem qualidade similar, com valores de área abaixo da curva ROC e de Taxa de Sucesso considerados bons (entre 0.80 e 0.90) ou mesmo excelentes (> 0.90) (BONINI, 2020) (**Figura 35**).

A pesquisa também identificou o aumento da concentração de escorregamentos nas classes de maior fragilidade. No cenário do modelo heurístico, p. ex., mais de 80% das cicatrizes se concentraram nas classes de fragilidade ambiental Alta (10.8%) e Muito Alta (71.9%), enquanto as classes de fragilidade ambiental Baixa e Moderada apenas 16.3% das cicatrizes, mesmo correspondendo a, aproximadamente metade da área de estudo (46.2%) (BONINI, 2020).

⁴³ Resultados da pesquisa de mestrado desenvolvida pelo aluno José Eduardo Bonini, sob minha coorientação.

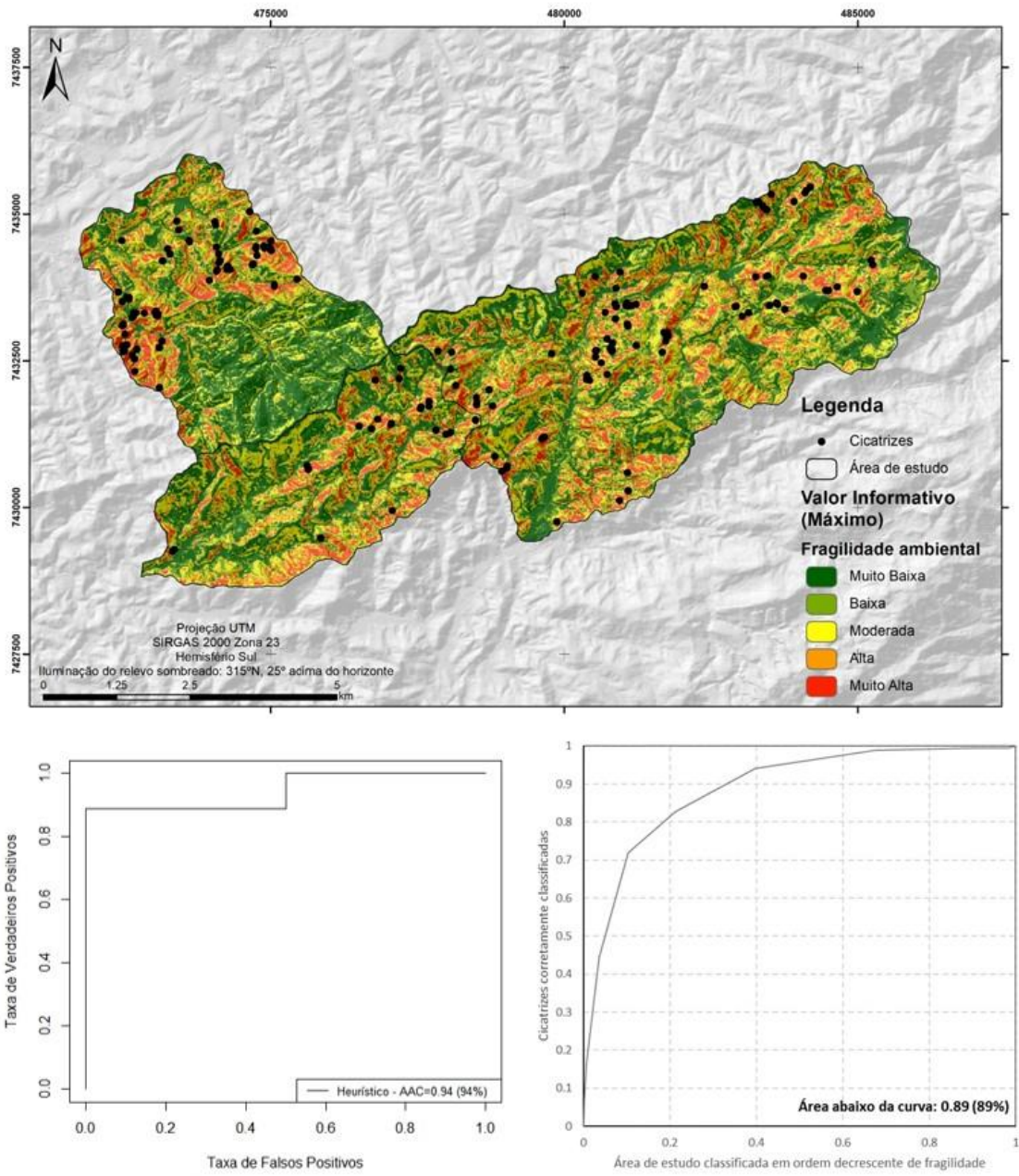


Figura 35: Mapa de fragilidade ambiental de base heurística, Curva ROC e Taxa de sucesso para o modelo heurístico (BONINI, 2020).

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O emprego de novas abordagens quantitativas possibilitou o avanço do conhecimento sobre a dinâmica espacial dos movimentos de massa sob diferentes domínios geológico-geomorfológicos e climáticos. Entretanto, mesmo com estes avanços que permitiram a indicação, mais precisa e eficiente, de áreas suscetíveis e das populações mais vulneráveis, as políticas e as ações governamentais nacionais foram criadas, em sua grande maioria, “impulsionadas”, por eventos de dimensões “catastróficas” e com profunda repercussão na sociedade brasileira. Dentro desta “cultura” pós-desastre, por exemplo, foram criadas a primeira defesa civil após o evento que atingiu a cidade do Rio de Janeiro no verão de 1966/1967, e, em escala nacional, o Programa Estadual de Prevenção de Desastres Naturais e de Redução de Riscos, após deslizamentos generalizados em oito municípios da região serrana fluminense em fevereiro de 2011.

Referente aos modelos matemáticos em bases físicas, um dos principais focos desta Tese, embora tenha havido um aumento significativo da sua aplicação (ou replicação), ainda são utilizados pontualmente e exclusivamente para o mapeamento da suscetibilidade, não sendo considerados, por exemplo, como uma ferramenta de apoio para a avaliação de perigo.

Nesta perspectiva, também estes modelos são totalmente desconsiderados em programas e planos de redução de risco em escala nacional. Fato este que merece uma maior atenção, pois, conforme apresentado pela literatura, são ferramentas eficientes na previsão de escorregamentos. Adicionalmente, diante da escassez de inventários sistemáticos de evento e multi-temporal em grande parte do território nacional, sua utilização independe da ocorrência pretérita, dado essencial para aplicação de outros modelos, como os estatísticos, por exemplo.

Tendo como base as perguntas que orientaram as pesquisas desenvolvidas, elencadas no Capítulo 1: Introdução, Objetivos e Eixo Norteador desta Tese, são pontuadas algumas considerações finais sobre a dinâmica espacial dos escorregamentos rasos e das corridas de detritos na Serra do Mar, a partir da utilização de modelos matemáticos em bases físicas, estatísticas e heurísticas, parâmetros morfométricos de bacias hidrográficas e levantamento em campo da espacialização das principais propriedades pedológicas, hidrológicas e geotécnicas que influenciam a estabilidade das encostas.

- Os modelos matemáticos em bases físicas, assim como qualquer método científico, podem ser considerados na avaliação espacial dos escorregamentos rasos em ambientes tropicais úmidos, uma vez que conseguem avaliar, de maneira efetiva, o papel de cada condicionante (topográfico, geotécnico e/ou hidrológico). Em todas as áreas estudadas até o momento, foi possível avaliar positivamente o uso destes modelos, pois os mapas de suscetibilidade, validados a partir de eventos pretéritos, apresentaram significativo grau de predição, sob as condições geomorfológicas da Serra do Mar.
- Igualmente, como outros métodos de mapeamento da suscetibilidade, os modelos em bases físicas foram desenvolvidos sob condições de contorno, utilizadas pelos seus desenvolvedores e devidamente apresentadas em todas as publicações originais. Portanto, em pesquisas posteriores, é essencial o conhecimento a priori destas condições limites, evitando, assim, que a real potencialidade de cada modelo seja erroneamente subestimada. É comum, inclusive nas pesquisas aqui apresentadas, que os autores elenquem inúmeras “limitações” destes modelos, desde a ausência de parâmetros de uso do solo, mineralogia dos mantos de intemperismo, tipos litológicos, cobertura vegetal, até a “restrição” da suscetibilidade a um único tipo de movimento de massa.
- Apesar das inúmeras restrições quanto ao uso de dados dos parâmetros físicos dos solos diretamente coletados em campo, fica evidente que a disponibilidade gratuita de Modelos Digitais de Elevação de alta resolução (p. ex. SRTM) e o maior entendimento do funcionamento matemático destes modelos, possibilitaram a sua maior aplicação e conseqüentemente um avanço nas discussões em paisagens nacionais. No Brasil, embora muitos trabalhos utilizem cartas topográficas em escalas 1:10.000 e 1:50.000 como base para construção do MDE, percebe-se um aumento importante do uso de Modelos Digitais de Elevação globais disponibilizados gratuitamente com resoluções que podem variar, por exemplo, entre 90 m (SRTM), 30m (SRTM30_PLUS) e 12,5 (TanDEM-X).
- Para escalas menores e recortes espaciais com maior variabilidade de classes morfológicas e geológicas (p. ex. municípios), o modelo estatístico do Valor Informativo se mostrou adequado, com resultados concisos quanto à suscetibilidade a escorregamentos rasos. Paralelamente, o uso da curva ROC e das Taxas de Sucesso permitiu avaliar mais precisamente a influência de cada um dos parâmetros morfológicos e litológicos no mapeamento final da suscetibilidade.

- Por meio de levantamentos de campo em diferentes trechos da Serra do Mar, foi possível fazer algumas associações entre variações espaciais de propriedades físicas e mineralógicas e o comportamento hidrológico dos mantos de alteração, sobretudo, durante eventos intensos e prolongados de chuva. Variações verticais da condutividade hidráulica saturada, acompanhadas por mudanças texturais, estruturais e mineralógicas, favorecem a formação de descontinuidade e potenciais zonas de rupturas, geralmente entre 1,0m e 2,0 de profundidade. Este grupo de informações, diretamente obtidas em campo, foi fundamental para a geração de cenários de suscetibilidade por meio de modelos matemáticos em bases físicas, confirmando a importância do uso conjunto de diferentes abordagens (campo e modelagem) nos estudos geomorfológicos.
- Referente às corridas de detritos, os resultados sinalizam o potencial dos parâmetros morfométricos das bacias hidrográficas (p. ex. área de contribuição, relação de relevo, densidade de drenagem) no mapeamento final da suscetibilidade. De acordo com as pesquisas, é possível também avaliar valores limiares de alguns destes parâmetros que interferem diretamente na magnitude das corridas de detritos, ainda que esta quantificação seja um grande desafio nos estudos nacionais, devido à enorme complexidade destes processos.
- Quando comparados aos escorregamentos rasos, a confecção de inventários de corridas de detritos é mais complexa, sobretudo em paisagens tropicais úmidas. Dependendo do percurso e da magnitude, torna-se mais difícil o mapeamento exclusivamente por meio de imagens de satélite ou fotografias aéreas, principalmente havendo um significativo intervalo de tempo entre o evento e a tomada das imagens. Além dos fatores naturais, como a rápida regeneração da cobertura vegetal, são comuns as modificações antrópicas dos depósitos nos eixos principais de drenagem. Desta forma, em todas as pesquisas foram feitas investigações, em campo, ao longo de quase toda trajetória destas corridas deflagradas/desenvolvidas nos eixos das drenagens principais, com objetivo de obter mais precisamente informações sobre a tipologia, morfologia e dimensões dos depósitos.
- Por fim, é fundamental que exista um avanço nas pesquisas que quantifiquem o perigo e a vulnerabilidade de elementos construídos e da população, prioritariamente em áreas já mapeadas como altamente suscetíveis. Ainda são poucos e insuficientes os estudos envolvendo esta temática no Brasil, o que dificulta tanto a consolidação das pesquisas quanto a aplicação de medidas preventivas e mitigadoras para redução dos danos sociais, econômicos e ambientais causados direta ou indiretamente por movimentos de massa no Brasil.

7. ANÁLISE CRÍTICA E PERSPECTIVAS FUTURAS

Desde minha primeira publicação, ainda como aluna de iniciação científica, os estudos focaram no mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos, primeiramente, em bacias hidrográficas no maciço da Tijuca, no município do Rio de Janeiro e, posteriormente, utilizando modelos matemáticos em bases físicas na Serra do Mar nos trechos Paulista e Paranaense.

As pesquisas realizadas entre 2002 e 2015, permitiram um avanço no entendimento destes modelos (nem sempre compreendidos na íntegra, ou apenas reaplicados), e uma melhor compreensão sobre a influência dos fatores condicionantes geomorfológicos na estabilidade de encostas. Alguns trabalhos desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisa de Processos Morfodinâmicos, que coordeno desde o término do meu doutoramento, se tornaram referências nacionais e, de alguma forma, contribuíram na divulgação e ampliação do uso destes modelos.

Mais recentemente, foram utilizadas outras ferramentas de mapeamento de suscetibilidade, como o modelo do Valor Informativo (VI) e análises morfométricas de bacias hidrográficas, especificamente para corridas de detritos. Outro ponto importante, foram as comparações da eficácia de diferentes métodos (VI x modelo SHALSTAB) e a interferência da resolução dos Modelos Digitais de Elevação na qualidade final dos mapas de suscetibilidade. Destaca-se também, o aprimoramento das etapas de validação e de avaliação do desempenho e da capacidade preditiva dos modelos com o uso de ferramentas estatísticas mais complexas (p. ex. Curva ROC e as Taxas de Sucesso).

O uso desses modelos em bases físicas ou estatísticas, assim como o levantamento dos valores dos parâmetros físicos e hidrológicos de entrada foi sempre baseada em conhecimento *in situ*. Em campo é possível reconhecer a tipologia dos escorregamentos, analisá-los no contexto da paisagem, observar as principais variações físicas nos perfis de solos, coletar amostras para ensaios de cisalhamento e determinar valores da condutividade hidráulica em diferentes curvaturas das encostas e declividades ao longo do perfil de alteração. Tais etapas são imprescindíveis, e sem as quais é impossível o avanço na modelagem. A “aplicação” destes modelos nunca foi o objetivo central das pesquisas, contrariamente, sempre foram usados como ferramentas de apoio para a avaliação da suscetibilidade e para a compreensão da dinâmica espacial destes processos na Serra do Mar.

Diante do que foi abordado, ao menos três lacunas podem ser apresentadas de maneira mais direta. Uma delas refere-se ao recorte espacial, pois grande parte dos estudos tem apenas bacias na Serra do Mar como áreas experimentais, o que pode conferir uma limitação no conhecimento sobre a dinâmica dos processos em paisagens distintas. Neste sentido, pesquisas atuais estão sendo desenvolvidas em novas áreas, como o Geoparque Caminhos dos Cânions do Sul (RS/SC) e a Serra da Capivara (Piauí), diversificando não somente as áreas experimentais, mas também a tipologia dos processos geomorfológicos.

A segunda lacuna consiste na insuficiência de avaliações sobre a hidrodinâmica e o comportamento reológico dos sedimentos, que precisariam ser incorporados nas investigações geomorfológicas. Uma terceira lacuna refere-se à identificação do grau de suscetibilidade a corridas de detritos destas bacias da Serra do Mar, utilizando como base parâmetros morfométricos. É importante que haja um avanço tanto na definição mais específica sobre a influência de cada um destes parâmetros, com a identificação de valores limites críticos, assim como a incorporação de novos atributos geomorfológicos gerados por MDE's de alta resolução.

Para finalizar, destaco que sempre houve a preocupação com a divulgação das pesquisas, que permitiu a abertura de um diálogo com a comunidade científica seja ela nacional, mas principalmente, internacional. Desta forma, estas comunicações possibilitou a avaliação crítica dos pares sobre os procedimentos metodológicos utilizados, os resultados, discussões e conclusões alcançadas nas pesquisas aqui apresentadas. Para cada uma das pesquisas realizadas foi gerado, pelo menos, um artigo em periódico indexado, com circulação e alcance nacional e/ou Fator de Impacto.

Os artigos de minha autoria e coautoria publicados nos últimos 15 anos, tiveram as seguintes métricas nas principais plataformas bibliográficas⁴⁴: Web of Science (347 citações e H-Index 9); Scopus (377 citações e H-Index 8) e Google Scholar (1198 citações⁴⁵ Índice i10 16).

⁴⁴ Atualizada em 29_08_2022

⁴⁵ Considera também alguns trabalhos em anais de congressos

REFERENCIAS

ADGER, W. Neil. Vulnerability. **Global Environmental Change**, [S. l.], v. 16, n. 3, p. 268–281, 2006. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006.

AFUNGANG, Roland Ngwatung; BATEIRA, Carlos Valdir; NKWEMOH, Clement Anguh. Assessing the spatial probability of landslides using GIS and informative value model in the Bamenda highlands. **Arabian Journal of Geosciences**, [S. l.], v. 10, n. 17, 2017. DOI: 10.1007/s12517-017-3155-1.

ALEOTTI, P.; CHOWDHURY, R. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 58, n. 1, p. 21–44, 1999. DOI: 10.1007/s100640050066.

ALHEIROS, M. M. O Plano Municipal de Redução de Risco. In: CARVALLHO, C. S.; GALVÃO, T. (org.). **Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais**. Brasília: Ministério das Cidades, 2006. p. 56–75.

ALLICCI, Renata Rendelucci; SCHICCHI, Maria Cristina da Silva. São Luiz do Paraitinga: o imaginário fundacional e suas projeções. **Anais do Museu Paulista: História e Cultura Material**, [S. l.], v. 27, 2019.

ALMEIDA, Fernando Flávio Marques De; CARNEIRO, Celso Dal Ré. Origem e Evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, [S. l.], v. 28, n. 2, p. 135–150, 1998.

AL-UMAR, Mohammad; FALL, Mamadou; DANESHFAR, Bahram. GIS-based modeling of snowmelt-induced landslide susceptibility of sensitive marine clays. **Geoenvironmental Disasters**, [S. l.], v. 7, n. 1, p. 9, 2020. DOI: 10.1186/s40677-020-0142-8.

ALVALÁ, Regina Célia; ASSIS DIAS, Mariane Carvalho; SAITO, Silvia Midori; STENNER, Cláudio; FRANCO, Cayo; AMADEU, Pilar; RIBEIRO, Julia; SOUZA, Rodrigo Amorim; NOBRE, Carlos Afonso. Mapping characteristics of at-risk population to disasters in the context of Brazilian early warning system. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [S. l.], v. 41, p. 101326, 2019. DOI: 10.1016/j.ijdrr.2019.101326.

AMARAL JUNIOR, A. F. **Mapeamento geotécnico aplicado a análise de processos de movimentos de massa gravitacionais: Costa Verde - RJ - escala 1:10.000**. 2007. São Carlos, 2007.

ASSIS DIAS, Mariane Carvalho De et al. Estimation of exposed population to landslides and floods risk areas in Brazil, on an intra-urban scale. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [S. l.], v. 31, p. 449–459, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.06.002>.

ASSIS DIAS, Mariane Carvalho De; SAITO, Silvia Midori; ALVALÁ, Regina Célia dos Santos; SELUCHI, Marcelo Enrique; BERNARDES, Tiago; CAMARINHA, Pedro Ivo Mioni; STENNER, Cláudio; NOBRE, Carlos Afonso. Vulnerability index related to populations at-risk for landslides in the Brazilian Early Warning System (BEWS). **International Journal of**

Disaster Risk Reduction, [S. l.], v. 49, p. 101742, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101742>.

AUGUSTO FILHO, Oswaldo. O estudo das corridas de massa em regiões serranas tropicais: um exemplo de aplicação no município de Ubatuba, SP. *In*: CONGR. BRAS. GEOL. ENG 1993, Poços de Caldas. **Anais [...]**. Poços de Caldas: ABGE, 1993. p. 63–70.

AVELAR, André S.; NETTO, Ana L. Coelho; LACERDA, Willy A.; BECKER, Leonardo B.; MENDONÇA, Marcos B. Mechanisms of the Recent Catastrophic Landslides in the Mountainous Range of Rio de Janeiro, Brazil. [S. l.], p. 265–270, 2013. DOI: 10.1007/978-3-642-31337-0_34.

ÁVILA, Frederico F.; ALVALÁ, Regina C.; MENDES, Rodolfo M.; AMORE, Diogo 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**, [S. l.], v. 105, n. 1, p. 1139–1161, 2021. DOI: 10.1007/s11069-020-04324-x.

BARATA, F. E. .. P. Landslides in the tropical region of Rio de Janeiro. *In*: PROCEEDINGS OF THE SEVENTH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING 1969, Mexico. **Anais [...]**. Mexico p. 507–516.

BATISTA, José A. N.; JULIEN, Pierre Y. Remotely sensed survey of landslide clusters: Case study of Itaoca, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [S. l.], v. 92, p. 145–150, 2019. DOI: 10.1016/j.jsames.2019.02.021.

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. **U.S. Geological Survey Open-File Report**, [S. l.], n. 2008–1159, p. 75, 2002. DOI: Open-File Report 2008–1159.

BAUM, Rex L. et al. Regional landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA. **Landslides**, [S. l.], v. 2, n. 4, p. 266–279, 2005. DOI: 10.1007/s10346-005-0023-y.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, [S. l.], v. 24, n. 1, p. 43–69, 1979. DOI: 10.1080/02626667909491834.

BIERMAN, Paul R.; CAFFEE, Marc. Slow Rates of Rock Surface Erosion and Sediment Production across the Namib Desert and Escarpment, Southern Africa. **American Journal of Science**, [S. l.], v. 301, n. 4–5, p. 326–358, 2001. DOI: 10.2475/ajs.301.4-5.326.

BIRKMANN, J. et al. Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 67, n. 2, p. 193–211, 2013. DOI: 10.1007/s11069-013-0558-5.

BISPO, Carlos de Oliveira; LISTO, Fabrizio De Luiz Rosito; DA SILVA, Danielle Gomes. Previsão de escorregamentos rasos a partir do modelo SHALSTAB na borda oriental da Chapada do Araripe. **Revista De Geografia**, [S. l.], v. 35, n. 4 (especial XII SINAGEO), p. 219–230, 2018.

BITAR, O. W.; CAMPOS, S. J. A. M.; MONTEIRO, A. C. M. C.; ARGENTIN, P;M; CORSI, A.; PAULON, N. Mapeamento De Áreas Suscetíveis A Movimentos Gravitacionais De Massa E Inundações Na Região Da Macrometrópole Paulista. **Revista Brasileira De Geologia De Engenharia E Ambiental**, [S. l.], v. 11, p. 29–49, 2021.

BONINI, J. E. **Comparação entre modelos heurísticos e estatísticos: Avaliação de fragilidade ambiental a escorregamentos rasos**. 2019. São Paulo, 2019.

BONINI, José Eduardo. **Fragilidade ambiental a escorregamentos rasos: análise comparativa entre modelos de bases heurística e estatística**. 2020. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. DOI: 10.11606/D.8.2020.tde-16032021-114011.

BONINI, José Eduardo; BATEIRA, Carlos Valdir de Meneses; DIAS, Vivian Cristina; MARTINS, Tiago Damas; VIEIRA, Bianca Carvalho. Suscetibilidade a escorregamentos rasos a partir de parâmetros morfométricos e dos modelos SHALSTAB e do Valor Informativo. **Confins**, [S. l.], n. 46, 2020. a. DOI: 10.4000/confins.30323.

BONINI, José Eduardo; BATEIRA, Carlos Valdir de Meneses; DIAS, Vivian Cristina; MARTINS, Tiago Damas; VIEIRA, Bianca Carvalho. Suscetibilidade a escorregamentos rasos a partir de parâmetros morfométricos e dos modelos SHALSTAB e do Valor Informativo. **Confins**, [S. l.], n. 46, 2020. b. DOI: 10.4000/confins.30323.

BONINI, José Eduardo; ROS, Jurandy Luciano Sanches; BATEIRA, Carlos Valdir M.; MARTINS, Tiago Damas; VIEIRA, Bianca Carvalho. Influência dos dados de elevação no mapeamento de instabilidade de vertentes. In: PINHEIRO L.S.; GORAYEB, A. (org.). **Geografia Física e as Mudanças Globais**. Fortaleza, Brasil: Editora UFC, 2019. p. 1–13.

BONINI, José Eduardo; ROSS, J. S.; MARTINS, T. D.; VIEIRA, B. C. Escorregamentos rasos em São Luiz do Paraitinga (SP, Brasil) (2009-2010). **Physis Terrae - Revista Ibero-Americana de Geografia Física e Ambiente**, [S. l.], v. 2, n. 2, p. 85–99, 2020. c. DOI: <https://doi.org/10.21814/physisterrae.3076>.

BONINI, José Eduardo; VIEIRA, Bianca Carvalho; MARTINS, Tiago Damas. Semiautomatic inventory and geomorphological characterization of mass movements using high-resolution images and open source software in the Ribeira de Iguape Valley, Brazil. [S. l.], [s.d.].

BORDONI, M.; MEISINA, C.; VALENTINO, R.; BITTELLI, M.; CHERSICH, S. Site-specific to local-scale shallow landslides triggering zones assessment using TRIGRS. **Natural Hazards and Earth System Science**, [S. l.], v. 15, n. 5, p. 1025–1050, 2015. DOI: 10.5194/nhess-15-1025-2015.

BRASIL. **Diretrizes gerais da política urbana e dá outras providência. LEI No 10.257, DE 10 DE JULHO DE 2001.** , 2001.

BRASIL. **Sistema Nacional de Defesa Civil, LEI N° 12.340, DE 1° DE DEZEMBRO DE 2010.** , 2010.

BRASIL. **Planejamento e Investimentos Estratégicos. Plano plurianual 2012-2015** . Brasília. 2011.

BRASIL. **Política Nacional de Proteção e Defesa Civil -LEI Nº 12.608, DE 10 DE ABRIL DE 2012.** , 2012.

BRASIL. DECRETO Nº 10.593, de 24 dezembro de 2020. 2020.

BRASIL. Decreto Nº 10.773, de 23 de agosto de 20212021.

BROLLO, Maria José; SANTORO, Jair; PENTEADO, Denise Rossini; DA SILVA, Paulo César Fernandes; RIBEIRO, Rogério Rodrigues. Itaoca (SP): Histórico de acidentes e desastres relacionados a perigos geológicos. *In: GEOSUDESTE 2015 2015, Anais [...].* [s.l: s.n.]

BROLLO, Maria José; TOMINAGA, Lídia Keiko; ROSSINI-PENTEADO, Denise; AMARAL, Rosângela Do; RIBEIRO, Rogerio Rodrigues; GUEDES, Antônio Carlos Moretti. Desastres Naturais e Riscos em São Luis do Paraitinga (SP). *In: 7º SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA 2010, Maringá. Anais [...].* Maringá

BRUGGER, P. J.; EHRlich, M.; LACERDA, W. A. Movements, piezometric level and rainfall at two natural slopes. *In: 2A CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS- COBRAE & 2ND PAN AMERICAN SYMPOSIUM ON LANDSLIDES 1997, Rio de Janeiro. Anais [...].* Rio de Janeiro p. 13–20.

CABRAL, Victor Carvalho; REIS, Fábio Augusto Gomes Vieira; MENDOZA, Carolina Martinez; OLIVEIRA, Alan. Model-based assessment of shallow landslides susceptibility at a petrochemical site in Brazil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 23, n. 2, p. 1394–1419, 2022. DOI: 10.20502/rbg.v23i2.2084.

CAMAPUM, , José C.; GITIRANA, Gilson. Unsaturated soils in the context of tropical soils. **Soils and Rocks**, [S. l.], v. 44, n. 3, p. 1–25, 2021. DOI: 10.28927/SR.2021.068121.

CAROU, Camila Bertaglia. **Mineralogia do Granito Itaóca e sua relação com a suscetibilidade a escorregamentos rasos da bacia do Rio Gurutuba.** 2019a. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019.

CAROU, Camila Bertaglia. **Mineralogia do Granito Itaocá e sua relação com a suscetibilidade a escorregamentos rasos da bacia do Rio Gurutuba.** 2019b. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. DOI: 10.11606/D.8.2019.tde-11122019-171423.

CAROU, Camila Bertaglia; VIEIRA, Bianca Carvalho; MARTINS, Tiago Damas; GRAMANI, Marcelo Fischer. Inventário dos Escorregamentos da Bacia do Rio Gurutuba , Vale do Ribeira (SP) Landslides Inventory of Gurutuba River Basin , Ribeira Valley (SP). **Revista do Departamento de Geografia**, [S. l.], v. Especial, p. 172–179, 2017. a. DOI: 10.11606/rdg.v0ispe.133377.

CAROU, Camila Bertaglia; VIEIRA, Bianca Carvalho; MARTINS, Tiago Damas; GRAMANI, Marcelo Fischer. Inventário dos Escorregamentos da Bacia do Rio Gurutuba, Vale do Ribeira (SP). **Geography Department University of Sao Paulo**, [S. l.], n. spe, p. 172, 2017. b. DOI: 10.11606/rdg.v0ispe.133377.

CARRARA, A.; GUZZETTI, F.; CARDINALI, M.; REICHENBACH, P. Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. **Nat Hazards**, [S. l.], 1999. DOI: 10.1023/A:1008097111310.

CARVALHO, C. S.; GALVÃO, T. Ação de Apoio à Prevenção e Erradicação Riscos em Assentamentos Precários. 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. 10–17.

CASCINI, Leonardo; CIURLEO, Mariantonietta; DI NOCERA, Silvio; GULLÀ, Giovanni. A new-old approach for shallow landslide analysis and susceptibility zoning in fine-grained weathered soils of southern Italy. **Geomorphology**, [S. l.], v. 241, p. 371–381, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.04.017>.

CERRI, L. E. S. Mapeamento de Riscos nos Municípios. 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. 44–55.

CERRI, L. E. S.; NOGUEIRA, F. R.; SANTOS, C. C.; MACEDO, E. S.; AUGUSTO FILHO, O. Mapeamento de risco em assentamentos precários no município de São Paulo (SP). **Geociências**, [S. l.], v. 26, n. 2, p. 143–150, 2007.

CERRI, RODRIGO; REIS, FÁBIO A. G. V; GRAMANI, M. F.; GIORDANO, L.; ZAINÉ, J. E. Landslides Zonation Hazard: relation between geological structures and landslides occurrence in hilly tropical regions of Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências [online]**, [S. l.], v. 89, n. 4, p. 2609–2623, 2017. DOI: 10.1590/0001-3765201720170224.

CHEN, Yueli; ZHAO, Linna; WANG, Ying; JIANG, Qingu; QI, Dan. Precipitation data and their uncertainty as input for rainfall-induced shallow landslide models. **Frontiers of Earth Science**, [S. l.], v. 13, n. 4, p. 695–704, 2019. DOI: 10.1007/s11707-019-0791-7.

CHORLEY, R. J. Models in Geomorphology. In: R. J. H. CHORLEY, P. (org.). **Models in Geomorphology**. Londres: Methuen & Co, 1967. p. 43–96.

CHUNG, C. F.; FABBRI, A. G. Probabilistic Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, [S. l.], v. 65, n. 12, p. 1389–1399, 1999. DOI: 10.1111/j.1743-6109.2008.01122.x.Endothelial.

CHUNG, Chang-Jo F.; FABBRI, Andrea G. Validation of Spatial Prediction Models for Landslide Hazard Mapping. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 451–472, 2003. DOI: 10.1023/B:NHAZ.0000007172.62651.2b.

CIURLEO, Mariantonietta; MANDAGLIO, Maria Clorinda; MORACI, Nicola. Landslide susceptibility assessment by TRIGRS in a frequently affected shallow instability area. **Landslides**, [S. l.], v. 16, n. 1, p. 175–188, 2019. DOI: 10.1007/s10346-018-1072-3.

CLEMENTINO, R. V; LACERDA, W. A. Estudos das propriedades geotécnicas de solos residuais não saturados de Ubatuba (SP). In: 1 COBRAE 1992, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABMS/ABGE, 1992.

COELHO NETTO, A. L.; SATO, A. M.; ARAÚJO, I. S.; A, De Souza Avelar; FERREIRA, D. L. C.; LIMA, P. H.; SILVA, A. P. A.; SILVA, R. P.; VIANNA, L. G. G. January 2011: the extreme landslide disaster in Brazil. *In: PROCEEDINGS OF THE SECOND WORLD LANDSLIDE FORUM 2011, Anais [...].* [s.l: s.n.]

COELHO, R. D.; GOMES, M. C. V; GRAMANI, Marcelo Fischer; VIEIRA, B. C. Relationship between soil physical properties and landslides in Serra do Mar mountain range, Brazil. *In: SCG-XIII INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LANDSLIDES 2020, Cartagena. Anais [...].* Cartagena

COELHO, Rebeca Durço. **Caracterização das propriedades físicas do solo e a instabilidade das encostas na Serra do Mar (Itaóca - SP).** 2020. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2020. DOI: 10.11606/D.8.2020.tde-29092020-183051.

COELHO, Rebeca Durço; GRAMANI, Marcelo Fischer; VIEIRA, Bianca Carvalho. Propriedades físicas do solo e a estabilidade das encostas na Serra do Mar, Sudeste do Brasil. **Revista do Departamento de Geografia, [S. l.],** v. 42, p. e188406, 2022. DOI: 10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2022.188406.

COHEN, Jacob. A coefficient of agreement for nominal scales. **Educational and Psychological Measurement, [S. l.],** v. 20, n. 1, p. 37–46, 1960.

COROMINAS, J. et al. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment, [S. l.],** 2013. DOI: 10.1007/s10064-013-0538-8.

COROMINAS, Jordi; COPONS, Ramon; VILAPLANA, Joan Manuel; ALTIMIR, Joan; AMIGÓ, Jordi. Integrated Landslide Susceptibility Analysis and Hazard Assessment in the Principality of Andorra. **Natural Hazards, [S. l.],** v. 30, n. 3, p. 421–435, 2003. DOI: 10.1023/B:NHAZ.0000007094.74878.d3.

COSTA NUNES, A. J. L. Landslides in soils of decomposed rock due to intense rainstorms. *In: 7TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING 1969, Mexico. Anais [...].* Mexico

COUTINHO, Roberto Quental; SILVA, Marilia Mary; SANTOS, Amabelli Nunes Dos; LACERDA, Willy Alvarenga. Geotechnical Characterization and Failure Mechanism of Landslide in Granite Residual Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, [S. l.],** v. 145, n. 8, p. 05019004, 2019. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002052.

CPRM. **Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais 1:25.000: nota técnica explicativa.**2014a

CPRM. **Carta de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações - Município de São Luís do Paraitinga/SP Escala 1:50.000.** [s.l.] : CPRM IPT, 2014. b.

CROVELLI, R. A. **Probability models for estimation of number and costs of landslides.** [s.l.] : U.S. Geological Survey Open File Report OO-249, 23 p, 2000.

CROZIER, M. J. Landslide geomorphology: An argument for recognition, with examples from New Zealand. **Geomorphology**, [S. l.], v. 120, n. 1–2, p. 3–15, 2010. DOI: 10.1016/j.geomorph.2009.09.010.

CRUZ, Olga. **A Serra do Mar e o litoral na área de Caraguatatuba – SP. Contribuição à geomorfologia litorânea tropical**. 1974. [S. l.], 1974.

CRUZ, Olga. Contribuição geomorfológica ao estudo de escarpas da Serra do Mar. **Revista do IG**, [S. l.], v. 11, p. 9–20, 1990. DOI: 10.5935/0100-929X.19900002.

CUOMO, Sabatino; IERVOLINO, Aniello. Investigating the role of stratigraphy in large-area physically-based analysis of December 1999 Cervinara shallow landslides. **Journal of Mountain Science**, [S. l.], v. 13, n. 1, p. 104–115, 2016. DOI: 10.1007/s11629-014-3261-4.

CUTTER, Susan L.; BORUFF, Bryan J.; SHIRLEY, W. Lynn. Social Vulnerability to Environmental Hazards *. **Social Science Quarterly**, [S. l.], v. 84, n. 2, p. 242–261, 2003. DOI: 10.1111/1540-6237.8402002.

DALL’OSSO, F.; DOMINEY-HOWES, D.; TARBOTTON, C.; SUMMERHAYES, S.; WITHYCOMBE, G. Revision and improvement of the PTVA-3 model for assessing tsunami building vulnerability using “international expert judgment”: introducing the PTVA-4 model. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 83, n. 2, p. 1229–1256, 2016. DOI: 10.1007/s11069-016-2387-9.

DALL’OSSO, F.; GONELLA, M.; GABBIANELLI, G.; WITHYCOMBE, G.; DOMINEY-HOWES, D. A revised (PTVA) model for assessing the vulnerability of buildings to tsunami damage. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 9, n. 5, p. 1557–1565, 2009. DOI: 10.5194/nhess-9-1557-2009.

DALL’OSSO, F.; MARAMAI, A.; GRAZIANI, L.; BRIZUELA, B.; CAVALLETTI, A.; GONELLA, M.; TINTI, S. Applying and validating the PTVA-3 Model at the Aeolian Islands, Italy: assessment of the vulnerability of buildings to tsunamis. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, [S. l.], v. 10, n. 7, p. 1547–1562, 2010. DOI: 10.5194/nhess-10-1547-2010.

DE ALMEIDA, Lutiane Queiroz; WELLE, Torsten; BIRKMANN, Jörn. Disaster risk indicators in Brazil: A proposal based on the world risk index. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [S. l.], v. 17, p. 251–272, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2016.04.007>.

DE LOYOLA HUMMELL, Beatriz Maria; CUTTER, Susan L.; EMRICH, Christopher T. Social Vulnerability to Natural Hazards in Brazil. **International Journal of Disaster Risk Science**, [S. l.], v. 7, n. 2, p. 111–122, 2016. DOI: 10.1007/s13753-016-0090-9.

DE PLOEY, J.; CRUZ, O. Landslides in the Serra do Mar, Brazil. **Catena**, [S. l.], v. 6, n. 2, p. 111–122, 1979. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0341-8162\(79\)90001-8](http://dx.doi.org/10.1016/0341-8162(79)90001-8).

DE SOUSA, Sinara Gomes; DA SILVA, Maria Luísa Gomes; PEREIRA, Thaís Mara Souza; BARBOSA, Manuella Pontes; LISTO, Fabrizio de Luiz Rosito. Suscetibilidade a Escorregamentos E Risco De Queda De Blocos No Geossítio Colina Do Horto, Juazeiro Do

Norte/Ce. **Estudos Geográficos: Revista Eletrônica de Geografia**, [S. l.], v. 16, n. 2, p. 194–212, 2018. DOI: 10.5016/estgeo.v16i2.13313.

DE VOS, J. C.; VAN DE VEN, A. A. F. Multicriteria evaluation for urban and regional planning. **Journal of Engineering Mathematics**, [S. l.], v. 32, n. 4, p. 281–304, 1997. DOI: 10.1023/A:1004203009192.

DEBORTOLI, Nathan S.; CAMARINHA, Pedro Ivo M.; MARENGO, José A.; RODRIGUES, Regina R. An index of Brazil's vulnerability to expected increases in natural flash flooding and landslide disasters in the context of climate change. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 86, n. 2, p. 557–582, 2017. DOI: 10.1007/s11069-016-2705-2.

DIAS, Helen Cristina. **Modelagem da suscetibilidade a escorregamentos rasos com base em análises estatísticas**. 2019. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2019. DOI: 10.11606/D.8.2019.tde-28082019-145944.

DIAS, Helen Cristina; BATEIRA, Carlos; PISSATO, Edilson; MARTINS, Tiago D.; VIEIRA, Bianca Carvalho. Avaliação da Suscetibilidade a Escorregamentos Rasos com Base na Aplicação de Estatística Bivariada: Resultados Preliminares. **Geography Department University of Sao Paulo**, [S. l.], p. 34–42, 2018. DOI: 10.11606/rdg.v0ispe.144537.

DIAS, Helen Cristina; GRAMANI, Marcelo Fischer; GROHMANN, Carlos Henrique; BATEIRA, Carlos; VIEIRA, Bianca Carvalho. Statistical-based shallow landslide susceptibility assessment for a tropical environment: a case study in the southeastern Brazilian coast. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 108, n. 1, p. 205–223, 2021. DOI: 10.1007/s11069-021-04676-y.

DIAS, Vivian Cristina. **Análise da influência dos parâmetros morfológicos e morfométricos na geração de corridas de detritos em Caraguatatuba (SP)**. 2014. Trabalho de Graduação Individual - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

DIAS, Vivian Cristina. **Corridas de detritos na Serra do Mar Paulista: parâmetros morfológicos e índice de potencial de magnitude e suscetibilidade**. 2018. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2018. DOI: 10.11606/D.8.2018.tde-02022018-120009.

DIAS, Vivian Cristina. **Parâmetros morfométricos e corridas de detritos: índice de suscetibilidade e magnitude para bacias hidrográficas na Serra do Mar**. 2021. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. DOI: 10.11606/T.8.2021.tde-03012022-154951.

DIAS, Vivian Cristina; MCDOUGALL, Scott; VIEIRA, Bianca Carvalho. Geomorphic analyses of two recent debris flows in Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, [S. l.], v. 113, p. 103675, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103675>.

DIAS, Vivian Cristina; MITCHELL, Andrew; VIEIRA, Bianca Carvalho; MCDOUGALL, Scott. Morphometric analysis of debris flow in tropical and temperate environments: field observations and geomorphologic characteristics in Serra do Mar, Brazil and British Columbia, Canada. **Brazilian Journal of Geology**, [S. l.], 2022.

DIAS, Vivian Cristina; VIEIRA, B. C.; GRAMANI, M. G. Morphometric and morphological parameters as indicators of the magnitude of debris flow in Serra do Mar Paulista. **Confins-Revue Franco-Bresilienne De Geographie-Revista Franco-Brasileira De Geografia**, [S. l.], v. 29, 2016. a. DOI: 10.4000/confins.11444.

DIAS, Vivian Cristina; VIEIRA, Bianca Carvalho. Parâmetros morfométricos e corridas de detritos: índice de suscetibilidade e de magnitude para bacias hidrográficas na Serra do Mar. **Geosp**, [S. l.], 2022.

DIAS, Vivian Cristina; VIEIRA, Bianca Carvalho; GRAMANI, Marcelo Fischer. Parâmetros morfológicos e morfométricos como indicadores da magnitude das corridas de detritos na Serra do Mar Paulista. **Confins**, [S. l.], n. 29, 2016. b. DOI: 10.4000/confins.11444.

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

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

DIETRICH, William E.; REISS, Robert; HSU, Mei-Ling; MONTGOMERY, David R. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data. **Hydrological Processes**, [S. l.], v. 9, n. 3–4, p. 383–400, 1995. DOI: 10.1002/hyp.3360090311.

DIETRICH, William E.; WILSON, Cathy J.; MONTGOMERY, David R.; MCKEAN, James. Analysis of Erosion Thresholds, Channel Networks, and Landscape Morphology Using a Digital Terrain Model. **The Journal of Geology**, [S. l.], v. 101, n. 2, p. 259–278, 1993.

DIKSHIT, Abhirup; SATYAM, Neelima; PRADHAN, Biswajeet. Estimation of Rainfall-Induced Landslides Using the TRIGRS Model. **Earth Systems and Environment**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 575–584, 2019. DOI: 10.1007/s41748-019-00125-w.

DOURADO, F.; ARRAES, T. C.; SILVA, M. F. O Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro – as Causas do Evento, os Mecanismos dos Movimentos de Massa e a Distribuição Espacial dos Investimentos de Reconstrução no Pós-Desastre. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, [S. l.], v. 35_2, n. 1, p. 43–54, 2013. DOI: 10.11137/2012_2_43_54.

EFFGEN, Julia Frederica; ROCHA, Pablo de Azevedo; PIRES, Patrício José Moreira; MARCHIORO, Eberval. Parametrização geotécnica para modelagem de suscetibilidade a escorregamentos translacionais em Fradinhos, Vitória-ES. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 32, p. 711–727, 2020. DOI: 10.14393/SN-v32-2020-52656.

EHRlich, Mauricio; DA COSTA, Douglas Pereira; SILVA, Rafael Cerqueira. Behavior of a colluvial slope located in Southeastern Brazil. **Landslides**, [S. l.], v. 15, n. 8, p. 1595–1613, 2018. DOI: 10.1007/s10346-018-0964-6.

EIRADO, Luiz Guilherme; HEILBRON, M.; ALMEIDA, J. C. H. Os terrenos tectônicos da faixa ribeira na serra da bocaina e na baía da Ilha Grande, sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geociências**, [S. l.], p. 426–436, 2006.

FALEIROS, F. M. **Evolução de terrenos tectono-metamórficos da Serrania do Ribeira e Planalto Alto Turvo (SP, PR)**. 2008. São Paulo, 2008.

FALEIROS, F. M. ;; MORAIS, S. M. ;; COSTA, V. S. **Geologia e recursos minerais da Folha Apiáí – SG.22-X-B-V, Estados de São Paulo e Paraná, Escala 1:100.000**. [s.l: s.n.].

FARIA, Ana; BATEIRA, Carlos Valdir de Meneses; OLIVEIRA, Sofia; FERNANDES, Joana; MARQUES, Fernando. Avaliação de Suscetibilidade a Movimentos de Vertente em Terraços Agrícolas pela Aplicação de Modelos Matemáticos de Base Física. **Geography Department University of Sao Paulo**, [S. l.], v. 33, p. 1, 2017. DOI: 10.11606/rdg.v33i0.122883.

FARIA, R. L.; Z Aidan, R. T. Zoneamento da Suscetibilidade à Ocorrência de Escorregamentos na Bacia Hidrográfica do Córrego do Yung, Juiz de Fora. **Revista Geonorte**, [S. l.], v. 10, p. 329–334, 2014.

FAWCETT, Tom. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**, [S. l.], v. 27, n. 8, p. 861–874, 2006. a. DOI: 10.1016/j.patrec.2005.10.010.

FAWCETT, Tom. An introduction to ROC analysis. **Pattern Recognition Letters**, [S. l.], v. 27, n. 8, p. 861–874, 2006. b. DOI: 10.1016/j.patrec.2005.10.010.

FELL, Robin; COROMINAS, Jordi; BONNARD, Christophe; CASCINI, Leonardo; LEROI, Eric; SAVAGE, William Z. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land use planning. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 102, n. 3, p. 85–98, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.022>.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 2, p. 51–71, 2001.

FERNANDES, N.; GUIMARÃES, Renato F.; GOMES, Roberto A. T.; VIEIRA, Bianca C.; MONTGOMERY, David R.; GREENBERG, Harvey. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. **CATENA**, [S. l.], v. 55, n. 2, p. 163–181, 2004. DOI: 10.1016/s0341-8162(03)00115-2.

FERNANDES, Nelson Ferreira. Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios. **Espaço Aberto**, [S. l.], v. 6, n. 1, p. 209–247, 2016. DOI: 10.36403/espacoaberto.2016.5243.

FERREIRA, C. J.; BROLLO, M. J.; PICANÇO, J. L.; SILVA, M. C.; GUIMARÃES, B. M. Debris flow hazard and susceptibility zonation in Itaoca municipality, São Paulo state, Brazil. [S. l.], n. January 2014, p. 893–900, 2016. DOI: 10.1201/b21520-105.

FERREIRA, C. J.; ROSSINI-PENTEADO, D.; BROLLO, M. J.; PICANÇO, J. L.; DA SILVA, M. C.; GUIMARÃES, B. M. Debris flow hazard and susceptibility zonation in small watersheds in Itaoca municipality, São Paulo state, Brazil. *In: Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice*. [s.l.] : CRC Press, 2018. p. 893–900. DOI: 10.1201/9781315375007-95.

FERREIRA, Fabiana Souza. **Análise da influência das propriedades físicas do solo na deflagração dos escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP)**. 2013. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. DOI: 10.11606/D.8.2013.tde-27032013-092838.

FREITAS, L. E.; SILVA, Raiza Fernandes; COELHO NETTO, Ana Luiza. Post-catastrophic Disaster Induced Laws for Climatic Change Adaptation: A Case Study in SE-Brazil. *In: [s.l.: s.n.]*. p. 197–212. DOI: 10.1007/978-3-030-37425-9_10.

FUCHS, Sven; KUHLCHE, Christian; MEYER, Volker. Editorial for the special issue: vulnerability to natural hazards—the challenge of integration. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 58, n. 2, p. 609–619, 2011. DOI: 10.1007/s11069-011-9825-5.

FÚLFARO, V. J.; PONÇANO, W. L.; BISTRICHI, C. A.; STEIN, D. P. Escorregamentos de Caraguatatuba: expressão atual, e registro na coluna sedimentar da planície costeira adjacente. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA 1976, Anais [...]*. [s.l.: s.n.] p. 341–350.

FURIAN, Sônia; BARBIÉRO, Laurent; BOULET, René. Organisation of the soil mantle in tropical southeastern Brazil (Serra do Mar) in relation to landslides processes. **CATENA**, [S. l.], v. 38, n. 1, p. 65–83, 1999. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0341-8162\(99\)00015-6](https://doi.org/10.1016/S0341-8162(99)00015-6).

GLASSEY, Phil; BARRELL, David; FORSYTH, Jane; MACLEOD, Rod. The geology of Dunedin, New Zealand, and the management of geological hazards. **Quaternary International**, [S. l.], v. 103, n. 1, p. 23–40, 2003. DOI: 10.1016/s1040-6182(02)00139-8.

GODT, Jonathan W.; BAUM, Rex L.; CHLEBORAD, Alan F. Rainfall characteristics for shallow landsliding in Seattle, Washington, USA. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S. l.], v. 31, n. 1, p. 97–110, 2006. DOI: 10.1002/esp.1237.

GOETZ, Jason N.; GUTHRIE, Richard H.; BRENNING, Alexander. Integrating physical and empirical landslide susceptibility models using generalized additive models. **Geomorphology**, [S. l.], v. 129, n. 3–4, p. 376–386, 2011. DOI: 10.1016/j.geomorph.2011.03.001.

GOMES, Guilherme J. C.; VRUGT, Jasper A.; VARGAS, Eurípedes A.; CAMARGO, Julia T.; VELLOSO, Raquel Q.; VAN GENUCHTEN, Martinus Th. The role of uncertainty in bedrock depth and hydraulic properties on the stability of a variably-saturated slope. **Computers and Geotechnics**, [S. l.], v. 88, p. 222–241, 2017. DOI: 10.1016/J.COMPGE0.2017.03.016. Acesso em: 27 abr. 2022.

GOMES, Maria Carolina Villaça. **Análise da influência da condutividade hidráulica saturada dos solos nos escorregamentos rasos na bacia do rio Guaxinduba (SP)**. 2012. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2012. DOI: 10.11606/D.8.2012.tde-09112012-123744.

GOMES, Maria Carolina Villaça. **Corridas de detritos e as taxas de denudação a longo-termo da Serra do Mar/SP**. 2017. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. DOI: 10.11606/T.8.2017.tde-24022017-145209.

GOMES, Maria Carolina Villaça; DIAS, Vivian Cristina; VIEIRA, Bianca Carvalho. Magnitude de corridas de detritos na Serra do Mar (SP): avaliação de diferentes métodos de classificação. **Boletim Paulista de Geografia**, [S. l.], v. 96, p. 51–65, 2017.

GOMES, Maria Carolina Villaça; VIEIRA, Bianca Carvalho. Perfis de condutividade hidráulica saturada dos solos da Serra do Mar (SP): comportamento hidrológico e a ocorrência de escorregamentos rasos. *In*: 9º SINAGEO - SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA 2012, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro

GOMES, Maria Carolina Villaça; VIEIRA, Bianca Carvalho. Saturated hydraulic conductivity of soils in a shallow landslide area in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Zeitschrift für Geomorphologie**, [S. l.], v. 60, n. 1, p. 53–65, 2016. DOI: 10.1127/zfg/2016/0229.

GOMES, Maria Carolina Villaça; VIEIRA, Bianca Carvalho; SALGADO, André Augusto Rodrigues; BRAUCHER, Régis. Debris flow and long-term denudation rates in a tropical passive margin escarpment in South America. **Geomorphology**, [S. l.], p. 108333, 2022. DOI: 10.1016/J.GEOMORPH.2022.108333.

GOMES, R. A.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; FERNANDES, N. F. Análise de um Modelo de Previsão de Deslizamentos (SHALSTAB) em Diferentes Escalas Cartográficas. **Solos e Rochas**, [S. l.], v. 1, p. 85–97, 2005.

GOMES, R.; GUIMARÃES, R.; DE CARVALHO, Osmar; FERNANDES, Nelson; DO AMARAL, Eurípedes. Combining Spatial Models for Shallow Landslides and Debris-Flows Prediction. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 5, n. 5, p. 2219–2237, 2013. a. DOI: 10.3390/rs5052219.

GOMES, R.; GUIMARÃES, Renato Fontes; DE CARVALHO JÚNIOR, Osmar Abílio; FERNANDES, Nelson Ferreira; DO AMARAL JÚNIOR, Eurípedes Vargas. Combining spatial models for shallow landslides and debris-flows prediction. **Remote Sensing**, [S. l.], v. 5, n. 5, p. 2219–2237, 2013. b. DOI: 10.3390/rs5052219.

GONTIJO-PASCUTTI, A. H.; HASUI, Y.; SANTOS, M.; SOARES JUNIOR, A. V.; SOUZA, I. A. As Serras do Mar e da Mantiqueira. *In*: HASUI, Yociteru; CARNEIRO, C. D. R.; ALMEIDA, F. F. M.; BARTORELLI, A. (org.). **Geologia do Brasil**. São Paulo. p. 549–571.

GUILLARD-GONÇALVES, Clémence; ZÊZERE, José. Combining Social Vulnerability and Physical Vulnerability to Analyse Landslide Risk at the Municipal Scale. **Geosciences**, [S. l.], v. 8, n. 8, p. 294, 2018. DOI: 10.3390/geosciences8080294.

GUIMARÃES, R. F. **Utilização de um modelo de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos com controle topográfico: adequação e calibração em duas bacias de drenagem**. 2000. Doutorado - UFRJ, Rio de Janeiro, 2000.

GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; OLIVEIRA, S. N.; FERNANDES, N. F. Análise temporal das áreas susceptíveis a escorregamentos rasos no Parque Nacional da Serra dos Órgãos (RJ) a partir de dados pluviométricos. **Revista Brasileira de Geociências**, [S. l.], v. 39, p. 192–200, 2009.

GUIMARAES, R. F.; RAMOS, V. M.; REDIVO, A. L.; GOMES, R. A. T.; FERNANDES, N. F.; DE CARVALHO, O. A. Application of the SHALSTAB model for mapping susceptible landslide areas in mine zone (Quadrilátero Ferrífero in southeast Brazil). *In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM 2003*, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 2444–2446. DOI: 10.1109/igarss.2003.1294470.

GUIMARÃES, Renato Fontes; MONTGOMERY, David R; GREENBERG, Harvey M; FERNANDES, Nelson Ferreira; TRANCOSO GOMES, Roberto Arnaldo;; DE CARVALHO, Osmar Abílio. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 69, n. 1–2, p. 99–108, 2003. a. DOI: 10.1016/s0013-7952(02)00263-6.

GUIMARÃES, Renato Fontes; MONTGOMERY, David R; GREENBERG, Harvey M; FERNANDES, Nelson Ferreira; TRANCOSO GOMES, Roberto Arnaldo;; DE CARVALHO, Osmar Abílio. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 69, n. 1–2, p. 99–108, 2003. b. DOI: 10.1016/s0013-7952(02)00263-6.

GUIMARÃES, T. M. **Modelagem matemática acoplada de previsão do tempo e estabilidade de encostas para prognóstico de movimentos de massa** . 2019. Mestrado - Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2019.

GUZZETTI, Fausto. **Landslide Hazard and Risk Assessment**. 2005. Perugia, Italy, 2005.

GUZZETTI, Fausto; CARRARA, Alberto; CARDINALI, Mauro; REICHENBACH, Paola. Landslide hazard evaluation: A review of current techniques and their application in a multi-scale study, Central Italy. *In: GEOMORPHOLOGY 1999*, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 181–216. DOI: 10.1016/S0169-555X(99)00078-1.

GUZZETTI, Fausto; GARIANO, Stefano Luigi; PERUCCACCI, Silvia; BRUNETTI, Maria Teresa; MARCHESINI, Ivan; ROSSI, Mauro; MELILLO, Massimo. **Geographical landslide early warning systems**. **Earth-Science Reviews** Elsevier B.V., , 2020. DOI: 10.1016/j.earscirev.2019.102973.

HASUI, Y. et al. **Geologia da Região Administrativa 3 (Vale do Paraíba) e parte da Região Administrativa 2 (Litoral) do Estado de São Paulo**. [s.l.] : Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A - IPT, 1978. a.

HASUI, Y. et al. **Geologia da Folha de São José dos Campos - SP, SF-23-Y-D-II**. [s.l.] : Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S/A, 1978. b.

HEILBRON, Monica; PEDROSA-SOARES, A. C.; CAMPOS NETO, Mario da Costa; SILVA, Luis Carlos Da; TROUW, Rudolph Allard Johannes; JANASI, Valdecir de Assis.

Província Mantiqueira. *In: Geologia do continente sul-americano: : evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida.* [s.l.] : Beca, 2004.

HORTA, Isabela Taici Lopes Gonçalves. **Análise de impactos pluviais em São Luiz do Paraitinga - SP/Brasil.** 2018. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018. DOI: 10.11606/D.18.2018.tde-09022018-153002.

HUNGR, Oldrich; EVANS, S. G.; BOVIS, M. J.; HUTCHINSON, J. N. A review of the classification of landslides of the flow type. **Environmental and Engineering Geoscience**, [S. l.], v. 7, n. 3, p. 221–238, 2001. DOI: 10.2113/gsegeosci.7.3.221.

IBGE. **Censo Demográfico de 2010.** Rio de Janeiro. 2012.

IBGE. **População em áreas de risco no Brasil .** Rio de Janeiro. 91f. 2018

IG. **Relatório Da Operação Dos Planos Preventivos De Defesa Civil – PPDC Operação Verão 2016-2017.** São Paulo. 2017

IPT. **Instabilidade das encostas da Serra do Mar voltadas ao parque industrial de Cubatão (SP): diagnose, soluções e ações de emergência.** São Paulo. 1986

IVERSON, Richard M. Landslide triggering by rain infiltration. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 36, n. 7, p. 1897, 2000. DOI: 10.1029/2000WR900090.

IVERSON, Richard M.; REID, Mark E.; LAHUSEN, Richard G. Debris-Flow Mobilization from Landslides. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, [S. l.], v. 25, n. 1, p. 85–138, 1997. DOI: 10.1146/annurev.earth.25.1.85.

JADE, Sridevi; SARKAR, S. Statistical models for slope instability classification. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 36, n. 1–2, p. 91–98, 1993. DOI: 10.1016/0013-7952(93)90021-4.

JAKOB, M. **Morphometric and Geotechnical Controls on Debris Flow Frequency and Magnitude in Southwestern British Columbia.** 1996. [S. l.], 1996.

JAKOB, M. A real time debris flow forecasting system for North Vancouver, British Columbia. [S. l.], 2009.

JAKOB, Matthias. Debris-flow hazard analysis. *In: Debris-flow Hazards and Related Phenomena.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2005. p. 411–443. DOI: 10.1007/3-540-27129-5_17.

JOHNSON, Peggy A.; MCCUEN, Richard H.; HROMADKA, Theodore V. Magnitude and frequency of debris flows. **Journal of Hydrology**, [S. l.], v. 123, n. 1–2, p. 69–82, 1991. DOI: 10.1016/0022-1694(91)90069-T. Acesso em: 17 abr. 2022.

JONES, Fred O. Landslides of Rio de Janeiro and the Serra das Araras escarpment, Brazil. [S. l.], 1973. DOI: 10.3133/pp697.

KANJI, Milton A.; CRUZ, Paulo T.; MASSAD, Façal. Debris flow affecting the Cubatão Oil Refinery, Brazil. **Landslides**, [S. l.], v. 5, n. 1, p. 71–82, 2008. DOI: 10.1007/s10346-007-0110-3.

KANJI, Milton Assis; GRAMANI, Marcelo Fischer. Metodologia para determinação da vulnerabilidade a corridas de detritos em pequenas bacias hidráulicas. *In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS 2001*, **Anais [...]**. : ABMS, 2001.

KIENBERGER, S.; LANG, S.; ZEIL, P. Spatial vulnerability units – expert-based spatial modelling of socio-economic vulnerability in the Salzach catchment, Austria. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 9, n. 3, p. 767–778, 2009. DOI: 10.5194/nhess-9-767-2009.

KIM, Min Seok; ONDA, Yuichi; UCHIDA, Taro; KIM, Jin Kwan. Effects of soil depth and subsurface flow along the subsurface topography on shallow landslide predictions at the site of a small granitic hillslope. **Geomorphology**, [S. l.], v. 271, p. 40–54, 2016. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.07.031.

KÖNIG, Téhrrie; KUX, Hermann J. H.; MENDES, Rodolfo M. Shalstab mathematical model and WorldView-2 satellite images to identification of landslide-susceptible areas. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 97, n. 3, p. 1127–1149, 2019. DOI: 10.1007/s11069-019-03691-4.

LEMONS, P. F. I.; DAMANGE, L. H. M. I. Aspectos Jurídicos da Gestão de Desastres. *In: COORDENADORIA ESTADUAL DE DEFESA CIVIL (org.)*. **Redução de Risco de Desastres: uma construção de resiliência local**. São Paulo. p. 27–41.

LIAO, Zonghu; HONG, Yang; KIRSCHBAUM, Dalia; ADLER, Robert F.; GOURLEY, Jonathan J.; WOOTEN, Rick. Evaluation of TRIGRS (transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis)’s predictive skill for hurricane-triggered landslides: a case study in Macon County, North Carolina. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 58, n. 1, p. 325–339, 2011. DOI: 10.1007/s11069-010-9670-y.

LISTO, Fabrizio De Luiz Rosito; GOMES, Maria Carolina Villaça; VIEIRA, Bianca Carvalho. Avaliação da variação do fator de segurança com o modelo TRIGRS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 19, n. 1, 2018. DOI: 10.20502/rbg.v19i1.1256.

LISTO, Fabrizio de Luiz Rosito; VIEIRA, Bianca Carvalho. Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil. **Geomorphology**, [S. l.], v. 169–170, p. 30–44, 2012. b. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.01.010>.

LISTO, Fabrizio De Luiz Rosito; VIEIRA, Bianca Carvalho. Influência de parâmetros geotécnicos e hidrológicos na previsão de áreas instáveis a escorregamentos translacionais rasos utilizando o modelo TRIGRS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 16, n. 3, 2015. DOI: 10.20502/rbg.v16i3.665.

LOPES, E. S. S. **Modelagem espacial dinâmica aplicada ao estudo de movimentos de massa em uma região da serra do mar paulista, na escala de 1:10.000**. 2006. Doutorado - UNESP, Rio Claro, 2006.

LOPES, E. S. S.; RIEDEL, P. S.; BENTZ, C. M.; FERREIRA, M. V. Calibração e validação do índice de estabilidade de encostas com inventário de escorregamentos. **Geociências**, [S. l.], p. 83–95, 2007.

MACEDO, E. S.; OGURA, A. T.; SANTORO, J. O que é um Plano de Contingência ou 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. 76–91.

MANDAL, Sanjay Kumar; LUPKER, Maarten; BURG, Jean-Pierre; VALLA, Pierre G.; HAGHIPOUR, Negar; CHRISTL, Marcus. Spatial variability of 10 Be-derived erosion rates across the southern Peninsular Indian escarpment: A key to landscape evolution across passive margins. **Earth and Planetary Science Letters**, [S. l.], v. 425, p. 154–167, 2015. DOI: 10.1016/j.epsl.2015.05.050.

MARCHEZINI, V.; WISNER, B. Challenges for vulnerability reduction in Brazil: insights from the PAR framework. *In*: **Challenges for vulnerability reduction in Brazil: insights from the PAR framework. Reduction of vulnerability to disasters: from knowledge to action**. [s.l: s.n.]. p. 57–96.

MARCHIORI-FARIA, D. G.; SANTORO, J. Gerenciamento de Desastres Naturais. *In*: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (org.). **Desastres Naturais: Conhecer para Prevenir**. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. p. 161–177.

MARIN, Roberto J.; GARCÍA, Edwin F.; ARISTIZÁBAL, Edier. Assessing the Effectiveness of TRIGRS for Predicting Unstable Areas in a Tropical Mountain Basin (Colombian Andes). **Geotechnical and Geological Engineering**, [S. l.], v. 39, n. 3, p. 2329–2346, 2021. DOI: 10.1007/s10706-020-01630-w.

MARQUES, Maria Clara De Oliveira; COELHO NETTO, Ana Luiza; SATO, Anderson Mululo. Influência De Floresta Secundária E Gramínea Na Deflagração De Deslizamentos Translacionais Rasos Em Nova Friburgo, Rio De Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 19, n. 4, 2018. DOI: 10.20502/rbg.v19i4.1479.

MARTINS, T. D.; OKA-FIORI, Chisato; VIEIRA, Bianca Carvalho; BATEIRA, Carlos V. M.; MONTGOMERY, David R. Avaliação de MDT na modelagem de instabilidade de vertentes. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, [S. l.], v. 41, p. 7, 2017. a. DOI: 10.5380/raega.v41i0.47607.

MARTINS, T. D.; VIEIRA, Bianca Carvalho; FERNANDES, Nelson Ferreira; OKA-FIORI, Chisato; MONTGOMERY, David. Application of the SHALSTAB model for the identification of areas susceptible to landslides: Brazilian case studies. **Revista de Geomorfologie**, [S. l.], v. 19, p. 136–144, 2017. b. DOI: 10.21094/rg.2017.015.

MARTINS, T.; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R. Assessment of Lidar-derived DTMs for landslide susceptibility mapping: Application in the Brazilian subtropical forest. **Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice**, [S. l.], v. 3, p. 1389–1392, 2016. DOI: 10.1201/b21520-170.

MARTINS, Tiago D.; VIEIRA., Bianca Carvalho; BONINI., José Eduardo; BATEIRA, Carlos. Implicações da resolução do MDT na modelagem de instabilidade de vertentes. **Confins**, [S. l.], n. 47, 2020. DOI: 10.4000/confins.33083.

MASSAD, F.; CRUZ, P. T.; KANJI, M. A. E.; ARAUJO FILHO, H. A. Characteristics and Volume of Sediment Transported in Debris Flows in Serra do Mar, Cubatão, Brasil. *In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON DEBRIS FLOW DISASTER OF DECEMBER 1999 IN VENEZUELA 2000*, Caracas, Venezuela. **Anais [...]**. Caracas, Venezuela.

MATOS, Luzia de Jesus. **A vulnerabilidade das construções às corridas de detritos na bacia experimental do rio Guaxinduba - município de Caraguatatuba - SP**. 2014. São Paulo, 2014. DOI: 10.11606/D.8.2014.tde-24042015-115918.

MATOS, Luzia De Jesus; FERREIRA, Claudio José; BATEIRA, Carlos Valdir de Meneses; VIEIRA, Bianca Carvalho. Avaliação das Construções Danificadas por Corridas de Detritos e Inundações Bruscas no Vale do Ribeira (SP) em 2014. **Geography Department University of Sao Paulo**, [S. l.], p. 57–67, 2018. DOI: 10.11606/rdg.v0ispe.144423.

MATOS, Luzia de Jesus; VIEIRA, B. C.; FERREIRA, C. J. Avaliação da Vulnerabilidade das Construções às Corridas de Detritos por meio do método PTVa (Papathoma Tsunami Vulnerability Assessment). **Boletim Paulista de Geografia**, [S. l.], v. 97, p. 42–65, 2017.

MEISINA, C.; SCARABELLI, S. A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. **Geomorphology**, [S. l.], v. 87, n. 3, p. 207–223, 2007. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.03.039.

MELO, C. M.; KOBAYAMA, M. APLICAÇÃO DO MODELO SHALSTAB NO ESTUDO DE ESCORREGAMENTOS NO BRASIL: REVISÃO. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, [S. l.], v. 19, n. 4, p. 721–738, 2018.

MENDES, Rodolfo Moreda; MARINHO, Fernando Antônio Medeiros; VALÉRIO FILHO, Mario. Capacidade De Retenção De Água Em Solos Da Serra Do Mar, SP. **Revista do Instituto Geológico**, [S. l.], v. 36, n. 1, 2015. DOI: 10.5935/0100-929X.20150002.

MICHEL, Gean Paulo; KOBAYAMA, Masato; GOERL, Roberto Fabris. Comparative analysis of SHALSTAB and SINMAP for landslide susceptibility mapping in the Cunha River basin, southern Brazil. **Journal of Soils and Sediments**, [S. l.], v. 14, p. 1266–1277, 2014.

MINDER, Justin R.; ROE, Gerard H.; MONTGOMERY, David R. Spatial patterns of rainfall and shallow landslide susceptibility. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 45, n. 4, 2009. DOI: 10.1029/2008wr007027.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. **Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para Elaboração de Políticas Municipais**. Brasília. 2006.

MINISTÉRIO DAS CIDADES; IPT. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios**. Brasília: Ministério das Cidades e Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 2007.

MONTGOMERY, D.; DIETRICH, William E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 30, n. 4, p. 1153–1171, 1994. a. DOI: 10.1029/93WR02979.

MONTGOMERY, D.; SULLIVAN, Kathleen; GREENBERG, Harvey M. Regional test of a model for shallow landsliding. **Hydrological Processes**, [S. l.], v. 12, n. 6, p. 943–955, 1998. a. DOI: 10.1002/(sici)1099-1085(199805)12:6<943::aid-hyp664>3.0.co;2-z.

MONTRASIO, L.; VALENTINO, R.; LOSI, G. L. Towards a real-time susceptibility assessment of rainfall-induced shallow landslides on a regional scale. **Natural Hazards and Earth System Science**, [S. l.], v. 11, n. 7, p. 1927–1947, 2011. DOI: 10.5194/nhess-11-1927-2011.

MORADEI, Natalia dos Santos. **A grande enchente de São Luiz do Paraitinga - 2010**. 2017. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. DOI: 10.11606/D.16.2017.tde-02032017-113404.

MORRISSEY, Meghan M.; WIECZOREK, Gerald F.; MORGAN, Benjamin A. **A comparative analysis of hazard models for predicting debris flows in Madison County, VA Open-File Report**. [s.l: s.n.]. DOI: 10.3133/ofr0167.

MURILLO-GARCÍA, Franny et al. Population Landslide Vulnerability Evaluation: The Case of the Indigenous Population of Pahuatlán-Puebla, Mexico. *In*: 2015, Cham. **Anais [...]**. Cham: Springer International Publishing, 2015. p. 1793–1797.

NERY, Tulus Dias. **Avaliação da suscetibilidade a escorregamentos translacionais rasos na bacia da ultrafértil, Serra do Mar (SP)**. 2011. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011. DOI: 10.11606/D.8.2011.tde-26082011-095230.

NERY, Tulus Dias; VIEIRA, Bianca Carvalho. O papel dos condicionantes geomorfológicos na deflagração dos escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP). *In*: 5ª CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS 2009, São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo

NERY, Tulus Dias; VIEIRA, Bianca Carvalho. Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 74, n. 2, p. 369–378, 2015. DOI: 10.1007/s10064-014-0622-8.

OLIVEIRA, M. R. P. **Análise de parâmetros morfológicos e litoestruturais e sua relação com escorregamentos no Planalto Paraitinga – Paraibuna - SP**. 2019. São Paulo, 2019. DOI: 10.11606/D.8.2019.tde-07112019-181738.

OLIVEIRA, Maria Rita Pelegrin; VIEIRA, Bianca Carvalho; ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Suscetibilidade Morfológica e Geológica aos Escorregamentos no Planalto de Paraitinga-Paraibuna (SP). **Geography Department University of Sao Paulo**, [S. l.], p. 93–106, 2018. DOI: 10.11606/rdg.v0ispe.148486.

O'LOUGHLIN, E. M. Prediction of Surface Saturation Zones in Natural Catchments by Topographic Analysis. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 22, n. 5, p. 794–804, 1986. DOI: 10.1029/WR022i005p00794.

PACK, R. T.; GOODWIN, C. N.; TARBOTON, D. G. Assessing Terrain Stability in a GIS using SINMAP. *In*: 15TH ANNUAL GIS CONFERENCE, GIS 2001, Vancouver, British Columbia. **Anais [...]**. Vancouver, British Columbia

PACK, Robert T.; TARBOTON, David G.; GOODWIN, Craig N. **SINMAP - A Stability Index Approach to Terrain Stability Hazard Mapping, User's Manual**. , 1999.

PAPATHOMA, M.; DOMINEY-HOWES, D. Tsunami vulnerability assessment and its implications for coastal hazard analysis and disaster management planning, Gulf of Corinth, Greece. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 3, n. 6, p. 733–747, 2003. DOI: 10.5194/nhess-3-733-2003.

PAPATHOMA-KÖHLE, M.; NEUHÄUSER, B.; RATZINGER, K.; WENZEL, H.; DOMINEY-HOWES, D. Elements at risk as a framework for assessing the vulnerability of communities to landslides. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 7, n. 6, p. 765–779, 2007. DOI: 10.5194/nhess-7-765-2007.

PAPATHOMA-KÖHLE, Maria. Vulnerability curves vs. vulnerability indicators: application of an indicator-based methodology for debris-flow hazards. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, [S. l.], v. 16, n. 8, p. 1771–1790, 2016. DOI: 10.5194/nhess-16-1771-2016.

PARK, D. W.; LEE, S. R.; VASU, N. N.; KANG, S. H.; PARK, J. Y. Coupled model for simulation of landslides and debris flows at local scale. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 81, n. 3, p. 1653–1682, 2016. DOI: 10.1007/s11069-016-2150-2.

PARK, D. W.; NIKHIL, N. V; LEE, S. R. Landslide and debris flow susceptibility zonation using TRIGRS for the 2011 Seoul landslide event. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, [S. l.], v. 13, n. 11, p. 2833–2849, 2013. DOI: 10.5194/nhess-13-2833-2013.

PECHINCHA, M. G. H.; ZAIDAN, R. T. Probabilidade à ocorrência de escorregamentos na bacia do córrego Matirumbide , Juiz De Fora , MG , a partir da utilização do modelo SINMAP. **Revista de Geografia**, [S. l.], v. 2, p. 1–18, 2013.

PENCK, W. **Morphological Analysis of Land Forms: A Contribution to Physical Geology**. London: MacMilliam and Co., Limited, 1953.

PEREIRA, S.; ZÊZERE, J. L.; BATEIRA, C. Technical Note: Assessing predictive capacity and conditional independence of landslide predisposing factors for shallow landslide susceptibility models. **Nat. Hazards Earth Syst. Sci.**, [S. l.], v. 12, n. 4, p. 979–988, 2012. DOI: 10.5194/nhess-12-979-2012.

PINHO, T. M. **Métodos de análise de estabilidade determinísticos em ambiente de SIG na elaboração de mapas de suscetibilidade a escorregamentos rasos de solo**. 2019. Mestrado - USP, São Carlos, 2019.

PRADHAN, A. M. S.; KIM, Y. T. Evaluation of a combined spatial multi-criteria evaluation model and deterministic model for landslide susceptibility mapping. *CATENA*, [S. l.], v. 140, p. 125–139, 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2016.01.022.

QUINA, Robson Rodrigues; COSTA, Rômulo Montan; SANCHES, Fabio de Oliveira; GOMES, Francisco Carlos Moreira; ZAIDAN, Ricardo Tavares. Comparação de produtos altimétricos dos sensores Palsar/Alos e Lidar, a partir do modelo Sinmap. *Research, Society and Development*, [S. l.], v. 9, n. 12, p. e27391211149, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i12.11149.

RABACO, L. M. L. **Avaliação de Modelos de Susceptibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa numa Faixa de Dutos**. 2005. Rio de Janeiro, 2005.

RAMOS, V. M.; GUIMARÃES, R. F.; CARVALHO JÚNIOR, O.; REDIVO, A. L.; GOMES, R. A. T.; CARDOSO, F.; FERNANDES, N. F. Algorithm development for incorporating soil physical properties of each different soil class in a landslide prediction model (SHALSTAB). *Soils and Rocks*, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 139–148, 2007.

REICHENBACH, Paola; ROSSI, Mauro; MALAMUD, Bruce D.; MIHIR, Monika; GUZZETTI, Fausto. A review of statistically-based landslide susceptibility models. *Earth-Science Reviews*, [S. l.], v. 180, p. 60–91, 2018. DOI: 10.1016/j.earscirev.2018.03.001.

REYNOLDS, W.; ELRICK, D. In situ measurement of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity, and the α -parameter using the guelph permeameter. *Soil Science*, [S. l.], v. 140, n. 4, p. 292–302, 1985.

RIBEIRO, Daniela Ferreira; SAITO, Silvia Midori; ALVALÁ, Regina Célia dos Santos. Disaster vulnerability analysis of small towns in Brazil. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, [S. l.], v. 68, p. 102726, 2022. DOI: 10.1016/j.ijdr.2021.102726.

RICCOMINI, C. O. **Rift Continental do Sudeste do Brasil**. 1990. Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.

RICCOMINI, C.; SANT'ANNA, L. G.; FERRARI, A. L. Evolução Geológica do Rift Continental do Sudeste do Brasil. *In*: MANTESO-NETO, V.; BARTORELLI, A.; CARNEIRO, C. D. R.; BRITO-NEVES, B. B. (org.). **Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**. São Paulo: Beca, 2004. p. 383–405.

RIFFEL, Eduardo Samuel; CHIMELO RUIZ, Luiz Fernando; GUASSELLI, Laurindo Antonio. MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE A DESLIZAMENTOS A PARTIR DE MINERAÇÃO DE DADOS E DO MODELO SHALSTAB. *Revista Brasileira de Cartografia*, [S. l.], v. 68, n. 9, 2016.

ROSS, Jurandyr Luciano Sanches. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais antropizados. *Geography Department, University of Sao Paulo*, [S. l.], p. 63–74, 1994. DOI: 10.7154/RDG.1994.0008.0006.

ROSS, Jurandy Luciano Sanches; MOROZ, Isabel Cristina. Mapa Geomorfológico do estado de São Paulo. **Geography Department, University of Sao Paulo**, [S. l.], p. 41–58, 1996. DOI: 10.7154/RDG.1996.0010.0004.

RUFAT, Samuel; TATE, Eric; BURTON, Christopher G.; MAROOF, Abu Sayeed. Social vulnerability to floods: Review of case studies and implications for measurement. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [S. l.], v. 14, p. 470–486, 2015. DOI: 10.1016/j.ijdr.2015.09.013.

SAATY, R. W. The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. **Mathematical Modelling**, [S. l.], v. 9, n. 3–5, p. 161–176, 1987. DOI: 10.1016/0270-0255(87)90473-8. Acesso em: 17 abr. 2022.

SAITO, Silvia Midori; ASSIS DIAS, Mariane Carvalho De; RIBEIRO, Daniela Ferreira; ALVALÁ, Regina Célia dos Santos; SOUZA, Daiane Batista De; SANTANA, Rodrigo Amorim Souza de Moraes; SOUZA, Pilar Amadeu De; RIBEIRO, Júlia Vicente Martins; STENNER, Claudio. Disaster risk areas in Brazil: outcomes from an intra-urban scale analysis. **International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment**, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 238–250, 2021. DOI: 10.1108/IJDRBE-01-2020-0008.

SAITO, Silvia Midori; DIAS, Mariane Carvalho de Assis; ALVALÁ, Regina Célia dos Santos; STENNER, Claudio; FRANCO, Cayo; RIBEIRO, Julia Vicente Martins; SOUZA, Pilar Amadeu De; SANTANA, Rodrigo Amorim Souza de Moraes. População urbana exposta aos riscos de deslizamentos, inundações e enxurradas no Brasil. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 31, 2019. DOI: 10.14393/SN-v31-2019-46320.

SALCIARINI, Diana; FANELLI, Giulia; TAMAGNINI, Claudio. A probabilistic model for rainfall—induced shallow landslide prediction at the regional scale. **Landslides**, [S. l.], v. 14, n. 5, p. 1731–1746, 2017. DOI: 10.1007/s10346-017-0812-0.

SALCIARINI, Diana; GODT, Jonathan W.; SAVAGE, William Z.; CONVERSINI, Pietro; BAUM, Rex L.; MICHAEL, John A. Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria Region of central Italy. **Landslides**, [S. l.], v. 3, n. 3, p. 181, 2006. DOI: 10.1007/s10346-006-0037-0.

SALGADO, André A. R.; MARENT, Breno R.; CHEREM, Luís F. S.; BOURLÈS, Didier; SANTOS, Leonardo J. C.; BRAUCHER, Régis; BARRETO, Helen N. Denudation and retreat of the Serra do Mar escarpment in southern Brazil derived from in situ-produced ¹⁰Be concentration in river sediment. **Earth Surface Processes and Landforms**, [S. l.], v. 39, n. 3, p. 311–319, 2014. DOI: 10.1002/esp.3448.

SALGADO, André Augusto Rodrigues; REZENDE, Eric de Andrade; BOURLÈS, Didier; BRAUCHER, Régis; DA SILVA, Juliana Rodrigues; GARCIA, Ricardo Alexandrino. Relief evolution of the Continental Rift of Southeast Brazil revealed by in situ-produced ¹⁰Be concentrations in river-borne sediments. **Journal of South American Earth Sciences**, [S. l.], v. 67, p. 89–99, 2016. DOI: 10.1016/j.jsames.2016.02.002.

SANTOS, Edwilson; LISTO, Fabrizio. Escorregamentos translacionais rasos no município de Camaragibe, região metropolitana do Recife: Uma análise preliminar a partir do modelo SHALSTAB. **Revista de Geociências do Nordeste**, [S. l.], v. 5, n. 2, p. 131–145, 2019. DOI: 10.21680/2447-3359.2019v5n2ID18438.

SÃO PAULO. DECRETO Nº 57.512, de 11 de novembro de 2011Brasil, 2011.

SARKAR, Shraban; ROY, Archana K.; RAHA, Priyankar. Deterministic approach for susceptibility assessment of shallow debris slide in the Darjeeling Himalayas, India. **CATENA**, [S. l.], v. 142, p. 36–46, 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2016.02.009.

SBROGLIA, Regiane Mara; HIGASHI, Rafael Augusto dos Reis; TOMAZZOLI, Edison Ramos; GUIMARÃES, Renato Fontes. Mapeamento de áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos na microbacia do ribeirão baú, Ilhota/SC, com o uso de modelagem matemática. **Revista Brasileira de Cartografia**, [S. l.], v. 68, n. 2, 2016.

SBROGLIA, Regiane Mara; PORATH, Pedro Henrique Machado ;.; HIGASHI, Rafael Augusto dos Reis;; DE OLIVEIRA, Francisco Henrique; Mapeamento de Áreas Suscetíveis a Deslizamentos Translacionais com o Uso da Ferramenta ASA - Automatic Shalstab Analysis. **XII Conferencia Brasileira sobre Estabilidade de Encostas COBRAE 2017 -2 a 4 Novembro**, [S. l.], v. 1, n. 2594-9217–2017, p. 8, 2017.

SELUCHI, M. E.; CHOU, S. C. Synoptic patterns associated with landslides events in the Serra do Mar. **Brazil Theor Appl Climatol**, [S. l.], 2009. DOI: 10.1007/s00704-008-0101-x.

SHOU, Keh-Jian; CHEN, Jinru. On the rainfall induced deep-seated and shallow landslide hazard in Taiwan. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 288, p. 106156, 2021. DOI: 10.1016/j.enggeo.2021.106156.

SILVA, D. C. O. **Aplicação do Modelo Shalstab na Previsão de Deslizamentos em Petrópolis**. 2006. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2006.

SILVA, Eliane Lima e; GOMES, Roberto Arnaldo Trancoso; GUIMARÃES, Renato Fontes; CARVALHO JÚNIOR, Osmar Abílio De. Emprego de modelo de susceptibilidade a escorregamentos rasos para gestão de riscos de desastres no município de Vitória-ES. **Sociedade & Natureza**, [S. l.], v. 25, n. 1, p. 119–132, 2013. DOI: 10.1590/S1982-45132013000100010.

SILVA, L.; BRAGA, B.; ARAÚJO, J.; FERNANDES, F. Simulação matemática aplicada à identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos translacionais rasos no Morro do Baú – Santa Catarina. In: 9º SINAGEO - SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA 2021, **Anais [...]**. [s.l: s.n.] p. 1–5.

SILVA, Rodrigo Ferreira. **Análise de Magnitude e Frequencia Espacial de Movimentos e Massa em Caraguatatuba - SP**. 2013. USP, 2013.

SOUZA, Daniel H.; STUART, Finlay M.; RODÉS, Ángel; PUPIM, Fabiano N.; HACKSPACHER, Peter C. Controls on the erosion of the continental margin of southeast

Brazil from cosmogenic ^{10}Be in river sediments. **Geomorphology**, [S. l.], v. 330, p. 163–176, 2019. DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.01.020.

SOUZA, Luzia Matos De. **Vulnerabilidade da população e os processos de corridas de detritos e inundações bruscas**. 2021. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. DOI: 10.11606/T.8.2021.tde-19052021-170904.

STABILE, Rodrigo Augusto; COLÂNGELO, Antonio Carlos. Estudo pluviométrico dos escorregamentos deflagrados no verão de 2009/2010 no planalto do Paraitinga (SP). *In: Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*. [s.l.] : INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS - UNICAMP, 2017. p. 3878–3889. DOI: 10.20396/sbgfa.v1i2017.2538.

STÄHLI, M. et al. Monitoring and prediction in early warning systems for rapid mass movements. **Natural Hazards and Earth System Science**, [S. l.], v. 15, n. 4, p. 905–917, 2015. DOI: 10.5194/nhess-15-905-2015.

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. D. S.; ROCHA, M. D. Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos—Serra do Mar, município de Cubatão. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA 1975, Anais [...]*. [s.l.: s.n.] p. 225–236.

TEIXEIRA, Manuel; BATEIRA, Carlos; MARQUES, Fernando; VIEIRA, Bianca. Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo catchment, NW of Portugal. **Landslides**, [S. l.], v. 12, n. 3, p. 455–468, 2015. DOI: 10.1007/s10346-014-0494-9.

TOMINAGA, L. K. Análise e Mapeamento de Risco. *In: TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (org.). Desastres Naturais: Conhecer para Prevenir*. 1. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2009. v. 1p. 147–160.

TRAN, The Viet; LEE, Giha; AN, Hyunuk; KIM, Minseok. Comparing the performance of TRIGRS and TiVaSS in spatial and temporal prediction of rainfall-induced shallow landslides. **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 76, n. 8, p. 315, 2017. DOI: 10.1007/s12665-017-6635-4.

TRICART, J. **Ecodinâmica**. Rio de Janeiro: Série Recursos Naturais e Meio Ambiente, 1977.

UNDRO. **Natural disasters and vulnerability analysis**. 1980. Geneva.

VAKHSHOORI, V.; ZARE, M. Is the ROC curve a reliable tool to compare the validity of landslide susceptibility maps? **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 249–266, 2018. DOI: 10.1080/19475705.2018.1424043.

VAN WESTEN, C. J.; RENGERS, N.; SOETERS, R. Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. **Natural Hazards**, [S. l.], v. 30, n. 3, p. 399–419, 2003. DOI: 10.1023/B:NHAZ.0000007097.42735.9e.

VAN WESTEN, C. J.; VAN ASCH, T. W. J.; SOETERS, R. Landslide hazard and risk zonation—why is it still so difficult? **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, [S. l.], v. 65, n. 2, p. 167–184, 2006. DOI: 10.1007/s10064-005-0023-0.

VAN WESTEN, Cees J.; CASTELLANOS, Enrique; KURIAKOSE, Sekhar L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard, and vulnerability assessment: An overview. **Engineering Geology**, [S. l.], v. 102, n. 3, p. 112–131, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2008.03.010>.

VANACKER, V.; VON BLANCKENBURG, F.; HEWAWASAM, T.; KUBIK, P. W. Constraining landscape development of the Sri Lankan escarpment with cosmogenic nuclides in river sediment. **Earth and Planetary Science Letters**, [S. l.], v. 253, n. 3–4, p. 402–414, 2007. DOI: 10.1016/j.epsl.2006.11.003.

VARGAS, M. Revisão Histórico-Conceitual dos Escorregamentos da Serra do Mar. *In: Solos e Rochas*. [s.l.: s.n.]. v. 22p. 53-83.

VESTENA, Leandro Redin; KOBİYAMA, M. Potential fragility of the Caeté catchment, municipality of Alfredo Wagner, Santa Catarina State, Brazil, to landslides occurrence. **Acta Scientiarum. Technology**, [S. l.], v. 36, n. 1, 2014. DOI: 10.4025/actascitechnol.v36i1.16047.

VIANNA, L. F. N. **Relatório sobre o levantamento dos deslizamentos ocasionados pelas chuvas de novembro de 2008 no complexo do Morro do Baú, municípios de Ilhota, Gaspar e Luiz Alves**. Florianópolis, SC: Epagri-Sede, 2009.

VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F.; FILHO, O. A. Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Natural Hazards and Earth System Science**, [S. l.], v. 10, n. 9, p. 1829–1837, 2010. DOI: 10.5194/nhess-10-1829-2010.

VIEIRA, B. C.; FERREIRA, F. S.; GOMES, M. C. V. Propriedades Físicas E Hidrológicas Dos Solos E Os Escorregamentos Rasos Na Serra Do Mar Paulista. **Raega - O Espaço Geográfico em Análise**, [S. l.], v. 34, p. 307, 2015. DOI: 10.5380/raega.v34i0.40739.

VIEIRA, B. C.; MARTINS, T. D.; LISTO, F. L. R. Previsão de escorregamentos rasos utilizando modelos matemáticos em bases físicas. *In: Gunther WR, Ciccotti L, Rodrigues AC Desastres: múltiplas abordagens e desafios*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2017.

VIEIRA, B. C.; VIEIRA, A. C. F.; FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. Estudo comparativo dos movimentos de massa ocorridos em Fevereiro de 1996 nas bacias do Quitite e do Papagaio (RJ): uma abordagem Geomofológica. *In: 2ND PANAM. SYMP. LANDSLIDES, 2º COBRAE 1997, Anais [...]*. [s.l.: s.n.] p. 165–174.

VIEIRA, B.; FERNANDES, N.; AUGUSTO FILHO, O. Mapping shallow landslide hazards in the Serra de Cubatao, Sao Paulo, Brazil. **Programme with Abstracts - International Geomorphology Conference**, [S. l.], 2009.

VIEIRA, Bianca Carvalho. **Previsão de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP) a partir de modelos matemáticos em bases físicas**. 2007b. Tese (Doutorado - Geografia Física). Departamento de Geografia. Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio de Janeiro, [S. l.], 2007.

VIEIRA, Bianca Carvalho; FERNANDES, Nelson Ferreira; AUGUSTO FILHO, Oswaldo; MARTINS, Tiago Damas; MONTGOMERY, David R. Assessing shallow landslide hazards

using the TRIGRS and SHALSTAB models , Serra do Mar , Brazil. **Environmental Earth Sciences**, [S. l.], v. 77, n. 6, p. 1–15, 2018. DOI: 10.1007/s12665-018-7436-0.

VIEIRA, Bianca Carvalho; GRAMANI, Marcelo Fischer. Serra do Mar: The Most “Tormented” Relief in Brazil. *In*: VIEIRA, Bianca Carvalho; SALGADO, André Augusto Rodrigues; SANTOS, Leonardo José Cordeiro (org.). **Landscapes and Landforms of Brazil**. [s.l.: s.n.]. p. 285–297. DOI: 10.1007/978-94-017-8023-0_26.

VIEIRA, Bianca Carvalho; MARTINS, Tiago Damas. Modelos em geografia física: conceitos e aplicações na previsão de escorregamentos. **GEOUSP: Espaço e Tempo (Online)**, [S. l.], v. 20, n. 1, p. 194, 2016. DOI: 10.11606/issn.2179-0892.geousp.2016.102616.

VIEIRA, Bianca Carvalho; RAMOS, Henrique. Aplicação do modelo Shalstab para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Revista do Departamento de Geografia**, [S. l.], v. 29, n. 2015, p. 161–164, 2015. DOI: 10.11606/rdg.v29i0.102087.

VIET, Tran The; LEE, Giha; THU, Trinh Minh; AN, Hyun Uk. Effect of Digital Elevation Model Resolution on Shallow Landslide Modeling Using TRIGRS. **Natural Hazards Review**, [S. l.], v. 18, n. 2, p. 4016011, 2017. DOI: doi:10.1061/(ASCE)NH.1527-6996.0000233.

WEIDNER, Luke; OOMMEN, Thomas; ESCOBAR-WOLF, Rüdiger; SAJINKUMAR, K. S.; SAMUEL, Rinu A. Regional-scale back-analysis using TRIGRS: an approach to advance landslide hazard modeling and prediction in sparse data regions. **Landslides**, [S. l.], v. 15, n. 12, p. 2343–2356, 2018. DOI: 10.1007/s10346-018-1044-7.

WELLE, Torsten; BIRKMANN, Joern. The World Risk Index – An Approach to Assess Risk and Vulnerability on a Global Scale. **Journal of Extreme Events**, [S. l.], v. 02, n. 01, p. 1550003, 2015. DOI: 10.1142/s2345737615500037.

WILFORD, D. J.; SAKALS, M. E.; INNES, J. L.; SIDLE, R. C.; BERGERUD, W. A. Recognition of debris flow, debris flood and flood hazard through watershed morphometrics. **Landslides**, [S. l.], v. 1, n. 1, p. 61–66, 2004. DOI: 10.1007/s10346-003-0002-0.

WOLLE, C. M. Slope Stability in Tropical Lateritic and Saprolitic Soils. *In*: ISSMFE COMMITTEE ON TROPICAL SOILS. PROGRESS REPORT 1982–1985. 1985, **Anais [...]**. [s.l.: s.n.] p. 164–221.

WOLLE, C. M.; HACHICH, W. Rain-induced landslides in Southeastern Brazil. *In*: 12TH INT. CONF. ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING 1989, Rio de Janeiro. **Anais [...]**. Rio de Janeiro p. 1639–1642.

WOLLE, Claudio Michael; MELLO, Luiz Guilherme Francisco Soares De; ALTRICHTER, Guillermo. O escorregamento do Km 42 da Via Anchieta: histórico das ocorrências e provável mecanismo de instabilização. *In*: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS 2001, **Anais [...]**. : Abms, 2001.

WU, W.; SIDLE, R. C. A Distributed Slope Stability Model for Steep Forested Basins. **Water Resources Research**, [S. l.], v. 31, p. 2097–2110, 1995.

YATHEENDRADAS, Soni; KIRSCHBAUM, Dalia; NEARING, Grey; VRUGT, Jasper A.; BAUM, Rex L.; WOOTEN, Rick; LU, Ning; GODT, Jonathan W. Bayesian analysis of the impact of rainfall data product on simulated slope failure for North Carolina locations. **Computational Geosciences**, [S. l.], v. 23, n. 3, p. 495–522, 2019. DOI: 10.1007/s10596-018-9804-y.

YIN, K. L.; YAN, T. Z. **Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. International Symposium on Landslides** Lausanne, 1988.

ZAIDAN, R. T.; FERNANDES, N. F. Análise de riscos de escorregamentos nas encostas edificadas da bacia de drenagem urbana do córrego do independência - Juiz de Fora (MG). **Revista de Geografia**, [S. l.], v. 5, p. 171–184, 2015.

ZAIDAN, Ricardo Tavares; FERNANDES, Nelson Ferreira. 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**, [S. l.], v. 10, n. 2, 2009. DOI: 10.20502/rbg.v10i2.131.

ZÊZERE, J. L.; PEREIRA, S.; MELO, R.; OLIVEIRA, S. C.; GARCIA, R. A. C. Mapping landslide susceptibility using data-driven methods. **Sci Total Environ**, [S. l.], v. 589, p. 250–267, 2017. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.02.188.

ZHANG, Guifang; CAI, Yixi; ZHENG, Zhuo; ZHEN, Junwei; LIU, Yongli; HUANG, Kangyou. Integration of the Statistical Index Method and the Analytic Hierarchy Process technique for the assessment of landslide susceptibility in Huizhou, China. **CATENA**, [S. l.], v. 142, p. 233–244, 2016. DOI: 10.1016/j.catena.2016.03.028.

ARTIGOS PUBLICADOS

Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. Vieira, B.C.; Fernandes, N.F *Natural Hazards and Earth System Sciences*, (2010) v. 10, 9, p. 1829-1837. DOI: [10.5194/nhess-10-1829-2010](https://doi.org/10.5194/nhess-10-1829-2010). Disponível: <https://nhess.copernicus.org/articles/10/1829/2010/>

Journal Impact Factor (Clarivate) 4.345

Citações <i>Web of Science</i>	52
Citações <i>Scopus</i>	56
Citações <i>Google Scholar</i>	89
<i>BibTeX</i>	84
<i>Visualizações</i>	1.555
<i>Downloads</i>	1.956
<i>Endnote</i>	76
<i>Mendeley - Readers</i>	77
Última Atualização: Agosto de 2022	

Fontes dos dados:

<https://clarivate.com>

<https://www.scopus.com>

<https://scholar.google.com.br>

<https://plu.mx/plum>

Abstract: Various methods are currently used in order to predict shallow landslides within the catchment scale. Among them, physically based models present advantages associated with the physical description of processes by means of mathematical equations. The main objective of this research consists on the prediction of shallow landslides using TRIGRS model, in a pilot catchment located at Serra do Mar Mountain range, São Paulo State, southeastern Brazil. Susceptibility scenarios have been simulated taking into account different mechanical and hydrological values. These scenarios were analyzed based on a landslide scars map from the January 1985 event, upon which two indexes were applied: Scars Concentration (SC - ratio between the number of cells with scars, in each class, and the total number of cells with scars within the catchment) and Landslide Potential (LP - ratio between the number of cells with scars, in each class, and the total number of cells in that same class). The results showed a significant agreement between the simulated scenarios and the scar's map. In unstable areas ($SF \leq 1$), the SC values exceeded 50% in all scenarios. Based on the results, the use of this model should be considered an important tool for shallow landslide prediction, especially in areas where mechanical and hydrological properties of the materials are not well known.

Shallow landslide prediction in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil

B. C. Vieira¹, N. F. Fernandes², and O. A. Filho³

¹Department of Geography, University of São Paulo, São Paulo, Brazil

²Department of Geography, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

³Geotechnical Department, University of São Paulo, São Paulo, Brazil

Received: 31 January 2010 – Revised: 5 July 2010 – Accepted: 19 July 2010 – Published:

Abstract. Various methods are currently used in order to predict shallow landslides within the catchment scale. Among them, physically based models present advantages associated with the physical description of processes by means of mathematical equations. The main objective of this research is the prediction of shallow landslides using TRIGRS model, in a pilot catchment located at Serra do Mar mountain range, São Paulo State, southeastern Brazil. Susceptibility scenarios have been simulated taking into account different mechanical and hydrological values. These scenarios were analysed based on a landslide scars map from the January 1985 event, upon which two indexes were applied: Scars Concentration (SC – ratio between the number of cells with scars, in each class, and the total number of cells with scars within the catchment) and Landslide Potential (LP – ratio between the number of cells with scars, in each class, and the total number of cells in that same class). The results showed a significant agreement between the simulated scenarios and the scar's map. In unstable areas ($SF \leq 1$), the SC values exceeded 50% in all scenarios. Based on the results, the use of this model should be considered an important tool for shallow landslide prediction, especially in areas where mechanical and hydrological properties of the materials are not well known.

1 Introduction

Serra do Mar is a mountain range that extends for about 1500 km along the southeast coast of Brazil. The region has a great economic importance since it is crossed by the major land transportation network that connects the city of São Paulo to other large metro areas, as well as to the port of San-

tos. The industrial region of Cubatão lies at the base of the Serra do Mar escarpment, and several industrial plants in the area have been affected by shallow landsliding and debris flows, especially during intense summer rainstorms. These have caused a severe impact on the infrastructure and significant social and economic damage (Kanji et al., 2008).

Mass movement events in Serra do Mar are known to occur in intervals of 5 to 10 years during the rainy season (Nalon, 2000) and, since the 1920s, there have been records of these processes, mainly debris flows and shallow landslides that caused several casualties and destroyed some of the local industrial plants (Meis and Silva, 1968; Barata, 1969; Costa Nunes, 1969; Jones, 1973; Vargas Jr. et al., 1986; Wölle and Hachich, 1989; Lacerda, 1997; Fernandes et al., 2004; Lacerda, 2007). In 1929, many landslides were triggered in the city of Santos, located on the foothills of Serra do Mar. Again, in 1956, the same region was affected as the accumulated rainfall reached the value of 373 mm in 24 h, triggering 60 landslides almost simultaneously (IPT, 1986).

Between 17 and 18 March 1967, in the northern sector of Serra do Mar in São Paulo State, close to the municipality of Caraguatatuba, hundreds of landslides and major debris flows were generated during heavy rainfall (580 mm in 2 days), approximately 35% of the total annual rainfall for that region. Likewise, on 23 and 24 January 1985, during an intense summer rainstorm (380 mm in 2 days), thousands of shallow landslides and debris flows were triggered (Figs. 1 and 2). In February 1994, some catchments on the Serra do Mar escarpment close to Cubatão were affected by landslides that reached the main tributary streams, increasing the magnitude of the debris flows. Kanji et al. (2008) estimated that the volume of the debris removed was about 300,000 m³ with an expected velocity of around 10 m/s, interrupting the Petrobrás oil refinery for about 3 weeks and leading to economic losses of about US\$ 40 million. Due to the landslide susceptibility in the Serra do Mar region and



Correspondence to: B. C. Vieira
(biancav@usp.br)

Landslides in Rio de Janeiro: The role played by variations in soil hydraulic conductivityVieira, B.C. e Fernandes, N.F (2004). *Hydrological Processes*. Volume 18 Issue 4 791-805

DOI: 10.1002/hyp.1363. Disponível:

<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.1363>**Journal Impact Factor (Clarivate) 3.565**

Citações <i>Web of Science</i>	41
Citações <i>Scopus</i>	45
Citações <i>Google Scholar</i>	86
Última Atualização: Agosto de 2022	

Fontes dos Dados:

<https://plu.mx/plum><https://scholar.google.com.br><https://nhess.copernicus.org><https://clarivate.com>

Abstract: Landslides are natural processes triggered by complex relationships between many conditioning factors. In Rio de Janeiro city, intense rainstorms combined with steep slopes, usually occupied by slums, create favorable conditions to landslide generation. In general, slope failures are related to high positive pore-pressures inside soil mantles, which are associated with topographic hollows and hydraulic discontinuities inside the deep weathered profile. This study aims to characterize the role played by spatial variations on saturated soil hydraulic conductivity (K_{sat}) in landsliding in Papagaio Basin (2.5 km²), triggered by intense rainstorms (250 mm in less than 2 days) of February 1996. Field measurements, using the Guelph permeameter, were conducted along 12 soil profiles (up to 5.0 m depth), around and inside landslide scars representing different geomorphological domains. In parallel, soil physical properties (grain size, total porosity, macroporosity, microporosity, etc.) were evaluated at the 87 sites where K_{sat} was measured. Despite of the many geological and pedological changes inside the basin, including variations in lithology, fracture density, vegetation type and succession stage, soil characteristics and weathering stage, human activities, among others, 94% of the K_{sat} values varied inside only two orders of magnitude (1.0×10^{-4} cm/s - 9.0×10^{-3} cm/s). However, abrupt changes in K_{sat} were observed along some of the studied soil profiles, as for instance, an increase of 2 orders of magnitude in about only 30 cm. These hydraulic discontinuities may locally contribute to the development of high pore pressures during intense rainstorms, leading to landsliding. The results also suggest that different K_{sat} variation patterns co-exist inside the basin which should be considered by mathematical models of landslide prediction.

Landslides in Rio de Janeiro: The role played by variations in soil hydraulic conductivity

Bianca Carvalho Vieira and Nelson Ferreira Fernandes*

Department of Geography, Federal University of Rio de Janeiro-UFRJ, Cidade Universitária, Ilha do Fundão, Rio de Janeiro 21941-590, Brazil

Abstract:

Landslides are natural processes triggered by complex relationships between many conditioning factors. In Rio de Janeiro city, intense rainstorms combined with steep slopes, usually occupied by slums, create favourable conditions for landslide generation. In general, slope failures are related to high positive pore-pressures inside soil mantles, which are associated with topographic hollows and hydraulic discontinuities inside the deep weathered profile.

This study aims to characterize the role played by spatial variations in saturated soil hydraulic conductivity K_{sat} on landsliding in the Papagaio Basin (2.5 km²), triggered by intense rainstorms (250 mm in less than 2 days) in February 1996. Field measurements, using the Guelph permeameter, were conducted along soil profiles (up to 5.0 m depth), around and inside landslide scars representing different geomorphological domains. Also, soil physical properties (grain size, total porosity, macroporosity, microporosity, etc.) were evaluated at the 87 sites where K_{sat} was measured.

Despite the many geological and pedological variations inside the basin, including changes in lithology, fracture density, vegetation type and succession stage, soil characteristics and weathering stage, and human activities, 94% of the K_{sat} values varied by only two orders of magnitude (1.0×10^{-6} – 9.0×10^{-5} m s⁻¹). However, abrupt changes in K_{sat} were observed along some of the soil profiles studied, e.g. an increase of two orders of magnitude in only 0–30 m. These hydraulic discontinuities may contribute locally to the development of high pore pressures during intense rainstorms, leading to landsliding. The results also suggest that different K_{sat} variation patterns coexist inside the basin, which should be considered in mathematical models of landslide prediction. Copyright © 2004 John Wiley & Sons, Ltd.

KEY WORDS landslides; hydraulic discontinuities; soil physical properties

INTRODUCTION

Landslides are common processes on the hillslopes of Rio de Janeiro, a city which combines steep slopes, intense summer rainstorms and disordered dense human occupation. Since the 1960s, when population spread towards the hillslopes, the result of a demographic explosion in southeastern Brazil leading to construction in hazardous areas and to a huge expansion of the slums, many studies have focused on the major factors controlling slope instability within the city. During the last four decades, especially during the years of 1966, 1967, 1988 and 1996, catastrophic landslides have greatly impacted the city, causing more than 320 deaths (Amaral and Palmeiro, 1997).

The importance to landslide generation of the physical properties of deep weathered soil profiles, associated with the structural and lithological complexity of the Precambrian bedrock, was documented by many studies in the region (e.g. Barata, 1969; Jones, 1973; Vargas *et al.*, 1986; Pedrosa *et al.*, 1988; Amaral *et al.*, 1992; Rocha, 1993; Temoteo, 1993; Lacerda, 1997; Lara *et al.*, 1997). Frequently, landslide scars are observed to lie at the boundary between the mature residual soil and the fractured bedrock or between slope deposits (talus/colluvium) and the unweathered bedrock. Other investigations have focused on the geomorphological

* Correspondence to: Nelson Ferreira Fernandes, Rua Repouso 241 Ap. 302, Ilha do Governador, Rio de Janeiro 21941-288, RJ, Brazil. E-mail: nelsonff@acd.ufrj.br

Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil Vieira, B.C.; Fernandes, N.F.; Augusto Filho, O.; Martins, T.D.; Montgomery, D.R. (2018). *Environmental Earth Sciences*, 77, 260. DOI: 10.1007/s12665-018-7436-0. Disponível: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/hyp.1363>

Journal Impact Factor (Clarivate) 2.784

Citações <i>Web of Science</i>	21
Citações <i>Scopus</i>	21
Citações <i>Google Scholar</i>	32
Última Atualização: junho de 2022	

Fontes dos Dados:

<https://clarivate.com>

<https://www.scopus.com>

<https://scholar.google.com.br>

<https://plu.mx/plum>

<https://nhess.copernicus.org>

Abstract: The hillslopes of the Serra do Mar, a system of escarpments and mountains that extend more than 1500 km along the south- ern and southeastern Brazilian coast, are regularly affected by heavy rainfall that generates widespread mass movements, causing large numbers of casualties and economic losses. This paper evaluates the efficiency of susceptibility mapping for shallow translational landslides in one basin in the Serra do Mar, using the physically based landslide susceptibility mod- els SHALSTAB and TRIGRS. Two groups of scenarios were simulated using different geotechnical and hydrological soil parameters, and for each group of scenarios (A and B), three subgroups were created using soil thickness values of 1, 2, and 3 m. Simulation results were compared to the locations of 356 landslide scars from the 1985 event. The susceptibility maps for scenarios A1, A2, and A3 were similar between the models regarding the spatial distribution of susceptibility classes. Changes in soil cohesion and specific weight parameters caused changes in the area of predicted instability in the B scenarios. Both models were effective in predicting areas susceptible to shallow landslides through comparison of areas predicted to be unstable and locations of mapped landslides. Such models can be used to reduce costs or to define potentially unstable areas in regions like the Serra do Mar where field data are costly and difficult to obtain.



Assessing shallow landslide hazards using the TRIGRS and SHALSTAB models, Serra do Mar, Brazil

Bianca Carvalho Vieira¹ · Nelson Ferreira Fernandes² · Oswaldo Augusto Filho³ · Tiago Damas Martins⁴ · David R. Montgomery⁵

Received: 31 October 2017 / Accepted: 19 March 2018
 © Springer-Verlag GmbH Germany, part of Springer Nature 2018

Abstract

The hillslopes of the Serra do Mar, a system of escarpments and mountains that extend more than 1500 km along the southern and southeastern Brazilian coast, are regularly affected by heavy rainfall that generates widespread mass movements, causing large numbers of casualties and economic losses. This paper evaluates the efficiency of susceptibility mapping for shallow translational landslides in one basin in the Serra do Mar, using the physically based landslide susceptibility models SHALSTAB and TRIGRS. Two groups of scenarios were simulated using different geotechnical and hydrological soil parameters, and for each group of scenarios (A and B), three subgroups were created using soil thickness values of 1, 2, and 3 m. Simulation results were compared to the locations of 356 landslide scars from the 1985 event. The susceptibility maps for scenarios A1, A2, and A3 were similar between the models regarding the spatial distribution of susceptibility classes. Changes in soil cohesion and specific weight parameters caused changes in the area of predicted instability in the B scenarios. Both models were effective in predicting areas susceptible to shallow landslides through comparison of areas predicted to be unstable and locations of mapped landslides. Such models can be used to reduce costs or to define potentially unstable areas in regions like the Serra do Mar where field data are costly and difficult to obtain.

Keywords Mathematical models · Susceptibility mapping · Shallow landslides · Geotechnical and hydrological parameters · Serra do Mar

Introduction

A variety of methods and approaches have been developed and applied in predicting landslide hazards. Physically based mathematical models are considered to be the most objective, due to the direct application of equations that describe

physically relevant processes, and disregard researchers subjective opinions. Such models also can be used to predict landslide susceptibility under different land use scenarios, (Dietrich and Montgomery 1998; Guzzetti et al. 1999; Montgomery and Dietrich 1994; van WESTEN 2004).

✉ Bianca Carvalho Vieira
biancav@usp.br

Nelson Ferreira Fernandes
nelsonff@acd.ufrj.br

Oswaldo Augusto Filho
oafilho@usp.br

Tiago Damas Martins
td.martins@unifesp.br

David R. Montgomery
bigdirt@uw.edu

¹ Department of Geography, University of São Paulo, Avenida Prof. Lineu Prestes 338, Cidade Universitária, São Paulo CEP: 05508-080, Brazil

² Department of Geography, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Ilha do Fundão, RJ CEP: 21945-970, Brazil

³ São Carlos School of Engineering, University of São Paulo, Av. Trabalhador São-carlense, 400, Centro, São Paulo, SP CEP: 13556590, Brazil

⁴ Cities Institute, Federal University of São Paulo, Avenida Jacu-Pessegue, 2630, Itaquera, São Paulo, SP CEP: 08260-001, Brazil

⁵ Department of Earth and Space Science, University of Washington, Johnson Hall, Box 351310, Seattle, WA, USA

Serra do Mar: The Most “Tormented” Relief in Brazil. Vieira B.C., Gramani M.F. (2015) *World Geomorphological Landscapes*, pp. 285-297. DOI: 10.1007/978-94-017-8023-0_26. Disponível: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-8023-0_26

Citações <i>Web of Science</i>	22
Citações <i>Scopus</i>	23
Citações <i>Google Scholar</i>	48
<i>Mendeley - Readers</i>	17
<i>Acessos</i>	1207
<i>CrossRef</i>	4
Última Atualização: Agosto de 2022	

Fontes dos Dados:

<https://clarivate.com>

<https://www.scopus.com>

<https://scholar.google.com.br>

<https://plu.mx/plum>

<https://link.springer.com>

Abstract: The Serra do Mar is a system of escarpments and mountains that stretches more than 1,500 km between the states of Santa Catarina and Rio de Janeiro with a general ENE orientation. It has high lithological and structural complexity along its entire length, with some stretches quite recessed from the coast and some very close to it. It caught the attention of explorers as early as the 18th century, and its origin and evolution have always intrigued researchers, particularly after the 1930s, when more systematic studies on the lithology and formation of the sedimentary basins that surround it were undertaken. With its wide variation in altitude, high slopes, and high rainfall volumes, as well as the fact that it includes Brazil's largest area of Atlantic Forest, the Serra do Mar has always been a “barrier” to be overcome, as it is situated between the country's major urban centers and its main ports.

Serra do Mar: The Most “Tormented” Relief in Brazil

26

Bianca Carvalho Vieira and Marcelo Fischer Gramani

Abstract

The Serra do Mar is a system of escarpments and mountains that stretch more than 1,500 km between the states of Santa Catarina and Rio de Janeiro with a general ENB orientation. It has high lithological and structural complexity along its entire length, with some stretches quite recessed from the coast and some very close to it. It caught the attention of explorers as early as the eighteenth century, and its origin and evolution have always intrigued researchers, particularly after the 1930s, when more systematic studies on the lithology and formation of the sedimentary basins that surround it were undertaken. With its wide variation in altitude, high slopes, and high rainfall volumes, as well as the fact that it includes Brazil's largest area of Atlantic Forest, the Serra do Mar has always been a “barrier” to be overcome, as it is situated between the country's major urban centers and its main ports.

Keywords

Serra do Mar • Atlantic forest • Orographic barrier • Santos fault • Atlantic border

26.1 Introduction

Serra do Mar stands out due to its orographic distinctiveness, as a system of escarpments and mountains that span more than 1,500 km between the states of Santa Catarina and Rio de Janeiro, in accordance with a general ENB orientation of the structures of the Atlantic Shield (Fig. 26.1). Lithologically, the area is highly complex and includes magmatic and metamorphic associations and igneous complexes, due primarily to events taking place in the Precambrian and Bopaleozoic eras.

Some geomorphological characteristics of this landscape draw particular attention. Some stretches are extremely steep and continuous (Fig. 26.2a), whereas others are more irregular and heterogeneous (Fig. 26.2b). Moreover, the range has a discontinuous outline, in some areas advancing toward the coast and in other sections retreating toward the interior of the Plateau. For some authors, this discontinuity is the result of lithological differences, such as the presence of complex fault systems and shear zones and morphotectonic events that formed the Atlantic Plateau during the Paleocene and Miocene.

Along with Serra da Mantiqueira, Serra do Mar constitutes the most outstanding orographic feature on the Atlantic edge of the South American continent (Almeida and Carmo 1998), having been called, due to its escarpments, tectonic processes, faults, and marked folds, the “most tormented relief in the country” (Almeida 1953). It stands out in the Brazilian landscape because of both its impressive geomorphological features and its role in the human occupation of Brazil from the period of colonization to the present day.

As Zalmá (2012) highlights, Serra do Mar has several local names as follows: Parnaçiplaciba, Perty, Couto, dos Órgãos, and da Carioca, among others. In a way, these designations

B.C. Vieira (✉)
Department of Geography, University of São Paulo, São Paulo,
Brazil
e-mail: biancaov@usp.br

M.F. Gramani
Institute of Technological Research of São Paulo, São Paulo,
Brazil
e-mail: mgramani@ipt.br

Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo catchment, NW of Portugal. Teixeira M., Bateira C., Marques F., Vieira B. (2015) *Landslides*, 12 (3), pp. 455-468. DOI: 10.1007/s10346-014-0494-9. Disponível: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-014-0494-9>

Journal Impact Factor (Clarivate) 4.345

Citações <i>Web of Science</i>	9
Citações <i>Scopus</i>	10
Citações <i>Google Scholar</i>	38
Acessos	1305
<i>CrossRef</i>	13
Última Atualização: junho de 2022	

Fontes dos Dados:

<https://clarivate.com>

<https://www.scopus.com>

<https://scholar.google.com.br>

<https://plu.mx/plum>

Abstract: The Northwest of Portugal is a steep slope mountain area where high amounts of rainfall (3,000mm/year) occur especially on winter, promoting high natural propensity to slope failure, mainly shallow landslides. This article aims to assess shallow landslide susceptibility, in Tibo catchment, Serra da Peneda, North of Portugal, using two physically based models—SHALLOW Landslide STABILITY (SHALSTAB) and Safety Factor (SF)—applying a set of mechanical and hydrological parameters, assessed in situ and laboratory testing of soil samples collected in the field, calibrated by back analysis of landslides inventoried in the study area, as well as accurate topographic information derived from a high-resolution digital elevation model (DEM). The validation of results was made using shallow landslide scars, directly inventoried in the field. Both susceptibility model results were validated by scar concentration (SC) and landslide potential (LP). SHALSTAB model was also validated by minimum $\log q/T$. SHALSTAB predicts 50% of the area to be on unstable classes ($\log q/T < -2.5$), 77% of the SC on unstable classes and a LP index of 7 and 4.7% for the two most unstable classes. By minimum $\log q/T$, SHALSTAB predicts 91% of the scars to occur on unstable classes. Safety factor predicts 47.99% of the area as unstable, 79.9% of the SC for unstable classes, and a LP index on unstable classes of 4.63 and 2.77% on partially unstable class. For the most unstable classes of both models, the greatest values of LP were between 3.5 and 7%. The simple physically based models used in this study (SHALSTAB and SF) proved to be effective as shallow landslide susceptibility predictors, being in consequence useful tools for municipal planning on landslide hazards, but their application requires, beyond detailed topographical information, good estimates of the mechanical and hydrological soil properties.

Landslides

DOI 10.1007/s10346-014-0494-9

Received: 9 September 2013

Accepted: 29 April 2014

© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Manuel Teixeira · Carlos Bateira · Fernando Marques · Bianca Vieira

Physically based shallow translational landslide susceptibility analysis in Tibo catchment, NW of Portugal

Abstract The Northwest of Portugal is a steep slope mountain area where high amounts of rainfall (3,000mm/year) occur especially on winter, promoting high natural propensity to slope failure, mainly shallow landslides. This article aims to assess shallow landslide susceptibility, in Tibo catchment, Serra da Peneda, North of Portugal, using two physically based models—*SHallow Landslide STABility* (SHALSTAB) and *Safety Factor* (SF)—applying a set of mechanical and hydrological parameters, assessed in situ and laboratory testing of soil samples collected in the field, calibrated by back analysis of landslides inventoried in the study area, as well as accurate topographic information derived from a high-resolution digital elevation model (DEM). The validation of results was made using shallow landslide scars, directly inventoried in the field. Both susceptibility model results were validated by scar concentration (SC) and landslide potential (LP). SHALSTAB model was also validated by minimum $\log q/T$. SHALSTAB predicts 50% of the area to be on unstable classes ($\log q/T < -2.5$), 77% of the SC on unstable classes and a LP index of 7 and 4.7% for the two most unstable classes. By minimum $\log q/T$, SHALSTAB predicts 91% of the scars to occur on unstable classes. Safety factor predicts 47.99% of the area as unstable, 79.9% of the SC for unstable classes, and a LP index on unstable classes of 4.63 and 2.77% on partially unstable class. For the most unstable classes of both models, the greatest values of LP were between 3.5 and 7%. The simple physically based models used in this study (SHALSTAB and SF) proved to be effective as shallow landslide susceptibility predictors, being in consequence useful tools for municipal planning on landslide hazards, but their application requires, beyond detailed topographical information, good estimates of the mechanical and hydrological soil properties.

Keywords Landslides · Shallow landslide susceptibility · Physically based models · SHALSTAB model · Safety factor model

Introduction

Landslides have large impact on contemporary society, affecting many areas worldwide. Due to its destructive potential, landslides have been a growing concerning theme for scientists and territory planners in the last decades (e.g., Alexander 1992; Carrara 1993; Soeters and Westen 1996; Marques 1997; Zêzere 1997; Guzzetti et al. 1999; Guimarães et al. 2003; Bateira 2001; Ayala 2004; Crozier and Glade 2004; Guzzetti 2005; Gomes 2006; Vieira et al. 2010).

Different quantitative methods have been applied worldwide in the last decades, to assess landslide susceptibility at basin or regional scale, with statistically based methods being the more frequently used (e.g., Yin and Yan 1988; Carrara et al. 1991; Soeters and Westen 1996; Aleotti and Chowdhury 1999; Guzzetti et al. 1999; Süzen and Doyuran 2004; Guzzetti 2005). Physically based approaches have been less frequently used, and published

models include dSLAM (Wu and Sidle 1997), SHALlow Landslide STABility (SHALSTAB; Montgomery and Dietrich 1994; Dietrich and Montgomery 1998), SINMAP (Pack et al. 1998, 2005; Calcaterra et al. 2004), and TRIGRS (Iverson 2000; Baum et al. 2002, 2008). These models have been widely used, with particular emphasis in the USA, Brazil, China, and Italy (e.g., Dietrich et al. 1998; Montgomery et al. 1998; Fernandes et al. 2001; Ramos et al. 2002; Guimarães et al. 2003; Savage et al. 2004; Gomes 2006; Salciarini et al. 2006; Santini et al. 2009; Cervi et al. 2010; Vieira et al. 2010).

In Portugal, previous works on landslide susceptibility on the Ancient Massif (Bateira 2001, 2010; Teixeira 2006; Pereira 2009; Pereira et al. 2012) have not yet applied physically based models. In this paper, the capacity of simple physically based models to assess and map shallow landslide susceptibility on a mountain area (igneous and metamorphic rock area), using values of mechanical and hydrological parameters, is evaluated.

Study area

The study site is the Tibo catchment which is located in Gavieira village, in the municipality of Arcos de Valdevez, inside the National Park of Peneda-Gerês (Fig. 1a). Tibo catchment has an area of 1.21 km² and a perimeter of 5.8 km. The catchment's height varies from 450 to 1,100 m (asl) and its main orientation is SW-NE (Fig. 1b). The catchment's hydrographical network, which seems to be tectonically controlled, mainly drains to the north and north-east. This is a steep slope area, with 38 % of the catchment area with slope angle between 25° and 35° and 17 % above 35°. In some sectors of the catchment, slope angle values of 45° and above are reached, in the deeply channeled hydrographical network banks, mainly controlled by bedrock faulting.

Geologically, the study area is located in the Hesperic Massif and it is composed, essentially, by Cambrian igneous and metamorphic rocks (SGP 1988), which are basically sin-tectonic and post-tectonic granites and Silurian Pelitic Schists (Moreira and Simões 1988). There are also some SSE-NNW pegmatite dykes and SSW-NNE oriented quartz veins, probably related with deep faulting.

Above the basement, there are different surficial formations (Fig. 3a) which include well-calibrated and fine-grained solifluction deposits which occupy a large part of the study area, with thickness varying from 0.5 m to more than 1 m and they are essentially composed by silty-clayey coarse sands. The "slope deposits" correspond to colluvium and are essentially composed by unconsolidated poorly graded coarse debris, angular gravels, and sands with silty clayey matrix, which is more abundant in the lower parts of these. These deposits are feed by previous landslides being concentrated mainly on concave and lower sections of the slopes, with thickness from less than 1 to 2.5 m. As they are mainly coarse grained and poorly consolidated, they generally present high water permeability. These deposits were mainly derived from Lindoso e

Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of Sao Paulo, Brazil.Listo, F.L.R. Vieira, B.C (2012) **Geomorphology**, 169–170, 30-44 DOI:

10.1016/J.GEOMORPH.2012.01.010. Disponível:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169555X12000311>**Journal Impact Factor (Clarivate) 4.133**

Citações <i>Web of Science</i>	37
Citações <i>Scopus</i>	35
Citações <i>Google Scholar</i>	64
<i>Mendeley - Readers</i>	94
<i>Acessos</i>	1305
<i>CrossRef</i>	14
Última Atualização: Agosto de 2022	

Fontes dos Dados:

<https://clarivate.com><https://www.scopus.com><https://scholar.google.com.br><https://plu.mx/plum>

Abstract: In the city of São Paulo, where about 11 million inhabitants live, landslides and flooding occur frequently, especially during the summer. These landslides cause the destruction of houses and urban equipment, economic damage, and the loss of lives. The number of areas threatened by landslides has been increasing each year. The objective of this article is to analyze the probability of risk and susceptibility to shallow landslides in the Limoeiro River basin, which is located at the head of the Aricanduva River basin, one of the main hydrographic basins in the city of São Paulo. To map areas of risk, we created a cadastral survey form to evaluate landslide risk in the field. Risk was categorized into four levels based on natural and anthropogenic factors: R1 (low risk), R2 (average risk), R3 (high risk), and R4 (very high risk). To analyze susceptibility to shallow landslides, we used the SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability) mathematical model and calculated the Distribution Frequency (DF) of the susceptibility classes for the entire basin. Finally, we performed a joint analysis of the average Risk Concentration (RC) and Risk Potential (RP). We mapped 14 risk sectors containing approximately 685 at-risk homes, more than half of which presented a high (R3) or very high (R4) probability of risk to the population. In the susceptibility map, 41% of the area was classified as stable and 20% as unconditionally unstable. Although the latter category accounted a smaller proportion of the total area, it contained a concentration (RC) of 41% of the mapped risk areas with a risk potential (RP) of 12%. We found that the locations of areas predicted to be unstable by the model coincided with the risk areas mapped in the field. This combination of methods can be applied to evaluate the risk of shallow landslides in densely populated areas and can assist public managers in defining areas that are unstable and inappropriate for occupation.



Mapping of risk and susceptibility of shallow-landslide in the city of São Paulo, Brazil

Fabrizio de Luiz Rosito Listo^{*}, Bianca Carvalho Vieira

Geography Department, University of São Paulo, Brazil, Avenue Professor Lineu Prestes, 333, Cidade Universitária, São Paulo, Brazil

ARTICLE INFO

Article history:
Received 2 February 2010
Received in revised form 30 August 2010
Accepted 17 January 2012
Available online 25 January 2012

Keywords:
Geomorphology
Shallow landslide
Risk analysis
Susceptibility
SHALSTAB model
Urban area

ABSTRACT

In the city of São Paulo, where about 11 million people live, landslides and flooding occur frequently, especially during the summer. These landslides cause the destruction of houses and urban equipment, economic damage, and the loss of lives. The number of areas threatened by landslides has been increasing each year. The objective of this article is to analyze the probability of risk and susceptibility to shallow landslides in the Limoeiro River basin, which is located at the head of the Aricanduva River basin, one of the main hydrographic basins in the city of São Paulo. To map areas of risk, we created a cadastral survey form to evaluate landslide risk in the field. Risk was categorized into four levels based on natural and anthropogenic factors: R1 (low risk), R2 (average risk), R3 (high risk), and R4 (very high risk). To analyze susceptibility to shallow landslides, we used the SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability) mathematical model and calculated the Distribution Frequency (DF) of the susceptibility classes for the entire basin. Finally, we performed a joint analysis of the average Risk Concentration (RC) and Risk Potential (RP). We mapped 14 risk sectors containing approximately 685 at-risk homes, more than half of which presented a high (R3) or very high (R4) probability of risk to the population. In the susceptibility map, 41% of the area was classified as stable and 20% as unconditionally unstable. Although the latter category accounted a smaller proportion of the total area, it contained a concentration (RC) of 41% of the mapped risk areas with a risk potential (RP) of 12%. We found that the locations of areas predicted to be unstable by the model coincided with the risk areas mapped in the field. This combination of methods can be applied to evaluate the risk of shallow landslides in densely populated areas and can assist public managers in defining areas that are unstable and inappropriate for occupation.

© 2012 Elsevier B.V. All rights reserved.

1. Introduction

Since 2007, half of the world's population has lived in urban areas, and the number of people living in urban areas may double in the next thirty years (Véron, 2007). Growing populations increase the vulnerability of cities, making landslide-risk management more complex, especially in developing countries, where the number of people who inhabit risk areas has grown by seventy to eighty million per year (UN, 2005).

The accelerated urbanization in developing countries has contributed to the construction of housing on steep hillsides, often using inadequate building standards, intensifying the occurrence of landslides and resulting in the expansion of risk areas. Additional factors have contributed to this expansion, including economic and social crises with long-term effects, historically inefficient policies for low-income housing, inefficient soil-use management, and a lack of appropriate legislation for the most susceptible areas and technical support for local populations (Ayala, 2002; Carvalho et al., 2007).

Wijkman and Timberlake (1985), Sidle et al. (1985), Anderson and Decker (1992), Alexander (1993), Amaral (1997), Ayala (2002), and others have verified that in developing countries, the impact of landslides is a major cause of loss of human life in densely populated urban areas, whereas in developed countries, it is primarily associated with economic losses. This pattern can be explained by greater prevention initiatives in developed countries. In the principal cities of poorer countries, landslides assume catastrophic proportions due to widespread cuts in embankments, garbage deposits, deforestation, changes in drainage networks, and other anthropogenic pressures without preventive planning (Brunsden and Prior, 1984; Sidle et al., 1985; Crozier, 1986; Fernandes et al., 2004).

In various languages, the concept of risk includes the possibility that a landslide (or a nother natural event) will cause significant social or economic damage to a particular population. Thus, risk areas are the places likely to be reached by natural or induced landslides. Susceptibility, in turn, is determined by the set of natural factors that may contribute to triggering these events. In other words, hillsides have a natural predisposition to landslides as a function of their geologic, topographic and climatic characteristics, among others. When sites with naturally high susceptibility are occupied in an inadequately managed manner (for example, by making cuts in the land and vegetation), there may be substantial risks to the population. Thus, landslide-associated accidents that cause significant social damage

^{*} Corresponding author at: Avenida Senador Casimiro da Rocha, 109B, District Planalto Paulista, Zip code: 04047-002, São Paulo (SP) - Brazil. Tel.: +55 11 3091 8559; fax: +55 11 3091 3159.
E-mail addresses: fabriziolisto@usp.br (F.L.R. Listo), biancav@usp.br (B. Carvalho Vieira).

Saturated hydraulic conductivity of soils in a shallow landslide area in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. Gomes M.C.V., Vieira B.C. (2016) *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 60 (1), pp. 53-65. DOI:10.1127/zfg/2016/0229. Disponível: https://www.schweizerbart.de/papers/zfg/detail/60/85506/Saturated_hydraulic_conductivity_of_soils_in_a_shallow_landslide_area_in_the_Serra_do_Mar_Sao_Paulo_Brazil

Journal Impact Factor (Clarivate) 1.063

Citações <i>Web of Science</i>	8
Citações <i>Scopus</i>	5
Citações <i>Google Scholar</i>	14
Última Atualização: Agosto de 2022	

Fontes dos Dados:

<https://clarivate.com>

<https://www.scopus.com>

<https://scholar.google.com.br>

Abstract: The Serra do Mar escarpment, which is located on the southern and southeastern coast of Brazil, is regularly hit by heavy rainfall that triggers numerous mass movements, particularly shallow landslides. Although several studies have investigated the relationship between these processes and the topographic, structural, lithological, and climatic constraints, there are few tests on the hydrological properties that directly influence the stability of slopes. Thus, the main objective of this study is to characterize the spatial distribution of saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) and evaluate its influence on the initiation of shallow landslides in the Serra do Mar in Sao Paulo State (SP). Tests for K_{sat} were performed using the Guelph Permeameter in three scars in an experimental basin in the city of Caraguatatuba-SP, which was strongly affected by landslides in 1967. In each scar, two profiles were excavated (top and center) with tests at six depths up to 2.50 m. To better evaluate the variation in K_{sat} , the particle size and porosity values were used at the same depths. Forty-one K_{sat} values were obtained, and the values varied between three orders of magnitude (10^{-6} to 10^{-4} m s $^{-1}$), with 80% concentrated between 10^{-6} and 10^{-5} m s $^{-1}$. In general, the profiles had lower K_{sat} values near the surface with a tendency to increase up to 5 m and significant hydraulic discontinuities between 1 and 2.5 m. It is believed, therefore, that a study of K_{sat} variation can provide important information on the rupture mechanisms within the Serra do Mar and define areas for real-time hydrological monitoring.



Saturated hydraulic conductivity of soils in a shallow landslide area in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil

Maria Carolina Villaça Gomes¹ and Bianca Carvalho Vieira^{2*}

¹ Graduate Program in Physical Geography, University of São Paulo, Brazil, Avenida São Remo, 463, Ap. 61B, Butantã, São Paulo (SP), Brazil. mariacarolinavg@usp.br

^{2*} Department of Geography, University of São Paulo, Brazil, Avenida Prof. Lineu Prestes, 338, Cidade Universitária, São Paulo (SP), Brazil. biancav@usp.br

With 9 figures and 1 table

Abstract: The Serra do Mar escarpment, which is located on the southern and southeastern coast of Brazil, is regularly hit by heavy rainfall that triggers numerous mass movements, particularly shallow landslides. Although several studies have investigated the relationship between these processes and the topographic, structural, lithological, and climatic constraints, there are few tests on the hydrological properties that directly influence the stability of slopes. Thus, the main objective of this study is to characterize the spatial distribution of saturated hydraulic conductivity (K_{sat}) and evaluate its influence on the initiation of shallow landslides in the Serra do Mar in São Paulo State (SP). Tests for K_{sat} were performed using the Guelph Permeameter in three scars in an experimental basin in the city of Caraguatuba-SP, which was strongly affected by landslides in 1967. In each scar, two profiles were excavated (top and center) with tests at six depths up to 2.50 m. To better evaluate the variation in K_{sat} , the particle size and porosity values were used at the same depths. Forty-one K_{sat} values were obtained, and the values varied between three orders of magnitude (10^{-6} to 10^{-4} m s⁻¹), with 80% concentrated between 10^{-6} and 10^{-5} m s⁻¹. In general, the profiles had lower K_{sat} values near the surface with a tendency to increase up to 5 m and significant hydraulic discontinuities between 1 and 2.5 m. It is believed, therefore, that a study of K_{sat} variation can provide important information on the rupture mechanisms within the Serra do Mar and define areas for real-time hydrological monitoring.

Keywords: Hydraulic Conductivity, Shallow Landslides, Serra do Mar, Guelph Permeameter, Hydraulic Discontinuities

1. Introduction

The Serra do Mar escarpment (SM), a geological-geomorphological compartment located along the coast (1,500 km) of the southern and southeastern regions of Brazil, are regularly hit by heavy rainfall, which can reduce the stability of its steep slopes and generate widespread mass movements. Several of these events have caused large numbers of casualties and significant economic losses, including the incidents in Caraguatuba in 1967 (Fig. 1), Cubatão in 1985, and the Serra do Mar in the states of Rio de Janeiro and Paraná in 2011, which amounted to more than 1,000 fatalities. The victims of all these events, particularly for the states of Rio de Janeiro and São Paulo, have totaled more than 3,200 since 1928. Despite being considered a high susceptibility area, the Serra do Mar has different types

of occupation throughout most of its extension, especially urban centers, generating a significant increase in risk areas. Faced with this scenario, since the 1960s, geological-geotechnical and geomorphological studies have been conducted in a more systematic manner (e.g., Meis & Silva 1968, Barata 1969, Costa Nunes 1969, Jones 1973, De Ploey & Cruz 1979, Ipt 1986, Vargas Jr. et al. 1986, Wolle & Hachich 1989, Lacerda et al. 1997, Gabbard et al. 1998, Fernandes et al. 2004 and Kanji et al. 2008). However, despite the fact that there are now more studies available, due to the great variability of soils, rocks, vegetation, and rainfall distribution, there is still a lack of research on the hydrological behavior during intense rainy periods, especially field surveys and long-time monitoring.

Among the properties, soil hydraulic conductivity plays an important role in water movement and may reduce the stability of slopes caused by variation in the soil

Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. (2015). Nery, T.D., Vieira, B.C. *Bull Eng Geol Environ* 74, 369–378 (2015). <https://doi.org/10.1007/s10064-014-0622-8>. Disponível: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10064-014-0622-8>

Journal Impact Factor (Clarivate) 4.298

Citações <i>Web of Science</i>	20
Citações <i>Scopus</i>	21
Citações <i>Google Scholar</i>	50
Última Atualização: Agosto de 2022	

Fontes dos Dados:

<https://clarivate.com>

<https://www.scopus.com>

<https://scholar.google.com.br>

Abstract: The Serra do Mar Mountain range is a fault scarp with steep slopes that are often affected by shallow landslides triggered by extreme rainfall. Most of these events result in casualties and economic and environmental damage, especially in areas close to urban centers, major roadways and agricultural areas. The goal of this study was to evaluate the susceptibility to shallow landslides in the Serra do Mar, specifically within a drainage basin affected by such an event in January of 1985. For this purpose, the mathematical modeling technique of SINMAP was used by introducing the topographic values from a digital terrain model as well as geotechnical and hydrological values from previous studies performed in the Serra do Mar. In all, 32 susceptibility scenarios were generated, and three were analyzed for this study. These scenarios were validated using landslide scar maps produced using orthophotography; this technique was also used to analyze the functions of morphological parameters (e.g., slope angle, curvature and hypsometric features). The basin was classified as unstable, with landscape rates above 70 % for all three of the scenarios chosen. A higher landscape frequency was expected on straight slopes with angles between 30° and 50° under unsaturated soil conditions, as evidenced by low moisture rates, especially for N–S-facing slopes. The susceptibility maps generated using this model should prove useful for other critical parts of the Serra do Mar to understand better and, above all, predict these landslides, which annually cause significant damage in Brazil.

Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model

Talita Eden Nery · Eliana Carvalho Vieira

Received: 8 February 2014 / Accepted: 29 April 2014
© Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Abstract The Serra do Mar mountain range is a tectonic escarpment with steep slopes that are often affected by shallow landslides triggered by extreme rainfall. Most of these events result in casualties and economic and environmental damage, especially in areas close to urban centers, major roadways and agricultural areas. The goal of this study was to evaluate the susceptibility to shallow landslides in the Serra do Mar, specifically within a drainage basin affected by such an event in January of 1985. For this purpose, the mathematical modeling technique of SINMAP was used by introducing the topographic values from a digital terrain model as well as geotechnical and hydrological values from previous studies performed in the Serra do Mar. In all, 32 susceptibility scenarios were generated, and three were analyzed for this study. These scenarios were validated using landslide scar maps produced using orthophotography; this technique was also used to analyze the functions of morphological parameters (e.g., slope angle, curvature and hypsometric features). The basin was classified as unstable, with landslide rates above 70 % for all three of the scenarios chosen. A higher landslide frequency was expected on straight slopes with angles between 30° and 50° under unsaturated soil conditions, as evidenced by low

moisture rates, especially for N-S-facing slopes. The susceptibility maps generated using this model should prove useful for other critical parts of the Serra do Mar to understand better and, above all, predict these landslides, which annually cause significant damage in Brazil.

Keywords Serra do Mar · Shallow landslides · Digital terrain model · SINMAP

Introduction

In Brazil between 1928 and 2011, more than 4,000 deaths occurred because of mass movements. In addition to large urban centers, such as Rio de Janeiro, São Paulo, Recife, and Salvador, the Serra do Mar mountain range, a tectonic escarpment that extends 1,500 km along the south and southeast coast of Brazil and passes through the states of Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná and Santa Catarina, is often affected by events of great magnitude. Geological, geotechnical, and geomorphological characteristics, such as steep slopes and soil with important hydrological discontinuities and sandy textures along with total rainfall that can reach up to 4,500 mm/year in some regions, make the Serra do Mar extremely susceptible to different types of mass-wasting, especially shallow landslides and debris flow. For example, in 2010 and 2011, this geological-geomorphic compartment suffered two major mass movements that together resulted in over 1,200 deaths in the Serra do Mar region of Rio de Janeiro State (Fig. 1).

Despite being considered an area of high susceptibility, the Serra do Mar is occupied by various anthropogenic structures along almost its entire extension, particularly urban districts, creating numerous risk areas. Given this scenario, geological, geotechnical and geomorphological

T. E. Nery
National Study Planning and Monitoring Center for Natural
Disasters, Curitiba, Paraná, Brazil
e-mail: talita.nery@comandoc.gov.br; talitadn@usp.br

T. E. Nery
Graduate Program in Physical Geography, University of São
Paulo, São Paulo, Brazil

E. C. Vieira (✉)
Department of Geography, University of São Paulo, Prof. Lúcio
Furtado Avenue, 338, Cidade Universitária, São Paulo, Brazil
e-mail: elianav@usp.br

Application of the SHALSTAB model for the identification of areas susceptible to landslides: Brazilian case studies. Martins, T., Vieira, B., Fernandes, N., Oka-Fiori, C., Montgomery, D. R. (2017). *Revista De Geomorfologie*, 19(1), 136-144. <https://doi.org/10.21094/rg.2017.015>. Disponível: <https://revistadegeomorfologie.ro/geo/index.php/revista/article/view/17>

Citações <i>Web of Science</i>	5
Citações <i>Semantic Scholar</i>	10
Citações <i>Google Scholar</i>	17
Última Atualização: Agosto de 2022	

Fontes dos Dados:

<https://clarivate.com>

<https://www.semanticscholar.org>

<https://scholar.google.com.br>

Abstract: Since the 1960s, catastrophic and generalized events of hazardous mass movements caused millions of dollars in economic losses and resulted in thousands of fatalities and homelessness in Brazil. To understand these processes and attempt to predict them, mathematical models have been utilized world-wide describing the physics of the process through mathematical equations. The objective of this study was to present two areas widely affected by shallow landslides where the SHALSTAB model was applied to understand the process and to predict potentially unstable areas in several hydrographic basins. Simulations utilized the types of distinct data that were available in each area. From both areas, geotechnical data collected in the field, topographical data from digital topographical maps and Digital Terrain Models (DTM) from Light Detection and Ranging (LiDAR) were utilized. Susceptibility maps were validated using two indexes, scar concentration (SC) and landslide potential (LP), based on landslides that occurred in 1985 and 2011. Both indexes showed satisfactory results given that the unconditionally unstable category described more than 45% of the landslide events, and the LP index displayed the highest values for the most unstable categories.



Application of the SHALSTAB model for the identification of areas susceptible to landslides: Brazilian case studies.

Tiago Damas MARTINS¹ Bianca Carvalho VIEIRA², Nelson Ferreira FERNANDES³, Chisato OKA-FIORI⁴, David, R. MONTGOMERY⁵

¹Cities Institute, Federal University of São Paulo, São Paulo, Brazil

² Department of Geography, University of São Paulo, São Paulo, Brazil.

³ Department of Geography, Federal University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil

⁴ Department of Geography, Federal University of Paraná, Paraná, Brazil

⁵ Department of Earth and Space Sciences, University of Washington, USA

Received 5 November 2017; Revised 20 November 2017; Accepted 1 December 2017

*Correspondence to: Bianca Carvalho VIEIRA, e-mail: biancavc@usp.br

ABSTRACT

Since the 1960s, catastrophic and generalized events of hazardous mass movements caused millions of dollars in economic losses and resulted in thousands of fatalities and homelessness in Brazil. To understand these processes and attempt to predict them, mathematical models have been utilized world-wide describing the physics of the process through mathematical equations. The objective of this study was to present two areas widely affected by shallow landslides where the SHALSTAB model was applied to understand the process and to predict potentially unstable areas in several hydrographic basins. Simulations utilized the types of distinct data that were available in each area. From both areas, geotechnical data collected in the field, topographical data from digital topographical maps and Digital Terrain Models (DTM) from Light Detection and Ranging (LiDAR) were utilized. Susceptibility maps were validated using two indexes, scar concentration (SC) and landslide potential (LP), based on landslides that occurred in 1985 and 2011. Both indexes showed satisfactory results given that the unconditionally unstable category described more than 45% of the landslide events, and the LP index displayed the highest values for the most unstable categories.

KEYWORDS

Serra do Mar; LiDAR; Landslide Potential; Natural Disasters

Modelos em Geografia Física: Conceitos e Aplicações na Previsão de Escorregamentos. Vieira, B. C.; Martins, T. D. *Geosp – Espaço e Tempo (Online)*, v. 20, n. 1, p. 194-206, mês. 2016. ISSN 2179-0892. DOI: [10.11606/issn.2179-0892.geosp.2016.102616](https://doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2016.102616)

Disponível: <https://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/102616>

Citações <i>Semantic Scholar</i>	10
Citações <i>Google Scholar</i>	7
<i>Mendeley - Readers</i>	21
<i>Downloads</i>	268
Última Atualização: Agosto de 2022	

Fontes dos Dados:

<https://www.semanticscholar.org>

<https://scholar.google.com.br>

<https://www.revistas.usp.br>

Abstract: Since the 1960s, catastrophic and generalized events of hazardous mass movements caused millions of dollars in economic losses and resulted in thousands of fatalities and homelessness in Brazil. To understand these processes and attempt to predict them, mathematical models have been utilized world-wide describing the physics of the process through mathematical equations. The objective of this study was to present two areas widely affected by shallow landslides where the SHALSTAB model was applied to understand the process and to predict potentially unstable areas in several hydrographic basins. Simulations utilized the types of distinct data that were available in each area. From both areas, geotechnical data collected in the field, topographical data from digital topographical maps and Digital Terrain Models (DTM) from Light Detection and Ranging (LiDAR) were utilized. Susceptibility maps were validated using two indexes, scar concentration (SC) and landslide potential (LP), based on landslides that occurred in 1985 and 2011. Both indexes showed satisfactory results given that the unconditionally unstable category described more than 45% of the landslide events, and the LP index displayed the highest values for the most unstable categories.

Artigo

Modelos em geografia física: conceitos e aplicações na previsão de escorregamentos

Bianca Carvalho Vieira

USP

Tiago Damas Martins

UFPR

p. 194-206

revista

Geo
USP
espaço e tempo

Volume 20 • nº 1 (2016)

ISSN 2179-0892

Como citar:

VIEIRA, B. C.; MARTINS, T. D. Modelos em geografia física: conceitos e aplicações na previsão de escorregamentos.

Geosp – Espaço e Tempo (Online), v. 20, n. 1, p. 194-206, mês. 2016. ISSN 2179-0892.

Disponível em: <http://www.revistas.usp.br/geosp/article/view/102616>. DOI: <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2179-0892.geosp.2016.102616>.



Este artigo está licenciado sob a Creative Commons Attribution 4.0 License.