



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
E MEIO AMBIENTE



Tese de Doutorado:

**Modelagem morfométrica para avaliação da potencialidade de bacias
hidrográficas a corridas de detritos: proposta aplicada em Caraguatatuba
(SP) e São Sebastião (SP)**

Claudia Vanessa dos Santos Corrêa

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

Coorientadora: Dra. Lucília do Carmo Giordano

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“Júlio de Mesquita Filho”
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Claudia Vanessa dos Santos Corrêa

MODELAGEM MORFOMÉTRICA PARA AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE DE
BACIAS HIDROGRÁFICAS A CORRIDAS DE DETRITOS: PROPOSTA APLICADA
EM CARAGUATATUBA (SP) E SÃO SEBASTIÃO (SP)

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto
de Geociências e Ciências Exatas do *Câmpus*
de Rio Claro, da Universidade Estadual
Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte
dos requisitos para obtenção de Doutora em
Geociências e Meio Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis

Coorientadora: Dra. Lucília do Carmo Giordano

Rio Claro - SP

2018

551.48 Corrêa, Claudia Vanessa dos Santos
C824m Modelagem morfométrica para avaliação da potencialidade de bacias
 hidrográficas a corridas de detritos : proposta aplicada em Caraguatatuba
 (SP) e São Sebastião (SP) / Claudia Vanessa dos Santos Corrêa. - Rio
 Claro, 2018
 275 f. : il., figs., gráfs., tabs., quadros, mapas

 Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de
 Geociências e Ciências Exatas
 Orientador: Fábio Augusto Gomes Vieira Reis
 Coorientadora: Lucília do Carmo Giordano

 1. Hidrologia. 2. Serra do Mar. 3. Corridas de detritos. 4. Simulação
 numérica. 5. Compartimentação fisiográfica. 6. Retro-análise. I. Título.

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

CLAUDIA VANESSA DOS SANTOS CORRÊA

MODELAGEM MORFOMÉTRICA PARA AVALIAÇÃO DA
POTENCIALIDADE DE BACIAS HIDROGRÁFICAS A CORRIDAS DE
DETRITOS: PROPOSTA APLICADA EM CARAGUATATUBA (SP) E
SÃO SEBASTIÃO (SP)

Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de
Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de
Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista
“Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Doutor em
Geociências e Meio Ambiente

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis
IGCE/UNESP/Rio Claro (SP)
Profa. Dra. Cenira Maria Lupinacci da Cunha
DEPLAN/ UNESP/ Rio Claro (SP)
Dr. Eymar Silva Sampaio Lopes
INPE/ São José dos Campos (SP)
Dr. Juliano Oliveira Martins Coelho
CEMADEN/ São José dos Campos (SP)
Dr. Wilson José de Oliveira
PETROBRAS/ Rio de Janeiro (RJ)

Resultado: APROVADA

Rio Claro, SP, 12 de março de 2018.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Agência Nacional do Petróleo (ANP)/ Programa PRH-05 pela bolsa concedida, sem a qual a realização desse trabalho seria inviabilizada.

Agradeço imensamente ao meu orientador Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis, que desde o meu mestrado me incentivou a seguir a carreira acadêmica, sempre esteve presente e me deu todos os nortes.

A minha coorientadora Dra. Lucília do Carmo Giordano, pelas correções dos artigos, pelas parcerias e por todo o grande auxílio no restante do trabalho.

À pós-graduação em Geociências e Meio Ambiente, à Unesp como um todo e a todos os funcionários, professores e técnicos que estiveram presentes ao longo da minha vida universitária e acadêmica nesses 16 anos, desde a graduação até o doutorado. Sou extremamente grata por ter completado meus estudos na Unesp/ Rio Claro e tenho muito orgulho de ter feito parte dessa grande universidade pública e de qualidade. Agradeço especialmente aos funcionários Rosângela Vacello, Márcia Regina Tavorali do Amaral, Maria Célia Zadra Schmidt e André Luiz Lomba, os quais tive contato diariamente ao longo dos últimos 4 anos e sempre estavam de prontidão para me auxiliar.

À Unespetro por todo o apoio e colaboração nesses 4 anos, pela promoção de cursos de alta qualidade e pela excelente estrutura ao aluno. Agradeço especialmente aos funcionários José Maria Cazonato, Rodrigo Goya, Fabiana Rissi, Márcia, Deryk Biotto e ao prof. Dr. Dimas Dias Brito.

Agradeço também ao CNPq/ DAAD pela concessão da minha bolsa de doutorado sanduíche, a qual durante 1 ano foi possível que eu morasse na Alemanha e realizasse estágio no exterior. Aprendi e amadureci muito cientificamente durante esse processo. Agradeço imensamente ao prof. Dr. Todd Ehlers, que me orientou durante esse período, com muita dedicação e comprometimento e ao Dr. Fernando Mazo D'Affonseca, que contribuiu muito na realização deste trabalho. Sou extremamente grata por todo o conhecimento e experiência que tive com vocês.

A minha grande banca de defesa: profa. Dra. Cenira Maria Lupinacci da Cunha, Dr. Wilson Oliveira, Dr. Eymar Lopes e Dr. Juliano Coelho, a qual me deu orientações valiosas e sábias para o fechamento da minha tese.

A minha banca de qualificação (profa. Dra. Paulina Setti Riedel e prof. Dr. José Eduardo Zaine), que enriqueceu muito o trabalho e me norteou na condução do doutorado.

Ao meu querido GEMA – Laboratório de Geologia de Engenharia e Meio Ambiente, no qual fiz muitas parcerias e amizades para toda a vida. Foram 6 anos rindo juntos, estudando e trabalhando arduamente. Agradecimentos especiais à MSc. Beatriz Gabelini, por toda a amizade e apoio; ao Dr. Flávio Rodrigues, pelas discussões, auxílios e grande amizade; ao Dr. Juliano Coelho, pelas risadas, auxílios e discussões; ao MSc. Rodrigo Cerri, por todo o apoio nas questões geológicas da minha tese; Ao MSc. Felipe Sisto, com os dados de campo e parcerias; ao querido André Kolya, pelas conversas em alemão, dicas e paciência; aos queridos Victor Cabral, Rebeca Meyer, Natália Almeida, Débora Targa, Lia Garpelli, Rafael Ribeiro, João Ferreira e Vinícius Veloso por todo o carinho e trocas de experiências durante às reuniões do nosso projeto; à MSc. Ana Maria Amaral com o auxílio nos dados pluviométricos; à MSc. Camila Jardimetti por todo o auxílio e paciência; às queridas Rafaela Bressan, Marina Coura, Flávia Demarchi, Tatiany Correia e Gabriela Hernandes pelas parcerias no campo e por toda a ajuda em meu doutorado.

Aos membros do projeto da Petrobras, o qual aprendi muito e que foi um verdadeiro laboratório para mim e que permeou todo o meu doutorado: MSc. Marcelo Gramani, por todo o apoio com dados relacionados a corridas de detritos; ao Agostinho Ogura pelos auxílios geológicos; ao prof. Dr. Augusto José Pereira Filho pelos esclarecimentos quanto aos dados pluviométricos; ao Dr. Felipe Vemado por dados fornecidos e dúvidas sanadas; ao prof. Dr. Oswaldo Augusto Filho pela concessão de dados cartográficos e à querida Dra. Mariselma Zaine por todo o apoio na estrutura do trabalho.

Ao Dr. Tullius Nery e à Vivian Cristina Dias por compartilhar materiais relacionados às corridas de detritos e por auxiliar em questões geomorfológicas.

Agradeço ao Cemaden por todo o apoio e colaboração no momento final da entrega da tese, especialmente ao Dr. Márcio Moraes.

Agradeço imensamente ao meu querido MSc. Hermes Dias Brito, que me auxiliou em todas as etapas deste trabalho, desde as fases de geoprocessamento até tabulação dos dados. Agradeço também por toda a sua paciência, apoio e carinho durante esses 6 especiais anos.

Agradeço imensamente a minha irmã Carine Corrêa, que me apoiou na busca

desse sonho e sempre acreditou em mim. Agradeço também ao restante da minha família, que sempre estiveram em minha torcida.

À toda família do Hermes, a qual tenho um grande carinho, e sempre me incentivou nesta saga: Dimas Brito, Ana Maria Barbanti, Luísa Brito, Nara Brito e Túlio Brito.

A todos grandes amigos que fiz na pós e a outros, como Anke Schwarz, MSc. Poliana Beatriz, Giovana Athayde, Francine Soares, MSc. Cássia Lemos e Débora Carolina, muito queridos e valiosos para mim.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente estiveram comigo na busca desse sonho. Muito obrigada!

RESUMO

As corridas de detritos são movimentos de massa que se desenvolvem ao longo de redes de drenagem e envolvem fluidos densos, compostos por materiais de diferentes granulometrias e composições, bem como quantidades variáveis de água, identificados como processos naturais constituintes da dinâmica e da modelagem da paisagem. Caracterizam-se pelo extenso raio de alcance, altas velocidades, altas vazões de pico e elevada capacidade de erosão e força de impacto. As áreas mais susceptíveis a ocorrência desses processos no Brasil estão situadas no sopé da Serra do Mar, da Serra da Mantiqueira e da Serra Geral, e no litoral norte do Estado de São Paulo foi registrado um grande evento de escorregamentos e corridas de detritos generalizados em 1967 que afetou a região de Caraguatatuba e São Sebastião, onde se encontra uma malha dutoviária associada a Unidades de Tratamento da Petrobras, outros empreendimentos, estruturas e uma grande área urbana em crescimento. O objetivo geral desta pesquisa é propor uma metodologia para avaliação da potencialidade de bacias hidrográficas à ocorrência de corridas de detritos, através do emprego da compartimentação fisiográfica, de estudos de retro-análise e da simulação numérica do terreno com o *software RAMMS*. A compartimentação fisiográfica revelou que as unidades que possuem contato direto com planícies são aquelas que possuem maior potencialidade a corridas de detritos. Na retro-análise, foi estabelecido o *Fator de Desproporcionalidade*, que possibilitou a análise de incoerências de incidência de cicatrizes de escorregamento em bacias hidrográficas, unidades geológicas e classes de declividade. As bacias Camburu, Pau D'Alho, Canivetal e Santo Antônio foram consideradas como as mais afetadas por escorregamentos e corridas de detritos, sendo que a classe de declividade de 35° a 50° é a mais atingida nesses locais e não houve uma unidade geológica preferencial durante a mobilização desses processos. A simulação numérica revelou que as corridas de detritos da Serra do Mar apresentam um fluxo com caráter reológico predominantemente granular e as zonas de deposição das corridas dão-se preferencialmente em regiões de baixa declividade. O emprego desta metodologia pode auxiliar na identificação de locais com potencialidade a corrida de detritos, especialmente na Serra do Mar, e contribuir com a gestão do meio físico.

Palavras-chave: Serra do Mar. Corridas de detritos. Simulação numérica. Compartimentação fisiográfica. Retro-análise.

ABSTRACT

The debris flows are mass movements that develop along drainage networks and involve generally dense fluids, compose of materials of different granulometries and compositions, as well as variable amounts of water, identified as natural processes that constitute the dynamics and the modeling the landscape. They are characterized by the long range, high speeds, high peak flows, high erosion capacity and impact force. The areas most susceptible to the occurrence of these processes in Brazil are in the foothills of the Serra do Mar, Serra da Mantiqueira and Serra Geral, and on the north coast of São Paulo State there was a great event of landslides and debris flows in 1967 which affected the region of Caraguatatuba and São Sebastião, where there is a pipeline network associated with Petrobras Treatment Units, other enterprises, structures and a large urban area in growth. The general aim of this research is to propose a methodology to evaluate the potential of watersheds to the occurrence of debris flows, using physiographic compartmentalization, retro-analysis studies and numerical simulation of the terrain with *Ramms* software. The physiographic compartmentalization revealed that the units that have direct contact with lowlands are those that have greater susceptibility to debris flows. In the retro-analysis, the *Disproportionality Factor* was established, which made it possible to analyze inconsistencies in the incidence of landslide scars in watersheds, geological units and declivity classes. The Camburu, Pau D'Alho, Canivetal and Santo Antônio watersheds were the most affected by landslides and debris flows, and the slope class of 35° to 50° is the most affected in these areas and there was no preferential geological unit during the mobilization of these processes. The numerical simulation revealed that the Serra do Mar debris flows have a predominantly granular rheological flow and the deposition zones of the flows are given in regions of low slope. Thus, the use of this methodology can help in the identification of areas with potential for the debris flows, especially in Serra do Mar, and contribute to the management of the physical environment.

Keywords: Serra do Mar. Debris flows. Numerical simulation. Physiographic compartmentalization. Retro-analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de distribuição de corrida de detritos no mundo	24
Figura 2. Exemplos de corridas de detritos em regiões serranas no Brasil e no mundo	26
Figura 3. a) Corrida de detritos deflagrada entre os dias 11 e 12 de Janeiro de 2011 na Bacia do Rio da Posse, Teresópolis (RJ); (b) Desenvolvimento de corridas de detritos em canais de menores ordens, cujos fluxos alcançaram o canal principal. Processo ocorrido em Cubatão (SP), 1994	34
Figura 4. Corrida de detritos de 1967 na Bacia do Rio Santo Antônio, Caraguatatuba (SP).	35
Figura 5. (a) Corrida de detritos viscosa, com predominância de transporte de materiais grosseiros em Guaratuba (Paraná), no ano de 2017.(b) Corrida de detritos de caráter plástico registrada em Dunkeld (Escócia), em agosto de 2004, com predominância de materiais finos na área de deposição.....	36
Figura 6. Modelo fenomenológico das corridas de detritos, baseada na topografia do relevo (altimetria e declividade) e as diferentes fases do processo (início, transporte e erosão, deposição parcial e deposição).....	38
Figura 7. Classificação de corrida de detritos de acordo com a magnitude do movimento..	38
Figura 8. Principais fases de uma corrida de detritos	39
Figura 9. Corrida de detritos do tipo primária/ não canalizada no Córrego Guarda-Mão, Itaoca (SP), ocorrido em Janeiro de 2014.....	48
Figura 10. (a) Corrida de detritos do tipo não canalizada e (b) corrida de detritos do tipo canalizada	48
Figura 11. Esquema de uma onda de corrida de detritos com frente rochosa	51
Figura 12. Impactos causados pela corrida de detritos de Caraguatatuba (SP), ocorrida em 18/03/1967.....	58
Figura 13. Comparação entre ortofotos de 1986 e 1994 na área da Bacia Rio das Pedras após a corrida de detritos que atingiu a Refinaria Presidente Bernardes em Cubatão (SP)/ fevereiro de 1994.....	63
Figura 14. Técnicas de mitigação de corridas de detritos.....	72
Figura 15. Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa	82
Figura 16. Mapa das isoietas para o evento ocorrido em 1967 na região de Caraguatatuba (SP).	95
Figura 17. Aspectos geográficos da área de estudo	106
Figura 18. Bacias hidrográficas que compõe a área de estudo	107
Figura 19. Mapa geológico da área de estudo	109
Figura 20. Perfil topográfico seccionando a bacia do rio Santo Antônio (Caraguatatuba, SP) na região de escarpa e planície	110
Figura 21. Mapa de declividade da área de estudo, em graus	111
Figura 22. Modelo Digital do Terreno (MDT) da área de estudo, com hipsometria exibida em metros.	112
Figura 23. (a) TEBAR, em São Sebastião; (b) UTGCA, em Caraguatatuba	115
Figura 24. Vista das escarpas (Unidade IV) para a planície litorânea (Unidade IA) de Caraguatatuba.....	124
Figura 25. Planície litorânea em São Sebastião (Unidade I) e ao fundo Escarpas da Serra do Mar (Unidade VIII).....	124

Figura 26. Processo de corrida de lama no evento de 18/03/1967 na Bacia Santo Antônio, em Caraguatatuba (SP), em planície costeira (unidade fisiográfica IA).....	125
Figura 27. Depósito de blocos em planície fluvial na unidade IB, indicando ocorrência de corridas de detritos	126
Figura 28. Cicatrizes de escorregamento e ocorrência das corridas de detritos do evento de 1967 na região de Caraguatatuba identificadas por Olga Cruz	127
Figura 29. Rampa de talus da unidade II com depósito de blocos métricos (Granito)	128
Figura 30. Morro isolado em planície costeira com evidências de rastejo	129
Figura 31. “Paredão” de alto declive na unidade 4, com afloramento rochoso	130
Figura 32. Duto OSVAT na unidade 5.....	131
Figura 33. Relevo de escarpas da Serra do Mar com topos angulosos na unidade fisiográfica VIII.	133
Figura 34. Aspecto geral da morfologia na unidade XVI. Destaque para os vales abertos, vertentes convexas e topos arredondados.....	137
Figura 35. Listagem das análises estatísticas normalizadas.	139
Figura 36. Cicatrizes de escorregamento de 1967, identificadas por Fúlfaro et al. (1976). 140	
Figura 37. Cicatrizes de escorregamento idenitificadas nas ortofotos da Emplasa (2011) 142	
Figura 38. Samambaia do gênero Gleichenia. (a) Detalhe e aspectos gerais da planta; (b) Cicatriz de escorregamento em Caraguatatuba com a presença da respectiva Pteridófita..	143
Figura 39. Porcentagem de incidência dos escorregamentos de 1967 em relação à porcentagem em área das bacias hidrográficas compreendidas nesta pesquisa.....	144
Figura 40. Fatores de desproporcionalidades calculados para as bacias hidrográficas de Caraguatatuba, considerando as cicatrizes de escorregamento do evento de 1967.....	145
Figura 41. Porcentagem de incidência dos escorregamentos entre 1967 e 2011 em relação à porcentagem em área das bacias hidrográficas compreendidas nesta pesquisa	146
Figura 42. Fatores de desproporcionalidades calculados para as bacias hidrográficas de Caraguatatuba, considerando as cicatrizes de escorregamento do evento de 1967.	147
Figura 43. Mapa de declividade das bacias hidrográficas afetadas pelo evento de 1967..	148
Figura 44. Mapa da geologia das bacias hidrográficas afetadas pelo evento de 1967.	149
Figura 45. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes de declividades, sob isoietas menores que 400 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.	151
Figura 46. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes de declividade, sob isoietas menores que 400 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967. ...	151
Figura 47. Correlação da porcentagem em área da incidência escorregamentos e porcentagem em área das classes de declividades, sob isoietas entre 400 e 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967	152
Figura 48. Fatores de desproporcionalidades das classes de declividade, sob isoietas entre 400 e 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.....	152
Figura 49. Porcentagem em área da incidência escorregamentos e porcentagem em área das classes de declividade, sob isoietas maiores que 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967	153
Figura 50. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes de declividade, sob isoietas maiores que 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967	153
Figura 51. Comparação entre a porcentagem em área da incidência escorregamentos e a porcentagem em área das classes de declividade nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967	154

Figura 52. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes de declividade nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967	154
Figura 53. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem das unidades geológicas, sob isoietas menores que 400 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967	156
Figura 54. Fatores de desproporcionalidades calculados para as unidades geológicas, sob isoietas menores que 400 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967...	157
Figura 55. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das unidades geológicas, sob isoietas entre 400 e 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967	157
Figura 56. Fatores de desproporcionalidades calculados para as unidades geológicas, sob isoietas entre 400 e 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967	158
Figura 57. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das unidades geológicas, sob isoietas maiores que 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967	158
Figura 58. Fatores de desproporcionalidades calculados para as unidades geológicas, sob isoietas maiores que 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967	159
Figura 59. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das unidades geológicas nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967	159
Figura 60. Fatores de desproporcionalidades calculados para as unidades geológicas nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967	160
Figura 61. Listagem das análises estatísticas normalizadas na bacia Santo Antônio.....	161
Figura 62. Mapa de declividade com os locais afetados pelos escorregamentos de 1967 na Bacia Santo Antônio	162
Figura 63. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes de declividades, sob isoietas menores que 400 mm, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967.	163
Figura 64. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes de declividade, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967, sob isoietas menores que 400 mm	163
Figura 65. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes de declividades, sob isoietas com precipitação acumulada entre 400 a 500 mm, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967	164
Figura 66. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes de declividade, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967, sob isoietas acumuladas entre 400 a 500 mm.....	165
Figura 67. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes de declividades, sob isoietas menores com precipitação acumulada maior que 500 mm, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967	166
Figura 68. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes de declividade, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967, sob isoietas acumuladas maior que 500 mm.....	166
Figura 69. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes de declividades, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967	167

Figura 70. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes de declividade, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967.....	167
Figura 71. Mapa da geologia da Bacia Santo Antônio com as unidades afetadas pelo evento de 1967.....	169
Figura 72. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes geológicas, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967.....	170
Figura 73. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes geológicas, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967.....	170
Figura 74. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes geológicas, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967 sob valores pluviométricos acumulados menores que 400 mm.....	171
Figura 75. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes geológicas, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967 sob valores pluviométricos acumulados menores que 400 mm.....	171
Figura 76. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes geológicas, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967 sob valores pluviométricos acumulados de 400 a 500 mm.....	172
Figura 77. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes geológicas, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967 sob valores pluviométricos acumulados de 400 a 500 mm.....	172
Figura 78. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes geológicas, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967 sob valores pluviométricos acumulados maior que 500 mm.....	173
Figura 79. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes geológicas, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967 sob valores pluviométricos acumulados de maior que 500 mm.....	173
Figura 80. Mapa de isópacas do depósito das corridas de detritos de 1967 na Bacia Santo Antônio (Caraguatatuba/ SP).....	174
Figura 81. Observações de campo evidenciando espessuras de depósitos do processo de corrida de detritos de 1967 e tamanhos dos blocos.....	176
Figura 82. Observações de campo evidenciando espessuras de depósitos do processo de corridas de detritos de 1967 e tamanhos dos blocos.....	177
Figura 83. Registro de campo do ponto 6.....	178
Figura 84. Observações de campo a respeito da espessura de depósitos.....	179
Figura 85. Depósito de blocos nas margens de ao longo do Ribeirão do Ouro.....	180
Figura 86. Deposição dos depósitos nos rios tributários do Santo Antônio.....	181
Figura 87. Fotografias referentes aos pontos de campo 11, 12 e 14.....	182
Figura 88. Áreas (em m ²) das zonas de isópacas da corrida de detritos de 1967, na bacia Santo Antônio.....	184
Figura 89. Volumes calculados (em m ³) das zonas de isópacas da corrida de detritos de 1967, na bacia Santo Antônio.....	185
Figura 90. Modelo Digital do Terreno (MDT) da área-alvo em escala 1:10.000 (IGC, 1979) com o buffer de 600 metros e cicatrizes de escorregamento mapeadas por Fúlfaro et al. (1976).....	187
Figura 91. Modelo Digital do Terreno (MDT) da área-alvo em escala 1:10.000 (IGC, 1979) com o buffer de 600 metros e cicatrizes de identificadas em fotografias aéreas de 1973 ..	188
Figura 92. Local de ocorrência da corrida de detritos na faixa OSPAR.....	190

Figura 93. Registros fotográficos da corrida de detritos na faixa de travessia do duto OSPAR	192
Figura 94. Fotografia aérea de 1973, exibindo o canal na planície da bacia Santo Antônio ainda não retificado	195
Figura 95. Setor retificado do Rio Santo Antônio na planície nos dias atuais	196
Figura 96. Configuração final da corrida de detritos simulada após 74 minutos considerando a altura do fluxo	199
Figura 97. Comparação entre áreas de deposição modeladas considerando as cicatrizes de Fúlfaro et al. (1976) a partir de espessura de ruptura de 1 metro e densidade de 1800 kg/m^3 e as áreas de deposição identificadas neste trabalho	200
Figura 98. Velocidades máximas atingidas pelas corridas de detritos no cenário 1	201
Figura 99. Rodovia dos Tamoios em 1967, após o evento	202
Figura 100. Configuração final da corrida de detritos simulada após 74 minutos considerando a altura do fluxo	202
Figura 101. Velocidades máximas atingidas pelas corridas de detritos no cenário 4	203
Figura 102. Comparação entre áreas de deposição modeladas considerando as cicatrizes de Fúlfaro et al. (1976) a partir de espessura de ruptura de 1,3 metros e densidade de 1800 kg/m^3 e as áreas de deposição identificadas neste trabalho	204
Figura 103. Diferenças das áreas de deposição do material das corridas de detritos entre os cenários 1, 2 e 3 (a) e 4, 5 e 6 (b)	205
Figura 104. Configuração final da corrida de detritos simulada após 95 minutos considerando a altura do fluxo	206
Figura 105. Comparação entre áreas de deposição modeladas considerando as cicatrizes de Fúlfaro et al. (1976) a partir de espessura de ruptura de 1,5 metros e densidade de 2000 kg/m^3 e as áreas de deposição identificadas neste trabalho	207
Figura 106. Velocidades máximas atingidas pelas corridas de detritos no cenário 7	208
Figura 107. Cicatrizes de escorregamento não consideradas no mapeamento de Fúlfaro et al. (1976)	209
Figura 108. Configuração final da corrida de detritos simulada após 120 minutos considerando a altura do fluxo	209
Figura 109. Comparação entre áreas de deposição modeladas considerando as cicatrizes mapeadas em fotografias aéreas (1973) a partir de espessura de ruptura de 1,0 metro e densidade de 1800 kg/m^3 e as áreas de deposição identificadas neste trabalho	210
Figura 110. Velocidades máximas atingidas pelas corridas de detritos no cenário 8	211
Figura 111. Configuração final da corrida de detritos simulada após 109 minutos considerando a altura do fluxo	212
Figura 112. Velocidades máximas atingidas pelas corridas de detritos no cenário 11	213
Figura 113. Comparação entre áreas de deposição modeladas considerando as cicatrizes mapeadas em fotografias aéreas (1973) a partir de espessura de ruptura de 1,3 metros e densidade de 1800 kg/m^3 e as áreas de deposição identificadas neste trabalho	214
Figura 114. Configuração final da corrida de detritos simulada após 109 minutos considerando a altura do fluxo	215
Figura 115. Comparação entre áreas de deposição modeladas considerando as cicatrizes mapeadas em fotografias aéreas (1973) a partir de espessura de ruptura de 1,5 metros e densidade de 2000 kg/m^3 e as áreas de deposição identificadas neste trabalho	216
Figura 116. Depósito da corrida de detritos de 1967 próximo à unidade da UTGCA, segundo relatos dos trabalhadores locais, pesquisadores que conhecem a área e moradores do entorno	217

Figura 117. Escorregamento na bacia Santo Antônio, em Caraguatatuba, em março de 2017, 50 anos após o evento de 1967	218
Figura 118. Corridas de lama e inundação no evento de 1967 em Caraguatatuba	219

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Classificação de corrida de detritos de acordo com a magnitude do movimento.	39
Quadro 2. Porcentagem de ocorrência de corrida de detritos de acordo com a ordem dos rios em uma bacia hidrográfica	44
Quadro 3. Principais casos brasileiros, das regiões sul e sudeste, de ocorrência de corridas de detritos	67
Quadro 4. Fatores utilizados para determinação de vulnerabilidade de uma área à geração de corridas de detritos, atributos e notas parciais	70
Quadro 5. Tipos de obras de controle contra corridas de detritos e suas respectivas funções.	71
Quadro 6. Classificação de modelos matemáticos.	75
Quadro 7. Critérios adotados para análise e fotointerpretação geomorfológica e geológica e delimitação das unidades de compartimentação fisiográfica.	89
Quadro 8. Tipo de parâmetro de entrada e formato	103
Quadro 9. Síntese do evento ocorrido em 18 de março de 1967.....	117
Quadro 10. Aspectos geológicos-geotécnicos das unidades fisiográficas delineadas.	119
Quadro 11. <i>Inputs</i> requeridos no <i>software</i> RAMMS, formato, origem de aquisição e parâmetro numérico	194
Quadro 12. Rotina estabelecida nas simulações dos diferentes cenários para as 2 áreas de lançamento consideradas	196
Quadro 13. Listagem dos arquivos .gif gerados pelas simulações realizadas no <i>software</i> RAMMS, presentes no CD-ROM que acompanha esta obra.	198

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Volume (m^3) das zonas de deposição calculadas segundo a correlação empírica relatada por Nery (2016).	184
Tabela 2. Áreas e volumes totais calculados nas superfícies das cicatrizes de escorregamento, em planta.	189
Tabela 3. Estimativa dos volumes totais calculados nas cicatrizes de escorregamento considerando as diferentes densidades.	189

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1. Limite inferior da precipitação acumulada para deflagração de corrida de detritos.....	47
Equação 2. Equação geral do cálculo da velocidade de corridas de detritos.	55
Equação 3. Cálculo da velocidade de processos de corridas de detritos (para movimentos acima de 10 m/s)	55
Equação 4. Cálculo da velocidade de processos de corridas de detritos (para movimentos acima de 10 m/s).	55
Equação 5. Cálculo da velocidade de processos de corridas de detritos (para movimentos entre 2m/s e 4m/s).	56
Equação 6. Cálculo da velocidade de processos de corridas de detritos (para movimentos entre 2 m/s e 4 m/s).	56
Equação 7. Cálculo da velocidade de corrida de detritos em estudos de retro-análise	57
Equação 8. Cálculo da força de impacto de uma corrida de detritos.	59
Equação 9. Cálculo do volume total mobilizado em uma corrida de detritos	61
Equação 10. Cálculo da viscosidade de uma corrida de detritos.....	62
Equação 11. Cálculo do comportamento de um fluxo sob escoamento em substrato inconsolidado (equivalente ao grau de erosão).....	64
Equação 12. Cálculo para estimar a vazão de pico em corridas de detritos	65
Equação 13. Lei de fricção Voellmy	78
Equação 14. Cálculo do volume produzido por cicatrizes de escorregamento	94
Equação 15. Equação do cálculo do Fator de Desproporcionalidade (<i>FD</i>).....	96
Equação 16. Volume estimado dos depósitos de corridas de detritos.....	100

LISTA DE SÍMBOLOS

A_1 – Área de impacto

A_c – Área da cicatriz

A_d - Área do depósito

AT – Área total da bacia

a , b e c – Constantes que variam para cada local (equação para estimar velocidade em corrida de detritos)

b – Largura do canal (velocidade de corrida de detritos em estudos de retro-análise)

CV – Concentração volumétrica de sólidos

D – Espessura do fluxo

d_{50} – Diâmetro médio dos grãos

F – Força de impacto

FD – Fator de desproporcionalidade

g – Aceleração da gravidade

GE – Grau de erosão

H – Altura do fluxo (equação para estimar velocidade de corrida de detritos e lei de fricção de Voellmy)

h - Espessura média da corrente (equação geral para estimar velocidade de corrida de detritos)

i – Unidade de análise

I - Limite inferior da precipitação acumulada de deflagração

$I1$ - Intensidade de precipitação média da hora que precede a corrida de detritos

N - Tensão normal na superfície de corrida

PA - Área de ocorrência de cada unidade dentro de uma região pré-determinada

PI - Área de incidência de escorregamentos

Q – Volume total mobilizado na corrida de detritos

Q_0 – Vazão de enchente no canal de saída da bacia (seção crítica) no período de 100 anos

q_T – Vazão de pico

r – Região pré-estabelecida

R_h - Raio hidráulico
 S – Declividade do canal
 S - Resistência de fricção (Lei de fricção de Voellmy)
 t - Duração total da precipitação
 V – Velocidade da corrida de detritos
 V_c – Volume do material mobilizado pelas cicatrizes de escorregamento
 V_d - Volume do depósito
 V_s – Velocidade da superfície
 Y_d – Peso específico do fluxo
 α – Coeficiente de impacto
 ξ - Fricção turbulenta viscosa (Lei de fricção de Voellmy)
 ρ – Densidade
 U - Vetor da velocidade do fluxo nas direções x e y (Lei de fricção de Voellmy)
 μ - Coeficiente de atrito seco tipo Coulomb
 μ_N – Viscosidade Newtoniana
 Θ - Declividade do canal
 $\varnothing$ - Ângulo da inclinação (Lei de fricção de Voellmy)
 γ – Peso específico das corridas de detritos
 γ_f – Densidade do fluido

LISTA DE SIGLAS

ANA – Agência Nacional das Águas
 ANP – Agência Nacional do Petróleo
 CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
 CRED - Centro de Pesquisa de Epidemiologia em Desastres
 DNIT - Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
 EMPLASA - Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A
 GASTAU - Gasoduto Caraguatatuba – Taubaté
 GLP – Gás Liquefeito de Petróleo
 GPS - *Global Positioning System* (Sistema de Posicionamento Global)
 IAEG – *International Association of Engineering Geology*
 IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
 IG – Instituto Geológico do Estado de São Paulo

IGC - Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo
LABHIDRO – Laboratório de Hidrometeorologia da USP
MDT – Modelo Digital do Terreno
NASA - *National Aeronautics and Space Administration*
ONU – Organização das Nações Unidas
OMS - Organização Mundial da Saúde
OSBAT - Oleoduto São Sebastião/Cubatão
OSPAR - Oleoduto Santa Catarina/ Paraná
OSPLAN - Oleoduto São Sebastião/Paulínia
RAMMS - *Rapid Mass Movements Simulations*
SIG – Sistema de Informação Geográfica
SMA – Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo
SPOT - *Satellite Pour l'Observation de la Terre*
SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*
TEBAR - Terminal Aquaviário Almirante Barroso
TRANSPETRO - Petrobras Transporte S.A.
USP – Universidade de São Paulo
UNESP – Universidade Estadual Paulista
UNICAMP – Universidade de Campinas
UTGCA - Unidade de Tratamento de Gás Monteiro Lobato
UTM - Universal Transversal de Mercator
VASP - Viação Aérea São Paulo

Sumário

1. INTRODUÇÃO	22
1.1. Hipótese e Objetivos	31
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1. As corridas de detritos	33
2.1.1. Os mecanismos deflagradores de corridas de detritos (fase de ocorrência)	40
2.1.2. O fluxo na corrida de detritos (fase de transporte)	49
2.1.3. A deposição do fluxo	52
2.2. Principais parâmetros envolvidos nas corridas de detritos	54
2.3. Principais casos brasileiros	65
2.4. Principais medidas mitigadoras à ocorrência de corridas de detritos	69
2.5. Modelagem de corrida de detritos	73
2.5.1. O modelo RAMMS (<i>Rapid Mass Movement Simulation</i>)	78
3. MATERIAIS E MÉTODOS	81
3.1. Levantamento bibliográfico e definição da área de estudo	81
3.1.1. Delimitação e caracterização da área de pesquisa	81
3.1.2. Pesquisa bibliográfica em obras de referência	83
3.1.3. Trabalho de campo preliminar	83
3.2. Aquisição, organização, elaboração e tratamento dos dados cartográficos ...	84
3.2.1. Levantamento dos produtos cartográficos e de sensoriamento remoto ...	84
3.2.2. Georreferenciamento dos produtos cartográficos	85
3.2.3. Geração de produtos auxiliares para a compartimentação fisiográfica, estudos de retro-análise e modelagem morfométrica	85
3.3. Elaboração do mapa de compartimentação fisiográfica	87
3.3.1. Delimitação das unidades fisiográficas	87
3.3.2. Estruturação do banco de dados	88
3.3.3. Trabalho de campo intermediário	88
3.4. Retro-análise de eventos de escorregamentos e corridas de detritos que já ocorreram nas áreas de estudo	91
3.4.1. Levantamento e preparação de materiais bibliográficos, fotográficos e cartográficos	91
3.4.2. Georreferenciamento do mapa de cicatrizes de escorregamento de Fúlfaro et al. (1976) e de fotografias aéreas de 1973	92

3.4.3. Extração, vetorização, cálculo de volume e área de cicatrizes de escorregamento	93
3.4.4. Vetorização das isoietas do evento pluviométrico de 1967	94
3.4.5. Análises estatísticas normalizadas das superfícies das cicatrizes de escorregamento	95
3.5. Seleção da área-alvo para modelagem morfométrica em <i>software</i> de simulação 3D	98
3.5.1. Análise dos resultados obtidos pelas análises estatísticas normalizadas	98
3.5.2. Elaboração do mapa de isópacas	99
3.5.3. Preparação e tratamento dos parâmetros de entrada (<i>inputs</i>) para a modelagem morfométrica	101
3.6. Modelagem morfométrica em <i>software</i> de simulação 3D	103
3.6.1. Trabalho de campo em área com registro de ocorrência recente de corridas de detritos	103
3.6.2. Realização de simulações com diversos cenários	104
3.7. Análises dos resultados, síntese e conclusões	105
4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	106
4.1. Características gerais	106
4.2. O evento de 1967	116
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	118
5.1. Compartimentação fisiográfica e caracterização geológico-geotécnica	118
5.1.1. Unidade IA – Planície Costeira	124
5.1.2. Unidade IB – Planície Fluvial	126
5.1.3. Unidade II – Rampas de colúvio e tálus	127
5.1.4. Unidade III – Morros isolados granítico-gnáissicos	128
5.1.5. Unidade IV – Escarpas e Morros em Granitos e Gnaisses	129
5.1.6. Unidade V – Escarpas com cristas orientadas gnáissicas	131
5.1.7. Unidade VI – Morros em gnaiss migmatítico	132
5.1.8. Unidade VII – Morros planálticos gnáissicos	132
5.1.9. Unidade VIII – Escarpas gnáissicas migmatíticas	133
5.1.10. Unidade IX – Escarpas retilíneas gnáissicas	134
5.1.11. Unidade X – Relevo montanhoso em gnaiss	134
5.1.12. Unidade XI – Relevo montanhoso com afloramentos rochosos	135
5.1.13. Unidade XII – Relevo montanhoso granítico-gnáissico	135
5.1.14. Unidade XIII – Morros planálticos graníticos-gnáissicos	135

5.1.15. Unidade XIV – Morros graníticos-gnáissicos	136
5.1.16. Unidade XV – Monolitos graníticos-gnáissicos	136
5.1.17. Unidade XVI – Mar de morros granítico-gnáissico	137
5.1.18. Unidade XVII – Relevo montanhoso em micaxistos e quartzitos	138
5.2. Retro-análise dos escorregamentos e corridas de detritos generalizados na região de Caraguatatuba (SP) em 18/03/1967	138
5.3. Modelagem morfométrica das corridas de detritos de 18/03/1967	174
5.4. Síntese dos resultados	217
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	220
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	223
APÊNDICES	254

1. INTRODUÇÃO

Os desastres naturais constituem hoje uns dos grandes problemas socioeconômicos mundiais. Dentre os fenômenos que mais se destacam, como erupções vulcânicas, terremotos e inundações, cabe citar os movimentos de massa, que são objeto de interesse de grande parte de pesquisadores e planejadores e/ou administradores públicos, pois podem atingir áreas com importantes infraestruturas para um país, como oleodutos, gasodutos, aquedutos, estradas, linhas de transmissão, além de complexos industriais e centros urbanos, tendo como consequência mais grave a perda de vidas humanas (GOMES, 2006).

De acordo com a ONU (1993), um dos fenômenos que mais causam prejuízos financeiros e mortes no mundo são os movimentos de massa. Estes fenômenos naturais são importantes processos de modelamento do relevo e têm sua ocorrência ligada às encostas. Nas cidades estes assumem, em geral, proporções catastróficas, uma vez que são feitas diversas modificações na paisagem natural que acabam se relacionando com os fatores naturais propiciando a deflagração destes processos (BRUNSDEN; PRIOR, 1984; FERNANDES; AMARAL, 1996; LARSEN; TORRES-SÁNCHEZ, 1998; ZERKAL; ZERKAL, 2004; LISTO; VIEIRA, 2012; SAMIA et al., 2017).

Dentre estes fenômenos naturais destacam-se as corridas de detritos, também denominadas de “*debris flow*”, que compreendem uma classe de movimento de massa de alta capacidade erosiva e de grande volume de água, capaz de mobilizar materiais de diferentes composições e dimensões durante sua trajetória, constituindo-se como um importante fator de risco para a população. Begueria et al. (2009) e Kang e Lee (2018) destacam que por serem capazes de atravessar longas distâncias e atingir altas velocidades, a ameaça das corridas é maior do que outros tipos de movimentos de massa. De maneira geral, esses processos são caracterizados por uma movimentação na forma de escoamento, envolvendo fluidos geralmente densos, composto por material grosseiro (blocos de rochas) e material fino (solos), bem como restos vegetais e quantidades variáveis de água (NI; WANG, 1990). Para Massad et al. (1997) as corridas de detritos se diferem dos demais movimentos de massa por possuírem características bastante peculiares: altas velocidades (valores da ordem de 5 a 20 m/s são mais comuns); altas vazões de pico (superando 10 a 20 vezes as vazões de água para uma mesma bacia e mesmo

evento pluviométrico); elevada capacidade de erosão e destruição (tanto das margens, como do fundo dos leitos); forças de impacto variando de 30 a 1.000 kN/m²; transporte de blocos de rochas métricos por grandes distâncias; concentrações de sólidos próximas a 50% e feições sedimentares típicas do processo (inversão granulométrica e imbricamento de blocos).

A ocorrência das corridas de detritos é favorecida por um conjunto de fatores do meio físico, como condições geológicas, geomorfológicas, hidráulicas, climáticas e questões ligadas ao uso e ocupação da terra (fator antrópico), que contribuem simultaneamente para a deflagração e desenvolvimento do processo (GRAMANI, 2001). Fleischman (1978) salienta que as corridas de detritos contribuem significativamente com o contínuo processo evolutivo de relevos montanhosos, responsáveis pela rápida modificação da paisagem. Ferreira (2013) destaca que escorregamentos e corridas de detritos são processos constituintes da dinâmica e da modelagem natural da paisagem, de modo que são caracterizados como eventos importantes para o desenvolvimento de encostas, principalmente nas regiões montanhosas (SELBY, 1993), como as escarpas da Serra do Mar.

Com o aumento populacional das últimas décadas, em sua maioria sem planejamento adequado, a ocorrência de processos de dinâmica superficial, como as corridas de detritos, vem aumentando significativamente, principalmente nos países em desenvolvimento (ALCÁNTARA-AYALA, 2002). A ocupação de encostas íngremes e de margens de córregos sem obedecer a critérios técnicos é um fator que aumenta os danos provocados quando esses eventos ocorrem (WRIGHT; KRONE, 1990).

No mundo, existem registros de corridas de detritos com diferentes características, como volume, velocidade, vazão, etc, deflagradas por fatores tanto externos quanto internos (GRAMANI, 2001). O fenômeno ocorre de maneira natural nas regiões serranas e montanhosas, geralmente associadas a índices pluviométricos elevados e, em cerca de 50 países, são muito frequentemente observados (MIDRIAK, 1985; TAKAHASHI, 1994) (Figura 1). Em áreas tropicais e costeiras são comuns os movimentos de massa na forma de rápidas corridas de detritos, causando enorme destruição na sua trajetória, envolvendo diversos tipos de solos e ambientes geológicos (COLLINS; ZNIDARCIC, 1997) (Figura 2).

Segundo Schuster et al. (2002), a maior quantidade das mortes associadas a movimentos de massa na América Latina foi ocasionada por avalanches, corridas de

detritos e de lama, todos de média-alta velocidade. Dentre os eventos mais notáveis na região pode-se mencionar o acontecido em dezembro de 1999 no povoado de Vargas na Venezuela, onde chuvas de alta intensidade deflagraram uma série de corridas de detritos que causaram aproximadamente 30.000 mortes e perdas econômicas de 1,79 bilhões de dólares (WIECZOREK et al., 2001). Outra grande catástrofe na América do Sul aconteceu no Peru no ano 1970, onde um sismo liberou um grande bloco de gelo no cume do Monte Huascarán, provocando uma corrida de detritos com um volume de aproximadamente 50 milhões de m³, causando a morte de mais de 25.000 pessoas (NUNES; SAYÃO, 2014).

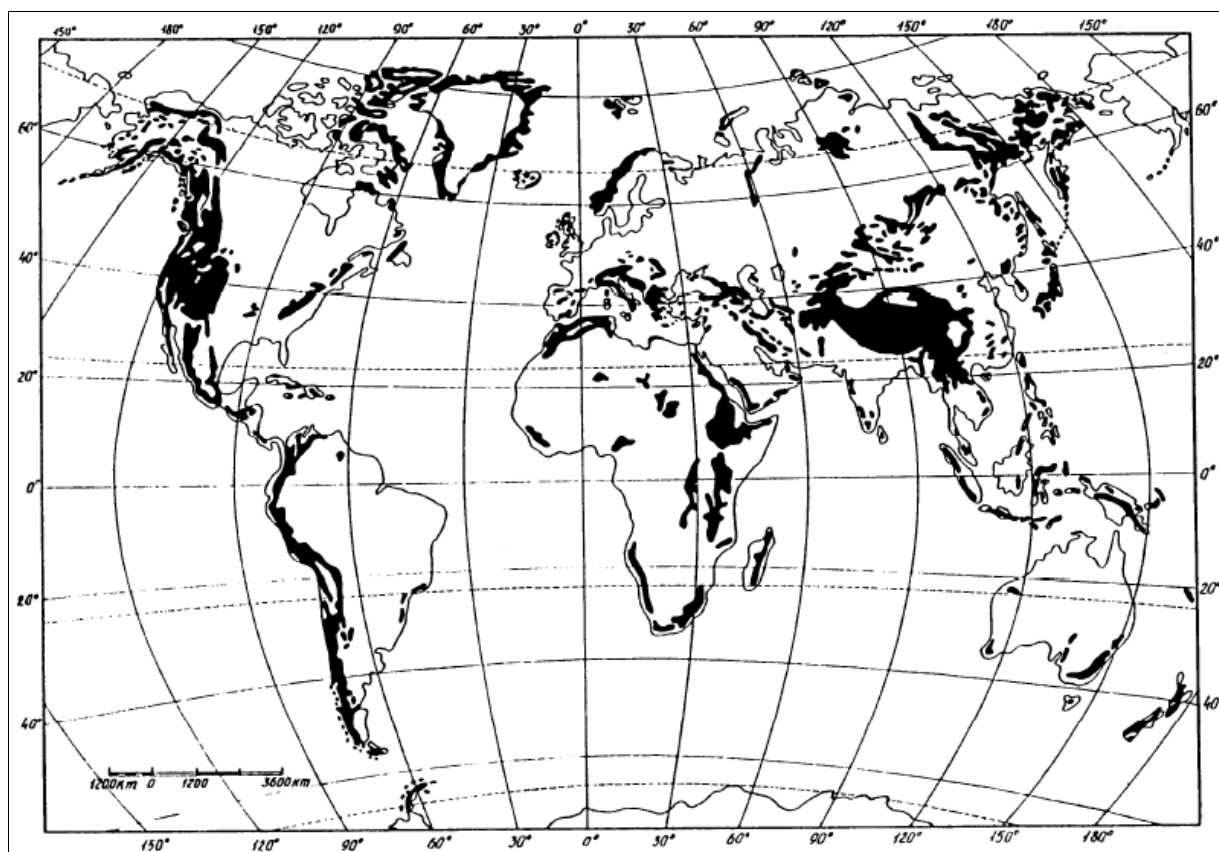


Figura 1. Mapa de distribuição de corrida de detritos no mundo. Os locais de ocorrência estão associados a ambientes serranos e montanhosos, geralmente próximos à costa, e que registram altos índices pluviométricos. Fonte: Perov et al. (1997) citados por Gramani (2001).

No cenário nacional, segundo dados do Centro de Pesquisa de Epidemiologia em Desastres (CRED) da Organização Mundial da Saúde (OMS), o Brasil está entre os dez países mais afetados por desastres naturais no mundo (EM-DAT, 2008). Neste contexto, Augusto Filho (1992) e Gramani (2001) elaboraram o levantamento dos acidentes mais importantes envolvendo movimentos de massa no Brasil, que

envolviam desde escorregamentos a corridas. As áreas mais susceptíveis a ocorrência desses processos no Brasil são as áreas situadas no sopé da Serra do Mar, da Serra da Mantiqueira e da Serra Geral, estendendo-se desde a região Sul até a região Norte. No município de Caraguatatuba, no Estado de São Paulo, em 1967 ocorreu um dos mais expressivos movimentos de massa registrados no estado e no Brasil, ocasionado por fortes chuvas que caíram sobre a região. Estima-se que mais de 30 mil árvores desceram as encostas da Serra do Mar e atingiram as porções baixas do relevo. Cerca de 400 moradias foram total ou parcialmente destruídas e, oficialmente, foram contabilizados 120 mortos e milhares de pessoas desabrigadas (GOMES et al., 2008).

A Serra do Mar destaca-se por ser uma área onde existem importantes rodovias que ligam o planalto ao litoral, estradas de ferro, dutovias e indústrias, além de estar atualmente em processo de expansão urbana e de atrair um grande fluxo anual de turistas. Cerca de 90% dos produtos de todo o Estado de São Paulo são escoados pelo Porto de Santos, pelas Rodovias Imigrantes e Anhanguera, que cortam a Serra do Mar. Freitas et al. (1990) fizeram um cadastro das situações de risco no trecho paulista da Serra do Mar, focando obras lineares como agentes indutores de processos de instabilização do terreno. Os autores concluíram que é importante controlar as situações de risco associadas a este tipo de empreendimento, uma vez que podem ocasionar, além de processos erosivos, corridas e escorregamentos.

A respeito das obras de engenharia lineares, destacam-se as dutovias, que podem ser subterrâneas ou superficiais, constituídas por tubos ligados entre si destinados ao transporte de diferentes fluidos (NOGUEIRA-JUNIOR; MARQUES, 1998). O deslocamento de materiais por meio destes modais é um dos meios de transporte mais seguros e eficientes (DE GROOT, 1996; TRENCH, 2001; VIANA, 2003). Quando comparado ao transporte rodoviário, por exemplo, as dutovias representam uma enorme economia de tempo e dinheiro em se tratando de condução dos produtos a grandes distâncias (TRENCH, 2001). Ademais, a rede de dutos permite a transferência direta entre os locais de extração, as refinarias e portos, diminuindo os riscos de acidentes com o material transportado.

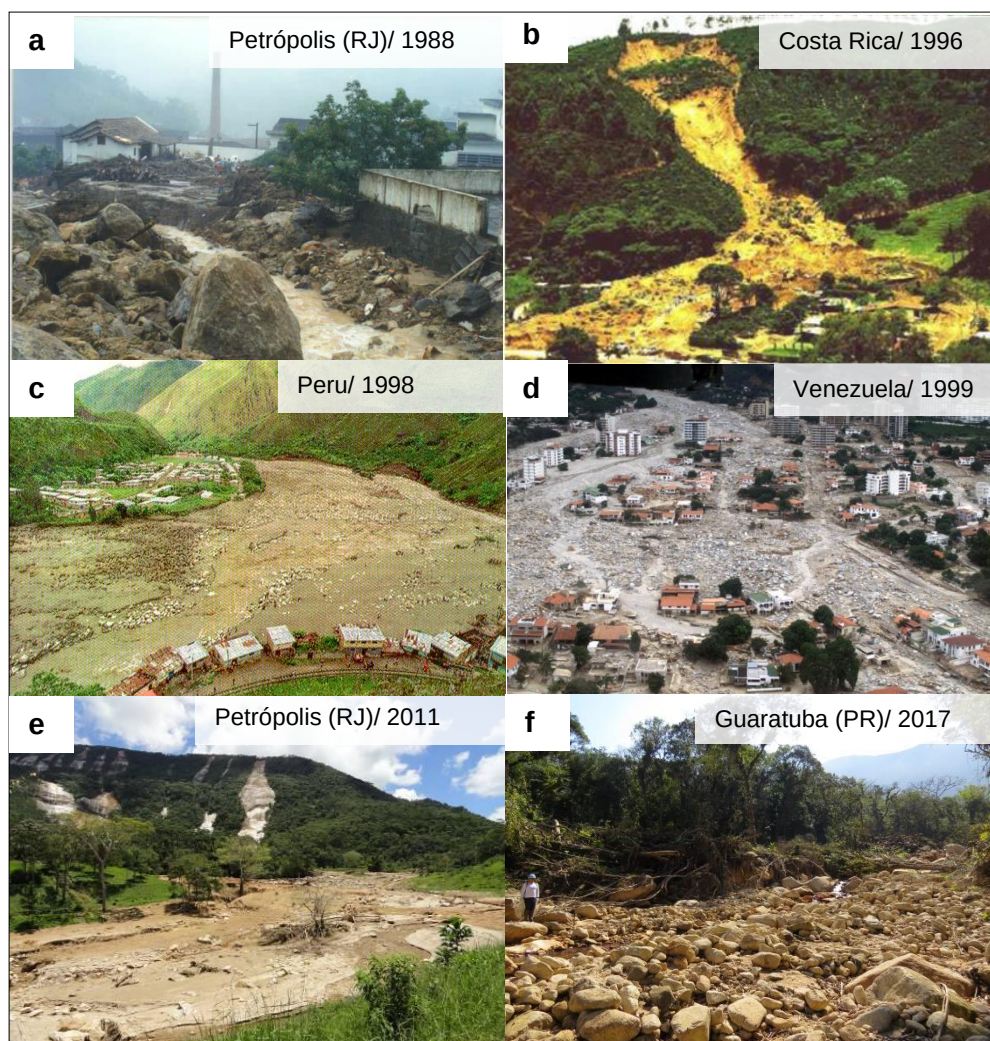


Figura 2. Exemplos de corridas de detritos em regiões serranas no Brasil e no mundo. Os processos se iniciaram com escorregamentos generalizados nas encostas e posteriormente o material alcançou as bacias e as redes de drenagem primárias, incorporando outros materiais ao fluxo no sentido jusante, tais como galhos, árvores, casas, blocos e lama, com grande velocidade e poder destrutivo. Fonte: (a) Gramani (2001); (b) Sancho (2016); (c) Gramani (2001); (d) Wieczorek et al. (2001); (e) Mello et al. (2011); (f) Arquivo pessoal: Claudia Vanessa dos Santos Corrêa.

Por serem obras de grande extensão, as dutovias comumente interceptam diversos tipos de ambientes, que apresentam grande diversidade geológica, física, biológica e social (NOGUEIRA JR.; MARQUES, 1998; VIANA, 2003). A partir do momento em que a faixa de duto é instalada, passa a sofrer influência do ambiente e a causar impactos sobre o mesmo, tais como eventos associados à erosão, deslizamentos de terra ou movimentação do solo. Devido à diversidade de terrenos que encontra, tornam-se essenciais estudos relacionados aos riscos geológico-geotécnicos oferecidos por esses modais de transporte (ÇEVİK; TOPAL, 2003).

Portanto, como acidentes ambientais podem ocorrer, torna-se imprescindível a execução de estudos e a definição de metodologias específicas para avaliar os prováveis aspectos que podem ocasionar problemas para este tipo de empreendimento. Em relação ao meio físico, os processos de dinâmica superficial representam um dos aspectos que ocasionam danos e acidentes a dutovias, sendo fundamental o estabelecimento dos principais atributos condicionantes a cada tipo de processo (CORRÊA et al., 2016).

Para a mensuração, identificação, previsão e monitoramento dos processos de corridas de detritos em áreas de duto ou não o geoprocessamento e a modelagem se configuram como ferramentas eficientes e de baixo custo, conforme proposições de Roper e Dutta (2005), Gregoretti et al. (2016) e Conterato (2014). Um modelo pode ser considerado uma representação simplificada da realidade, auxiliando no entendimento dos processos que a envolvem, baseando-se em descrição formal de objetos e processos, permitindo realizar simulações. A utilização de modelos em estudos geoambientais é cada vez mais frequente, principalmente com o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que ajudam a entender os mecanismos de modelagem natural da paisagem, sejam por intervenções naturais ou antrópicas, impactos das mudanças no uso e na cobertura da terra, e por previsões sobre alterações futuras em quaisquer ambientes (REIS; ZAINÉ, 2016). Nesse contexto, Delavar e Naghibi (2003) e Fitz (2008) salientam que as técnicas de sensoriamento remoto, aliadas às de geoprocessamento, auxiliam nas tomadas de decisão. Já Harvey (1969) e Burrough (1998) destacam que o uso de modelos vem se destacando no meio científico porque possibilita a elaboração de hipóteses e a realização de estudos de predição, sendo utilizados para descrever, explorar e analisar como um sistema trabalha.

Assim, diversos trabalhos técnicos e científicos foram desenvolvidos no cenário nacional e mundial, buscando definir, caracterizar e gerenciar as áreas de riscos associados a corridas de detritos, em áreas de dutos ou não (TAKAHASHI, 1991, 1994; ARATTANO; FRANZI, 2003; ÇEVİK; TOPAL, 2003; GRAMANI et al., 2005; RABACO, 2005; RODRIGUES et al., 2005; ROPER; DUTRA, 2005; GOMES, 2006; ARATTANO; MARCHI, 2008; GOMES et al., 2008; AUGUSTO FILHO et al., 2010; KOBIYAMA et al., 2010; MARQUES et al., 2011; GOMES et al., 2015; GREGORETTI et al., 2016; KOBIYAMA et al., 2016; MICHEL; KOBIYAMA, 2016; NERY, 2016, entre outros). Ademais, decorrente à falta ou à dificuldade para

obtenção das informações de eventos pretéritos e sua dinâmica de deflagração, alguns estudos vêm propondo métodos semi-quantitativo, quantitativo e modelagem em base física, na tentativa de compreender a trajetória das corridas de detritos, as possíveis zonas de deposição (HATTANJI; MORIWAKI, 2009; CHEN; LEE, 2010; CHEN; YU, 2011), a sua frequência (IKEYA, 1981; TAKAHASHI, 1981, 1991, 1994; ELLEN et al., 1993) e os locais com potencial para sua ocorrência (SCALLY et al., 2001).

Assim, esta pesquisa propõe uma metodologia integrada para identificar locais mais vulneráveis à ocorrência de corridas de detritos, cuja proposta de aplicação dar-se-á em algumas bacias hidrográficas nas porções serranas e costeiras nos municípios de Caraguatatuba e São Sebastião (SP), sendo que as justificativas e as premissas para o desenvolvimento dessa pesquisa podem ser sintetizadas da seguinte forma:

- As corridas de detritos, embora ocorram com menos frequência que os escorregamentos, possuem maior poder destrutivo, configurando-se como um fator de risco à população e por promover significativas perdas materiais e econômicas (GRAMANI, 2001; WILFORD et al., 2004; LOPES; RIEDEL, 2007; KANG; LEE, 2018);

- As corridas de detritos vêm tornando-se cada vez mais frequentes nos últimos anos, o que demanda um maior entendimento do modelo conceitual desses processos (LARS, 2004; DI et al., 2008; NERY, 2016), principalmente sobre o volume de material envolvido, seu raio de alcance e velocidades que o fluxo pode atingir para se evitar acidentes catastróficos;

- As áreas serranas, especialmente a Serra do Mar, são regiões que constantemente registram a ocorrência desses processos, devido as suas características geomorfológicas, geológicas e de cunho pluviométrico (GRAMANI, 2001; KANJI et al., 2003; KANJI et al., 2008; VIEIRA et al., 2010; CORRÊA et al., 2015; NERY, 2016);

- Os dutos possuem grande vulnerabilidade a processos de movimentos de massa, como a escorregamentos e a corridas de detritos e seu rompimento podem causar sérios prejuízos econômicos, sociais e ambientais (BUGHI et al., 1996; PORTER; SAVIGNY, 2002; ÇEVİK; TOPAL, 2003; GRAMANI et al., 2005; PAULA et al., 2005; AUGUSTO-FILHO et al., 2010; REIS; ZAINÉ, 2016);

- A ampliação da rede dutoviária e implantação de outros empreendimentos requer estudos acerca da susceptibilidade ambiental a fim de que a ocorrência de acidentes envolvendo dutos seja cada vez menor;

- Existência de poucas metodologias específicas envolvendo corridas de detritos com a utilização de programas de simulação, especialmente, simulando as situações das condições ambientais brasileiras;

- A área proposta para aplicação do método possui em seu registro histórico o episódio de uma grande corrida de detritos em 1967, o que torna possível realizar estudos de retro-análise, nos quais são atribuídos os mesmos parâmetros ambientais que desencadearam o evento na época de ocorrência (CORRÊA et al., 2015); e,

- Necessidade de construção de um modelo conceitual (teórico-científico) da ocorrência de movimentos de massa na região da Serra do Mar, considerando os diferentes atributos do meio físico no desenvolvimento integrado entre escorregamentos e corridas de massa.

Frente a esses pressupostos, a tese está estruturada da seguinte maneira: o capítulo 1 expõe as principais problemáticas do tema e as justificativas e premissas para a realização desta pesquisa, acrescentado aos objetivos principais e específicos e a hipótese que a norteia. O capítulo 2, por conseguinte, é dedicado à discussão das principais características das corridas de detritos, que envolvem desde a sua dinâmica de origem, ao seu processo de transporte e à fase de deposição, bem como os parâmetros que estão envolvidos nestes fenômenos. Ademais, também serão apresentadas algumas características gerais da modelagem numérica, seguida de uma breve discussão sobre o modelo empregado na presente pesquisa. O capítulo 4 corresponde aos métodos e técnicas que possibilitaram a realização deste trabalho, que abrangem desde a elaboração da compartimentação fisiográfica, a estudos de retro-análise até a simulação em *softwares* de modelagem morfométrica. Em seguida, no capítulo 5, as bacias hidrográficas alvo de investigação são caracterizadas em relação aos seus aspectos geológicos, geomorfológicos e climáticos, de modo que estas informações sejam utilizadas posteriormente para embasar as etapas elencadas no capítulo 4. O capítulo 6 vai apresentar os resultados obtidos pela metodologia empregada, concomitantemente a sua discussão e análise. Por fim, o capítulo 7 será destinado

às conclusões do trabalho e recomendações futuras, obtidas pelas reflexões dos resultados.

1.1. Hipótese e Objetivos

O entendimento da dinâmica e dos fatores envolvidos na corrida de detritos, bem como seu raio de alcance e de dispersão é necessário, uma vez que este evento está diretamente relacionado ao processo natural de evolução e modelagem de vertentes. Entretanto, uma análise baseada apenas nos aspectos morfométricos e geológicos pode não ser suficiente para a compreensão destes processos de natureza complexa, que podem acarretar prejuízos econômicos, sociais e ambientais. Assim, outros métodos de análise podem ser propostos para a sua compreensão.

Desta maneira, a hipótese desta pesquisa considera que a simulação numérica do terreno permite realizar uma correlação espacial entre as áreas de abrangência de depósito de corridas de detritos modeladas e as identificadas na área do evento, bem como sua espessura, considerando a viscosidade, a densidade do fluxo e as espessuras das cicatrizes de escorregamento como parâmetros de entrada.

Portanto, o objetivo principal desta pesquisa é de propor uma metodologia para avaliação da potencialidade de bacias hidrográficas à ocorrência de corridas de detritos, de modo a definir e hierarquizar os parâmetros fisiográficos que condicionam esses processos através do emprego da compartimentação fisiográfica, de estudos de retro-análise e da simulação numérica do terreno nas áreas serranas e costeiras de Caraguatatuba (SP) e São Sebastião (SP). Estes locais foram selecionados como proposta de aplicação da respectiva metodologia por apresentarem processos históricos de movimentos de massa, sendo que no ano de 1967 a região foi palco de ocorrência de um grande evento de escorregamentos e corridas de detritos generalizados, o que possibilita estudos de retro-análise.

Mediante essas considerações, os objetivos específicos dessa pesquisa são:

- Definir zonas com maior potencialidade a corridas de detritos, segundo atributos e critérios adequados a esses processos;
- Identificar e hierarquizar áreas-alvo passivas a ocorrência de corridas de detritos na região serrana e costeira de bacias hidrográficas de Caraguatatuba e São Sebastião (SP);
- Compreender a dinâmica, evolução, magnitude e parâmetros envolvidos na ocorrência de corrida de detritos ao longo das vertentes, drenagem e zonas

de deposição através do emprego da modelagem morfométrica em *softwares* de simulação 3D.

- Estabelecer uma metodologia para avaliação da potencialidade de bacias hidrográficas à ocorrência de corridas de detritos que seja eficiente, acessível e de baixo custo, de modo a possibilitar sua aplicação na gestão de bacias hidrográficas por órgãos e entidades públicas e privadas, e que auxilie na tomada de decisão para implantação de novos empreendimentos, bem como a ordenar a expansão urbana.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo é apresentada a fundamentação teórica sobre a temática da tese, que engloba desde as características gerais das corridas de detritos, sua dinâmica, as principais variáveis envolvidas nestes eventos até a discussão, funcionamento e emprego da modelagem morfométrica em corridas de detritos.

2.1. As corridas de detritos

As corridas de detritos (*debris flows*) são movimentos rápidos, nos quais os materiais carregados se comportam como fluidos altamente viscosos e densos, concentrados a hiperconcentrados, formados por grandes volumes de solos e materiais de alteração (material fino), mistura de blocos de rochas (material grosseiro), detritos (galhos e outros materiais vegetais), outros material em encostas, como as estruturas construídas pelo homem, e quantidades variáveis de água, devido à influência direta da gravidade, desenvolvidos em anfiteatros nos cursos de drenagens (Figura 3a) (AUGUSTO FILHO, 1992; SELBY, 1993; FERNANDES; AMARAL, 1996; GRAMANI, 2001; DA SILVA, 2013; GREGORETTI et al., 2016; NERY, 2016; KANG; LEE, 2018). Essa mistura de materiais desce a encosta em direção aos cursos d'água, seguindo o canal à jusante até perder sua energia, geralmente formando grandes depósitos nas porções inferiores, mais planas da bacia. Essa variedade de material carregado no fluxo atribui a esses processos uma alta densidade, com proporções de 60 a 80% em peso de material sólido (VARNES, 1978; HUTCHINSON, 1988) e para o último autor as corridas de detritos podem ser descritas como “concreto molhado” (HUTCHINSON, op.cit.). Nery (2016) ressalta que esses processos se desenvolvem nos canais de primeira a terceira ordem, podendo alcançar o canal principal (Figura 3b) (BENDA; CUNDY, 1990; GRAMANI, 2001; IPT, 2002; BENDA et al., 2003), o que permite diferenciá-lo de outros movimentos de massa, pois ocorrem periodicamente ao longo de canais estabelecidos (SANCHO, 2016).



Figura 3. (a) Corrida de detritos deflagrada entre os dias 11 e 12 de Janeiro de 2011 na Bacia do Rio da Posse, Teresópolis (RJ), evento que ficou conhecido como “Megadesastre da região serrana do Rio de Janeiro”. Na figura é possível visualizar a deposição de blocos de dimensões variadas na região de declive mais suave da bacia. Fonte: Nery (2016); (b) Desenvolvimento de corridas de detritos em canais de menores ordens, cujos fluxos alcançaram o canal principal. Processo ocorrido em Cubatão (SP), 1994. Fonte: Gramani (2001).

Ademais, as corridas de detritos estão geralmente associadas à concentração excessiva dos fluxos de águas superficiais, provenientes de precipitações anômalas, que deflagram em algum ponto da encosta um processo de fluxo contínuo de material terroso, devido à perda de atrito interno dos materiais constituintes em função do excesso de água (FERNANDES; AMARAL, op.cit.). Selby (1993) salienta que as corridas se desenvolvem ao longo das redes de drenagens e apresentam extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas e em condições excepcionais, o que o situa como o movimento de massa com maior poder destrutivo (Figura 4) (IVERSON, 1997; LOPES, 2006;). A respeito dessa assertiva, Rodine (1984) destaca que o material mobilizado é precedido por um forte rugido e Takahashi (2007) o descreve como um Desastre Fantasma por seu potencial de destruição.



Figura 4. Corrida de detritos de 1967 na Bacia do Rio Santo Antônio, Caraguatatuba (SP). O fluxo originado pelos escorregamentos nas encostas atingiu as bacias de menor ordem, na região serrana, que por sua vez atingiu o canal principal (Rio Santo Antônio) e espalhou o material na porção mais baixa da área, em área urbana, causando perdas de vida e danos materiais e econômicos. Fonte: Sakai (2014).

Para Midriak (1985) o fenômeno é um processo de ocorrência natural, de cunho gravitacional-erosivo, onde o incremento de água, no solo ou material inconsolidado, propicia o que o autor denominou de inter-estágio, gravitacional e fluvio-gravitacional. Jishan (1992) considera a corrida de detritos um fenômeno de transição entre um transporte de sedimentos em suspensão e um escorregamento. Por outro lado, autores como Guidicini e Nieble (1984) e Kobiyama et al. (2010) consideram esses processos com características essencialmente hidrológicas, uma vez que são deflagrados por altos níveis pluviométricos acumulados e possuem o comportamento de um fluido altamente viscoso. Para Gramani (2001), uma corrida de detrito viscosa estaria próxima a um transporte de sedimentos e uma corrida com caráter plástico próxima a um escorregamento (Figura 5).

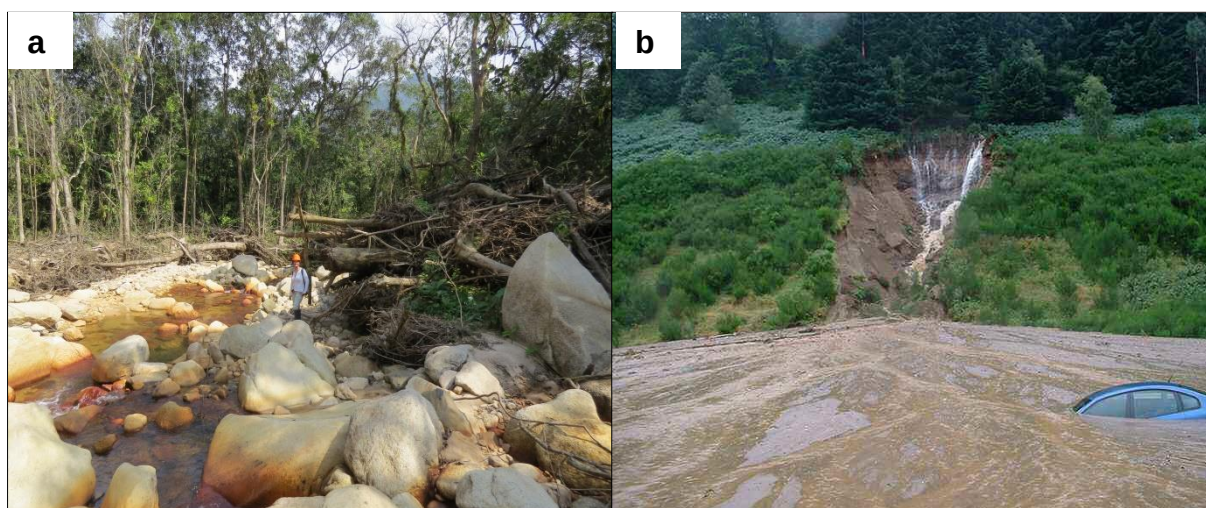


Figura 5. (a) Corrida de detritos viscosa, com predominância de transporte de materiais grosseiros em Guaratuba (Paraná), no ano de 2017. Fonte: Arquivo pessoal Claudia Vanessa dos Santos Corrêa; (b) Corrida de detritos de caráter plástico registrada em Dunkeld (Escócia), em agosto de 2004, com predominância de materiais finos na área de deposição. Fonte: Nettleton et al. (2005).

O tempo de recorrência das corridas de detritos é menor do que quando comparadas com outros movimentos de massa (deslizamentos, quedas de blocos, rastejos, etc.). Apesar desse fato, o evento pode ocasionar consequências mais graves, devido a sua capacidade de transportar grandes volumes de materiais e atingir áreas extensas (GRAMANI, 2001). Ademais, devido à ocupação desordenada e ao quadro atual de mudanças climáticas, Gramani (2015) salienta que a ocorrência destes eventos tem aumentado no Brasil nos últimos anos, sobretudo nas áreas serranas, como a Serra do Mar, a Serra da Mantiqueira e a Serra Geral, nas regiões sul e sudeste do país, o que justifica a realização desta pesquisa. O mesmo autor destaca que estes eventos têm causado significativo impacto e danos diversos em muitas áreas urbanas e rurais, geralmente associados a períodos de alta intensidade de chuva concentrados em curtos intervalos de tempo. Muitos autores afirmam que as corridas de detritos são, dentre os processos geológicos atuantes no Brasil, aquelas que causam o maior número de perdas de vida, grandes prejuízos sócio, econômicos e impactos ambientais, envolvendo inúmeras escalas de alcance (MACEDO; AKIOSSI, 1996; ALHEIROS; AUGUSTO FILHO, 1997; MARTINEZ, 1999). Apesar de sua frequente ocorrência nos últimos anos, locais situados imediatamente ao final das encostas de alta declividade e à frente da desembocadura de vales a jusante do alto da serra são configurados como locais de alto risco frente à ocorrência de corridas de detritos, apesar de serem enquadrados

repetidamente como os mais adequados para ocupação urbana e implantação de diferentes tipos de empreendimentos em muitos mapeamentos (SANTOS, 2011).

Vandine (1985) propôs o modelo conceitual de ocorrência das corridas de detritos baseadas na topografia do relevo (altimetria e declividade) e nas diferentes fases do processo (início, transporte e erosão, deposição parcial e deposição) (Figura 6). Segundo o autor, o material é gerado pelas encostas (1), os materiais de solo, rocha e detritos vegetais “saturados” por água fluem para os cursos d’água onde escoam com alto potencial energético e alto potencial erosivo, retrabalhando depósitos na drenagem e nos taludes marginais, ganhando maior volume e energia de deslocamento (2). Durante seu percurso, drenagem abaixo, parte do material da corrida se deposita em alvéolos naturais de deposição situados em compartimentos morfológicos menos íngremes por perda de energia potencial (3). Atingindo os terrenos de baixada, a diferença brusca de declividade ocasiona a deposição em leques aluvionais com raios de alcance distintos em função dos materiais presentes no corpo do fluxo do processo de corrida (4). Os primeiros que se depositam são os grandes blocos na frente de choque, sendo o raio de alcance desses elementos relativamente limitado. Os materiais que vêm em seguida, num ambiente de enchente com alta concentração de material detrítico (restos vegetais, blocos menores e alta concentração de sedimentos granulares) se depositam nas extensas planícies fluviais ao extravasarem do canal de drenagem. Por último a dinâmica do fenômeno se finaliza sob a forma de uma inundação com sedimentos de diferentes granulometrias em suspensão. Essa sequência fenomenológica pode se dar em pulsos ou em um único evento (GRAMANI, 2015).

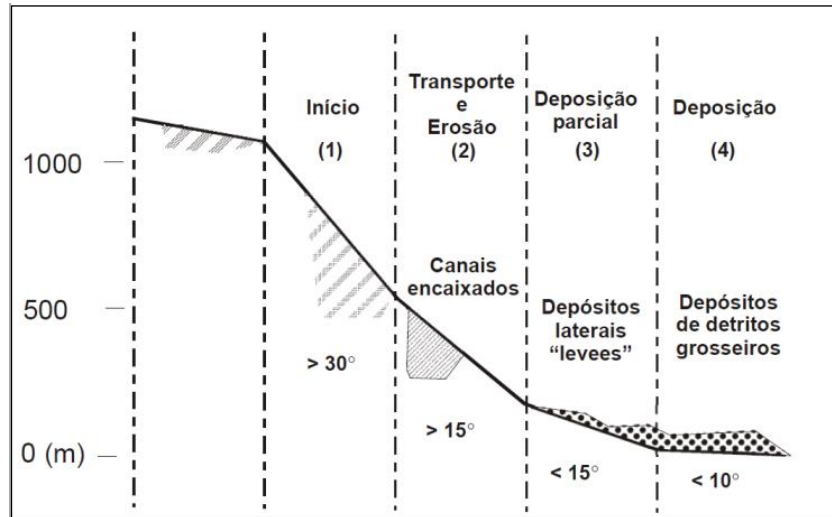


Figura 6. Modelo fenomenológico das corridas de detritos, baseada na topografia do relevo (altimetria e declividade) e as diferentes fases do processo (início, transporte e erosão, deposição parcial e deposição). Fonte: Vandine (1985).

Jakob (2005) elaborou uma classificação baseada na magnitude das corridas de detritos, no qual ele divide os fluxos em 9 classes de acordo com o seu potencial de dano. Assim, as classes são catalogadas em função do volume, a vazão de pico, a área inundável, a área afetada e possíveis consequências. A figura 7 ilustra esta classificação e o quadro 1 descreve as características para determinação de cada classe, incluindo os principais mecanismos deflagradores e as condições hidrológicas.

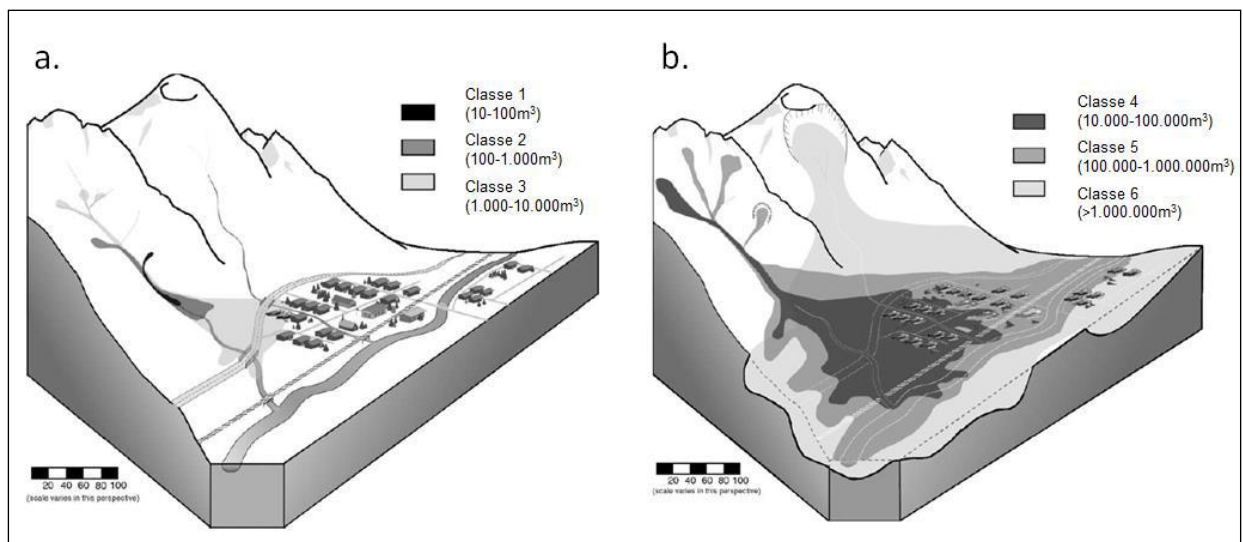


Figura 7. Classificação de corrida de detritos de acordo com a magnitude do movimento. Fonte: Jakob (2005) modificado por Sancho (2016).

Quadro 1. Classificação de corrida de detritos de acordo com a magnitude do movimento. Fonte: Jakob (2005) modificado por Sancho (2016).

Tipo	Volume (m ³)	Vazão de pico (m ³ /s)	Área inundada (m ²)	Consequências
1	< 10 ²	<5	<4x10 ³	Dano localizado, já ocasionou morte de trabalhadores florestais em pequenos talvegues, danos em construções pequenas.
2	10 ² -10 ³	5 - 30	4x10 ³ – 2x10 ³	Soterramento de carros, destruição de construções menores e árvores, descarrilamento de trens.
3	10 ³ -10 ⁴	30-200	2x10 ³ – 9x10 ³	Destruição de edifícios de maior porte, danos em pilares de pontes de concreto, rodovias e dutos.
4	10 ⁴ -10 ⁵	200-1500	9x10 ³ – 4x10 ⁴	Destruição de aldeias, corredores de infraestrutura, pontes, obstrução de riachos.
5	10 ⁵ -10 ⁶	1500 – 12 000	4x10 ⁴ – 2x10 ⁵	Destruição de partes das cidades e florestas de 2km ² de área. Obstrução de riachos e pequenos rios.
6	10 ⁵ -10 ⁶	N/A	> 2x10 ⁵	Destruição de cidades e obstrução de vales até várias dezenas de km ² de área. Bloqueio de rios.
7	10 ⁶ -10 ⁷	N/A	N/A	Destruição de cidades e obstrução de vales até várias dezenas de km ² de área. Bloqueio de grandes rios.
8	10 ⁷ -10 ⁸	N/A	N/A	Destruição de grandes cidades e inundação de vales até 100 km ² de área. Bloqueio de grandes rios.
9	>10 ⁸	N/A	N/A	Vasta e completa destruição de centenas de km ² .

Rosso e Magni (2011) e Polanco (2010) compartimentaram as corridas de detritos em três fases distintas, de modo a facilitar o entendimento da dinâmica do processo: a ocorrência (que inclui os mecanismos que envolvem a deflagração do processo - geração), o fluxo (transporte) e a deposição (sedimentação) (Figura 8).

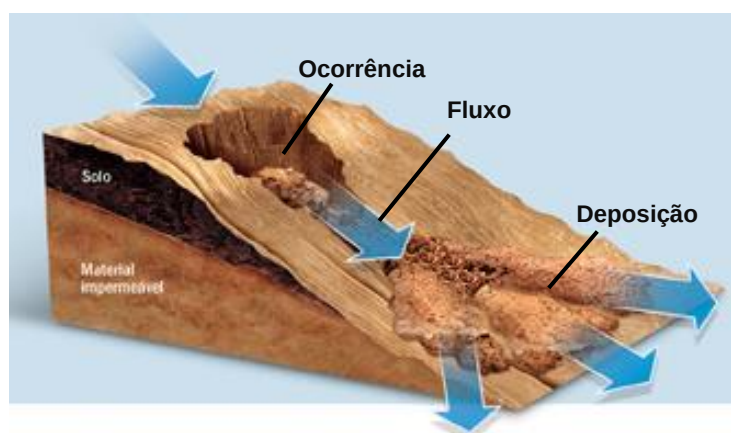


Figura 8. Principais fases de uma corrida de detritos. Fonte: Sakai (2014).

De modo a facilitar as discussões e compreensão acerca da dinâmica do fenômeno, os próximos subcapítulos irão ser dedicados às características gerais de cada fase de ocorrência de uma corrida de detritos, baseada na divisão de Rossi e Magni (2011) e Polanco (2010).

2.1.1. Os mecanismos deflagradores de corridas de detritos (fase de ocorrência)

As corridas de detritos são originadas quando blocos, matacões e fragmentos de rocha, pobremente selecionadas, junto com massas de solos, são mobilizados a partir das encostas e canais de drenagem, pela adição de uma certa quantidade de água (COSTA, 1984). Ademais, quantidades significativas de material vegetal também podem ser mobilizadas por corridas de detritos, e em certos pontos do fluxo têm-se verdadeiros “*wood flows*” (fluxos de madeira), predominando troncos e galhos de árvores (GRAMANI, 2001). Ainda a respeito da composição de material de origem, Sakai (2014) destaca que a massa de solo envolvida nas corridas de detritos é composta essencialmente de materiais residuais e coluvionares de encostas.

Acerca da fonte de material pedológico e geológico que compõe o processo, Ritter et al. (1995) destacam que em ambientes tropicais úmidos a ação intempérica ocorre de forma mais intensa sobre as rochas, e que condicionadas à estrutura (falhas, diaclases etc.), às propriedades internas (texturais e mineralógicas), à coesão e o ângulo de atrito, esta ação favorece uma maior permeabilidade e, conseqüentemente à formação de espessos mantos de intemperismo e grandes depósitos coluvionares e aluvionares, proporcionando abundante áreas fontes passíveis de mobilização.

Quanto à localização da origem, Gramani (2001) ressalta que esses processos se formam geralmente nas cabeceiras de drenagens, primárias e secundárias, associadas à concentração de sedimentos, mais água, em uma quantidade crítica para o seu desenvolvimento no canal. Por vezes, são formadas a partir da instabilização dos materiais depositados no leito dos rios, com a passagem de grande quantidade de água provindas de grandes precipitações pluviométricas, degelo ou ruptura de barragens naturais ou artificiais. Quando formadas nos canais secundários, a previsão e a prevenção contra os acidentes torna-se mais difícil. Isto

ocorre porque em algumas situações, visa-se apenas o estudo da drenagem principal como feição de desenvolvimento das corridas (GRAMANI, 2001).

Segundo Takahashi (1981), as corridas de detritos podem ser geradas a partir da combinação de três fatores: (a) quantidades suficientes de materiais “livres” para mobilização, (b) superfície aquosa, com fonte abundante de água, para escoamento dos materiais e (c) inclinação de encostas e canais favoráveis aos movimentos. Esses materiais “livres” podem ter origem a partir dos taludes marginais localizados nos canais de drenagem, dos deslizamentos recentes que atingem as drenagens ou a partir da intensa erosão de antigos depósitos (CANNON et. al, 2001). Costa (1984) salienta que esses fluxos também podem ocorrer a partir da ruptura dos depósitos coluvionares, tálus, maciços rochosos e dos aluviões. São caracterizados, sobretudo, por ondas violentas, com alta concentração de sedimentos, muitas vezes carregando grandes blocos de rocha e material vegetal, no qual o comportamento é muito distinto dos fluxos de água nas drenagens (WELSH; DAVIES, 2011).

A mobilização do material de origem das corridas de detritos requer o deslocamento da massa, água suficiente para saturá-lo, e a conversão de energia potencial gravitacional para energia cinética capaz de mudar o tipo do movimento de deslocamento para fluxo (COSTA, 1984; TAKAHASHI, 1991; SELBY, 1993; IVERSON, 1997). Sakai (2014), pautado em Sauret (1987), aponta os seguintes fatores como principais agentes deflagradores das corridas de detritos:

- Abundante fonte de partículas e detritos de solos e/ou rocha inconsolidados;
- Encostas íngremes (geralmente acima de 30° (COSTA, 1984));
- Fonte abundante de água atingindo os materiais suscetíveis a escorregamentos (chuvas, degelo, rompimento de tubulações/ represamentos naturais ou artificiais); e
- Vegetação esparsa (SAKAI, 2014).

Essas quatro condições parecem ser fundamentais para o desenvolvimento de corridas de detritos (SAURET, 1987). Entretanto, diversos casos são relatados com a ocorrência de corridas em encostas com baixas declividades ou com cobertura vegetal bastante densa. Porém, cabe destacar que abalos sísmicos e erupções vulcânicas também podem ser a origem da ignição desses processos (PLAFKER; ERICKSON, 1978; COSTA, 1984; SCOTT et al., 2001; SHIEH et al., 2009; TANG et al., 2012; TAKAHASHI, 2014).

Sobre os aspectos geomorfológicos, o ângulo da encosta, a orientação da encosta e a curvatura são condicionantes relevantes na deflagração destes fenômenos (TAKAHASHI, 2014). O ângulo da encosta contribui na disposição do material ao longo da encosta e na velocidade do movimento. Ademais, as variações de espessuras e as características naturais destes materiais ao longo destas encostas podem contribuir no raio de alcance destes sedimentos (DAI; LEE, 2002). Gramani (2001) ainda destaca que vertentes que possuem altas declividades (valor crítico em torno de 30°), morfologias côncavas a retilíneas e disponibilidade de material passível de mobilização, são as mais suscetíveis ao desenvolvimento de corridas de detritos. Nesse sentido, ao correlacionar a morfometria das encostas com a pluviosidade, observa-se que nas escarpas serranas as águas pluviais concentram-se rapidamente devido ao forte declive das vertentes, o que aumenta a capacidade erosiva e o transporte de detritos grosseiros (GRAMANI, 2001).

Nesse sentido, Vandine (1985), pesquisando sobre algumas inclinações de vertentes para as diferentes fases das corridas de detritos, observou que durante a sua ocorrência nas áreas mais íngremes ocorre a retirada do material-fonte e nas áreas mais planas a sua deposição. Assim, a partir da compilação de eventos nacionais e internacionais, o autor elaborou gráfico a seguir, que correlaciona a área da bacia no qual a corrida de detritos ocorreu com a inclinação da vertente durante o início, o transporte e a deposição do material (Gráfico 1).

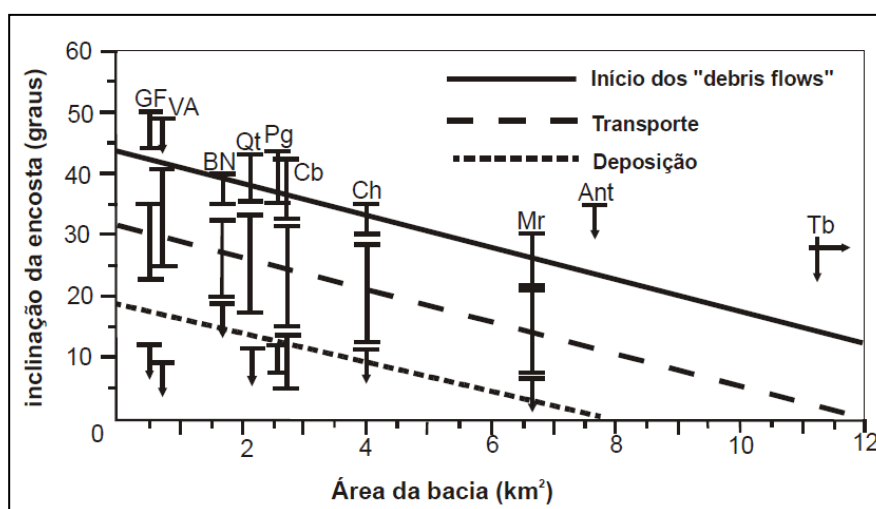


Gráfico 1. Limites para início, transporte e deposição das corridas de detritos em função da área da bacia e da inclinação da encosta (Locais de ocorrência: GF=Grota Funda; VA=Via Anchieta; BN=Braço Norte; Qt=Quitite; Pg=Papagaio; Cb=Cubatão; Ch=Rio Cachoeira; Mr=Maranguape; Ant=Antofagasta (Chile) e Tb=Timbé do Sul). Fonte: Vandine (1985) e Kanji et. al (1997).

Nesse cenário de condicionantes geomorfológicas, Augusto Filho (1993) salienta que as características das drenagens das bacias também são importantes fatores no desenvolvimento e manutenção das corridas de detritos. Segundo o mesmo autor, o índice de circularidade da bacia, a declividade média do talvegue principal, além da presença de depósitos, são algumas das características morfométricas que determinam a ocorrência destes processos gravitacionais. Assim, quanto maior for o índice de circularidade da bacia (portanto, mais próximo de 1), maior será sua potencialidade de gerar cheias com baixo tempo de concentração, que, por sua vez, são importantes na formação de corridas do tipo secundário (AUGUSTO FILHO, op.cit.). De acordo com o mesmo autor, a declividade média do talvegue influencia diretamente na capacidade de erosão e mobilização do material depositado ao longo das drenagens. Portanto, maiores índices de circularidade da bacia e de declividade média dos talvegues indicam maior potencialidade de geração de corridas de detritos.

Ademais, o tipo de canal de drenagem também é outro condicionante importante para a deflagração das corridas de detritos, uma vez que este possui características geométricas que favorecem a deflagração e o desenvolvimento dos processos. Assim, dentre as feições típicas destacam-se os vales encaixados e fechados, pois possuem maior raio hidráulico e são responsáveis por uma maior espessura das corridas de detritos (GRAMANI, 2001). A respeito dessa afirmação, Pierson (1981) verificou que nos vales encaixados ocorre um aumento do poder de erosão devido às grandes espessuras atingidas pela massa de detritos, aumentando a porcentagem de material no processo.

Em relação à ordem do rio em uma bacia hidrográfica, na classificação de Strahler (1952), Benda (1985) observou que nos canais de primeira a terceira ordem existe uma maior probabilidade de ocorrência de corrida de detritos. Ademais, para os rios de outras ordens, o autor concluiu que à medida que sua hierarquia diminui, a probabilidade de deflagração deste fenômeno também decresce (Quadro 2). Outros autores corroboram essa assertiva, tais como Gramani (2001) e Nery (2016).

Quadro 2. Porcentagem de ocorrência de corrida de detritos de acordo com a ordem dos rios em uma bacia hidrográfica. Fonte: Benda (1985).

Ordem dos rios ¹	% de probabilidade de ocorrência de <i>corrida de detritos</i>
0 – 1	Maior que 84%
0 – 1 – 2	84
0 – 1 – 2 – 3	41
0 – 1 – 2 – 3 – 4	4

¹ordem dos rios é uma classificação que reflete o grau de ramificação ou bifurcação dentro de uma bacia. Rios de 1ª ordem são as correntes formadoras, ou seja, canais que não tenham tributários; a junção de dois afluentes de 1ª ordem dá origem a segmentos de 2ª ordem (STRAHLER, 1952; VILLELA; MATTOS, 1975).

Outro aspecto morfométrico relevante na geração de corrida de detritos referem-se às linhas de drenagem, que apresentam diferentes formas geométricas apresentadas e são controladas por fatores geomorfológicos e geológicos (GRAMANI, 2001). Nesse sentido, a forma do relevo condiciona o formato das drenagens com altas declividades, vales encaixados e estrangulamento dos canais. As altas declividades proporcionam maiores instabilidades locais dos materiais e os estrangulamentos atuam como pontos de acumulação e formação de barramentos naturais contra o fluxo (*knickpoints*). Por outro lado, a litologia contribui com a formação de corpos coluvionais e aluvionais depositados ao longo das drenagens, modificando o perfil geral do canal, contribuindo com grande quantidade de material rochoso de partículas de maiores diâmetros (GRAMANI, op.cit.).

O tipo da bacia hidrográfica na qual ocorre a corrida de detritos também é identificado como um condicionante deflagrador desse processo. Nesse sentido, de acordo com Mizuyama (1982) e Slaymaker (1988), bacias hidrográficas com áreas entre 0,1 km² e 10 km² são mais propensas à ocorrência de corridas de detritos devido ao:

- Tempo de retorno menor e vazão maior;
- Localização em altitudes elevadas ou barreiras geográficas, apresentando maiores precipitações pluviométricas (efeito orogenético) e
- Bacias menores, em geral, apresentam maiores declividades médias e menor tempo de concentração, causando maior suscetibilidade a escorregamentos (COSTA, 1984).

Para Fleischman (1978), a dimensão das bacias geradoras de corridas de detritos se limita a aproximadamente 50 m², sendo raras ocorrências em bacias com grandes dimensões. No entanto, este parâmetro quando associado ao ângulo da encosta apresenta uma melhor relação na ocorrência das corridas de detritos, uma vez que quanto menor a área da bacia e maior for a inclinação da encosta, maior será a probabilidade de sua ocorrência (VANDINE, 1985; GRAMANI, 2001).

Outro importante mecanismo deflagrador das corridas de detritos é a precipitação, que segundo Sakai (2014) e Gramani (2001), é a principal condicionante para a ocorrência do respectivo fenômeno, especialmente em regiões como a Serra do Mar. Para Takahashi (1991), uma corrida de detritos só é produzida quando quantidade suficiente de água for fornecida a ponto de saturar os espaços vazios entre as partículas de solo e rocha, a ponto de iniciar a sua movimentação. Desta maneira, existe um consenso na literatura de que a poropressão se eleva devido às chuvas intensas ou degelo. A elevação da poropressão resultante de precipitações intensas e de longa duração ao longo de superfícies de ruptura existentes diminui a resistência ao cisalhamento (CAMPBELL, 1975; COSTA, 1984) e diminui a coesão do solo (COSTA, 1984; THOMAS, 1994) fazendo com que o solo se liquefaça transformando-se em um fluido viscoso (COSTA, 1984). Wolle (1998) complementa, afirmando que a chuva na corrida de detritos eleva o lençol freático e gera forças de percolação, preenche temporariamente fendas, trincas e demais estruturas em solos e rochas com geração de pressões hidrostáticas e forma frentes de saturação sem a efetiva subida do nível d'água, diminuindo a sucção (WOLLE, 1988).

Nesse sentido, foram propostas várias relações empíricas entre intensidade e duração de chuva e a ocorrência de fluxos de detritos (CAINE, 1980; GOVI; SORZANA, 1980; WIECZOREK; SARMIENTO, 1983; 1988; CROZIER, 1997; KANJI et al., 1997; MARCHI et al., 2002; BACCHINI; ZANNONI, 2003; JAKOB; WEATHERLY, 2003; MOTTA, 2014; NUNES; SAYÃO, 2014). Kanji et. al (op.cit.) realizaram um levantamento bibliográfico de alguns valores de chuvas acumuladas que geraram corridas de detritos no Brasil e no mundo, na tentativa de estimar os limites pluviométricos críticos que deflagram a ocorrência desses processos. Assim, obtiveram como produto a correlação apresentada no gráfico a seguir.

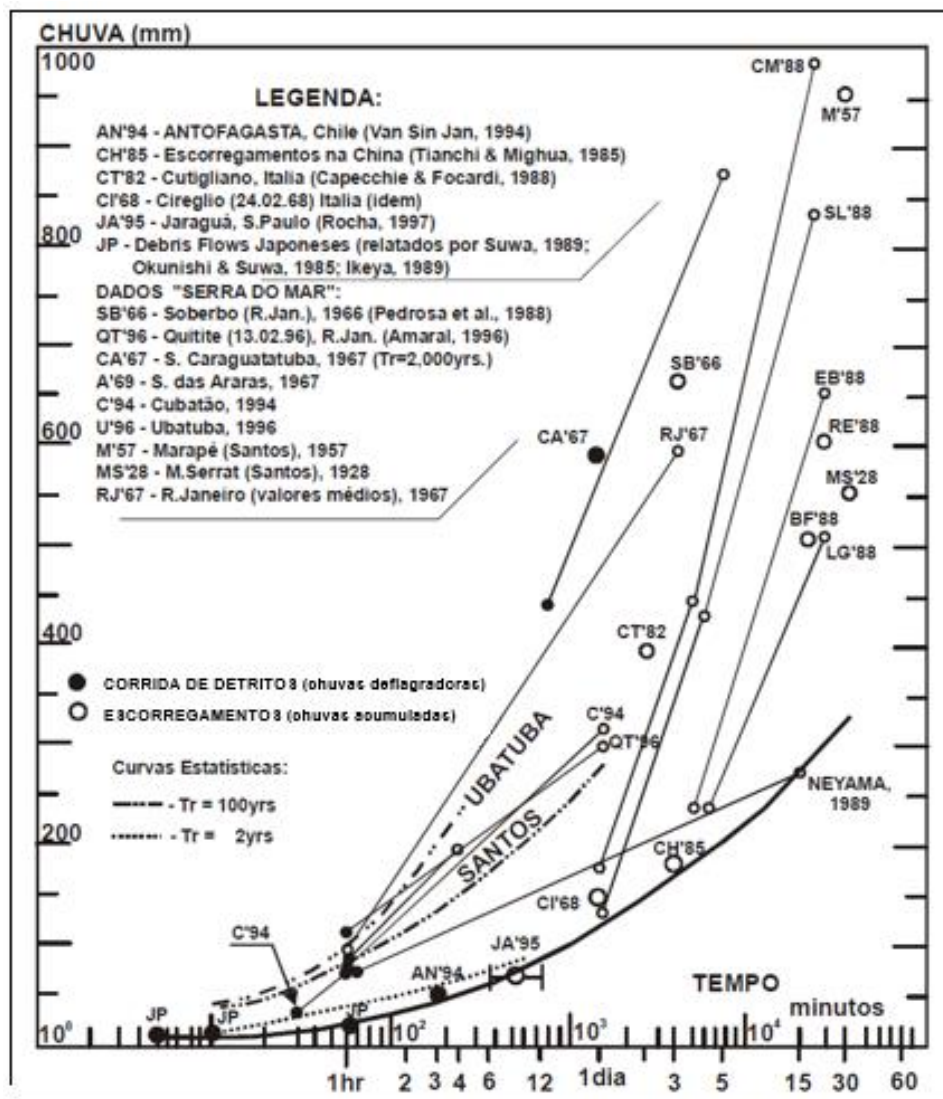


Gráfico 2. Relação entre chuvas acumuladas (mm) x tempo (horas) registrados no território nacional e alguns valores medidos em casos internacionais onde houve geração de corridas de detritos. Fonte: Kanji et al. (1997) modificado por Gramani (2001).

A partir desta correlação, Kanji et. al (op.cit.) apresentaram a equação (1), que determina o limite inferior para as precipitações que podem deflagrar um fenômeno como as corridas de detritos. Os mesmos autores destacam que a sua ocorrência está intimamente relacionada a altos índices pluviométricos em curtos períodos de tempo (poucos minutos a horas), após um período de chuvas anterior, mesmo de pequena intensidade (STARKEL, 1979; CAINE, 1980; KANJI et. al, 1997).

Equação 1. Limite inferior da precipitação acumulada para deflagração de corrida de detritos. Fonte: Kanji et. al (1997).

$$I = 22,4 \times t^{0,41} \quad (1)$$

No qual:

I – limite inferior da precipitação acumulada de deflagração (mm);

t – duração total da precipitação (horas).

Ainda sobre a origem e deflagração das corridas de detritos, IPT (1987; 1988) e Augusto Filho (1993) propuseram uma classificação desses fenômenos segundo seu mecanismo de geração: corridas de detritos primárias e secundárias. Na corrida de detritos primária, o processo se inicia nas encostas e vertentes através da transformação de escorregamentos translacionais e rotacionais, condicionados pelas precipitações acumuladas, em uma massa viscosa e saturada, através dos fenômenos de dilatação¹ ou de liquefação espontânea², que alcança rapidamente o canal de drenagem (Figura 9) (CAMPBELL, 1975; TAKAHASHI, 1981; IPT, 1987; 1988; WIECZOREK, 1987; AUGUSTO FILHO, 1993; KANJI et al., 2003). No grupo de origem secundária, a formação de corridas dar-se-á nas drenagens principais, a partir da remobilização de detritos acumulados no leito ou nas margens e/ou barramentos naturais, acrescidos do material oriundo de escorregamentos nas encostas e torrentes de água geradas na bacia, a partir da concentração e do escoamento rápido da água ao longo das redes de drenagens (TAKAHASHI, 1981; ZIMMERMANN, 1990; AUGUSTO FILHO, 1993; RICKENMANN; ZIMMERMANN, 1993; RICKENMANN, 1999; GLADE, 2005; GODT; COE, 2007). Na classificação de Nettleton et al. (2005) e Hutchinson (1968) as corridas de detritos do tipo primária são denominadas de não canalizadas e a área de deposição pode conter canais e diques, ao passo que nas áreas secundárias, categorizadas como canalizadas na divisão dos respectivos autores, o depósito tende a assumir a forma do canal (Figura 10).

¹ De acordo com o IPT (1987), dilatação é “a transformação da massa sólida em fluido viscoso pelo aumento de volume, resultante do aumento da porosidade, provocando uma incorporação ainda maior de umidade e amolgamento”.

² Liquefação espontânea é o “colapso da estrutura interna com transformação repentina da massa sólida em um fluido viscoso, devido ao acréscimo de grande volume de água, o que causa o aumento da pressão neutra no solo” (IPT, 1987).

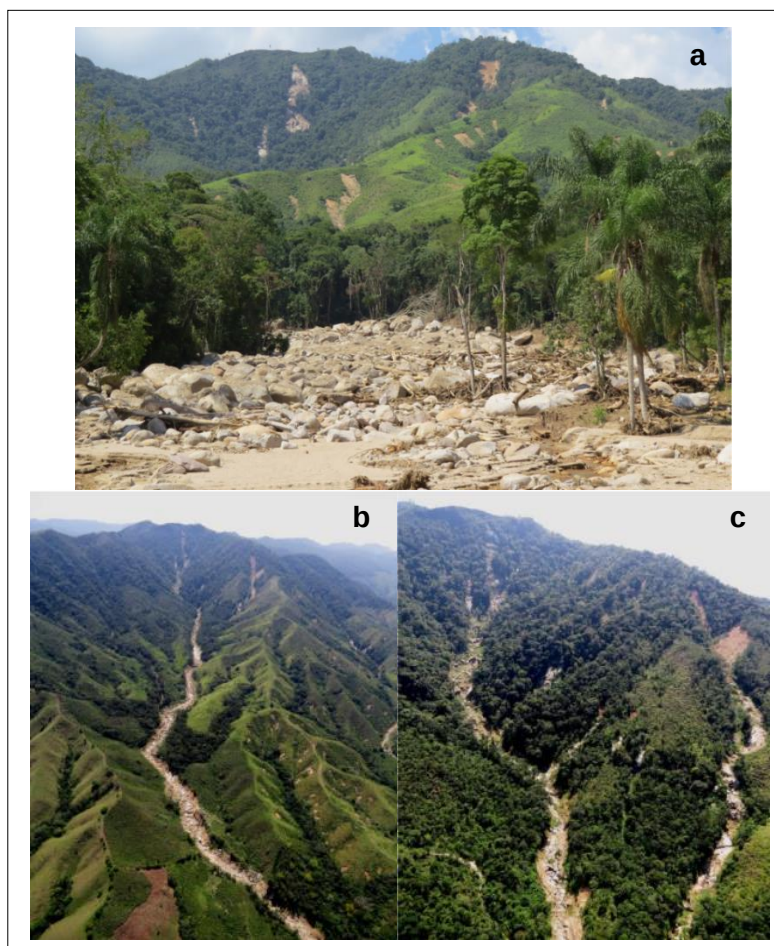


Figura 9. Corrida de detritos do tipo primária/ não canalizada no Córrego Guarda-Mão, Itaoca (SP), ocorrido em Janeiro de 2014. (a) Visão geral do evento, com destaque para as cicatrizes de escorregamento nas encostas da bacia; (b), (c) Evidências do direcionamento da massa viscosa do escorregamento para o canal principal. Fonte: Gramani (2015).

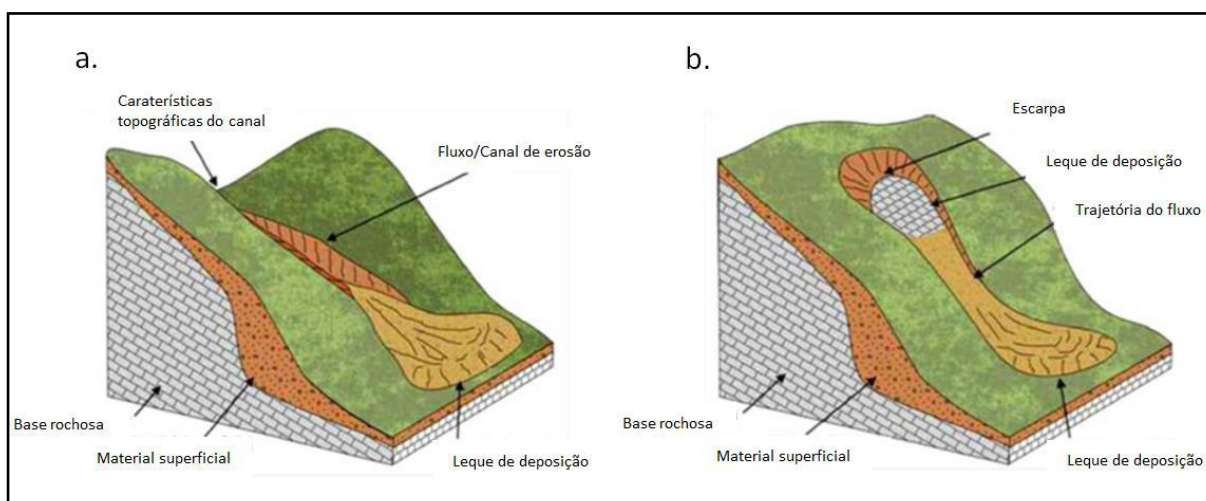


Figura 10. (a) Corrida de detritos do tipo não canalizada, cuja deflagração está associada ao fluxo de materiais de escorregamentos translacionais e rotacionais em direção ao canal de drenagem e (b) corrida de detritos do tipo canalizada, cuja formação se dá nas drenagens principais de uma bacia hidrográfica. Fonte: Sancho (2016).

Outro condicionante distinto que pode auxiliar a induzir processos de corrida de detritos, indicado na literatura, é a ação antrópica. De acordo com Rivera-Pomés (1994), as atividades humanas, especialmente aquelas que envolvem o uso de explosivos (que podem gerar sismos induzidos) e a remoção da cobertura vegetal podem iniciar o processo de mobilização de grande quantidade de solo, criando condições para o desenvolvimento de corridas de detritos quando as áreas coincidem com locais suscetíveis a esses processos.

2.1.2. O fluxo na corrida de detritos (fase de transporte)

Segundo Sancho (2016), a fase de transporte em uma corrida de detritos corresponde ao percurso percorrido pelo fluxo, no qual ele permanece em movimento. No trajeto, o movimento pode incrementar seu volume, erodindo o material nesta zona ou carregando o material depositado de movimentos anteriores. A taxa de erosão irá depender das características geológicas e das condições dos materiais na zona de trajetória do fluxo (HUNGR, 2005).

Sancho (2016) destaca que para um determinado movimento de massa ser considerado uma corrida de detritos, seus detritos sólidos movimentados devem ser soltos e capazes de flutuar sobre a mistura água / partículas que as conduzem. Sobre este fluxo, Sakai (2014) afirma que uma corrida de detritos possui maior concentração de sólidos que um fluxo hidráulico hiperconcentrado e maior concentração de água que um deslizamento de terra ou avalanche de rochas, cuja movimentação possui um comportamento visco-plástico turbulento (SAKAI, 2014). Portanto, durante o fluxo, o processo possui duas fases distintas, a líquida e a sólida, o que lhe atribui uma dinâmica híbrida, regida tanto pelas leis da mecânica dos solos, como da mecânica dos fluidos (SAKAI, 2014; SANCHO, 2016). Para Fisher (1971) e Scott (1988) as corridas são constituídas de uma fase contínua ("*matrix phase*" ou "*fluid phase*") composta de água misturada com partículas menores que 2mm, e uma segunda fase de grãos grosseiros com partículas maiores que 2mm, o que seria equivalente às fases líquida e sólida, respectivamente, de Sakai (2014) e Sancho (2016).

Segundo Costa (1984), a grande mobilidade dos fluxos de detritos está ligada à presença de argilas na mistura água-solo, pois a argila reduz a permeabilidade aumentando a poropressão, e assim a mobilidade da massa. Geralmente esta zona

de transporte possui locais com declividades maiores que 10° (BATHURST et al., 1997; HUNGR, 2005). Portanto, as principais variáveis para a definição da dinâmica do fluxo são a granulometria e a concentração de material sólido carregada pelo fluxo de água. Guidicini e Nieble (1984) ainda ressaltam que por apresentar elevada fluidez, o fluxo tem suas propriedades físicas alteradas, principalmente a densidade e a viscosidade. Outros autores destacam que o grande aporte de detritos pela corrida de detritos permite que esses processos possuam um extenso raio de alcance, maior do que escorregamentos comuns (INFANTI JUNIOR; FORNASARI FILHO, 1998; TAKAHASHI, 1998) e que apesar das rupturas se iniciarem lentamente, os materiais mobilizam-se rapidamente, transformando-se em fluxo e percorrendo grandes distâncias a altas velocidades (ANDERSON; SITAR, 1994; 1995; AULITZKY, 1989).

Sobre o material a ser mobilizado durante o evento, Sakai (2014) salienta que ele é composto principalmente por materiais residuais e coluvionares de encostas, que são dispostos originalmente em camadas sobre materiais mais resistentes, como a rocha sã. Em sua essência, o fluxo é composto por solo, água, rochas soltas e material de recobrimento vegetal, cuja origem está relacionada essencialmente a precipitações intensas em áreas de encosta, desde que haja inclinação suficiente para tal. Portanto, além do material mineral, grande quantidade de material vegetal pode ser mobilizada por este fenômeno (SAKAI, 2014). Tal variedade de granulometria atua de forma distinta durante o fluxo, o que torna complexa a contabilização da contribuição de cada diâmetro de partícula no comportamento geral da massa. Rosso e Magni (2011) salientam que para um fenômeno ser considerado uma corrida de detritos o material sólido deve estar solto e capaz de fluir com a vazão de água, sendo ao menos 50% deste, formado de partículas maiores que areia.

Os fluxos de detritos se movimentam através de uma onda (*surge*) ou várias ondas sucessivas (COSTA, 1984; HUNGR, 2005; GOSTNER et al., 2008). VanDine (1996) indica declividades maiores a 15° para esta zona. Pierson (1986) reporta que a configuração interna do fluxo é dividida em três zonas (Figura 11):

- Frente rochosa (cabeça): composta de partículas de maior diâmetro como pedregulhos, blocos de rochas e material não liquefeito sendo capazes de transportar grandes blocos de rocha (COSTA, 1984; HUNGR, 2005; GOSTNER et al., 2008). O aumento de material grosso como pedregulhos na frente do movimento

causa um aumento no nível de fluxo resultando em um aumento na vazão de pico (IVERSON, 1997; HUNGR, 2005);

- Corpo principal: Composto de uma massa de material fino e detritos liquefeitos (HUNGR, 2005);

- Cauda: É um fluxo turbulento composto por uma carga de sedimentos dissolvidos em água, similar a uma inundação de detritos (HUNGR, 2005).

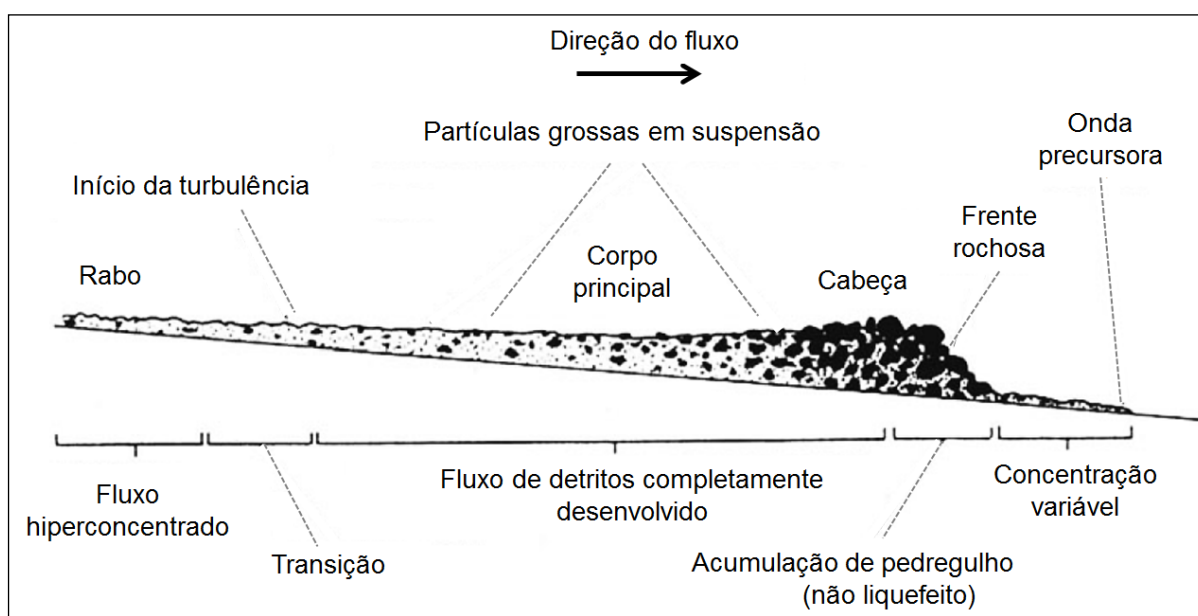


Figura 11. Esquema de uma onda de corrida de detritos com frente rochosa. Fonte: Pierson (1986) modificado por Sancho (2016).

Segundo Gramani (2001), a corrida de detritos exhibe propriedades de resistência como resultado da interação de partículas, devido à alta concentração volumétrica que comumente apresenta, cerca de 60%. Os materiais são suportados neste fenômeno por efeitos de massa, como resultado da alta concentração (resistência coesiva, resistência por atrito, viscosidade e pressão dispersiva), pela turbulência do meio e por expulsão do fluido dos poros. Os mecanismos de movimento e as propriedades do fluxo diferem inteiramente do fluxo de água limpa, devido a uma extrema concentração de sedimento. Quando a concentração é baixa, os efeitos não são perceptíveis, mas a alta concentração muda as características físicas e dinâmicas das correntes (BRADLEY; MCCUTCHEON, 1985). Outro aspecto importante sobre o fluxo das corridas de detritos é que a composição do material sólido, com certa quantidade de cascalhos, não é uniforme em toda a massa corrente. Ela varia conforme o fluxo escoar, e no espaço temporal ocorre a seleção

dessas partículas (SUWA et al., 1985). Por outro lado, Bradley e MCCutcheon (1985) relatam em seus experimentos que, durante o fluxo, a concentração apresenta-se uniforme por todo o perfil. Em geral, a distribuição da concentração não é uniforme, devido à ação da gravidade, dos choques entre as partículas e da alimentação por novas fontes de material durante a sua trajetória.

Um dos principais problemas da corrida de detritos, segundo Gramani (2001) é a determinação da trajetória que este processo pode desenvolver. Isto ocorre porque os fluxos são capazes de erodir, espraiar ou bloquear, alterando a sua direção. A quantidade de material transportado no processo e suas variações com o tempo (viscosidade, topografia, distribuição granulométrica) são alguns fatores importantes para determinar o escoamento e deposição dos materiais (MORGAN et al., 1997). Estes parâmetros serão discutidos com maior detalhe no subcapítulo 2.2.

2.1.3. A deposição do fluxo

Esta fase corresponde à etapa na qual a massa mobilizada inicia seu processo de deposição, que normalmente resulta da combinação da redução da declividade e da perda do confinamento (HUNGR, 2005). Segundo Iverson (1997), a deposição ocorre quando toda a energia cinética é transformada em outra energia. A área de deposição normalmente ocorre no formato de um leque, conhecido como leque de detritos (*debris fan*) (HUNGR, 2005).

A deposição do material das corridas de detritos depende do local de sua ocorrência, do canal (estreito e/ou aberto), da característica do detrito, bem como da existência de barreiras naturais ou artificiais (SANCHO, 2016). Entretanto, há consenso nas bibliografias de que a deposição e o cessar do fluxo ocorrem em regiões mais planas e abertas (IPT, 1987; WOLLE; CARVALHO, 1994), com declividades entre 3° e 10° (IKEYA, 1981; LAWSON, 1982; BENDA; CUNDY, 1990; FANNIN; ROLLERSON, 1993), porém podem apresentar deposição parcial ou inicial em até 15° (VANDINE, 1996). Sobre a causa da deposição, o cessar pode estar associado à perda do material confinante dentro do canal, ou seja, o espriamento, e pelo impedimento do fluxo devido a barramentos naturais e artificiais (VANDINE, 1996). Outros autores destacam que as porções das drenagens caracterizadas por áreas desconfiadas, mais largas e com maior seção, são considerados pontos de retardação das corridas de detritos, com os depósitos apresentando grande

variedade de rochas com diferentes diâmetros (HONG et al., 1985; BENDA, 1985; HASHIMOTO; HIRANO, 1990; GRAMANI, 2001). A diminuição de velocidade e a deposição nestas áreas ocorre, em boa parte, devido à diminuição da espessura do fluxo e geralmente o material depositado nas porções mais distantes representa a matriz viscosa.

VanDine (1996) descreveu que o comportamento da deposição pode ocorrer de três formas:

- Lâminas ou camadas de detritos (*debris sheets*) são geralmente depositadas sobre uma porção da área do leque de deposição, em que são caracterizados por um ramo ou canal de diferentes direções, apresentando uma forma geométrica semelhante a um “nariz” em sua fase final;

- Canais preenchidos parcialmente ou totalmente pelos detritos (*debris plugs*) caracterizam-se pelo comportamento de deposição ao longo do canal e em suas laterais e, conseqüentemente, quando da deposição total destes materiais no canal, podem resultar em uma mudança brusca da direção de fluxo deste canal;

- Os diques de detritos (*debris levees*) são barreiras íngremes que podem ocupar ambas as margens dos canais, podendo apresentar vários metros de altura e estender-se por várias dezenas de metros ao longo do canal (VANDINE, 1996).

Van Steijn (1996) e IPT (2002) afirmam que o reconhecimento das corridas de detritos dá-se pela morfologia do seu depósito, observando um par de diques ou depósitos laterais ao longo do sulco principal e/ou lóbulos frontais no término do trajeto. Segundo Van Steijn (op.cit.), estes elementos podem ser detectados no campo e a partir de fotografias aéreas.

Nery (2016) ressalta que um ponto importante para a determinação dos impactos das corridas de detritos é a seção na qual o processo deixa de ser caracterizado preponderantemente pela movimentação e passa a se caracterizar por deposição. A esse ponto se dá o nome de seção crítica, onde as velocidades e vazões são maiores, e que servem de base para o dimensionamento e determinação de características de sua deposição (NERY, 2016).

2.2. Principais parâmetros envolvidos nas corridas de detritos

Dentre os parâmetros envolvidos na corrida de detritos, Costa (1984), Iverson (1997), Gramani (2001) e Sakai (2014) destacam a velocidade do processo, sua força de impacto, a distância percorrida, a área do depósito, a espessura e volume mobilizados, a viscosidade e densidade do fluxo, a taxa de erosão e a descarga de pico. Nesse sentido, este subcapítulo será direcionado à discussão de cada uma dessas variáveis.

Sobre a velocidade do fenômeno, Rickenmann (1999) afirma que esta variável apresenta difícil medição durante a corrida de detritos, e sua aproximação pode ser realizada em visitas de campo após o evento, mas geralmente é estimada por meio de correlações empíricas e medidas de ensaios realizadas em laboratório.

Para Gramani (2001), as corridas de detritos podem atingir altas velocidades durante o seu escoamento, dependentes diretamente das características do material (granulometria, concentração de sólidos, selecionamento e teor de argila) e da geometria dos canais de drenagem (declividade, formato, largura e raio hidráulico). Nesse sentido, de acordo com Yablonskiy et al. (1992) a variação da velocidade deste evento depende de alguns fatores relativos à superfície de escoamento, dentre eles o raio hidráulico, o perfil longitudinal dos canais ou inclinação da superfície e a densidade do fluxo. Porém, de maneira geral, as velocidades observadas e calculadas em corridas de detritos naturais variam comumente de 0,5 a 20m/s, sendo comuns velocidades em torno de 8-10m/s (GRAMANI, 2011).

Ademais, Gramani (2001) verificou que muitas fórmulas têm sido propostas para a determinação da velocidade deste fenômeno, visando preferencialmente sua porção frontal e a superfície do fluxo. Tal determinação é efetuada porque, nas porções frontais, estão localizados os maiores problemas no que diz respeito ao impacto gerado e alturas atingidas, afetando os obstáculos encontrados em sua trajetória. Desta forma, são vários os fatores considerados na elaboração das fórmulas para cálculos de velocidade. De acordo com Gramani (2001), maioria dos pesquisadores utiliza a profundidade média do fluxo e a inclinação dos canais como principais parâmetros a serem obtidos (Equação 2).

Equação 2. Equação geral do cálculo da velocidade de corridas de detritos. Fonte: Costa (1984).

$$V = a \times h^{-b} \times S^c \quad (2)$$

No qual:

V – Velocidade da corrida de detritos;

a , b e c – constantes (variam para cada local);

S – declividade do canal;

h - espessura média da corrente (m).

A partir de alguns estudos de Costa (1984), Gramani (2001) efetuou validações de diversas formulações, a fim de verificar quais se aplicam melhor a diferentes faixas de velocidade. As Equações (3) e (4) apresentaram resultados satisfatórios para velocidades acima de 10m/s (KHERKHEULIDZE, 1967 apud GRAMANI, 2001) e (ZHANG et al., 1985 apud GRAMANI, 2001):

Equação 3. Cálculo da velocidade de processos de corridas de detritos (para movimentos acima de 10m/s). Fonte: Kherkheulidze (1976) e Zhang et. al (1985) citados por Gramani (2001).

$$V = 10,75 \cdot h^{0,55} \cdot S^{0,33} \quad (3)$$

No qual:

V – Velocidade do fluxo (m/s);

h – altura do fluxo (m);

S - declividade do canal (m/m).

Equação 4. Cálculo da velocidade de processos de corridas de detritos (para movimentos acima de 10m/s). Fonte: Kherkheulidze (1976) e Zhang et. al (1985) citados por Gramani (2001).

$$V = 21 \cdot h^{0,48} \cdot S^{0,5} \quad (4)$$

No qual:

V – Velocidade do fluxo (m/s);

h – altura do fluxo (m);

S - declividade do canal (m/m).

Não obstante, as equações (5) e (6) se encaixam melhor para faixas de velocidade entre 2 m/s e 4 m/s (KHERKHEULIDZE, 1975 apud GRAMANI, 2001) e (SRIBNI, 1966 apud GRAMANI, 2001):

Equação 5. Cálculo da velocidade de processos de corridas de detritos (para movimentos entre 2m/s e 4m/s). Fonte: Kherkheulidze (1976) citado por Gramani (2001).

$$V = 5,8 \cdot h^{0,55} \cdot S^{0,33} \quad (5)$$

No qual:

V – Velocidade do fluxo (m/s);

h – altura do fluxo (m);

S - declividade do canal (m/m).

Equação 6. Cálculo da velocidade de processos de corridas de detritos (para movimentos entre 2m/s e 4m/s). Fonte: Kherkheulidze (1976) citado por Gramani (2001).

$$V = 5,15 \cdot h^{0,67} \cdot S^{0,25} \quad (6)$$

No qual:

V – Velocidade do fluxo (m/s);

h – altura do fluxo (m);

S - declividade do canal (m/m).

Rickenmann (1991) propôs outra equação para estimar a velocidade de corridas de detritos, desde que haja mais informações do local de sua ocorrência, como o diâmetro médio dos sólidos transportados pelo fluxo e a vazão de período de retorno de 100 anos para a bacia hidrográfica. A equação (7) é indicada principalmente para estudos de retro-análise e considera mais variáveis, cujos resultados são mais coerentes com a realidade (SAKAI, 2014).

Equação 7. Cálculo da velocidade de corrida de detritos em estudos de retro-análise.

Fonte: Rickenmann (1991).

$$V = 1,3 \cdot \text{sen}^{0,2}(\theta) \cdot \left(\frac{Q_0}{b}\right)^{0,6} \cdot \frac{g^{0,2}}{d_{50}^{0,4}} \quad (7)$$

No qual:

V – Velocidade do fluxo (m/s);

θ - declividade do canal (em graus);

g – aceleração da gravidade (m/s²);

d_{50} – diâmetro médio dos grãos (m);

Q_0 – vazão de enchente no canal de saída da bacia (seção crítica) no período de 100 anos (m³/s);

b – largura do canal (m).

Outros autores baseados nas relações utilizadas na mecânica de fluidos, estimaram diretamente a velocidade através da superelevação calculada a partir do impacto causado em estruturas, ou através de características do canal (JAKOB, 2005). Estas equações assumem que: o quadrado da velocidade numa área de seção transversal média pode ser substituído pela velocidade média; a inclinação é constante e a altura do canal é muito menor que o raio de curvatura do mesmo. Iverson (1997), utilizando equações propostas por Chow (1959), Fairchild e Wigmosta (1983), Hungr et al. (1984) e Rickenmann (1999), indicou que estas estimativas permite a obtenção de resultados razoáveis.

Em relação à força de impacto deste fenômeno, Gramani (2001) e Takahashi (1981) destacam que as corridas de detritos são capazes de exercer enormes forças de impacto sobre objetos localizados em sua trajetória. Okuda et al. (1977) mediram uma força maior que 60 kN para uma área de 15 cm² sob ocorrência de corrida de detritos. Assim, construções, muros, pequenas barragens, árvores de grande porte, pontes e casas podem ser totalmente destruídas ou englobadas pelos fluxos. Gramani (2001) destaca que é possível encontrar fragmentos destas obras imersos no fluxo, transportados por grandes distâncias. A título de exemplo, Cruz (1974) relata que durante a corrida de detritos ocorrida em Caraguatatuba (SP), na bacia do Rio Santo Antônio, a ponte metálica localizada próxima à desembocadura do respectivo canal foi completamente bloqueada por troncos de árvores, trazidos pelo fluxo da corrida, formando um represamento original, que originou uma enchente de

grandes dimensões. Nesse sentido, a região a montante se comportou como um grande reservatório de água e sedimentos, cuja consequência foi o rompimento da ponte, liberando esse aporte de materiais acumulados (GRAMANI, 2001) (Figura 12).

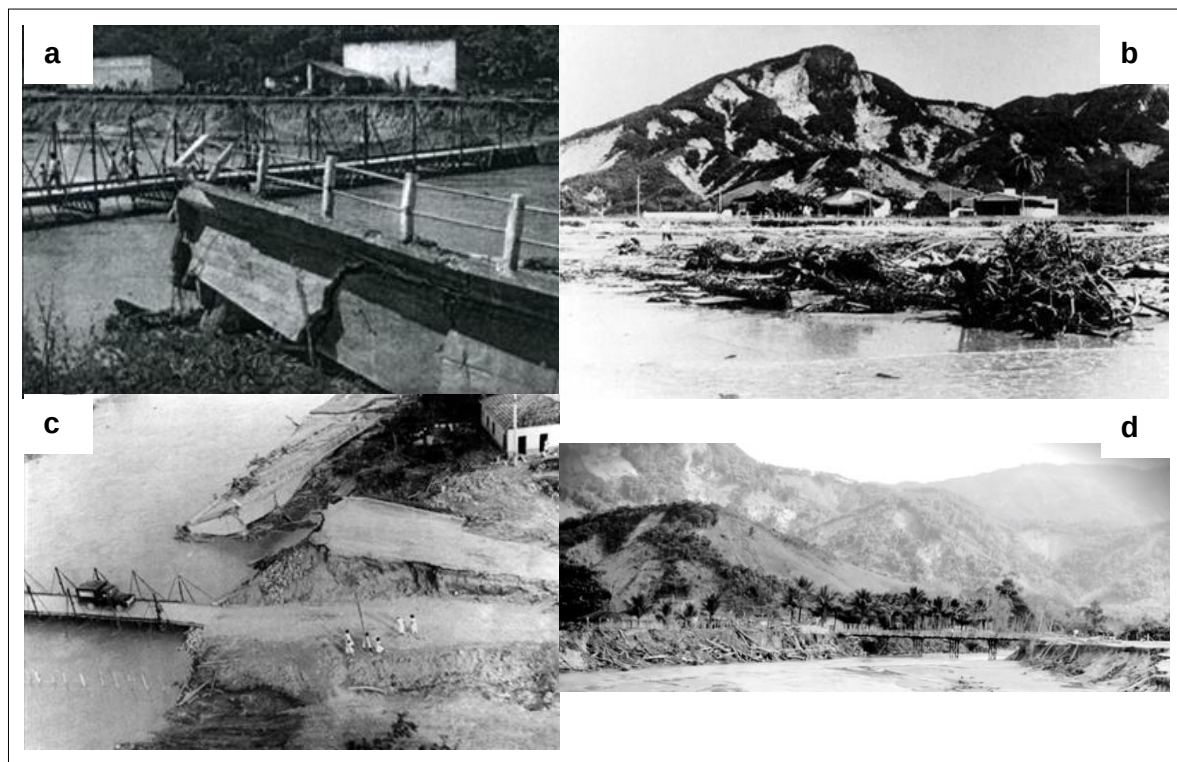


Figura 12. Impactos causados pela corrida de detritos de Caraguatatuba (SP), ocorrida em 18/03/1967. (a) Destroços da ponte rompida na desembocadura do Rio Santo Antônio. Fonte: <https://www.youtube.com/watch?v=bm95isZXQbc>; (b) Material do fluxo acumulado a montante que foi liberado após o rompimento da ponte na Bacia do Rio Santo Antônio. Fonte: Cruz (1974); (c) Ponte construída logo após o evento para o tráfego de alimentos, água e resgate de sobreviventes e feridos. Fonte: Cruz (1974); (d) Nova ponte construída e evidência de depósitos nas margens da drenagem, principalmente de material vegetal. Fonte: <http://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiba-regiao/noticia/2017/03/deslizamento-de-terra-que-devastou-caraguatatuba-completa-50-anos.html>.

Na tentativa de mensurar essa força, Watanabe e Ikeya (1981) proporam a equação a seguir (8), na qual a magnitude da força de impacto é diretamente proporcional à densidade do fluxo e ao quadrado da velocidade.

Equação 8. Cálculo da força de impacto de uma corrida de detritos. Fonte: Watanabe e Ikeya (1981).

$$F = \alpha \cdot A_I \cdot \gamma \cdot \frac{V^2}{g} \quad (8)$$

No qual:

F – Força de impacto (kN);

α – coeficiente de impacto (valor que varia de 1 – fluxo turbulento – a 2 – fluxo laminar – adimensional);

A_I – área de impacto (m²);

γ – peso específico das corridas de detritos (kN/m³);

V – velocidade do fluxo;

g – aceleração da gravidade (m/s²).

Assim, de acordo com a equação (8), verifica-se que o aumento da velocidade eleva a força de impacto ao quadrado, ao passo que o peso específico afeta tal valor de maneira diretamente proporcional (SAKAI, 2014). O autor ainda ressalta que nas áreas mais planas e largas da bacia hidrográfica, na qual ocorre a diminuição da velocidade do fluxo, é frequentemente observada a permanência de diversas estruturas antrópicas ou não, tais como casas, vegetação, pontes e outras edificações. Em contrapartida, na garganta de saída das corridas de detritos observa-se normalmente uma grande destruição, devido as maiores velocidades do fluxo (SAKAI, 2014). Para Gramani (2001), as estimativas da força de impacto são fundamentais para auxiliar projetos de estruturas para reter e controlar estes eventos.

Outro parâmetro fundamental a ser considerado na corrida de detritos é a distância percorrida pelo processo, que de acordo com Gramani (2001),

é uma característica muito marcante do fenômeno e corresponde à capacidade de atingir grandes distâncias a partir da área fonte dos sedimentos (GRAMANI, 2001, p. 88).

De acordo com estudos do IPT (1987), a grande distância de percurso é explicada por características de diminuição da resistência ao fluxo do material promovida pela adição de água aos sedimentos e configuração das drenagens das regiões de alta declividade das bacias que originam tais fenômenos. Sancho (2016)

e Gramani (2001) salientam que o conhecimento dessa variável é importante para a projeção de medidas de proteção e para a análise de risco e prevenção, de modo a auxiliar uma ocupação segura em locais de vulnerabilidade à ocorrência de corridas de detritos.

A determinação da distância percorrida pode ser realizada por meio de medições em campo, fotogrametria e a partir de coordenadas obtidas com GPS (*Global Positioning System* – Sistema de Posicionamento Global) (SANCHO, 2016). Quanto a correlações empíricas, vários autores, realizando pesquisas sobre o alcance máximo das corridas de detritos em diferentes localidades geográficas, propõem equações para a determinação da distância percorrida pelo evento, baseando-se principalmente no volume do fluxo e na altura ou diferença entre a cota de saída do movimento e a cota final de deposição (CHOW, 1959; FAIRCHIELD; WIGMOSTA, 1983; HUNGR et al., 1984; RICKENMANN, 1999; MCCLUNG, 2001; MOTTA, 2014).

Não obstante, outra variável relevante para medidas de prevenção a corridas de detritos é a área de deposição do fluxo. Assim como a determinação da distância percorrida, este parâmetro também pode ser obtido através de medidas de campo, por coordenadas coletadas com GPS ou por fotointerpretação em imagens de sensoriamento remoto. Alguns autores também propõem a determinação desta variável via correlações empíricas, baseadas principalmente no volume do fluxo e na sua altura (RICKENMANN, 1999; CROSTA et al., 2001; LORENTE et al., 2003).

No que tange o volume do material mobilizado durante a corrida de detritos, Sancho (2016) afirma que este se refere ao “volume total de material movimentado para a área de deposição durante um evento”. Segundo Rickenmann (1999), o volume é o parâmetro mais importante do ponto de vista do potencial destrutivo e de aplicação de medidas mitigadoras, além do fato de seu conhecimento ser necessário para o emprego em muitas equações, principalmente das vazões (GRAMANI, 2001).

Takahashi (1991), a partir de dados coletados no Japão e Canadá, elaborou a Equação (9) para a determinação do volume de corridas de detritos em função de sua vazão de pico.

Equação 9. Cálculo do volume total mobilizado em uma corrida de detritos. Fonte: Takahashi (1991).

$$Q = 500 \cdot q_T \quad (9)$$

No qual:

Q – volume total mobilizado da corrida de detritos (m³);

q_T – vazão de pico (m³/s).

Outros autores também propuseram equações para estimar o volume mobilizado pela corrida de detritos, baseando-se em diferentes variáveis, tais como área de contribuição (MARCHI; D'AGOSTINO, 2004), vazão de pico (TAKAHASHI, 1991), distância total percorrida e altura ou diferença entre a cota de saída do movimento e a cota final de deposição (COROMINAS, 1996; RICKENMANN, 1999; GRAMANI, 2001; POLANCO, 2010; MOTTA, 2014).

Augusto Filho (1993) calculou o volume de sedimentos mobilizados admitindo que a partir de um dado evento pluviométrico crítico, os escorregamentos ocorridos em encostas de suscetibilidade muito alta podem contribuir para as corridas de detritos com 50% de sedimento. Este volume de sedimentos representaria 0,5 m da espessura média de um escorregamento, considerando que a espessura das rupturas observadas na Serra do Mar seja igual a 1 m (AUGUSTO FILHO, 1993; WOLLE; CARVALHO, 1994). Nesse contexto, Fúlfaro et al. (1976), consideraram que o material afetado pelo escorregamento refere-se ao vazio deixado na superfície topográfica, e que assume a forma do vazio a uma cunha, com dimensões estabelecidas a partir da área do escorregamento (em planta) e das medidas diretas do levantamento de campo. Posteriormente, respectivos autores multiplicaram os valores obtidos pelo valor de densidade dos solos (1,8 ton/m³), obtendo assim os valores estimados de sedimentos (FÚLFARO et al., 1976).

Ademais, técnicas de fotogrametria têm sido utilizadas para a obtenção do volume a partir de fotos aéreas, sendo esta particularmente influenciada pela cobertura vegetal. Radares de penetração e outras técnicas sísmicas também são empregados, porém necessitam ser calibrados a partir de um deslizamento observado e bem documentado. Sancho (2016) e Nunes e Sayão (2014) recomendam a determinação do volume diretamente na área do fluxo de detritos,

cujo valor pode ser comparado ao estimado pelas agências de monitoramento e informados logo após o evento.

Sobre a espessura, Gramani (2001) ressalta que sua dimensão varia de acordo com a geometria do canal, raio hidráulico e volume de material incorporado. Em vales estreitos são registradas as maiores espessuras de fluxo, cujo valor diminui conforme a drenagem se torna desconfiada. Os valores medidos variam de 5m (ERIKSEN et al., 1970) até valores de 50-90m (OKUSA et al., 1986).

Além desses parâmetros, a corrida de detritos, por ser caracterizada por um líquido hiperconcentrado apresentam altas densidades, bem maiores que enchentes com altas concentrações de sedimentos (GRAMANI, 2001). A densidade de uma corrida de detritos varia de 14 kN/m³, nos casos de menor concentração de sólidos, a 25 kN/m³ nos casos com menor quantidade de água (CURRY, 1996 apud COSTA, 1984). Valores próximos a 20 kN/m³ são comuns (DAVIES, 1992). Nesse contexto, os valores de viscosidade de uma corrida de detritos possuem uma variação muito grande quando retratadas por diferentes pesquisadores. Porém, existe um consenso de que por ser um fluido hiperconcentrado e com altos valores de densidade, composto por materiais de diferentes granulometrias e densidades, sua viscosidade também é elevada, o que diminui a velocidade de transporte do fluxo, a depender da quantidade de material mobilizado aportado durante o evento. Os valores comumente estão no intervalo de 15 a 60.000 poises, sendo que valores acima de 2.000 poises são mais comuns, conforme relatou Gramani (2001). Costa (1984), baseando-se nas pesquisas de Sharp e Nobles (1953), Curry (1966) e Johnson (1970), propôs a seguinte equação para determinar a viscosidade de fluxos de corridas:

Equação 10. Cálculo da viscosidade de uma corrida de detritos. Fonte: Costa (1984).

$$\mu_N = \frac{\gamma_d \sin S D^2}{2 V_s} \quad (10)$$

No qual:

μ_N – viscosidade Newtoniana (poise);

γ_d – peso específico do fluxo (N/m³);

D – espessura do fluxo (metros);

V_s – velocidade da superfície (m/s);

S – declividade (graus).

O autor ressalta que embora essa não seja a equação ideal para corridas de detritos, sua aplicação pode dar valores relativos para comparações (COSTA, 1984).

Outro aspecto importante nas corridas de detritos é sua capacidade de erosão. De acordo com Gramani (2001), o fenômeno possui um grande poder de erosão durante o seu escoamento pelos canais de drenagem. Por apresentar uma grande capacidade de incorporar materiais durante o escoamento, as corridas de detritos são consideradas processos naturais altamente erosivos, causando consideráveis perdas de solo em curto espaço de tempo. Nesse sentido, Sancho (2016) afirma que o material incorporado a uma corrida de detritos depende principalmente da capacidade de erosão do material nas margens e no leito do canal. A erosão e o arraste do material do canal resultam em aumento do volume final, alteração da composição e, às vezes, melhora a mobilidade do movimento (HUNGR, 2005). Os principais pontos afetados pela erosão localizam-se, geralmente, próximos às cabeceiras de drenagens, com alta declividade (Figura 13). O substrato rochoso é raramente afetado, apenas o sendo em casos de rochas intensamente fraturadas ou muito alteradas (ALEOTTI et al., 1996).

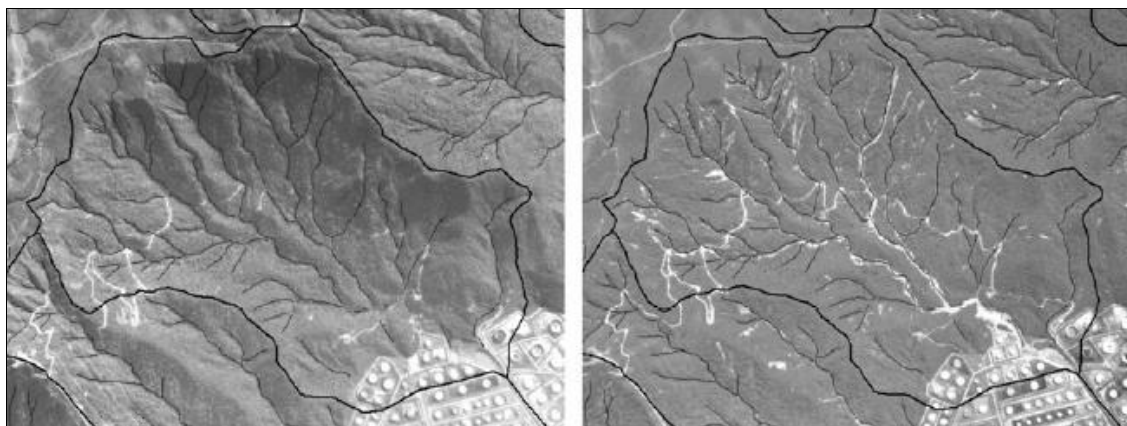


Figura 13. Comparação entre ortofotos de 1986 e 1994 na área da Bacia Rio das Pedras após a corrida de detritos que atingiu a Refinaria Presidente Bernardes em Cubatão (SP)/ fevereiro de 1994. (a) Antes do evento (1984); (B) após a corrida de detritos (1994). Em trechos do afluente principal, com a passagem da corrida de detritos, o canal que era em torno de 1 metro, chegou a 40 metros em alguns locais. A erodibilidade foi evidente nas cabeceiras de drenagens e nos locais com maiores ângulos de declive. Fonte: Lopes (2006).

De modo a estimar o grau de erosão, IPT (1987) propôs a equação abaixo na tentativa de prever o comportamento da massa quando essa escoar sobre um substrato inconsolidado.

Equação 11. Cálculo do comportamento de um fluxo sob escoamento em substrato inconsolidado (equivalente ao grau de erosão). Fonte: IPT (1987) citado por Gramani (2001).

$$\text{Grau de erosão (GE)} \approx \gamma_f \times R_h \times \theta \times g \quad (11)$$

No qual:

GE – Grau de erosão

γ_f – densidade do fluido (g/cm^3)

R_h - raio hidráulico (cm)

θ - declividade (graus)

g - aceleração da gravidade (cm/s^2)

Esta correlação empírica evidencia a razão de vales encaixados localizados próximos a cabeceiras de drenagem apresentarem características de muita erosão de margens e leito. As maiores declividades (θ) e os maiores raios hidráulicos (R_h) encontrados nesses pontos aumentam diretamente o valor do grau de erosão. Caso contrário ocorre com as porções mais distais, com áreas mais planas e vales largos, consequentemente diminuindo o valor de R_h e θ (GRAMANI, 2001).

Em relação à aplicabilidade desse conceito, Sancho (2016) afirma que a área de impacto de um fluxo de detritos depende diretamente do grau de erosão dos materiais ao longo do canal, pois o volume final é influenciado pela capacidade de sua erosão. Assim, conhecer a profundidade de erosão de cada material é importante para a construção de estruturas de proteção de estruturas como dutos que atravessam canais típicos de fluxos de detritos (JAKOB et al., 1997).

O último parâmetro a ser abordado é a vazão da corrida de detritos, que sob a ótica de Sakai (2014), é uma das grandezas físicas mais importantes para a caracterização das corridas de detritos, pois a partir desse parâmetro muitas medidas mitigadoras e avaliações de impacto podem ser estimadas.

Os registros das vazões de pico das corridas de detritos geralmente são bem maiores do que enchentes comuns, cerca de 5 a 20 vezes (MASSAD et al., 1997). Este pico ocorre a dois aspectos:

- aumento do volume de material mobilizado, devido à incorporação de material sólido provindos de escorregamentos das encostas e pela erosão dos depósitos marginais e de fundo, e

- aumento na velocidade dos fluxos, devido ao aumento de densidade da massa (GRAMANI, 2001).

Após realizarem estudos de retro-análise em Cubatão e no Japão, Massad et al. (1997), pautados na equação de Araya Moya (1994), proporam a seguinte equação para determinar a vazão de pico de corridas de detritos:

Equação 12. Cálculo para estimar a vazão de pico em corridas de detritos. Fonte: Gramani (2001).

$$q_T = \frac{2}{(1 - C_V)} \cdot A_T \cdot I_1 \quad (12)$$

No qual:

q_T – vazão de pico (m³/s);

C_V – concentração volumétrica de sólidos (adimensional);

A_T – área total da bacia (km²);

I_1 – intensidade de precipitação média da hora que precede a corrida de detritos (mm/h).

Outros autores também proporam correlações empíricas para a determinação da vazão de pico em corridas de detritos, baseadas principalmente em parâmetros como altura do fluxo, largura do canal, velocidade do fluxo, volume dos sólidos e volume total das corridas de detritos, conforme compilação realizada Cruz e Massad (1997) e Massad et al. (1997).

2.3. Principais casos brasileiros

De acordo com Collins e Znidarcic (1997), em áreas tropicais e costeiras são comuns os movimentos de massa, que causam enorme destruição em sua trajetória, envolvendo diversos tipos de solos e ambientes geológicos.

Assim, no Brasil, ao longo de sua história, foram registradas diversas ocorrências de movimentos de massa e são identificados como os mais atingidos os Estados de Pernambuco, Alagoas, Bahia, Espírito Santo, Minas Gerais, Rio de Janeiro, São Paulo e Santa Catarina (POLANCO, 2010). Nesse sentido, as áreas mais susceptíveis a ocorrência de escorregamentos e corridas de detritos no Brasil são as áreas situadas no sopé da Serra do Mar, da Serra da Mantiqueira e da Serra

Geral, estendendo-se desde a região Sul até a região Norte (POLANCO, 2010). A mesma autora destaca que a localização de grandes concentrações urbanas, importantes setores industriais e rodovias nestes locais é um fator agravante do risco, pois estas áreas são as mais susceptíveis aos movimentos gravitacionais de massa, caracterizando-se como áreas de formação, desenvolvimento e de deposição natural dos materiais transportados.

Desta maneira, este capítulo irá dedicar-se à discussão dos principais casos de corridas de detritos que ocorreram nas regiões sul e sudeste do Brasil. De acordo com Gramani (2001), devido as suas características geológicas, geomorfológicas e climáticas, a Serra do Mar, a Serra da Mantiqueira e a Serra Geral são ambientes com condições propícias para a ocorrência de escorregamentos e corridas de detritos, principalmente. Em relação a Serra do Mar, o mesmo autor afirma que devido à elevada declividade de suas encostas (com ângulos maiores que 35°) e suas chuvas intensas e concentradas, os movimentos de massa – principalmente corridas de detritos e escorregamentos translacionais – são frequentemente observados neste ambiente. A Serra da Mantiqueira, outra região propícia à ocorrência destes eventos, se estende entre os estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. De acordo com Gramani (2001), a incidência destes processos é identificada nestes locais pela presença de afloramentos em sua porção terminal, expondo principalmente depósitos típicos de corridas de detritos. Em relação a Serra Geral, que está localizada na região Sul do Brasil, Gramani (op.cit.) salienta que sua susceptibilidade aos movimentos de massa deve-se à presença de escarpas íngremes com diferenças topográficas da ordem de 1000 metros, além de suas condições climáticas, representadas pela incidência de grandes períodos chuvosos. O autor ainda salienta que por apresentar vales fechados e anfiteatros de pequenas dimensões, formando sub-bacias, o local está mais propício à ocorrência de corridas de detritos e de lama por seus canais de drenagem.

Trabalhos como os de Gramani (2001), Kanji et. al (2003), Polanco (2010), Kobiyama e Michel (2014), Sakai (2014), Corrêa et. al (2015) e Nery (2016) relataram as principais corridas de detritos que ocorreram no Brasil, caracterizando-as em relação a sua dinâmica, geometria dos materiais, condições climáticas e ambiente geológico-geomorfológico. Assim, o Quadro a seguir irá expor alguns dos casos brasileiros, especificamente das regiões sul e sudeste, que concentram a maior incidência destes processos.

Quadro 3. Principais casos brasileiros, das regiões sul e sudeste, de ocorrência de corridas de detritos. Fonte: Sternberg (1949), Gramani (2001), Kanji et. al (2003), Corrêa et. al (2015), Kobiyama e Michel (2014), Polanco (2010), Sakai (2014) e Nery (2016).

Caso	Local	Tipo do evento	Área	Precipitação	Velocidade	Volume (m³)	Perdas
Vale do Paraíba (MG/SP) – 15/12/1948	- Sul do Estado de Minas Gerais: Além Paraíba, Leopoldina, Volta Grande, Pirapetinga - Norte do Estado do Rio de Janeiro: Santo Antônio de Pádua	Escorregamentos e corridas de detritos	1500 km²	180 mm/24 horas	-	-	250 mortes
Serra das Araras – 23/01/1967	60 km da cidade de Rio de Janeiro	Escorregamentos e corridas de detritos	170 km²	275 mm/12 horas	-	>10x10 ⁶ m³	1700 mortos, >100 casas destruídas, danos em rodovias.
Caraguatatuba - 18/03/1967	Caraguatatuba (SP)	Escorregamentos e corridas de detritos ³	7 a 15 km de extensão	586 mm/24 horas	-	7,6x10 ⁶ m³	120 mortos, 400 casas destruídas, danos em rodovias.
Viaduto IV da ferrovia Santos - Jundiá, 1971	Santos (SP)	Escorregamentos e corrida de detritos	-	-	-	1x10 ⁵ m³ (estimado)	Viaduto de aço destruído, o que exigiu obras de estabilização de encosta
Tubarão – Março de 1974	Bacia do Rio Tubarão (Santa Catarina)	Escorregamentos, corridas de lama e de detritos	-	742 mm/16 dias	-	-	199 mortes
Grota Funda, 1975/1976	Paranapiacaba (SP)	Escorregamento e corrida de detritos	300.000 m²	381 mm/1 mês	30 km/h	1.000.000 m³	Pilares da ponte ferroviária danificados.
Lavrinhas – Dezembro de 1986	Lavrinhas (SP)	Escorregamento e corrida de detritos	6 km de extensão	-	80 km/h	160.000 m³	11 mortos
Petrópolis - Fevereiro de 1988	Petrópolis (RJ)	Escorregamentos e corrida de detritos	-	776mm/24 dias	-	-	171 mortos
Bacia do Rio das Pedras – 06/02/1994	Cubatão (SP)	Escorregamentos, corrida de detritos e corrida de lama	2,64 km²	280mm/24 horas	10 m/s	300.000 m³	Destruição 8 barragens de gabião e prejuízos à Refinaria Presidente Bernardes
Timbé do Sul – Dezembro de 1995	SC/ RS	Escorregamentos e corrida de detritos	23,1 km² e 18 km de extensão	>500 mm/1 hora	>5 m/s	3x10 ⁶ 15 metros de altura	29 mortos, 20 casas destruídas, perdas (agricultura e gado)
Bacia do Rio das Pedras - 1996	Cubatão (SP)	Escorregamentos e corrida de detritos	2,64 km²	-	-	16.000 m³	Apenas trabalho de limpeza
Rodovia de Ubatuba - 1996	Ubatuba (SP)	Escorregamentos rotacionais, queda de blocos e corrida de detritos	-	442 mm/13 horas	-	-	Rodovia foi danificada, o que exigiu obras de estabilização da encosta

³ Segundo o IPT (1988), os processos variaram de comportamento, no tempo e no espaço, alterando suas características dinâmicas conforme o escoamento, passando de “*debris flows*” (corrida de detritos/blocos de rocha), “*mud flows*” (corrida de lama) e “*mud flood*” (enchente com alta concentração de material sólido).

Continuação do quadro 3.

Caso	Local	Tipo do evento	Área	Precipitação	Velocidade	Volume	Perdas
Maciço do Quitite e Papagaio – Fevereiro de 1996	Rio de Janeiro (RJ)	Escorregamentos translacionais, rotacionais e corrida de detritos	2,13 km ² com 1,6 km de extensão (Bacia do Quitite) 2,53 km ² (Bacia do Papagaio)	300 mm/48 horas	5,3 m/s	100.000 m ³ (Bacia do Quitite) 42.000 m ³ (Bacia do Papagaio)	1 morte e centenas de casas destruídas
Rodovia Anchieta – 12/12/1999	Km 42 da rodovia (Rio Pilões)	Escorregamentos e corrida de detritos	3,2 km de extensão	274 mm/72 horas	-	300.000 m ³	200 m de área afetada e tráfego interrompido por várias semanas
Campos do Jordão – Janeiro de 2000	Campos do Jordão (SP)	Escorregamentos e corrida de detritos	-	453,2 mm/ 96 horas	-	-	300 residências desocupadas por situação de risco e 10 mortes
Fazenda Mato Quietto – Janeiro de 2000	Lavrinhas (SP)	Escorregamentos e corrida de detritos	17,5 km ²	>70 mm/1 hora	22 m/s	1,6x10 ⁶ m ³	11 mortes, muitas casas e pontes destruídas
Vale do Itajaí – Novembro de 2008	SC	Escorregamentos translacionais, rotacionais e corrida de detritos e de lama	-	185,8 mm/48 horas	-	-	78.000 pessoas desalojadas, 135 mortes e 2 desaparecidos no Estado
Córrego D'antas e Córrego das Vieiras – Janeiro de 2011	Nova Friburgo (RJ)	Escorregamentos e corrida de detritos	52 km ² (Bacia do Córrego D'antas) 33 km ² (Bacia do Córrego das Vieiras) 7,5 km de extensão	266 mm/48 horas	8,5 m/s	-	429 mortes, pessoas desaparecidas, 3.220 desalojados, 2.031 desabrigados e inúmeros prejuízos
Bairro da Posse - Janeiro de 2011	Teresópolis (RJ)	Escorregamentos translacionais e corrida de detritos	12 km ² 4,8 km de extensão	270 mm/24 horas	-	-	343 mortes, pessoas desaparecidas, 9.110 desalojados, 6.727 desabrigados e inúmeros prejuízos
Córrego do Cuiabá – Janeiro de 2011	Petrópolis (RJ)	Escorregamentos translacionais, rotacionais, corrida de detritos e de terra	36 km ² 15 km de extensão	-	-	100.000 m ³	71 mortes, pessoas desaparecidas, 6.223 desalojados, 191 desabrigados e inúmeros prejuízos
Serra da Prata – 11/03/2011	Morretes e Paranaguá (PR)	Escorregamentos e corrida de detritos	50 km ²	348 mm/72 horas	-	-	Prejuízos por destruição total ou parcial de casas, ruas, estradas, pontes e lavouras. 21 pessoas feridas e 1 óbito
Ribeirão Cágado - 2013	Cubatão (SP)	Escorregamentos e corrida de detritos	0,26 km ²	273,6 mm/24 horas	-	-	Danos na adutora da Sabesp
Córrego Guarda-Mão – Janeiro de 2014	Itaoca (SP)	Escorregamentos e corrida de detritos	7,16 km ²	210 mm / 2 horas	-	-	Destruição de plantações, moradias, pontes, estradas, 25 mortos e 2 desaparecidos

2.4. Principais medidas mitigadoras à ocorrência de corridas de detritos

Segundo Gramani (2001), as medidas mitigadoras à ocorrência de corridas de detritos se englobam em duas esferas: (a) conhecimento da vulnerabilidade do terreno frente à ocorrência desses processos e (b) aplicação de medidas estruturais para sua contenção.

Sobre a vulnerabilidade do terreno, o mesmo autor relata que esta depende basicamente da existência e da combinação dos seguintes aspectos: histórico pluviométrico, inclinação das encostas, inclinação dos canais, área da bacia, aspectos geológicos (tipos de rocha e de solos, espessuras, características físicas, erosividade), altura das encostas, vegetação e uso e ocupação do terreno (GRAMANI, 2001). Nesse sentido, atribuindo pesos a cada variável e estipulando diferentes cenários, ele chegou a diferentes notas finais e distintos cenários hipotéticos, que variavam de 100 a 0, cuja indicação remetia a áreas mais vulneráveis e menos vulneráveis a corridas de detritos, respectivamente. Nessa metodologia, a nota final é obtida por meio da somatória das notas parciais de cada classe multiplicadas pelo seu respectivo peso. O quadro a seguir lista os fatores e atributos utilizados pelo autor para determinar a vulnerabilidade de uma área à ocorrência de corridas de detritos.

Quadro 4. Fatores utilizados para determinação de vulnerabilidade de uma área à geração de corridas de detritos, atributos e notas parciais. Fonte: Gramani (2001).

FATORES	C	P	ATRIBUTOS	NP
Chuva (R) (mm/h)	R1	3	>80	10
	R2		60-80	6,6
	R3		30-60	3,3
	R4		<30	0
Inclinação da Encosta (S) (°)	S1	2,5	>45	10
	S2		45-30	6,6
	S3		15-30	3,3
	S4		<15	0
Inclinação do canal (D) (°)	D1	0,5	>25	10
	D2		15-25	6,6
	D3		10-15	3,3
	D4		<10	0
Área da Bacia (A) (km ²)	A1	1	<5	10
	A2		5-10	6,6
	A3		10-20	3,3
	A4		>20	0
Altura da Encosta (H) (m)	H1	1	>750	10
	H2		500-750	6,6
	H3		200-500	3,3
	H4		<200	0
Uso e ocupação/vegetação (V) (% da área ocupada ou desmatada)	V1	0,5	90-100	10
	V2		50-90	6,6
	V3		30-50	3,3
	V4		<30	0
Aspectos geológicos (G)*	G1	1,5	G1	10
	G2		G2	6,6
	G3		G3	3,3
	G4		G4	0

Sendo que:

* G1 = solos residuais; colúvios e alúvios espessos; depósitos glaciais e piroclásticos; muito material disponível para mobilização após eventos chuvosos (nas encostas e nos canais);

G2 = condição intermediária entre G1 e G3;

G3 = pacotes coluvionares de pequena expressão; aluviões pouco espessos; pequena espessura dos solos residuais;

G4 = rochas sedimentares; solos com grande resistência ao cisalhamento e com baixo grau de erosão, forte cimentação entre grãos; ausência de pacotes coluvionares; muito pouco material disponível nos canais de drenagem (GRAMANI, 2001).

Sobre as medidas estruturais, os parâmetros a serem considerados para sua implantação geralmente incluem: frequência e intensidade ou volume do evento, trajetória preferencial, granulometria dos detritos, distância total percorrida, vazão de pico, espessura na proximidade das estruturas, ângulo de deposição provável e

forças de impacto (VANDINE, 1996). Gramani (2001) listou as principais medidas defensivas contra as corridas de detritos, considerando os parâmetros supracitados.

Quadro 5. Tipos de obras de controle contra corridas de detritos e suas respectivas funções. Fonte: Cruz et al. (1999) modificado por Gramani (2001).

TIPO DE OBRA	FUNÇÃO	DESCRIÇÃO
Barragens	Obras de retenção, quebra de energia e controle: redução das vazões de pico	Geralmente de concreto; vertedor central + bacia de dissipação; porte médio; construídos em sequência em um canal; suportar grandes impactos; podem ser feitos com outros materiais
Reservatórios	Obras de armazenamento dos materiais transportados	Entre duas barragens ou na porção final do fluxo; construídos em áreas planas: reduzir a espessura dos fluxos, consequentemente a sua velocidade, forçando a deposição dos materiais
Canais	Obras de condução (escoamento) das corridas de detritos para áreas de deposição	Geralmente revestidos de concreto; evitar erosão e espraiamento lateral; dimensões variadas
Estabilização de encostas	Evitar o fornecimento de material para os fluxos	Contenção de escorregamentos; estabilização dos materiais do leito; reflorestamento
Fios sensores e pluviômetros	Sistemas de alerta e alarme	Instalados em seções conhecidas dos canais de drenagem ou mesmo nos canais de condução dos materiais; prevenir e estabelecer a evacuação de áreas antes da atuação do processo

A figura 14 demonstra alguns exemplos de construção de obras de engenharia aplicadas na mitigação das corridas de detritos, compatibilizadas por Sancho (2016).

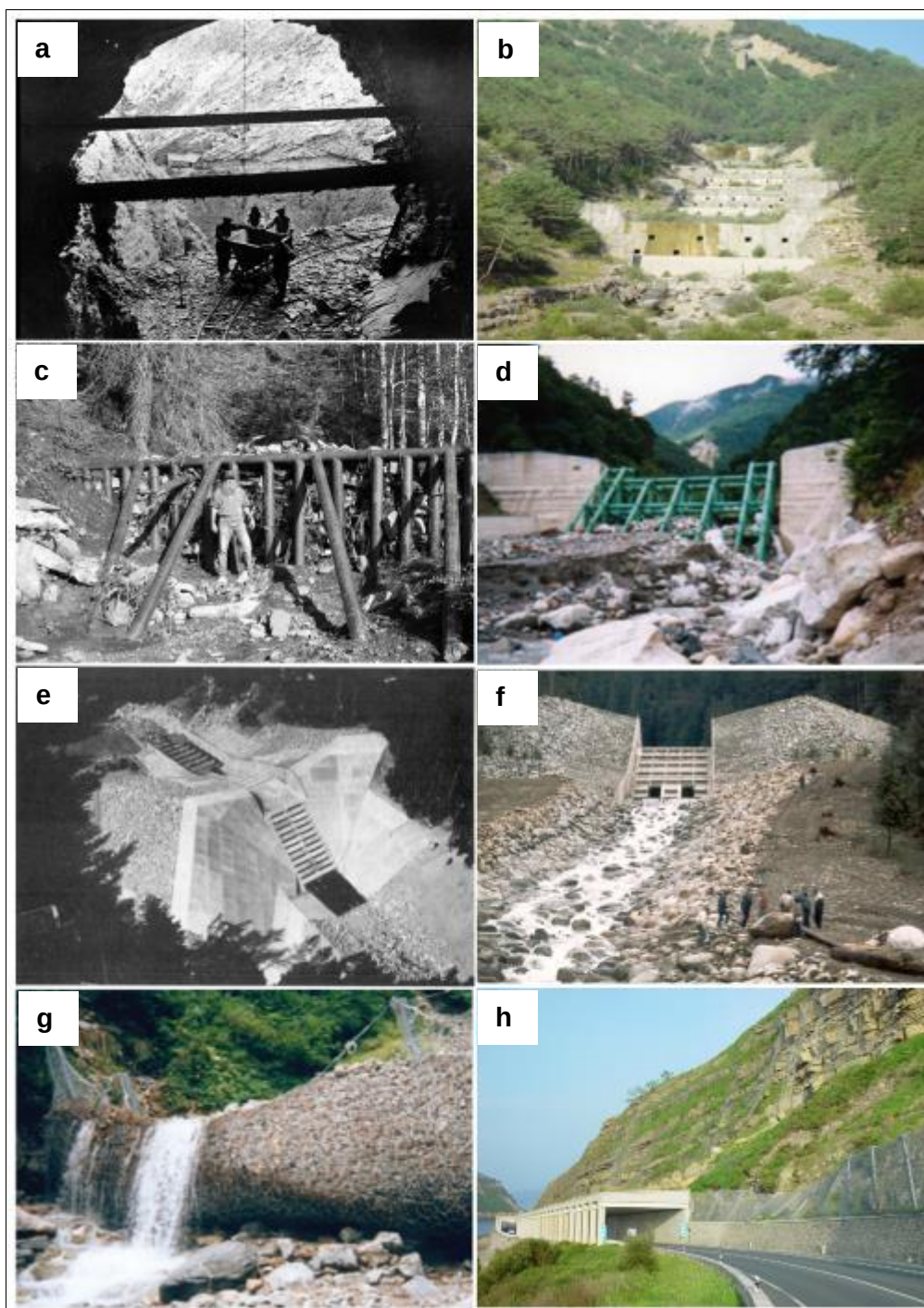


Figura 14. Técnicas de mitigação de corridas de detritos. (a) Túnel de desvio, cuja finalidade é a de desviar o fluxo de áreas habitáveis. França (Huebl; Fiebiger, 2005); (b) Check dams, cuja estrutura dissipa a energia do fluxo, diminuindo o impacto da corrida de detritos. Espanha (Corominas, 2013); (c) Debris racks, que funcionam como barreiras resistentes aos detritos, projetadas para coletar e depositar os detritos grosseiros, permitindo a passagem da água e materiais finos. Colorado, USA (deWolfe et al., 2008); (d) Barreiras tubulares, que possui a mesma finalidade da estrutura descrita na figura c. Japão (Ishikawa et al., 2008); (e) e (f) Barragem, cuja funcionalidade é a de reduzir as vazões de pico. Canadá (Wieczorek et al., 2001); (g) Barreira flexível, mesma função descrita na figura c. Japão (Bartelt et al., 2009); (h) Túneis falsos, utilizados para proteção de estradas e infraestrutura localizadas na zona atravessada pelo fluxo (Corominas, 2013). Fonte: adaptado de Sancho (2016).

2.5. Modelagem de corrida de detritos

Segundo Tucci (2012), modelo é a representação do comportamento de um sistema, ou, em uma definição mais abrangente,

a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com o objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas (TUCCI, 2012, p. 17-18).

Portanto, o modelo pode ser considerado uma representação simplificada da realidade, que auxilia na compreensão dos processos que a envolvem e a partir da descrição dos objetos e da dinâmica de um evento, permite realizar diferentes simulações (BURROUGH, 1998). Na concepção de Fernandes (1996) e Christofolletti (1999), os modelos criam respostas imediatas que auxiliam a tomada de decisões e que é possível realizar mensurações em escala temporal a partir dos resultados obtidos pela modelagem.

Não obstante, para Burrough (1998), a modelagem corresponde a

um modelo espacial dinâmico com representação matemática de um processo do mundo real em que uma localização na superfície terrestre muda em resposta a variações em suas forças direcionadoras [...] (BURROUGH, 1998).

Na visão de Rennó (2003), um modelo é definido por um sistema de equações e procedimentos compostos por variáveis e parâmetros, os quais mantêm seus valores inalterados durante todo o processo estudado. Assim, um parâmetro possui o mesmo valor para todos os intervalos de tempo, o que não significa que não possa variar espacialmente. Por outro lado, as variáveis podem mudar ao longo do tempo em que o modelo estiver sendo executado (RENNÓ, 2003, apud REIS; ZAINÉ, 2016).

Os modelos são utilizados para se antecipar aos eventos como representar o impacto da urbanização em uma bacia antes que ela ocorra ou a realizar a previsão de enchentes em tempo real. Neste sentido, o uso de modelos de simulação tem se tornado cada vez mais necessários devido à complexidade dos eventos e a rapidez com que é exigida a produção de resultados, sobretudo em áreas de conhecimento que envolvem riscos (DOMINGUES, 2012). Assim, observa-se uma tendência

crescente em tornar o uso de modelos computacionais que realizam simulações cada vez mais acessíveis e de fácil adaptação a diferentes cenários (DOMINGUES, op.cit.).

Pautado em Lambin (1994), Lopes (2006) relata que os modelos espaciais dinâmicos descrevem a evolução de padrões espaciais de um sistema ao longo do tempo, devendo responder a questões como: “Quais variáveis contribuem para explicar o fenômeno e quais os processos envolvidos?”, “Como o processo evolui?” e “Onde ocorrem os fenômenos?” (LOPES, 2006). Entretanto, Tucci (2012) lembra que “o modelo por si só não é um objetivo, mas uma ferramenta para atingir um objetivo”.

A utilização de modelos em estudos geoambientais é, cada vez, mais frequente, principalmente com o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que ajudam a entender os mecanismos de modelagem natural da paisagem, sejam por intervenções naturais ou antrópicas, impactos das mudanças no uso e na cobertura da terra, e por previsões sobre alterações futuras nos ecossistemas (REIS; ZAINE, 2016). Assim, observa-se uma tendência crescente em tornar o uso de modelos computacionais que realizam simulações cada vez mais acessíveis e de fácil adaptação a diferentes cenários (REIS, CERRI, 2014).

Os modelos matemáticos expressam as relações observadas em campo, através de equações matemáticas (FERNANDES, 2016) que mantêm seus valores inalterados durante todo o processo estudado (REIS; ZAINE, 2016). Assim, um parâmetro possui o mesmo valor para todos os intervalos de tempo, o que não significa que não possa variar espacialmente. Por outro lado, as variáveis podem mudar ao longo do tempo em que o modelo estiver sendo executado (RENNÓ, 2003 apud REIS; ZAINE, 2016). Nesse sentido, na tentativa de diferenciar os modelos matemáticos, Rennó (2003) e Fernandes (2016) os classificaram em 10 tipos, conforme evidenciado no quadro a seguir.

Quadro 6. Classificação de modelos matemáticos. Fonte: Reis e Zaine (2016); Fernandes (2016); Rennó (2003); Gomes (2006).

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

O emprego da modelagem na análise de corridas de detritos foi impulsionado através da disseminação dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) (VAN WESTEN, 1993; ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999), somado aos Modelos Digitais de Terreno (MDT's), que permitiram a aquisição e manipulação de informações, por

exemplo, dos parâmetros e índices morfométricos, de forma prática e rápida dentro do ambiente SIG. Desta maneira, contribuíram sistematicamente na modelagem, na identificação da suscetibilidade, do potencial de geração de sedimentos e no zoneamento do perigo (MELELLI; TARAMELLI, 2004; MARCHI; FONTANA, 2005; TOMINAGA, 2007; MICHEL et al., 2012).

Para Reis e Cerri (2014), a etapa de levantamento e obtenção de dados é um dos pontos cruciais no processo de modelagem. Segundo os mesmos autores, os dados necessários para a execução da simulação referem-se à base cartográfica (cartas topográficas, imagens de satélites e fotografias aéreas), aos dados hidrológicos (dados pluviométricos, hidrogramas de descarga) e aos dados referentes ao meio físico (rugosidade, permeabilidade e uso e ocupação do solo). A ausência de um destes dados ou a existência de dados em escala incompatível com o detalhe necessário impossibilita a execução da simulação, além de ser fundamental o uso de critérios específicos para o uso de cada modelo de simulação, de forma que não ocorram erros ou interpretações superficiais decorrentes de simplificações ou considerações parciais de parâmetros (REIS; CERRI, 2014). Sobre o conhecimento dos parâmetros envolvidos na ocorrência de qualquer processo, Corrêa et al. (2015) destacam que os estudos de retroanálise auxiliam a etapa de modelagem numérica através do resgate histórico das variáveis que influenciaram a ocorrência de um determinado fenômeno que já incidiu no mesmo local.

Diversos trabalhos, em âmbito nacional e internacional, vêm sendo produzidos sob a ótica da utilização da modelagem matemática para a mitigação, compreensão e conhecimento do fenômeno de corrida de detritos. Sakai et al. (2013) desenvolveram um modelo de probabilidade multivariada para estudar a probabilidade de riscos a corrida de detritos e inundações na Bacia Santo Antônio, no município de Caraguatatuba (SP). Para tal, os autores utilizaram dados pluviométricos, topográficos e parâmetros físicos intrínsecos à corrida de detritos, previamente calibrados, que posteriormente foram utilizados no modelo FLO-2D. Como resultados, obtiveram o alcance da área afetada pela corrida de detritos e por inundações, bem como diferentes espessuras de deposição do fluxo do evento.

Conterato (2014) realizou uma modelagem de corrida de detritos em uma bacia hidrográfica do município do Rio de Janeiro (RJ), a partir de dados obtidos por retroanálise de eventos anteriores já ocorridos no local, tais como cicatrizes de escorregamento e dados de vazão de pico, o que permitiu a elaboração do

hidrograma. Assim, várias simulações com o modelo *RAMMS* foram realizadas, utilizando diferentes valores de vazão, de atrito e de ângulo de deposição do fluxo. Segundo o autor, os resultados foram satisfatórios, principalmente quando correlações entre as isópacas obtidas por atividades de fotointerpretação e aquelas produzidas pela modelagem foram inferidas. Não obstante, Conterato (2014) também relata que as simulações realizadas com as cicatrizes de escorregamento como dado de entrada produziram resultados mais próximos à realidade em comparação às simulações com hidrogramas como *inputs*, principalmente no que tange às espessuras de deposição da corrida de detritos.

Cesca e D'Agostino (2008), realizando análises sobre corridas de detritos ocorridas em 2006 na região das Dolomitas, na Itália, fizeram comparações com simulações obtidas pelos modelos *RAMMS* e *FLO-2D*, de modo a obter a adequabilidade dos dados obtidos pela modelagem com as verdades de campo. Nesse sentido, a partir de estudos de retro-análise, os autores obtiveram dados de campo como profundidades mínimas e máximas do fluxo, profundidade e declividade do leque de deposição e descrições detalhadas em seção sobre a granulometria do material de depósito, parâmetros que posteriormente foram preparados e inseridos nos respectivos *softwares*. Ademais, também foram utilizados dados pluviométricos e topográficos. A partir dos resultados das simulações, os autores concluíram que o modelo *RAMMS* tem constantemente dispersões excessivas de depósitos nas laterais do canal, ao passo que no modelo *FLO-2D* a área de inundação foi superestimada. Entretanto, ambos os modelos foram avaliados como adequados para simulações de corridas de detritos.

Outros autores, utilizando outros modelos de simulação de corridas de detritos também obtiveram resultados satisfatórios em suas análises. Entretanto, existe um consenso na literatura que estudos preliminares de retro-análise são fundamentais para a aplicação da modelagem matemática, uma vez que fornecem subsídio para validação dos dados através da comparação entre os resultados simulados e a verdade de campo, além de possibilitarem uma maior acurácia na calibração dos parâmetros de entrada. Assim, destacam-se os trabalhos de Gomes (2006), Rickenmann et al. (2006), McArdell et al. (2007), Begueria et al. (2009), Rocha (2011), Hussin et al. (2012), Raïmat et al. (2013), Rossatti e Begnudelli (2013), Worni et al. (2013), Berti e Simoni (2014), Gems et al. (2014), Frank et al. (2015), Schraml et al. (2015), Zugliani (2015), Gregoretti et al. (2016), Sancho (2016), De

Finis et al. (2017), Liu et al. (2017), Salvatici et al. (2017), Wei et al. (2018), dentre outros.

2.5.1. O modelo RAMMS (*Rapid Mass Movement Simulation*)

Este subcapítulo irá apresentar algumas das características gerais do modelo *RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation)*, módulo *RAMMS::Debris Flow*, baseadas nas informações do manual do usuário (*RAMMS::Debris Flow*, 2013, v.1.5) e na homepage do programa (<http://ramms.slf.ch>), complementado por pesquisas no cenário internacional e nacional que utilizaram o respectivo *software* para a modelagem de corridas de detritos.

RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation) é um modelo de simulação numérica em 3D desenvolvido pelo Centro de Pesquisas de Avalanches de Neve do Instituto Federal da Suíça (WSL/ SLF). Originalmente foi desenvolvido para modelar avalanches de neve, entretanto o instituto desenvolveu outros módulos aplicados também à modelagem de queda de blocos e corrida de detritos (CESCA; D'AGOSTINO, 2008; KOWALSKI, 2008; GRAF; MCARDELL, 2011; HUSSIN et al., 2012; RAMMS, 2013; SANCHO, 2016).

O programa *RAMMS* utiliza o modelo contínuo de fluxo de Voellmy-Salm (SALM et al. 1990; SALM, 1993) baseado na lei de fricção de Voellmy (1955), e descreve as corridas de detritos como um modelo contínuo de profundidade média. Este modelo divide a resistência de fricção em duas partes: (i) um atrito seco do tipo Coulomb (coeficiente μ) escalado com (ii) a tensão normal (N) e a velocidade quadrática de arrasto ou fricção turbulenta viscosa (coeficiente ξ). Assim, a resistência de fricção S (Pa) é definida de acordo com a Equação a seguir.

Equação 13. Lei de fricção Voellmy. Fonte: RAMMS (2013).

$$S = \mu \rho H g \cos(\phi) + \frac{\rho g U^2}{\xi}, \quad (13)$$

No qual:

μ - coeficiente de atrito seco tipo Coulomb (adimensional);

ρ – densidade (kg/m³);

H - altura do fluxo (metros);

g - aceleração da gravidade (m/s^2);

$\varnothing$ - ângulo da inclinação (graus);

U - vetor da velocidade do fluxo nas direções x e y (m/s^2);

ξ - fricção turbulenta viscosa (m/s^2).

A tensão normal na superfície de corrida, $\rho h g \cos(\varnothing)$, é resumida em um único parâmetro N .

O modelo Voellmy considera a resistência da fase sólida (μ é ocasionalmente expresso como a tangente do ângulo de atrito interno) e a viscosidade, ou turbulência, da fase fluida (ξ foi introduzida por Voellmy, aplicando argumentos hidrodinâmicos). Os coeficientes de fricção são responsáveis pelo comportamento do fluxo, sendo que μ domina quando o fluxo está perto de parar e ξ domina quando o fluxo está transcorrendo rapidamente.

Os valores de μ normalmente variam entre 0,05 e 0,4. Tipicamente, valores baixos de ξ ($100 - 200 \text{ m/s}^2$) são relatados para fluxos granulares, enquanto os valores relativamente altos de ξ ($200 - 1000 \text{ m/s}^2$) são associados a fluxos mais viscosos, com menor quantidade de detritos de maiores dimensões e granulometrias, como blocos rochosos.

Para a obtenção destes parâmetros devem ser realizadas retro-análises de eventos bem documentados (SANCHO, 2016; RAMMS, 2013). Assim, dentre os principais dados de entrada, destacam-se: (i) a topografia, por meio de um modelo de elevação digital; (ii) informação sobre o início do movimento, seja do volume da área desprendida ou um hidrograma do evento; e (iii) os parâmetros reológicos dos materiais. Para pequenas corridas de detritos não canalizadas, do tipo primária, é favorável o uso áreas de desprendimento (com profundidades definidas), como inventário de cicatrizes de escorregamento, ao passo que para corridas canalizadas, do tipo secundária, o emprego de hidrogramas pode ser mais apropriado. No entanto, a aplicação de hidrogramas requer um conhecimento prévio sobre a quantidade de material que pode passar por uma determinada localidade do canal (REIS; ZAINÉ, 2016; RAMMS, 2013).

Como dados de saída o programa *RAMMS* fornece imagens de altura de fluxo, velocidade de fluxo, pressão de fluxo, forças de impacto, assim como perfis da altura, velocidade e pressão de fluxo em determinados locais para projeção de estruturas (SANCHO, 2016).

Alguns trabalhos empregando o *RAMMS* na modelagem de corridas de detritos em âmbito internacional e nacional vêm sendo realizados, com resultados satisfatórios e coerentes à ocorrência destes processos em comparação ao cenário real (RICKENMANN et al., 2006; GRAF et al., 2009; LOUP et al., 2012; GRAF et al., 2013; RAÏMAT et al., 2013; CONTERATO, 2014; TOBLER et al., 2014; FRANK et al., 2015; FREKHAUG, 2015; FAN et al., 2017; FRANK et al., 2017).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é dedicado às discussões dos principais métodos, técnicas e procedimentos que foram empregados nesta pesquisa, conforme apresentado na figura 15.

3.1. Levantamento bibliográfico e definição da área de estudo

3.1.1. Delimitação e caracterização da área de pesquisa

As bacias hidrográficas selecionadas para a realização deste projeto estão inseridas nos municípios de Caraguatatuba e São Sebastião (SP) e compreendem às bacias do Rio Bacuí, Maçaguaçu, Guaxinduba, Santo Antônio, Pau D'alho, Canivetal, Ribeirão da Lagoa, Rio Grande, Camburu, Piraçununga, Rio Claro, Perequê, Perequê-Mirim, São Tomé, Enseada, São Francisco, Vila Baby, Barequeçaba e Ribeirão Grande. Estes locais foram selecionados como objetos de pesquisa devido a ocorrências anteriores de corridas de detritos e escorregamentos, à diversidade geológica e morfológica existentes e principalmente por caracterizarem-se por áreas de alta vulnerabilidade a processos de movimentos de massa, tais como escorregamentos e corridas. Ademais, a região também possui relevância econômica, ambiental e social, devido à existência de extensas faixas dutoviárias, à presença de um Terminal operado pela Transpetro em São Sebastião (SP), grandes remanescentes florestais e malha urbana em crescente expansão.

A delimitação da área da pesquisa seguiu os preceitos da hidrologia, seguindo as orientações de Pedrezzi (2004). Esta etapa foi realizada com o auxílio do *software* Google Earth e de cartas topográficas georreferenciadas em escala 1:50.000 (IBGE, 1973; 1974a; 1974b; 1975) com as curvas de nível e a drenagem local vetorizadas. Nesse sentido, cada uma das bacias hidrográficas supracitadas foi delimitada em ambiente SIG. Posteriormente, a região foi caracterizada segundo aos seus aspectos geológicos, geomorfológicos, pluviométricos e socioeconômicos, subsidiado pela etapa de levantamento bibliográfico (3.1.2).

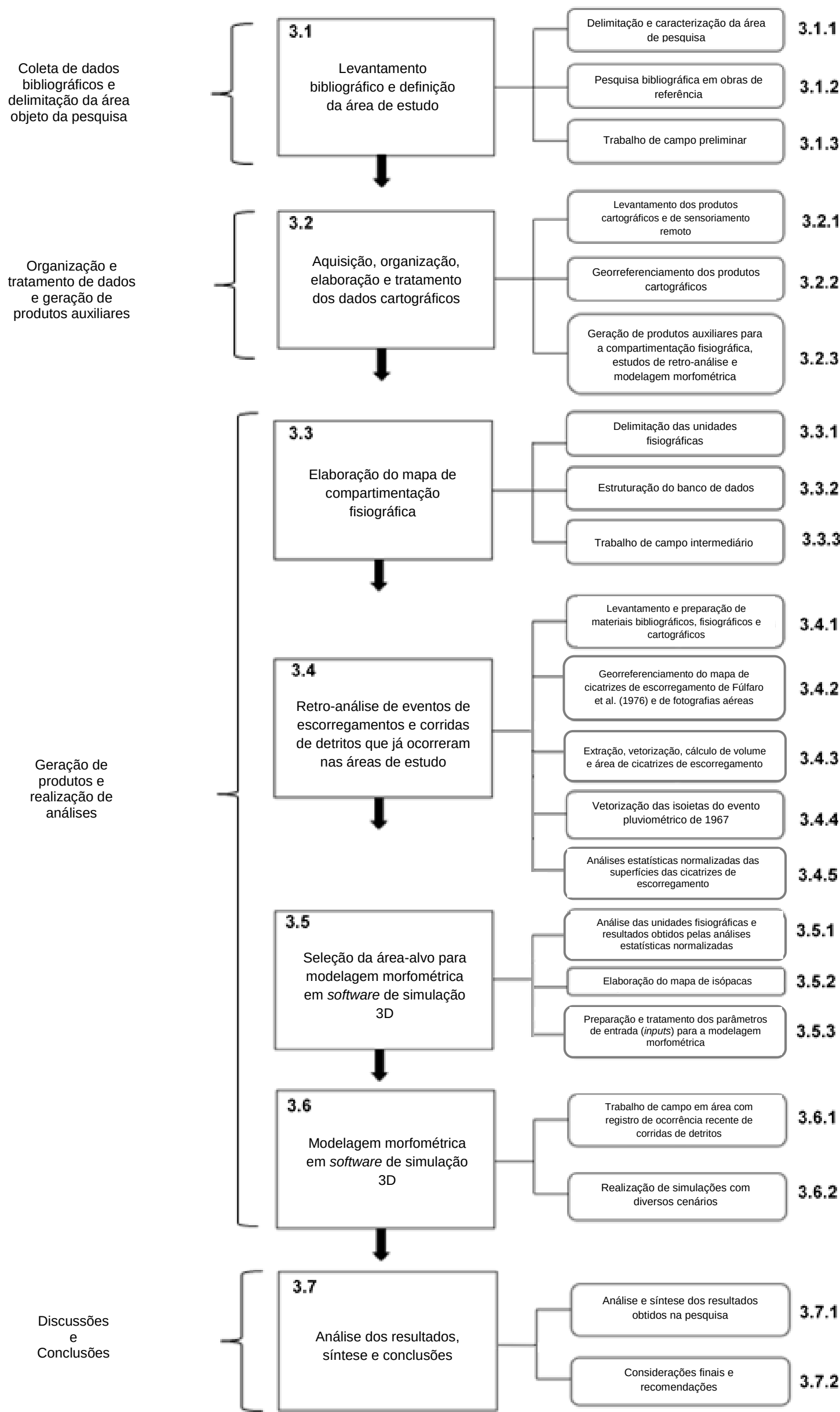


Figura 15. Fluxograma das etapas metodológicas da pesquisa.

3.1.2. Pesquisa bibliográfica em obras de referência

Esta etapa foi baseada no levantamento das principais obras de referência acerca da temática corridas de detritos e sua ocorrência no Brasil, especialmente na região sudeste, na qual inserem-se as áreas alvo de estudo da pesquisa. Ademais, os processos, a dinâmica, os parâmetros naturais e antrópicos que condicionam estes processos foram investigados, bem como o emprego de Sensoriamento Remoto e SIG na identificação das áreas mais susceptíveis a sua ocorrência. Como a pesquisa envolve a utilização da modelagem morfométrica 3D do terreno através de *software* de simulação para verificar a potencialidade das áreas-alvo a corridas de detritos, também foram necessárias pesquisas a respeito de sua funcionalidade, bem como dos parâmetros de entrada para a geração de dados.

Algumas das principais palavras-chave utilizadas no levantamento bibliográfico foram compartimentação fisiográfica, corridas de detritos, modelagem numérica, modelagem de corrida de detritos, susceptibilidade a corrida de detritos, Serra do Mar, escorregamentos, lei de fricção Voellmy, viscosidade, atrito, *RAMMS*, movimentos de massa, corridas de detritos no Brasil e suas correspondências em inglês (*physiographic compartmentalization, debris flows, numerical modelling, debris flow modelling, debris flow susceptibility, landslides, Voellmy model, viscosity, friction, mass movements e debris flow in Brazil*).

3.1.3. Trabalho de campo preliminar

A realização do trabalho de campo teve como finalidade o conhecimento da área de estudo, no que tange suas características ambientais e socioeconômicas.

No que tange os aspectos ambientais, o local foi caracterizado em relação aos elementos do meio físico através da identificação e correlação dos dados contidos nos mapas geológico, geomorfológico, hipsométrico, de declividade, hidrográfico e evidências de processos de escorregamento e/ou corridas de detritos. Ademais, observações em relação ao uso e cobertura da terra também foram registradas, principalmente em relação à expansão da malha urbana. Assim, como resultados, foram geradas fichas de campo com a caracterização dos aspectos

físicos da área de estudo e possíveis ocorrências de processos de escorregamento e/ou corridas de detritos recentes e pretéritos.

3.2. Aquisição, organização, elaboração e tratamento dos dados cartográficos

3.2.1. Levantamento dos produtos cartográficos e de sensoriamento remoto

Nesta fase foram realizados os levantamentos de produtos de sensoriamento remoto e da base cartográfica que comporam a pesquisa. Em relação à base cartográfica, foram adquiridas as cartas topográficas correspondentes às áreas das bacias selecionadas como objeto de estudo nas escalas 1:50.000, através da plataforma do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) (IBGE, 1973; 1974a; 1974b; 1975), e na escala 1:10.000, pelo IGC (Instituto Geográfico e Cartográfico do Estado de São Paulo) (IGC, 1977; 1978a; 1978b; 1978c; 1978d; 1978e; 1979).

Sobre as imagens de sensoriamento remoto, foram utilizados dados da plataforma Emplasa (2011)⁴ e fotografias aéreas em escala 1:25.000 (1973). As imagens obtidas pela Emplasa referem-se a ortofotos de 2011 em escala 1:25.000, com resolução espacial de 1 m², sendo que a aquisição das fotografias aéreas se deu basicamente nos períodos mais secos de inverno, entre 2010 e 2011, e o processo de ortorretificação foi finalizado em 2012 (EMPLASA, 2018). As fotografias aéreas foram disponibilizadas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), possuem escala de 1:25.000 e resolução espacial de 1,5 m² e foram obtidas por levantamento aerofotogramétrico em 1973 pela VASP (Viação Aérea São Paulo).

Ademais, foram também utilizados mapas geomorfológicos e geológicos da área de estudo (CPRM, 1982a; 1982b; 1991; IG, 1996a; IG, 1996b; FLORENZANO; CSORDAS, 1993; ROSS; MOROZ, 1997) e arquivos vetoriais (*shapefiles*) da malha de dutovias brasileiras, de estradas municipais, estaduais e federais, e dos limites

⁴ Fotografias aéreas ortorretificadas (Ortofotos) em escala 1:25.000 (2011) cedidas pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S/A – Emplasa (Contrato de Licença de Uso – CLU N° 114/15).

territoriais dos municípios e estados brasileiros (ANP, 2017; DNIT, 2015; IBGE, 2016a; 2016b).

3.2.2. Georreferenciamento dos produtos cartográficos

Os dados supracitados foram georreferenciados primeiramente em seu *datum* e sistema de coordenadas originais, em ambiente SIG (*software ArcGIS 10.2.2*). Segundo Martins (2010), o processo de georreferenciamento consiste “em relacionar as coordenadas da imagem com as coordenadas reais do local”. Assim, primeiramente foram georreferenciadas as cartas topográficas, que foram definidas como a base cartográfica do respectivo projeto. Em seguida, foi aplicado o mesmo procedimento para os outros dados cartográficos. Seguindo as orientações do IBGE (1997), que estabeleceu a utilização do *datum* SIRGAS2000 em projetos cartográficos brasileiros, os mapas e arquivos vetoriais que estavam com outros *datums* foram submetidos à transformação geodésica pelo método *Molodensky*, que transforma diretamente coordenadas geodésicas, dadas em latitude, longitude e altura elipsoidal, por meio do aumento da componente horizontal e vertical, sem necessidade de uma conversão intermediária das coordenadas geodésicas para o sistema geodésico cartesiano (FRAU et.al., 2012). Ademais, adotou-se nesse projeto o sistema de coordenadas planas/ projeção UTM (Universal Transversa de Mercator) como vigente, de modo a facilitar cálculos envolvendo álgebras de mapas e o processo de modelagem morfométrica.

3.2.3. Geração de produtos auxiliares para a compartimentação fisiográfica, estudos de retro-análise e modelagem morfométrica

Nesta fase, mapas temáticos ligados a parâmetros morfométricos foram confeccionados, para auxiliar as etapas de compartimentação fisiográfica, de retro-análise e de modelagem morfométrica, além de caracterizar a área de estudo em seu aspecto geomorfológico. Desta maneira, foram vetorizadas em ambiente SIG (*ArcGIS 10.2.2*) as cartas topográficas em escalas 1:50.000 e 1:10.000, excedendo-se os limites da área de estudo em 600 metros, através da criação de um *buffer*, para minimizar possíveis distorções nas bordas durante a confecção dos mapas de

cunho morfométrico. Assim, foram confeccionados os mapas de declividade e o Modelo Digital do Terreno (MDT) em escalas 1:10.000 e 1:50.000, além do mapa de hidrografia local, nas mesmas escalas.

Sua elaboração deu-se-à através do geoprocessamento das curvas de nível e hidrografia oriundas de cartas topográficas do IBGE (1:50.000) e do IGC (1:10.000), previamente georreferenciadas e vetorizadas. Em ambiente SIG foi realizado o processamento digital com a aplicação em cadeia das ferramentas algorítmicas “*Create TIN*”, “*TIN to Raster*” e “*Slope*”. Os processos “*Create TIN*” e “*TIN to Raster*” permitiram a geração de um arquivo *raster*, contendo em cada pixel um valor numérico associado relativo a sua cota altimétrica (Modelo Digital do Terreno – MDT/ hipsometria). O MDT representa matematicamente uma superfície tridimensional representativa da superfície real da área de estudo.

O comando “*Slope*”, por sua vez, permitiu a geração de outro *raster* contendo a informação angular do terreno associado a cada pixel do arquivo. Neste trabalho a unidade adotada para o mapa de declividade foi graus, e 5 intervalos foram geradas, adaptando-se a classificação de Gabelini (2017). A respectiva autora, analisando susceptibilidade a escorregamentos sob a ótica fisiográfica e quantitativa na mesma área de estudo deste projeto, estabeleceu os seguintes intervalos de declividade: 0-10°, 10-15°, 15-30°, 30-45° e maior que 45°. Nesse contexto, para esta pesquisa foram inferidas as seguintes divisões para a declividade da área: 0-5°, 5-20°, 20-35°, 35-50° e maior que 50°. As adaptações das classes de Gabelini (2017) foram realizadas de acordo com as análises feitas nessa pesquisa, principalmente a partir dos resultados obtidos na etapa 3.4. Não obstante, para o MDT a divisão das classes foi realizada em intervalos de 100 em 100 metros, de modo a facilitar a etapa de fotoanálise, proposta por Zaine (2011).

Outros subprodutos também foram vetorizados, representados pelos mapas geológico (CPRM, 1982; CPRM, 1991; IG, 1996), geomorfológico (FLORENZANO; CSORDAS, 1993) e de uso e ocupação da terra atual, baseado nas ortofotos da Emplasa (2011). Destaca-se que o mapa geomorfológico elaborado por Florenzano e Csordas (op.cit.) foi utilizado somente para nortear as atividades de campo e auxiliar a etapa de fotointerpretação, na compartimentação fisiográfica. Para o mapeamento do uso e ocupação da terra, as orientações do IBGE (2013) foram consideradas e as proposições de Ceron e Diniz (1966), Loch (1984) e Marchetti e Garcia (1986) foram empregadas na identificação das diferentes classes de uso.

Este mapeamento subsidiou a etapa de compartimentação fisiográfica (ZAINÉ, 2011), em conjunto com as análises observadas em campo, e auxiliou o diagnóstico da interferência antrópica como um elemento deflagrador de corridas de detritos.

3.3. Elaboração do mapa de compartimentação fisiográfica

3.3.1. Delimitação das unidades fisiográficas

A compartimentação fisiográfica é o método utilizado para agrupar os elementos constituintes do meio físico de acordo com suas semelhanças e diferenças (OLIVEIRA, 2004). Segundo Vedovello (2000), consiste em dividir uma determinada região em áreas que apresentem, internamente, características fisiográficas homogêneas e distintas das áreas adjacentes. Nesse sentido, a aplicação desta metodologia permitiu um maior conhecimento da área no que tange seus aspectos físicos, além de possibilitar a inferência de locais com maior potencialidade a escorregamentos e corridas de detritos. O método de compartimentação fisiográfica adotado, pautado na análise fotogeológica de Zaine (2011) reúne, dentre outras características, critérios morfométricos e geológicos fundamentais que contribuem na deflagração de corridas de detritos, tais como densidade de drenagem, declividade, forma do vale e forma da encosta, características do modo de alteração e relação de escoamento superficial/infiltração, o que permite identificar sítios com maior possibilidade a corridas de detritos.

A realização da compartimentação fisiográfica seguiu as recomendações da interpretação pelo método lógico (GUY, 1966; SOARES; FIORI, 1976), que segundo Vedovello (2000) é passível de repetição por outros intérpretes ou aplicação em outras áreas. Neste método os estudos de textura, forma e estrutura das feições seguem as etapas de fotoleitura, fotoanálise e fotointerpretação. Segundo Soares e Fiori (1976), a etapa de fotoleitura compreende o reconhecimento dos elementos de textura de interesse na imagem; a fotoanálise faz a associação e ordenação das partes da imagem analisada e a fotointerpretação trata da análise da imagem visando à descoberta e avaliação, por métodos indutivos, dedutivos e comparativos do significado, função e relação dos objetos correspondentes às imagens (SOARES; FIORI, 1976).

Para a fotoanálise, foram consideradas as proposições do quadro de análise fotogeológica, elaborado por Zaine (2011) (Quadro 7). O respectivo método tem por finalidade a obtenção de uma carta geológico-geotécnica, seccionada em várias unidades de terreno, que incluem características referentes ao relevo, geologia e uso da terra, cujas informações são sintetizadas mediante a análise integrada, baseando-se no método lógico proposto por Soares e Fiori (1976).

Cabe ressaltar que foram considerados os resultados da compartimentação fisiográfica produzidos por Gabelini (2017), cujo trabalho também considerava a região de Caraguatatuba (SP) como área de estudo, assim como esta pesquisa. Ambos contribuíram para o desenvolvimento do projeto “Alertas meteorológicos para avaliação de risco geológico e geotécnico nas regiões Sul e Sudeste do Brasil”, que busca investigar os mecanismos pluviométricos deflagradores de processos de movimento de massa, erosões ou inundações, de modo a estabelecer indicadores de alertas meteorológicos para a gestão de risco ao longo de obras lineares das regiões sul e sudeste do Brasil.

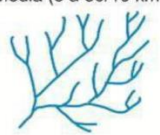
3.3.2. Estruturação do banco de dados

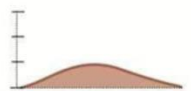
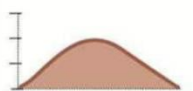
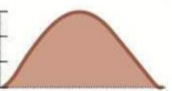
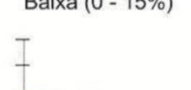
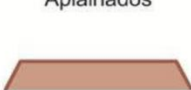
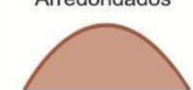
De modo a facilitar o manuseio dos dados documentais, arquivos vetoriais, imagens e outras informações, foi criado um banco de dados do respectivo projeto, cuja estrutura encontra-se no Apêndice 3. Para imagens georreferenciadas e arquivos vetoriais, o sistema de coordenada adotado foi a plana UTM e o *datum* SIRGAS2000, conforme as orientações do IBGE (IBGE, 1997).

3.3.3. Trabalho de campo intermediário

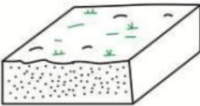
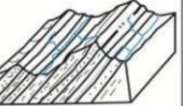
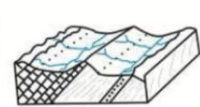
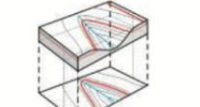
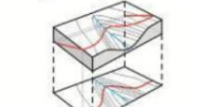
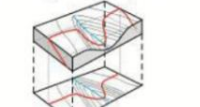
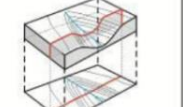
Esta campanha de campo constituiu-se na verificação e a caracterização *in situ* das unidades fisiográficas previamente delimitadas e ajuste dos modelos de compartimentação da área (limite das unidades), tendo como base o mapa preliminar ou das unidades fotointerpretadas. Assim como na primeira campanha de campo, foram identificados, classificados e descritos os escorregamentos, assim como os possíveis depósitos decorrentes de processo de corridas de detritos dentro da área de pesquisa.

Quadro 7. Critérios adotados para análise e fotointerpretação geomorfológica e geológica e delimitação das unidades de compartimentação fisiográfica. Fonte: Zaine (2011).

1. Análise da densidade textural		CLASSES		
Elementos de análise	Elementos de drenagem e relevo			
Critérios de análise	Densidade dos elementos de drenagem	Baixa (0 a 5/10 km ²) 	Média (5 a 30/10 km ²) 	Alta (> 30/ km ²) 
	Densidade dos elementos do relevo (dissecação e rugosidade do terreno)	Baixa (mais lisa) 	Média 	Alta (mais rugosa) 
Propriedade a ser interpretada	PERMEABILIDADE (intergranular)	Alta (Permeável)	Média	Baixa (Pouco permeável a impermeável)
APLICAÇÕES Informações interpretadas por esta análise	Relação escoamento superficial/infiltração	Baixa	Média	Alta
	Espessura e características do manto de alteração	Grande (Espesso; > 5m)	Média	Pequena (Raso/rocha aflorante)

2. Análise das formas e características do relevo		CLASSES		
Elementos de análise	Declives, vertentes, topos, vales, rupturas de declive (quebras de relevo), cristas e escarpas			
Critérios de análise	a) Amplitude local (variações de cotas na unidade)	Pequena (0 a 100 m) 	Média (100 a 300 m) 	Grande(> 300 m) 
	b) Declividade	Baixa (0 - 15%) 	Média (15 - 30%) 	Alta (> 30%) 
	c) Forma de encosta / vertente (* representação em planta)	Convexa  	Côncava  	Retilínea  
	d) Forma do vale (* representação em planta)	Aberto  		Fechado  
	e) Forma do topo	Aplainados 	Arredondados 	Angulosos 
	f) Feições particulares de relevo	Identificar e descrever. Associar modelos geológicos já conhecidos *Consultar quadros Howard (1967); Soares e Fiori (1976); Nunes et. al, (1995)		
Propriedades a serem interpretadas	Solubilidade	Não solúvel		Solúvel
	Resistência à erosão natural (dureza)	Baixa (Pouco resistente)	Média (Resistência média)	Alta (Muito resistente)
APLICAÇÕES Informações interpretadas por esta análise	Profundidade do topo rochoso	Profundo	Intermediário	Raso a sub aflorante
	Espessura de materiais inconsolidados	Espesso	Intermediário	Delgado a inexistente
	Grau de escavabilidade	Pouco resistente	Resistência média	Muito resistente
	Potencial a erosão linear (induzida)	Médio a alto	Médio a alto	Médio a baixo
Registros de processos geológicos	Potencial a movimentos gravitacionais de massa	Baixo	Médio a Alto	Alto

Continuação do quadro 7.

3. Análise das estruturas geológicas		CLASSES			
Elementos de análise	Linhas de rupturas de declive (positivas = proeminentes; negativas = reentrâncias) Lineações e alinhamentos de relevo (traços de foliação e camadas), drenagem e traços de fratura				
Critérios de análise	a) Tropia	Não orientada 	Pouco orientada 	Orientada 	Muito orientada 
	b) Assimetria de relevo e drenagem (geometria das camadas)	Muito assimétrico 	Assimétrico 	Pouco assimétrico 	Simétrico 
	c) Regra dos Vs	Horizontal a sub 	Mergulho p/ montante 	Mergulho p/ jusante 	Vertical a sub 
	d) Sinuosidade* (drenagem)	Curvos/dendríticos 	Mistos 	Retilíneos não paralelos/espçados 	Retilíneos paralelos adensados 
	e) Padrões reconhecidos e anomalias	Identificar e descrever. Associar à modelos geológicos já conhecidos. *Consultar quadros Howard (1967); Soares e Fiori (1976); Nunes et. al, (1995)			
Propriedades a serem interpretadas	Planos de estratificação e foliação metamórfica		Ausentes a pouco marcantes	Espaçados	Adensados
	Composição e estrutura		Homogênea	Mista	Heterogênea
	Plasticidade/ruptibilidade (foliação x fraturas)		-	Rúptil	Dúctil
	Grau de faturamento		Baixo	Médio	Alto
	Permeabilidade Fissural		Baixa	Média	Alta
APLICAÇÕES Informações interpretadas por esta análise	Partição em blocos: possibilidade de queda de blocos		Baixa	Média	Alta

4. Análise complementar		CLASSES		
Elementos de análise	Tons de cinza ou coloração; vegetação e uso do solo; feições de processos geológicos			
Critérios de análise	Tons de cinza *	branco a cinza claro	cinza médio	cinza escuro a preto
	Coloração*	Claros, amarelados, róseos		Verdes escuros a pretos
Propriedades a serem interpretadas	Solos derivados de rochas básicas/ácidas ou arenosas/argilosas	Solos ácidos/ arenosos	Solos básicos/argilosos	
	Presença de água/umidade no solo	Solos secos	Solos úmidos	Corpos d'água**
	Cobertura vegetal	Sem vegetação a pastagem	Rasteiras e arbustivas	Arbóreas (florestas e reflorestamento)
APLICAÇÕES Informações interpretadas por esta análise	Solo exposto	Presente		Ausente
	Afloramentos e blocos rochosos	Presente		Ausente
	Presença de N.A. raso/aflorante	Profundo (> 5m)	Variável	Raso (aflorante < 2m)

* A análise deve considerar os diferentes tipos de uso do solo.

** Corpos d'água podem apresentar tons claros quando ocorre a reflexão da luz.

3.4. Retro-análise de eventos de escorregamentos e corridas de detritos que já ocorreram nas áreas de estudo

Os estudos de retro-análise auxiliam na compreensão dos movimentos de massa, através do resgate histórico das variáveis que influenciaram a sua ocorrência. Nesse sentido, a combinação de estudos de retro-análise à interpretação de imagens de sensoriamento remoto, da caracterização geológico-geotécnica e da análise do uso e da ocupação da terra fornecem dados que permitem um maior entendimento dos processos que estão envolvidos em tais eventos (CORRÊA et al., 2015). Desta maneira, a finalidade desta etapa é analisar e identificar quais foram as condições que levaram a incidência de corridas de detritos e escorregamento nas áreas selecionadas para estudo.

3.4.1. Levantamento e preparação de materiais bibliográficos, fotográficos e cartográficos

De modo a identificar registros históricos de processos de escorregamento e corridas de detritos na área, foram realizadas pesquisas bibliográficas em obras de referência, *papers*, jornais, revistas, *sites* governamentais municipais e outros veículos de comunicação. Assim, identificada a ocorrência de eventos pretéritos, buscou-se incorporar no banco de dados do projeto materiais documentais, fotográficos e cartográficos referentes à incidência desses processos nas bacias hidrográficas objeto de pesquisa.

As principais causas de deflagração das corridas de detritos e escorregamento já ocorridas também foram investigadas, sendo que parâmetros morfométricos, geológicos, pluviométricos e reológicos, considerados os mais relevantes na literatura na incidência desses eventos, foram elencados, pois subsidiaram as etapas subsequentes, principalmente a modelagem morfométrica.

3.4.2. Georreferenciamento do mapa de cicatrizes de escorregamento de Fúlfaro et al. (1976) e de fotografias aéreas de 1973

A partir do conhecimento do grande evento de corridas de detritos e escorregamentos generalizados na área de estudo, em 1967, como subsídio à etapa de elaboração do mapa de isópacas (3.5.2), de extração, vetorização e cálculo de volume e área de cicatrizes de escorregamento (3.4.3), de análises estatísticas normalizadas (3.4.5), de preparação e tratamento dos parâmetros de entrada (*inputs*) para a modelagem morfométrica (3.5.3) e das simulações (3.6.2), foram georreferenciadas as fotografias aéreas de 1973 e o mapa de cicatrizes de escorregamento proposto por Fúlfaro et al. (1976).

As fotografias aéreas foram disponibilizadas pelo IPT e são datadas de 1973, 6 anos após o grande evento que ocorreu na área de estudo. Assim como Nery (2016), também foram encontradas dificuldades para georreferenciá-las, devido à falta de objetos facilmente identificáveis (como estradas, ruas, mancha urbana, pontes e outras edificações), principalmente no contato escarpa-planalto, onde insere-se o Parque Estadual da Serra do Mar, cuja predominância de uso da terra é por floresta. Nesse sentido, na tentativa de minimizar deslocamentos durante o processo de georreferenciamento, criou-se um mosaico no *software Adobe Photoshop® CS6* através da ferramenta “*Photomerge*”, método automático que combina várias fotografias em uma imagem contínua. Posteriormente, o mosaico criado foi submetido ao georreferenciamento, com o auxílio das cartas topográficas e ortofotos da Emplasa (2011).

As informações do mapeamento de Fúlfaro et al. (1976) apresentam as cicatrizes de escorregamento relativas ao evento ocorrido na região da área de estudo em 1967. Nesse sentido, o mapa elaborado pelos respectivos autores foi georreferenciado em ambiente SIG, sendo que os possíveis conflitos de *datums* foram solucionados através da transformação geodésica, de modo análogo a procedimentos empregados em etapas anteriores.

3.4.3. Extração, vetorização, cálculo de volume e área de cicatrizes de escorregamento

Uma vez que as corridas de detritos ocorridas na região de Caraguatatuba em 1967 se iniciaram com escorregamentos generalizados nas encostas (GRAMANI, 2001), as cicatrizes mapeadas por Fúlfaro et al. (1976) foram utilizadas para estudos de retro-análise envolvendo análises estatísticas normalizadas e como *input* para a etapa de modelagem morfométrica. Nesse sentido, esta etapa compreendeu a vetorização das cicatrizes de escorregamento mapeadas pelos respectivos autores, seguidas pelo cálculo de área e volume de cada feição mapeada. Tais informações permitiram uma melhor calibração dos parâmetros inseridos na etapa de simulação (3.6.2).

Ademais, também foram extraídas nas ortofotos digitais da Emplasa (2011) as cicatrizes de escorregamento atuais, presentes em toda a extensão da área de estudo, que posteriormente foram utilizadas na etapa 3.4.6. Nesse sentido, técnicas de fotointerpretação foram empregadas para o seu mapeamento, de modo que considerou-se os seguintes critérios para identificar estas feições: o tamanho, que descreve a extensão da área do processo; a vegetação, cuja ausência pode sinalizar a incidência de escorregamentos; a textura; a posição topográfica e; a forma, caracterizada pela concavidade na parte superior e pela convexidade na parte inferior da encosta, indicando assim a presença de um movimento de massa (LOCH, 1984; MARCHETTI; GARCIA, 1986; BARLOW et al., 2003; LOPES et al., 2007; GUZZETTI et al., 2012; SESTINI e FLORENZANO, 2014). Para facilitar e auxiliar a sua identificação, também foram utilizadas as curvas de nível, bem como as informações acerca da declividade da área.

Concomitantemente aos resultados obtidos na etapa 3.5, que identificou áreas-alvo para o processo de modelagem morfométrica, optou-se por também extrair as cicatrizes de escorregamento da Bacia do Rio Santo Antônio nas fotografias aéreas de 1973, utilizando os mesmos procedimentos e técnicas fotointerpretativas supracitados. Essas feições foram empregadas na modelagem morfométrica, com a finalidade de comparar as simulações entre as cicatrizes mapeadas neste trabalho e aquelas identificadas por Fúlfaro et al. (1976).

O cálculo de área das cicatrizes de escorregamento foi aplicado para todas as feições, extraídas das 3 fontes distintas: mapeadas por Fúlfaro et al. (1976) e identificadas nas fotografias aéreas de 1973 e ortofotos de 2011. O cálculo de volume, entretanto, deu-se apenas nas cicatrizes de escorregamento relativas ao processo ocorrido em 1967, uma vez que estes dados foram utilizados para calibrar os *inputs* da simulação e para comparar os volumes produzidos pela modelagem com os inferidos por fórmulas empíricas, conforme explanado a seguir.

Sendo assim, a área de cada cicatriz foi calculada utilizando-se a ferramenta “*Calculate Geometry*”, disponibilizada no *software ArcGIS 10.2.2*. Para inferir os volumes das feições mapeadas por Fúlfaro et al. (1976) e aquelas extraídas em fotografias aéreas de 1973, no âmbito deste projeto, optou-se por utilizar, com adaptações, a correlação empírica proposta por Augusto Filho (1993) e Nery (2016), conforme demonstrado na equação a seguir.

Equação 14. Cálculo do volume produzido por cicatrizes de escorregamento. Fonte: Augusto Filho, 1993 e Nery (2016).

$$V_c = A_c \cdot 0,5 \quad (14)$$

No qual:

V_c – Volume da cicatriz (m^3);

A_c – Área da cicatriz (m^2);

0,5 - Espessura da ruptura (m).

As adaptações inferidas se deram no âmbito da dimensão da espessura de ruptura, baseadas nas observações nos trabalhos de campo e nas obras de Fúlfaro et al. (1976) e Massad et al. (1997).

3.4.4. Vetorização das isoietas do evento pluviométrico de 1967

Considerando que a pluviosidade não se constitui propriamente em uma condicionante na ocorrência de escorregamentos e corridas de detritos, mas sim no principal agente deflagrador imediato destes processos (IPT, 1988; GRAMANI, 2001; SAKAI, 2014), esse parâmetro foi utilizado como um dos critérios na avaliação da susceptibilidade das bacias hidrográficas inseridas na área de estudo a estes

fenômenos. Assim, para avaliar e analisar a influência da chuva na deflagração dos escorregamentos e corridas de detritos generalizadas na área de estudo em 18 de março de 1967 foram vetorizadas as isoietas confeccionadas por Guidicini e Nieble (1984), que possui valores pluviométricos acumulados dos dias 17 e 18/03/1967 (Figura 16).

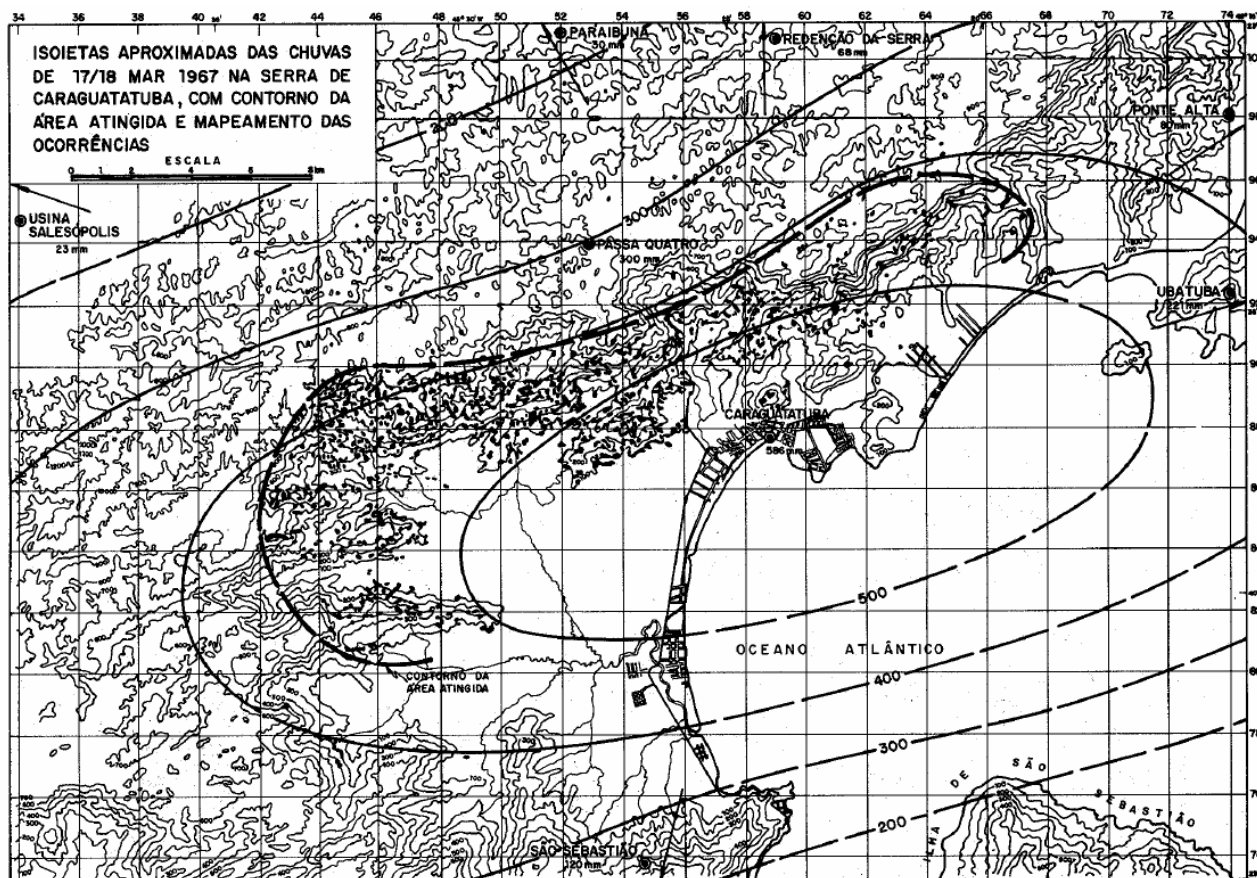


Figura 16. Mapa das isoietas para o evento ocorrido em 1967 na região de Caraguatatuba (SP). Fonte: Guidici e Nieble (1984).

3.4.5. Análises estatísticas normalizadas das superfícies das cicatrizes de escorregamento

Esta etapa consistiu-se na identificação e categorização dos condicionantes dos processos de movimentos de massa da área de estudo, baseada em análises normalizadas das superfícies de cicatrizes de escorregamentos e das áreas de ocorrência das unidades de regiões pré-estabelecidas, como subsídio à seleção da área-alvo a ser submetida à modelagem morfométrica. Desta maneira, foram considerados os seguintes parâmetros para avaliação da susceptibilidade a escorregamentos, baseando-se na fundamentação teórica desta pesquisa:

geológicos, topográficos (declividade), climáticos (isoietas com valores pluviométricos acumulados) e geotécnicos (cicatrices de escorregamento).

Nesse sentido, foi desenvolvida uma metodologia baseada na frequência de ocorrência em área de cicatrizes de escorregamento sobre a ocorrência em área de cada unidade considerada, que no caso desta pesquisa foram as unidades geológicas e as diferentes classes de declividade. Adicionalmente, um fator de desproporcionalidade (FD) adimensional foi empregado para avaliar a existência de eventuais desproporcionalidades entre a área de incidência de escorregamentos (PI) e a área de ocorrência de cada unidade (por exemplo, geológica ou classe de declividade) considerada (PA) dentro de uma região pré-determinada, com o intuito de identificar se a incidência de escorregamentos apresenta alguma tendência, ou melhor, se incide desproporcionalmente em determinadas unidades.

Assim, considerando uma região r pré-estabelecida, o fator de desproporcionalidade de uma determinada unidade i ($FD_{i,r}$) pode ser calculado através da relação entre a porcentagem em área dos escorregamentos da região r incidentes na unidade i ($PI_{i,r}$) e a porcentagem em área da ocorrência da unidade i na região r ($PA_{i,r}$):

Equação 15. Equação do cálculo do Fator de Desproporcionalidade (FD).

$$FD_{i,r} = \frac{PI_{i,r}}{PA_{i,r}} \quad (15)$$

No qual:

$FD_{i,r}$ – Fator de Desproporcionalidade (adimensional)

$PI_{i,r}$ - Área de incidência de escorregamentos (%)

$PA_{i,r}$ - Área de ocorrência de cada unidade dentro de uma região pré-determinada (%)

Em um cenário em que não há nenhum condicionante específico (os escorregamentos ocorrem indistintamente em toda região considerada), o FD é igual a 1 para todas as unidades avaliadas, pois neste caso a porcentagem de incidência de escorregamentos numa determinada área é proporcional a sua porcentagem de ocorrência em área. Por outro lado, cenários com FD s calculados diferentes de 1 podem sugerir a existência de condicionantes (geológicos, topográficos,

pedológicos, antrópicos, cobertura vegetal), pois nestes casos existem desproporções entre a porcentagem de incidência de escorregamentos e a porcentagem de ocorrência em área das unidades. Nesse sentido, unidades com *FD* maiores ou menores que 1 indicam unidades com maiores ou menores tendência à incidência de escorregamentos, respectivamente.

Cabe destacar que a utilização de áreas em detrimento ao número de cicatrizes evita problemas relacionados à contabilização de escorregamentos que ocorrem concomitantemente em duas ou mais unidades. Ademais, o emprego de número de cicatrizes pode não levar em consideração eventuais diferenças nas dimensões das cicatrizes, o que pode limitar, ou até falsear, as interpretações, principalmente as que visam ponderar as unidades que mais contribuem para o volume de massa movimentado em uma determinada região.

Neste projeto, os valores de *FDs* foram calculados para todas as unidades geológicas presentes na área de estudo, assim como para 5 classes de declividade (0 – 5°, 5 – 20°, 20 - 35°, 35 – 50° e maior que 50°). Em relação ao aspecto antrópico, análises sobre a cobertura vegetal e tipo de uso/ cobertura da terra foram consideradas dispensáveis, pois na área das encostas há uma predominância da fisionomia florestal, aonde está inserido o Parque Estadual da Serra do Mar.

Não obstante, análises utilizando o conceito *FD* foram executadas para avaliar desproporcionalidades entre as áreas e a incidência de escorregamentos em todas as bacias hidrográficas inseridas na área de estudo, considerando as cicatrizes referentes ao evento de 1967 e as mapeadas no cenário de 2011. Outra normalização inferida deu-se à no âmbito dos dados pluviométricos, considerando as isoietas da etapa anterior (3.4.4), compartimentadas em intervalos de 100 mm para as análises envolvendo as cicatrizes de escorregamento referentes ao evento de 1967. Ademais, em relação às cicatrizes extraídas em ortofotos de 2011, de modo a diferenciá-las das mapeadas em 1967 (FÚLFARO et al., op.cit.), optou-se em realizar uma álgebra de mapas através da ferramenta *Erase* no software *ArcGIS 10.2.2*. Desta maneira, a distinção de escorregamentos ocorridos de fato em 1967 e após 1967/ entre o ano de 2011 seria mais visualizável e facilitaria as análises temporais e comparações entre os diferentes cenários.

Para realizar as análises estatísticas normalizadas, o *shapefile* das cicatrizes de escorregamento de 1967 mapeadas por Fúlfaro et al. (op.cit.) e das cicatrizes de escorregamentos que ocorreram entre 1967 a 2011 foram submetidas a álgebras de

mapas, que envolveram o emprego das ferramentas *Intersect* e *Clip*, em ambiente SIG (*ArcGIS 10.2.2*). Assim, para as cicatrizes de escorregamento de 1967, foram consideradas, além da análise englobando todas as bacias, a normalização envolvendo as isoietas elaboradas por Guidicini e Nieble (1984) (Figura 16). Portanto, sob a compartimentação das isoietas em intervalos de 100 mm, foram realizadas as análises de frequência de incidência e de *FD* considerando a declividade e geologia através da ferramenta *Clip*, que permite que um dado geográfico vetorial seja recortado de acordo com uma camada máscara que define sua região de interesse. Ademais também foram realizadas análises estatísticas normalizadas desprezando os intervalos pluviométricos (isoietas delimitadas por Guidicini e Nieble (1984), equivalentes a acumulados de 48 horas, dos dias 17 e 18/03/1967), de modo a avaliar a influência da chuva na ocorrência desses eventos, o que permite hierarquizar os parâmetros deflagradores dos movimentos de massa de 1967 na região de Caraguatatuba. A intersecção das cicatrizes de escorregamentos com os mapas temáticos (declividade e geologia) foi viabilizada através do emprego da ferramenta *Intersect*.

Este método desenvolvido também pode ser aplicado para outros processos, bem como para diferentes tipos de unidades objeto de análise, desde que a incidência dos processos e as áreas de ocorrência das unidades sejam devidamente normalizadas.

3.5. Seleção da área-alvo para modelagem morfométrica em software de simulação 3D

3.5.1. Análise dos resultados obtidos pelas análises estatísticas normalizadas

Com a finalidade de selecionar a área-alvo para aplicação da modelagem morfométrica no software de simulação *RAMMS*, a etapa 3.5.1 compreendeu à análise dos resultados obtidos na fase 3.4, subsidiada pela fundamentação teórica, considerando que a vulnerabilidade à ocorrência de detritos de uma determinada região depende basicamente da existência e da combinação dos seguintes aspectos: regime pluviométrico, inclinação das encostas, inclinação dos canais, área da bacia, aspectos geológicos (tipos de rocha e de solos, espessuras,

características físicas, erosividade), altura das encostas, vegetação e uso e ocupação do terreno (Quadro 4) (GRAMANI, 2001).

Nesse sentido, os resultados produzidos pela análise estatística normalizada permitiram inferir quais bacias hidrográficas foram as mais afetadas pelos escorregamentos e corridas de detritos generalizados ocorridos em 1967 e que atualmente também possuem registros destes fenômenos, fato observado nas análises com as imagens da Emplasa (2011).

Portanto, considerando essas premissas, ao final desta etapa foi possível selecionar a área-alvo submetida à modelagem morfométrica, considerando sua incidência a movimentos de massa.

3.5.2. Elaboração do mapa de isópacas

O mapa de isópacas corresponde ao mapeamento dos depósitos de corridas de detritos e suas respectivas espessuras, referentes ao evento que ocorreu na área de estudo em 1967. Segundo Gregoretti et al. (2016), o seu conhecimento e identificação é essencial para estudos de modelagem, uma vez que possibilita uma melhor avaliação das espessuras simuladas e as observadas no evento.

Nery (2016), baseando-se em literaturas a respeito da área de deposição de corridas de detritos, salientou que o reconhecimento destes fenômenos é realizado pela morfologia do seu depósito, observando um par de diques ou depósitos laterais ao longo do sulco principal e/ou lóbulos frontais no término do trajeto (VAN STEIJN, 1996; IPT, 2002). Segundo Van Steijn (op.cit.), estes elementos podem ser detectados no campo e a partir de fotografias aéreas. Sobre o reconhecimento dessa feição a partir de técnicas fotointerpretativas, Nery (2016), baseando-se em Vandine (1985), afirmou que as áreas de depósito são identificadas pela tonalidade, em cor esbranquiçada, pela largura do canal e por sua deposição em locais com declividades inferiores a 15° . Assim, com a área-alvo selecionada na etapa anterior (3.5.1), o delineamento da área de depósito foi efetuado em ambiente SIG utilizando-se a fotografia aérea datada de 1973 a partir das premissas fotointerpretativas supracitadas, complementada com dados de Nery (2016) e Cruz (1974). Não obstante, as espessuras foram inferidas através dos trabalhos de campo efetuados e pelas observações e relatos de Cruz (1974), além de dados produzidos por Petri e Suguio (1971). Ademais, as considerações de Gramani

(2001) e de Fúlfaro et al. (1976) também contribuíram para a delimitação do depósito e estimativas das espessuras.

Posteriormente, com o *shapefile* da área do depósito delimitada, empregando-se a ferramenta “*Calculate Geometry*”, em ambiente SIG (*ArcGIS* 10.2.2) foi calculada a área de cada zona de espessura e do depósito como um todo. Em seguida, considerando-se os apontamentos de Nery (2016), o volume total da área de deposição foi estimado, a partir da correlação empírica proposta pelos respectivos autores, conforme exibido a seguir.

Equação 16. Volume estimado dos depósitos de corridas de detritos. Fonte: Nery (2016).

$$V_d = A_d \cdot 2,0 \quad (16)$$

No qual:

V_d - Volume do depósito (m^3);

A_d - Área do depósito (m^2);

2,0 m - Espessura média da deposição.

A espessura média de deposição da respectiva correlação empírica, segundo Nery (2016), foi fundamentada nas observações de campo realizadas por Conq et al. (2015) na bacia do Córrego do Príncipe, em Teresópolis (RJ). Estes autores observaram que a corrida de detritos formou uma zona de deposição com espessura a partir de 2 m. Ademais, Augusto et al. (2005) também registraram depósitos com espessuras semelhantes a este valor em uma determinada região da Serra do Mar, próximo a Cubatão (SP). Entretanto, nesta pesquisa, foram adaptados os valores de espessura média da deposição por aqueles obtidos em cada zona do mapa de isópacas, estimados a partir dos trabalhos de campo realizados na área e pela etapa de retro-análise.

3.5.3. Preparação e tratamento dos parâmetros de entrada (*inputs*) para a modelagem morfométrica

Previamente à modelagem morfométrica no *software* de simulação *RAMMS*, os parâmetros de entrada do programa (*inputs*) foram listados e submetidos a modificações conforme as necessidades do modelo.

Nesse sentido, primeiramente, O MDT (Modelo Digital do Terreno, produto da fase 3.2.3) em escala 1:10.000 (IGC, 1979) – que se constitui no cerne do modelo – foi transformado do formato .tiff para o .ascii, uma das exigências do programa. Esse procedimento foi realizado em ambiente SIG, através da ferramenta “*Raster to ASCII*”. Cabe destacar que a base topográfica utilizada para a construção do Modelo Digital do Terreno possui mais de uma década após o evento de 1967 (IGC, 1979). Consequentemente, ele não representa as condições de relevo antes das corridas ocorrerem.

Outro requisito necessário para a modelagem, segundo o manual do programa, é a adoção do sistema de coordenadas em formato cartesiano para todos os dados (*rasters* e dados vetoriais) (*RAMMS*, 2013). Entretanto, conforme supracitado em subcapítulos anteriores, o presente projeto adotou projeções planas para facilitar procedimentos relacionados a álgebras de mapas; portanto, nenhuma modificação dessa esfera foi realizada.

Ademais, outro aspecto importante refere-se às condições iniciais da simulação, que depende do tipo de corrida de detritos que ocorreu na área de interesse. Nesse sentido, o programa, considerando a classificação de Nettleton et al. (2015) e Hutchinson (1968), sugere como *input* para corridas de detritos do tipo não canalizadas áreas de lançamento (ou áreas de desprendimento) e hidrogramas para aquelas corridas caracterizadas como canalizadas. Portanto, para esta pesquisa, considerando a etapa de retro-análise, utilizou-se as cicatrizes de escorregamento elaboradas por Fúlfaro et al. (1976) e as extraídas nas fotografias aéreas de 1973 como áreas de lançamento. Ademais, a espessura das áreas de desprendimento, outro requisito de *input* do programa, foi inferida a partir dos resultados obtidos na retro-análise, complementada com observações dos trabalhos de campo.

Outro parâmetro considerado na modelagem com o RAMMS é a definição da área a ser submetida ao processo de simulação. Para este estudo, a área-alvo pre-selecionada na etapa 3.5.3 foi adotada, acrescida de um buffer de 600 metros, de modo a garantir que possíveis distorções nas bordas não afetassem os resultados.

O tempo de duração do evento também é importante para a simulação e no *software* a sua unidade é dimensionada para segundos. Baseando-se na retro-análise, especificamente na obra de Gramani (2001), os valores apresentados pelo autor em minutos foram convertidos em segundos, considerando a ocorrência das corridas de detritos.

Sobre as características do fluxo, o programa recomenda que os seguintes parâmetros sejam inferidos: densidade, atrito e viscosidade. Para a densidade, foram considerados os resultados provenientes da etapa de retro-análise, baseados em projetos que tiveram como área de pesquisa a mesma localidade aqui adotada (Serra do Mar/ Caraguatatuba). O coeficiente μ , segundo o manual do programa, corresponde à tangente do ângulo na zona de deposição (RAMMS, 2013), ao passo que a viscosidade (ξ) descreve o comportamento turbulento do fluxo. Para ambos os parâmetros foram utilizados resultados obtidos na retro-análise, a partir de trabalhos já publicados sobre o evento ocorrido no local, que contêm detalhes sobre o fluxo e o material carreado, além de terem sido realizadas diferentes simulações com distintos cenários na tentativa de estabelecer os valores ideais de cada variável. O quadro 8 lista os *inputs* do programa e a exigência do seu formato.

Ademais, o programa ainda permite que imagens de sensoriamento remoto (imagens orbitais, fotografias aéreas e até cartas topográficas) sejam acopladas ao projeto a ser alvo de simulação. Obviamente, esses materiais devem estar previamente georreferenciados e atrelados ao sistema de coordenadas cartesianas, conforme supracitado. Assim, para este trabalho a ortofoto da Emplasa (2011) foi utilizada, considerando os limites da área-alvo adicionados ao *buffer* de 600 metros.

Quadro 8. Tipo de parâmetro de entrada e formato. Fonte: Elaborado pela autora.

<i>Input</i>	Formato
Dados topográficos	ASCII
Áreas de lançamento/ desprendimento	Vetorial (<i>shapefile</i>)
Espessura da área de lançamento	Vetorial (<i>shapefile</i>)/ inferidas no programa ou importadas da tabela de atributos do <i>shapefile</i> das áreas de lançamento
Área da simulação	Vetorial (<i>shapefile</i>)
Tempo de duração da corrida de detritos	Segundos
Densidade do material	Kg/m ³
μ (atrito)	adimensional
ξ (viscosidade)	m/s ²

3.6. Modelagem morfométrica em *software* de simulação 3D

3.6.1. Trabalho de campo em área com registro de ocorrência recente de corridas de detritos

Concomitantemente à realização das simulações no *software* RAMMS, um trabalho de campo foi realizado na região de Guaratuba (PR), na Serra do Mar paranaense, onde insere-se o oleoduto OSPAR (Oleoduto Santa Catarina – Paraná) e houve o registro em fevereiro de 2017 de ocorrência de escorregamentos e corridas de detritos na bacia hidrográfica que o mesmo se situa (Bacia do Rio São João). A ocorrência recente do evento possibilitou o seu reconhecimento *in loco* e permitiu uma maior compreensão da dinâmica de deposição de corridas de detritos, dos parâmetros que envolvem a dinâmica do fluxo, tais como viscosidade e velocidade, além da identificação dos materiais envolvidos no processo. Ademais, a realização desta campanha de campo também facilitou a reflexão acerca dos riscos

que envolvem a ocorrência de corridas de detritos em áreas de inserção de dutovias, auxiliando na discussão e conclusão dos resultados.

3.6.2. Realização de simulações com diversos cenários

Para representar uma aproximação de uma situação real em campo, de modo a simular sua dinâmica, modo de ocorrência e variáveis envolvidas, frequentemente são utilizados diferentes modelos. Um modelo matemático é aquele que simula o sistema considerado através de um conjunto de equações que representam os processos governantes e as condições de contorno do modelo. Modelos matemáticos podem ser utilizados (i) num sentido interpretativo, para melhorar nossa habilidade de compreender os processos observados em campo, (ii) como uma estrutura capaz de juntar e organizar os dados coletados, e (iii) como uma ferramenta capaz de formular e/ou verificar ideias a respeito da dinâmica do sistema em questão (ANDERSON; WOESSNER, 1992 apud REIS; ZAINÉ, 2018). Apesar de serem uma representação simplificada da realidade, modelos são particularmente relevantes na análise de movimentos de massa, assim como na previsão de suas ocorrências e decorrências, contribuindo, portanto, na mitigação dos impactos (BATHURST et al., 1997; RAMMS, 2013).

Assim, considerando essas premissas, o modelo suíço *RAMMS (Rapid Mass Movement Simulation)*, versão 1.5, foi empregado para investigar as intensas e extensas corridas de detritos que ocorreram em Caraguatatuba no dia 18 de março de 1967. *RAMMS* é um modelo físico numérico, baseado na reologia Voellmy, capaz de simular as dimensões, as pressões de impacto e as velocidades de fluxo de avalanches de neve, deslizamentos e fluxos de detritos, em modelos digitais de terreno tridimensionais. O módulo *RAMMS:: Debris Flow*, desenvolvido para simular corridas de lama e de detritos em terrenos complexos, é utilizado na Suíça e em todo o mundo para análises de risco e para auxiliar no planejamento de medidas de mitigação (REIS; ZAINÉ, 2018).

Inicialmente foram realizados testes empíricos considerando os valores *default* dos parâmetros de entrada, permitindo o contato inicial com o modelo e o conhecimento das ferramentas que o cercam. Após sucessivos testes, foram inseridos os parâmetros retro-analisados do item 3.5.3, sendo que uma rotina de simulações foi estabelecida, baseada em diferentes espessuras das áreas de

lançamento, diferentes níveis de viscosidade e de densidade do fluxo. A consideração destes distintos cenários possibilitou que os parâmetros fossem calibrados com maior acurácia e sensibilidade, de modo que nas simulações finais foram também realizados testes com diferentes valores do coeficiente μ .

3.7. Análises dos resultados, síntese e conclusões

A última etapa do trabalho consistiu-se na integração e discussão dos resultados, com a proposição de metodologia para avaliação da potencialidade de bacias hidrográficas à ocorrência de corridas de detritos, em áreas de inserção de dutovias ou não. Ademais, foram delineadas as considerações finais da pesquisa, a partir da reflexão dos resultados, acrescentadas por algumas recomendações no que tange à gestão territorial e planejamento ambiental da região, envolvendo as Estações de Tratamento da Petrobrás e as áreas de inserção dos dutos.

4. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

4.1. Características gerais

A área de estudo compreende as bacias hidrográficas dos rios Bacuí, Maçaguaçu, Guaxinduba, Santo Antônio, Pau D'alho, Canivetal, Ribeirão da Lagoa, Rio Grande, Camburu, Piraçununga, Rio Claro, Perequê, Perequê-Mirim, São Tomé, Enseada, São Francisco, Vila Baby, Barequeçaba e Ribeirão Grande Santo Antônio, do Rio Juqueriquerê e do Rio São Francisco, localizadas nos municípios de Caraguatatuba e São Sebastião (SP), no contexto geomorfológico do Planalto Atlântico e da Província Costeira, na Serra do Mar paulista (Figura 17 e 18). A Província Costeira é dividida por Almeida (1964) em Serras Costeiras e Zona da Baixada Litorânea. As planícies possuem ocorrência restrita distribuídas por um litoral bastante recortado, onde são frequentes as enseadas e praias. A costa é abruptamente interceptada pela borda oriental do Planalto Atlântico com ocorrência de pontões rochosos perpendiculares à direção geral desta estrutura, os quais favorecem a formação de baías.

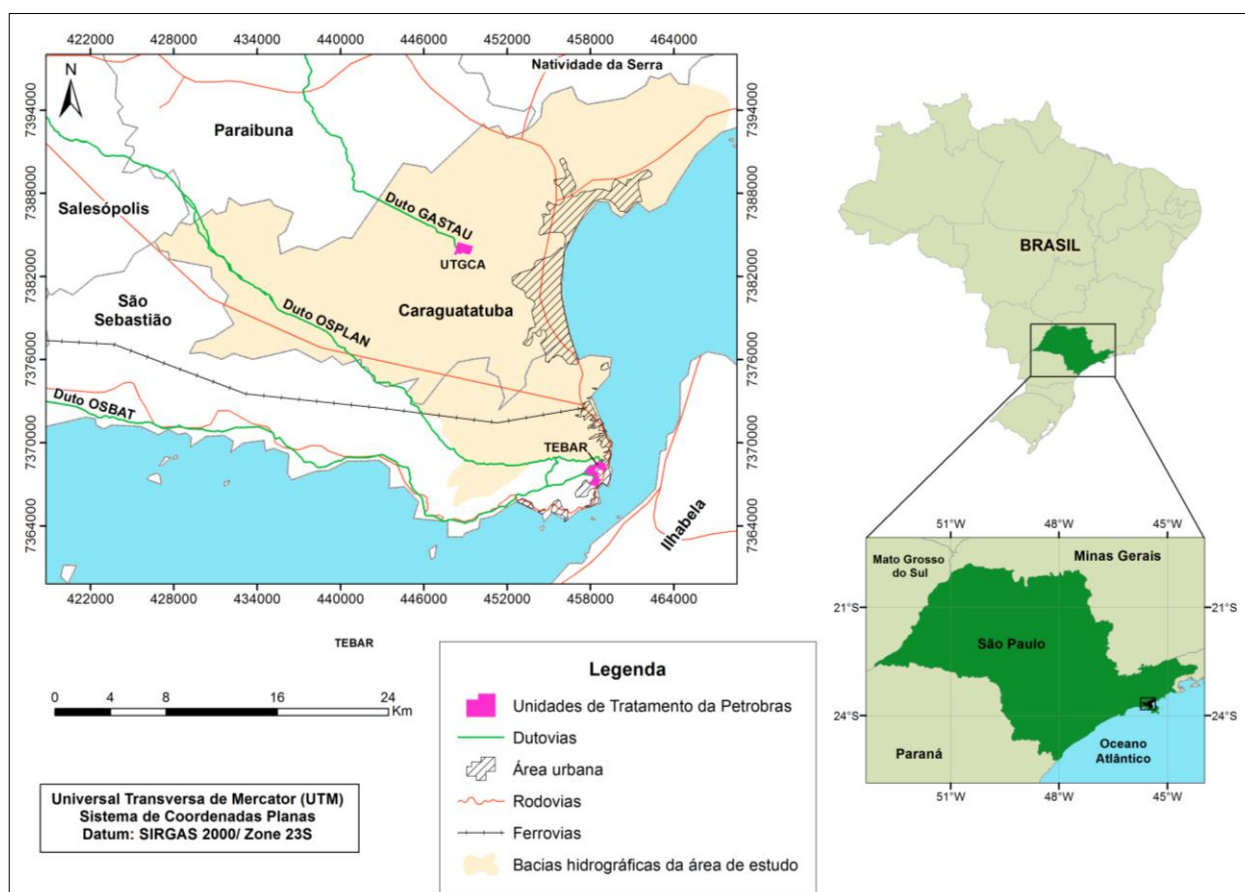


Figura 17. Aspectos geográficos da área de estudo. Elaborado pela autora.

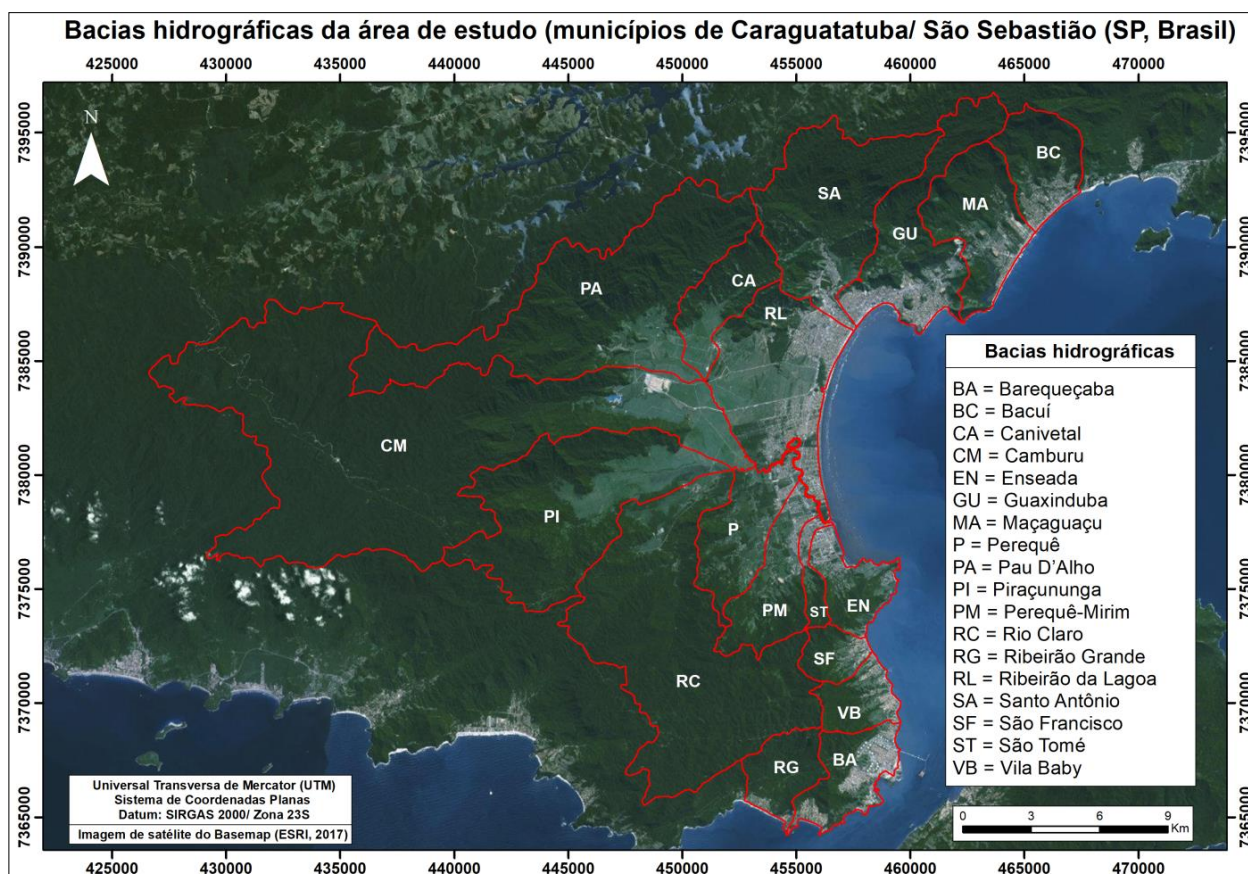


Figura 18. Bacias hidrográficas que compõe a área de estudo. Elaborado pela autora.

Almeida (1964) ainda destaca que a ação dos movimentos neotectônicos, representada pelos movimentos de blocos de falhas, é responsável pelo desenvolvimento de *rifts* e soerguimento da Serra do Mar e Mantiqueira. Esses movimentos ocorreram basicamente ao longo de antigas linhas de fraqueza do Pré-cambriano, com direção predominante leste-nordeste determinando a linha de costa atual. Esta área encontra-se totalmente inserida no Embasamento Cristalino em trecho do cinturão de cisalhamento transcorrente Paraíba do Sul. Com relação à litologia da região serrana, destaca-se a ocorrência de rochas polimetamórficas de idade arqueana (migmatitos, gnaisses, granito-gnaisses, biotita gnaisses), granitóides foliados do proterozóico superior, rochas cataclásticas cambro-ordivicianas e intrusões básicas localizadas, de idade mesozóica (geralmente na forma de diques). Dentre as principais estruturas geológicas da área, cita-se a falha Bertioga-Caraguatatuba (CPRM, 1982a; 1991).

Os depósitos do quaternário são marcados por depósitos coluvionares, aluvionares e costeiros. Os colúvios situados no pé da serra apresentam vários metros de espessura e são preservados em afloramentos nas margens das

principais drenagens e sobre rochas alteradas. A ocorrência de grandes blocos rochosos imersos em matriz argilo-arenosa e sucessivas inversões granulométricas sugere que os depósitos coluvionares estão associados a corridas de detritos. Ao longo dos canais de drenagem, depósitos aluvionares recentes possuem grande quantidade de material arenoso e matacões, que podem ser remobilizados e transportados por corridas de detritos (GRAMANI, 2001). As planícies costeiras são compostas basicamente por depósitos marinhos antigos, recentes e atuais (CRUZ, 1990) (Figura 19).

No contexto geomorfológico, a área de estudo está inserida na unidade morfoescultural do Planalto Atlântico, sustentado pelo embasamento cristalino, exibindo um relevo bastante dissecado, com encostas íngremes e alta densidade de drenagem associadas com as falhas, fraturas e contatos litológicos (ROSS; MOROZ, 1997).

Ademais, a área de estudo também se situa na unidade morfoescultural Serrania Costeira e Zona da Baixada Litorânea. A Serrania Costeira representa o *front* da serra, com altitudes de até 1200 metros, apresentando feições como escarpas festonadas, espigões, serras alongadas, morros paralelos e morros isolados. As Baixadas Litorâneas são representadas por relevos baixos com altitudes inferiores a 70 metros, apresentando elevações que separam pequenas planícies e enseadas (CRUZ, 1974).

Cruz (1974) compartimentou o relevo do município de Caraguatatuba em três unidades distintas: planalto, escarpa e planícies litorâneas (Figura 20). Segundo o IPT (1987), o substrato rochoso do planalto e da escarpa é composto por granitos-gnaisses, migmatitos e micaxistos. Predominantemente, o modelado no planalto é de um relevo mamelonizado com altitudes entre 800 a 900 e acima de 900 m, com amplitude topográfica variando entre 20 a 200 m (até 400 m em alguns pontos) e presença de escarpas retilinizadas. A rede de drenagem nas cabeceiras é do tipo dendrítica, passando a retilínea, retangular e em treliça, em resposta ao arranjo estrutural, principalmente nos médios e baixos cursos (NERY, 2016).

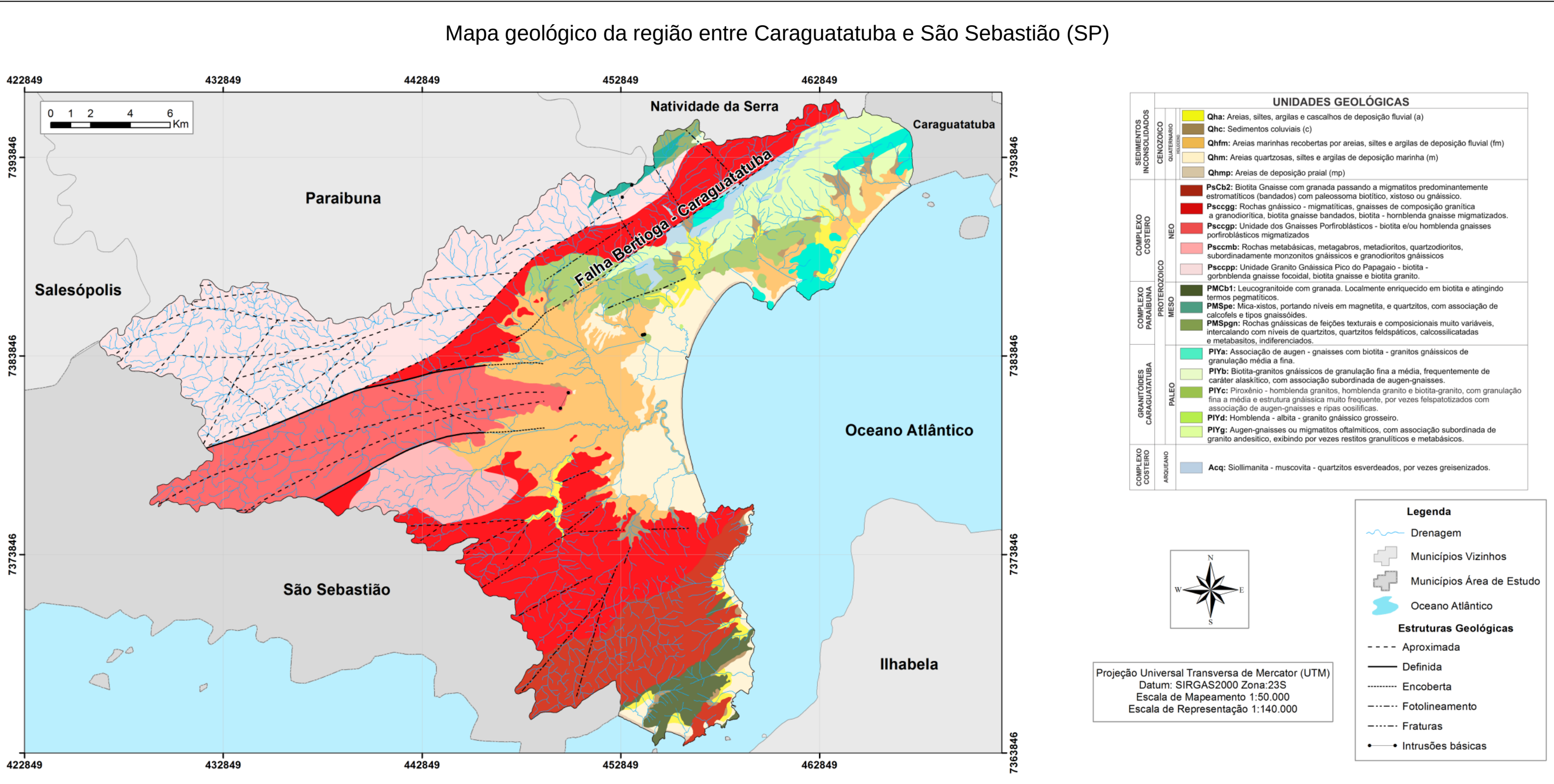


Figura 19. Mapa geológico da área de estudo. Fonte: CPRM (1982a; 1991); IG (1996a).

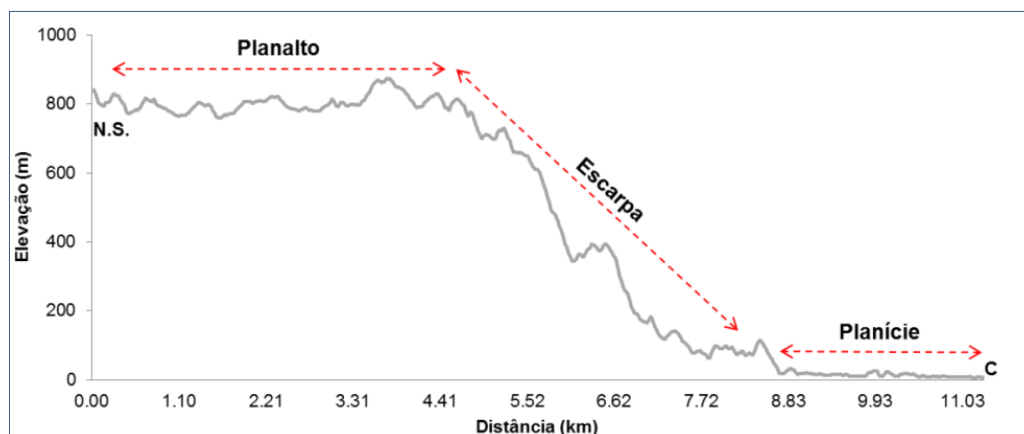


Figura 20. Perfil topográfico seccionando a bacia do rio Santo Antônio (Caraguatatuba, SP) na região de escarpa e planície. Fonte: Nery (2016).

As escarpas são caracterizadas pelo grande controle estrutural, onde prevalecem encostas do tipo côncavo-convexo, íngremes nas partes mais altas (maior que 22°), com ocorrência de baixos níveis e patamares intermediários e rampas de desgastes, com encostas mais suaves (CRUZ, 1974). As amplitudes topográficas alcançam até 800 m, em extensos perfis retinizados. Sistemas de drenagens formam pequenas bacias em forma de anfiteatro e os vales apresentam formato em “V”, sendo profundamente entalhados e interrompidos por soleiras. Colúvios e tálus formam-se por meio de movimentos de massa e/ou por escoamento superficial, preferencialmente na época da estação chuvosa (NERY, 2016). A recorrência desses processos pode ser inferida através da superposição de camadas correspondentes a diferentes épocas de deposição, observadas por Cruz (1974).

As planícies litorâneas são compostas por depressões úmidas, terraços fluviais e colúvio-aluviais, e terraços e taludes de detritos coluviais de pé de encosta. Os traçados das drenagens neste compartimento são condicionados à evolução e progressão dos depósitos (CRUZ, 1974).

Ainda sobre o contexto geomorfológico da área, dada a importância dos aspectos morfométricos na incidência de corridas de detritos, são apresentados nas figuras 21 e 22 os mapas de declividade da área de estudo e o Modelo Digital do Terreno, ambos elaborados com a base topográfica em escala 1:50.000.

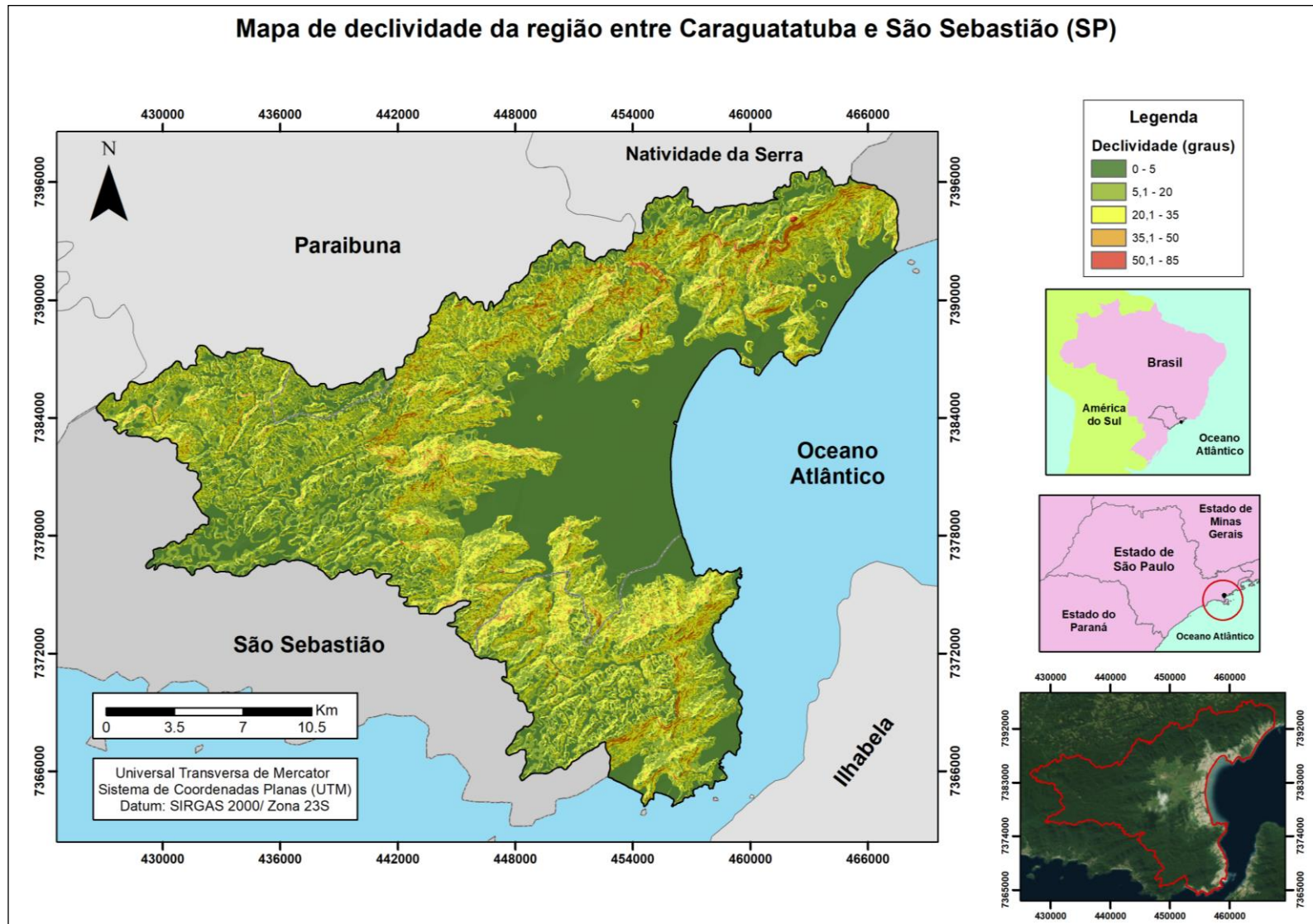


Figura 21. Mapa de declividade da área de estudo, em graus ($^{\circ}$). Elaborado pela autora a partir das cartas topográficas do IBGE em 1:50.000 (IBGE, 1973; 1974a; 1974b; 1975).

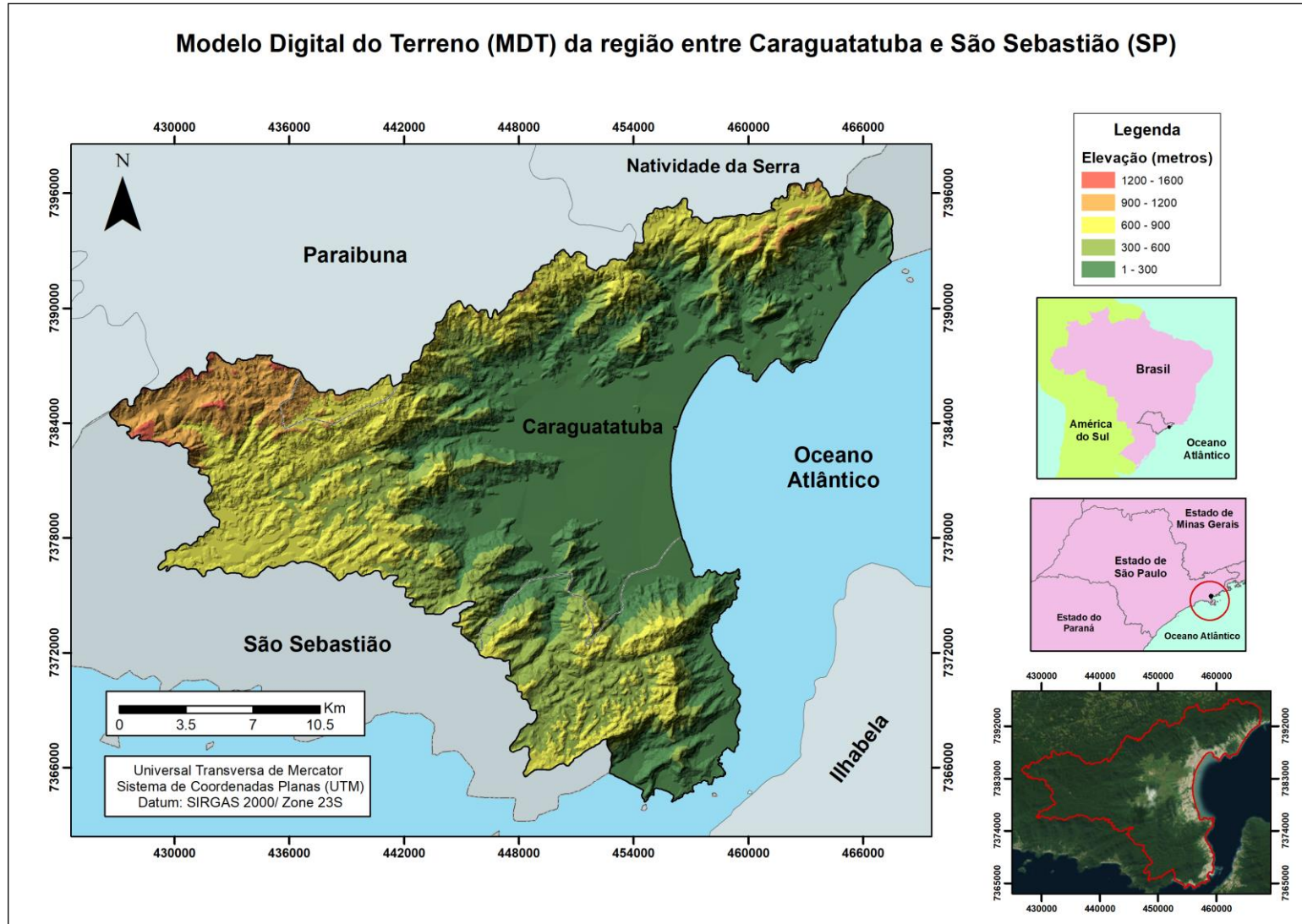


Figura 22. Modelo Digital do Terreno (MDT) da área de estudo, com hipsometria exibida em metros. Elaborado pela autora a partir das cartas topográficas do IBGE em 1:50.000 (IBGE, 1973; 1974a; 1974b; 1975).

Em Caraguatatuba a costa apresenta um brusco desvio para o norte, com recuo da escarpa para o interior e consequente preenchimento deste anfiteatro serrano por uma vasta planície litorânea (Figuras 21 e 22). Por suas dimensões, a planície litorânea constitui uma exceção no litoral norte do Estado de São Paulo. Ao norte e a nordeste da baixada de Caraguatatuba, a escarpa aproxima-se do mar, tornando a mergulhar seus esporões no oceano, sem apresentar condições para o desenvolvimento de planícies maiores (CRUZ, 1974).

Sobre os aspectos pedológicos, os solos da região apresentam-se de forma irregular nas escarpas, sendo mais espessos nas áreas de cumes e variando a espessuras delgadas ao longo das encostas, consistindo, em sua maior parte, de solos de alteração capeados por fina camada de colúvio (IPT, 1987). A camada do manto de alteração/colúvio é composta por materiais arenosos, areno argilosos e argilo arenosos. As espessuras das zonas de decomposição da rocha e de rocha pouca decomposta, onde ocorrem os movimentos de massa, variam entre 7,15 e 55 m e 8,10 e 16,50 m, respectivamente (CRUZ, 1974). O regolito também varia de acordo com a constituição rocha matriz. Rochas com composição quartzo-feldspáticas geram regolitos menos espessos e mais arenosos do que rochas mais ricas em micas (principalmente biotita), onde o solo é tendencialmente mais argiloso e mais espesso (GRAMANI, 2001).

Condicionado à topografia e às características do material acima da rocha sã, o nível freático pode ser raso, situado na delgada camada do manto de alteração/colúvio, ou profundo, no contato entre a zona de decomposição e a zona da rocha pouco alterada. Em encostas mais íngremes, o nível freático pode restringir-se à rocha sã. Oscilações do nível freático nas encostas são condicionadas às variações de precipitação sazonais e diárias (CRUZ, 1974).

Com relação ao clima, no litoral do Estado de São Paulo são observadas características de clima tropical, sem estação seca bem definida, com diminuição dos volumes de precipitação durante o inverno e o aumento no verão (SELUCHI; CHOU, 2009; SANTOS; GALVANI, 2012). Na classificação de Köppen o clima da região é classificado como tipo Af, que indica clima tropical chuvoso com chuvas o ano inteiro (SANCHEZ et al., 1999). Tavares et al. (2004) apontam que, de forma geral, o litoral norte possui alta variabilidade de precipitação, principalmente entre os meses de fevereiro e março. Este efeito sazonal do regime pluviométrico é decorrente da influência das massas tropicais e sistemas frontais, que somados à

influência topográfica, condicionam maiores valores de precipitação no Litoral Norte (SANT-ANNA NETO, 1994; BARBOSA, 2007; PELLEGATTI; GALVANI, 2010).

Cruz (1974) caracterizou o Litoral Norte como uma das áreas mais úmidas do país, devido às águas superficiais abundantes e rede de drenagem densa e contínua, somado ao regime de chuvas torrenciais, de alta intensidade, com máximas entre 100 a 200 mm em 24 horas e 40 a 50 mm por hora. Associadas às escarpas da Serra do Mar, estas características resultam em vários eventos de dinâmica superficial, como os escorregamentos e corridas de detritos generalizados ocorridos em 1967. Caraguatatuba, especificamente, apresenta uma menor variabilidade de precipitação em relação aos demais municípios, devido à sua posição geográfica mais recuada, que ameniza a relação da circulação atmosférica com a orografia, resultando em sombras de chuvas (TAVARES et al., 2004). Sua precipitação média anual é de 1784 mm (SANTOS; GALVANI, 2012).

Relacionando-se com os aspectos climáticos, nos municípios de Caraguatatuba e São Sebastião ocorre o predomínio do bioma Mata Atlântica, que é estratificada em três formações florestais principais: mata de encosta (com árvores altas com dossel descontínuo), mata de planície litorânea, e mata de altitude (existentes a partir dos 1.100 metros de altitude, a vegetação é mais baixa que a da mata de encosta). Em função da distribuição escalonada das encostas, o porte arbóreo pode variar entre 25 a 30 m de altura, com diâmetro de tronco entre 1 e 3 m e copas densas e largas (SMA, 1992). Esta variedade fisionômica deve-se às variações na região da forma do relevo, altitude, declividade, litologia, pedologia e condições climáticas (SANCHEZ et al., 1999).

No que tange os aspectos socioeconômicos, os municípios de Caraguatatuba e São Sebastião (SP) possuem um total de 196.337 habitantes e uma área de 884.776 km² (GABELINI, 2017). Entretanto, a área urbanizada é restrita principalmente à porção litorânea, uma vez que acima da cota de 100 metros o uso é destinado teoricamente à conservação através do Parque Estadual da Serra do Mar.

Marandola Júnior et al. (2013) salientam que o Litoral Norte atualmente configura-se como uma região com um dos mais acentuados processos de expansão e crescimento urbano do Estado de São Paulo. Segundo os mesmos autores, o local passou por uma de suas décadas de maior crescimento urbano e econômico, no contexto de grandes transformações que envolvem a exploração de

gás e petróleo, a expansão do porto de São Sebastião, a consolidação de um novo tipo de turismo e da própria urbanização, especialmente em Caraguatatuba, sede e polo irradiador da maior parte das transformações. O setor petrolífero na região é indicado pela presença de um terminal em São Sebastião (TEBAR - Terminal Aquaviário Almirante Barroso), um em Caraguatatuba (UTGCA - Unidade de Tratamento de Gás Natural Monteiro Lobato) e 3 dutos (GASTAU, OSPLAN E OSBAT – Figura 17).

O TEBAR é o maior terminal operado pela Transpetro. São Sebastião recebe petróleo por navio-petroleiro e abastece quatro refinarias do Estado de São Paulo através dos oleodutos São Sebastião-Guararema e Santos-São Sebastião. Os derivados entram e saem do terminal pelo oleoduto Guararema-Paulínia. Outra forma de vazão é o envio dos derivados por navios para outros portos nacionais ou para exportação (TRANSPETRO, 2018). Este terminal está situado na área urbana do município e próximo à faixa litorânea (Figura 23a).

O UTGCA – Unidade de Tratamento de Gás Natural Monteiro Lobato, localizado na planície costeira de Caraguatatuba, processa diariamente cerca de 20 milhões de metros cúbicos de gás por dia, resultando em 200 metros cúbicos de GLP (Gás Liquefeito de Petróleo). A unidade recebe gás e condensado de três plataformas *offshore* da bacia de Santos, na costa dos Estados de São Paulo e do Rio de Janeiro. A distribuição do gás processado dar-se-à posteriormente via gasoduto GASTAU até o município de Taubaté (SP) (Figura 23b).



Figura 23. (a) TEBAR, em São Sebastião; (b) UTGCA, em Caraguatatuba. Fonte: <<https://petronoticias.com.br/archives/54469>>.

O oleoduto OSBAT tem 121 km de extensão e possui como ponto de origem o TEBAR, em São Sebastião, cujo destino é o Terminal de Cubatão (Refinaria Presidente Bernardes). O gasoduto GASTAU transporta gás de Caraguatatuba à Taubaté e possui uma extensão de 96 km. Segundo a Transpetro (2018), sua operação iniciou-se em 2010. O oleoduto OSPLAN parte de São Sebastião à Refinaria de Paulínia (SP), sendo que há um terminal intermediário em Guararema (SP). Sua extensão total é de 235 km (TRANSPETRO, 2018).

4.2. O evento de 1967

Os movimentos de massa que assolaram a região de Caraguatatuba em 1967 foram deflagrados por fortes chuvas em março de 1967, e segundo Gramani (2001) são considerados uns dos mais expressivos já registrados no mundo. Neste evento, escorregamentos generalizados e simultâneos atingiram as principais drenagens da região serrana, foram canalizados e transformaram-se em corridas de detritos, com grande mobilização de material vegetal. Os movimentos de massa ocorreram num raio de 7 a 15 quilômetros de extensão e variaram de comportamento, no tempo e no espaço, alterando suas características conforme o escoamento, passando de corrida de detritos a corridas de lama (IPT, 1988).

No mês de março de 1967 foram registrados cerca de 946 mm de chuva nos postos pluviométricos de Caraguatatuba, sendo que 260 mm e 325 mm ocorreram nos dias 17 e 18, respectivamente (NERY, 2016). O temporal foi antecedido por uma chuva fraca e os escorregamentos ocorreram depois de 4 horas de chuvas fortes ao redor de 225 mm em 24 horas (GRAMANI, 2001). Segundo Cruz (1990), as vertentes com mais de 22° foram as mais atingidas. A sequência e descrição dos eventos ocorridos no dia 18/03/1967 está sintetizada no Quadro 9.

Cruz (1974) relatou que os rios perderam seu leito original, vagando em uma planície de lama. A estrada da serra desapareceu impossibilitando até mesmo o reconhecimento da sua trajetória e em outras localidades as vias também foram atingidas por escorregamentos, dificultando o acesso aos bairros (CRUZ, 1974).

Para este evento, estimou-se um grande volume de sedimentos mobilizados, e cerca de 30 mil árvores desceram as encostas e morros, se espalhando pela cidade e resultando na destruição de 400 casas. Segundo registros oficiais,

ocorreram 436 mortes, entretanto, o número foi maior (CRUZ, 1974; IPT, 1987; NERY, 2016).

Quadro 9. Síntese do evento ocorrido em 18 de março de 1967. Fonte: Gramani (2001) adaptado por Reis e Zaine (2017).

Horário	Fase	Síntese do Evento
6:00 – 12:00	Preliminar	Começam a cair as primeiras barreiras.
12:00 – 16:00	Enchente Inicial	Nível do rio Santo Antônio se elevou em alguns metros e em alguns pontos a água extravasou nas margens.
16:15 – 17:00	Escorregamentos	Escorregamentos generalizados. A superfície de ruptura atingia, na maior parte dos casos, a rocha sã, expondo muitas cicatrizes.
16:15 – 17:00	Corrida de detritos	Os materiais dos escorregamentos que atingiram as linhas de drenagem foram mobilizados (solo, rocha, árvore, água) canalizados, retidos e acumulados em barramentos naturais. Com o aumento do material acumulado e aumento da pressão, ocorreu o rompimento violento destes, gerando corridas de detritos. Segundo testemunhas, o fato foi precedido de forte barulho, com o material movimentando-se em forma de onda. Próximo a Caraguatatuba, transformou-se em uma corrida de lama e inundação por madeiras (galhadas).
17:00 – 18:00	Enchente por bloqueio	A ponte metálica localizada próxima à desembocadura do rio Santo Antônio foi completamente bloqueada por troncos de árvores, trazidos pelos “debris flows”, formando um represamento natural, originando uma enchente de grandes dimensões. A região à montante transformou-se num imenso reservatório de água e sedimentos em suspensão. Como consequência a ponte entrou em colapso e liberou o material.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo reúne os resultados obtidos durante a pesquisa, acompanhados de reflexões e discussões subsidiadas por referenciais teóricos. Nesse sentido, optou-se por agrupá-los em três subcapítulos: 5.1, 5.2, 5.3 e 5.4.

5.1. Compartimentação fisiográfica e caracterização geológico-geotécnica

A utilização do método lógico de interpretação, que seguiu as proposições de Soares e Fiori (1976), Guy (1966) e Zaine (2011), gerou como produto 18 unidades fisiográficas delimitadas em escala 1:50.000 na região de Caraguatatuba e São Sebastião (SP), distribuídas no Planalto Atlântico e na Serrania Costeira (Apêndice 2/ Quadro 10). Considerando que a compartimentação subsidiou o entendimento fisiográfico da Serra do Mar quanto a sua potencialidade a movimentos de massa, os tópicos a seguir irão discutir sucintamente os principais aspectos geológico-geotécnicos de cada uma das unidades identificadas, cujas pranchas encontram-se disponíveis no apêndice 1.

Quadro 10. Aspectos geológicos-geotécnicos das unidades fisiográficas delineadas.

Unidade fisiográfica	Geologia	Relevo	Fotoanálise											
			Análise da densidade textural					Análise das formas e características do relevo						
			Densidade de drenagem	Densidade dos elementos de relevo	Permeabilidade	Relação escoamento superficial/infiltração	Espessura e características do manto de alteração	Amplitude altimétrica	Declividade	Formas de escosta	Forma do vale	Forma do topo	Feições particulares	Bacias hidrográficas presentes na unidade
IA	Areias de deposição praial, areias quartzosas, siltes e argilas de deposição marinha e areias marinhas recobertas por areias, siltes e argilas de deposição fluvial	Planície costeira	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Não se aplica	Pequena	Muito Baixa	Não se aplica	Aberto	Aplainado	Planície costeira bem extensa em Caraguatatuba (SP)	Bacuí, Maçaguaçu, Guaxinduba, São Francisco, Ribeirão Grande, Vila Baby, Enseada, Perequê, Perequê-Mirim, São Tomé, Barequeçaba, Santo Antônio, Canivetal, Ribeirão da Lagoa, Pau D'Alho, Camburu, Piraçununga, Rio Claro
IB	Areias, siltes, argilas e cascalhos de deposição fluvial	Planície fluvial	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Não se aplica	Pequena	Muito Baixa	Não se aplica	Aberto	Aplainado	Depósitos de corridas de detritos	Maçaguaçu, Guaxinduba, São Francisco, Barequeçaba, Santo Antônio, Ribeirão da Lagoa, Rio Claro, Vila Baby, Enseada
II	Sedimentos coluvionares e corpos de tálus	Rampas de colúvio e tálus	Baixa	Baixa	Média	Média	Grande	Pequena	Média	Convexa	Aberto	Aplainado	Evidências de escorregamento	Bacuí, Maçaguaçu, Guaxinduba, Barequeçaba, Santo Antônio, Canivetal, Pau D'Alho, Camburu, Ribeirão Grande, Vila Baby, Enseada, Perequê, Perequê-Mirim, São Tomé
III	Granitos e gnaisses em corpos insulares	Morros isolados	Baixa	Baixa	Média	Média	Grande	Pequena	Média	Convexa	Não se aplica	Aplainado	Morros isolados graníticos-gnáissicos	Bacuí, Maçaguaçu, Guaxinduba, Canivetal, Ribeirão da Lagoa, Pau D'Alho, Camburu, Piraçununga, Rio Claro, Perequê, Perequê-Mirim

Quadro 10. Aspectos geológicos-geotécnicos das unidades fisiográficas delineadas.

IV	Granito e Gnaiss Pico do Papagaio	Escarpas em anfiteatros com espigões digitados e Morros	Alta/Média	Alta/Média	Média	Média	Média	Grande	Alta	Retilíneas e Côncavas	Fechado	Anguloso	Cristas angulosas	Bacuí, Guaxinduba, Santo Antônio, Canivetal, Ribeirão da Lagoa, Pau D’Alho, Camburu, Piracununga, Enseada, Maçaguaçu
V	Gnaiss Migmatítico (Metabásicas associadas)	Escarpas com espigões digitados	Média	Média	Médio	Média	Média	Grande	Alta	Côncavas a Retilíneas	Fechado	Arredondado a anguloso	Cristas orientadas	Piraçununga, Rio Claro, Ribeirão Grande, Perequê, Perequê-Mirim, São Tomé
VI	Gnaiss Migmatítico (Metabásicas associadas)	Morros paralelos	Alta	Alta	Média	Média	Média	Média	Média a baixa	Côncava	Fechado	Aplainado a arredondado	Não se aplica	São Francisco, Rio Claro
VII	Gnaiss Migmatíticos	Morros	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Côncava a Retilínea	Fechado	Arredondado a anguloso	Não se aplica	Bacuí, Guaxinduba, Santo Antônio, Rio Claro, Perequê, Perequê-Mirim, São Tomé
VIII	Granito e Gnaiss Migmatítico	Escarpas com espigões digitados e morros	Média	Média	Média	Média	Pequena	Média	Média	Côncava a Retilínea	Fechado	Anguloso	Escarpas angulosas	São Francisco, Barequeçaba, Vila Baby, Enseada, Ribeirão Grande
IX	Gnaiss Migmatítico	Escarpas com espigões digitados	Baixa	Media	Baixa	Média	Pequena	Grande	Alta	Retilínea	Fechado	Anguloso	Cristas orientadas	Bacuí, Maçaguaçu, Guaxinduba, São Francisco, Rio Claro, Ribeirão Grande, Vila Baby, Barequeçaba
X	Gnaiss Migmatítico	Montanhoso	Média	Média	Média	Média	Média	Pequena	Média a baixa	Côncava a retilínea	Fechado	Arredondado a anguloso	Não se aplica	Maçaguaçu, Guaxinduba
XI	Granito Gnáissico Pico do Papagaio	Montanhoso	Média	Média	Baixa a média	Média a alta	Pequena	Média	Média	Retilínea	Fechado	Arredondado	Não se aplica	Camburu
XII	Granito Gnáissico Pico do Papagaio	Montanhoso	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Convexa e Retilínea	Fechado	Anguloso	Cristas angulosas	Pau D’Alho, Camburu
XIII	Granito Gnáissico Pico do Papagaio (Rochas metabásicas isoladas subordinadas)	Morros arredondados	Média	Média	Média	Média	Média	Alta	Média	Convexa a retilínea	Fechado	Arredondado a anguloso	Vertentes retilizadas	Camburu

Quadro 10. Aspectos geológicos-geotécnicos das unidades fisiográficas delineadas.

XIV	Granito Gnáissico (Metabásicas)	Morros paralelos	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Convexa a côncava	Fechado a aberto	Arredondado	Vertentes convexizadas	Camburu, Piraçununga
XV	Granito Gnáissico Pico do Papagaio	Montanhoso	Média	Média	Baixa a média	Baixa a média	Média	Grande	Alta	Retilínea	Fechado	Anguloso a arredondado	Não se aplica	Camburu
XVI	Granito Gnáissico (Micaxistos e quartzitos)	Mar de morros	Baixa	Baixa	Média	Média	Média	Pequena	Média a baixa	Côncava a retilínea	Fechado	Arredondado	Mar de morros	Pau D’Alho, Camburu
XVII	Granito Gnáissico (Micaxistos e quartzitos)	Montanhoso	Média	Média	Média	Média	Grande	Grande	Alta	Convexa a retilínea	Fechado	Arredondado	Não se aplica	Pau D’Alho

Quadro 10. Aspectos geológicos-geotécnicos das unidades fisiográficas delineadas.

Unidade fisiográfica	Fotointerpretação				Observações de campo		
	Características geotécnicas						
	Profundidade do topo rochoso	Espessura dos materiais inconsolidados	Potencial a movimentos gravitacionais		Processos geológicos	Uso e cobertura da terra	Bacias hidrográficas presentes na unidade
Corridas de detritos			Escorregamentos				
IA	Não se aplica	Espesso	Médio (maior para inundações e corridas de lama)	Baixo	Registros históricos de corrida de lama e inundações	Área urbana, floresta, cultura temporária, mineração, complexo industrial, cultura permanente	Bacuí, Maçaguaçu, Guaxinduba, São Francisco, Ribeirão Grande, Vila Baby, Enseada, Perequê, Perequê-Mirim, São Tomé, Barequeçaba, Santo Antônio, Canivetal, Ribeirão da Lagoa, Pau D'Alho, Camburu, Piraçununga, Rio Claro
IB	Não se aplica	Espesso	Alto	Baixo	Registros de campo evidenciaram a ocorrência de corridas de detritos em várias planícies fluviais da área de estudo e inundações	Cultura permanente, floresta, área urbana, silvicultura	Maçaguaçu, Guaxinduba, São Francisco, Barequeçaba, Santo Antônio, Ribeirão da Lagoa, Rio Claro, Vila Baby, Enseada
II	Profundo	Espesso	Alto	Alto	Registros de campo evidenciaram a ocorrência de escorregamentos em algumas rampas de colúvio/ tálus, além de corrida de detritos	Área urbana, floresta, pastagem, silvicultura, complexo industrial	Bacuí, Maçaguaçu, Guaxinduba, Barequeçaba, Santo Antônio, Canivetal, Pau D'Alho, Camburu, Ribeirão Grande, Vila Baby, Enseada, Perequê, Perequê-Mirim, São Tomé
III	Profundo	Intermediário	Baixo	Médio	Foram observados pontos de rastejo em campo	Floresta, pastagem, cultura temporária, área urbana	Bacuí, Maçaguaçu, Guaxinduba, Canivetal, Ribeirão da Lagoa, Pau D'Alho, Camburu, Piraçununga, Rio Claro, Perequê, Perequê-Mirim
IV	Raso a sub aflorante	Delgado a inexistente	Médio (quando unidade ocorrer próxima a drenagens em vales fechados)	Alto	Nas atividades de campo foram observados registros de escorregamento (material coluvionar e cicatrizes de escorregamento)	Floresta (em grande parte), pastagem, área urbana	Bacuí, Guaxinduba, Santo Antônio, Canivetal, Ribeirão da Lagoa, Pau D'Alho, Camburu, Piraçununga, Enseada, Maçaguaçu
V	Intermediário	Intermediário	Médio (quando unidade ocorrer próxima a drenagens em vales fechados)	Alto	Foram observadas nas atividades de campo evidências de escorregamentos recentes e antigos (cicatrizes de escorregamento)	Floresta (em sua maioria), pastagem, mineração, área urbana	Piraçununga, Rio Claro, Ribeirão Grande, Perequê, Perequê-Mirim, São Tomé
VI	Intermediário	Intermediário	Médio (quando unidade ocorrer próxima a drenagens em vales fechados)	Médio	Foram observadas nas atividades de fotointerpretação evidências de escorregamento (presença de cicatrizes)	Floresta	São Francisco, Rio Claro
VII	Intermediário	Intermediário	Baixo	Médio	Foram observadas nas atividades de fotointerpretação evidências de escorregamento (presença de cicatrizes)	Floresta	Bacuí, Guaxinduba, Santo Antônio, Rio Claro, Perequê, Perequê-Mirim, São Tomé
VIII	Raso a sub aflorante	Delgado a inexistente	Médio (quando unidade ocorrer próxima a drenagens em vales fechados)	Alto	Nas atividades de campo e de escritório foram observados registros de escorregamento (material coluvionar e cicatrizes de escorregamento)	Floresta, pastagem, mineração, cultura temporária, área urbana	São Francisco, Barequeçaba, Vila Baby, Enseada, Ribeirão Grande
IX	Raso a sub aflorante	Delgado a inexistente	Médio (quando unidade ocorrer próxima a drenagens em vales fechados)	Alto	Foram observadas nas atividades de fotointerpretação evidências de escorregamento (presença de cicatrizes)	Floresta, pastagem	Bacuí, Maçaguaçu, Guaxinduba, São Francisco, Rio Claro, Ribeirão Grande, Vila Baby, Barequeçaba

Quadro 10. Aspectos geológicos-geotécnicos das unidades fisiográficas delineadas.

X	Intermediário	Intermediário	Médio (quando unidade ocorrer próxima a drenagens em vales fechados)	Médio	Foram observadas nas atividades de fotointerpretação evidências de escorregamento (presença de cicatrizes)	Floresta	Maçaguaçu, Guaxinduba
XI	Raso a sub afluente	Intermediário a raso/ sub afluente	Médio (quando unidade ocorrer próxima a drenagens em vales fechados)	Médio	Foram observadas nas atividades de fotointerpretação evidências de escorregamento (presença de cicatrizes)	Floresta	Camburu
XII	Intermediário	Intermediário a raso/ sub afluente	Médio (quando unidade ocorrer próxima a drenagens em vales fechados)	Médio	Foram observadas nas atividades de fotointerpretação evidências de escorregamento (presença de cicatrizes)	Floresta	Pau D'Alho, Camburu
XIII	Intermediário	Intermediário	Médio (quando unidade ocorrer próxima a drenagens em vales fechados)	Médio	Não foram observados processos geológicos na Unidade nas atividades de fotointerpretação	Floresta	Camburu
XIV	Intermediário	Intermediário	Baixo	Baixo	Foram observadas nas atividades de fotointerpretação evidências de escorregamento (presença de cicatrizes)	Floresta	Camburu, Piraçununga
XV	Intermediário	Intermediário	Médio (quando unidade ocorrer próxima a drenagens em vales fechados)	Médio	Foram observadas nas atividades de fotointerpretação evidências de escorregamento (presença de cicatrizes)	Floresta	Camburu
XVI	Intermediário	Intermediário	Médio (quando unidade ocorrer próxima a drenagens em vales fechados)	Médio	Nas atividades de campo foram observados registros de escorregamento	Floresta	Pau D'Alho, Camburu
XVII	Intermediário	Intermediário	Médio (quando unidade ocorrer próxima a drenagens em vales fechados)	Médio	Não foram observados processos geológicos na Unidade nas atividades de fotointerpretação	Floresta	Pau D'Alho

5.1.1. Unidade IA – Planície Costeira

A unidade IA se refere a toda planície costeira da área de estudo, constituída por sedimentos inconsolidados quaternários. Ela se encontra embutida em um recôncavo longitudinal festonado da Serra do Mar, formando um arco de aproximadamente 180°. No município de São Sebastião a planície costeira tem porte menor, pois é recortada pelos costões rochosos que chegam ao mar.



Figura 24. Vista das escarpas (Unidade IV) para a planície litorânea (Unidade IA) de Caraguatatuba. Fonte: Gabelini (2017).

A respectiva unidade apresenta baixa densidade textural, e, portanto, baixa densidade de drenagem e de relevo. Ademais, morfometricamente caracteriza-se pela sua baixa amplitude altimétrica e declividades muito baixas, não ultrapassando 5°.



Figura 25. Planície litorânea em São Sebastião (Unidade I) e ao fundo Escarpas da Serra do Mar (Unidade VIII). Fonte: Gabelini (2017).

Nesta unidade os vales são abertos, a permeabilidade é considerada alta, a relação de escoamento e infiltração também é alta, com espesso material inconsolidado. O potencial à ocorrência de escorregamentos é baixo, porém no evento de 18/03/1967 esta planície, especialmente nas proximidades da Bacia Santo Antônio, comportou-se como a zona de deposição dos escorregamentos e corridas de detritos generalizados que desceram as encostas da Serra do Mar e os canais de drenagem, conforme relatado por Cruz (1974) (Figura 26). Gramani (2001) ressalta que no respectivo evento foram registrados nesta unidade processos de corridas de lama e inundações, cuja consequência foi o rompimento de uma ponte localizada na mesma bacia hidrográfica. Ademais, outros processos geológicos observados nos trabalhos de campo nesta unidade foram os erosivos lineares.



Figura 26. Processo de corrida de lama no evento de 18/03/1967 na Bacia Santo Antônio, em Caraguatatuba (SP), em planície costeira (unidade fisiográfica IA). Fonte: Cruz (1974).

A planície é predominantemente ocupada por área de mata nativa, área urbana, área industrial, área de mineração, área descoberta, piscicultura, pastagem, cultura temporária, cultura permanente, área de dutovias e porto.

Todas as bacias hidrográficas consideradas neste estudo estão contidas nesta unidade fisiográfica.

5.1.2. Unidade IB – Planície Fluvial

Embora as características fisiográficas desta unidade sejam semelhantes à anterior, optou-se em distinguí-las em função de sua potencialidade à ocorrência de corridas de detritos.

A unidade IB é constituída por sedimentos essencialmente de origem fluvial, tais como areias, siltes, argilas e cascalhos. Assim como na unidade anterior, sua densidade textural é baixa, bem como a declividade. A amplitude altimétrica é pequena, a espessura dos materiais inconsolidados é grande e os vales são abertos. Na escala de mapeamento (1:50.000), as bacias hidrográficas que estão contidas nessa unidade são Maçaguaçu, Guaxinduba, São Francisco, Barequeçaba, Santo Antônio, Ribeirão da Lagoa, Rio Claro, Vila Baby e Enseada.

Considerando as corridas de detritos primárias e secundárias, essa unidade fisiográfica é enquadrada por ter alto potencial à ocorrência de detritos. Nesse sentido, durante as atividades de campo foram encontrados vestígios que indicam essa assertiva, conforme evidenciado na figura 27. Ademais, Cruz (1974), ao realizar o mapeamento das cicatrizes de escorregamento do evento de 1967 na região, considerou também a ocorrência de corridas de detritos, identificada principalmente nas planícies fluviais dos canais de drenagem (Figura 28).



Figura 27. Depósito de blocos em planície fluvial na unidade IB, indicando ocorrência de corridas de detritos. Foto: Arquivo pessoal Claudia Vanessa dos Santos Corrêa.

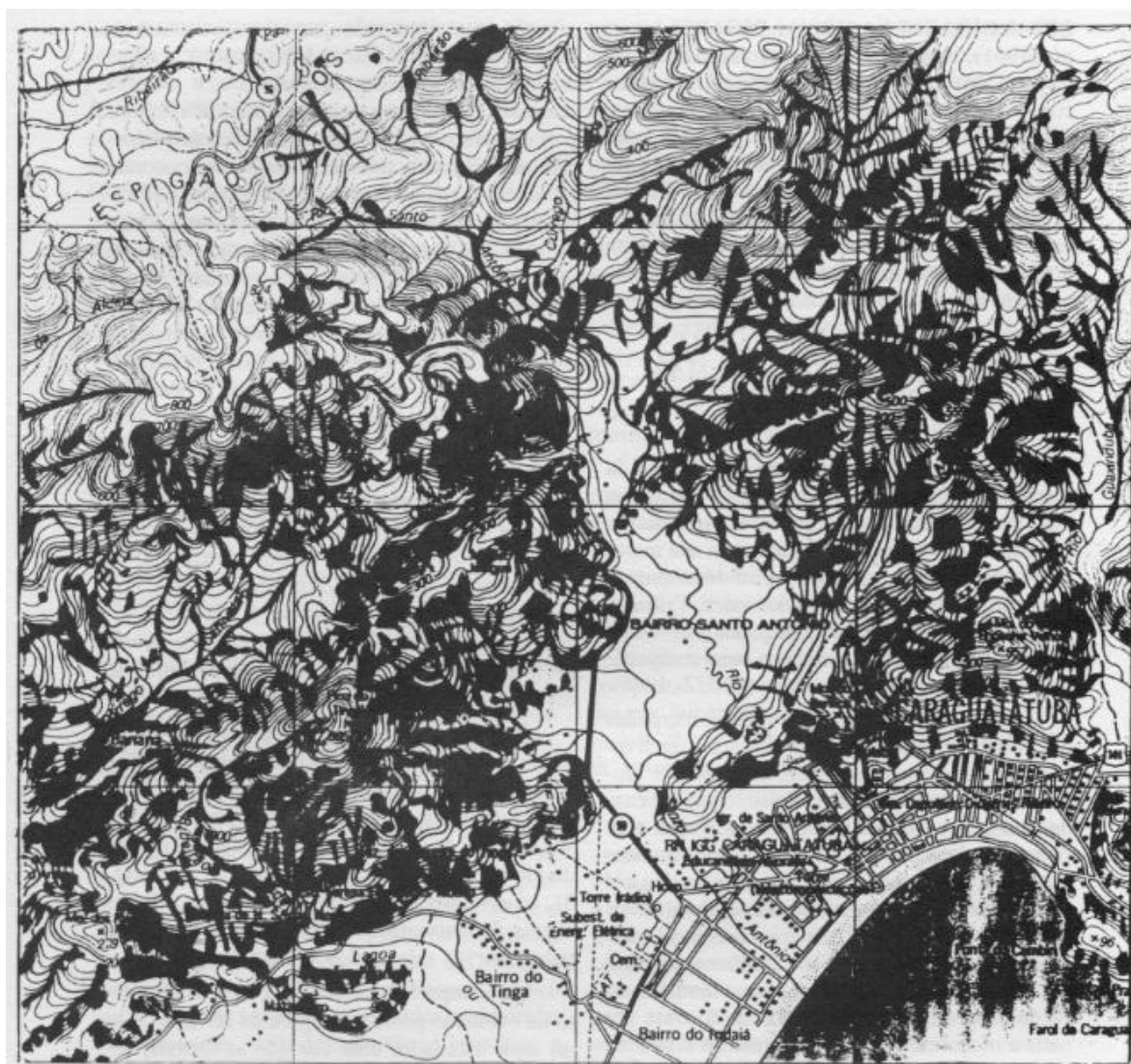


Figura 28. Cicatrizes de escorregamento e ocorrência das corridas de detritos do evento de 1967 na região de Caraguatatuba identificadas por Olga Cruz. Fonte: Cruz (1974).

5.1.3. Unidade II – Rampas de colúvio e tálus

A unidade II é composta por sedimentos coluvionares e corpos de tálus. Nesse sentido, segundo Moreira e Pires Neto (1998), sua existência está relacionada a ocorrência de escorregamentos e queda de blocos, por processos de alteração de encostas e pela ação da gravidade, muito comum no sopé de serras da região Sudeste do Brasil.

As bacias hidrográficas que estão contidas na unidade fisiográfica II são Bacuí, Maçaguaçu, Guaxinduba, Barequeçaba, Santo Antônio, Canivetal, Pau D'Alho, Camburu, Ribeirão Grande, Vila Baby, Enseada, Perequê, Perequê-Mirim e São Tomé. Sua fisiografia é caracterizada por pequena amplitude topográfica e média

declividade, além de possuir média permeabilidade, média relação de escoamento superficial/infiltração, topo rochoso profundo e espesso material inconsolidado. Esta unidade possui alto potencial a movimentos de massa, principalmente a escorregamentos, fato evidenciado em campo (Figura 29). Ademais, esta unidade também contribui na ocorrência de corridas de detritos primárias, no qual o material mobilizado nas encostas, pela ação gravitacional, atinge os canais de drenagem principal (CAMPBELL, 1975; TAKAHASHI, 1981; IPT, 1987; 1988; WIECZOREK, 1987; AUGUSTO FILHO, 1993; KANJI et al., 2003).



Figura 29. Rampa de tálus da unidade II com depósito de blocos métricos (Granito).
Foto: Arquivo pessoal Fábio Augusto Gomes Vieira Reis.

5.1.4. Unidade III – Morros isolados granítico-gnáissicos

A unidade III caracteriza-se morros isolados nas planícies fluviais e costeira, composta por rochas graníticas podendo variar de gnaisses até migmatitos. Localiza-se nas porções baixas do relevo, de modo que possui pequena amplitude altimétrica e declividade predominante média. Para esta unidade, Gabelini (2017) ressalta que os processos geológicos que podem ocorrer são o rastejo e escorregamentos (Figura 30).



Figura 30. Morro isolado em planície costeira com evidências de rastejo. Foto: Arquivo pessoal Fábio Augusto Gomes Vieira Reis.

Essas áreas possuem média permeabilidade, média relação de escoamento superficial/infiltração, grande espessura do manto de alteração, topo rochoso profundo, material inconsolidado intermediário, médio potencial a escorregamentos e baixo potencial a corrida de detritos. Quanto ao uso e ocupação da terra, predomina nesta unidade áreas de pastagem, cultura temporária, área urbana e floresta. As bacias hidrográficas contidas na unidade III são Bacuí, Maçaguaçu, Guaxinduba, Barequeçaba, Santo Antônio, Canivetal, Pau D'Alho, Camburu, Ribeirão Grande, Vila Baby, Enseada, Perequê, Perequê-Mirim e São Tomé.

5.1.5. Unidade IV – Escarpas e Morros em Granitos e Gnaisses

Na unidade fisiográfica IV o relevo é caracterizado por escarpas em anfiteatros, escarpas em espigões digitados e morros. Sob a ótica geológica, é composta por gnaisses de composição granítica a granodiorítica migmatizados, biotita-hornblenda gnaisses e biotita granitos, que tendem a formar solos pouco desenvolvidos.

A respectiva unidade apresenta grande amplitude altimétrica (cerca de 800 m) e declividade predominantemente alta ($> 30^\circ$), com vales fechados encaixados em estruturas geológicas (zonas de falhas e fraturas) que influem na sinuosidade da drenagem, tendendo a padrão de estruturação retilínea.

A permeabilidade e relação escoamento superficial/infiltração são médias, o manto de alteração é médio e a espessura dos materiais inconsolidados é delgada a

inexistente. Foi possível observar em campo a ocorrência de afloramentos rochosos, cicatrizes de escorregamentos e “paredões” nas encostas com alto declive, demonstrando alto potencial a movimentos de massa (Figura 31). Ademais, possui média potencialidade a corridas de detritos, sendo que estas podem ocorrer caso o material mobilizado das encostas por escorregamentos atinja canais de drenagem.



Figura 31. “Paredão” de alto declive na unidade 4, com afloramento rochoso. Foto: Arquivo pessoal Fábio Augusto Gomes Vieira Reis.

Identificaram-se como uso da terra as classes de floresta, em grande maioria, pastagem e presença de área urbana. Cabe destacar que acima da cota de 100 metros a região de Caraguatatuba e São Sebastião insere-se no domínio do Parque Estadual da Serra do Mar, cuja intervenção antrópica é muito pequena, praticamente nula. As bacias hidrográficas que estão contidas na unidade IV são Bacuí, Guaxinduba, Santo Antônio, Canivetal, Ribeirão da Lagoa, Pau D’Alho, Camburu, Piracununga, Enseada e Maçaguaçu.

5.1.6. Unidade V – Escarpas com cristas orientadas gnáissicas

A unidade V é composta por rochas gnáissicas migmatíticas em relevo de escarpas com espigões digitados, assim como a Unidade IV, porém, com menor estruturação do relevo (GABELINI, 2017). Apresenta grande amplitude topográfica (cerca de 500 m) e declividade predominantemente alta. A unidade caracteriza-se pelos seus vales fechados em encostas de forma predominantemente côncava, com topos arredondados a angulosos.

A permeabilidade e a relação escoamento/infiltração são intermediárias, bem como a espessura do manto de alteração e topo rochoso. Em relação ao uso e ocupação, predominam áreas de mata nativa, pastagem, mineração e área urbana.

Quanto ao potencial a ocorrência de movimento de massas, esta unidade, é considerada de alto potencial, principalmente a escorregamentos. Foram observadas, em campo, escorregamentos recentes, cicatrizes, blocos no sopé da encosta, blocos isolados e gnaisses bem alterados. Possui média potencialidade a corridas de detritos, que podem ocorrer caso o material mobilizado das encostas por escorregamentos atinjam canais de drenagem, especialmente aqueles situados em vales fechados. Ademais, cabe salientar que nesta unidade há a travessia do duto OSVAT, inclusive de modo aéreo (Figura 32).



Figura 32. Duto OSVAT na unidade 5. (a) indicação da faixa dutoviária; (b) Passagem aérea. Foto: Arquivo pessoal Fábio Augusto Gomes Vieira Reis.

As bacias hidrográficas que estão contidas na unidade V são Piraçununga, Rio Claro, Ribeirão Grande, Perequê, Perequê-Mirim e São Tomé.

5.1.7. Unidade VI – Morros em gnaiss migmatítico

A respectiva unidade é caracterizada por relevo em morros paralelos, composta predominantemente por rochas gnáissicas migmatíticas. Possui amplitude local média, de aproximadamente 120 metros.

Como o relevo de morros é mais suave que o do relevo escarpado, a declividade desta unidade varia de média a baixa. As encostas são predominantemente côncavas, com topos aplainados a arredondados e drenagens em vales fechados.

Esta unidade possui média permeabilidade e média relação escoamento/infiltração, espessura média do manto de alteração, profundidade do topo rochoso intermediária, com médio potencial a movimentos de massa (escorregamentos e corridas de detritos). Dada à dificuldade de acesso ao local, não foram levantados pontos de campo.

As bacias hidrográficas que estão contidas na respectiva unidade são as do rio São Francisco e Rio Claro.

5.1.8. Unidade VII – Morros planálticos gnáissicos

Na unidade fisiográfica VII estão contidas as bacias hidrográficas Bacuí, Guaxinduba, Santo Antônio, Rio Claro, Perequê, Perequê-Mirim e São Tomé. É caracterizada por morros com topos arredondados, com amplitude topográfica média (aproximadamente 300 m) e uma declividade média, havendo predominância de encostas côncavas e drenagens em vales fechados.

A permeabilidade e relação escoamento/infiltração são intermediárias e a profundidade do topo rochoso e a espessura dos materiais inconsolidados foram identificadas como médias. Em relação ao potencial de ocorrência de movimentos de massa, esta unidade foi considerada média, sendo que nas atividades fotointerpretativas foram identificadas cicatrizes de escorregamento. Entretanto, o potencial à ocorrência de corridas de detritos é baixo, uma vez que esses processos ocorrem preferencialmente em locais com grande declive (GRAMANI, 2001). A unidade inteira abrange áreas de mata nativa por estar inserida no domínio do Parque Estadual da Serra do Mar.

5.1.9. Unidade VIII – Escarpas gnáissicas migmatíticas

Composta por rochas gnáissicas migmatíticas, esta unidade é caracterizada por relevo em escarpas com espigões digitados, com drenagens em vales fechados, encostas côncavas (predominantemente) a retilíneas, com topos angulosos (Figura 33). Possui média amplitude altimétrica e declives também medianos.

A permeabilidade e relação escoamento/infiltração são consideradas médias, porém a espessura do manto de alteração é pequena assim como a profundidade do topo rochoso. Considerou-se alto potencial a movimento de massa, principalmente a escorregamentos, corroborado pela identificação de cicatrizes de escorregamento nas atividades de fotointerpretação. Ademais, possui média potencialidade a corridas de detritos, sendo que estas podem ocorrer caso o material mobilizado das encostas por escorregamentos atinja canais de drenagem. Em relação ao uso e ocupação esta unidade contém áreas de floresta, pastagem, mineração, cultura temporária e área urbana.

As bacias hidrográficas que estão contidas na respectiva unidade fisiográfica são Barequeçaba, São Francisco, Vila Baby, Enseada e Ribeirão Grande.



Figura 33. Relevo de escarpas da Serra do Mar com topos angulosos na unidade fisiográfica VIII. Em destaque a construção do túnel do Contorno Sul da Rodovia dos Tamoios (SP- 99). Foto: Arquivo pessoal Fábio Augusto Gomes Vieira Reis.

5.1.10. Unidade IX – Escarpas retilíneas gnáissicas

A Unidade IX é caracterizada pelo relevo em escarpas com espigões digitados, com grande amplitude local e declividade, além da presença de cristas orientadas. Geologicamente, é composta por rochas gnáissicas migmatíticas, em encostas predominantemente retilíneas, vales fechados e topos angulosos.

A permeabilidade foi considerada baixa, com média relação de escoamento/infiltração, pequena espessura de manto de alteração, topo rochoso raso a sub aflorante em área considerada de alto potencial a escorregamentos e médio potencial a corridas de detritos. Esta unidade contém áreas de floresta e pastagem.

As bacias hidrográficas que estão contidas na respectiva unidade são Bacuí, Maçaguaçu, Guaxinduba, São Francisco, Rio Claro, Ribeirão Grande, Vila Baby e Barequeçaba.

5.1.11. Unidade X – Relevo montanhoso em gnaiss

Esta unidade é representada por relevo montanhoso com rochas gnáissicas migmatíticas. Tem média densidade de elementos de drenagem e de relevo. O modelado é montanhoso, cuja declividade pode variar de média a baixa. Suas encostas são côncavo-retilíneas, que formam vales profundos e fechados, com topos arredondados a angulosos. A permeabilidade é considerada média, a relação escoamento/infiltração média, a espessura do manto de alteração e a profundidade do topo rochoso foram consideradas intermediárias.

Esta área foi enquadrada com médio potencial a ocorrência de movimentos de massa (escorregamentos e corridas de detritos), e quanto ao uso e ocupação a área é composta essencialmente por floresta.

As bacias hidrográficas que estão contidas na respectiva unidade são Maçaguaçu e Guaxinduba.

5.1.12. Unidade XI – Relevo montanhoso com afloramentos rochosos

A unidade fisiográfica XI, que tem como bacia hidrográfica limítrofe apenas a Camburu, possui modelado montanhoso de rochas graníticas e gnáissicas. É caracterizada por uma média amplitude topográfica com declividade predominantemente média (15 – 30°), com drenagens em vales fechados.

Esta unidade possui permeabilidade baixa à média, relação escoamento/infiltração média a alta, pequena espessura do manto de alteração e topo rochoso raso. Apesar da sua média potencialidade a movimentos de massa, tanto para corridas de detritos como para escorregamento, foram identificadas nas atividades fotointerpretativas feições que indicam sua possível ocorrência. O uso predominante da terra é por floresta.

5.1.13. Unidade XII – Relevo montanhoso granítico-gnáissico

A unidade fisiográfica XII, que contém a apenas as bacias hidrográficas Pau D'Alho e a Camburu, caracteriza-se pelo relevo de montanhoso, com média densidade de elementos de drenagem e relevo e litologia composta de rochas graníticas e gnáissicas.

Está localizada em áreas de encostas convexas a retilíneas, formando vales fechados e topos angulosos. Sua amplitude é média, com declividade média. Não obstante, a permeabilidade, relação escoamento/infiltração, espessura do manto de alteração, profundidade do topo rochoso e espessura dos materiais inconsolidados foram consideradas médias, com médio potencial a corridas de detritos e escorregamentos. Em relação ao uso e ocupação da terra, nesta unidade há o predomínio de áreas de floresta.

5.1.14. Unidade XIII – Morros planálticos graníticos-gnáissicos

A unidade XIII se caracteriza pelo relevo de morros arredondados, com média densidade de elementos de drenagem e relevo, sua litologia é composta por rochas graníticas e gnáissicas, com rochas metabásicas. A respectiva unidade contém apenas a bacia hidrográfica do Rio Camburu em seu interior.

O modelado é dominado por encostas convexas a retilíneas, formando vales fechados e topos arredondados a anguloso. Sua amplitude é alta, variando de 700 a 1200 m, com declividade média.

A permeabilidade, relação escoamento/infiltração, espessura do manto de alteração, profundidade do topo rochoso e espessura dos materiais inconsolidados foram consideradas médias, com médio potencial a movimentos de massa (escorregamentos e corridas de detritos). Cabe salientar que durante as atividades de fotointerpretação não foram observadas cicatrizes de escorregamento nessas unidades. Sobre o uso e ocupação da terra, esta unidade é dominada pela fisionomia florestal.

5.1.15. Unidade XIV – Morros graníticos-gnáissicos

Contendo as bacias hidrográficas do rio Camburu e Piraçununga e possuindo o predomínio de floresta no seu uso, a unidade fisiográfica XIV se caracteriza pelo relevo de morros paralelos, sustentados por rochas graníticas e gnáissicas associadas a rochas metabásicas. A densidade dos elementos de drenagem e relevo é média, com encostas convexas a côncavas, formando vales fechados a abertos, com topos arredondados.

A amplitude local é média, bem como a declividade. A permeabilidade, relação escoamento/infiltração, espessura do manto de alteração, profundidade do topo rochoso e espessura dos materiais inconsolidados foram consideradas médias, com baixo potencial à ocorrência de corridas de detritos e escorregamentos.

5.1.16. Unidade XV – Monolitos graníticos-gnáissicos

A Unidade XV caracteriza-se por um relevo montanhoso sustentado por rochas graníticas e gnáissicas, com afloramentos rochosos. Possui grande amplitude local e altas declividades, acompanhadas por encostas retilíneas, topos angulosos a arredondados e drenagens em vales fechados. As altas declividades estão associadas a afloramentos rochosos tipo “Pão de Açúcar”.

A permeabilidade varia de baixa a média, bem como a relação escoamento/infiltração. A espessura do manto de alteração e a profundidade do topo rochoso foram classificadas como intermediárias. Ademais, devido às altas

declividades e o relevo montanhoso com vales fechados, considerou-se a unidade com potencial médio à ocorrência de escorregamentos e corridas de detritos. O uso da terra na unidade é predominantemente floresta, e a bacia hidrográfica que está contida em seu interior é apenas a do rio Camburu.

5.1.17. Unidade XVI – Mar de morros granítico-gnáissico

A unidade fisiográfica XVI representa a Borda do Planalto Atlântico, caracterizada pelo relevo com modelado de Mar de Morros, com rochas graníticas e gnaisses com micaxistos e quartzitos. Segundo Ab'Saber (1970), o modelado “Mar de Morros” tem como principal característica o relevo forte ondulado e montanhoso, com morros em meia-laranja, resultantes da dissecação fluvial. A respectiva unidade possui baixa densidade de elementos de drenagem e de relevo, pequena amplitude local e declividades que variam de média a baixa. O relevo de mar de morros é reconhecido pelas encostas côncavas, nesse caso formando vales fechados a abertos, com topos arredondados (Figura 34).



Figura 34. Aspecto geral da morfologia na unidade XVI. Destaque para os vales abertos, vertentes convexas e topos arredondados. As ondulações no vale possivelmente indicam depósitos de antigos escorregamentos (em vermelho). Foto: Arquivo pessoal Fábio Augusto Gomes Vieira Reis.

A permeabilidade, relação escoamento/infiltração, espessura do manto de alteração, profundidade do topo rochoso e espessura dos materiais inconsolidados foram consideradas médias, com médio potencial a corridas de detritos e escorregamentos. Em relação ao uso e ocupação da terra, a unidade está inserida predominantemente em florestas do domínio do Parque Estadual da Serra do Mar.

As bacias hidrográficas no interior da unidade são dos rios Pau D'Alho e Camburu, na região do planalto.

5.1.18. Unidade XVII – Relevo montanhoso em micaxistos e quartzitos

A respectiva unidade é caracterizada por seu relevo montanhoso em rochas graníticas e gnáissicas, com micaxistos e quartzitos. Foram observadas nas atividades fotointerpretativas grandes amplitudes altimétricas e declividade alta. Suas encostas são convexas a retilíneas, formando vales fechados e topos arredondados. Nesta unidade há ausência de morros com afloramentos rochosos.

Quanto às características geológico-geotécnicas, a unidade possui média permeabilidade, média relação de escoamento superficial/infiltração, grande espessura do manto de alteração, profundidade do topo rochoso intermediária, material inconsolidado intermediário, e médio potencial a movimentos de massa (corridas de detritos e escorregamentos). Em relação ao uso e ocupação da terra, há o predomínio do uso florestal na Unidade XVII, principalmente por situar-se no domínio do Parque Estadual da Serra do Mar. A unidade possui apenas a bacia hidrográfica do Pau D'Alho em seu interior.

5.2. Retro-análise dos escorregamentos e corridas de detritos generalizados na região de Caraguatatuba (SP) em 18/03/1967

A etapa de retro-análise se consistiu no resgate bibliográfico e cartográfico sobre a ocorrência dos escorregamentos e corridas de detritos generalizados na região de Caraguatatuba, em 1967, complementada pelas análises estatísticas normalizadas a partir das cicatrizes de escorregamento e isoietas através do emprego do Fator de Desproporcionalidade (*FD*). Nesse sentido, ao fim desse capítulo, será apresentada a área-alvo que foi submetida à modelagem no *software* de simulação de corridas de detritos *RAMMS*, cuja seleção deu-se a partir dos resultados aqui obtidos.

Os referenciais bibliográficos utilizados para a compreensão do fenômeno ocorrido em 18/03/1967 na área de estudo foram Cruz (1974), Fúlfaro et al. (1976), Guidicini e Nieble (1984), Cruz (1990), Massad et al. (1997), Gramani (2001), Sakai

et al. (2013), Sakai (2014) e Reis e Zaine (2018). Os respectivos autores descreveram em suas obras as corridas de detritos e os escorregamentos deflagrados na região de Caraguatatuba (SP), utilizando diferentes metodologias, técnicas e abordagens. As principais informações obtidas por esses trabalhos foram em relação à duração do evento (GRAMANI, 2001; CRUZ, 1974), às características do fluxo (CRUZ, 1974; FÚLFARO et al., 1976; GRAMANI, 2001) e do material (FÚLFARO et al., 1976; MASSAD et al., 1997; LISTO; VIEIRA, 2015).

As análises estatísticas normalizadas foram viabilizadas através do georreferenciamento e vetorização do mapa de escorregamentos elaborado por Fúlfaro et al. (1976), pelas cicatrizes de escorregamento ocorridas entre 1967 a 2011 identificadas em ortofotos da Emplasa (2011) e pelas condições pluviométricas durante o evento, subsidiando-se nas isoietas elaboradas por Guidicini e Nieble (1984). As cicatrizes foram utilizadas nas análises estatísticas porque, segundo Gramani (2001), as corridas de detritos que ocorreram no dia 18/03/1967 na região de Caraguatatuba (SP) foram deflagradas pelos escorregamentos generalizados que atingiram as drenagens principais da região serrana, enquadradas, portanto, como primárias na classificação de Augusto Filho (1993). Desta maneira, a análise com as cicatrizes de escorregamento possibilita a identificação dos locais mais afetados por estes eventos, e, conseqüentemente, a seleção da área-alvo para aplicação da modelagem morfométrica.

Assim, a figura a seguir lista as análises estatísticas normalizadas realizadas e em seguida os resultados obtidos são apresentados, apoiando-se nos resultados e discussões de Reis e Zaine (2018).

- | |
|---|
| <p>A) Todas as sub-bacias</p> <p>A.1 Área das bacias vs. Áreas das cicatrizes (1967, Fúlfaro 1976)</p> <p>A.2 Área das bacias vs. Áreas das cicatrizes (1967 a 2011)</p> <p>B) Toda área atingida em 1967: declividade</p> <p>B.1 área sob precipitação acumulada de 300 mm</p> <p>B.2 área sob precipitação acumulada de 400 mm</p> <p>B.3 área sob precipitação acumulada de 500 mm</p> <p>B.4 Todas as subáreas integradas</p> <p>C) Toda área atingida em 1967: geologia</p> <p>C.1 área sob precipitação acumulada de 300 mm</p> <p>C.2 área sob precipitação acumulada de 400 mm</p> <p>C.3 área sob precipitação acumulada de 500 mm</p> <p>C.4 Todas as subáreas integradas</p> |
|---|

Figura 35. Listagem das análises estatísticas normalizadas. Elaborado por Fernando D’Affonseca.

A distribuição das cicatrizes de escorregamento relacionadas ao evento de março de 1967 identificadas por Fúlfaro et al. (1976) está exibida na figura 36. Na figura 37, são apresentadas as cicatrizes mapeadas nas ortofotos da Emplasa (2011), referentes aos processos que ocorreram entre 1967 a 2011.

É possível identificar a existência de áreas afetadas pelo evento de 1967 e não recuperadas totalmente até 2011, assim como de áreas afetadas por escorregamentos mais recentes, que incidiram entre 1967 e 2011 (pela ortofotos não é possível realizar uma datação mais precisa desses eventos). Além disso, existe a possibilidade de que superfícies de escorregamento avaliadas como pós 1967 podem ser apenas uma expansão da cicatriz de 1967, ocasionadas por processos erosivos, por exemplo.

Conforme supracitado, especificamente no capítulo 3.4.5, este trabalho optou por distinguir as cicatrizes mapeadas em 2011 daquelas identificadas em 1967 por Fúlfaro et al. (1976). Para tal, foi aplicado uma álgebra simples entre vetores utilizando a ferramenta *Erase*, no *software ArcGIS 10.2.2*. Assim, seria possível identificar os processos que ocorreram de fato após 1967, auxiliando na normalização das análises estatísticas.

As feições indicadas na figura 37 como não recuperadas até o ano de 2011 indicam cicatrizes remanescentes do processo de 1967, ou seja, ainda são passíveis de identificação e não foram recobertas pela vegetação. Sobre as fisionomias florestais, Gabelini (2017) destacou que no processo ocorrido em 1967 grande parte dos indivíduos arbóreos presentes até então nas encostas da Serra do Mar, na região de Caraguatatuba, foram remobilizados e as cicatrizes foram recobertas por vegetação rasteira e arbustiva do gênero *Gleichenia*, tempos depois, pelo processo natural de sucessão ecológica. *Gleichenia* trata-se de uma samambaia, muito comum na região, que se adapta a solos pouco espessos, característicos das cicatrizes, e que dificulta a recomposição do solo (PORTELA, 2014). Segundo Prado e Hirai (2011), as plantas do gênero *Gleichenia* são samambaias que pertencem à divisão das Pteridófitas, e no Brasil estão localizadas nas regiões de florestas, como a Mata Atlântica e matas de regiões serranas. Esta espécie necessita de luz intensa, e por esse motivo é encontrada em barrancos de estradas, vertentes de morros litorâneos e capoeiras. Sua identificação é facilitada pela cor verde claro, destaque em suas folhas (GABELINI, 2017) (Figura 38).

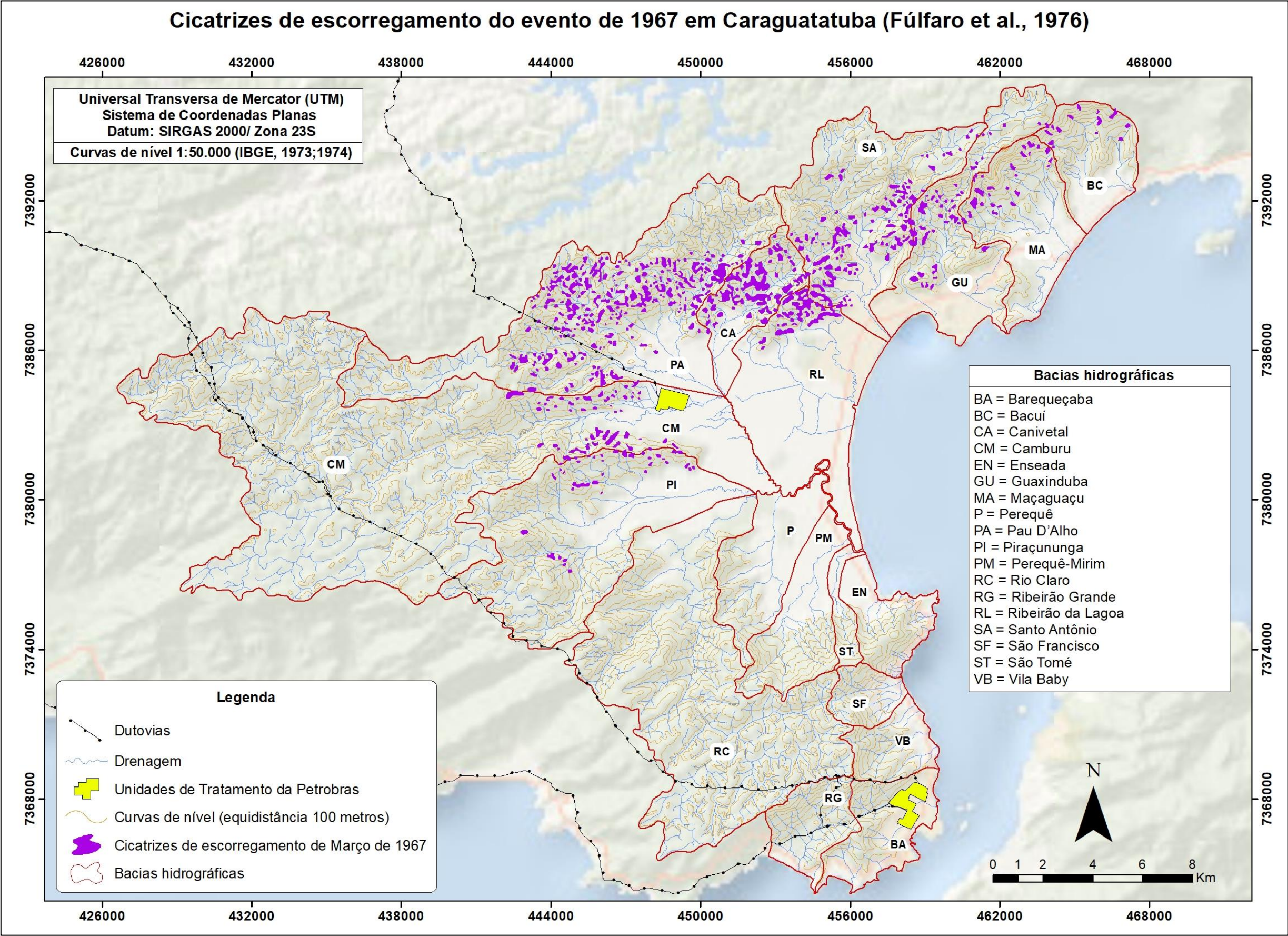


Figura 36. Cicatrizes de escorregamento de 1967, identificadas por Fúlfaro et al. (1976).

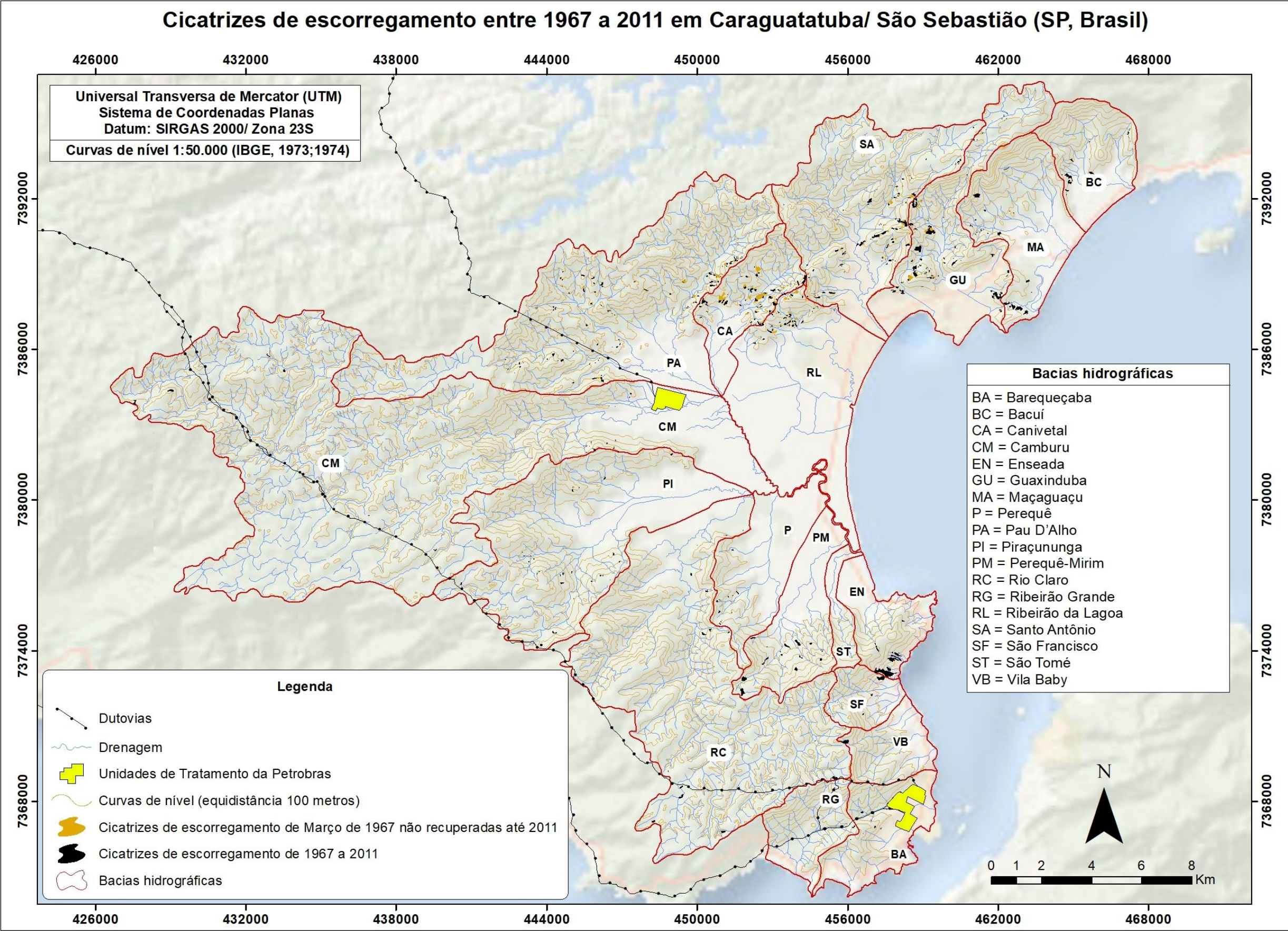


Figura 37. Cicatrizes de escorregamento idenitificadas nas ortofotos da Emplasa (2011).

Nesse sentido, foi identificada nos trabalhos de campo, especialmente na região da Serra do Mar no qual se insere a Rodovia dos Tamoios a presença desta vegetação, evidenciando a afirmativa de que algumas cicatrizes não foram recuperadas e se configuram como evidências do processo ocorrido em 1967 (VIEIRA; RAMOS, 2015) (Figura 38).



Figura 38. Samambaia do gênero *Gleichenia*. (a) Detalhe e aspectos gerais da planta; (b) Cicatriz de escorregamento em Caraguatatuba com a presença da respectiva Pteridófita (em vermelho). Fonte: Portela (2014).

Ademais, as cicatrizes associadas ao período entre 1967 a 2011 ocorrem de forma mais esparsa, o que pode indicar que eventos com potencial de deflagrar escorregamentos necessariamente não seguem o padrão de 1967. Assim, a região sul da área de estudo – que compreende a bacias hidrográficas limítrofes ao município de São Sebastião – também está exposta a precipitações deflagradoras de escorregamentos, embora o município de Ilhabela se constitua como uma barreira orográfica. Possivelmente os índices pluviométricos que incidem nestes locais não são tão intensos quanto os da porção norte da área de estudo, que foram capazes de mobilizar grande parte das encostas da Serra do Mar em Caraguatatuba em 1967.

As análises estatísticas normalizadas revelaram que no cenário de 1967 as bacias hidrográficas mais afetadas pelos escorregamentos foram a Pau D'Alho, Santo Antônio e Canivetal (Figura 39). Essas bacias, juntas, perfazem o total de 68% de área afetada pelos escorregamentos, embora em área compreendam somente 20% da região de Caraguatatuba considerada nesse estudo. Em contrapartida, a bacia do rio Camburu, onde está instalada a UTGCA (Unidade de Tratamento de Gás Monteiro Lobato) e o GASTAU (Gasoduto Taubaté),

corresponde a 25% da região considerada e somente 8% da área afetada pelos escorregamentos de 1967 incidem nela. Tais desproporcionalidades podem ser melhores compreendidas quando fatores de desproporcionalidades (*FDs*) são empregados (Figura 40).

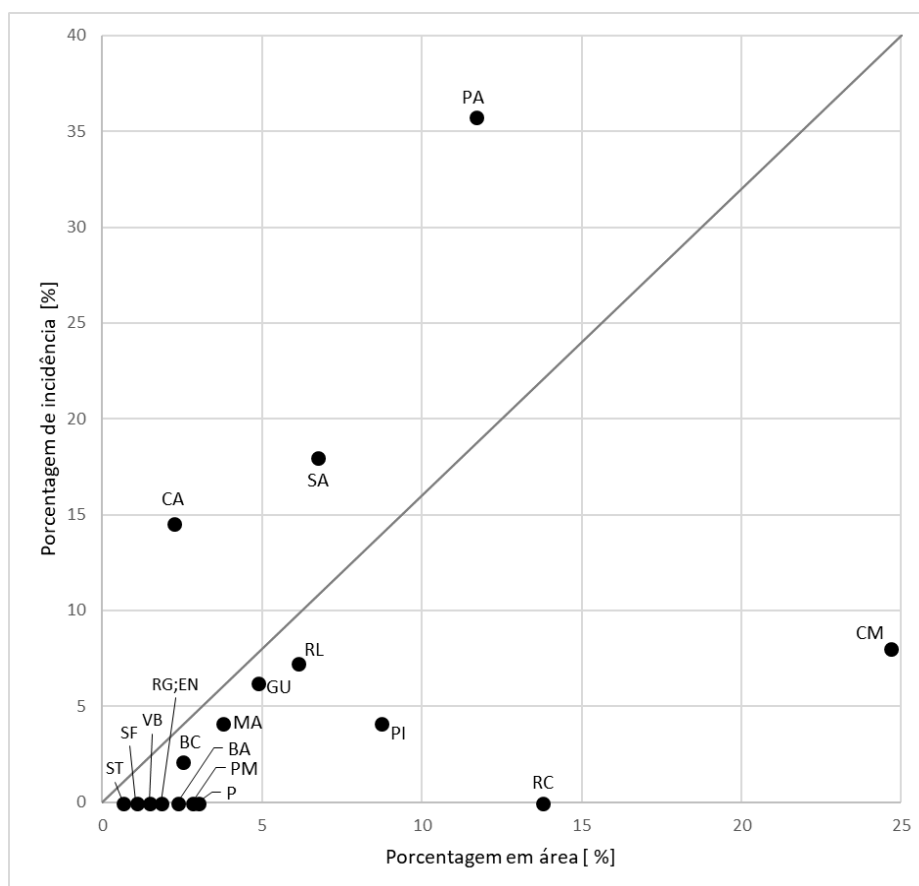


Figura 39. Porcentagem de incidência dos escorregamentos de 1967 em relação à porcentagem em área das bacias hidrográficas compreendidas nesta pesquisa. Bacias hidrográficas: BA = Barequeçaba; BC = Bacuí; CA = Canivet; CM = Camburu; EN = Enseada; GU = Guaxinduba; MA = Maçaguaçu; P = Perequê; PA = Pau D'Alho; PI = Piraçununga; PM = Perequê-Mirim; RC = Rio Claro; RG = Ribeirão Grande; RL = Ribeirão da Lagoa; SA = Santo Antônio; SF = São Francisco; ST = São Tomé; VB = Vila Baby.

Conforme explicitado no capítulo 3.4.5, nas análises estatísticas envolvendo o Fator de Desproporcionalidade, em um cenário em que não há nenhum condicionante específico (os escorregamentos ocorrem indistintamente em toda região considerada), o *FD* é igual a 1 para todas as unidades avaliadas, pois neste caso a porcentagem de incidência de escorregamentos numa determinada área é proporcional a sua porcentagem de ocorrência em área. Por outro lado, cenários com *FDs* calculados diferentes de 1 podem sugerir a existência de condicionantes (geológicos, topográficos, pedológicos, antrópicos, cobertura vegetal), pois nestes

casos existem desproporções entre a porcentagem de incidência de escorregamentos e a porcentagem de ocorrência em área das unidades. Assim, unidades com *FD* maiores ou menores que 1 indicam unidades com maiores ou menores tendência à incidência de escorregamentos, respectivamente.

Não obstante, no caso dos escorregamentos ocorridos em 1967, considerando apenas as áreas das bacias afetadas, é possível observar, através do emprego da metodologia *FD*, que existe uma grande desproporcionalidade na ocorrência de escorregamentos na bacia Canivetal. Tal desproporcionalidade foi influenciada pelas suas pequenas dimensões em área e pela elevada incidência de cicatrizes.

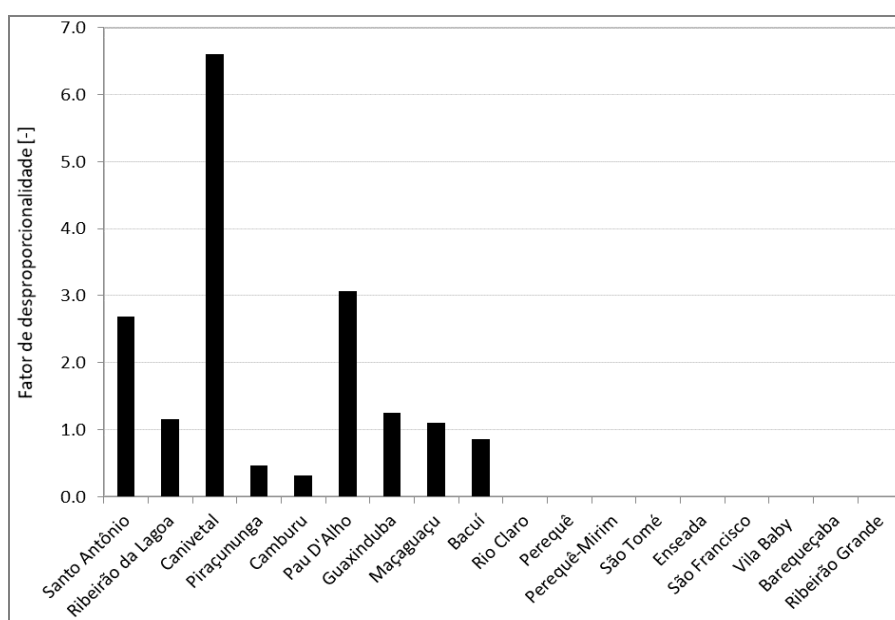


Figura 40. Fatores de desproporcionalidades calculados para as bacias hidrográficas de Caraguatatuba, considerando as cicatrizes de escorregamento do evento de 1967.

Para efeitos comparativos, foram também calculados os *FDs* para as cicatrizes que ocorreram entre 1967 a 2011, identificadas nas ortofotos da Emplasa. Desta maneira, identificou-se que para este cenário todas as bacias hidrográficas inseridas na área de estudo foram afetadas (Figura 41). As bacias hidrográficas mais afetadas foram a Guaxinduba, Santo Antônio e Canivetal. A bacia Pau D'Alho, que foi a mais afetada em 1967, é a quarta mais afetada considerando as cicatrizes pós 1967 e em seu domínio encontra-se em operação o duto GASTAU (Figura 41).

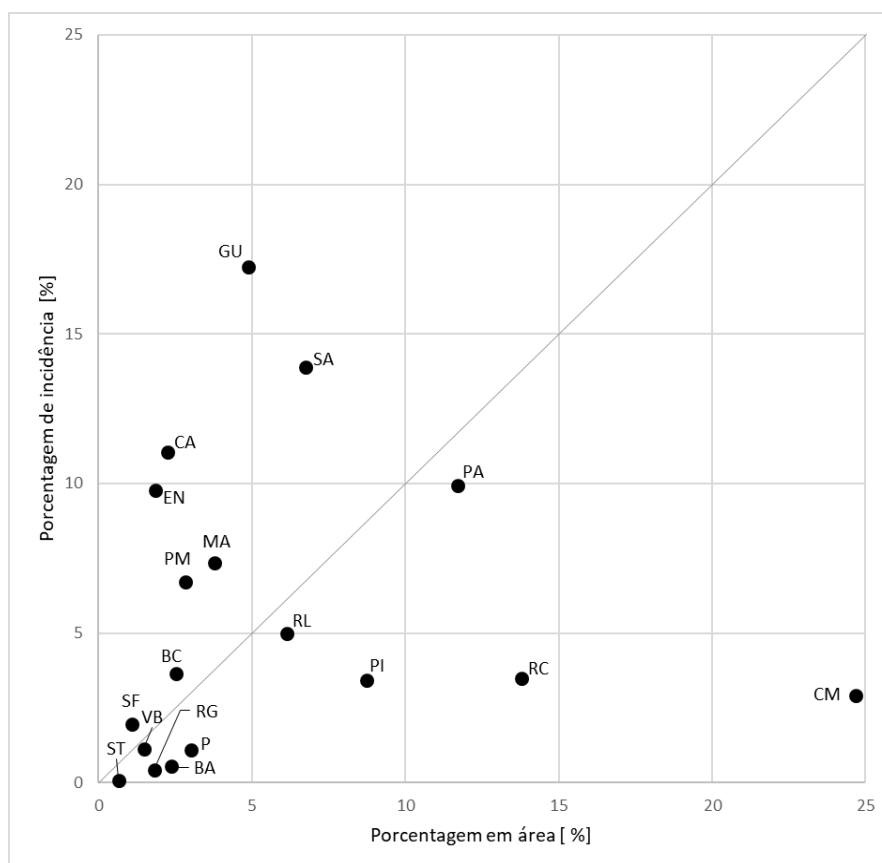


Figura 41. Porcentagem de incidência dos escorregamentos entre 1967 e 2011 em relação à porcentagem em área das bacias hidrográficas compreendidas nesta pesquisa. Bacias hidrográficas: BA = Barequeçaba; BC = Bacuí; CA = Canivetal; CM = Camburu; EN = Enseada; GU = Guaxinduba; MA = Maçaguaçu; P = Perequê; PA = Pau D'Alho; PI = Piraçununga; PM = Perequê-Mirim; RC = Rio Claro; RG = Ribeirão Grande; RL = Ribeirão da Lagoa; SA = Santo Antônio; SF = São Francisco; ST = São Tomé; VB = Vila Baby.

Em relação ao *FD*, o maior valor registrado foi na bacia Enseada, que não havia sido afetada pelo evento de 1967 (Figura 42). A respectiva bacia localiza-se na porção sul da área de estudo, no município de São Sebastião. A bacia do Canivetal apresentou um alto *FD* novamente, e, na concepção de Reis e Zaine (2018) este fato pode indicar que nela possa haver algum condicionante favorável à ocorrência de escorregamentos, como, por exemplo, estrutural, pois a mesma se alinha nas foliações SW-NE e pela falha Bertioga-Caraguatatuba (CERRI et al., 2018) (Figura 19). Porém, outra suposição é a de que o principal condicionante possa ser meramente meteorológico, e as bacias Canivetal e Santo Antonio podem estar localizadas numa região de incidência relativamente maior de precipitação.

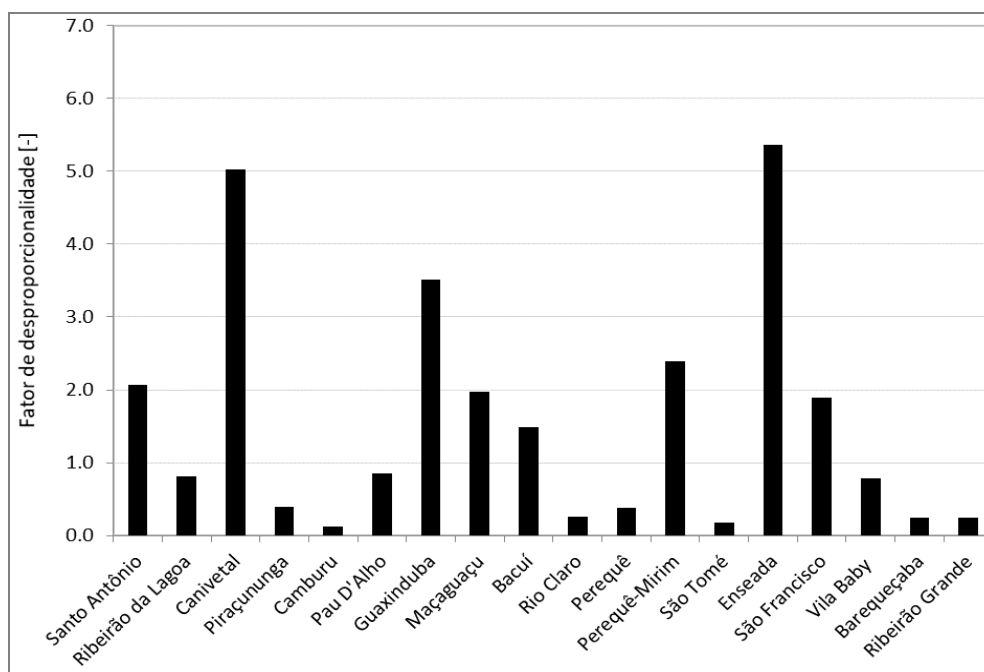


Figura 42. Fatores de desproporcionalidades calculados para as bacias hidrográficas de Caraguatatuba, considerando as cicatrizes de escorregamento entre 1967 e 2011.

A bacia do rio Camburu novamente apresenta um baixo *FD* para as cicatrizes de escorregamento entre 1967 e 2011, provavelmente porque ela possui uma ampla distribuição na área do planalto, onde as declividades e amplitudes topográficas são mais amenas em relação às regiões onde estão inseridas as escarpas. As escarpas, pelo seu aspecto orográfico, preferencialmente concentram as precipitações (REIS; ZAINÉ, 2018).

Objetivando uma melhor compreensão dos condicionantes que deflagraram os escorregamentos em 18/03/1967, foram realizadas análises para as bacias afetadas, considerando as isoietas elaboradas por Guidicini e Nieble (1984), a declividade do relevo em escala 1:50.000 (Figura 43) e a geologia, em escala 1:50.000 (Figura 44). A primeira análise passível a ser realizada é que as cicatrizes de 1967 ocorrem preferencialmente nas porções mais baixas e íngremes das escarpas, sob isoietas maiores ou iguais a 400 mm, com exceção da bacia Pau D'Álho, onde cicatrizes sob isoietas menores que 400 mm e próximos à divisa geomorfológica escharpa/planalto ocorrem. Aparentemente, não existe um controle geológico, ou ele é de menor relevância, pois as cicatrizes ocorrem em diversas unidades geológicas indiscriminadamente, seguindo as zonas de maior precipitação acumulada, com exceção das unidades quaternárias, que ocorrem em locais de baixa declividade e praticamente não apresentam cicatrizes.

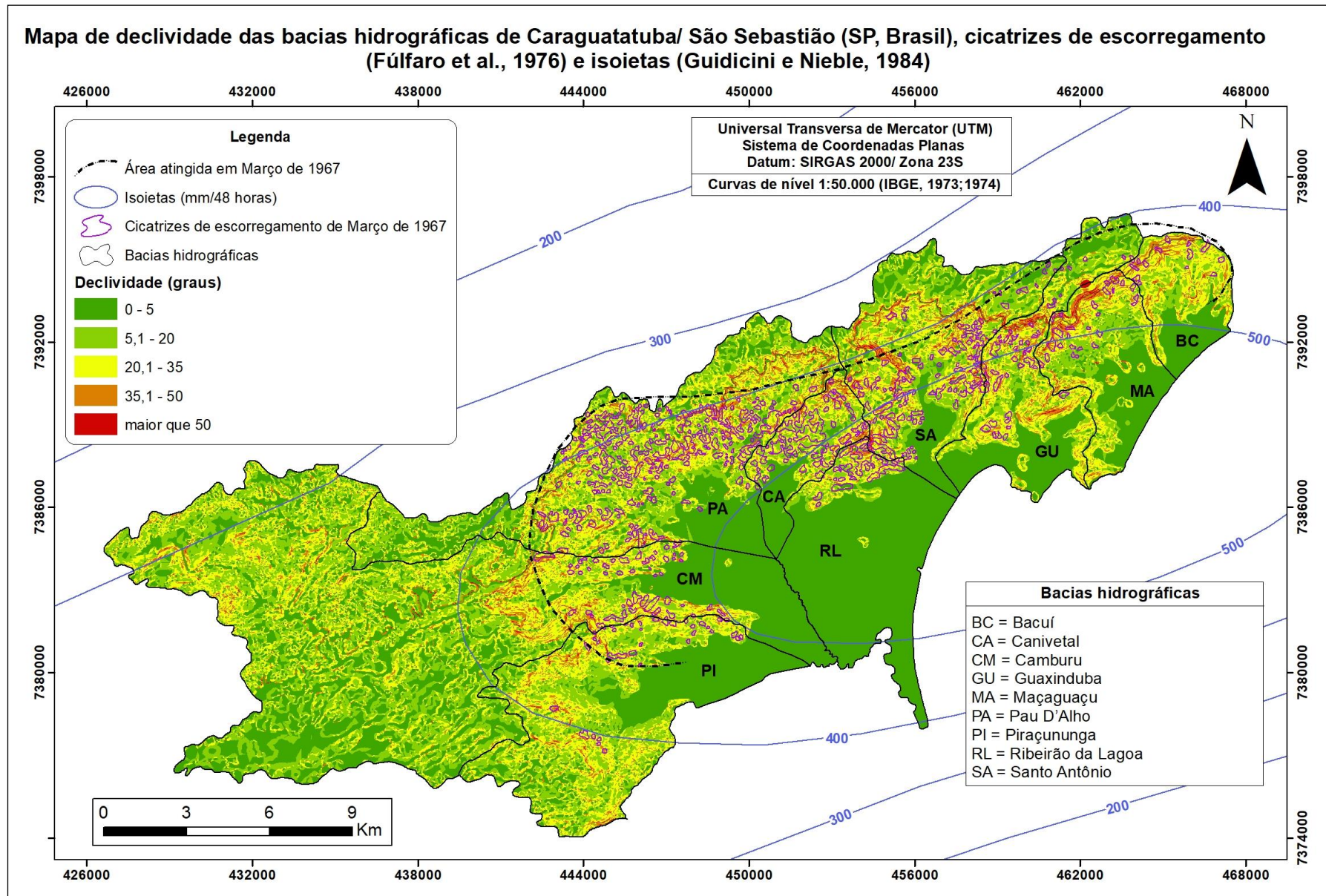


Figura 43. Mapa de declividade das bacias hidrográficas afetadas pelo evento de 1967.

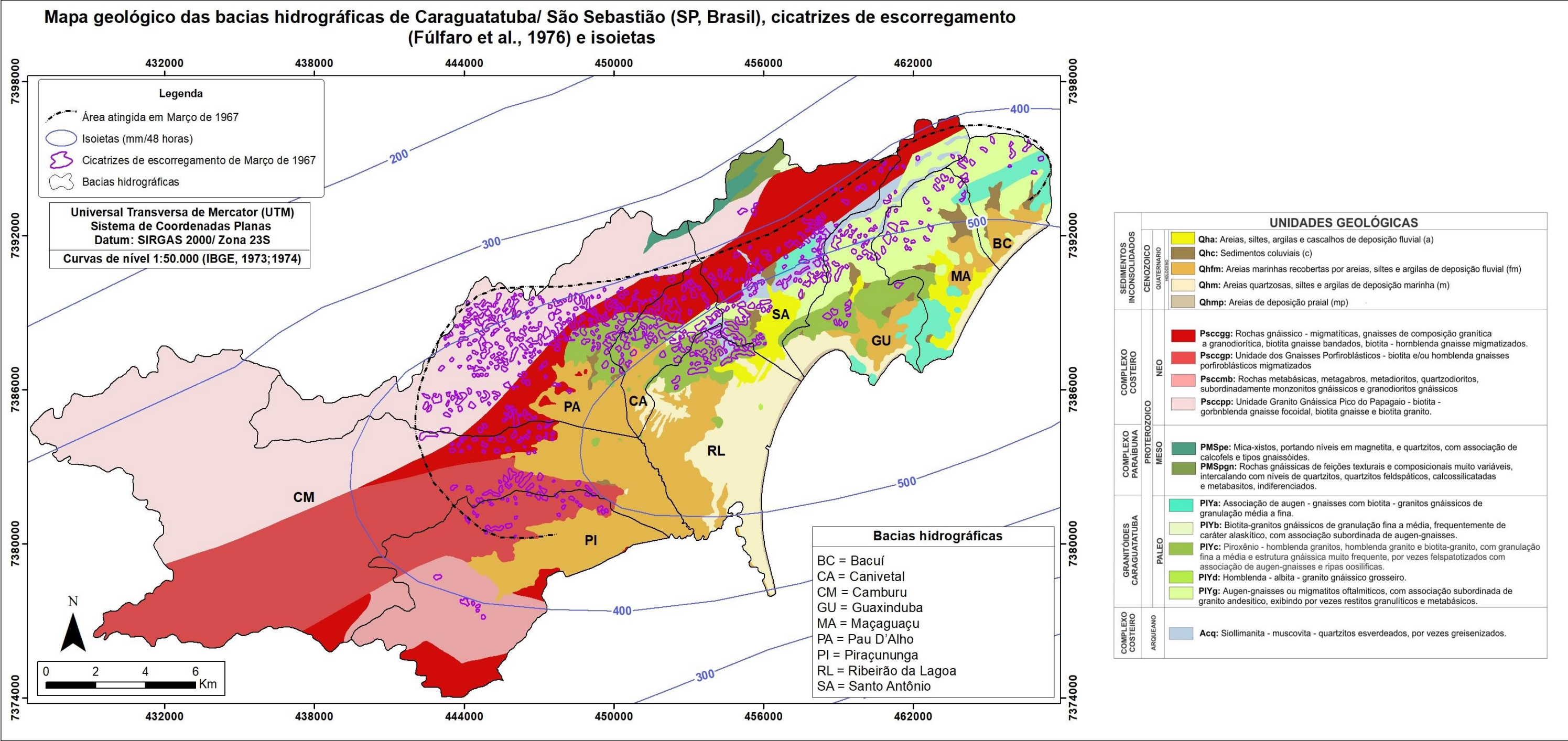


Figura 44. Mapa da geologia das bacias hidrográficas afetadas pelo evento de 1967.

Para uma melhor avaliação das classes de declividade e das unidades geológicas, foram também realizadas análises de desproporcionalidades, distinguindo-se 3 regiões distintas: (I) região sob isoietas menores que 400 mm, (II) região sob isoietas de 400 a 500 mm, (III) região sob isoietas maiores que 500 mm. A realização de análises considerando regiões sob as mesmas isoietas visou eliminar a influência dos condicionantes meteorológicos, uma vez que são assumidas condições meteorológicas homogêneas em cada sub-região (REIS; ZAINÉ, 2018). Entretanto, posteriormente, uma análise adicional foi efetuada integrando toda a extensão das bacias, desconsiderando-se as isoietas.

Em todas as 4 análises realizadas, é possível observar que a classe de declividade mais atingida é a de 20 – 35° (Figuras 45, 47, 49 e 51), embora seja uma das mais predominantes na área afetada pelo evento de 1967. Desta maneira, não é sensato afirmar que a classe de declividade 20 – 35° seja a classe mais suscetível à ocorrência de escorregamentos nas bacias afetadas, embora tenha sido nela que a maior parte dos escorregamentos de 1967 ocorreu. Portanto, é admissível que advenha dela a maior parte do material movimentado e depositado pelo evento (REIS; ZAINÉ, 2018).

Nas análises de desproporcionalidades (Figuras 46, 48, 50 e 52), é possível observar que os escorregamentos de 1967 incidem de forma mais desproporcional na classe de declividades 35 – 50°. Somente na região com precipitação acumulada superior a 500 mm a classe de declividade maior que 50° apresentou uma maior desproporcionalidade entre a porcentagem da área atingida incidente na unidade e a porcentagem de ocorrência da unidade (Figura 50). Tal fato pode estar associado com as propriedades e espessuras dos mantos de alteração e dos depósitos coluvionares nas vertentes das escarpas, conforme resultados obtidos na etapa de compartimentação fisiográfica. Estes fatores controlam, dentre outros aspectos, a capacidade de infiltração, a espessura do material saturado por água subterrânea e, por consequência, a pressão dos poros, que reduz a tensão normal efetiva do solo e resistência ao cisalhamento (REIS; ZAINÉ, 2018).

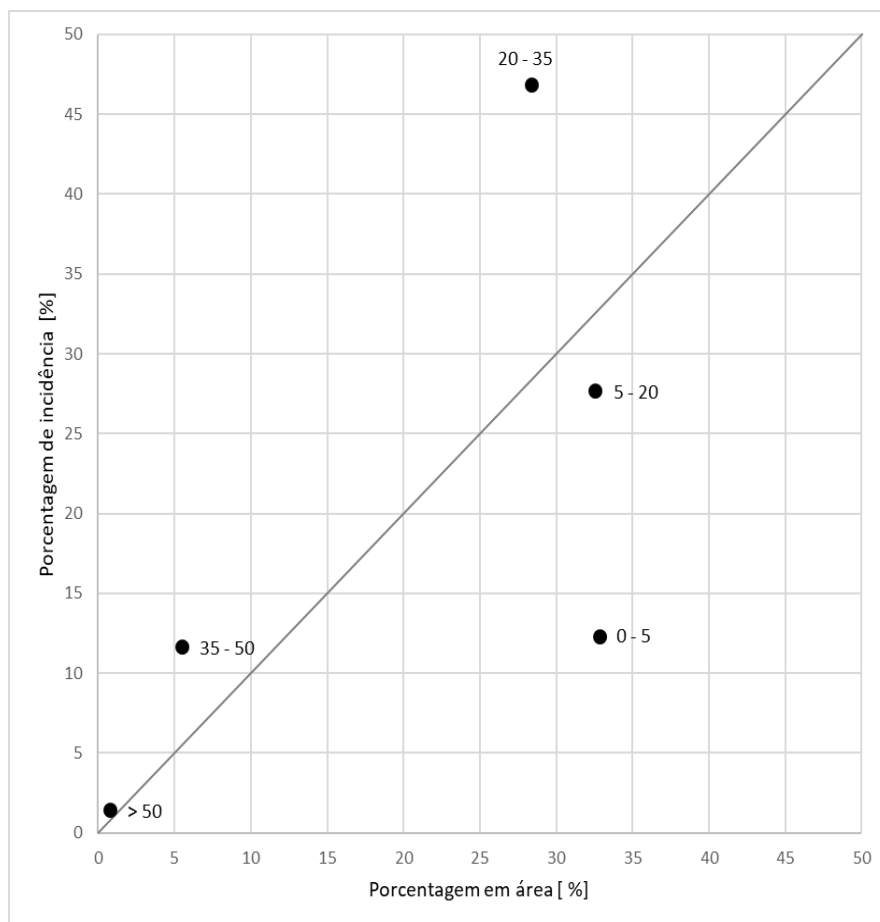


Figura 45. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes de declividades, sob isoietas menores que 400 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

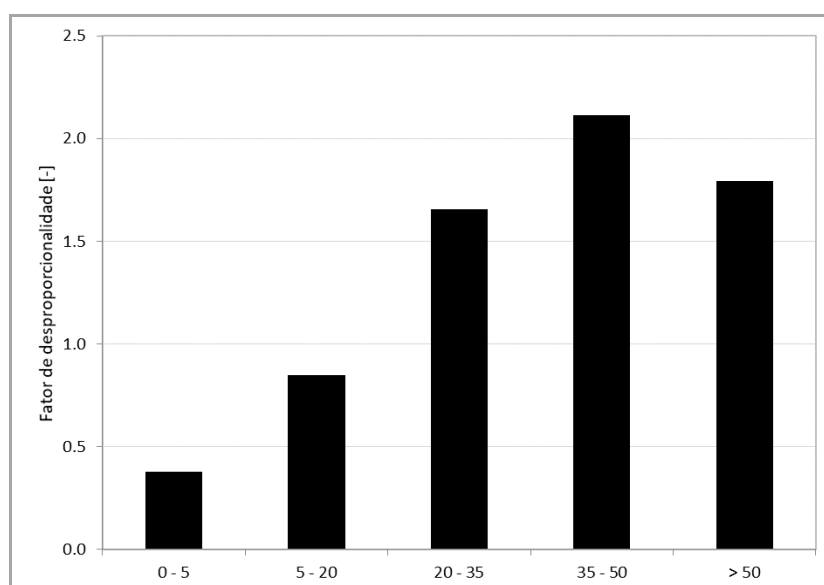


Figura 46. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes de declividade, sob isoietas menores que 400 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

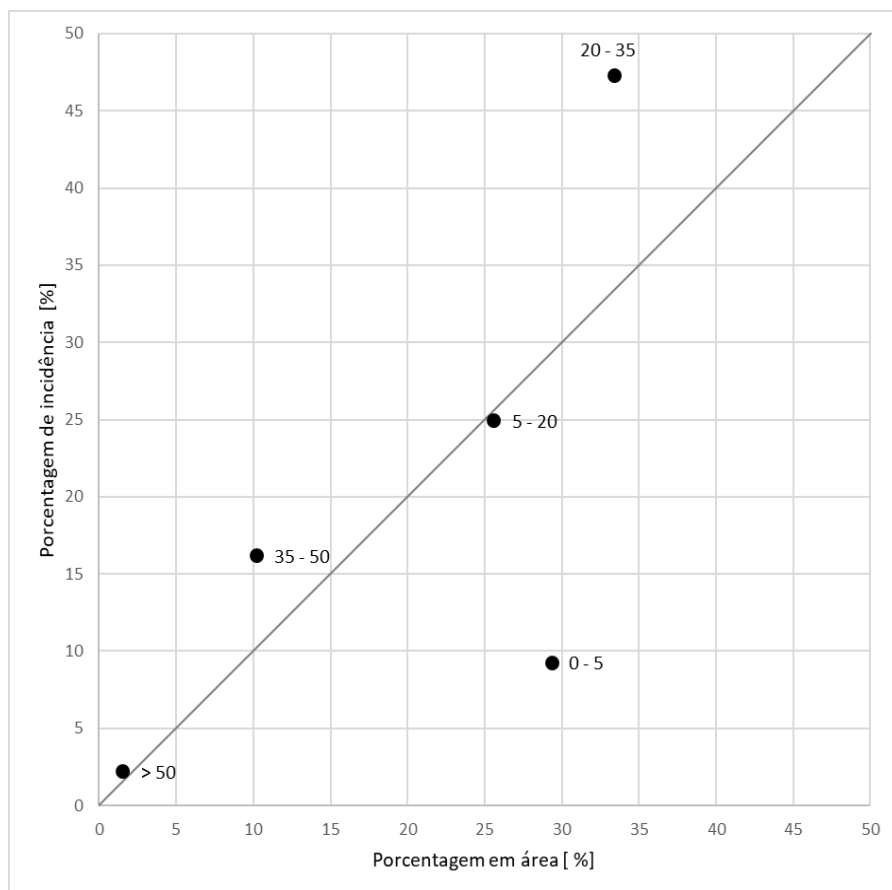


Figura 47. Correlação da porcentagem em área da incidência escorregamentos e porcentagem em área das classes de declividades, sob isoietas entre 400 e 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

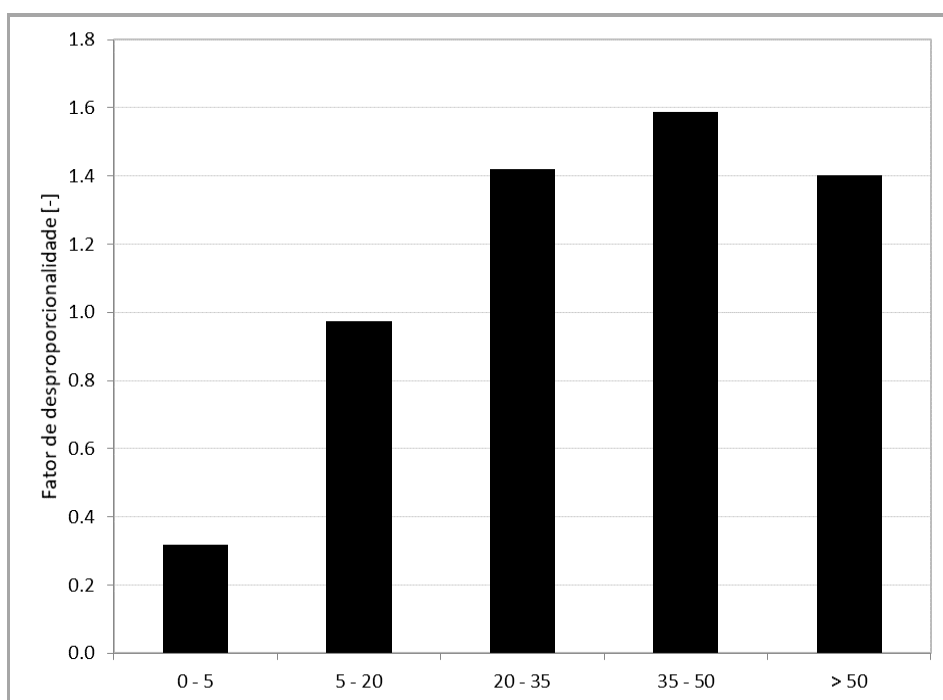


Figura 48. Fatores de desproporcionalidades das classes de declividade, sob isoietas entre 400 e 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

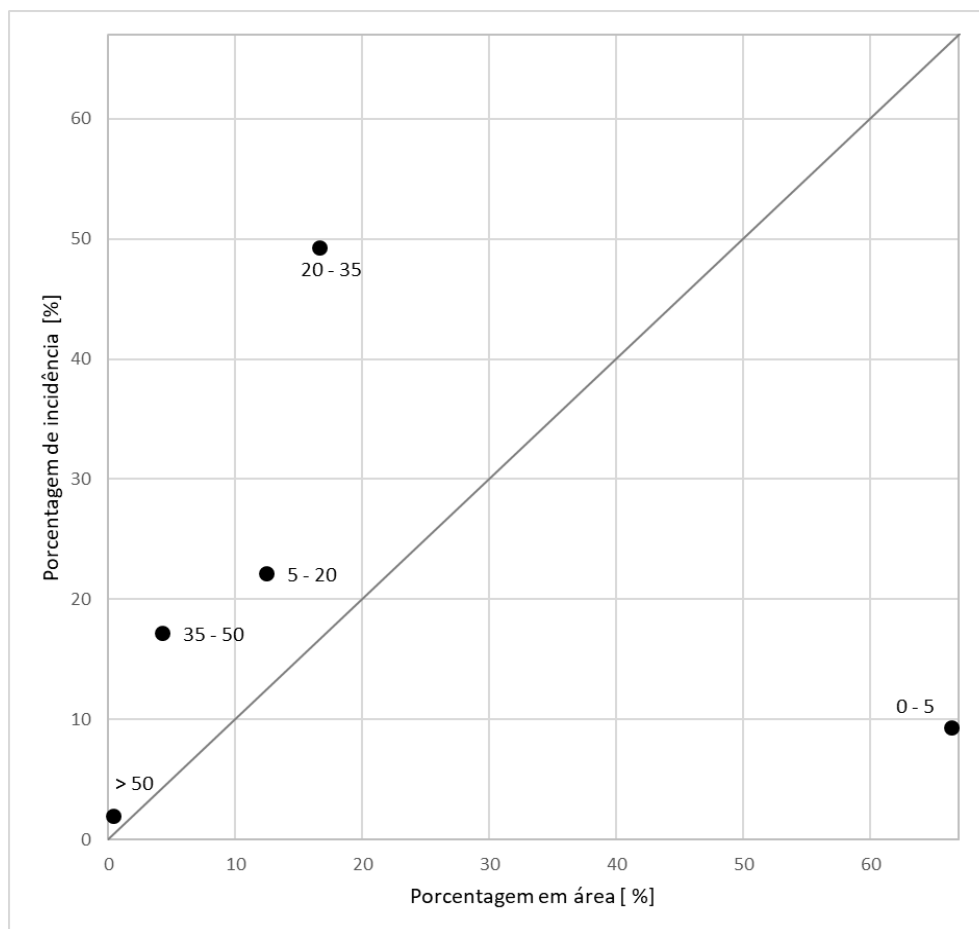


Figura 49. Porcentagem em área da incidência escorregamentos e porcentagem em área das classes de declividade, sob isoietas maiores que 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

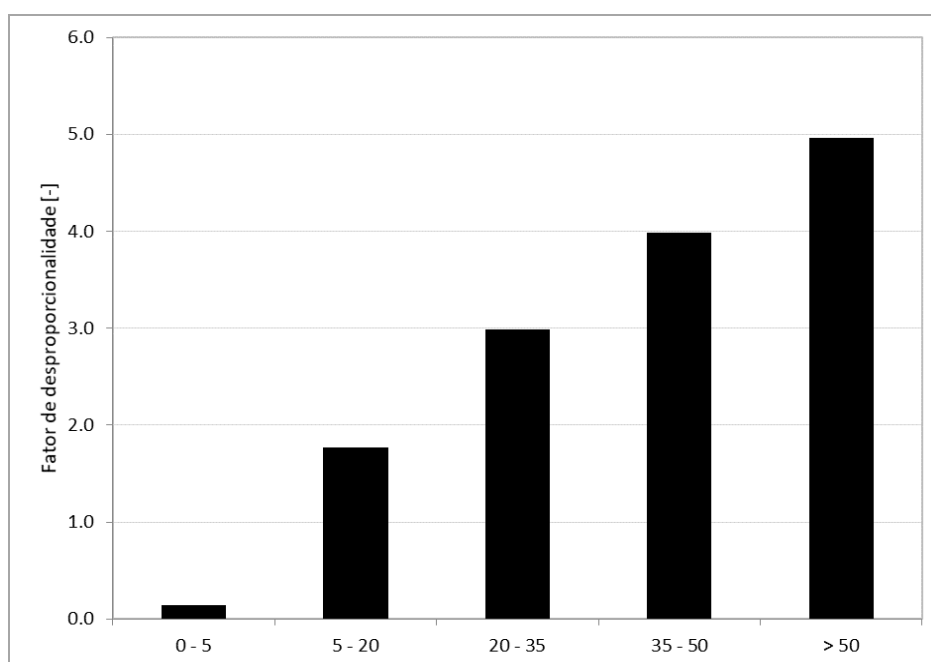


Figura 50. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes de declividade, sob isoietas maiores que 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

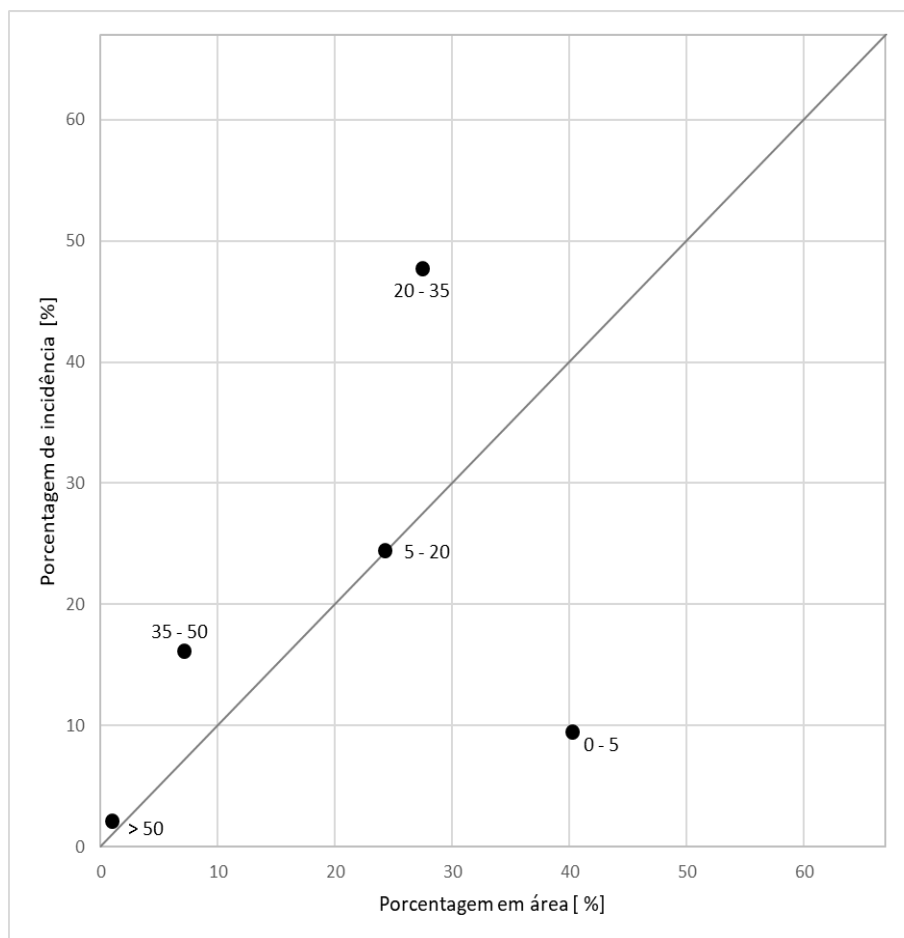


Figura 51. Comparação entre a porcentagem em área da incidência escorregamentos e a porcentagem em área das classes de declividade nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

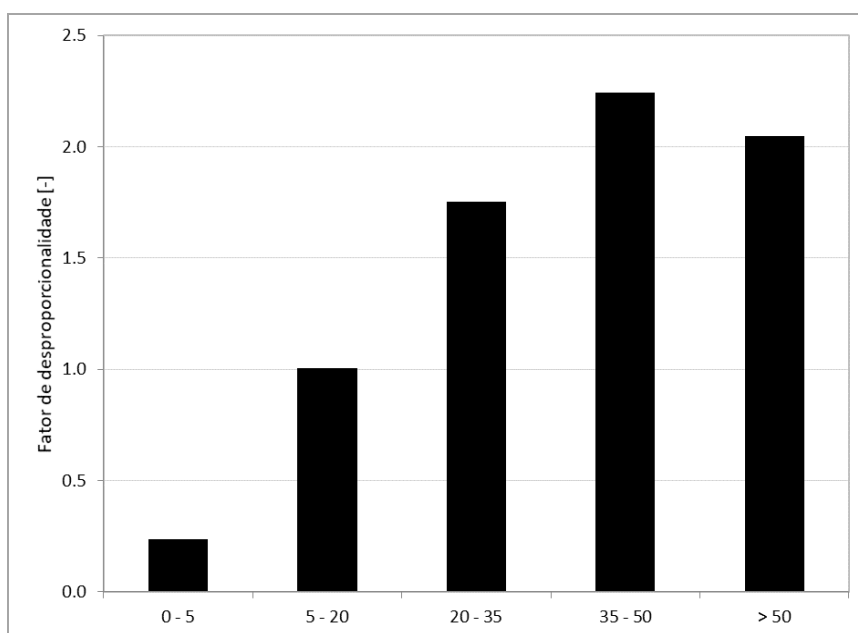


Figura 52. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes de declividade nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

As análises de desproporcionalidade envolvendo unidades geológicas mostraram-se mais complexas do que as envolvendo classes de declividade, pois as sub-regiões definidas (zonas sob a mesma precipitação acumulada) não são compostas pelas mesmas unidades geológicas, dificultando as comparações.

Sob precipitações acumuladas menores que 400 mm, nota-se que as únicas unidades atingidas são PScpp, PScmb e em menor porcentagem PIYb (Figura 53 e 54). Essas unidades tratam-se de granitos gnáissicos (PScpp e PIYb) e metagrabos (PScmb). Os gnaisses atingidos por escorregamentos sob essas condições estão nas bacias Santo Antônio e, principalmente, na bacia Pau D'Alho, enquanto o metagabro encontra-se na bacia Camburu (Figura 44). Não há como identificar nenhuma tendência definida, o que leva à dedução de que a incidência de escorregamentos nessas unidades seja ocasional, ou seja, os fatores controladores possam ter sido a declividade e/ou a orografia, principalmente no caso dos escorregamentos incidentes na bacia Pau D'Alho.

Na faixa de precipitações acumuladas entre 400 e 500 mm (Figuras 55 e 56) uma gama maior de unidades geológicas foi afetada pelos escorregamentos de 1967 em relação à faixa da isoietas anterior. De maneira óbvia, os baixos valores de *FD* corresponderam às unidades quaternárias, que se desenvolvem em áreas de baixo declive. Ademais, a unidade que foi mais afetada em área pelos escorregamentos para as condições pluviométricas em questão foi a PScgg (gnaisse migmatítico), ao passo que o maior *FD* calculado foi para a unidade PIYc (piroxênio-hornblenda granitos).

De acordo com as análises efetuadas para a região com precipitações acumuladas acima de 500 mm (Figuras 57 e 58), todas as unidades proterozóicas e arqueanas apresentam *FDs* acima de 1 sob essas condições, principalmente pelo fato da região sob precipitação acumulada superior a 500 mm ser dominada pelas unidades quaternárias Qhm e Qhfm (areias marinhas). Não obstante, mesmo sob precipitações mais intensas, a unidade PIYa mostrou tendencialmente mais resistente à ocorrência de escorregamentos. É válido ressaltar que o alto *FD* estimado para PScgg pode não ser representativo, pois na única porção onde ele ocorre sob isoietas maiores de 500 mm há uma enorme cicatriz (Figura 44).

Ao integrar todas as bacias, portanto desconsiderando as isoietas (Figuras 59 e 60), verifica-se que no evento de 1967 a maior parcela dos escorregamentos se deu sobre granitos (PIYc) e, principalmente, gnaisses (PIYg, PScgg, PScpp)

proterozóicos. As superfícies de escorregamentos dessas unidades, em conjunto, correspondem a 84% da área afetada (Figura 57). Não obstante, PIYc e Acq são as unidades com maiores *FDs*, porém, não é possível afirmar se elas são de fato as unidades mais propensas à ocorrência de escorregamento ou se a sua localização, sob o evento meteorológico excepcional de 1967, teve um papel mais importante. Reis e Zaine (2018) admitiram que possivelmente a geologia (com seus regolitos associados) tenha tido um papel relativamente subordinado no respectivo evento, sendo menos relevante que a distribuição da precipitação e da declividade. Sobre essa afirmação, Lopes (2006), pesquisando sobre a incidência de escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar, na região de Cubatão (SP), também concluiu que análises considerando apenas as características geológicas não são capazes de fornecer resultados conclusivos sobre a vulnerabilidade de determinadas unidades litológicas à ocorrência de escorregamentos. Ademais, o autor destaca que outros fatores devem ser incluídos nessa análise, como a declividade e distribuição das chuvas, como realizado no presente trabalho.

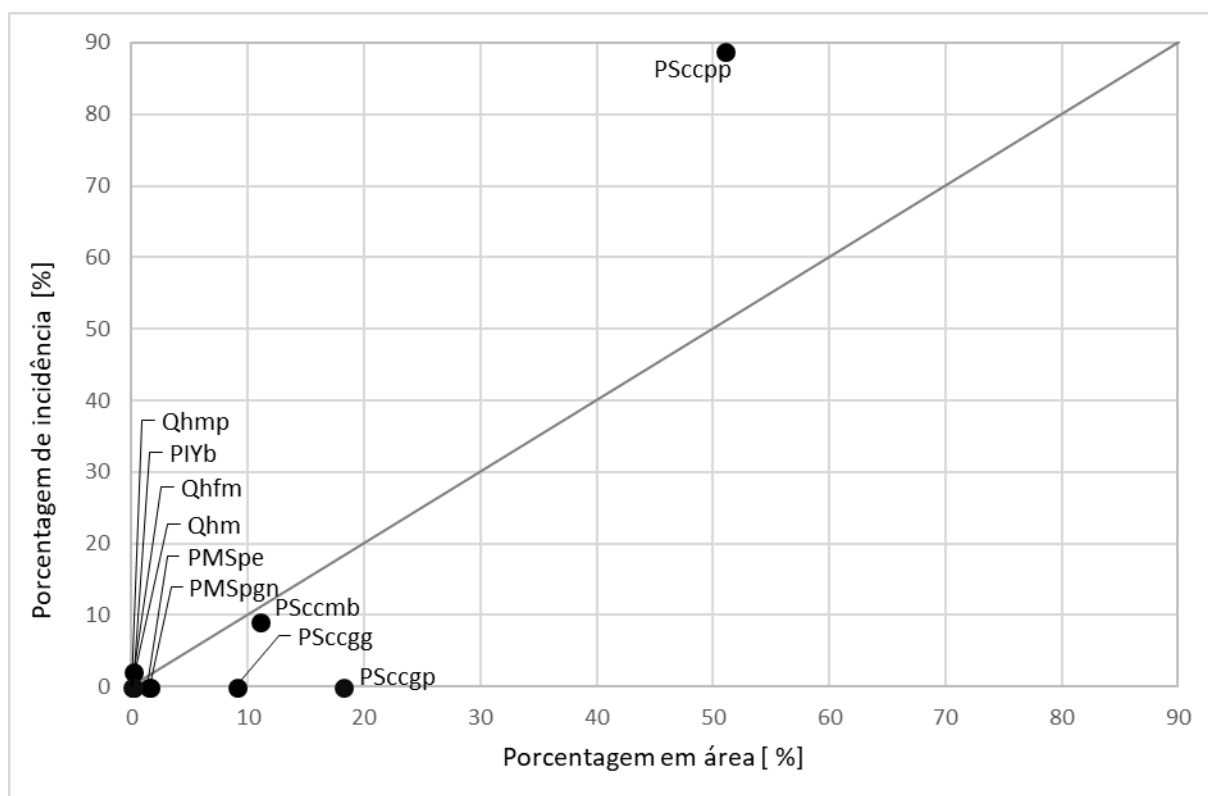


Figura 53. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem das unidades geológicas, sob isoietas menores que 400 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

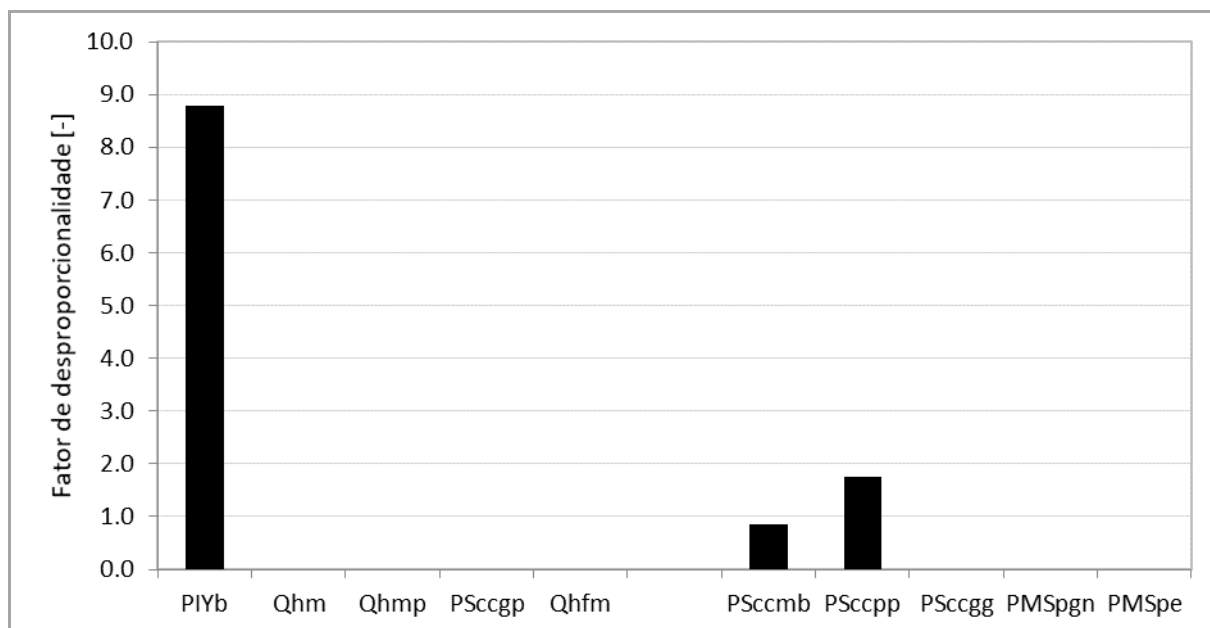


Figura 54. Fatores de desproporcionalidades calculados para as unidades geológicas, sob isoietas menores que 400 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

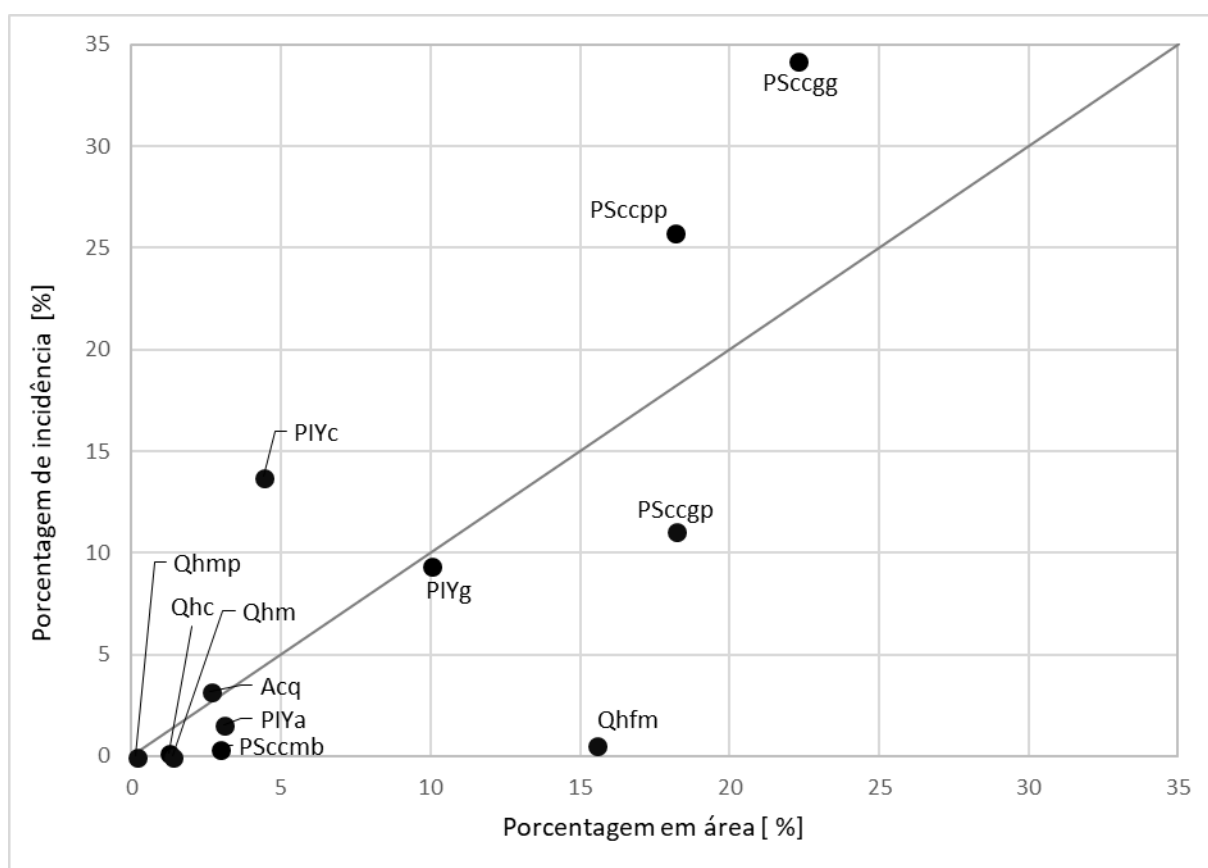


Figura 55. Comparação entre a porcentagem em área da incidência escorregamentos e a porcentagem em área das unidades geológicas, sob isoietas entre 400 e 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

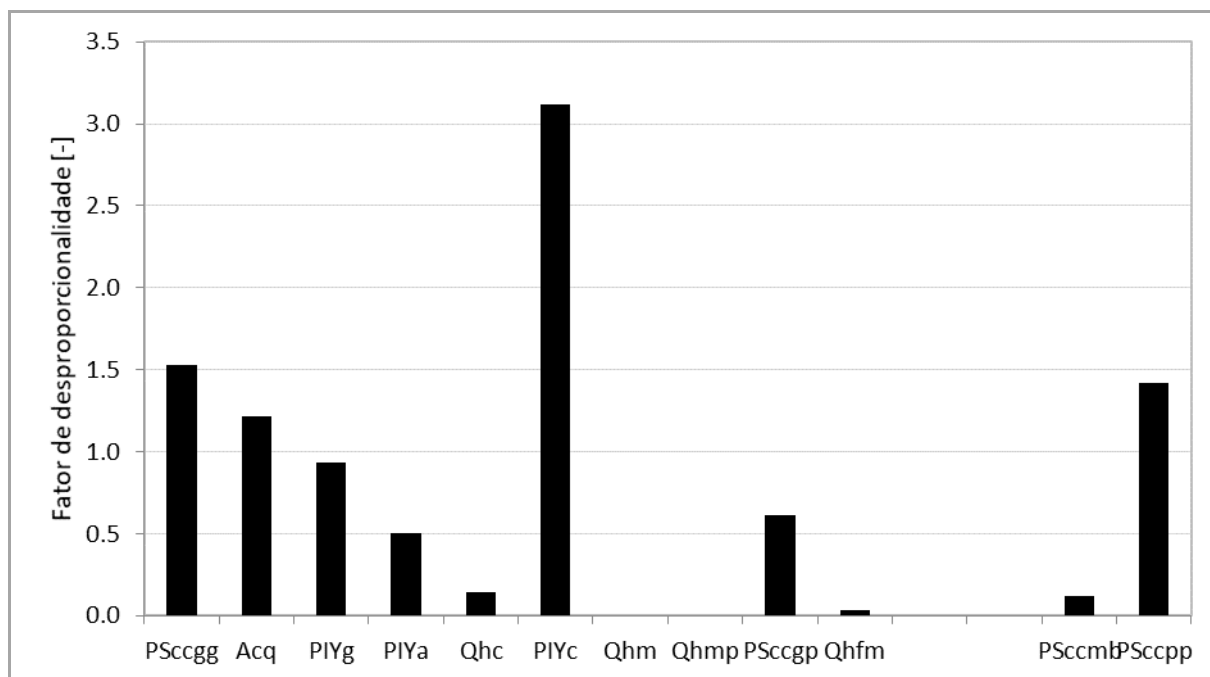


Figura 56. Fatores de desproporcionalidades calculados para as unidades geológicas, sob isoietas entre 400 e 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

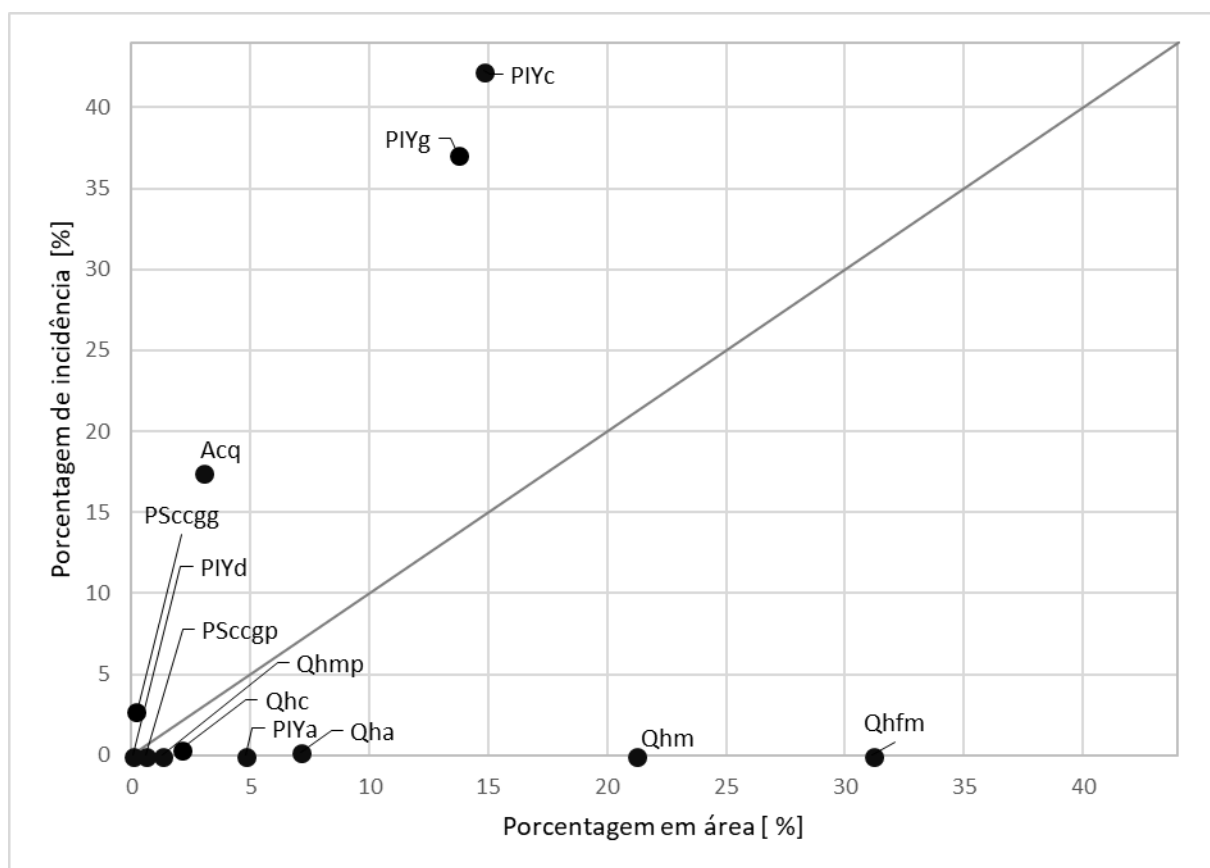


Figura 57. Comparação entre a porcentagem em área da incidência escorregamentos e a porcentagem em área das unidades geológicas, sob isoietas maiores que 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

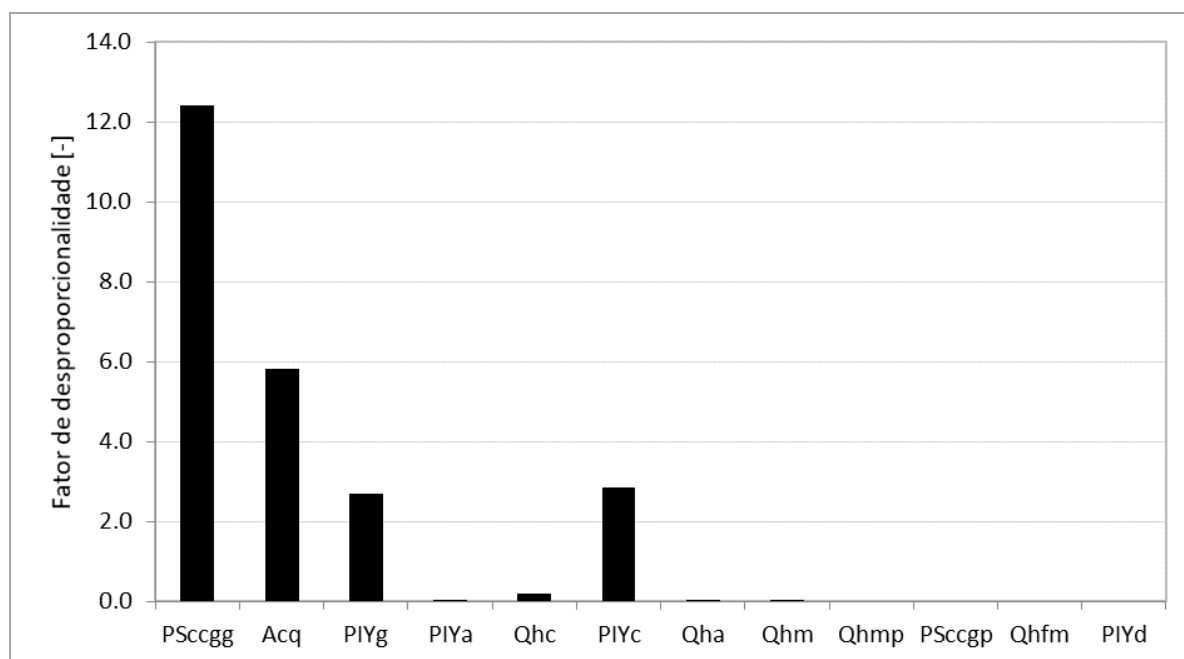


Figura 58. Fatores de desproporcionalidades calculados para as unidades geológicas, sob isoietas maiores que 500 mm, nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

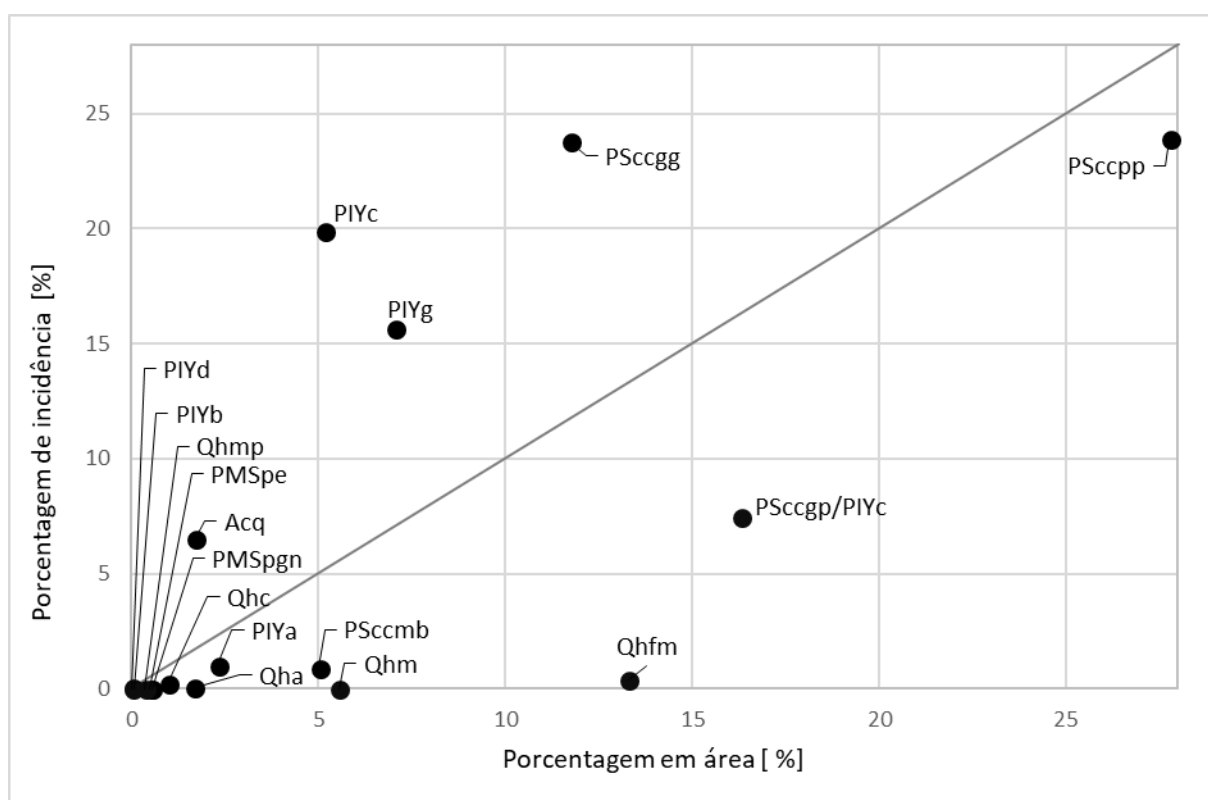


Figura 59. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de deslizamentos e a porcentagem em área das unidades geológicas nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

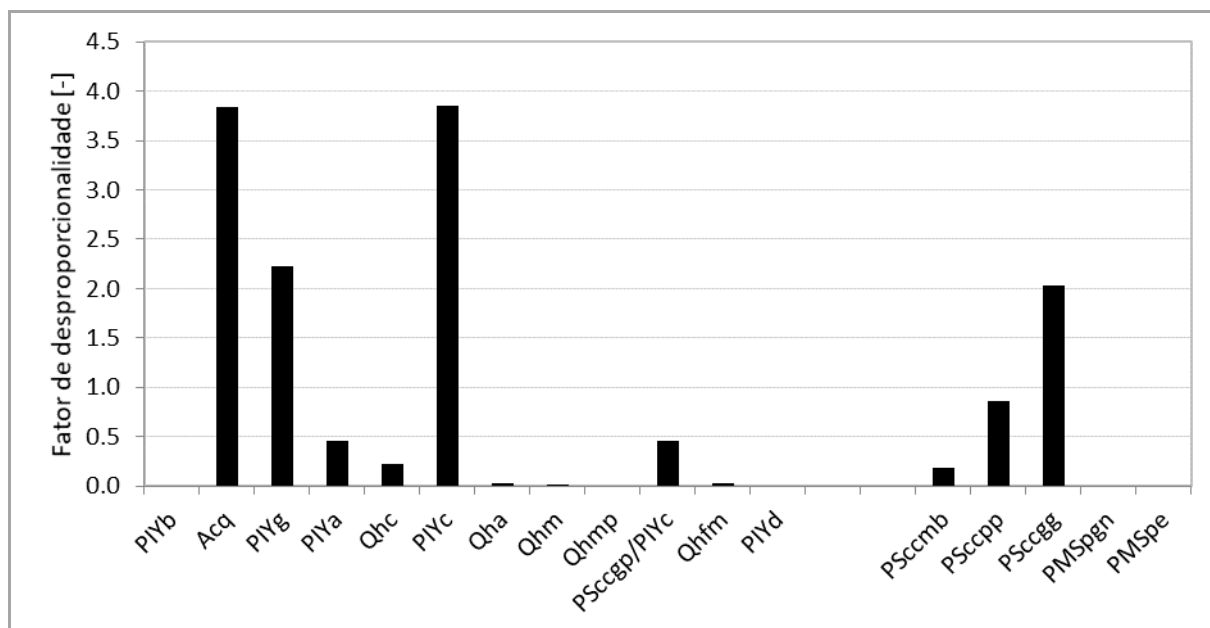


Figura 60. Fatores de desproporcionalidades calculados para as unidades geológicas nas bacias hidrográficas atingidas pelo evento de 1967.

Os resultados da etapa 5.2, ao serem integrados e analisados conjuntamente, permitem e subsidam a seleção da área-alvo para modelagem no *software* de simulação *RAMMS*. Assim, a Bacia do Rio Santo Antônio foi selecionada, devido às suas características fisiográficas (presença de planícies aluviais e costeira, que viabilizam a geração de corridas de detritos, proximidade às escarpas da Serra do Mar, que possuem grande potencial para gerar escorregamentos, e, portanto, corridas primárias) e pelos resultados obtidos nas análises estatísticas normalizadas. Entretanto, cabe destacar que outras bacias também possuem potencialidade para ocorrência desses fenômenos, como a Canivetal, a Pau D'Alho e a Camburu, principalmente. Outras bacias hidrográficas possuem maior potencial para geração de escorregamentos, que podem deflagrar corridas de detritos do tipo primária, conforme os resultados apresentados no item 5.1.

Não obstante, com a finalidade de complementar esse cenário e as retro-análises, optou-se também por empregar o Fator de Desproporcionalidade apenas na Bacia do Rio Santo Antônio, objetivando uma melhor compreensão das corridas de 1967 somente na respectiva unidade de análise. A figura 61 exhibe as análises realizadas e em seguida os resultados são discutidos.

- | |
|---|
| D) Bacia Santo Antônio (cicatrizes de 1967): declividade
D.1 área sob precipitação acumulada de 300 mm
D.2 área sob precipitação acumulada de 400 mm
D.3 área sob precipitação acumulada de 500 mm
D.4 Toda a bacia

E) Bacia Santo Antônio (cicatrizes de 1967): geologia
E.1 área sob precipitação acumulada de 300 mm
E.2 área sob precipitação acumulada de 400 mm
E.3 área sob precipitação acumulada de 500 mm
E.4 Toda a bacia |
|---|

Figura 61. Listagem das análises estatísticas normalizadas na bacia Santo Antônio. Elaborado por Fernando D’Affonseca.

As análises realizadas com a declividade, considerando a precipitação acumulada menor que 400 mm, revelam que a classe mais afetada pelos escorregamentos foi a de 20-35⁰, seguida pela de 35-50⁰ (Figura 63). Entretanto, os maiores valores de *FD* foram registrados para a última classe supracitada, que nesta faixa pluviométrica possui a segunda menor representatividade em área, em comparação às demais (Figura 64). Sobre a declividade de 35-50⁰, observa-se que sua distribuição na bacia está concentrada principalmente nas escarpas da Serra do Mar.

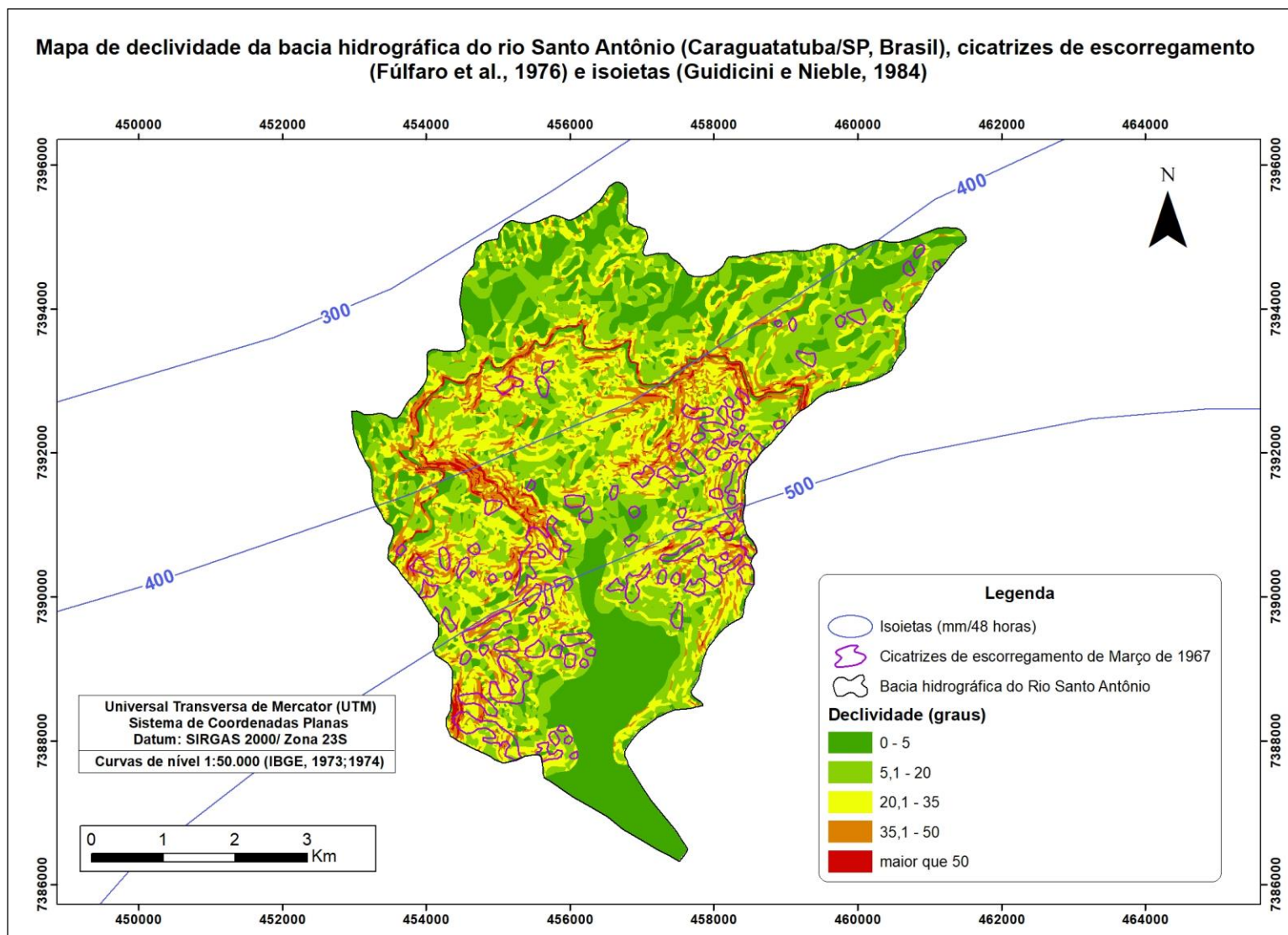


Figura 62. Mapa de declividade com os locais afetados pelos escorregamentos de 1967 na Bacia Santo Antônio.

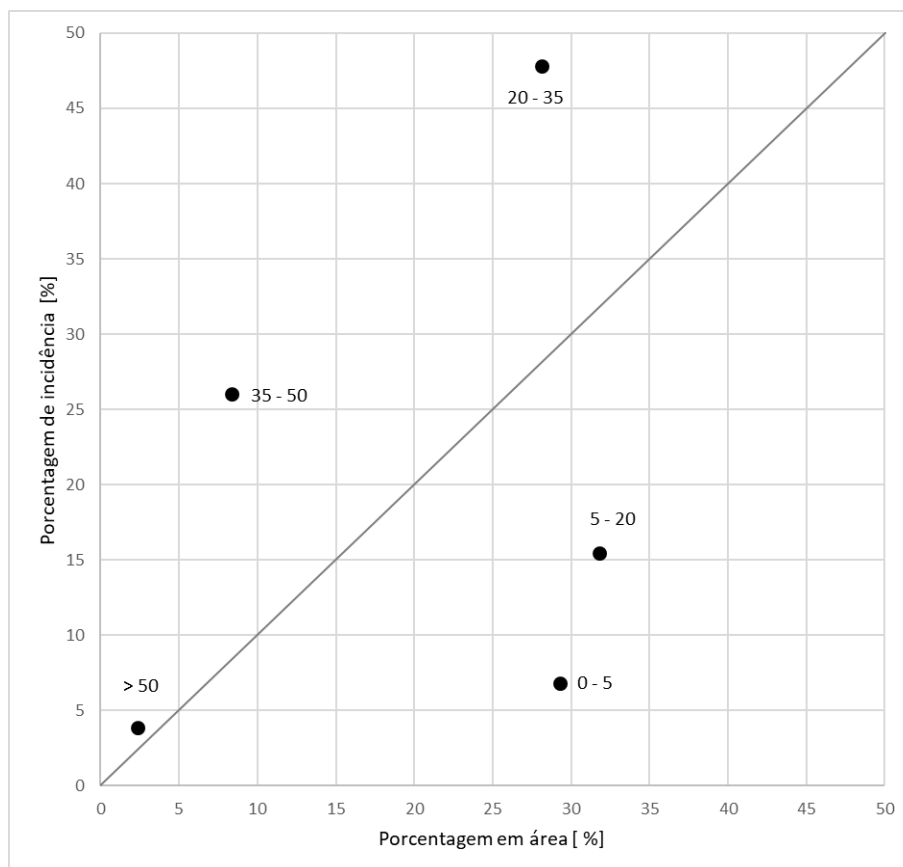


Figura 63. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes de declividades, sob isoietas menores que 400 mm, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967.

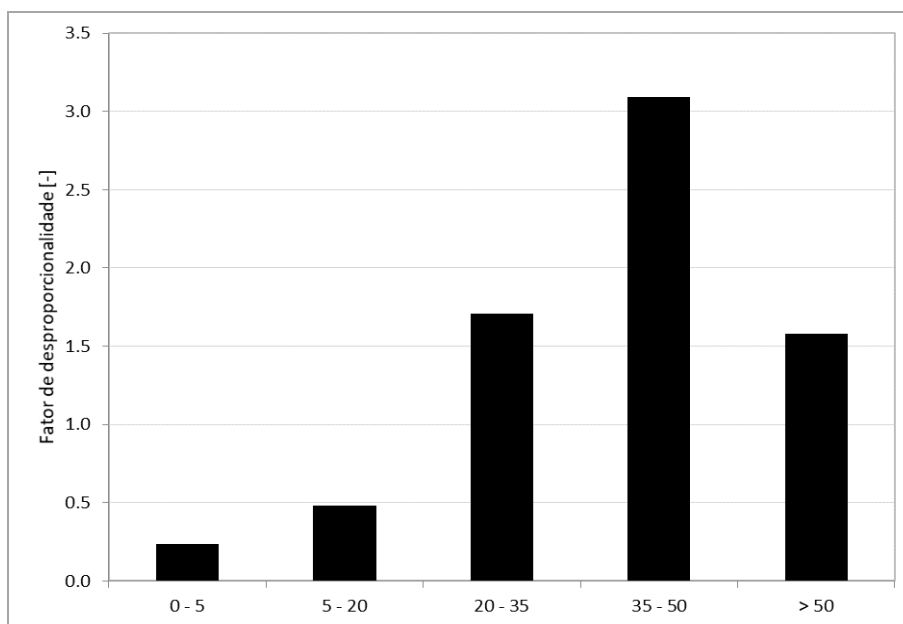


Figura 64. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes de declividade, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967, sob isoietas menores que 400 mm.

No compartimento das isoietas entre 400 e 500 mm, observa-se novamente que a classe de 20 a 35^o foi a que teve a maior incidência, em área, dos escorregamentos generalizados (Figura 65). Entretanto, análises com *FD* evidenciam que houve uma grande desproporcionalidade na classe 35-50^o (Figura 66). Destaca-se que nesta classe as cicatrizes possuem uma distribuição leste-oeste na bacia selecionada como área-alvo, praticamente acompanhando as isoietas delimitadas, o que permite inferir que essa desproporcionalidade se deu pelos altos acumulados pluviométricos. Essa faixa de isoietas registrou a segunda maior incidência em área dos escorregamentos de 1967 na Bacia Santo Antônio, e inclusive locais situados no planalto foram afetados no evento, embora possuam menores declives (Figura 62).

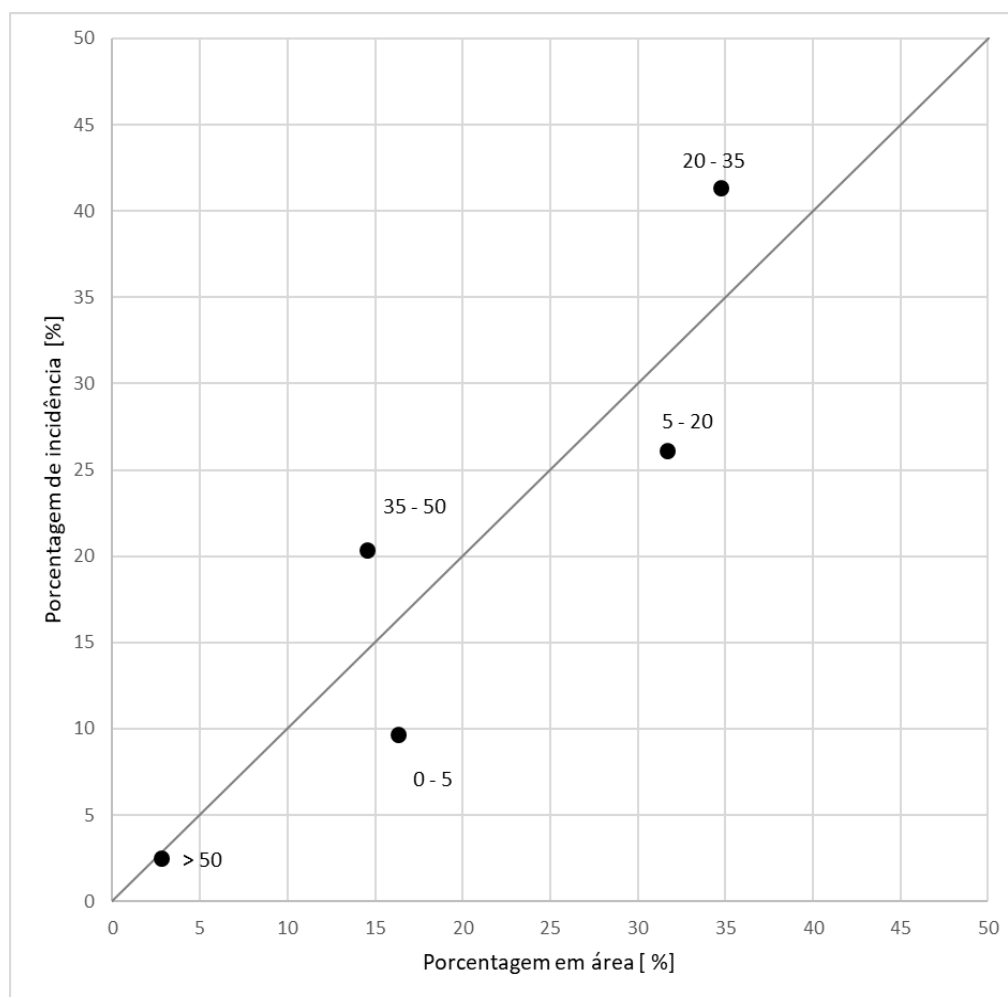


Figura 65. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes de declividades, sob isoietas com precipitação acumulada entre 400 a 500 mm, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967.

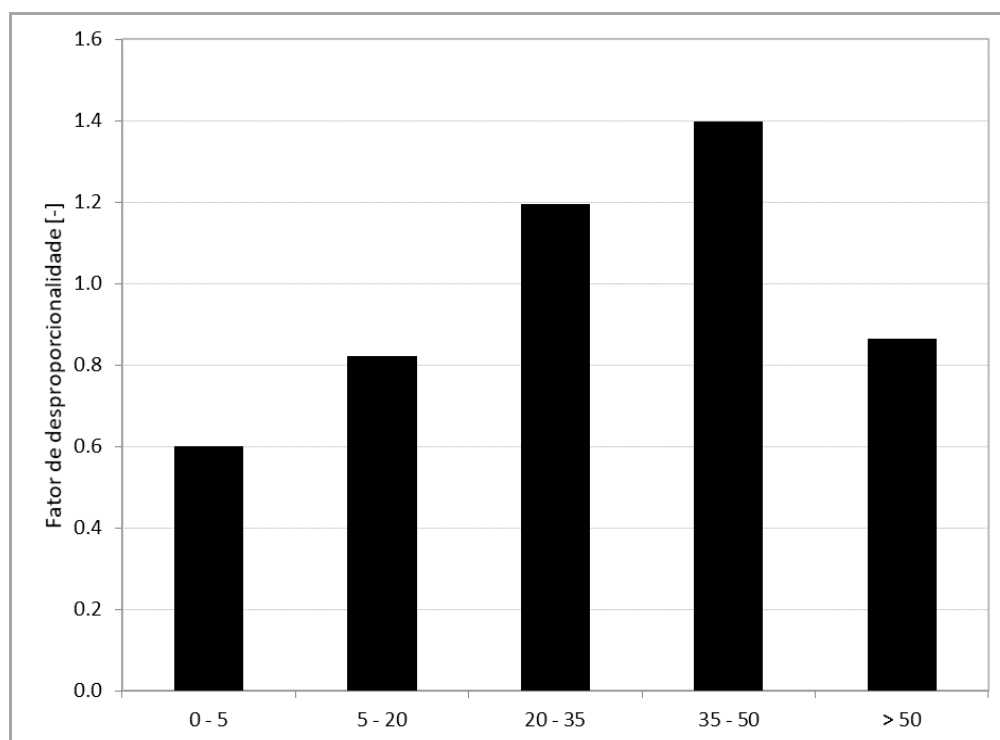


Figura 66. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes de declividade, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967, sob isoietas acumuladas entre 400 a 500 mm.

Quanto às curvas pluviométricas com acumulados maiores que 500 mm, observa-se que a classe de declive mais atingida foi novamente a de 20 a 35° (Figura 67). Porém um dado interessante é que nas análises com o emprego da *FD* existe uma grande desproporcionalidade para a classe maior que 50°, evidenciando que a chuva foi um importante fator de deflagração na ocorrência dos escorregamentos (Figura 68). Por fim, destaca-se que as áreas que estavam situadas no domínio das chuvas índices pluviométricos acumulados maiores que 500 mm foram aquelas que tiveram maior incidência de escorregamentos, correspondendo a 15% da área nesta faixa de isoietas.

Por fim, as análises estatísticas normalizadas referentes à bacia, desconsiderando as isoietas, revelou que a classe de declividade que teve maior incidência de escorregamentos foi a de 20 a 35° (Figura 69). Ademais, a classe com maior desproporcionalidade foi a de 35-50° (Figura 70), provavelmente afetada pelos altos índices pluviométricos do acumulado dos dias 17 e 18/03/67. Conforme já explicitado, existe uma maior distribuição da respectiva classe na isoietas de 400 a 500 mm, que registrou, nas análises anteriores, a segunda maior incidência em escorregamentos.

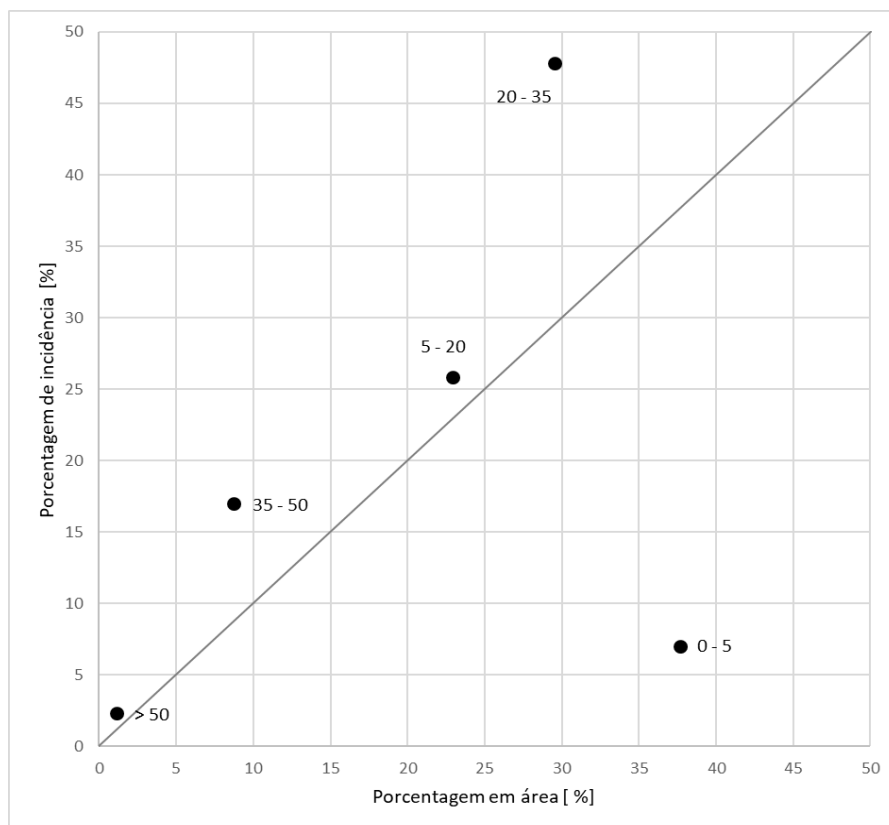


Figura 67. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes de declividades, sob isoietas menores com precipitação acumulada maior que 500 mm, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967.

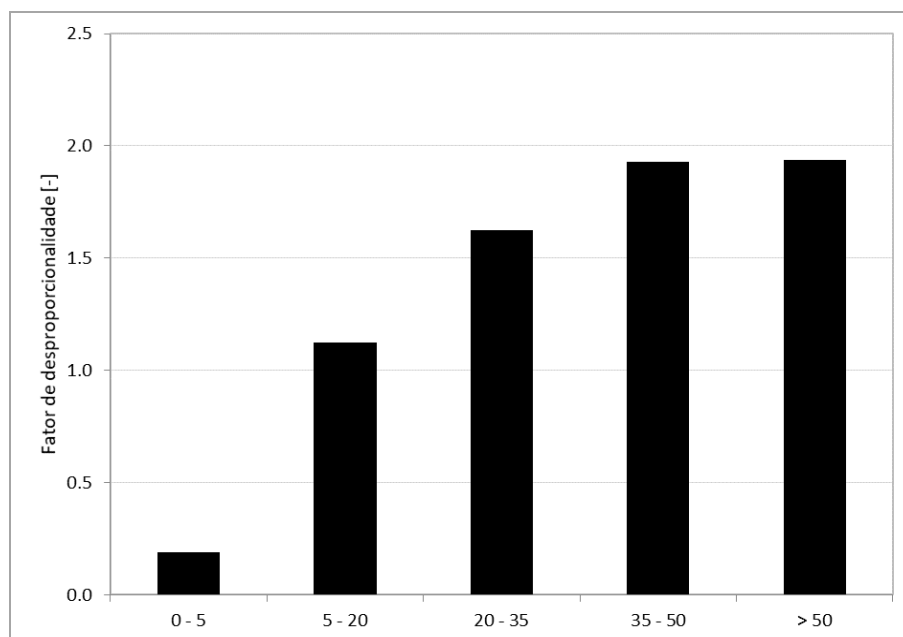


Figura 68. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes de declividade, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967, sob isoietas acumuladas maior que 500 mm.

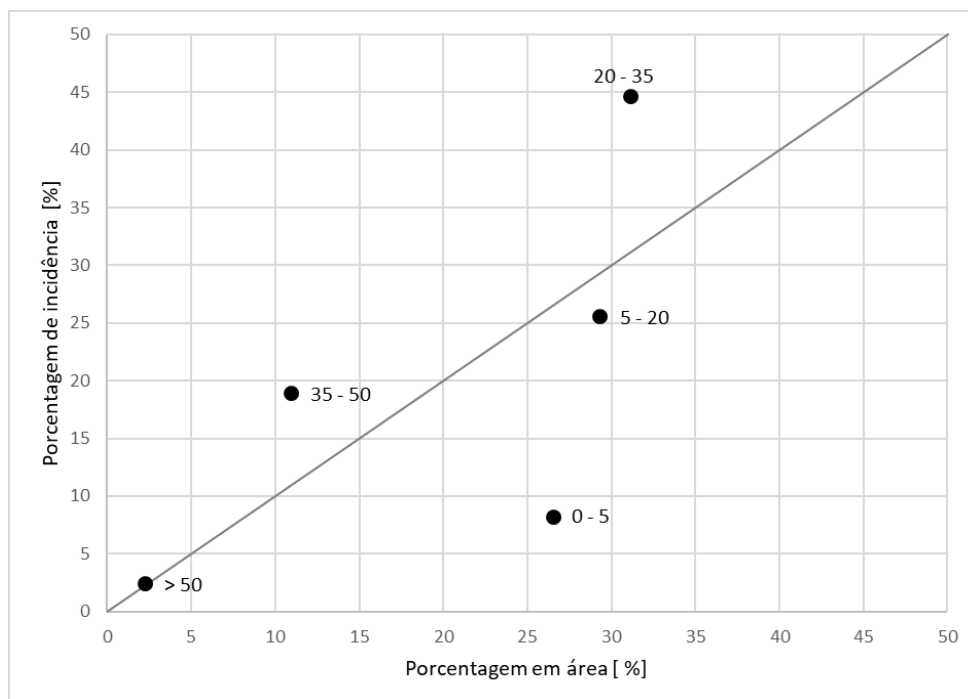


Figura 69. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes de declividades, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967.

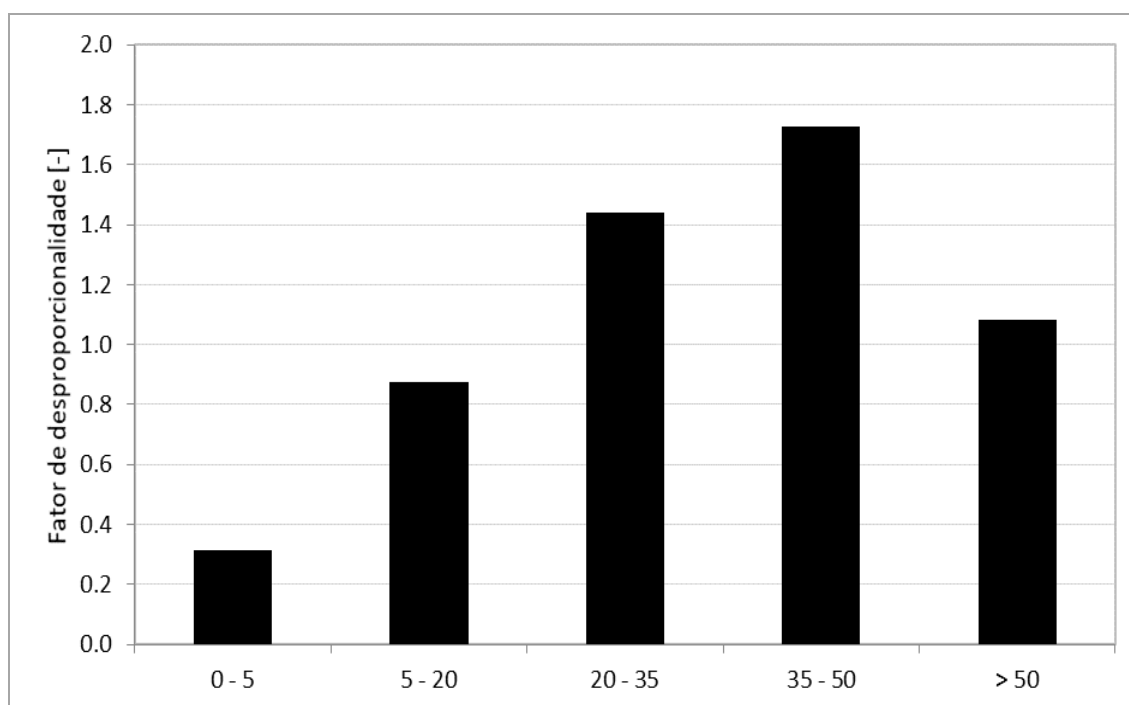


Figura 70. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes de declividade, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967.

As análises estatísticas normalizadas para a geologia na Bacia Santo Antônio evidenciam novamente que sua participação foi subordinada no evento, uma vez que é explícito em todos os cenários (com isoietas ou não) que não houve uma unidade com maior tendência à incidência aos escorregamentos (Figuras 71 a 72). As análises empregadas até então revelam que o material de unidades geológicas sob isoietas com acumulados pluviométricos maiores que 400 mm desceram as encostas da Serra do Mar indiscriminadamente, sem obedecer a critérios geológicos específicos. As figuras a seguir apresentam todos os resultados das análises estatísticas normalizadas do evento de 1967 para a bacia Santo Antônio (Figuras 72 a 79).

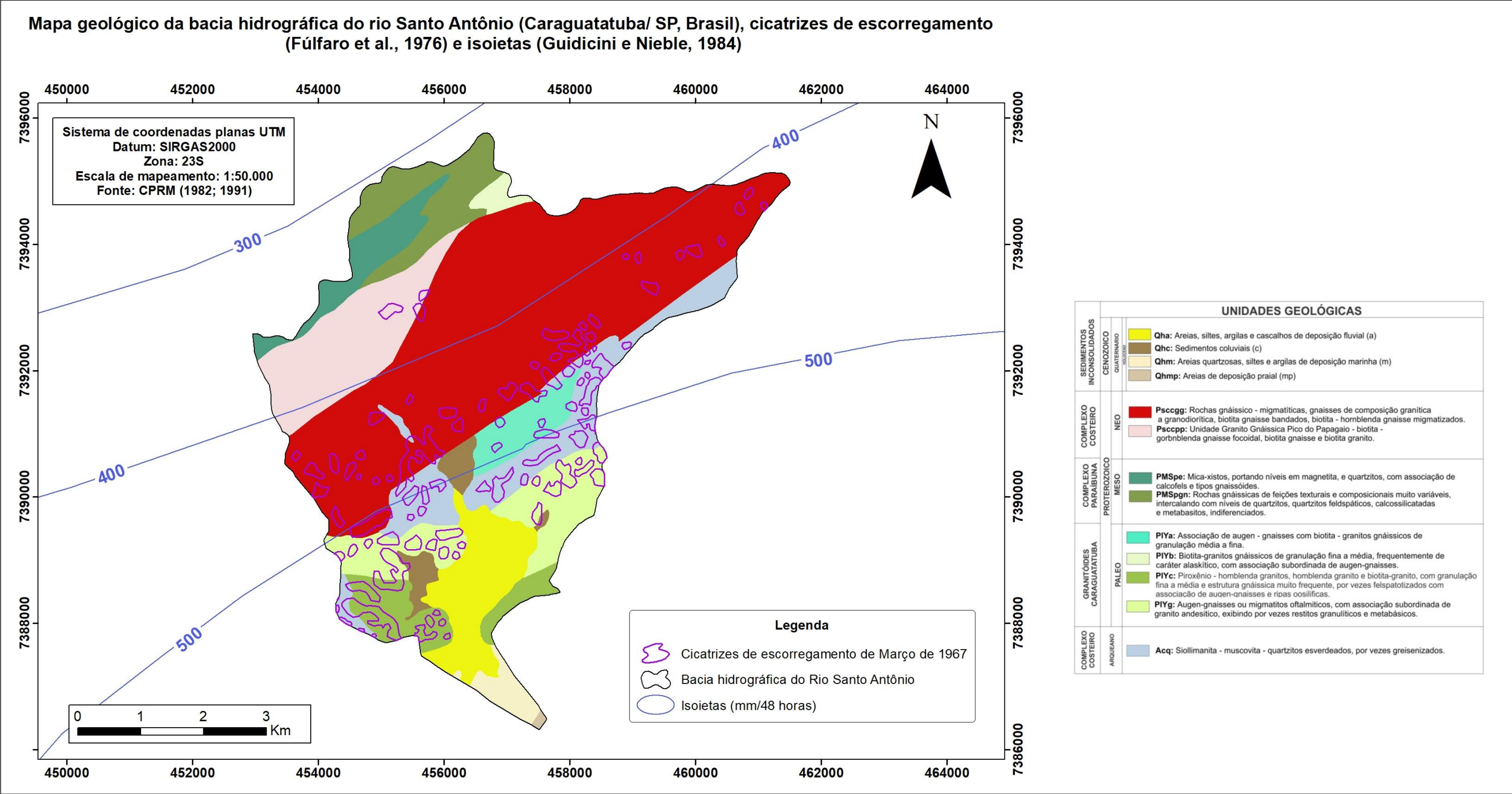


Figura 71. Mapa da geologia da Bacia Santo Antônio com as unidades afetadas pelo evento de 1967.

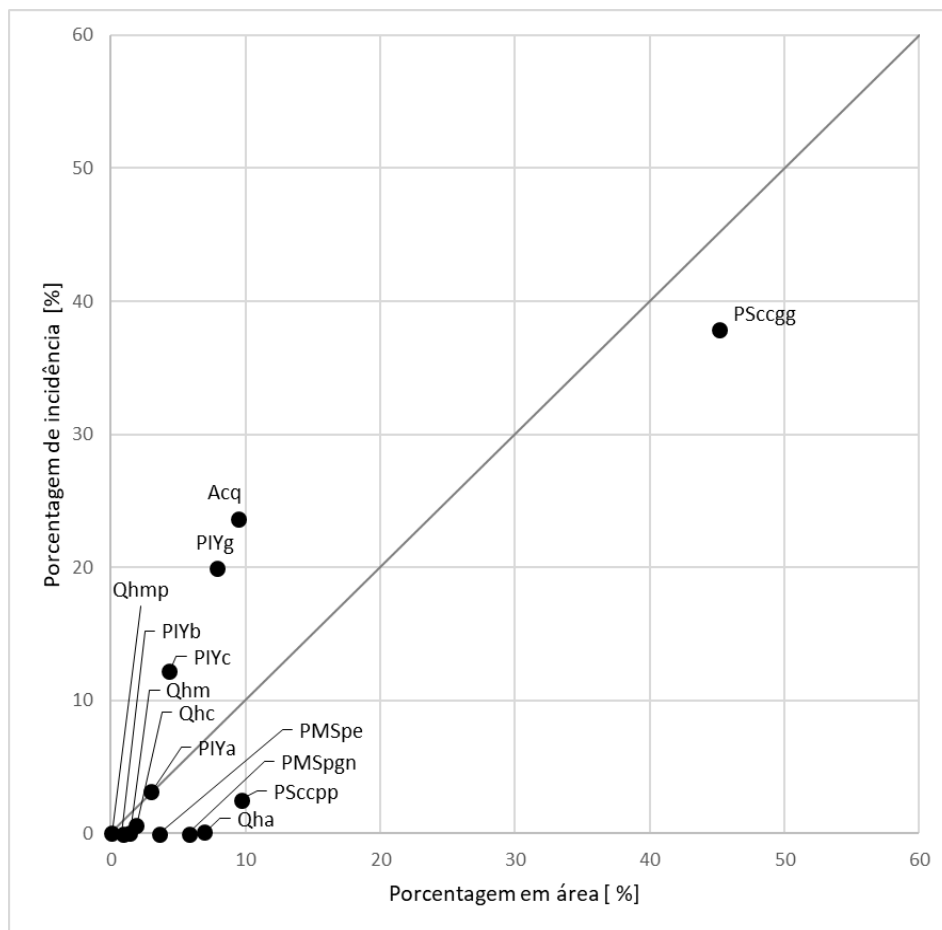


Figura 72. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes geológicas, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967.

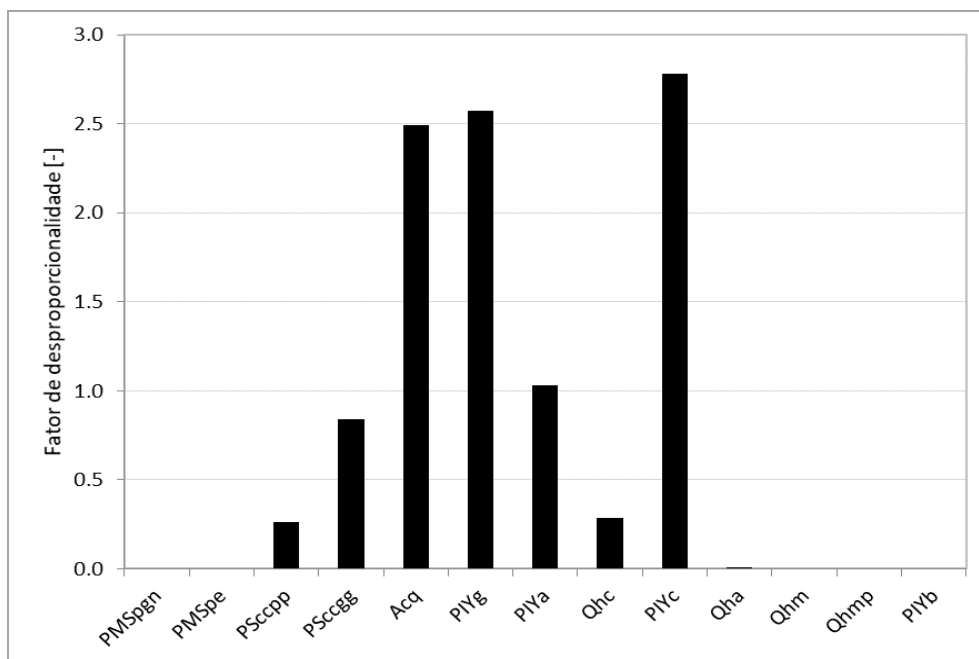


Figura 73. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes geológicas, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967.

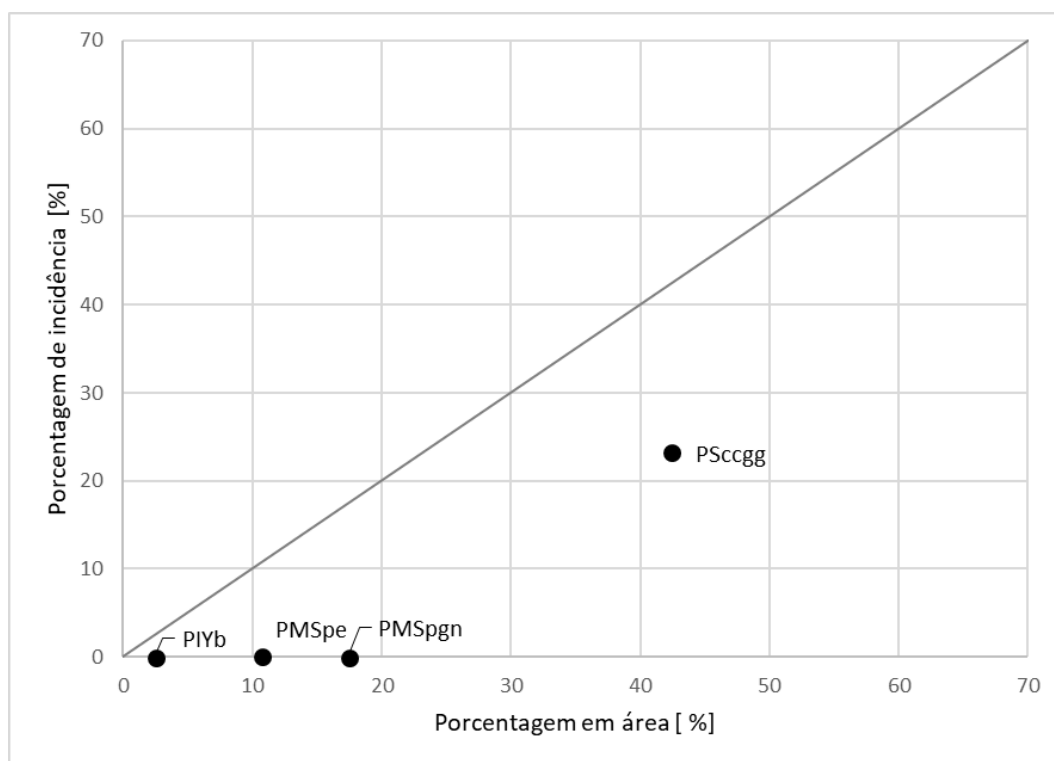


Figura 74. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes geológicas, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967 sob valores pluviométricos acumulados menores que 400 mm.

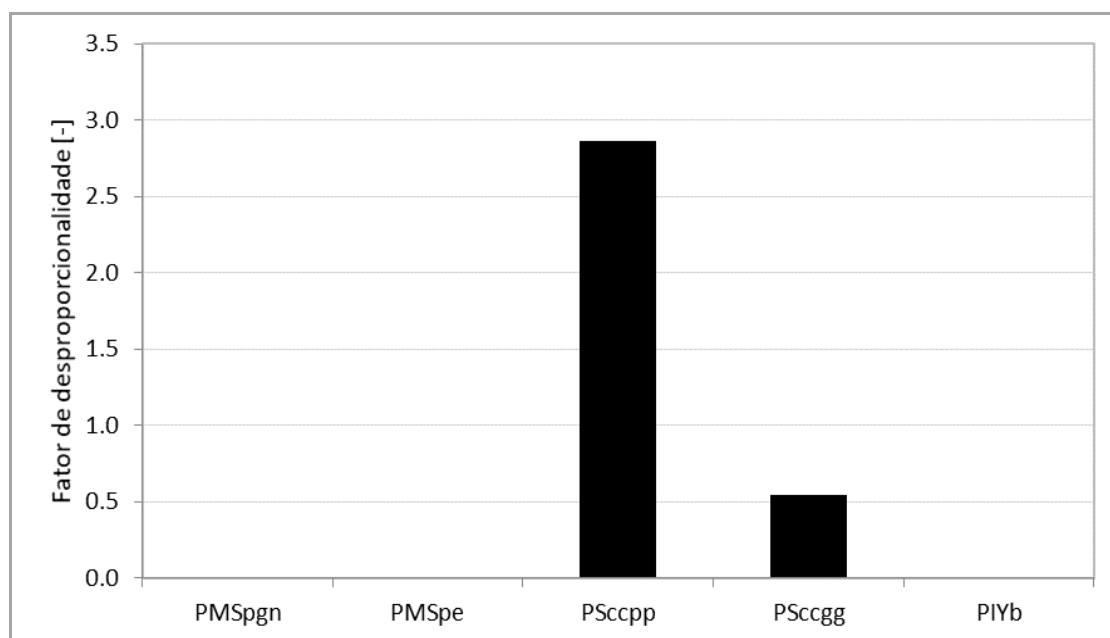


Figura 75. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes geológicas, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967 sob valores pluviométricos acumulados menores que 400 mm.

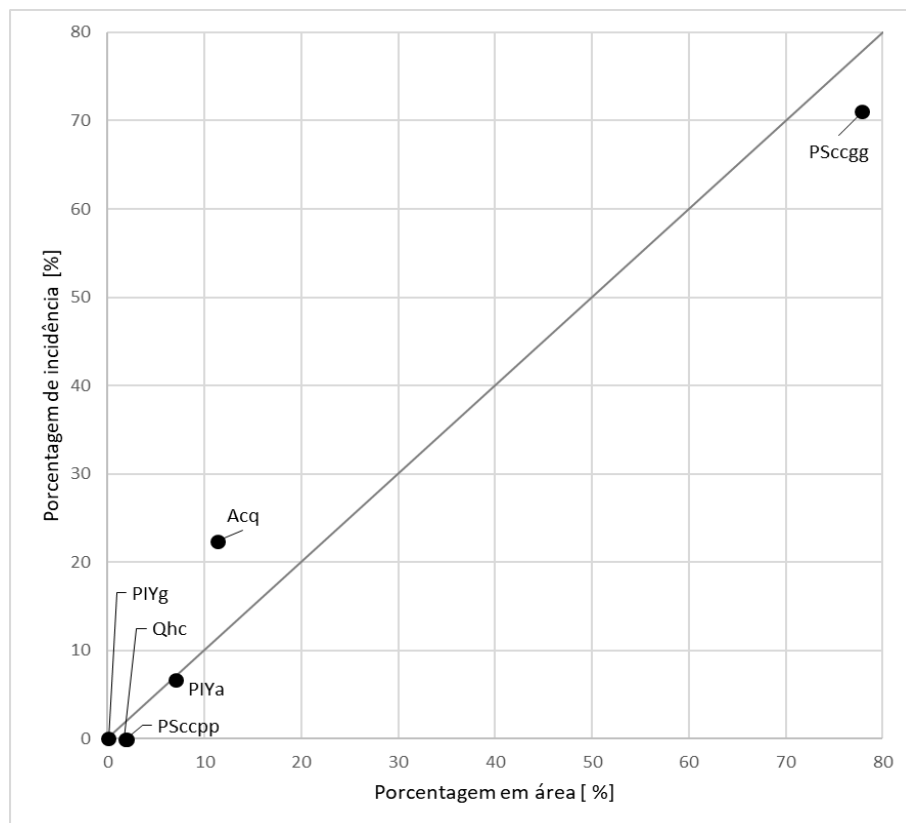


Figura 76. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes geológicas, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967 sob valores pluviométricos acumulados de 400 a 500 mm.

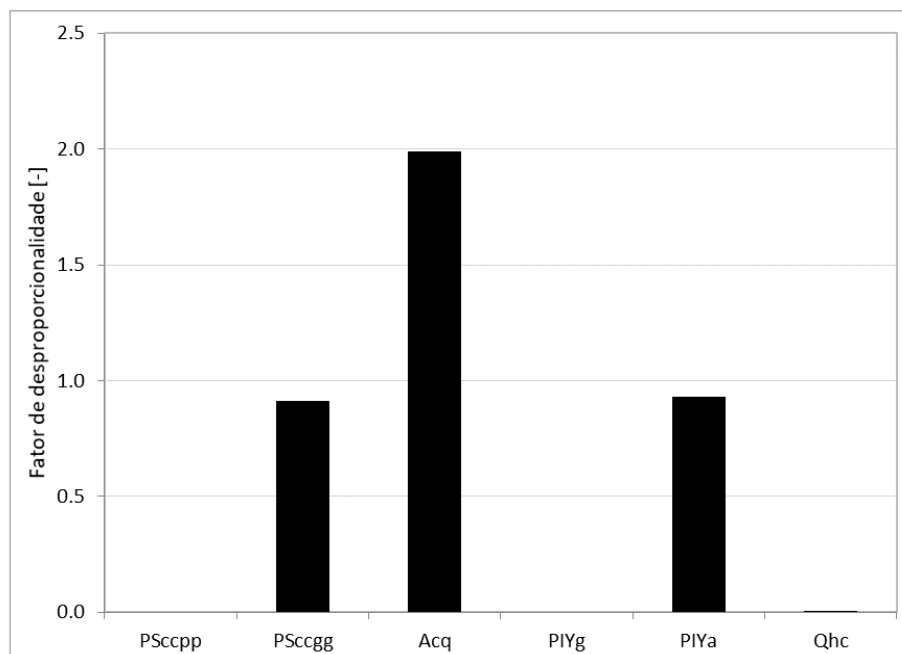


Figura 77. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes geológicas, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967 sob valores pluviométricos acumulados de 400 a 500 mm.

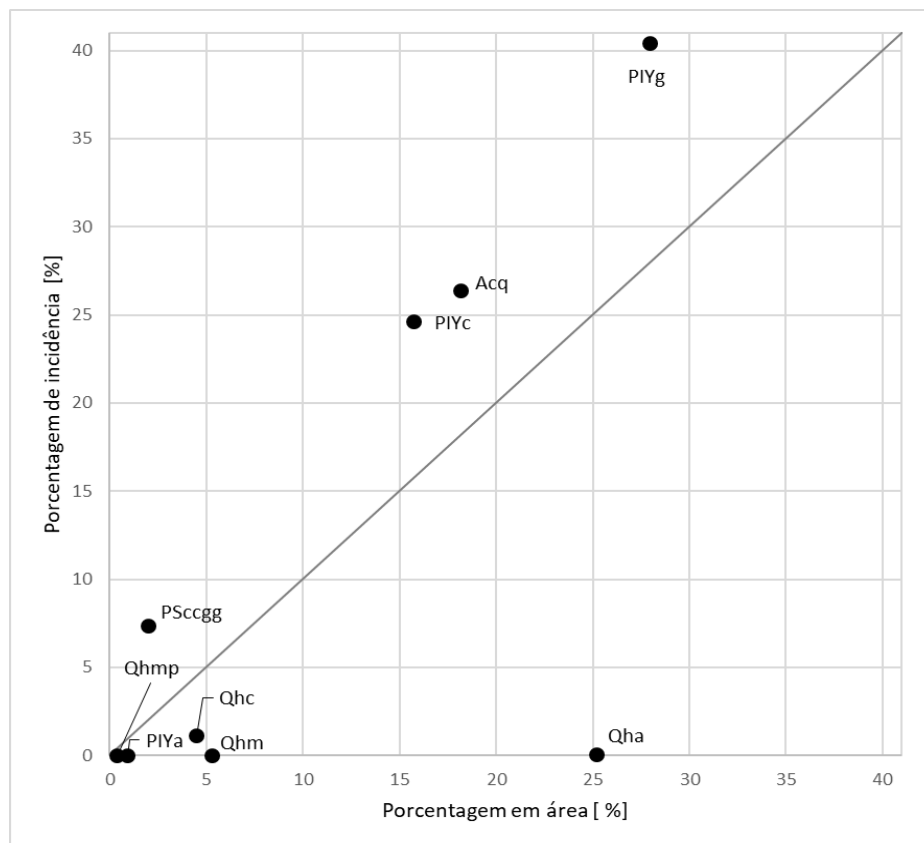


Figura 78. Comparação entre a porcentagem em área da incidência de escorregamentos e a porcentagem em área das classes geológicas, na bacia do rio Santo Antônio, atingida pelos eventos de 1967 sob valores pluviométricos acumulados maior que 500 mm.

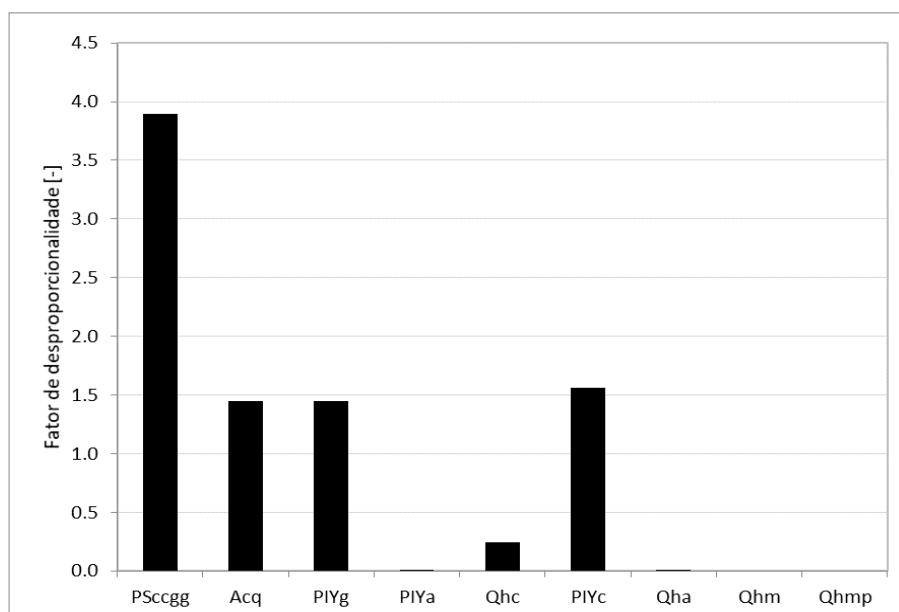


Figura 79. Fatores de desproporcionalidades calculados para as classes geológicas, no âmbito da Bacia Santo Antônio, atingida pelo evento de 1967 sob valores pluviométricos acumulados de maior que 500 mm.

5.3. Modelagem morfométrica das corridas de detritos de 18/03/1967

Primeiramente, de modo a facilitar análises comparativas entre os resultados simulados e os observados, foram identificadas através de técnicas de fotointerpretação nas fotografias aéreas mosaicadas e georreferenciadas, datadas de 1973, as áreas de depósito das corridas de detritos que ocorreram em 1967 na área-alvo (Bacia Santo Antônio). Além da fotointerpretação, esta delimitação foi subsidiada pelos trabalhos e relatos de Nery (2016) e Cruz (1974).

As áreas de depósito identificadas foram divididas em sub-zonas de espessura, as quais foram estimadas através dos relatos de Cruz (1974), Gramani (2001), Fúlfaro et al. (1976) e Petri e Suguio (1971), e dados coletados e observados em campo (Figura 80).

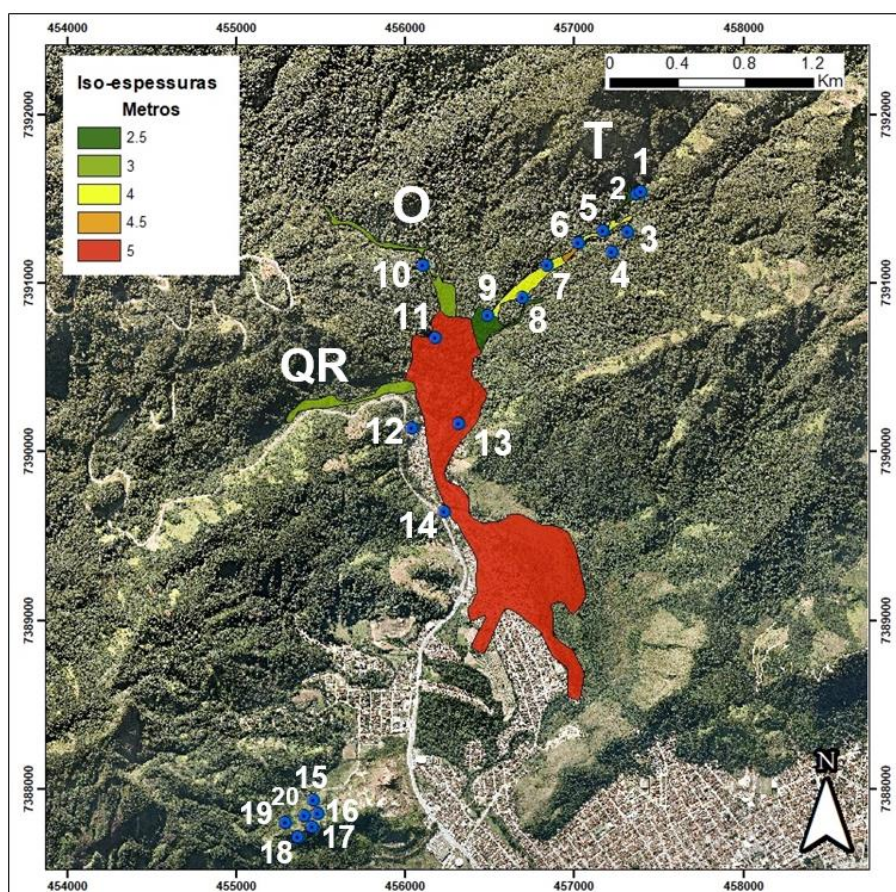


Figura 80. Mapa de isópacas do depósito das corridas de detritos de 1967 na Bacia Santo Antônio (Caraguatatuba/ SP).

O mapeamento realizado por Cruz (1974) foi utilizado com cautela, pois à jusante, na planície aluvial e costeira à jusante dos 2 primeiros alvéolos (os dois primeiros morros, no sentido litoral – Serra do Mar) a autora também delimitou depósitos de *mud flow* e *mud flood*, e não apenas os de corridas de detritos, processo foco dessa pesquisa.

De modo a facilitar a discussão dos resultados, os canais/ vales tributários da drenagem principal da bacia foram denominados de “T” (tributário), “O” (correspondente ao Ribeirão do Ouro) e “QR” (Córrego Quinhentos Réis) (Figura 80).

No vale da drenagem “T” foram realizados 9 pontos de campo, no qual foram estabelecidas 3 zonas de espessuras, de montante à jusante: 2.5, 4, 4.5, 4 e 2.5 metros (Figura 80).

No ponto 1 e 2 (zona de isópaca de 2.5 metros) foram encontrados muitos blocos, que em sua maioria possuíam tamanho de eixo maior métricos. Assim, foi observado que uma das margens do rio no ponto 1 possuía uma espessura de deposição de material de cerca de 2.5 metros (Figura 81).

A zona de espessura de 4 metros foi estimada a partir de 3 pontos de campo, com complementação de outros 2: 5 e 7 e 3 e 4, sendo que estes dois últimos foram coletados em uma porção mais superior do talude (Figura 80). Nestes pontos foram também observadas a deposição de muitos blocos, no leito e nas margens do rio tributário (Figura 82).

A zona de espessura de 4.5 metros foi delimitada a partir das observações de campo do ponto 6, localizado no vale do tributário “T” (Figura 80 e 83).

Na zona de espessura 2.5 metros foram realizadas duas observações em campo: pontos 8 e 9 (Figura 80 e 84). O ponto 9 corresponde ao exutório da drenagem “T”, cuja confluência se dá posteriormente ao canal principal da Bacia Santo Antônio e o ponto 8 está inserido em uma das drenagens tributárias do mesmo rio.

A zona de espessura de 3 metros, situada no vale do tributário “O” (Ribeirão do Ouro) foi delimitada e estimada por fotointerpretação, atividades de campo (ponto 10) e bibliografias (GRAMANI, 2001; NERY, 2016; CRUZ, 1974). As figuras 85 e 86 a seguir apresentam os resultados obtidos para esta zona.



Figura 81. Observações de campo evidenciando espessuras de depósitos do processo de corrida de detritos de 1967 e tamanhos dos blocos. As fotografias A e B referem-se ao ponto 1, ao passo que a C foi registrada no ponto 2. No ponto 1 observa-se uma deposição com espessura estimada de pelo menos 2.5 metros. Na figura A é possível notar o imbricamento dos blocos e o seu tamanho, cujo eixo maior varia entre centimétrico a métrico. No ponto 2 são observados blocos com maior tamanho de eixo maior.



Figura 82. Observações de campo evidenciando espessuras de depósitos do processo de corridas de detritos de 1967 e tamanhos dos blocos. A fotografia A se refere ao ponto 3, as fotografias B, C e D correspondem a registros de campo do ponto 4, E e F remetem ao ponto 5 e G ao ponto 7. No ponto 3 observa-se uma grande deposição de blocos, cujo eixo maior pode chegar a 1 metro. Entretanto, observações de campo revelaram deposição de blocos ainda maiores. No ponto 4, que corresponde às figuras B, C e D é possível observar um grande depósito de blocos, com predomínio dos que possuem eixo maior elevado. Nesse sentido, destaca-se o depósito de corrida na fotografia C – aonde é possível estimar cerca de 4,0 metros de deposição. Neste é evidente o predomínio de blocos maiores em meio à massa de solo. A figura B mostra um processo de barramento natural, fato relatado também nas bibliografias sobre o evento de 1967. Sobre esta assertiva, é comum em processos de debris flow formarem-se pequenos barramentos de detritos que ao se acumularem se rompem, lançando um grande volume de materiais à jusante (COSTA; SCHUSTER, 1988; TAKAHASHI, 1981; TAKAHASHI, 2014). Na fotografia D são observados muitos blocos, cujo eixo maior varia entre centimétrico a métrico. No ponto 5 (fotografias E e F) há um predomínio de deposição de blocos com elevado eixo maior. Nesse sentido, pode-se estimar deposição de material carregado no fluxo de cerca de 3 a 4 metros de altura. No ponto 7 também houve um predomínio de deposição de blocos com grande eixo maior, e observações de campo permitiram estimar suas dimensões em cerca de 3.5 a 4 metros.



Figura 83. Registro de campo do ponto 6. Nas fotografias A e B é possível observar um grande acúmulo de bloco, com tamanhos variáveis (centimétricos a métricos), porém há predominância de blocos de eixo maior maiores. Na figura A é possível estimar em 4.5 metros a altura do bloco.



Figura 84. Observações de campo a respeito da espessura de depósitos. Na figura A, que corresponde a registros de campo do ponto 8, foram encontrados diversos depósito de blocos, com tamanhos variáveis (centimétricos a métricos). Assim, no depósito de uma das margens do tributário “T” é possível estimar 2.5 metros de material oriundo da corrida de detritos de 1967. O ponto 9 (figuras B e C) foi obtido na confluência do tributário “T” com a drenagem principal da Bacia Santo Antônio e neste local a quantidade de blocos diminuiu, entretanto, em campo também foi estimado a espessura de 2.5 metros de depósito.



Figura 85. Depósito de blocos nas margens de ao longo do Ribeirão do Ouro (fotografia A). Os blocos variam de centimétricos a métricos, com predominância de blocos maiores, que podem chegar a 3 metros (fato observado e registrado em campo). A figura B, registrada em uma das margens do Ribeirão do Ouro, evidencia um depósito de blocos de variados tamanhos, com presença de blocos de grande eixo maior.

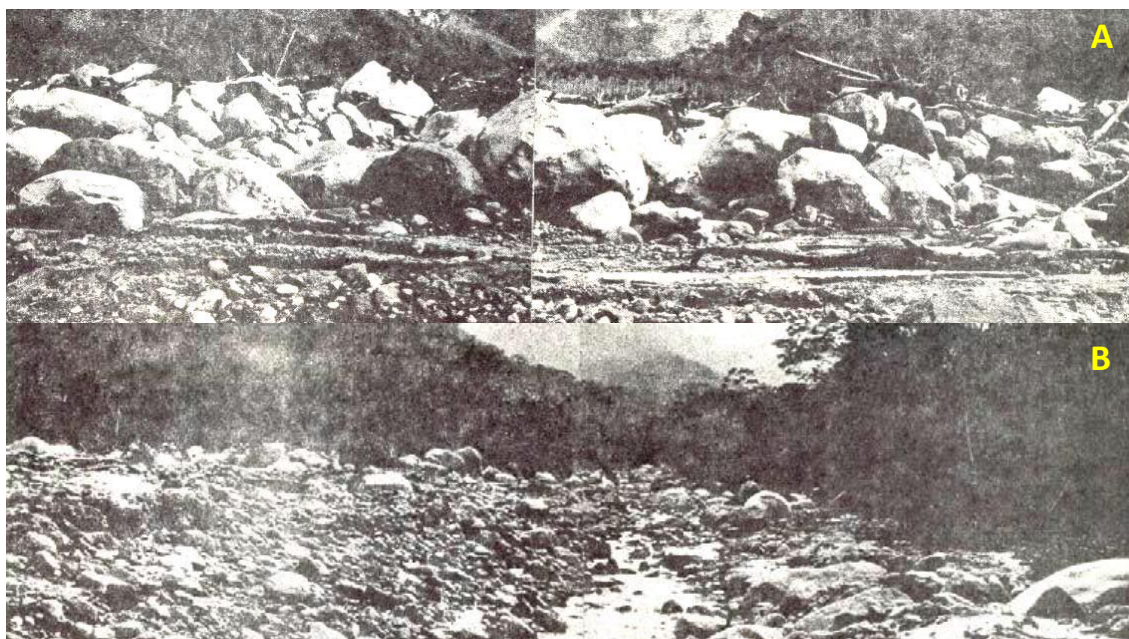


Figura 86. Deposição dos depósitos nos rios tributários do Santo Antônio. Segundo Cruz (1974), (A) O baixo vale do Rio Mantegueira, localizado na porção superior à direita da bacia (tributário do Ribeirão do Ouro) transformou-se em um “rio de pedras”, (B) formando vastos taludes de detritos em poucas horas, com blocos de mais de 3 metros de eixo maior (CRUZ, 1974). Segundo a mesma autora, os blocos maiores foram depositados nos pés das escarpas, formando grandes taludes de detritos.

A zona de espessura de 3 metros no vale do tributário “QR” (Córrego Quinhentos Réis) foi estimada a partir de dados bibliográficos, uma vez que em campo não foi possível visitar o local, devido ao seu difícil acesso. Assim, baseado em relatos de Cruz (1974), nas quebras de relevo, no formato do vale e cicatrizes de Fúlfaro et al. (1976), foi estabelecida a espessura de 3 metros para a região.

Por fim, a zona de espessura de 5 metros, localizada na planície aluvial do Rio Santo Antônio foi delimitada e estimada a partir de alguns pontos de campo realizados no local (11, 12 e 14), além de complementações por parte da bibliografia existente (CRUZ, 1974; GRAMANI, 2001; NERY, 2016). Cabe destacar que o ponto 13 foi obtido em relevo de meia encosta e os resultados encontrados foram referentes ao processo de escorregamento, e não de corrida de detritos. A figura 87 apresenta alguns resultados utilizados para estimar a espessura da respectiva zona.

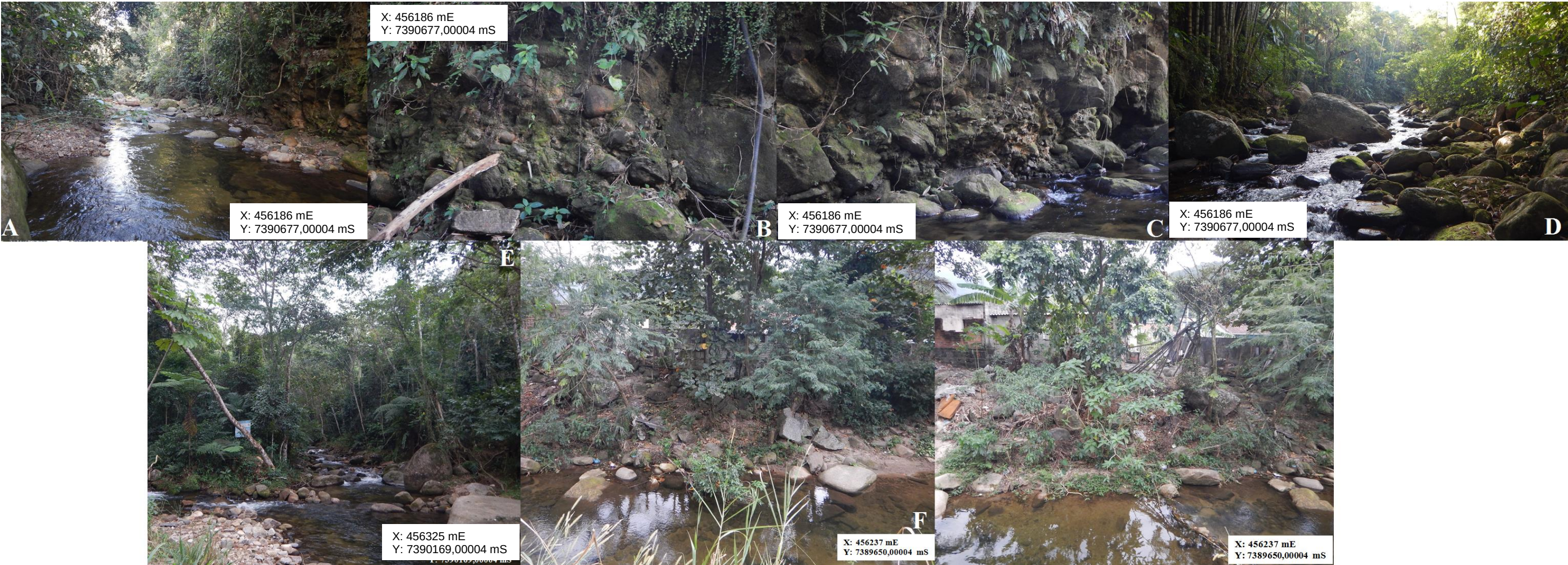


Figura 87. Fotografias referentes aos pontos de campo 11 (A, B, C e D), 12 (E) e 14 (F e G). Todos se referem à zona de espessura de 5 metros da figura 12. Nas figuras A a D (ponto 11) são observados blocos rochosos de grande eixo maior, e com depósito estimado em campo de 5 metros (a fotografia A exibe um perfil com 5 metros). As fotografias B e C evidenciam que no mesmo depósito existem grandes blocos rochosos, bem como na drenagem do Santo Antônio (D). O ponto 12 (fotografia E) foi obtido na confluência de dois tributários ao Rio Santo Antônio e evidencia a existência de grandes blocos rochosos no leito das drenagens e em suas margens. O ponto 14 (fotografias F e G), localizado na área urbana da Bacia Santo Antônio, revela depósito de blocos nas margens da drenagem e em seu leito. Foi estimado também em campo a espessura de 5 metros dos depósitos.

Adicionalmente, está registrada nas obras de Cruz (1974) e de Gramani (2001) que ao longo da Bacia Santo Antônio, em sua planície aluvial, foram criados depósitos de 4 a 5 metros de espessura, com blocos de 5 metros de eixo maior. Nesse sentido, foi verificado em campo que a deposição de blocos provavelmente se cessou na porção distal do primeiro alvéolo esquerdo da Bacia Santo Antônio (primeiro morro esquerdo da bacia, considerando o sentido litoral- Serra do Mar), e, portanto, a planície a qual os autores se referem é a zona de espessura de 5 metros, uma vez que a sua jusante ocorreu o processo de corrida de lama e inundação. Assim, a configuração final da respectiva zona também seguiu estas assertivas.

Por fim, destaca-se que nos pontos de campo de 15 a 20 foram registrados indícios apenas de eventos relacionados aos escorregamentos, uma vez que estes foram realizados no relevo de meia-encosta e no topo do primeiro alvéolo direito da Bacia Santo Antônio. Assim, a etapa de fotointerpretação das fotos aéreas de 1973 e as cicatrizes de escorregamento elaboradas por Fúlfaro et al. (1976) corroboraram tal afirmativa.

A partir das isópacas estimadas, foi possível estipular o volume do depósito das corridas de detritos ocorridas em 1967, baseada na seguinte correlação empírica relatada por Nery (2016):

$$V_d = A_d \cdot 2,0$$

Onde V_d é o volume do depósito (m^3), A_d se refere a sua área (m^2) e 2,0 m é a espessura média da deposição. O respectivo autor baseou-se nas proposições de campo relatadas por Conq et al. (2015), que observaram essa espessura em depósitos na bacia do Córrego do Príncipe, em Teresópolis (RJ). Entretanto, como o presente trabalho estimou as espessuras de cada zona de deposição, o valor de 2,0 metros foi substituído pelos valores aqui relatados (Tabela 1).

Tabela 1. Volume (m^3) das zonas de deposição calculadas segundo a correlação empírica relatada por Nery (2016).

Zona de deposição (metros)	Área (m^2)	Volume (m^3) (A_d * espessura de deposição na zona de isópaca) (Adaptado de Nery, 2016)
4	31449,38465	125797,5386
3	44860,91716	134582,7515
5	728116,523	3640582,615
3	35958,5	107875,4814
2,5	5020,940957	12552,35239
4	9603,242128	38412,96851
4,5	4345,795569	19556,08006
2,5	4699,477351	11748,69338
2,5	25694,07378	64235,18445
Total	889748,8484	4155343,665

A figura a seguir exhibe a distribuição das áreas de deposição em cada zona, bem como seus respectivos volumes (Figura 88 e 89).

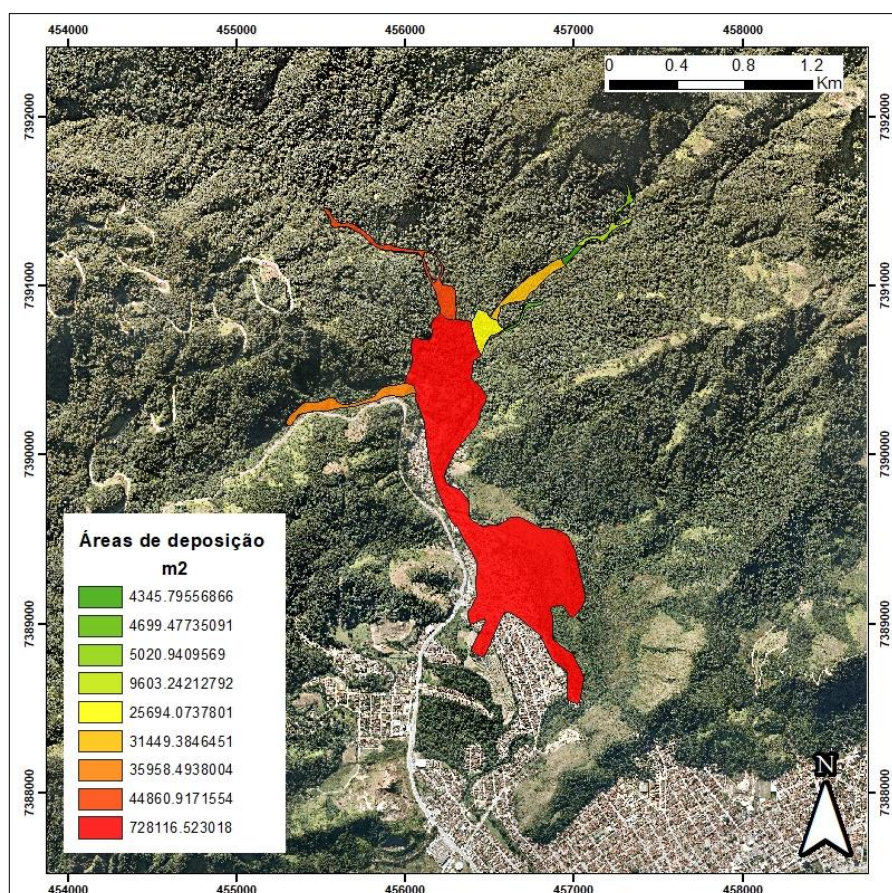


Figura 88. Áreas (em m^2) das zonas de isópaca da corrida de detritos de 1967, na bacia Santo Antônio.

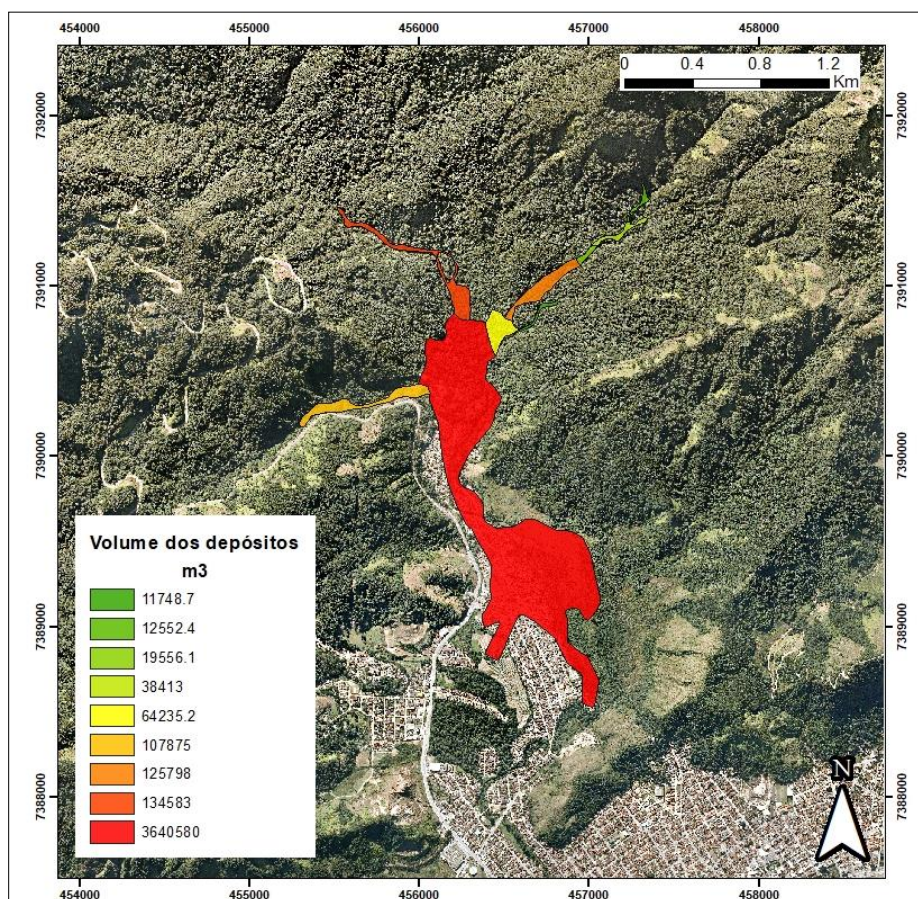


Figura 89. Volumes calculados (em m³) das zonas de isópacas da corrida de detritos de 1967, na bacia Santo Antônio.

Não obstante, considerando os limites da área-alvo, também foram calculadas as áreas das superfícies das cicatrizes de escorregamento mapeadas por Fúlfaro et al. (1976) e das extraídas nesse trabalho, identificadas nas fotografias aéreas datadas de 1973 que foram mosaicadas e georreferenciadas no âmbito desse projeto. Conforme já explicitado, essas feições foram utilizadas como áreas de lançamento na modelagem morfométrica, uma vez que as corridas de detritos de 1967 foram essencialmente do tipo primárias. Em seguida, assim como realizado com as áreas de deposição, foram calculados os volumes das superfícies das respectivas feições, em planta, baseando-se na seguinte correlação empírica proposta por Augusto Filho (1993) e Nery (2016):

$$V_c = A_c \cdot 0,5$$

Onde V_c é o Volume da cicatriz (m^3), A_c remete a sua área (m^2) e 0,5 é a espessura da ruptura (m). Entretanto, cabe destacar que foram também calculados volumes para outras espessuras de ruptura (1,0 m; 1,3 m e 1,5 m), de modo a obter uma melhor calibração do modelo em relação ao volume inicial do processo relatado na literatura.

Neste trabalho foram utilizadas duas origens de áreas de lançamento para a modelagem morfométrica: cicatrizes mapeadas por Fúlfaro et al. (1976) e cicatrizes extraídas em fotografias aéreas mosaicadas e georreferenciadas, datadas de 1973. Nesse sentido, foram calculadas as áreas e volumes das superfícies das cicatrizes para cada uma das fontes, considerando as espessuras supracitadas e os limites da área com e sem o *buffer* de 600 metros. Cabe destacar que o *buffer* foi aplicado visando diminuir efeitos de distorções nas bordas, especialmente na confecção dos Modelos Digitais do Terreno (MDT). Nesse sentido, as figuras a seguir (90 e 91) apresentam o MDT da área-alvo com as cicatrizes de Fúlfaro et al. (1976) e as identificadas no âmbito deste projeto em fotografias aéreas de 1973.

As áreas e os volumes totais das superfícies das respectivas cicatrizes de escorregamento são apresentadas na tabela 2, e a tabela 3 exhibe os diferentes volumes considerando os valores de densidade adotados nos diferentes cenários das simulações (ver também quadro 12).

O trabalho de Fúlfaro et al. (1976) estimou, a partir de suas superfícies das cicatrizes de escorregamento em planta, um volume de escorregamento deflagrado de 4.200.000 m^3 . Os autores, adotando a densidade de 1,8 ton/ m^3 , concluíram que o volume do material deflagrado pelas cicatrizes de escorregamento na bacia Santo Antônio em 1967 foi de 7.560.000 toneladas, o que leva a uma espessura média de ruptura de 1,3 m (cálculo realizado no presente trabalho, considerando a correlação empírica de Augusto Filho (1993) e Nery (2016). Destaca-se que o volume estimado por Fúlfaro et al. (1976) foi selecionado como norteador nas análises pelo fato dele ser o mais citado na literatura científica e que esses autores não indicam as profundidades de cicatrizes utilizadas nos seus cálculos.

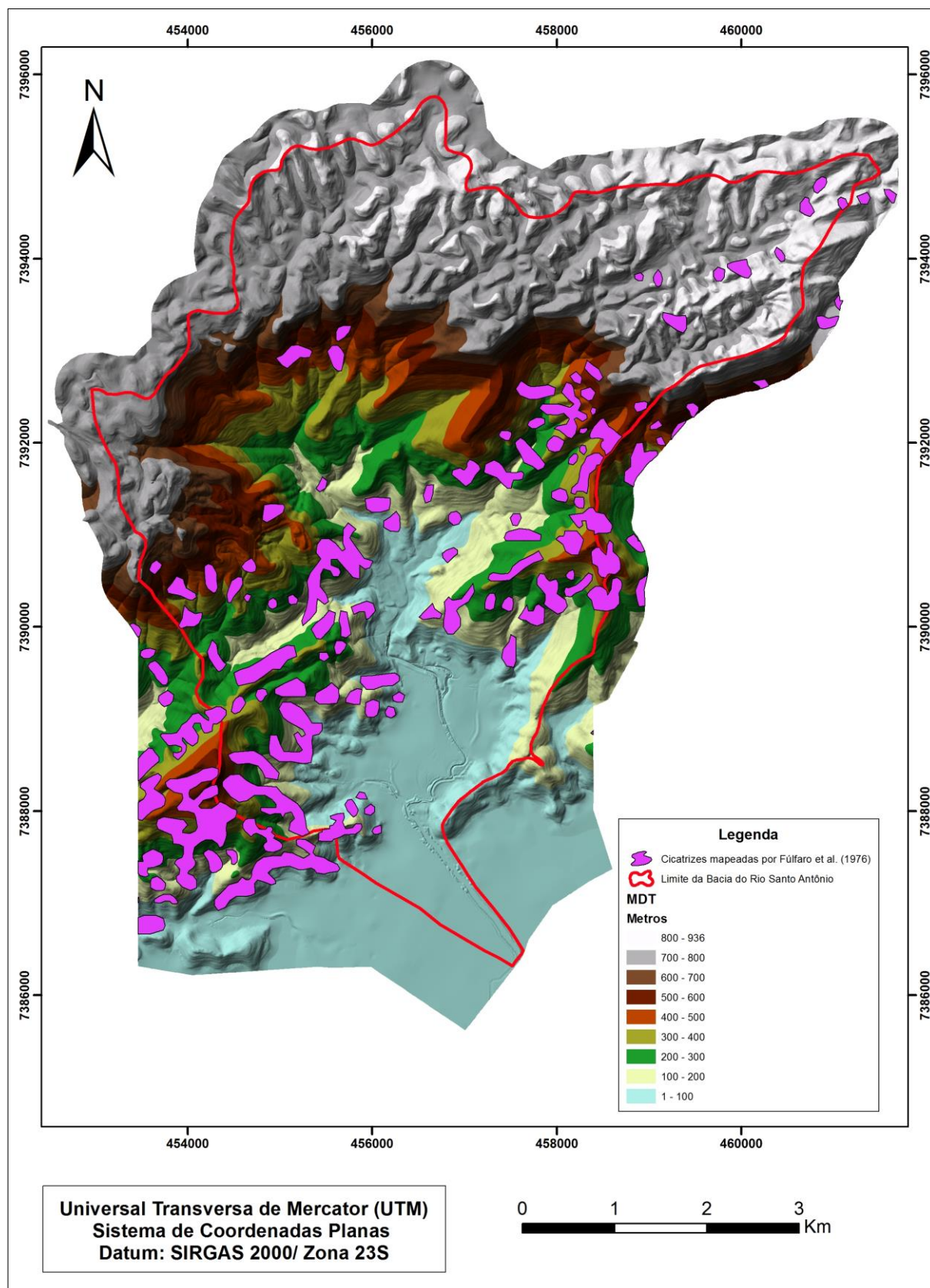


Figura 90. Modelo Digital do Terreno (MDT) da área-alvo em escala 1:10.000 (IGC, 1979) com o *buffer* de 600 metros e cicatrizes de escorregamento mapeadas por Fúlvaro et al. (1976).

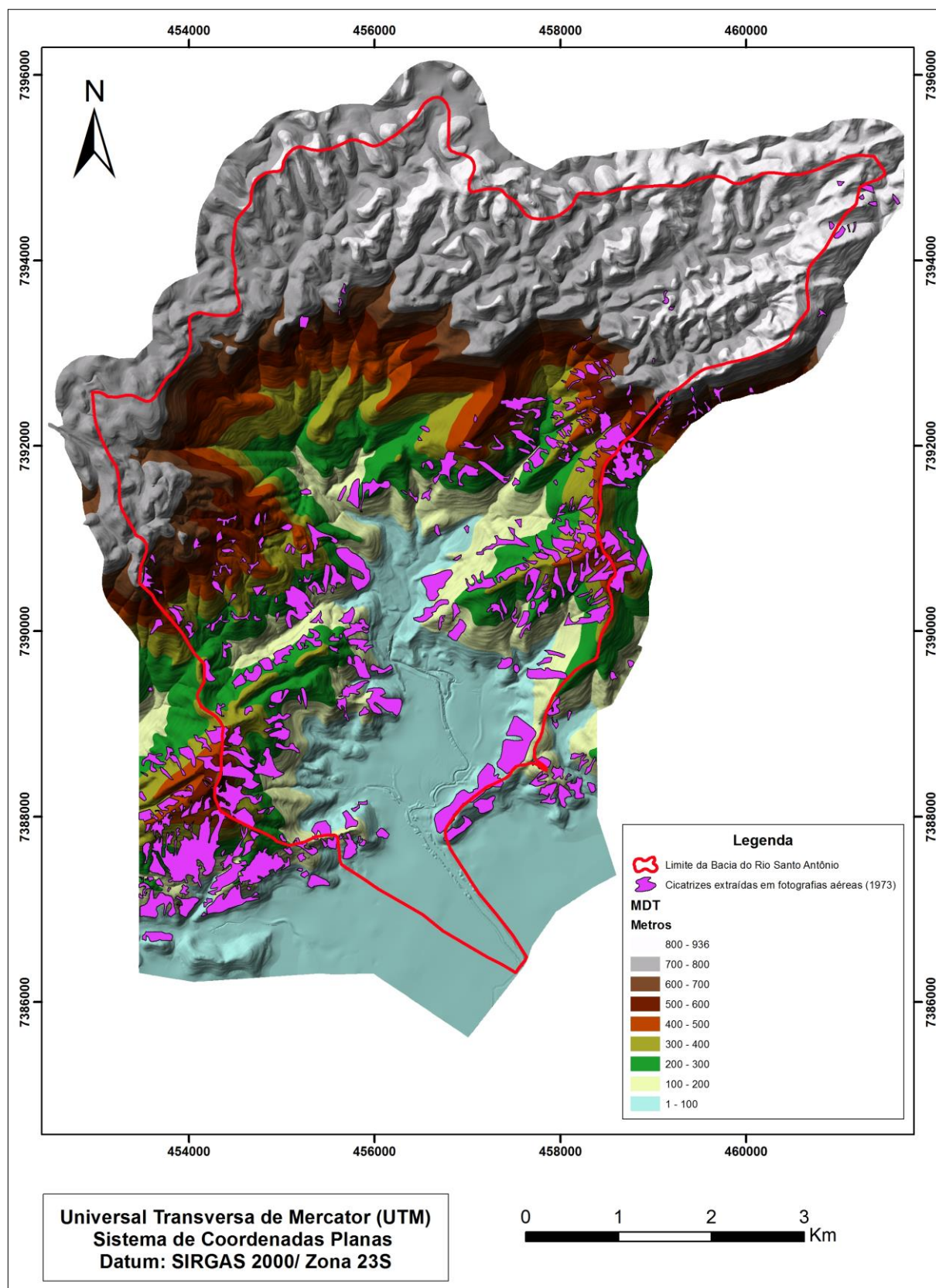


Figura 91. Modelo Digital do Terreno (MDT) da área-alvo em escala 1:10.000 (IGC, 1979) com o *buffer* de 600 metros e cicatrizes de identificadas em fotografias aéreas de 1973.

Tabela 2. Áreas e volumes totais calculados nas superfícies das cicatrizes de escorregamento, em planta.

Origem da cicatriz	Área total (m ²)	Volume total em superfície (m ³) (considerando espessuras de ruptura de):			
		0,5 m	1 m	1,3 m	1,5 m
Fúlfaro et al. (1976) com <i>buffer</i> na área alvo	4781444,321	2390722,161	4781444,321	6215877,618	7172166,482
Fúlfaro et al. (1976) sem <i>buffer</i>	3153161,653	1576580,827	3153161,653	4099110,149	4729742,48
Extraídas em fotografias aéreas com <i>buffer</i> na área-alvo	4260271,183	2130135,592	4260271,183	5538352,538	4787037,333
Extraídas em fotografias aéreas sem <i>buffer</i>	2715570,921	1357785,46	2715570,921	3530242,197	4073356,381

Tabela 3. Estimativa dos volumes totais calculados nas cicatrizes de escorregamento considerando as diferentes densidades.

Origem da cicatriz	Volume total (toneladas)											
	Ruptura da cicatriz de 0,5 m			Ruptura da cicatriz de 1 m			Ruptura da cicatriz de 1,3 m			Ruptura da cicatriz de 1,5 m		
	1,8 ton/m ³	1,9 ton/m ³	2,0 ton/m ³	1,8 ton/m ³	1,9 ton/m ³	2,0 ton/m ³	1,8 ton/m ³	1,9 ton/m ³	2,0 ton/m ³	1,8 ton/m ³	1,9 ton/m ³	2,0 ton/m ³
Fúlfaro et al. (1976) com <i>buffer</i> na área alvo	4303299,8898	4542372,1059	4781444,322	8606599,7778	9084744,2099	9562888,642	11188579,7124	11810167,4742	12431755,236	12909899,6676	13627116,3158	14344332,964
Fúlfaro et al. (1976) sem <i>buffer</i>	2837845,4886	2995503,5713	3153161,654	5675690,9754	5991007,1407	6306323,306	7378398,2682	7788309,2831	8198220,298	8513536,464	8986510,712	9459484,96
Extraídas em fotografias aéreas com <i>buffer</i> na área-alvo	3834244,0656	4047257,6248	4260271,184	7668488,1294	8094515,2477	8520542,366	9969034,5684	10522869,8222	11076705,076	8616667,1994	9095370,9327	9574074,666
Extraídas em fotografias aéreas sem <i>buffer</i>	2444013,828	2579792,374	2715570,92	4888027,6578	5159584,7499	5431141,842	6354435,9546	6707460,1743	7060484,394	7332041,4858	7739377,1239	8146712,762

Concomitantemente à realização das simulações no *software* RAMMS, um trabalho de campo foi realizado na região de Guaratuba (PR), na Serra do Mar paranaense, onde está inserido o oleoduto OSPAR (Oleoduto Santa Catarina – Paraná) e houve o registro no dia 11 fevereiro de 2017 de ocorrência de escorregamentos e corridas de detritos na bacia hidrográfica que o mesmo se situa (Bacia do Rio São João) (Figura 92). A realização deste campo possibilitou o reconhecimento do processo *in loco*, dada a sua ocorrência recente, sendo que muitas estruturas da dinâmica do fluxo ainda estavam preservadas, tais como o grande imbricamento dos blocos rochosos (Figura 93a). Ademais, a compreensão do processo também se deu em relação ao mecanismo de deposição do material mobilizado e dos parâmetros que envolvem a dinâmica do fluxo, tais como viscosidade e velocidade, além da identificação dos materiais envolvidos no processo. Ademais, a realização desta campanha de campo também facilitou a reflexão acerca dos riscos que envolvem a ocorrência de corridas de detritos em áreas de inserção de dutovias (Figura 93b).

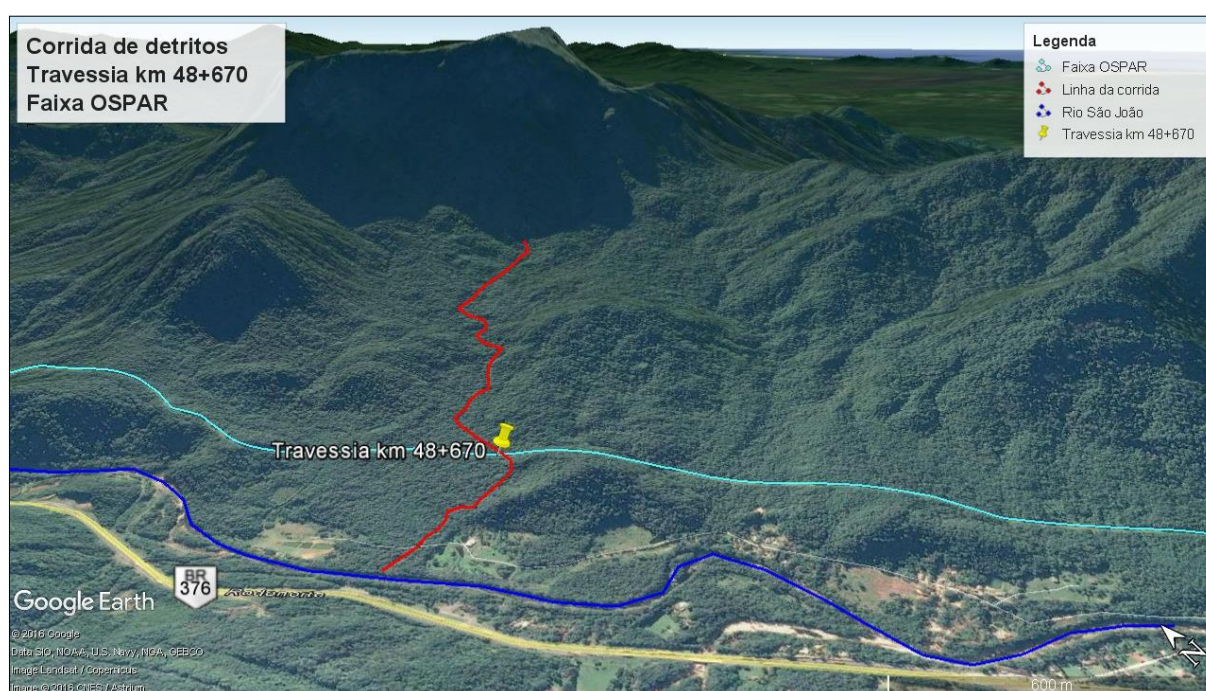


Figura 92. Local de ocorrência da corrida de detritos na faixa OSPAR. Fonte: Transpetro (2017).

A corrida de detritos em Guaratuba (PR), assim como em Caraguatatuba (SP) em 1967, se iniciou com escorregamentos generalizados nas encostas da Serra do Mar, porém em território paranaense, de modo que os materiais mobilizados atingiram os canais de drenagem e os percorreram até as porções de declive mais suave, na parte inferior das bacias hidrográficas. Tal fato foi corroborado durante as atividades de campo, onde foram registrados depósitos de blocos na desembocadura dos canais tributários com o rio São João, de ordem maior na bacia hidrográfica (Figura 93c).

Relatos dos moradores locais, bem como dos técnicos que operam o duto, descrevem que durante o evento um forte estrondo foi ouvido, conforme também observado e amplamente discutido na literatura na caracterização de corridas de detritos (RONDINE, 1984; GRAMANI, 2001; TAKAHASHI, 2007). Ademais, de acordo com dados preliminares da Transpetro (2017), os escorregamentos nas encostas – e posteriormente as corridas de detritos – foram deflagrados por um acumulado pluviométrico de 200 mm em 5 horas na noite do dia 11/02/2017. Dentre os principais danos materiais, houve a ruptura da fibra óptica na travessia do duto, e a faixa foi totalmente coberta superficialmente por blocos métricos, com registro de processos erosivos em sua porção à jusante (TRANSPETRO, 2017) (Figura 93d).

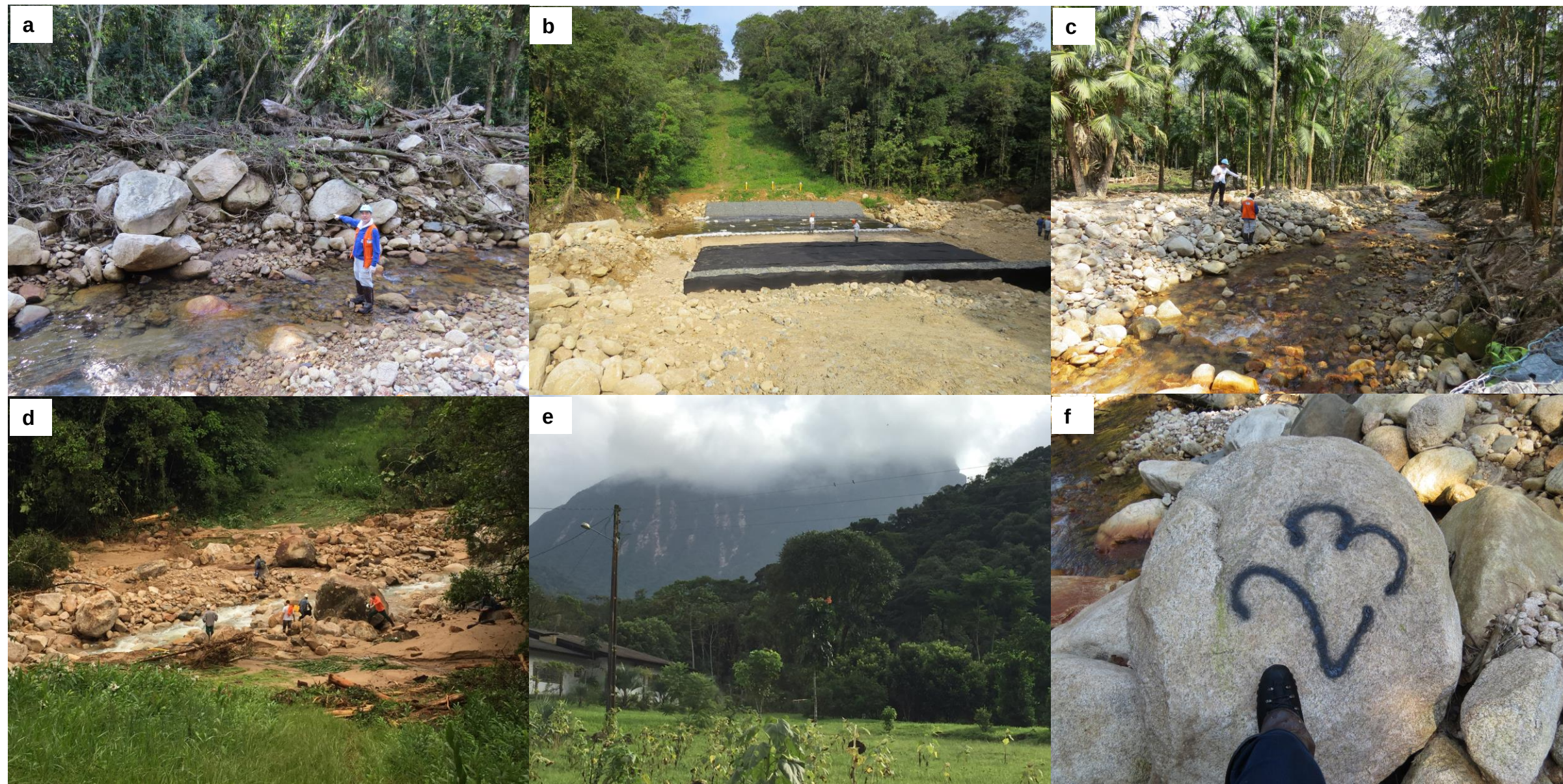


Figura 93. Registros fotográficos da corrida de detritos na faixa de travessia do duto OSPAR. (a) Imbricamento dos blocos rochosos após deposição do material mobilizado, com presença de blocos centimétricos a métricos; (b) Faixa de travessia do duto OSPAR após retirada dos blocos (foto registrada em Setembro/ 2017); (c) Deposição dos blocos nas proximidades da desembocadura do rio tributário com o Rio São João, com predominância de blocos centimétricos; (d) Registro fotográfico na faixa de travessia do duto logo após o evento; (e) Cicatrizes de escorregamento nas encostas, responsáveis pela origem de mobilização do material nas corridas; (f) Acompanhamento do movimento dos blocos por indicação numérica com registro das coordenadas geográficas. Fonte: a, b, c, f – IPT (arquivo pessoal); d, f – Transpetro (2017).

Conforme observado, nota-se que a corrida de detritos ocorrida na faixa de travessia do duto OSPAR teve uma predominância de fluxo de blocos, com materiais mais grosseiros, e, portanto, um comportamento mais turbulento. Nesse sentido, houve uma maior predominância de deposição de blocos menores em direção à jusante do canal, especialmente nas áreas próximas de desembocadura dos tributários na drenagem principal, ao passo que nas porções a montante foi possível registrar blocos de dimensões métricas. É importante destacar que para este tipo de corrida, com característica mais grosseira e fluxo turbulento, as taxas erosivas são maiores e relevantes, podendo agravar os danos provocados.

Assim, com essas informações complementares em mãos, o processo de simulação da corrida de detritos de 1967 foi realizada na área-alvo. Para tal, inicialmente foram selecionados os dados de entrada (*inputs*), considerando trabalhos já publicados, dados contraídos nos trabalhos de campo e outros resultados até então obtidos, em capítulos anteriores, conforme as exigências do programa. Nesse sentido, o quadro 11 exhibe os *inputs* requeridos pelo programa, seu formato, forma de aquisição, o parâmetro numérico obtido e os possíveis tratamentos empregados.

Os referenciais bibliográficos utilizados para a compreensão do fenômeno ocorrido em 18/03/1967 na área de estudo foram Cruz (1974), Fúlfaro et al. (1976), Guidicini e Nieble (1984), Cruz (1990) Massad et al. (1997), Gramani (2001), Sakai et al. (2013), Sakai (2014) e Reis e Zaine (2018). Os respectivos autores descreveram em suas obras as corridas de detritos e os escorregamentos deflagrados na região de Caraguatatuba (SP), utilizando diferentes metodologias, técnicas e abordagens. Destaca-se que o trabalho de Cruz (1974), buscando compreender os processos envolvidos na dinâmica da paisagem na Serra do Mar e litoral em Caraguatatuba (SP), realizou um diagnóstico da área sob aspectos geológicos, geomorfológicos e climatológicos, abordando inclusive os escorregamentos e corridas de detritos ocorridos no local em 1967. Dessa maneira, a partir da obra da autora, importantes relatos foram resgatados, principalmente pelo fato de que seu trabalho foi um dos primeiros realizados após o grande desastre, o que o caracteriza como uma importante fonte bibliográfica capaz de fornecer muitos detalhes sobre o evento.

Quadro 11. Inputs requeridos no software RAMMS, formato, origem de aquisição e parâmetro numérico.

Input	Formato	Origem	Parâmetro numérico
Dados topográficos	ASCII	MDT em escala 1:10.000	Grid de 8 metros
Áreas de lançamento/desprendimento	Vetorial (<i>shapefile</i>)	Cicatrizes de escorregamento mapeadas por Fúlfaro et al. (1976) e extraídas em fotos aéreas de 1973	-----
Espessura da área de lançamento	Vetorial (<i>shapefile</i>)/inferidas no programa ou importadas da tabela de atributos do <i>shapefile</i> das áreas de lançamento	Retro-análise (Fúlfaro et al., 1976; Massad et al., 1997) e observações em trabalhos de campo	0,5 metros
			1,0 metros
			1,3 metros
			1,5 metros
Área da simulação	Vetorial (<i>shapefile</i>)	Área-alvo com <i>buffer</i> de 600 metros	-----
Tempo de duração da corrida de detritos	Segundos	Retro-análise (Gramani, 2001)	45 minutos (2700 segundos)
Densidade do material	Kg/m ³	Retro-análise (Fúlfaro et al., 1976; Listo e Vieira, 2015; Reis e Zaine, 2018)	Fúlfaro et al. (1976) – 1,8 ton/m ³ (1800 kg/m ³)
			Reis e Zaine (2018) – 2000 kg/m ³)
			Listo e Vieira (2015) – 1700 kg/m ³ , 18000 kg/m ³ , 19000 kg/m ³ e 20000 kg/m ³
μ (atrito)	adimensional	Cálculo da tangente do ângulo de deposição e retro-análise (Reis e Zaine, 2018)	0,05
ξ (viscosidade)	m/s ²	Retro-análise (características do fluxo descritas em Cruz (1974), Fúlfaro et al. (1976) e Gramani (2001)) e testes empíricos	200

Cabe salientar que o MDT confeccionado, cuja base topográfica são as cartas do IGC (1979), possui um intervalo temporal de mais de uma década após o evento de 1967, e, portanto, não representa as reais condições do relevo antes das corridas. Acerca dessa limitação, destaca-se que diferenças notórias são observadas no formato do leito do rio Santo Antônio, que era originalmente meandrante (Figura 94) e que foi posteriormente retificado (Figuras 90, 91 e 95). Estas diferenças certamente afetam os resultados das simulações, pois os trajetos de fluxo e a áreas de deposição dos detritos são significativamente influenciados pelo relevo (REIS; ZAINÉ, 2018).



Figura 94. Fotografia aérea de 1973, exibindo o canal na planície da bacia Santo Antônio ainda não retificado (em vermelho). A base topográfica utilizada nas modelagens, em escala 1:10.000, é de 1978/ 1979.



Figura 95. Setor retificado do Rio Santo Antônio na planície nos dias atuais. Foto de 2016. Fonte: Arquivo pessoal Fábio Augusto Gomes Vieira Reis.

Assim, com essas premissas consideradas, foram estabelecidas as seguintes rotinas nas simulações, considerando as cicatrizes de Fúlfaro et al. (1976) e as mapeadas nas fotografias aéreas de 1973:

Quadro 12. Rotina estabelecida nas simulações dos diferentes cenários para as 2 áreas de lançamento consideradas (cicatrizes de Fúlfaro et al. (1976) e mapeadas em fotografias aéreas de 1973).

		Espessura da ruptura (m)		
		1,0	1,3	1,5
Densidade do material (Kg/m ³)	1800	CF; CFA	CF; CFA	-
	1900	CF; CFA	CF; CFA	-
	2000	CF; CFA	CF; CFA	CF; CFA

Onde: CF – cicatrizes mapeadas por Fúlfaro et al. (1976); CFA – cicatrizes delimitadas nas fotografias aéreas de 1973 (Figuras 90 e 91).

É importante salientar que inúmeros testes empíricos foram realizados, empregando-se diferentes valores de viscosidade (ξ) e outros com distintos valores de tangente do ângulo de atrito (μ). Entretanto, além dos resultados não terem sido satisfatórios, a etapa de retro-análise (Quadro 12) evidenciou que o fluxo para a corrida de 1967 foi essencialmente granular, havendo predomínio da fase sólida (Figura 86). De acordo com o manual do programa, valores de viscosidade entre 100 e 200 m/s² referem-se a fluxos com caráter mais granular, ao passo que valores maiores que 200 m/s² indicam corridas de caráter mais lamoso (RAMMS, 2013). Ademais, aumentando-se o ângulo de deposição – e consequentemente da tangente – a modelagem não apresentava coerência com a deposição do fluxo observada por Cruz (1974), Nery (2016) e pelo mapa de isópacas elaborado neste trabalho (Figura 80), e, portanto, foi considerado o valor de 0,05 para todas as simulações, assim como realizado por Reis e Zaine (2018).

Outra ressalva se refere aos valores de densidade e ruptura adotados nas simulações. Norteando-se na obra de Fúlfaro et al. (1976), que estimou volumes de material mobilizado pelas cicatrizes de escorregamento em planta de 4.200.000 m³ e 7.560.000 toneladas, adotando a densidade de 1,8 ton/m³, observando-se a tabela 3 é possível observar que para ambas as cicatrizes adotadas na modelagem ocorreram algumas superestimações e subestimações. Cabe descartar que o mapa de cicatrizes elaborado por Fúlfaro et al. (1976), bem como o confeccionado no presente trabalho, a partir de fotografias aéreas de 1973, não envolveram a etapa de ortorretificação, que corrige distorções geométricas presentes na imagem (no caso deste trabalho, ambas as cicatrizes foram identificadas em fotografias aéreas antigas, datadas de 1973). Nesse sentido, considerando essa limitação, foram adotados os valores de densidade e espessura de ruptura que se aproximavam mais aos estimados por Fúlfaro et al. (1976) (Quadro 13).

Os resultados obtidos pela modelagem são exibidos a seguir, considerando valores homogêneos de ξ (200) e μ (0,05). No CD-ROM em anexo, estão listados arquivos em formato .gif que apresentam a evolução das corridas de cada cenário, baseadas na altura do fluxo que foi mobilizado (Quadro 13).

Quadro 13. Listagem dos arquivos .gif gerados pelas simulações realizadas no software RAMMS, presentes no CD-ROM que acompanha esta obra.

	Espessura de ruptura (m)	Densidade (kg/m ³)	Origem da cicatriz
GIF 1	1,0	1800	Fúlfaro et al. (1976)
GIF 2	1,0	1900	Fúlfaro et al. (1976)
GIF 3	1,0	2000	Fúlfaro et al. (1976)
GIF 4	1,3	1800	Fúlfaro et al. (1976)
GIF 5	1,3	1900	Fúlfaro et al. (1976)
GIF 6	1,3	2000	Fúlfaro et al. (1976)
GIF 7	1,5	2000	Fúlfaro et al. (1976)
GIF 8	1,0	1800	Cicatrices mapeadas em fotografias aéreas (1973)
GIF 9	1,0	1900	Cicatrices mapeadas em fotografias aéreas (1973)
GIF 10	1,0	2000	Cicatrices mapeadas em fotografias aéreas (1973)
GIF 11	1,3	1800	Cicatrices mapeadas em fotografias aéreas (1973)
GIF 12	1,3	1900	Cicatrices mapeadas em fotografias aéreas (1973)
GIF 13	1,3	2000	Cicatrices mapeadas em fotografias aéreas (1973)
GIF 14	1,5	2000	Cicatrices mapeadas em fotografias aéreas (1973)

No primeiro cenário (arquivo GIF 1 do CD-ROM) a modelagem das corridas se deu utilizando as cicatrizes identificadas por Fúlfaro et al. (1976), a partir de espessura de ruptura de 1 metro e densidade do material de 1800 kg/m³, valores inclusive estimados pelo autor em sua respectiva obra. Nos resultados modelados, a corrida teve duração de 74 minutos, entretanto a geometria final dos depósitos pouco se alterou após 60 minutos, o que estaria em consenso com os relatos do evento relatado por Gramani (2001).

A figura a seguir exibe o resultado considerando a espessura do fluxo.

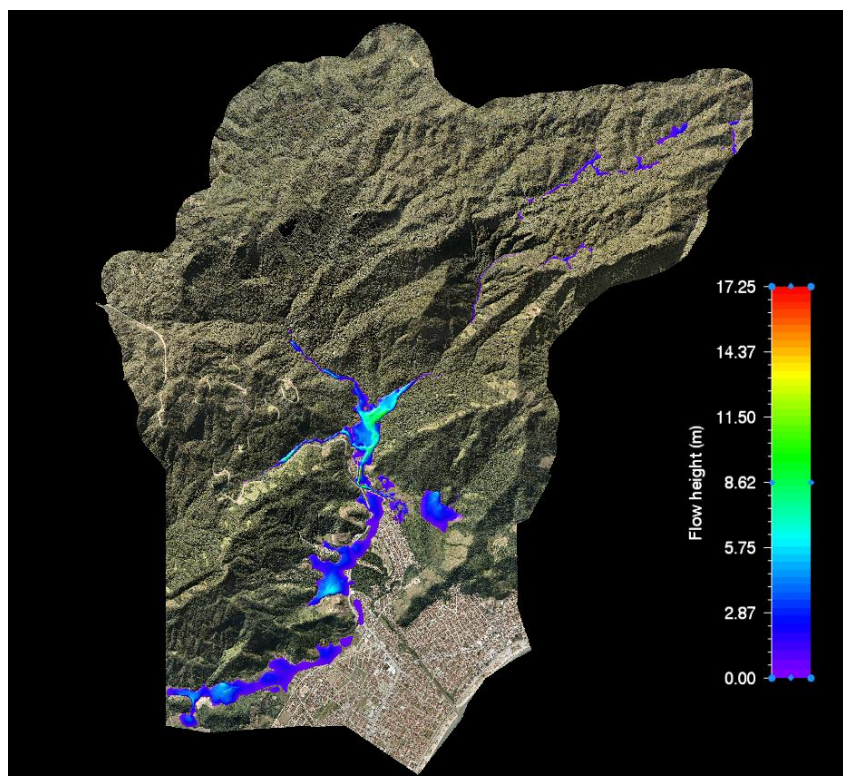


Figura 96. Configuração final da corrida de detritos simulada após 74 minutos considerando a altura do fluxo.

O cone de dejeção formado pelo evento não pôde ser representado pelas simulações, provavelmente devido ao modelo de elevação digital utilizado, que não corresponde às condições originais do rio Santo Antônio, que era meandrante, limitação também observada por Reis e Zaine (2018). É notório que a retificação do leito do rio causa um grande impacto nos fluxos e depósitos de detrito simulados, que se concentram principalmente no interior de suas margens retificadas atuais, nas regiões de baixa declividade. Ademais, a cronologia dos escorregamentos é outro fator que também pode influenciar na geometria final dos depósitos simulados, uma vez que a deposição primária de corridas geradas por escorregamentos iniciais pode alterar topografia do terreno a ser percorrido por corridas causadas por escorregamentos subsequentes, causando potenciais desvios e barramentos temporários e/ou definitivos (REIS; ZAINÉ, 2018). Por simplificação, todos os escorregamentos foram programados para ocorrer simultaneamente durante as simulações realizadas nesta pesquisa.

Para fins comparativos foram plotados os depósitos mapeados no mapa de isópacas (Figura 80) com os resultados modelados (Figura 97).

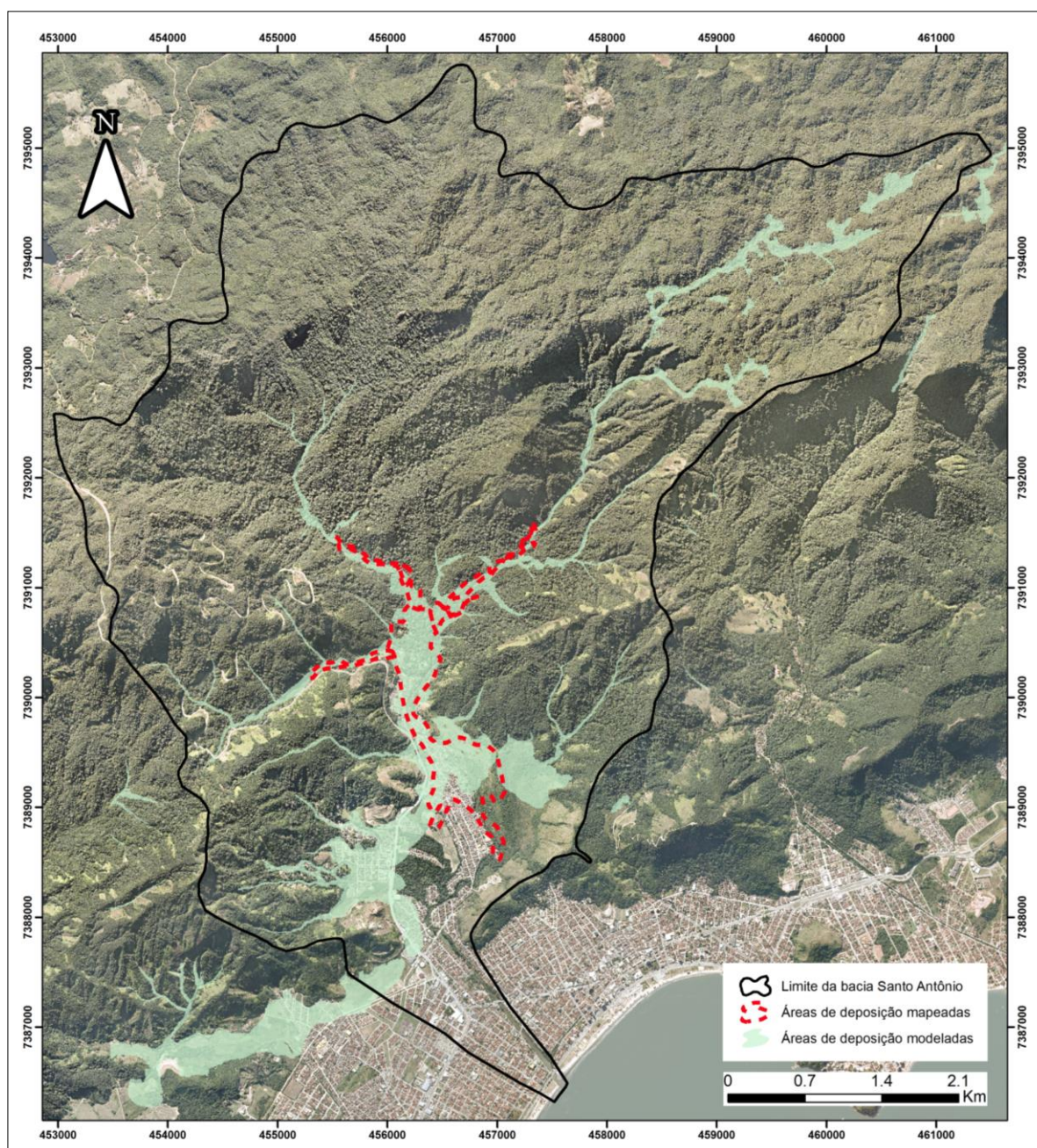


Figura 97. Comparação entre áreas de deposição modeladas considerando as cicatrizes de Fúlfaro et al. (1976) a partir de espessura de ruptura de 1 metro e densidade de 1800 kg/m^3 e as áreas de deposição identificadas neste trabalho.

Embora o depósito mapeado tenha considerado fotos aéreas de 1973, 6 anos após o evento, é notório na área de deposição modelada que a limitação do MDT (baseado em dados topográficos de 1979) influenciou no resultado calculado pelo modelo, principalmente no que tange ao rio Santo Antônio em área de planície, que no bairro Rio do Ouro foi canalizado. Ademais, outras áreas de deposição foram

identificadas pelo modelo, que não foram mapeadas no mapa de isópacas. Sobre essa assertiva, Reis e Zaine (2018) elucidaram que nesses locais os depósitos são classificados como solos aluviais e talvez tais disparidades possam estar associadas à tipologia dos materiais mobilizados pelos escorregamentos, visto que esses alvéolos mais à jusante da bacia possuem uma geologia distinta dos alvéolos à montante do cone de dejeção de detritos formado, eventualmente com perfis de intemperismo e coluviões distintos, contendo por exemplo menos blocos rochosos.

Outro aspecto interessante do resultado inferido pelo modelo foram os depósitos de corrida de detritos na área de planalto, distribuídos nas planícies fluviais dos rios tributários do Santo Antônio.

As velocidades máximas atingidas pelo fluxo (Figura 98) indicam que nos vales dos canais tributários ao Santo Antônio, situados em áreas de relevo escarpado da Serra do Mar, foram calculadas pelo modelo em cerca de 10 m/s^2 , que na região da Rodovia dos Tamoios (SP-99) – local muito afetado pelos escorregamentos, no qual inclusive seu traçado foi totalmente modificado após o evento (Figura 99) – chegou na faixa dos 20 m/s^2 .

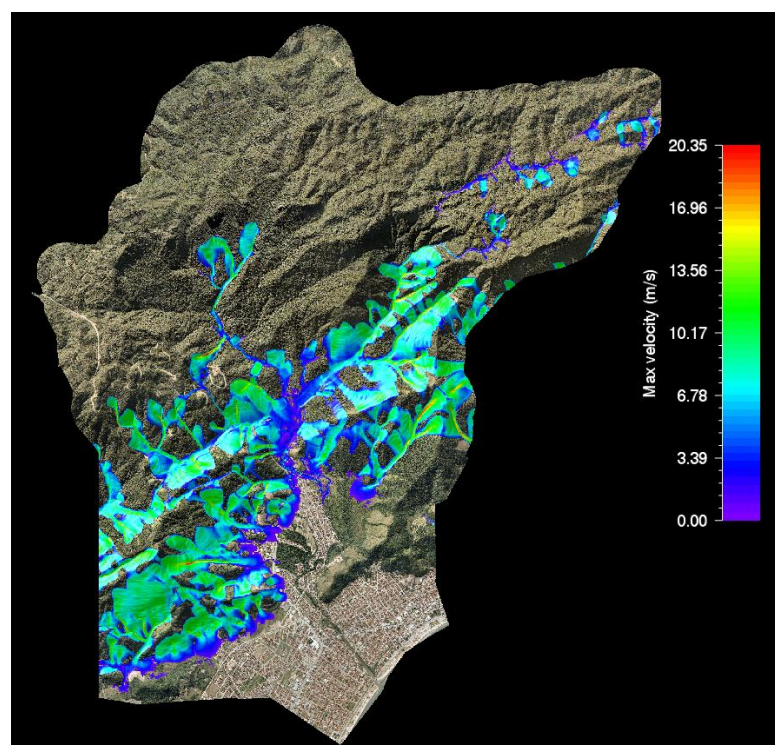


Figura 98. Velocidades máximas atingidas pelas corridas de detritos no cenário 1.



Figura 99. Rodovia dos Tamoios em 1967, após o evento. Fonte: Arquivo municipal.

Os cenários seguintes (GIF 2 e GIF 3) apresentaram resultados muito semelhantes, sendo que apenas o tempo de duração da corrida foi distinto entre estes – 75 minutos para o cenário 2 e 102 minutos para o cenário 3. As velocidades máximas do fluxo também foram semelhantes, bem como as espessuras do depósito (vide CD-ROM).

No cenário 4 (GIF 4) houve modificações quanto à espessura da ruptura, cujo valor inferido para simulação foi de 1,3 metros. Para essa configuração dos parâmetros, o tempo de duração da corrida foi de 91 minutos, cuja figura a seguir exhibe a disposição dos depósitos após esse período.

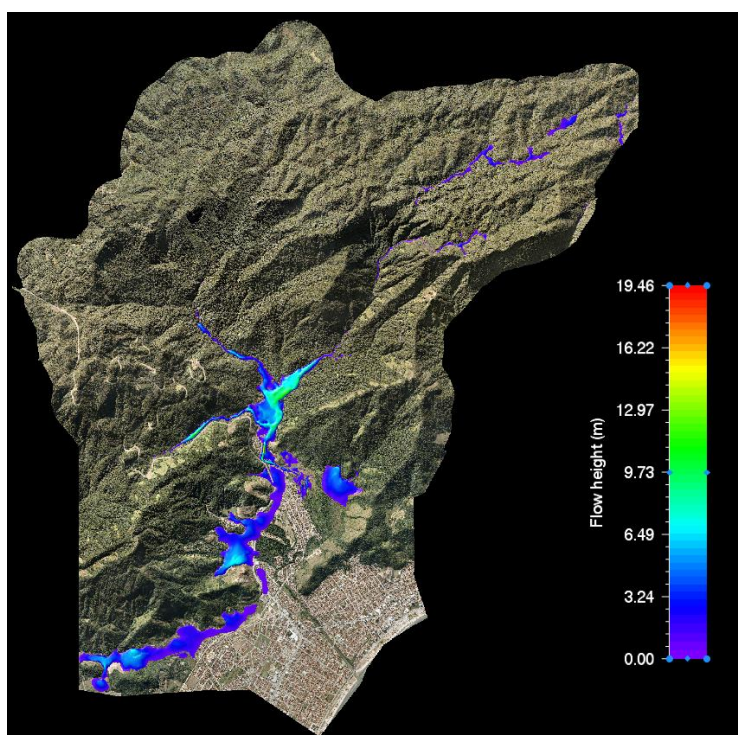


Figura 100. Configuração final da corrida de detritos simulada após 74 minutos considerando a altura do fluxo.

A notória diferença entre os cenários considerando espessuras distintas, como no caso dos cenários 1, 2 e 3 e 4, 5 e 6 se refere à espessura dos depósitos. Para os cenários 4, 5 e 6 observa-se espessuras de até 19 metros, na área de desembocadura e encontro dos fluxos de todos os tributários do rio Santo Antônio, ao passo que para os 3 primeiros cenários observa-se máximas de 17 metros (Figuras 100 e 96, respectivamente). Para ambos os cenários, considerando as mesmas rupturas (1,0 e 1,3 metros), a maior espessura dos depósitos é observada neste local, bem como identificada na delimitação das isópacas deste trabalho.

Sobre as velocidades máximas alcançadas pelo fluxo, observa-se que com o aumento da espessura de ruptura a corrida é ligeiramente mais rápida, alcançando valores de até $21,92 \text{ m/s}^2$ nos dois primeiros alvéolos no sentido litoral-continente. É interessante notar que estes locais, na etapa de retro-análise, mostraram maiores valores pluviométricos quando foram aplicados os Fatores de Desproporcionalidades (Figuras 62 e 71).

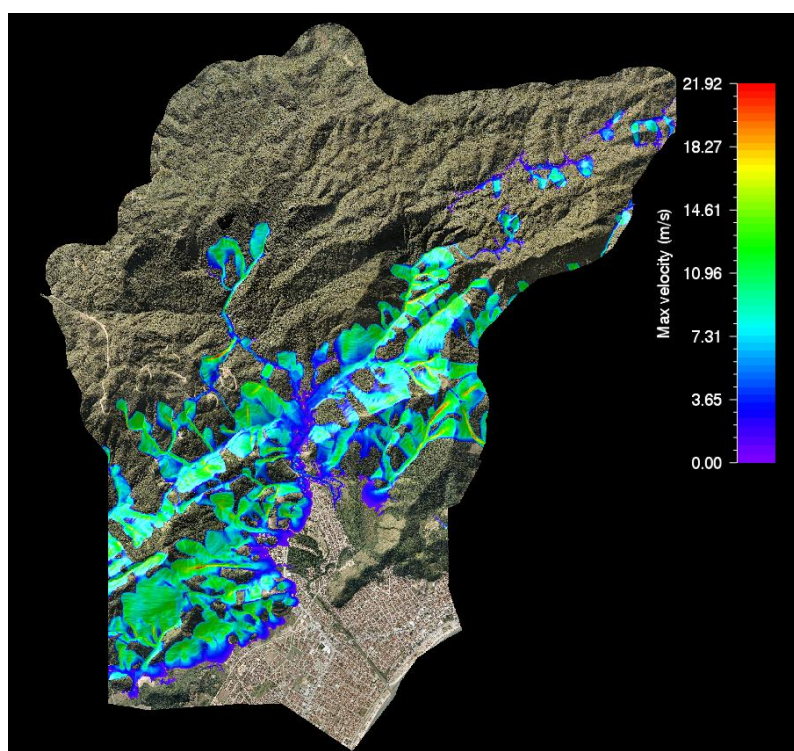


Figura 101. Velocidades máximas atingidas pelas corridas de detritos no cenário 4.

A respeito das diferenciações entre os depósitos mapeados e os modelados no cenário 4 a figura 102 exhibe os resultados.

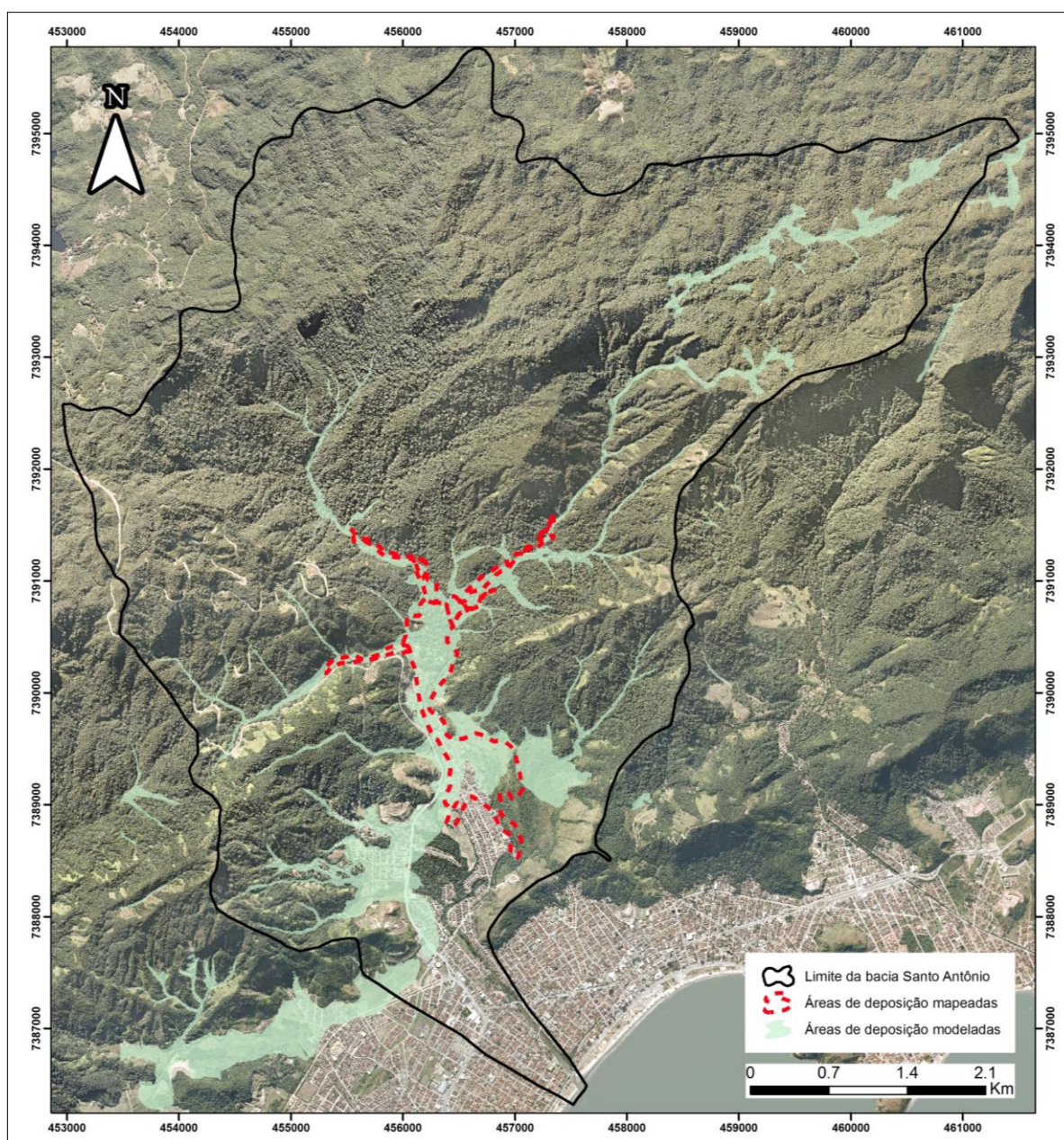


Figura 102. Comparação entre áreas de deposição modeladas considerando as cicatrizes de Fúlfaro et al. (1976) a partir de espessura de ruptura de 1,3 metros e densidade de 1800 kg/m^3 e as áreas de deposição identificadas neste trabalho.

Assim como nos cenários 1, 2 e 3, as diferenças observadas entre o depósito modelado e o mapeado foram fortemente influenciadas pelo MDT utilizado e o canal que foi retificado no bairro Rio do Ouro. Ademais, existem pequenas diferenças entre na deposição do material entre os cenários 1, 2 e 3 e 4, 5 e 6, indicadas em amarelo na figura 103.

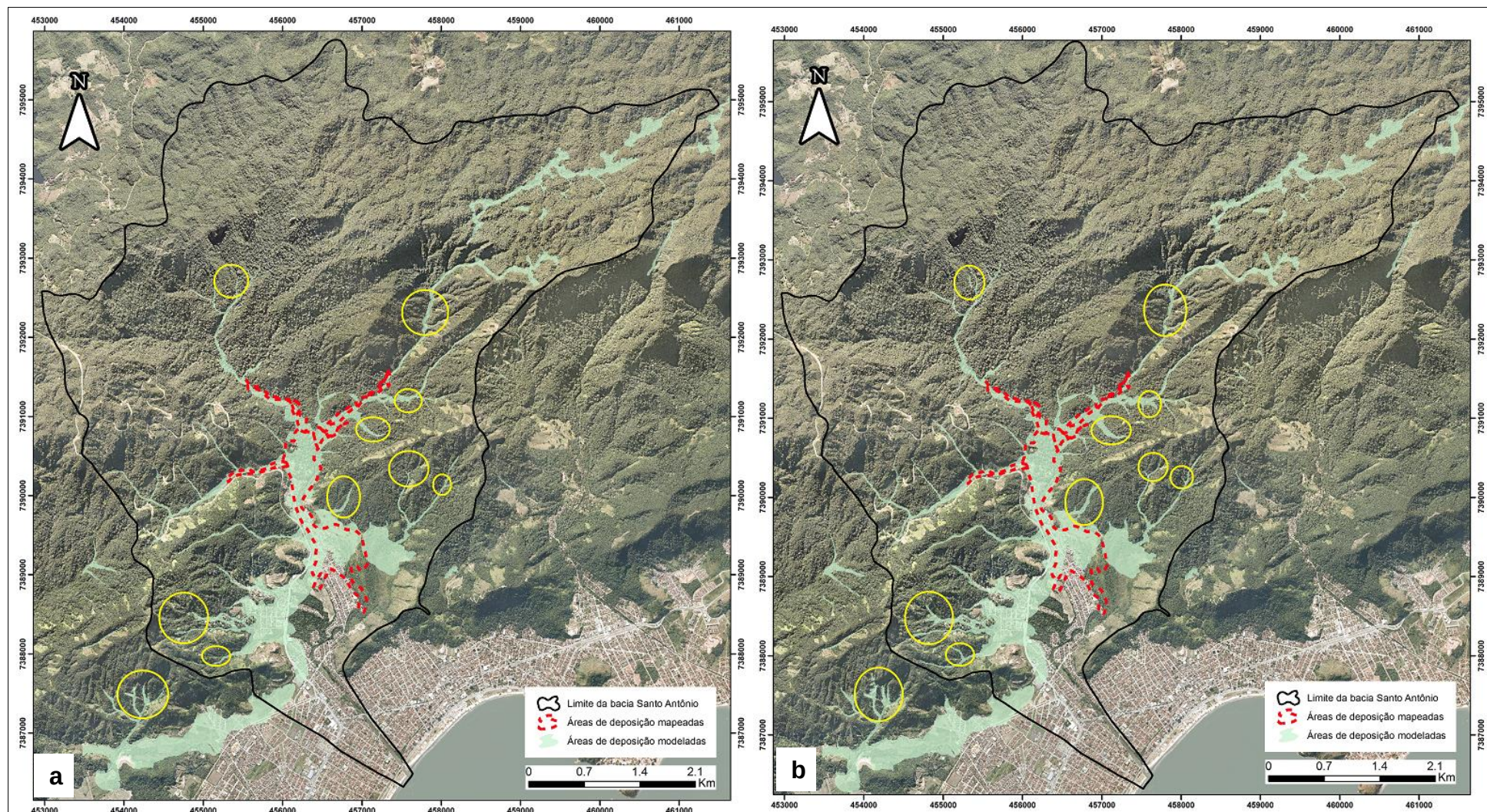


Figura 103. Diferenças das áreas de deposição do material das corridas de detritos entre os cenários 1, 2 e 3 (a) e 4, 5 e 6 (b).

Novamente não foram observadas diferenças significativas entre as velocidades máximas do fluxo nos cenários 4, 5 e 6, bem como das áreas de deposição (vide CD-ROM). As distinções se deram no âmbito da duração das corridas, que no cenário 5, considerando 1900 kg/m^3 de densidade, o evento teve a duração de 84 minutos e no cenário 6, 87 minutos.

Considerando espessuras de ruptura de 1,5 metros, optou-se apenas por realizar simulações com a densidade de 2000 kg/m^3 , visto que as diferenças na área de deposição, bem como da velocidade do fluxo, não são significativas. Nesse sentido, considerando o cenário 7 (GIF 7), observa-se, diante os cenários anteriores, uma maior espessura nos depósitos (Figura 103). Nesse sentido, considerando que a duração do evento modelada foi de 95 minutos, após esse período o leito do rio Santo Antônio, após o encontro dos tributários, atingiu uma espessura próxima a 20 metros. As porções mais suaves do relevo, assim como nos cenários anteriores, exibiram menor espessura dos depósitos.

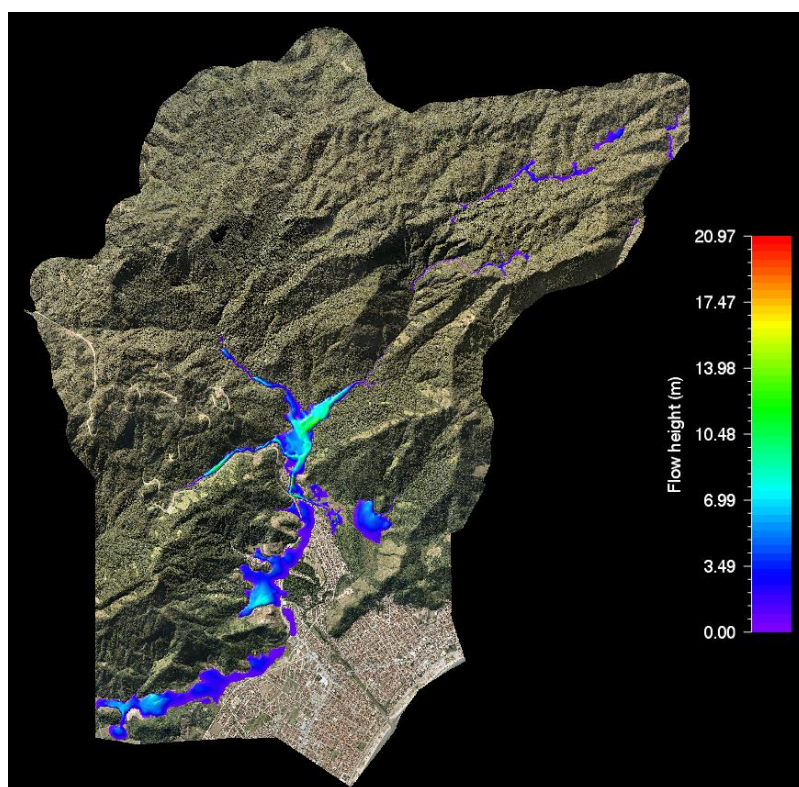


Figura 104. Configuração final da corrida de detritos simulada após 95 minutos considerando a altura do fluxo.

Em relação às diferenças de deposição modeladas e mapeadas, nota-se que considerando espessuras de ruptura de 1,5 metros e densidade do material de 2000 kg/m³ as áreas de deposição se assemelham com as do cenário 4, 5 e 6, sem diferenças significativas (Figura 105).

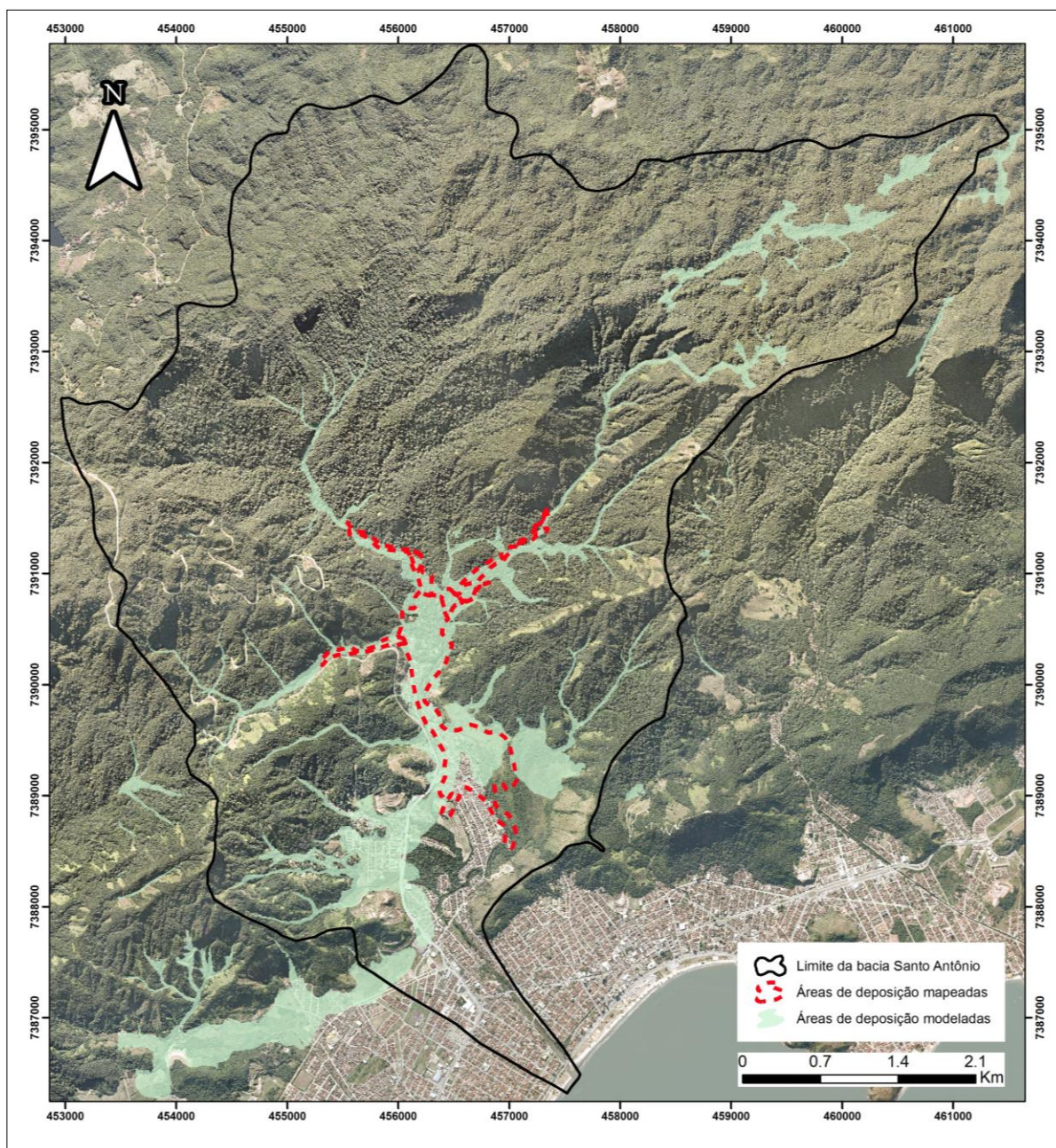


Figura 105. Comparação entre áreas de deposição modeladas considerando as cicatrizes de Fúlfaro et al. (1976) a partir de espessura de ruptura de 1,5 metros e densidade de 2000 kg/m³ e as áreas de deposição identificadas neste trabalho.

As velocidades máximas modeladas, para este cenário, foram maiores, alcançando até 23 m/s² na região das escarpas da Serra do Mar – na Rodovia dos Tamoios – e nos dois primeiros alvéolos no sentido litoral-continente (Figura 106). Assim como nos cenários anteriores, as menores velocidades são observadas nas porções de relevo mais suaves da bacia, caracterizando a fase de deposição do material mobilizado.

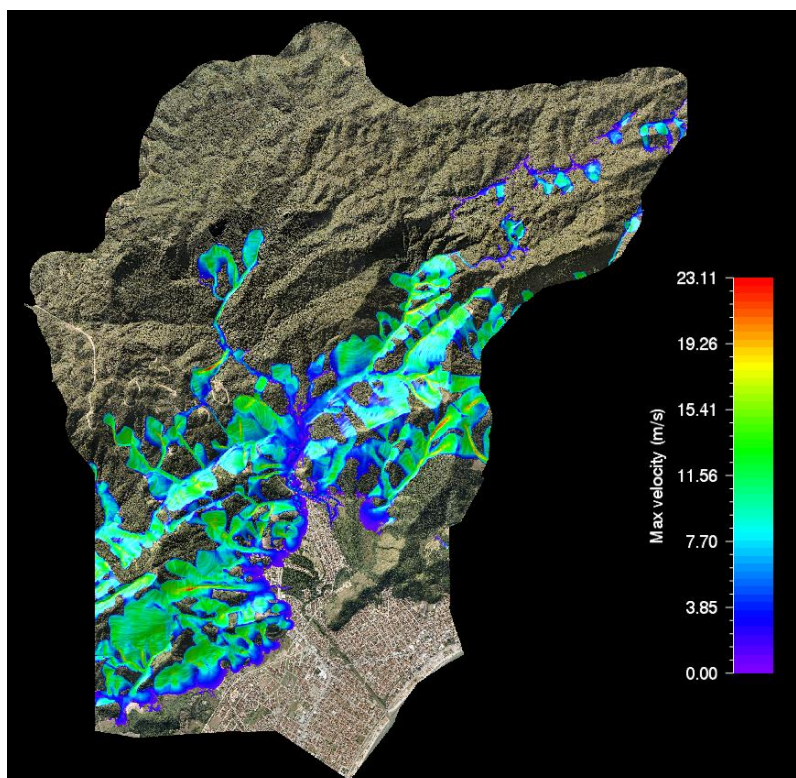


Figura 106. Velocidades máximas atingidas pelas corridas de detritos no cenário 7.

Os próximos resultados a serem apresentados referem-se às cicatrizes mapeadas no âmbito deste trabalho em fotografias aéreas de 1973, compreendendo aos cenários 8 ao 14. A respeito do cenário 8, cuja espessura de ruptura adotada foi de 1,0 metro e densidade de 1800 kg/m³, a duração da corrida de detritos modelada foi de 120 minutos e a maior espessura de depósito foi de aproximadamente 14 metros, próximo à desembocadura dos afluentes do rio Santo Antônio (Figura 107). A principal diferença entre as simulações deste grupo de cicatrizes de escorregamento com as anteriores refere-se ao mapeamento das feições presentes na parte distal do primeiro alvéolo direito na bacia, no sentido litoral-continente, que não haviam sido consideradas por Fúlfaro et al. (1976) (Figuras 90, 91 e 107). Assim, houve uma diferença significativa entre as áreas de depósito (Figura 108).

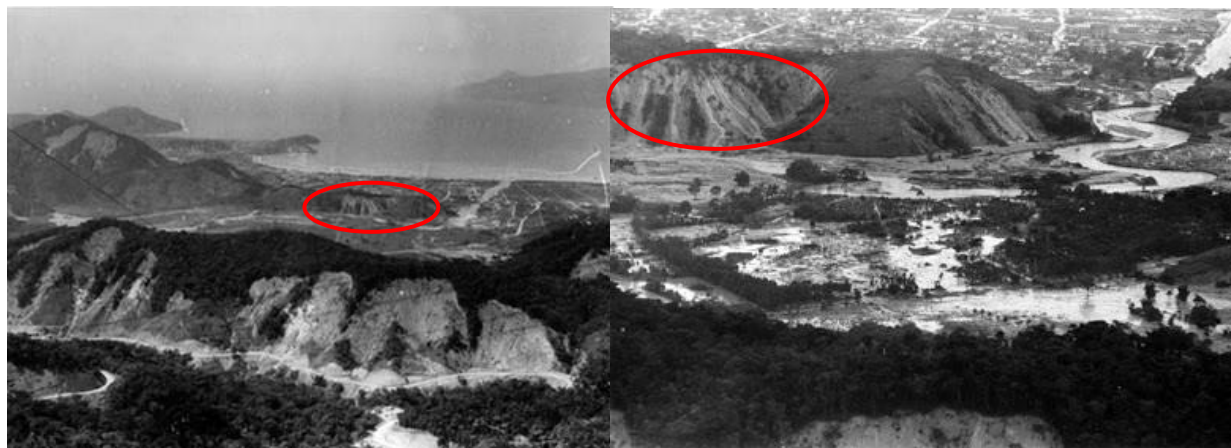


Figura 107. Cicatrizes de escorregamento não consideradas no mapeamento de Fúlfaro et al. (1976) (em destaque). Fonte: Cruz (1974).

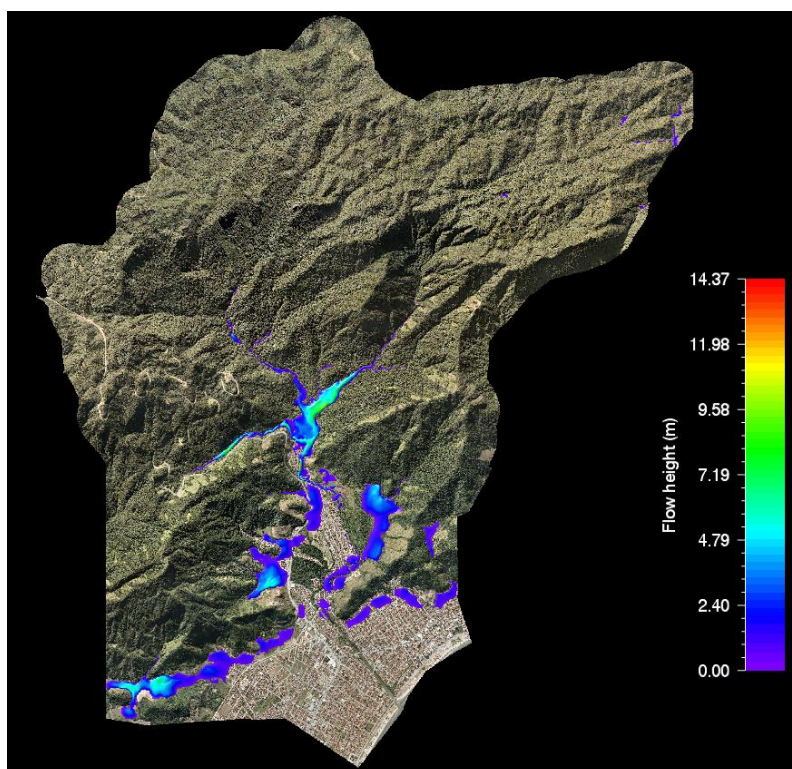


Figura 108. Configuração final da corrida de detritos simulada após 120 minutos considerando a altura do fluxo.

Sobre os depósitos modelados e mapeados, observa-se que os depósitos formados pelos escorregamentos dos primeiros alvéolos nas bacias não foram passíveis de identificação na etapa de fotointerpretação das isópacas (Figura 109). Tal fato pode ser explicado pela presença da área urbana, que mascara feições geológicas e geomorfológicas, ou pela razão das fotografias aéreas serem datadas de 1973, portanto, obtidas 6 anos após o evento. Entretanto, cabe destacar que nas atividades de campo foi possível identificar a presença de blocos centimétricos e métricos nestes locais.

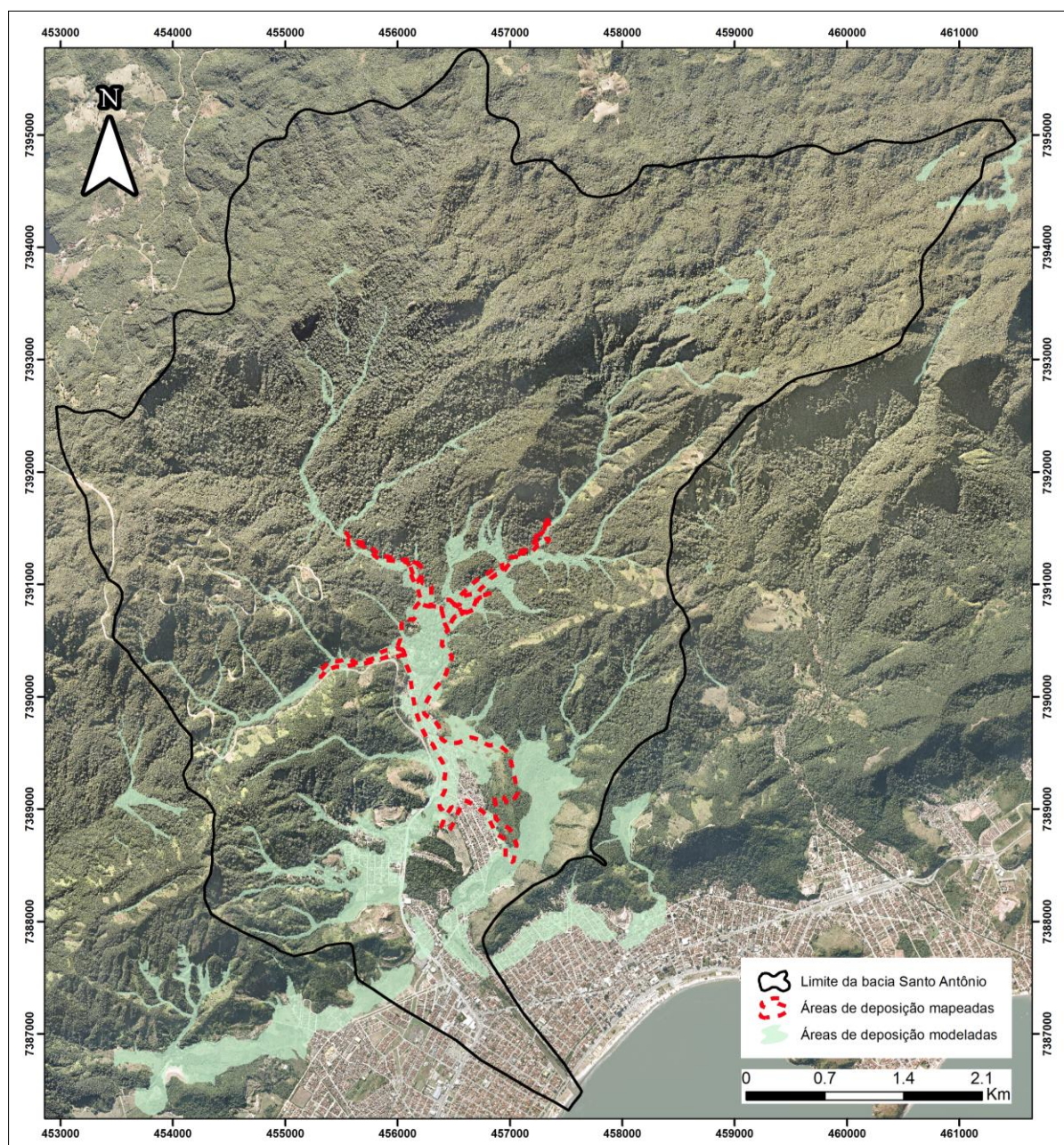


Figura 109. Comparação entre áreas de deposição modeladas considerando as cicatrizes mapeadas em fotografias aéreas (1973) a partir de espessura de ruptura de 1,0 metro e densidade de 1800 kg/m^3 e as áreas de deposição identificadas neste trabalho.

As velocidades máximas atingidas pelo fluxo no cenário 8 foram de até 19 m/s², e cabe destacar que os resultados foram semelhantes aos resultados anteriores, considerando as cicatrizes de Fúlfaro et al. (1976) (Figura 110).

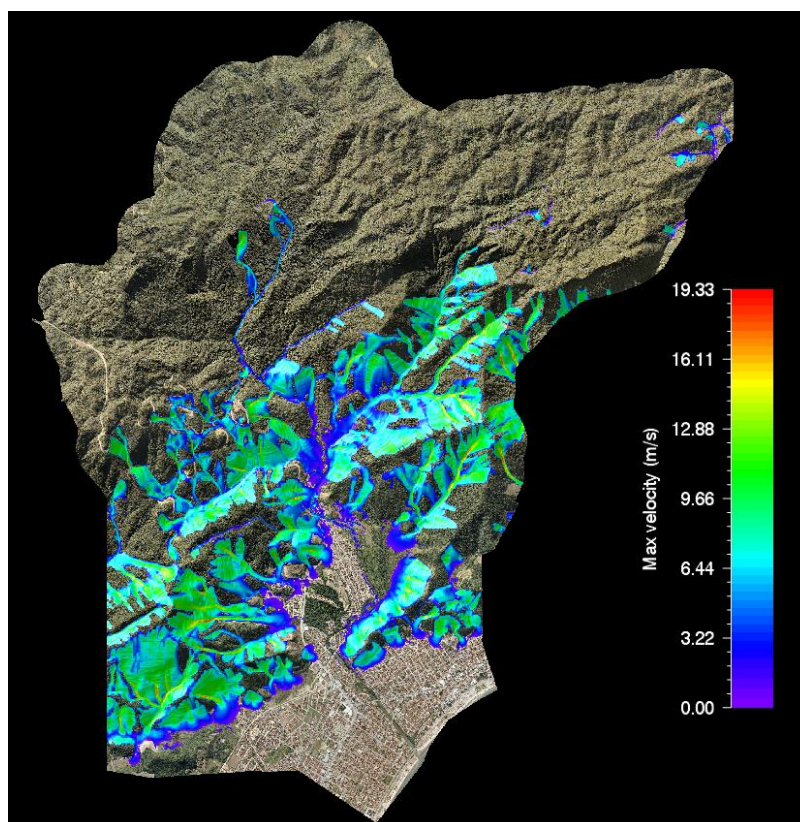


Figura 110. Velocidades máximas atingidas pelas corridas de detritos no cenário 8.

Os cenários 9 e 10, que foram modelados com os mesmos valores de espessura de ruptura – 1,0 metro – porém com densidades distintas (1900 kg/m³ e 2000 kg/m³, respectivamente) também produziram resultados muito semelhantes, embora a espessura de deposição tenha sido maior no cenário 9 (vide CD-ROM). Ademais o tempo inferido na corrida de detritos foi de 126 minutos para o cenário 9 e de 126 minutos para o cenário 10.

Nos próximos cenários alvo de análise (11, 12 e 13) a espessura de ruptura inferida foi de 1,3 metros, utilizando as densidades de 1800, 1900 e 2000 kg/m³, respectivamente. Sobre o cenário 11, a duração da corrida de detritos simulada foi de 109 minutos, e as áreas de deposição ao final do processo revelaram espessuras de até 17 metros no leito do rio Santo Antônio, na área de desembocadura dos fluxos dos canais tributários, assim como nos resultados dos cenários anteriores (Figura 111).

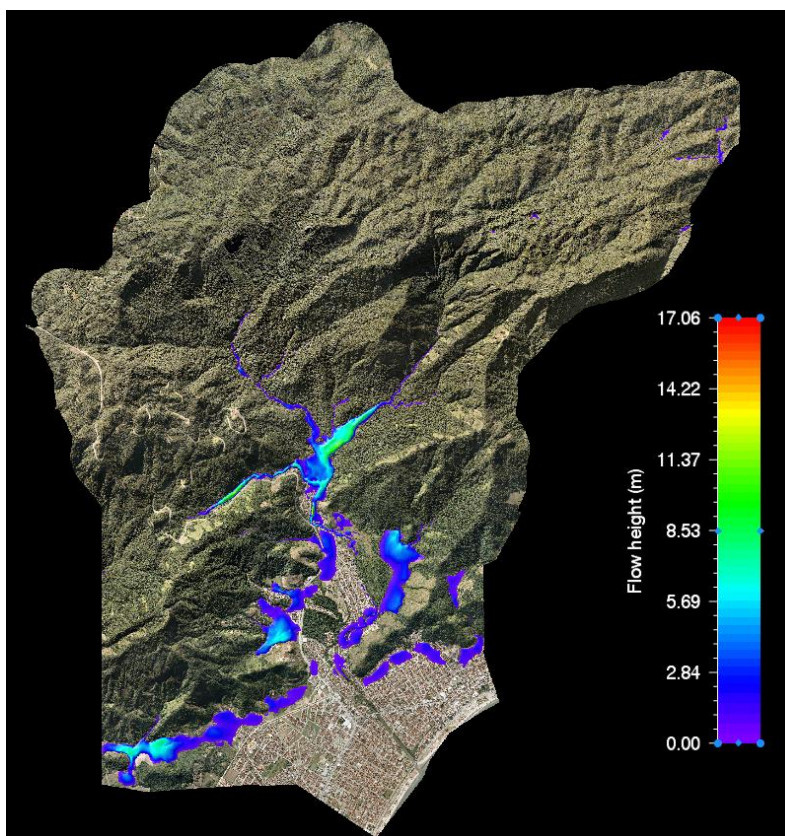


Figura 111. Configuração final da corrida de detritos simulada após 109 minutos considerando a altura do fluxo.

A respeito das velocidades máximas atingidas pelo processo, no cenário 11 observa-se que as maiores velocidades foram da ordem de $20,96 \text{ m/s}^2$, registradas em locais semelhantes aos cenários anteriores. Ademais, as menores velocidades se deram na área da planície, principalmente próximas ao encontro dos fluxos na bacia, na confluência com o rio principal (Santo Antônio) (Figura 112).

A comparação entre o depósito modelado e o depósito mapeado evidencia novamente a limitação do MDT, uma vez que a simulação não considerou os depósitos carregados pelo rio Santo Antônio em 1967. Ademais, nos canais tributários, considerando esse cenário, o modelo calculou um depósito maior nas planícies dos tributários (Figura 113).

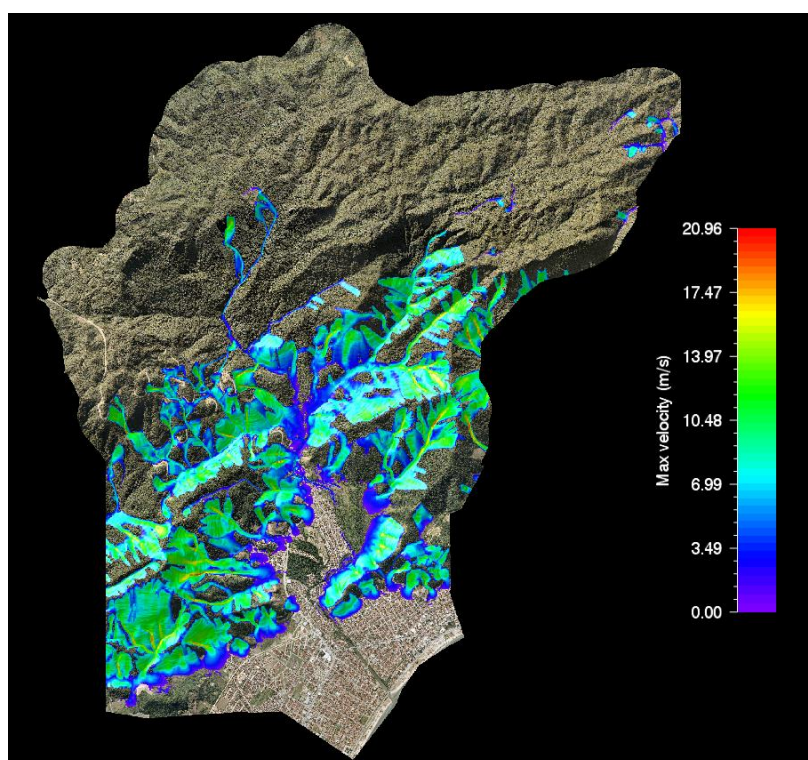


Figura 112. Velocidades máximas atingidas pelas corridas de detritos no cenário 11.

Assim como cenários anteriores, as simulações envolvendo outras densidades (GIF 12 e GIF 13, densidades respectivas de 1900 e 2000 kg/m³, com espessuras de ruptura de 1,3 metros – vide CD-ROM) apresentaram configuração e espessuras de depósitos muito semelhantes. A única distinção foi no âmbito da duração das corridas – que no cenário 12 foi de 109,383 minutos e no cenário 13 de 109,850 minutos.

Por fim, no último cenário simulado (GIF 14) foi adotado como espessura de ruptura o valor de 1,5 metros e a densidade de 2000 kg/m³. Assim como considerado para as cicatrizes de Fúlfaro et al. (1976), optou-se por apenas realizar simulações com a densidade de 2000 kg/m³, visto que as diferenças na área de deposição, bem como da velocidade do fluxo, não são significativas com as mudanças de densidade inferidas nesse trabalho. Assim, a modelagem calculou o processo de corrida em 109,300 minutos, e as áreas de deposição atingiram espessuras de até cerca de 13 metros (Figura 114).

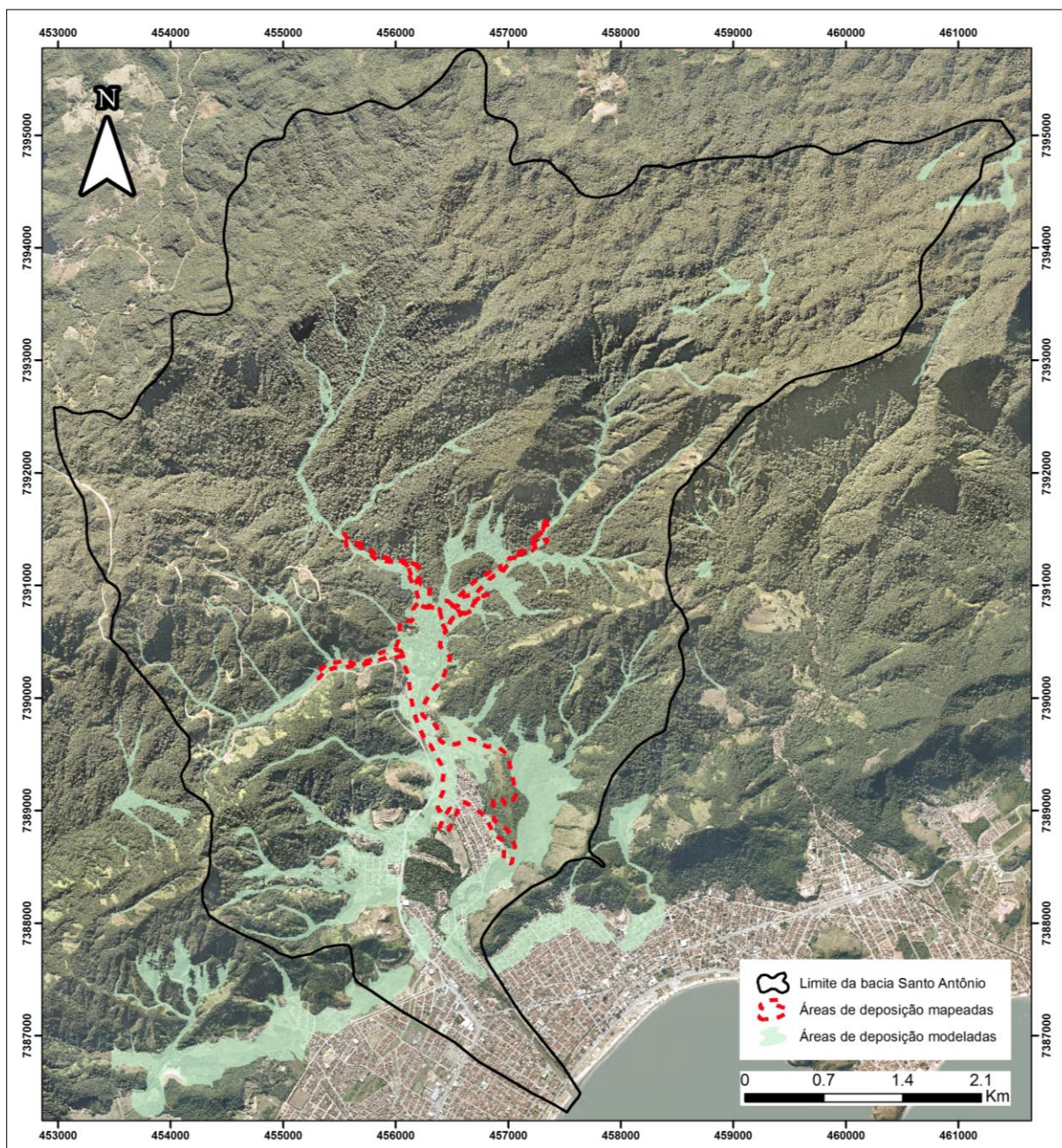


Figura 113. Comparação entre áreas de deposição modeladas considerando as cicatrizes mapeadas em fotografias aéreas (1973) a partir de espessura de ruptura de 1,3 metros e densidade de 1800 kg/m^3 e as áreas de deposição identificadas neste trabalho.

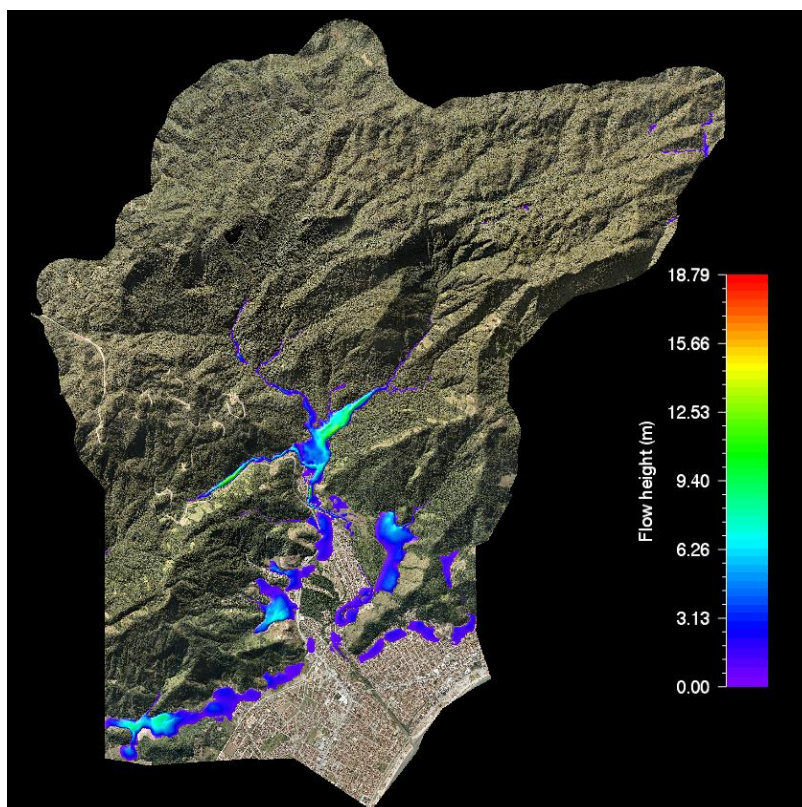


Figura 114. Configuração final da corrida de detritos simulada após 109,300 minutos considerando a altura do fluxo.

Diferentemente de cenários anteriores, esta simulação apresentou maiores espessuras de depósitos nos rios tributários perpendicularmente ao Santo Antônio, diferentemente dos resultados obtidos com as isópacas mapeadas (Figura 80). Não obstante, a comparação entre as áreas de depósito modeladas e mapeadas evidencia novamente a deposição na confluência dos tributários com o rio principal (Santo Antônio) e o aporte de material mobilizado na planície da respectiva bacia (Figura 115).

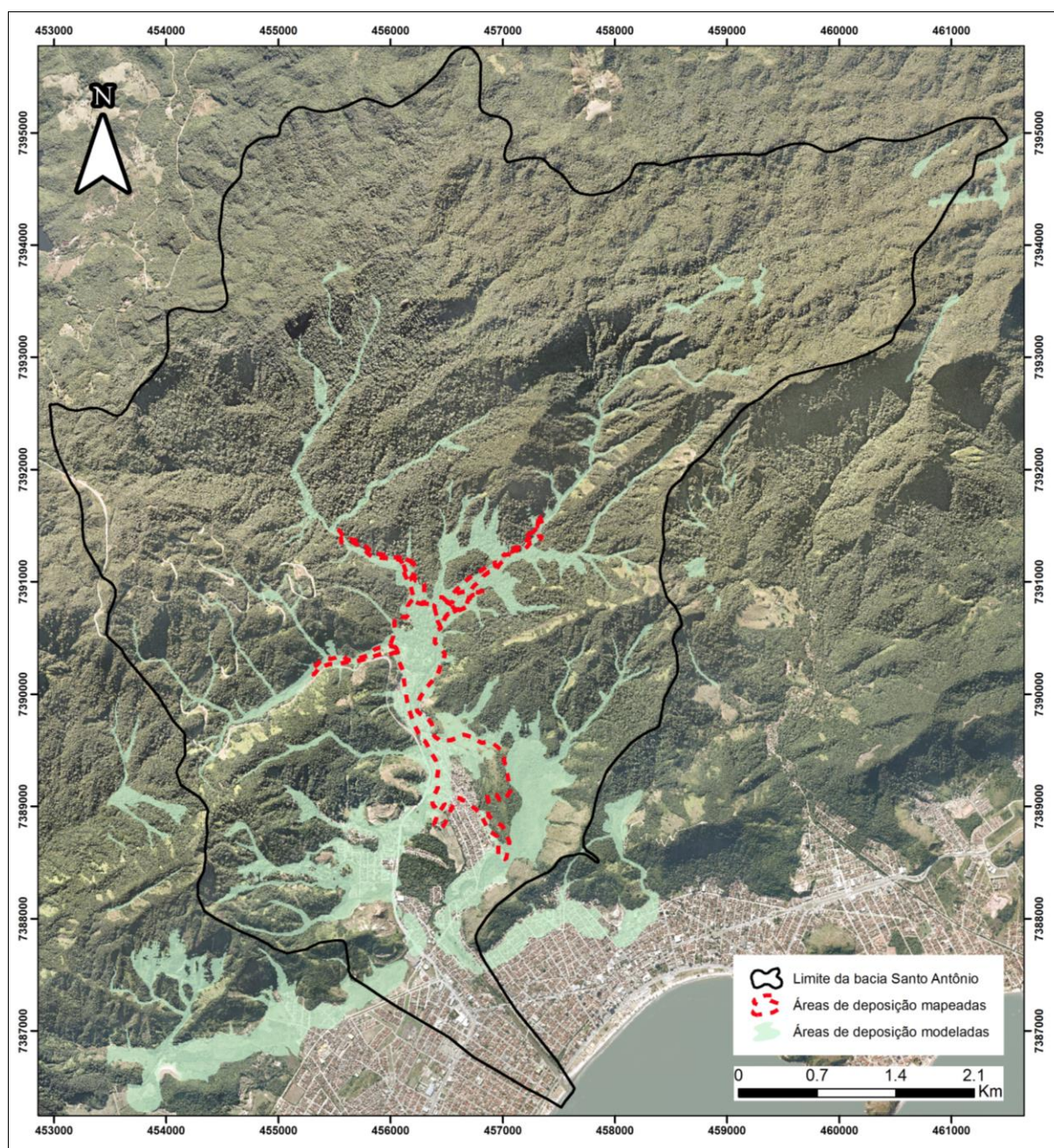


Figura 115. Comparação entre áreas de deposição modeladas considerando as cicatrizes mapeadas em fotografias aéreas (1973) a partir de espessura de ruptura de 1,5 metros e densidade de 2000 kg/m^3 e as áreas de deposição identificadas neste trabalho.

5.4. Síntese dos resultados

Os resultados obtidos nos subcapítulos 5.1 a 5.3 evidenciam a potencialidade da área de estudo a processos de corridas de detritos.

Em relação à compartimentação fisiográfica, foi possível observar que unidades com alta densidade textural e que possuem contato com as áreas mais planas da área de estudo – como a unidade IV, que possui contato com a unidade II e a IB – possuem alto potencial à geração de corridas de detritos, conforme observado no evento de 1967. A bacia Pau D’Alho – na qual insere-se a UTGCA (Unidade de Tratamento de Gás de Caraguatatuba) e o duto GASTAU (Gasoduto Caraguatatuba/Taubaté) – possui alto potencial à ocorrência desses processos, e durante as atividades de campo, inclusive, foi possível observar depósitos das corridas de 1967 próximos a essa unidade, conforme relatos de moradores locais e trabalhos já publicados sobre o evento na área, consultados durante a etapa de retro-análise (Figura 116).



Figura 116. Depósito da corrida de detritos de 1967 próximo à unidade da UTGCA, segundo relatos dos trabalhadores locais, pesquisadores que conhecem a área e moradores do entorno. Foto: Arquivo pessoal Fábio Augusto Gomes Vieira Reis.

Outras unidades fisiográficas foram identificadas com alto potencial para movimentos de massa, especialmente escorregamentos, como as unidades nas quais inserem-se os dutos OSBAT (Oleoduto São Sebastião/Cubatão) e OSPLAN (Oleoduto São Sebastião/Paulínia). A ocorrência de corridas de detritos para essas unidades fisiográficas será viabilizada caso o material mobilizado alcance canais de drenagem. Ademais, a bacia hidrográfica do rio Santo Antônio ainda se configura, sob o aspecto fisiográfico, uma área com potencial à geração de corridas de detritos, sendo que inclusive, 50 anos após a tragédia de 67, foram registrados novamente escorregamentos e corridas de lama no local (Figura 117).



Figura 117. Escorregamento na bacia Santo Antônio, em Caraguatatuba, em março de 2017, 50 anos após o evento de 1967. Fonte: Jornal Estadão, 16/03/2017.

A porção sul da área de estudo possui um litoral recortado, com pequenas reentrâncias, restritas planícies costeiras e fluviais. A ocorrência em campo de pequenos escorregamentos nestes locais foi constatada, entretanto, na análise envolvendo o *FD* foi possível observar que a incidência de escorregamentos é menor do que porção norte, referente ao município de Caraguatatuba.

A utilização do *FD*, na etapa de retro-análise, foi fundamental para identificar as desproporcionalidades em relação à ocorrência de escorregamentos quanto às bacias, à declividade e à geologia. Assim, foi possível identificar quais fatores apresentaram-se desproporcionais em relação à incidência de escorregamentos. Ademais, a identificação da área-alvo para simulação, aliada aos resultados da compartimentação fisiográfica, mostrou-se eficiente para esta finalidade.

A bacia selecionada como área-alvo na simulação (Santo Antônio) possui características fisiográficas semelhantes à Pau D'Alho, na qual insere-se o duto GASTAU, que sob a ótica fisiográfica, possui maior potencialidade à ocorrência de corridas de detritos do que outros dutos inseridos na área de estudo, situados na porção sul. Assim, a modelagem com *software* de simulação pode também ser aplicada para análise de possíveis ocorrências de corridas de detritos em outras bacias hidrográficas com inserção de faixas dutoviárias.

A modelagem no *software* RAMMS mostrou-se satisfatória, sendo que de maneira geral houve uma correspondência entre a área e espessura dos depósitos de corridas de detritos observados e modelados. Não obstante, as velocidades modeladas também foram coerentes com as relatadas nas bibliografias consultadas. Entretanto, ressalta-se que foram observadas algumas limitações em relação ao MDT utilizado, que não refletia as condições do relevo antes do evento modelado. Ademais, os resultados com os depósitos de detritos do *software* são coerentes, uma vez que ele não considerou o evento que ocorreu concomitantemente à corrida de detritos, relatada por Cruz (1974) (corrida de lama e inundações) (Figura 118). Nesse sentido, Sakai (2014), realizando modelagens com o *software* FLO-2D na mesma bacia (Santo Antônio), verificou que o modelo extravasou os limites das corridas de detritos para os limites de corridas de lama. As corridas de lama possuem menor poder erosivo do que as corridas de detritos e seu caráter é mais viscoso e lamoso.

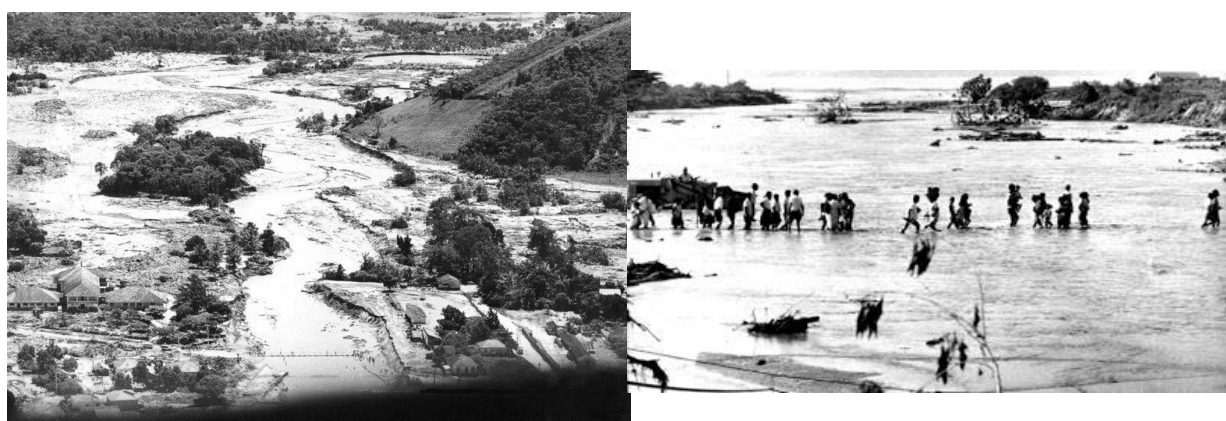


Figura 118. Corridas de lama e inundação no evento de 1967 em Caraguatatuba. (a) Corrida de lama na bacia Santo Antônio em 1967, após incorporação do material da corrida de detritos no canal principal da bacia; (b) inundação causada pelo acúmulo de material mobilizado à montante na bacia, que sofreu represamento por uma ponte que posteriormente se rompeu, liberando o fluxo acumulado. Fonte: Arquivo municipal.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho demonstrou que a utilização da modelagem fisiográfica possibilita a correlação entre áreas de abrangência de depósitos de corridas de detritos, a partir da calibração dos dados de entrada (*inputs*). Desta maneira, os objetivos foram alcançados, tanto o geral quanto os específicos.

Os resultados produzidos pela etapa de compartimentação fisiográfica e de retro-análise revelaram que as bacias mais suscetíveis à ocorrência de corridas de detritos são a Pau D'Alho, a Santo Antônio, a Canivetal e a Camburu. Sua suscetibilidade decorre de suas características fisiográficas: proximidade das escarpas/ relevo serrano com as planícies, altas declividades, alta densidade de drenagem e abundância de canais de primeira ordem, que viabilizam o processo.

O Fator de Desproporcionalidade evidenciou que as maiores desproporcionalidades se deram na bacia Canivetal, cuja área de superfície foi muito afetada pelos escorregamentos de 1967, provavelmente pela sua posição geográfica mediante os índices pluviométricos, próximos aos 500 mm. Outra desproporcionalidade verificada se deu no âmbito morfométrico, no qual observou-se que a classe de declividade de 35 a 50° preferencialmente concentra a ocorrência de movimentos de massa na região da Serra do Mar. Entretanto, especificamente para a geologia, não foi possível determinar possíveis tendências a escorregamentos, de modo que a análise com *FD* revelou que apenas unidades sedimentares quaternárias não possuem vulnerabilidade a esses processos, por motivos óbvios ligados à morfologia do terreno. Porém, destaca-se que as unidades fisiográficas/ geológicas envolvendo depósito de tálus e colúvios são passivas de mobilização durante os escorregamentos, e, por consequência, as corridas de detritos, no caso desta área na Serra do Mar do presente estudo.

As corridas de detritos ocorridas em 1967 tiveram uma forte característica fluvial, sendo que grande parte dos materiais mobilizados nos escorregamentos alcançaram bacias de drenagem e as corridas se desenvolveram sobre seus vales, que na região da Serra do Mar são muito encaixados e formam verdadeiros “V”s. Assim, verificou-se que as maiores velocidades do fluxo das corridas de detritos se deram exatamente nesses vales, conforme resultados obtidos pelas simulações.

Estudos que envolvem modelagem morfométrica preferencialmente devem contemplar a etapa de retro-análise, conforme constatado neste trabalho. Esta etapa

permitiu uma maior compreensão e entendimento do evento, além de possibilitar uma melhor calibração e tratamento dos *inputs* a serem inseridos nos modelos.

Neste estudo as mudanças de densidade do material não influenciaram significativamente no comportamento do fluxo durante a corrida de detritos, quiçá em sua velocidade. Pequenas diferenças foram notadas apenas na duração do evento, com variações a nível de segundos. Entretanto, modificações nas espessuras das rupturas influenciaram no cálculo das velocidades do fluxo e nas espessuras do depósito.

A corrida de detritos registrada na faixa de travessia do duto OSPAR (Oleoduto Santa Catarina – Paraná) forneceu importantes informações a respeito do comportamento do fluxo. Notou-se que as corridas de detritos na área-alvo produziram depósitos semelhantes aos ocorridos em Guaratuba, especificamente nos tributários do rio Santo Antônio, em sua porção a montante. Assim, foi visto no trabalho de campo do respectivo duto que os processos erosivos produzidos pelos fluxos mais turbulentos de corridas de detritos podem agravar os danos, como rompimento de estruturas. Portanto, também são necessários estudos que contemplem essa esfera.

Outro aspecto importante refere-se à gestão de risco de áreas a movimentos de massa, especificamente a corridas de detritos. Foi observado nos trabalhos de campo que a expansão urbana de Caraguatatuba segue em direção a sua grande planície costeira, e na maioria das vezes esses locais são considerados seguros para as atividades humanas que envolvem desde a instalação de moradias até empreendimentos econômicos. Entretanto, é necessário cautela na ocupação desses locais, especialmente no caso da área de estudo, que possui registro histórico de ocorrência de corridas de detritos. Esses processos, conforme destacado no presente estudo, possuem um grande raio de alcance e poder destrutivo.

Ademais, sugere-se que para modelagens, simulações de cenários futuros ainda incluam áreas de desprendimento situadas nas porções das vertentes onde cicatrizes foram mapeadas, pois nesses locais há relativamente pouco material a ser mobilizado, visto que os relatos do evento de 1967 indicam que a rocha sã foi exposta na maioria dos escorregamentos.

Algumas limitações foram encontradas durante a realização dessa pesquisa, como um modelo digital que traduzisse o relevo antes do evento ocorrido na região

de Caraguatatuba, em 1967. Apesar desta inviabilidade, as simulações realizadas a partir destas condições topográficas sugeriram que corridas futuras provavelmente não formarão cones de dejeção de detritos, devido à retificação do leito do rio Santo Antônio.

Outras dificuldades encontradas referem-se à utilização de fotografias aéreas não ortorretificadas, o que pode acarretar em cálculos não muito precisos de áreas, e consequentemente de volumes, como realizados nesta pesquisa. Foram realizadas tentativas de ortorretificar as fotos de 1973, entretanto, a ausência de pontos de controle inviabilizou esse processo, principalmente nas áreas correlatas ao Parque Estadual da Serra do Mar, que possui uma densa vegetação.

De um modo geral, os resultados do presente trabalho sugerem que as corridas de detritos da Serra do Mar podem apresentar um fluxo com caráter reológico predominantemente granular. As zonas de deposição das corridas dão-se preferencialmente em regiões de baixa declividade ($<5^\circ$). Nos talwegues mais encaixados e declivosos, onde as velocidades e pressões de fluxo são maiores, há maior probabilidade de ocorrência de processos erosivos, que podem aumentar o volume de material transportado pelas corridas e, por consequência, os impactos potenciais.

As ferramentas e técnicas empregadas nesse projeto podem auxiliar no planejamento e gestão dos locais que foram identificados com maior potencial à ocorrência desses processos, o que auxilia na mitigação dos impactos. Ademais, este estudo pode ser utilizado como ferramenta na tomada de decisões pelo setor público e privado e contribuir com a gestão do meio físico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AB'SABER, A.N. Províncias geológicas e domínios morfoclimáticos no Brasil. **Geomorfologia**, v. 20, p. 26-52. 1970.

ALCÁNTARA-AYALA, I. Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries. **Geomorphology**, v. 47, p. 107–124. 2002.

ALEOTTI, P.; BALDELLI, P.; POLLONI, G. **Landsliding and flooding event triggered by heavy rains in the Tanaro Basin (Italy)**. In: International Symposium Interpraevent - Garmisch-Partenkirchen, v. 1, p.435-446, 1996.

ALEOTTI, P.; CHOWDHURY, R. Landslides hazard assessment: summary review and new perspectives. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, n. 58, p. 21-44. 1999.

ALHEIROS, M.M.; AUGUSTO FILHO, O. Landslides and Coastal Erosion Hazards in Brazil. **International Geology Review**. v. 39, p.756-763, 1997.

ALMEIDA, F.F.M. Fundamentos Geológicos do Relevo Paulista. **Boletim do Instituto de Geografia e Geologia**, São Paulo, n. 41, p. 169-263. 1964.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS. **Dados HidroWeb: Estações**. 2001. Disponível em: <<http://www.snirh.gov.br/hidroweb/>>. Acesso em: 18 nov. 2017.

ANDERSON, S.A.; SITAR, N. **Procedures for Analysis of the Mobilization of Debris Flows**. In: International Conference Soil Mechanics and Foundation Engineering, 13, New Delhi. **Proceedings...** New Delhi, Índia, p. 255-258, 1994.

ANDERSON, S.A.; SITAR, N. Analysis of rainfall-induced Debris Flows. **Journal of Geotechnical Engineering**, ASCE, v. 121, p.544-552, 1995.

ANDERSON, M.P.; WOESSNER, W.W. **Applied Groundwater Modelling: Simulation of Flow and advective Transport**. San Diego: Academic Press, Inc. Harcourt Brace Jovanovich Publisher, 1992.

ANP – Agência Nacional do Petróleo. **Malha Dutoviária Brasileira**. 2017. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/wwwanp/armazenamento-e-movimentacao-de-produtos-liquidos/orientacoes-sobre-os-arquivos-de-dados-georreferenciados-solicitados-para-atendimento-a-resolucao-anp-n-52-2015>>. Acesso em: 15 dez. 2015.

ARATTANO, M.; FRANZI, L. On the evaluation of debris flows dynamics by means of mathematical models. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 3, p. 539-544. 2003.

ARATTANO, M.; MARCHI, L. Systems and sensors for debris-flow monitoring and warning. **Sensors**, v. 8, p. 2436–2452. 2008.

ARAYA-MOYA, V. Genesis de aluviones en la costa de zonas deserticas. In: Simposio Panamericano de Deslizamientos, I, Guayaquil. **Proceedings...** Guayaquil, Ecuador, p. 186–200, 1994.

AUGUSTO FILHO, O. O estudo das corridas de massa em regiões serranas tropicais: um exemplo de aplicação no município de Ubatuba, SP. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 7, 1993, Poços de Caldas. **Anais...** Poços de Caldas: ABGE, 1993, v. 2, p. 63-72.

AUGUSTO FILHO, O.; VIRGILI, J.C. Estabilidade de taludes. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Eds.). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. P. 243-269.

AUGUSTO FILHO, O.; HIRAI, J. N. OLIVEIRA, A. S; LIOTTI, E.S. GIS applied to geotechnical and environmental risk management in a Brazilian oil pipeline. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment (Print)**, v. 69, p. 631-641, 2010.

AUGUSTO FILHO, O.; MAGALHÃES F.S.; GRAMANI M.F. Mass movements susceptibility map of a highway system using GIS technology: a case study in Brazil. In: GEOLINE, Geology and linear structures, Lyon, 2005. **Abstracts...** France: IAEG, 2005.

AULITZKY, H. The debris flows in Austria. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, v. 40, p. 5-13, 1989.

BACCHINI, M.; ZANNONI, A. Relations between rainfall triggering of debrisflow: case study of Cancia (Dolomites, Northeastern Italy). **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 3, p. 71-79, 2003.

BARBOSA, J.P.M. Estudo sobre a evolução dos eventos extremos de precipitação no setor Paulista da Serra do Mar. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17, São Paulo, 2007. **Anais...** São Paulo, p. 1-21, 2007.

BARLOW, J; MARTIN, Y.; FRANKLIN, S.E. Detecting translational landslide scars using segmentation of Landsat ETM+ and DEM data in the northern Cascade

Mountains, British Columbia. **Canadian Journal of Remote Sensing**, v. 29, n. 4, p. 510-517. 2003.

BARTELT, P.; VOLKWEIN, A.; WENDELER, C. **Full scale testing and dimensioning of flexible debris flow barriers**. Summary report of the 2005–2008 CTI-Project “Numerical modeling and design of flexible debris flow barriers”. Swiss Federal Institute for Forest, Snow, and Landscape Research (WSL), Switzerland. 2009.

BATHURST, J.C.; BURTON, A.; WARD, T.J. Debris flow run-out and landslide sediment delivery model tests. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 5, n. 123, p. 410-419, 1997.

BEGUERIA, S.; VAN ASCH, T. W. J.; MALET, J. P.; GRONDAHL, S. A GIS-based numerical model for simulating the kinematics of mud and debris flows over complex terrain. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 9, p. 1897–1909, 2009.

BENDA, L.E. Delineation of channels susceptible to debris flow and debris floods. In: International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention. **Anais...** Tsukuba-Japan, p.195-201. 1985.

BENDA, L.E.; CUNDY, T.W. Predicting deposition of debris flows in mountain channels. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 27, p. 409-417. 1990.

BENDA, L.; VELDHUISEN, C.; BLACK, J. Debris flows as agents of morphological heterogeneity at low-order confluences, Olympic Mountains, Washington. **Geological Society of America**, v. 115, n. 9, p. 1110-1121. 2003.

BERTI, M.; SIMONI, A. DFLOWZ: a free program to evaluate the area potentially inundated by a debris flow. **Computers and Geosciences**, v. 67, 14–23. 2014.

BRADLEY, J.B.; McCUTCHEON, S.C. The effects of high sediment concentration on transport processes and flow phenomena. In: International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, Tsukuba, 1985. **Proceedings...** Tsukuba, Japan, p.219-225, 1985.

BRUNSDEN, D.; PRIOR, D. B. **Slope Instability**. Chichester: John Wiley, 1984.

BUGHI, S.; ALEOTTI, P.; BRUSCHI, R.; ANDREI, G.; MILANI, G.; SAKELLARIADI, E.; SCARPELLI, G. Slow movements of slopes interfering with pipelines: modeling vs monitoring. In: CHAKRABARTI, S. (ed). **Proceedings of the**

15th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Florence, Italy, June 1996. ASME, Fairfield, 1020 pp.

BURROUGH, P.A. Dynamic Modelling and Geocomputation. In: LONGER, P.; BATTY, M.; McDONNEL, R. **Geocomputation: A Primer**. London: John Wiley & Sons, 1998. 278 p.

CAINE, N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. **Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography**, v. 62-A, p.2 3-27. 1980.

CAMPBELL, R. H. Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California. **U. S. Geological Survey Professional Paper**, 851, p. 51, 1975.

CANNON, S. H.; KIRKHAM, R. M.; PARISE, M. Wildfire-related debris-flow initiation processes, Storm King Mountain, Colorado. **Geomorphology**, v.9, n. 3-4, p. 171-188. 2001.

CARDOSO, M.R.D; MARCUZZO, F.F.N.; BARROS, J.R. Classificação Climática de Köppen-Geiger para o Estado de Goiás e o Distrito Federal. **Acta Geográfica**, v. 8, n. 16, p. 40-55. 2015.

CERON, A.O.; DINIZ, J.A.F. O uso das fotografias aéreas na identificação das formas de utilização agrícola da terra. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 28, n. 2, p. 161-173, 1966.

CERRI, R.I.; REIS, F.A.G.V.; GRAMANI, M.; ROSOLEN, V.; LUVIZOTTO, G.L.; GIORDANO, L.C.; GABELINI, B.M. Assessment of landslide occurrences in Serra do Mar mountain range using kinematic analyses. **Environmental Earth Sciences**, v. 77, n. 325, 2018.

CESCA, M.; D'AGOSTINO, V. Comparison between Flo-2D and RAMMS in debris flow modelling: a case study in the Dolomites. International Conference on monitoring, simulation, prevention and remediation of dense and debris flow, II, 2008. **Proceedings...**, WITpress Southampton, p. 197-206, 2008.

ÇEVIK, E.; TOPAL, T. GIS-based landslide susceptibility mapping for a problematic segment of the natural gas pipeline, Hendek (Turkey). **Environmental Geology**, v. 44, n. 8, p. 949–962. 2003.

CHEN, C.Y.; LEE, W.J. **Topographic features and the initiation of debris flows**. p. 69-79. 2010. Disponível em: <<http://www.interpraevent.at/palm-cms/upload/files/Publikationen/Tagungsbeitraege/2010>>. Acesso em: 17 dez. 2017.

CHEN, C.Y.; YU, F.C. Morphometric analysis of debris flows and their source areas using GIS. **Geomorphology**, 129, p. 387-397, 2011.

CHILDS, C. **Interpolating Surfaces in ArcGIS Spatial Analyst**. ArcUser. Redlands, CA: ESRI Press, 2004.

CHOW, V.T. **Open-channel hydraulics**. New York: McGraw-Hill, 1959.

CHRISTOFOLETI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Ed. Edgard Blücher Ltda, 236 p. 199.

COLLINS, B.; ZNIDARCIC, D. **Triggering Mechanisms of Rainfall Induced Debris Flows**. In: 2nd Panam. Symp. Landslides, 2o COBRAE. Rio de Janeiro, 1997. p. 277-286.

CONTERATO, L. **Uso do programa RAMMS na modelagem de corridas de detritos e previsão de áreas atingidas: estudo do caso de Quitite-Papagaio**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014. 188 p.

CONQ, M.; SILVEIRA, C.S.; DOURADO, F. Processos geomorfológicos e danos derivados da corrida de detritos de janeiro de 2011 na bacia do córrego do Príncipe, Teresópolis – Região Serrana do Rio de Janeiro. **Ciência e Natura**, v. 37, n. 1, p. 93-103. 2015.

COROMINAS, J. The angle of reach as a mobility index for small and large landslides. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 33, p. 260-271, 1996.

COROMINAS, J. Avoidance and protection measures. In: SHRODER, J.; MARTSON, R.A.; STOFFEL, M. **Mountain and hillslope geomorphology. Treatise on geomorphology**. San Diego: Academic Press, v. 7, p. 259-272, 2013.

CORRÊA, C.V.S.; REIS, F.A.G.V.; AMARAL, A.M.C.; COURA, M.M.; GIORDANO, L.C.; CHAVES, C.J. Caracterização geológico-geomorfológica dos principais movimentos de massa na região sudeste do Brasil entre os anos de 1967 e 2011 como subsídio a estudos de retroanálise. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 15, Bento Gonçalves, 2015. **Anais...** Bento Gonçalves: ABGE, 2015. CD-ROM

CORRÊA, C.V.S.; REIS, F.A.G.V.; GIORDANO, L.C. **Modelagem Fisiográfica do terreno para avaliação do potencial a corridas de massa em dutovias: proposta aplicada em Caraguatatuba (SP) e São Sebastião (SP)**. Avaliação dos Programas de Recursos Humanos da ANP – 2016. 2016.

COSTA, J.E. Physical Geomorphology of Debris Flows. In: COSTA, J.E.; FLEISHER, P.J. (Eds.). **Developments and Applications of Geomorphology**. Berlim: Springer-Verlag. Cap.9, p. 268-317. 1984.

COSTA, J.E.; SCHUSTER, R.L. The formation and failure of natural dams. **Geological Society of America Bulletin**, v. 100, p. 1054-1068. 1988.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Mapa geológico da Folha Caraguatatuba**. SF-23-Y-D-VI-1. São Paulo: CPRM, 1982a. Escala 1:50.000.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Mapa geomorfológico da Folha Caraguatatuba**. SF-23-Y-D-VI-1. São Paulo: CPRM, 1981a. Escala 1:50.000.

CPRM - COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS. **Mapa geológico da Folha Pico do Papagaio**. SF-23-Y-D-V-2. São Paulo: CPRM, 1991. Escala 1:50.000.

CROSTA, G.B.; CALVETTI, F.; IMPOSIMATO, S.; RODDEMAN, D., FRATTINI, P.; AGLIARDI, F. **Granular flows and numerical modeling of landslides**. Debrisfall assessment in mountain catchments for local end-users, p. 71, 2001.

CROZIER, M.J. The climate-landslide couple: A southern hemisphere perspective. In: MATTHEWS et al. **Rapid Mass Movement as a Source of Climatic Evidence for the Holocene: Palaeoclimate Research**. Stuttgart: Gustav Fischer Verlag, v. 19, p. 333-354, 1997.

CRUZ, O. **A Serra do Mar e o litoral na área de Caraguatatuba-SP – contribuição à geomorfologia litorânea tropical**. Tese (Doutorado em Geografia), Universidade de São Paulo, USP, 1974. 181p.

CRUZ, O. Contribuição geomorfológica ao estudo de escarpas da Serra do Mar. **Revista do Instituto Geológico**, v. 11, n. 1, p. 9-20, 1990.

CRUZ, P.T.; MASSAD, F. Debris Flow: an attempt to define design parameters. In: Symposium on recent Developments in Soil and Pavement Mechanics, Rio de Janeiro, 1997. **Proceedings...** Rio de Janeiro, Brazil, 6 p., 1997.

CRUZ, P.T.; MASSAD, F.; KANJI, M.A.; ARAÚJO-FILHO, H.A. Obras de preservação ambiental em encostas. In: Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica, 3, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABGE, 1999.

CURRY, R.R. Observation of alpine mudflows in the Tenmile Range, Central Colorado. **Bulletin of the Geological Society of America**, v.7, p. 771-776, 1966.

DA SILVA, R.F. **Análise de magnitude e frequência espacial de movimentos de massa em Caraguatatuba-SP**. Dissertação (Mestrado em Geografia Física), Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. 109 p.

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

DAVIES, T.R. Debris flow behavior - an integrated overview. In: WALLING, D. E. **Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions**. Julho, IAHS, n.209. Chengdu, China: [s.n.], 1992. p. 217-225.

DE FINIS, E.; GATTINONI, P.; MARCHI, L.; SCESI, L. Modeling Debris Flows in Anomalous Basin-Fan Systems. In: Mikos M., Tiwari B., Yin Y., Sassa K. (eds) **Advancing Culture of Living with Landslides**. WLF 2017. Springer, Cham. 2017.

DE GROOT, S.J. Quantitative assessment of the development of the offshore oil and gas industry in the North Sea. **ICES Journal of Marine Science**, v. 53, p.1045–1050. 1996.

DELAVAR, M. R.; NAGHIBI, F. Pipeline Routing Using Geospatial Information System Analysis. In: Scandinavian Research Conf. on Geographical Information Science, 9, Escandinávia. **Anais...** Escandinávia, 2003.

DEUBELBEISS, Y.; GRAF, C. Two different starting conditions in numerical debris flow models – Case study at Dorfbach, Randa (Valais, Switzerland). In: Graf, C. (Red.) **Mattertal - ein Tal in Bewegung**. Publikation zur Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft, 2011, St. Niklaus. Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL. 125–138. 2013.

DEWOLFE, V.G.; SANTI, P.M.; EY, J.; GARTNER, J.E. Effective mitigation of debris flows at Lemon Dam, La Pata County, Colorado. **Geomorphology**, v. 96, n. 3-4, p. 366-377, 2008.

DI, B.F.; CHEN, N.S.; CUI, P.; LI, Z.L.; HE, Y.P.; GAO, Y.C. GIS-based risk analysis of debris flow: an application in Sichuan, southwest China. **International Journal of Sediment Research**, v. 23, p.138–148, 2008.

DNIT - DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Shapefile da Malha Rodoviária Brasileira**. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/mapas-multimodais/shapefiles>>. Acesso em: 17 jul. 2015.

DOMINGUES, L.S.V. **Análise comparativa de softwares de simulação de onda de cheia e corridas de massa**. Trabalho de Conclusão do Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2012.

ELLEN, S.D.; MARK, R.K.; CANNON, S.H.; KNIFONG, D.L. **Map of debris-flow hazard in the Honolulu District of Oahu, Hawaii**. United States Geological Survey Open-File Report, p. 93-213, p. 24. 1993.

EM-DAT. **International Disaster Database**. 2008. Disponível em: <www.emdat.be>. Acesso em: 02 jan. 2018.

EMPLASA - EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S/A. **Projeto Mapeia São Paulo – Vale do Paraíba e Litoral Norte**. Ortofotos 2011. Escala 1:10.000. Ortofotos. São Paulo: EMLASA.

EMPLASA - EMPRESA PAULISTA DE PLANEJAMENTO METROPOLITANO S/A. **Projeto Mapeia São Paulo – Vale do Paraíba e Litoral Norte**. Apresentação. São Paulo: EMLASA, 2018. Disponível em: <http://www.mapeiasp.sp.gov.br/Images/MAPEIASP_INFO_GERAL.pdf>. Acesso em: 25 jan. 2018.

ERIKSEN, E.; PLAFKER, G.; FERNÁNDEZ CONCHA, J. **Preliminary Report on the Geologic Events Associated with the May 31, 1970, Peru Earthquake**. Geological Survey Circular 639. Washington, 1970, 25 p., 1970.

ESRI 2014. **ArcGIS Desktop: Release 10.2.2**. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute.

ESRI. **Basemap: World Imagery**. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute. 2017.

FAIRCHILD, L.H.; WIGMOSTA, M. Dynamic and volumetric characteristics of the 18 May 1980 lahars on the Toutle River, Washington. In: Symposium on Erosion Control in Volcanic Areas, Washington. **Proceedings...** Washington, USA: Technical Memorandum of Public Works Research Institute, p. 131-153, 1983.

FAN, L.; LEHMANN, P.; MCARDELL, B.; OR, D. Linking rainfall-induced landslides with debris flows runout patterns towards catchment scale hazard assessment. **Geomorphology**, v. 280, 1-15. 2017.

FANNIN, R.J.; ROLLERSON, T.P. Debris flows: some physical characteristics and behavior. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 30, p. 71-81. 1993.

FERNANDES, N.F. Modelagem matemática em geomorfologia: potencialidades e limitações. **Revista Sociedade e Natureza**, v. 8, n. 15, p. 222-227, 1996.

FERNANDES, N.F. Modelagem em Geografia Física: Teoria, Potencialidades e Desafios. **Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFRJ**, v. 6, n. 1, 2016.

FERNANDES, N.F.; AMARAL, C.P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra, A.J.T.; Cunha, S.B. (Orgs.). **Geomorfologia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand, 1996. p. 123- 194.

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

FERREIRA, F.S. **Análise da influência das propriedades físicas do solo na deflagração dos escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP)**. Dissertação (Mestrado em Geografia Física), Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. 113 p.

FISHER, R.V. Features of coarse-grained, high concentration fluids and theirs deposits. **Journal Sediment Petrology**, 41, p.916-927, 1971.

FITZ, P.R. **Geoprocessamento sem complicação**. São Paulo: Oficina de Textos, 2008.160 p.

FLEISCHMAN, S.M. **Debris Flow**. Monografia, Lenigrado, Ed. Universidade de Moscou. 1978.

FLORENZANO, T. G.; CSORDAS, S. M. **Mapa geomorfológico da Região do Médio Vale do Paraíba e Litoral Norte do Estado de São Paulo**. São José dos Campos: INPE, 1993. Escala: 1:250.000.

FRANK, F.; MCARDELL, B.W.; HUGGEL, C.; VIELI, A. The importance of entrainment and bulking on debris flow runout modeling: examples from the Swiss Alps. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 15, p. 2569–2583. 2015.

FRANK, F.; MCARDELL, B.W.; OGGIER, N.; BAER, P.; CHRISTEN, M.; VIELI, A. Debris flow modeling at Meretschibach and Bondasca catchment, Switzerland: sensitivity testing of field data-based entrainment model. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 17, p. 801–15. 2017.

FRAU, C.M.; PINO, L.M.; ROJAS, Y.O.; HERNÁNDEZ, Y.M. Modelamiento geométrico del cambio de coordenadas UTM causadas por mudanza de referencial geodésico. Caso SIRGAS – Chile. **Boletim Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 18, n. 4, p.583-604, 2012.

FREITAS, C.G.L.; TAVEIRA, L.S.; PECCHIALI, F. Situações de risco na região da Serra do Mar no Estado de São Paulo: obras lineares. In: Simpósio Latino Americano sobre risco geológico urbano, 1, 1990, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1990.

FREKHAUG, M.H. **An assessment of prediction tools to Norwegian debris flows**. Dissertação (Mestrado), Master Norwegian University of Science and Technology. 2015.

FÚLFARO, V.; 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...** Rio de Janeiro: ABGE, 1976. v. 2, p. 341-350. CD-ROM.

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

GEMS, B.; WÖRNDL, M.; GABL, R.; WEBER, C.; AUFLEGER, M. Experimental and numerical study on the design of a deposition basin outlet structure at a mountain debris cone. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 14, p. 175–187. 2014.

GLADE, T. Linking debris-flow hazard assessments with geomorphology. **Geomorphology**, v. 66, p. 189-213. 2005.

GODT, J. W.; COE, J. A. Alpine debris flows triggered by a 28 July 1999 thunderstorm in the central Front Range, Colorado. **Geomorphology**, v. 84, p. 80-97, 2007.

GOMES, R.A.T. **Modelagem de Previsão de Movimentos de Massa a Partir da Combinação de Modelos de Escorregamentos e Corridas de Massa**. Tese (Doutorado) - Geografia, UERJ, Rio de Janeiro, 2006. 180p.

GOMES, C.L.R.; OGURA, A.T.; GRAMANI, M.F.; CORSI, A.C.; ALAMEDDINE, N. Retro-análise da corrida de massa ocorrida no ano de 1967 nas encostas da

Serra do Mar, vale dos rios Camburu, Pau D' Alho e Canivetal, município de Caraguatatuba - SP: quantificação volumétrica dos sedimentos depositados nas planícies de inundação. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 12, Recife, 2008. **Anais...** Recife: ABGE, 2008. CD-ROM.

GOMES, M.C.V.; DIAS, V.C.; VIEIRA, B.C. Influência dos parâmetros morfométricos na magnitude de corridas de detritos em Caraguatatuba/SP, Serra do Mar: análise preliminar. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 15, Bento Gonçalves, 2015. **Anais...** Bento Gonçalves: ABGE, 2015.

GOSTNER, W.; BEZZOLA, G.R.; SCHATZMANN, M.; HANS-ERWIN, M. Water related natural disasters: Strategies to deal with debris flows: The case of Tschengls, Italy. In: WIEGANDT, E. **Mountains: Sources of Water, Sources of Knowledge**. Netherlands: Springer, v. 31, p. 221-241, 2008.

GOVI, M.; SORZANA, P.F. Landslide susceptibility as function of critical rainfall amount in Piedmont basins (North-Western Italy). **Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica**, n. 14, p. 43-61, 1980.

GRAF, C.; MCARDELL, B.W. Debris-flow monitoring and debris-flow runout modelling before and after construction of mitigation measures: an example from an instable zone in the Southern Swiss Alps. In: **La géomorphologie alpine: entre patrimoine et contrainte**. Université de Lausanne. Institut de Géographie, p. 245-258, 2011.

GRAF, C.; STOFFEL, M.; GRÊT-REGAMEY, A. Enhancing debris flow modeling parameters integrating Bayesian networks. **Geophysical Research Abstracts**, v. 11, n. 10, p. 725–10,721. 2009.

GRAF, C.; DEUBELBEISS, Y.; BÜHLER, Y.; MEIER, L.; MCARDELL, B.; CHRISTEN, M.; BARTELT, P. Gefahrenkartierung Mattertal: Grundlagenbeschaffung und numerische Modellierung von Murgängen, in: **Mattertal – ein Tal in Bewegung**, Herausgeber: Graf, C., Publikation zur Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft, 29 June to 1 July 2011, St. Niklaus, Birmensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL, 85-1-12, 2013

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

GRAMANI, M.F. A corrida de massa no Córrego Guarda-Mão, município de Itaoca (SP): impacto e observações de campo. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 15, 2015, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: ABGE, 2015. CD-ROM.

GRAMANI, M.F.; OLIVITO, J. P. R.; AUGUSTO FILHO, O., MAGALHÃES, F. S. Análise da potencialidade de geração de corridas de massa nos trechos serranos do duto OSBAT. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 11, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABGE, v.1. p. 1350 – 1365, 2005.

GREGORETTI, C.; DEGETTO, M.; BOREGGIO, M. GIS-based cell model for simulating debris flow runout on a fan. **Journal of Hydrology**, v. 534, p. 326–340, 2016.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. **Estabilidade de taludes naturais e sua escavação**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

GUY, M. Quelques principes e quelques expériences sur la methodologie de la photointerpretation. In: Symp. Intern. Photo-Interpretation, 2., Paris, **Acte...** v.1, p. 21-41. 1966.

GUZZETTI, F.; MONDINI, A.C.; CARDINALI, M.; FIORUCCI, F.; SANTANGELO, M.; CHANG, K.T. Landslide inventory maps: new tools for an old problem. **Earth Science Reviews**, v. 112, p. 42-66, 2012.

HARVEY, D.W. **Explanation in geography**. Ed. Arnold: Londres, 1969. 521p.

HASHIMOTO, H.; HIRANO, M. **Model of deposition of grains from debris flow**. In: FRENCH, R.H. (ed.). *Hydraulics/Hidrology of Arid Lands (H2AL)*. p.537-542, 1990.

HATTANJI, T.; MORIWAKI, H. Morphometric analysis of relic landslides using detailed landslide distribution maps: implications for forecasting travel distance of future landslides. **Geomorphology**, v. 103, p. 447-454. 2009.

HONG, X.Y.; WANG, L.X.; ZHU, J.C.; SUN, B.P.; WANG, Q.T.; ZIAO, H.M. The debris flow in Han Yu Forest of Mi Yun County of Beijing. In: International Symposium of Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, Japão. **Anais...** Erosion Control Society of Japan: Tsukuba, Japão, p. 191–193. 1985.

HUEBL, J.; FIEBIGER, G. Debris-flow mitigation measures. In: JAKOB, M.; OLDRICH, H. **Debris-flow Hazards and Related Phenomena**. Berlin, Heidelberg: Praxis-Springer, Cap. 18, p. 445-487, 2005.

HUNGR, O. Classification and terminology. In: JAKOB, M.; HUNGR, O. **Debris flow Hazards and Related Phenomena**. Praxis-Springer, p. 47-61, 2005.

HUNGR, O.; MORGAN, G.C.; KELLERHALS, R. Quantitative analysis of debris torrent hazards for design of remediation measures. **Canadian Geotechnical Journal**, n. 21, p. 663-677, 1984.

HUSSIN, H.Y.; QUAN-LUNA, B.; VAN WESTEN, C.J.; CHRISTEN, M.; MALET, J.P., VAN ASCH, T. Parameterization of a numerical 2-D debris flow model with entrainment: a case study of the Faucon catchment, Southern French Alps. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 12, p. 3075–3090. 2012.

HUTCHINSON, J. N. Mass movement. In: FAIRBRIDGE, R. W. **Encyclopedia of geomorphology**. New York: Reinhold Book Corp, p. 688-696, 1968.

HUTCHINSON, J.N. General report: Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: International Symposium on Landslides, 5th, Lausanne, 1998. **Anais...** Lausanne, 1998, v.1. p. 3-35.

IBGE- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual Técnico de Uso da Terra**. 3 ed. IBGE: Rio de Janeiro, 2013.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Folha de Maresias**. São Paulo: IBGE, 1973. SF-23-Y-D-V-4. Escala 1:50.000.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Folha de Caraguatatuba**. São Paulo: IBGE, 1974a. SF-23-Y-D-VI-1. Escala 1:50.000.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Folha do Pico do Papagaio**. São Paulo: IBGE, 1974b. SF-23-Y-D-V-2. Escala 1:50.000.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Folha de São Sebastião**. São Paulo: IBGE, 1975. SF-23-Y-D-VI-3. Escala 1:50.000.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Sistema de referência geocêntrico para a América do Sul**. Relatório Final Grupos de trabalho I e II. Rio de Janeiro: CDD IBGE, 1997. 122 p. Disponível em: <<http://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 25 mar. 2016.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Geociências - Malha municipal**. IBGE: Rio de Janeiro, 2016a. Disponível em: <https://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 27 mai. 2016.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Geociências – Estados brasileiros**. IBGE: Rio de Janeiro, 2016b. Disponível em: <https://downloads.ibge.gov.br/downloads_geociencias.htm>. Acesso em: 27 mai. 2016.

IG – INSTITUTO GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa geológico do município de São Sebastião**. São Paulo: IG, 1996a. Escala 1:50.000.

IG – INSTITUTO GEOLÓGICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapa geomorfológico do município de São Sebastião**. São Paulo: IG, 1996b. Escala 1:50.000.

IGC - INSTITUTO GEOGRÁFICO CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Folha SF-23-Y-D-VI-1-SO-B**. Escala 1:10.000. 1977.

IGC - INSTITUTO GEOGRÁFICO CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Folha SF-23-Y-D-VI-1-NO-E**. Escala 1:10.000. 1978a.

IGC - INSTITUTO GEOGRÁFICO CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Folha SF-23-Y-D-VI-1-NO-C**. Escala 1:10.000. 1978b.

IGC - INSTITUTO GEOGRÁFICO CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Folha SF-23-Y-D-VI-1-NO-F**. Escala 1:10.000. 1978c.

IGC - INSTITUTO GEOGRÁFICO CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Folha SF-23-Y-D-VI-1-SO-A**. Escala 1:10.000. 1978d.

IGC - INSTITUTO GEOGRÁFICO CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Folha SF-23-Y-D-VI-1-NO-D**. Escala 1:10.000. 1978e.

IGC – INSTITUTO GEOGRÁFICO E CARTOGRÁFICO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Mapeamento topográfico em escala 1:10.000**. São Paulo: IGC, 1979.

IKEYA, H. A method of designation for area in danger of debris flow. In: DAVIES, T.R.H.; PEARCE, A.J. (Eds.). **Erosion and sediment transport in Pacific Rim steep lands**. International Association Hydrological Science Publication, n. 132, Institute of Hydrology, Wallingford, Oxon, UK, p. 576–588. 1981.

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

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Estudos das instabilizações de encostas da Serra do Mar na região de**

Cubatão, objetivando a caracterização do fenômeno “Corrida de Lama” e a prevenção de seus efeitos. São Paulo: IPT, 1987. Relatório n. 25636.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Estudo das instabilizações de encostas na Serra do Mar na região de Cubatão objetivando a caracterização do fenômeno “corrida de lama” e da prevenção de seus efeitos.** São Paulo: IPT, 1988. Relatório n. 26258.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Reconhecimento, caracterização e monitoramento de locais potencialmente sujeitos a instabilizações na Serra do Mar na área de influência dos diversos Sistemas de Captação e Abastecimento de Água e de Tratamento de Esgoto.** IPT: São Paulo, 2002. Relatório n. 59123.

ISHIKAWA, N.; INOUE, R.; BEPPU, M.; HASEGAWA, Y.; MIZUYAMA, T. Dynamic load characteristics of debris flow model using different gravel size distribution. In: **Proceedings of Conference Interpravent**, p. 207-216, 2008.

IVERSON, R.M. The physics of debris flows. **Reviews of Geophysics**, v. 35, p. 245-296. 1997.

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

JAKOB, M.; HUNGR, O.; THOMSON, B. Two debris flows with anomalously high magnitude. In: Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, I, **Proceedings...** ASCE, p. 382-394, 1997.

JAKOB, M.; WEATHERLY, H. A hydroclimatic threshold for landslide initiation on the North Shore Mountains of Vancouver, British Columbia. **Geomorphology**, v. 54, p. 137-156, 2003.

JISHAN, W. Erosion and deposition from debris flows. In: WALLING, D.E.; DAVIES, T.R.; HASHOLT, B. (Eds.). Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions. **Anais...** Chengdu Symposium, China, IAHS, n. 209, p. 355-360. 1992.

JOHNSON, A.M. **Physical processes in geology.** San Francisco: Freeman and Cooper, 577 p., 1970.

KANG, S.; LEE, S.R. Debris flow susceptibility assessment based on an empirical approach in the central region of South Korea. **Geomorphology**, v. 308, p. 1-12, 2018.

KANJI, M.A.; CRUZ, P.T.; MASSAD, F.; ARAUJO-FILHO, H.A. Basic and Common Characteristics of Debris Flows. In: Panamerican Symposium on Landslides, 2nd, Rio de Janeiro. **Proceedings...** COBRAE, 1997, Rio de Janeiro, Brazil, p. 223- 231.

KANJI, M.A.; MASSAD, F.; CRUZ, P.T. Debris Flows in Areas of Residual Soils: Occurrence and Characteristics. In: International Workshop on Occurrence and Mechanism of Flows in Natural Slopes and Earthfills, 2003, Sorrento. **Anais...** International Workshop on Occurrence and Mechanism of Flows in Natural Slopes and Earthfills. Naples: Associazione Geotecnica Italiana, 2003. v. 2. p. 1-9.

KANJI, M.A.; CRUZ, P.T.; MASSAD, F. Debris flow affecting the Cubatao Oil Refinery, Brazil. **Landslides**, v. 5, p. 71–82, 2008.

KOBIYAMA, M.; GOERL, R.F.; CORREA, G.P.; MICHEL, G.P. Debris flow occurrences in Rio dos Cedros, Southern Brazil: meteorological and geomorphic aspects. In: WRACHIEN, D.; BREBBIA, C.A. (Orgs.). **Monitoring, Simulation, Prevention and Remediation of Dense Debris Flows III**. Southampton: WITpress, 2010. p.77-88.

KOBIYAMA, M.; MICHEL, G.P. **Bibliografia dos trabalhos de fluxos de detritos ocorridos no Brasil no período de 1949-2014**. Trabalho Técnico GPDEN, n° 01, p. 15, 2014.

KOBIYAMA, M.; MICHEL, G.P.; GOERL, R.F. Historical views and current perspective of debris flow disaster management in Brazil. In: AVERSA, S.; CASCINI, L.; PICARELLI, L.; SCAVIA, C. (eds.). **Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice**. CRCPress/ Balkema, 2016. p.1189 -1194.

KOWALSKI, J. **Two-phase modeling of debris flows**. PhD Thesis. Zürich, ETH, 2008.

LAMBIN, E.F. **Modeling Deforestation Processes – A Review**. Trees Series B: Research Report, n. 1, EUR 15744 EN, European Commission, Luxembourg, 113p, 1994.

LARS, H. R. Relationships between accident investigations, risk analysis, and safety management. **Journal of Hazardous Materials**, v. 111, p. 13-19, 2004.

LARSEN, M. C.; TORRES-SANCHEZ, A. J. The frequency and distribution of recent landslides in three montane tropical regions of Puerto Rico. **Geomorphology**, v. 24, p. 309- 331. 1998.

LAWSON, D.E. Mobilization, movement, and deposition of active subaerial sediment flows, Matanuska Glacier, Alaska. **The Journal of Geology**, v. 90, p.279-300, 1982.

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

LISTO, F.L.R.; VIEIRA, B.C. Influência de parâmetros geotécnicos e hidrológicos na previsão de áreas instáveis a escorregamentos translacionais rasos utilizando o modelo TRIGRS. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 16, p. 485-500. 2015.

LIU, W.; SIMING, H.E.; OUYANG, C. Two-dimensional Dynamics Simulation of Two-phase Debris Flow. **Acta Geologica Sinica (English Version)**, v. 91, n. 5, p. 1873–1883. 2017.

LOCH, C. **A interpretação de imagens aéreas: noções básicas e algumas aplicações nos campos profissionais**. Série didática. Florianópolis: Editora da UFSC, 1984.

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**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, UNESP, Rio Claro, 2006. 302 p.

LOPES, E.S.S.; RIEDEL P.S. Simulação da corrida de massa do km 42 ocorrido na rodovia Anchieta. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 2, 2007, Santos. **Anais...** Santos: 2007.

LOPES, E.S.S.; RIEDEL, P.S.; BENTZ, C.M.; FERREIRA, M.V.; NALETO, J.L. C. Inventário de escorregamentos naturais em banco de dados geográfico - análise dos fatores condicionantes na região da Serra de Cubatão - SP. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (SBSR), 13, 2007, Florianópolis. **Anais...** São José dos Campos: INPE, p. 2785-2796. 2007.

LORENTE, A.; BEGUERÍA, S.; BATHURST, J.C.; GARCÍA-RUIZ, J.M. Debris flow characteristics and relationships in the Central Spanish Pyrenees. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 3, p. 683-692, 2003.

LOUP, B.; EGLI, T.; STUCKI, M.; BARTELT, P.; MCARDELL, B.; BAUMANN, R. Impact pressures of hillslope debris flows. Back-calculation and simulation

(RAMMS). In: Congress INTERPRAEVENT, 12, 2012, Grenoble. **Proceedings... Grenoble**, France, p. 225-236. 2012.

MACEDO, E. S. AKIOSSI, A. Escorregamentos ocorridos no Brasil entre 1988 e 1996: levantamentos a partir de notícias de jornal. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 34, 1996, Salvador. **Anais...** Araxá: SBG, 1996.

MARANDOLA JR., E.; MARQUES, C.; PAULA, L.T. de.; CASSANELI, L.B. Crescimento urbano e áreas de risco no litoral norte de São Paulo. **Revista Brasileira de Estudos da População**, v. 30, n. 1, p. 35-56. 2013.

MARCHETTI, D.A.B.; GARCIA, G.J. **Princípios de fotogrametria e fotointerpretação**. São Paulo: Nobel, 1986. 257p.

MARCHI, L.; D'AGOSTINO, M. Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 29, p. 207-220, 2004.

MARCHI, L.; ARATTANO, M.; DEGANUTTI, A.M. Ten years of debris-flow monitoring in the Moscardo Torrent (Italian Alps). **Geomorphology**, v. 46, p. 1- 17, 2002.

MARCHI, L.; FONTANA, G.D. GIS morphometric indicators for the analysis of sediment dynamics in mountain basins. **Environmental Geology**, v. 48, p. 218–228. 2005.

MARCUZZO, F.F.N.; ANDRADE, L.R.; MELO, D.C.R. Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.4, n.4, p. 696-710. 2011.

MARQUES, M. L.; FERREIRA, M. V.; RIEDEL, P. S.; BENTZ, C. M. Utilização de imagens orbitais de alta resolução no monitoramento de faixa de dutos. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 15. Curitiba, mai. 2011. **Anais...** Curitiba: INPE, 2011.

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

MARTINS, M. **Geração de ortoimagem a partir de georreferenciamento direto de imagens digitais aérea de pequeno formato com dados LiDAR**. Dissertação (Mestrado em Ciências Geodésicas), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2010. 131 p.

MASSAD, F.; CRUZ, P.T.; KANJI, M.A. Comparison between estimated and measured debris flow discharges and volume of sediments. In: Pan-American Symposium on Landslides, 2nd, Rio de Janeiro, 1997. **Anais...** Rio de Janeiro: 1997.

MCARDELL, B.W.; CESCO, M.; HUGGEL, C.; SCHEUNER, Y.; GRAF, C.; CHRISTEN, M. Numerical Modeling of debris flow run-out in the Swiss Alps. In: GSA Denver Annual Meeting, Denver, 2007. **Proceedings...** Denver, USA, Geological Society of America Abstracts with Programs, v. 39, 438 p. 2007.

MCCLUNG, D.M. Superelevation of flowing avalanches around curved channel bends. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 106, n. B8, p. 16489–16498. 2001.

MELELLI, L.; TARAMELLI, A. An example of debris-flow hazard modeling using GIS. **Natural Hazard and Earth System Sciences**, v. 4, p. 374-358. 2004.

MELLO, R.C.; VAREJÃO L.C.; DOURADO, F. Megadesastre '11 da Serra Fluminense: a corrida de massa do Vale do Cuiabá, em Itaipava/Petrópolis – análise preliminar dos condicionantes geológicos. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 13, 2011. **Anais...** São Paulo: ABGE, 2011. CD-ROM.

MICHEL, G.P.; KOBAYAMA, M.; GOERL, R.F. Análise comparativa entre os modelos Shalstab e Sinmap na identificação de áreas susceptíveis a escorregamentos translacionais. In: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 10, Foz do Iguaçu, 2012. **Anais...** Foz do Iguaçu: UTFPR, 2012.

MICHEL, G.P.; KOBAYAMA, M. Mapeamento de áreas susceptíveis a fluxos de detritos por meio de modelagem computacional. In: LADWIG, N.I.; SCHWALM, H. (Org.). **Planejamento e gestão territorial: Hidrografia e sustentabilidade**. Florianópolis: Insular, 2016. p.71-89.

MIDRIAK, R. **Debris Flow and their occurrence in the Czechoslovak High-Mountain West Carpathians**. In: International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention. Sept., Tsukuba-Japan. p.175-180. 1985.

MIZUYAMA, T. Analysis of sediment yield and transport data for erosion control works. Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield. **Proceedings Exeter Symposium**, IAHS Publication, n. 137, p. 177-182, 1982.

MOREIRA, C.V.R.; PIRES NETO, A.G. Clima e Relevo. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. **Geologia de Engenharia**. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, 1998.

MORGAN, B.A. WIECZOREK, G.F.; CAMPBELL, R.H.; GORI, P.L. **Debris flows hazards in areas affected by the June 27, 1995 storm in Madison County, Virginia**. USGS, Open File Report 97-438, 14p, 1997.

MOTTA, H. P. **Avaliação de corridas de detritos para a previsão de eventos futuros**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

NETTLETON, M.I.; MARTIN, S.; HENCHER, S.; MOORE, R. Debris flow types and mechanisms. In: Winter, M. G.; Macgregor, F.; Shackman (Eds). Press. **Scottish road network Landslides study summary report**, Scottish, p. 1-19, 2005.

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

NI, J.; WANG, G. Some aspects of the mechanism of debris flow. In: FRENCH, R.H. (Ed.). **Hydraulics/Hidrology of Arid Lands (H2AL)**. p.422- 427, 1990.

NOGUEIRA-JUNIOR, J.; MARQUES, A. S. Linhas de transmissão e dutovias. In: OLIVEIRA, A. M. D. S.; BRITO, S. N. A. D. (Eds.). **Geologia de engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. Cap.30. p.475-485.

NUNES, A.L.; SAYÃO, A. Debris flows e técnicas de mitigação e convivência. In: Congresso Nacional de Geotecnia, 14, Covilhã, 2014. **Anais...** Covilhã, Portugal: 2014, p. 83-123.

OKUDA, S.; SUWA, H.; OKUNISHI, K.; NAKANO, M.; YOKOYAMA, K. Synthetic observation on debris flow, part. 3. Observation at Valley Kamikamihorizawa of Mt. Yakedake in 1976. **Annals of Disaster Prevention Research Institution**, Kyoto University, v. 20B-I, p. 237-263, 1977.

OKUSA, S.; ANMA, S.; MAIKUMA, H. A Gigantic Avalanche Resulting from the 1984 Naganoken-Seibu Earthquake, Central Japan. In: GARDINER, V. International Geomorphology, Parte I. **Proceedings...** International Conference on Geomorphology, I, p. 407-430, 1986.

OLIVEIRA, T.A. **Compartimentação fisiográfica aplicada à avaliação de terrenos: subsídio ao planejamento territorial do município de Cananeia-SP**. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", 2004.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **Working party on world landslide inventory**. Bulletin of the IAEG, 41, p. 5-12. 1993.

PAULA, J.P L.; CERRI, L E.S.; LOLLO, J.A. Carta geológico-geotécnica para implantação de dutovia no norte do município de Itu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 11., 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABGE, 2005. v. 1.

PEDREZZI, J.A. Hidrologia Aplicada. 2004. Disponível em: <<http://www.facens.br/site/alunos/download/hidrologia>>. Acesso em 15 dez. 2017.

PELLEGATTI, C.H.G.; GALVANI, E. Avaliação da precipitação na Serra do Mar-SP em eventos de diferentes intensidade e duração. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 27, p. 147 – 158. 2010.

PEROV, V.F.; ARTYUKHOVA, I.; BUDARINA, O.; GLAZOVSKAYA, T.; SIDOROVA, T. Map of the world mudflow phenomena. In: Debris Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, **Proceedings**, 1st Conference, ASCE, p.322-331, 1997.

PETRI, S.; SUGUIO, K. Características granulométricas dos materiais de escorregamentos de Caraguatatuba, São Paulo, como subsídio para o estudo da sedimentação Neoceno-zóica do Sudeste Brasileiro. In: Congresso da Sociedade Brasileira de Geologia, 25. **Anais...** p.71-82, 1971.

PLAFKER, G.; ERICKSON, G.E. Navados Huascarán avalanches, Peru. In: VOIGHT, B. (ed). **Rockslides and avalanches**. Amsterdam: Elsevier, p. 277-314, 1978.

PIERSON, T.C. Dominate particle support mechanism in debris flow at Mt. Thomas New Zealand, and implications for flow mobility. **Sedimentology**, v. 28, p. 49-60. 1981.

PIERSON, T. Flow behaviour of channelized debris flows, Mt. St. Helens. In: ABRAHAM, A. D. **Hillslope processes**. Boston: Allen and Unwin, p. 1173-1176, 1986.

POLANCO, L.S.E. **Correlações empíricas para fluxo de detritos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - UFRJ/COPPE, Rio de Janeiro, 2010. 110 p.

PORTELA, V.D.A. **Avaliação da vegetação como indicadora de áreas suscetíveis a escorregamentos na Serra do Mar em Caraguatatuba (SP)**. Dissertação (Mestrado em Geografia Física), Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2014. 122 p.

PORTER, M.; SAVIGNY, K.W. Natural hazard and risk management for South American pipelines. In: International Pipeline Conference, 4, Calgary, 2002. **Proceedings...** Calgary, Canada, 2002.

PRADO, J; HIRAI, R.Y. Checklist dalicófitas e samambaias do Estado de São Paulo. **Biota Beotropical**, v. 11, n.1. 2011.

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

RAÏMAT, C.; RIERA, E.; GRAF, C.; LUIS-FONSECA, R., FAÑANÁS, C.; HÜRLIMANN, M. Experiencia de la aplicación de RAMMS para la modelización de flujo tras la aplicación de las soluciones flexibles VX en el barranc de Portainé. En: Libro del VIII Simp. Nac. Sobre Taludes y Laderas Inestables, Palma de Mallorca, 11-14 Junio 2013. **Proceedings...** Barcelona: CIMNE, p. 1131-1144. 2013.

RAMMS::DEBRISFLOW. **User Manual v1.5 – Debris Flow**. A numerical model for debris flows in research and practice. WSL Institut für Schnee- und Lawinenforschung, 2013. 126 p.

REIS, F.A.G.V.; CERRI, L.E.S. (Coords.). **Metodologia para avaliação de áreas sujeitas à ocorrência de ondas de cheia e corridas de massa/detritos: Estudo piloto no duto OSBRA no Estado de São Paulo**. Processo Fundunesp: 1954/2011-CCP – Termo de Cooperação PETROBRAS 0050.0097435.15.9. Relatório final de pesquisa. Rio Claro: UNESP; PETROBRAS, 2014.

REIS, F.A.G.V.; ZAINE, J.E. (Coords.). **Alertas Meteorológicos para Avaliação de Risco Geológico e Geotécnico nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil / Alertas Meteorológicos Associados a Risco de Origem Geológico e Geotécnico**. Processo Fundunesp: 2.351/2014-CCP – Termo de Cooperação PETROBRAS 0050.0097435.15.9. Relatório 2. Rio Claro: UNESP; PETROBRAS, 2016.

REIS, F.A.G.V.; ZAINE, J.E. (Coords.). **Alertas Meteorológicos para Avaliação de Risco Geológico e Geotécnico nas Regiões Sul e Sudeste do Brasil / Alertas Meteorológicos Associados a Risco de Origem Geológico e Geotécnico**. Processo Fundunesp: 2.351/2014-CCP – Termo de Cooperação PETROBRAS 0050.0097435.15.9. Relatório final. Rio Claro: UNESP; PETROBRAS, 2018.

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

RICKENMANN, D. Hyperconcentrated flow and sediment transport at steep slopes. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 117, n. 11, p.1419-1439. 1991.

RICKENMANN, D. Empirical relationships for debris flows. **Natural Hazards**, v. 19, p. 47-77, 1999.

RICKENMANN, D.; ZIMMERMANN, M. The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. **Geomorphology**, v.8, p. 175-189, 1993.

RICKENMANN, D.; LAIGLE, D.; MCARDELL, B.; HÜBL, J. Comparison of 2D debris-flow simulation models with field events. **Computational Geosciences**, v. 10, n. 2, p. 241–264. 2006.

RITTER, D.F.; KOCHER, R.C.; MILLER, J.R. **Process Geomorphology**. Dubuque: Ed. William C. Brown Pub., p. 546, 1995.

RIVERA POMÉS, C.H. **Desenvolvimento de um Modelo Conceitual para Simulação de uma Avalanche de Detritos (Debris Flow) qualquer**. Tese (Doutorado em Engenharia de Solos), EPUSP - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 139 p. 1994.

ROCHA, H.L. **Aplicação do modelo Flo-2D para simulação de fluxos de detritos na Bacia do Rio Cunha, Rio dos Cedros/SC. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental)**, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 123 p. 2011.

RODINE, J.D. **Analysis of mobilization of debris flows**. PhD Thesis. Ed. California: Stanford University, 1974.

RODRIGUES, A.F.; POLIVANOV, H.; XAVIER DA SILVA, J.; OLIVEIRA, W.J. Avaliação geotécnica e ambiental da zona de influência do duto petrolífero no município de Mangaratiba (RJ), com a utilização da técnica de avaliação do terreno. In: Congresso Brasileiro de Petróleo e Gás, 3. 2005, Salvador. **Anais...** Salvador: IBP/ UNIFACS, 2005.

ROPER, W.; DUTTA, S. Remote Sensing and GIS Applications for Pipeline Security Assessment. In: ESRI User Conference Proceedings, 2005, San Diego. **Anais...** ESRI, San Diego, 2005.

ROSATTI, G.; BEGNUDELLI, L. Two-dimensional simulation of debris flows over mobile bed: Enhancing the TRENT2D model by using a well-balanced generalized Roe-type solver. **Computer and Fluids**, v. 71, p. 179–195. 2013.

ROSS, J.L.S.; MOROZ, I.C. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. USP/IPT/FAPESP. Escala 1:500.000. 1997.

ROSSO, M.; MAGNI, L. **Preliminary Short Course On Debris-Flow**. Politecnico di Torino, Dipartimento di Idraulica Trasporti e Infrastrutture civili. Curso Ministrado Na Escola Politécnica da USP no âmbito do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 2011.

SAKAI, R.O. **Estudo do impacto de Debris flows: caso da Bacia do Rio Santo Antônio em Caraguatatuba (Brasil)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014. 236 p.

SAKAI, R.O.; CARTACHO, D.L.; ARASAKI, E.; ALFREDINI, P.; PEZZOLI, A.; SOUSA JÚNIOR, W.C.; ROSSO, M.; MAGNI, L. Extreme Events Assessment Methodology Coupling Debris Flow, Flooding and Tidal Levels in the Coastal Floodplain of the São Paulo North Coast (Brazil). **International Journal of Geosciences**, v. 4, nº 5B, p. 30-38, 2013.

SALM, B. Flow, flow transition and runout distances of flowing avalanches. *Annals of Glaciology*, v. 18, p. 221-226. 1993.

SALM, B.; BURKARD, A.; GUBLER, H. **Berechnung von Fliesslawinen: eine Anleitung für Praktiker mit Beispielen**. Mitteilung 47, Eidg. Institut für Schnee- und Lawinenforschung - SLF. 1990.

SALVATICI, T.; MORELLI, S.; PAZZI, V.; FRODELLA, W.; FANTI, R. Debris flow hazard assessment by means of numerical simulations: implications for the Rotolon Creek Valley (Northern Italy). **Journal of Mountain Science**, v. 14, n. 4, p. 636-648. 2017.

SAMIA, J.; TEMME, A.; BREGT, A.; WALLINGA, J.; GUZZETTI, F.; ARDIZZONE, F.; ROSSI, M. Characterization and quantification of path dependency in landslide susceptibility. **Geomorphology**, v. 292, p. 16–24. 2017.

SANCHEZ, M.; PEDRONI, F.; LEITÃO-FILHO, H.F.; CESAR, O. Composição florística de um trecho de floresta ripária na Mata Atlântica em Picinguaba, Ubatuba, SP. **Revista Brasileira de Botânica**, n. 22, p. 31-42. 1999.

SANCHO, A.M.V. **Análise dinâmica de fluxos de detritos em regiões tropicais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Departamento de

Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. 160 p.

SANTOS, A.R. dos. Todas as áreas de topografia suave podem ser consideradas seguras? **EcoDebate**. 2011. Disponível em: <<http://www.ecodebate.com.br/2011/01/18/todas-as-areas-de-topografia-suave-podem-ser-consideradas-seguras-artigo-de-alvaro-rodrigues-dos-santos>>. Acesso em: 30 jan. 2018.

SANTOS, D.D.; GALVANI, E. Caracterização sazonal das precipitações no município de Caraguatatuba – SP, entre os anos de 1943 a 2004. **Revista GEONORTE**, Edição Especial 2, vol. 1, nº5, p. 1196-1203. 2012.

SANT'ANNA NETO, J.L. Dinâmica Atmosférica e o Caráter Transicional do Clima na Zona Costeira Paulista. **Revista do Departamento de Geografia (USP)**, São Paulo, v. 8, p. 35-49. 1994.

SAURET, B. **Coulées de débris canalisées - Compte rendu bibliographique**. 150/151. [S.l.]: Bull. Liaison Laboratoires Ponts et Chaussées. 1987. p. 65-77.

SCALLY, F.; SLAYMAKER, O.; OWENS, I. Morphometric controls and basin response in the Cascade mountains. **Geografiska Annaler**, v. 83, p. 117-130. 2001.

SCHRAML, K.; THOMSCHITZ, B.; MCARDELL, B.W.; GRAF, C.; KAITNA, R. Modeling debris-flow runout patterns on two alpine fans with different dynamic simulation models. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 3, n. 2, p. 1397-1425. 2015.

SCHUSTER, R.; SALCEDO, D.; VALENZUELA, L. Overview of catastrophic landslides of South America in the twentieth century. In: EVANS, S.; DEGRAFF, J. **Catastrophic landslides: effects, occurrence and mechanisms**. Boulder: General Society of America, p. 1-34, 2002.

SCOTT, K.M. Origins, behavior and sedimentology of lahars and laharrunout flows in the Toutle Cowlitz system. **USGS**, Prof. Paper, 1447-A, p.174, 1988.

SCOTT, K.M.; MACIAS, J.L.; NARANJO, J.A.; RODRIQUEZ, S.; MCGEEHIN, J.P. **Catastrophic Debris Flows Transformed from Landslides in Volcanic Terrains: Mobility, Hazard Assessment, and Mitigation Strategy**. USGS Professional Paper 1630, 59 p.). US Geological Survey, Reston, VA. 2001.

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

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

SESTINI, M.F.; FLORENZANO, T.G. Caracterização de cicatrizes de deslizamentos por processamento de dados TM Landsat em Caraguatatuba-SP. São Paulo, USP, **Geologia USP Série Científica**, v.4, n.2, p. 57-69. 2004.

SHARP, R.P.; NOBLES, L.H. Mudflow of 1941 at Wrightwood, Southern California. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 64, p. 547-560, 1953.

SHIEH, C.L.; CHEN, Y.S.; TSAI, Y.J.; WU, J.H. Variability in rainfall threshold for debris flow after the Chi-Chi earthquake in central Taiwan, China. **International Journal of Sediment Research**, v. 24, p. 177–188, 2009.

SLAYMAKER, O. The distinctive attributes of debris torrents. **Hydrological Sciences**, v. 33, n. 6, p. 567-573, 1988.

SMA – SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. **São Paulo 92: perfil ambiental e estratégias**. São Paulo: SMA. 181 p. 1992.

SOARES, P.C.; FIORI, A.P. Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. **Notícia Geomorfológica**, v. 16, n. 32, p. 71–104, 1976.

STARKEK, L. The role of extreme meteorological events in the shaping of mountain relief. **Geographia Polonica**, v. 41, p. 13-20, 1979.

STERNBERG, H.O. Enchentes e movimentos coletivos do solo no Vale do Paraíba em dezembro de 1948 – Influência da exploração destrutiva das terras. **Revista Brasileira de Geografia**, n. 11, v. 2, p. 223-261. 1949.

STRAHLER, A.N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, n. 11, p. 1117–1142. 1952.

SUWA, H.; OKUDA, S.; OGAWA, K. Size segregation of large boulders in debris flow. In: International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, Tsukuba, 1985. **Proceedings...** Japan. p.237-241, 1985.

TANG, C.; VAN-ASCH, T.W.J.; CHANG, M.; CHEN, G.Q.; ZHAO, X.H.; HUANG, X.C. Catastrophic debris flows on 13 August 2010 in the Qingping area, southwestern China: The combined effects of a strong earthquake and subsequent rainstorms. **Geomorphology**, v.139–140, p. 55–576, 2012.

TAKAHASHI, T. **Debris Flows**. Annual Review Fluid Mechanics. v.13. 1981. p. 57-77.

TAKAHASHI, T. **Debris flow**. IAHR Monograph, A. A. Balkema: Rotterdam, 1991.

TAKAHASHI, T. **Japan-China Joint Research on the Prevention from Debris Flow Hazards**. Intern. Scientific Research Program, n° 03044085. March/1994-Kyoto University, p. 100-113. 1994.

TAKAHASHI, T. **Mechanics and Countermeasures for the Debris Flows**. Curso ministrado em convênio da Escola Politécnica (USP) com o Disaster Prevention Research Institute (Kyoto University). 1998. 103p.

TAKAHASHI, T. **Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures**. London: Taylor & Francis Group, 2007.

TAKAHASHI, T. **Debris flow: mechanics, prediction and Countermeasures**. London: Taylor & Francis Group, 2014.

TAVARES, R.; SANT'ANNA NETO, J.L.; TOMMASSELLI, J.T.G.; PRESSINOTTI, M.M.N.; SANTORO, J. Análise da variabilidade temporal e espacial das chuvas associada aos movimentos de massa no Litoral Norte Paulista. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1., 2004, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: GEND/UFSC, p. 680-696. 2004.

THOMAS, M.F. **Geomorphology in the Tropics - A Study of Weathering and Denudation in Low Latitudes**. Wiley. Chichester. 1994.

TOBLER, D.; KULL, I.; JACQUEMART, M.; HAEHLEN, N. Hazard Management in a Debris Flow Affected Area: Case Study from Spreitgraben, Switzerland, **Landslide Science for a Safer Geoenvironment**, v. 3, p. 25–30. 2014.

TOMINAGA, L.K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: Aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP**. Tese (Doutorado em Geografia) - Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007. 207 p.

TRANSPETRO - PETROBRAS TRANSPORTE S.A. **Corrida de detritos/ Travessia do KM 48+670 da faixa do OSPAR**. 11 de fevereiro de 2017. Apresentação interna. 2017.

TRANSPETRO - PETROBRAS TRANSPORTE S.A. **Terminal São Sebastião**. 2018. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/terminais-e-oleodutos/terminal-sao-sebastiao.htm>>. Acesso em: 17 nov. 2018.

TRENCH, C.J. **How pipelines make the oil market work - Their networks, operation, and regulation**. New York: Allegro Energy Group, Association of Oil Pipe Lines, 2001. p. 1–20.

TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 4.ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2012. 939 p.

VAN STEIJN, H. Debris-flow magnitude-frequency relationships for mountainous regions of Central and Northwest Europe. **Geomorphology**, v. 15, p. 259-273, 1996.

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

VANDINE, D.F. Debris flows and debris torrents in the Southern Canadian Cordillera. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 22, p. 44-68. 1985.

VANDINE, D.F. **Debris flow control structures for forest engineering**. Working paper 22. Victoria, BC: Ministry of Forests Research Program. 1996.

VARNES, D.J. Slope movements types and processes. In: SCHUSTER, R. L.; KRIZEK, R. J. (Eds.). **Landslides analyses and control**. Washington: National Academy of Science, 1978. p. 11-33.

VEDOVELLO, R. **Zoneamentos Geotécnicos Aplicados à Gestão Ambiental, a partir de Unidades Básicas de Compartimentação – UBCs**. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2000.

VIANA, P.M.F. **Geovalas: um novo processo construtivo para dutos enterrados**. Tese (Doutorado em Geotecnia), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos. 2003.

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 Sciences**, v. 10, p. 1829–1837, 2010.

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

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

WATANABE, M.; IKEYA, H. Investigation and analysis of volcanic mud flow on Mt. Sakurajima, Japan. **Erosion and Sediment Transport Measurement**. IAHS Publication n. 133, p. 245 – 256. 1981.

WEI, Z.L.; XU, Y.P.; SUN, H.Y.; XIE, W.; WU, G. Predicting the occurrence of channelized debris flow by an integrated cascading model: A case study of a small debris flow-prone catchment in Zhejiang Province, China. **Geomorphology**, v. 308, p. 78-90. 2018.

WELSH, A.; DAVIES, A. Identification on alluvial fans susceptible to debris-flow hazards. **Landslides**, v. 8, p. 183-194. 2011.

WIECZOREK, G.F. Effect of rainfall intensity and duration on debris flows in central Santa Cruz Mountains, California. **Reviews in Engineering Geology**, vol. 7, p. 93-104, 1987.

WIECZOREK, G.F.; LARSEN, M.C.; EATON, L.S.; MORGAN, B.A.; BLAIR, J.L. **Debris-flow and flooding hazards associated with the December 1999 storm in coastal Venezuela and strategies for mitigation**. U.S. Geological Survey Open File Report 01-144, 40 p. 2001. Disponível em: <<http://geology.cr.usgs.gov/pub/open-file-reports/ofr-01-0144/>>. Acesso em: 23 dez. 2017.

WIECZOREK, G.F.; SARMIENTO, J. **Significance of storm intensity-duration for triggering debris flow near La Honda, California**. Geological Society of America. Boulder, CO, p. 5-289, 1983.

WIECZOREK, G.F.; SARMIENTO, J. Rainfall, piezometric levels and debris flows near La Honda, California in January 3-5, 1982 and other storms between 1975 and 1983. In: WIECZOREK, G.F.; ELLEN, S.D. **Landslides, floods, and marine effects of the January 3-5, 1982, storm in the San Francisco Bay Region, California**. Reston, VA: US Geological Survey, p. 43-62, 1988.

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**, v. 1, p. 61-66, 2004.

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

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

WORN, R., HUGGEL, C.; DORREN, L.K.A.; JABOYEDOFF, M. Numerical modelling of flows and falls. In: SHRODER, J. (Editor in Chief), MARSTON, R.A.; STOFFEL, M. (Eds.) **Treatise on Geomorphology**. Academic Press, San Diego, CA, v. 7, Mountain and Hillslope Geomorphology, p. 273–283. 2013.

WRIGHT, V.G.; KRONE, R.B. Erosion processes in upland areas. In: FRENCH, R.H. (ed.). **Hydraulics/Hidrology of Arid Lands (H2AL)**. p.142-147. 1990.

YABLONSKIY, V.V.; TISHCHENKO, A.S.; DEZIRON, A.V.; BOEVA, E.G. Debris flows in the Ukraine: some results of field and experimental studies. In: WALLING, D.E.; DAVIES, T.R.; HASHOLT, B. (Eds.). Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions. **Anais...** Chengdu Symposium, China, IAHS, n. 209, p. 361-367. 1992.

ZAINE, J.E. **Método de Fotogeologia aplicado a estudos geológico-geotécnicos: ensaio em Poços de Caldas, MG**. Tese (Livre docência em Geociências e Meio Ambiente), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Rio Claro, 2011.

ZERKAL, S.V.; ZERKAL, O.V. Simulation flow landslides by particle method. In: International Symposium on landslides, 9, 2004. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: 2004.

ZHEN-LEI, W.; YUE-PING, X.; HONG-YUE, S.; WEI, X.; GANG, W. Predicting the occurrence of channelized debris flow by an integrated cascading model: A case study of a small debris flow-prone catchment in Zhejiang Province, China. **Geomorphology**, v. 308, p. 78-90. 2018.

ZIMMERMANN, M. Debris flows 1987 in Switzerland: geomorphological and meteorological aspects. In: Hydrology in Mountains Regions. II Artificial Reservoirs; Water and Slopes. **Anais...** IHS: Lausanne Symposia, n. 194, 1990.

ZNAMENSKY, D.V.; TAMADA, K. Estruturas de Controle e de Manejo das Corridas Detriticas ou de Debris Flow. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, XXV, Salvador, 2003. **Anais...** Salvador, Brasil, v. III, p. 215- 232, 2003.

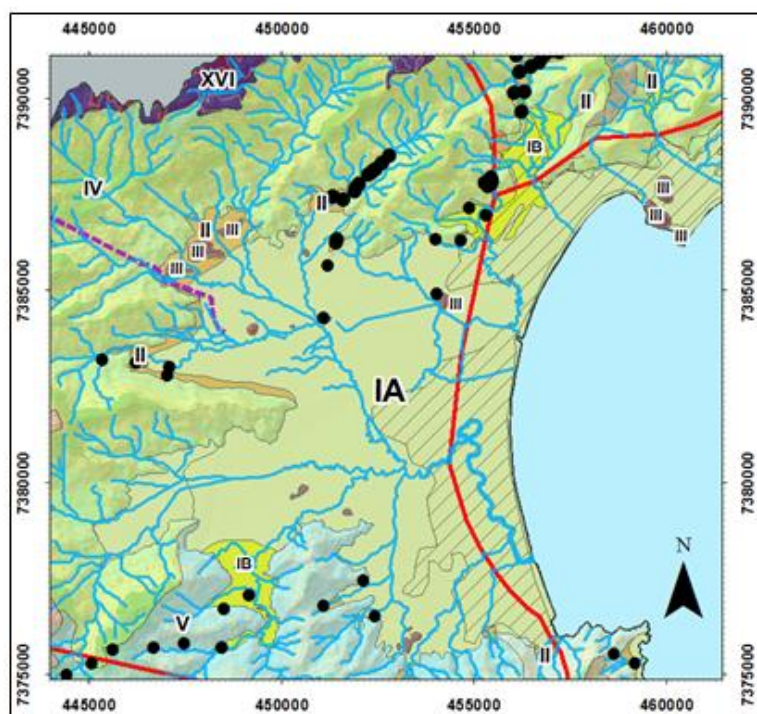
ZOLLINGER, F. **Debris detention basins in the European Alps**. In: International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention, Tsukuba, 1985. **Proceedings...** Tsukuba, Japan. p. 433-438, 1985.

ZUGLIANI, D. **Two-phase modelling of debris flow over composite topography: theoretical and numerical aspects**. PhD thesis, University of Trento. 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE 1. Pranchas das unidades fisiográficas

Prancha 1: Caracterização da Unidade fisiográfica IA



Detalhe da Unidade IA no mapa de compartimentação fisiográfica



Limites da Unidade IA com outras unidades fisiográficas



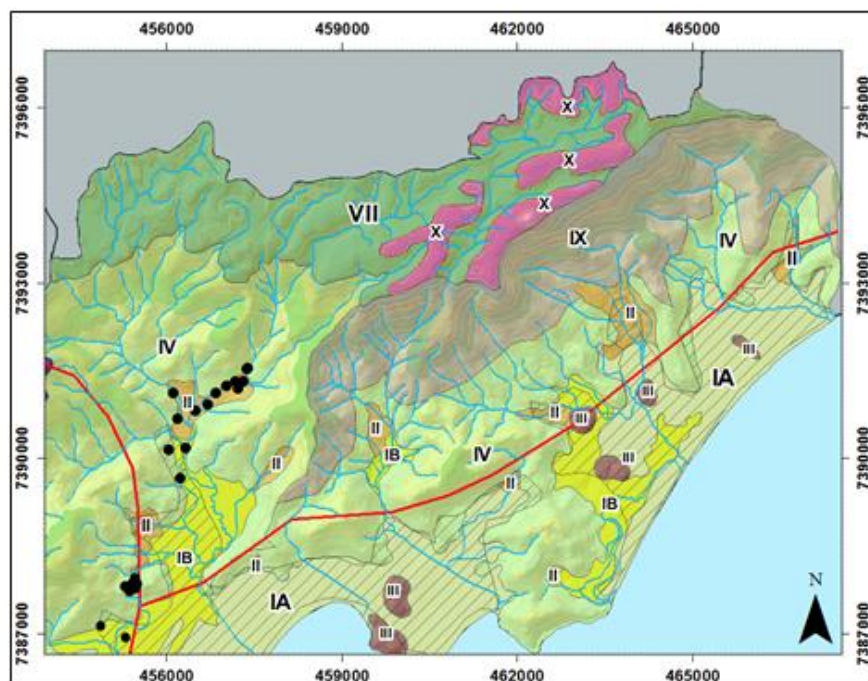
Perfil com argilas e areia média na Unidade Fisiográfica IA.



Unidade Fisiográfica IA no município de São Sebastião, com ocorrência mais restrita

Unidade fisiográfica	Geologia	Relevo	Fotoanálise											
			Análise da densidade textural					Análise das formas e características do relevo						
			Densidade de drenagem	Densidade dos elementos de relevo	Permeabilidade	Relação escoamento superficial/ infiltração	Espessura e características do manto de alteração	Amplitude altimétrica	Declividade	Formas de encosta	Forma do vale	Forma do topo	Feições particulares	
IA	Areias de deposição praial, areias quartzosas, siltes e argilas de deposição marinha e areias marinhas recobertas por areias, siltes e argilas de deposição fluvial	Planície costeira	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Não se aplica	Pequena	Muito Baixa	Não se aplica	Aberto	Aplainado	Planície costeira bem extensa em Caraguatatuba (SP)	
Unidade fisiográfica	Fotointerpretação					Observações de campo								
	Características geotécnicas													
	Profundidade do topo rochoso	Espessura dos materiais inconsolidados	Potencial a movimentos gravitacionais			Processos geológicos	Uso e cobertura da terra							
			Corridas de detritos	Escorregamentos										
IA	Não se aplica	Espesso	Médio (maior para inundações e corridas de lama)		Baixo	Registros históricos de corrida de lama e inundações			Área urbana, floresta, cultura temporária, mineração, complexo industrial, cultura permanente					

Prancha 2: Caracterização da Unidade fisiográfica IB



Detalhe da Unidade IB no mapa de compartimentação fisiográfica



Planície Fluvial da Unidade IB em contato com a Unidade V



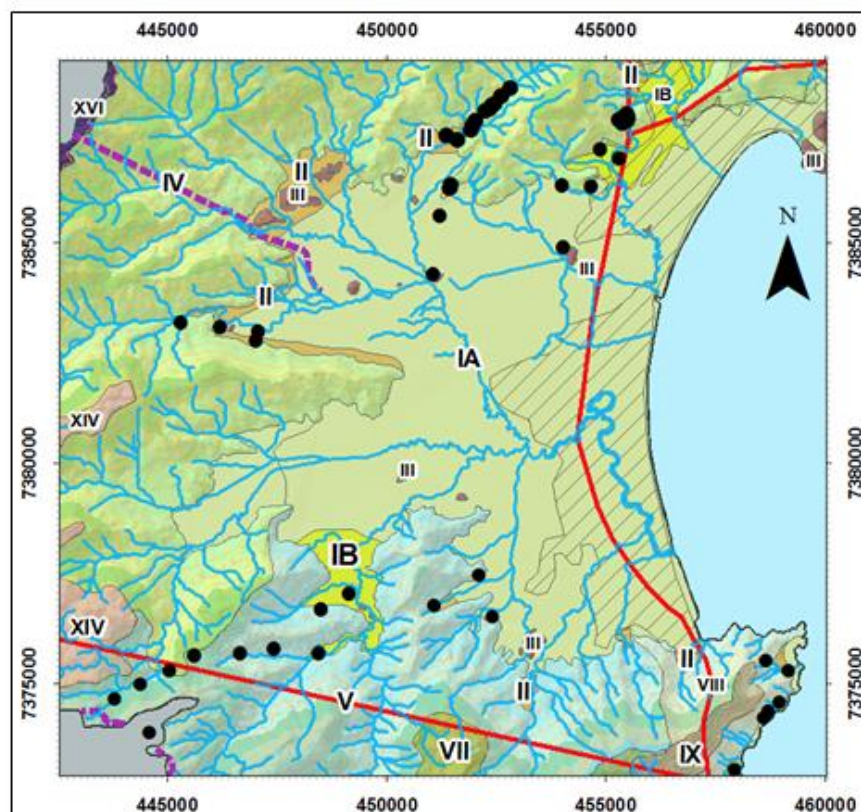
Planície Fluvial da Unidade IB em área urbana, na Bacia do Rio Santo Antônio, com presença de depósito de blocos (Gnaisses)



Planície Fluvial da Unidade IB, em sua porção mais à montante, cuja drenagem possui em seu leito deposição de blocos Migmatíticos

Unidade fisiográfica	Geologia	Relevo	Fotoanálise										
			Análise da densidade textural					Análise das formas e características do relevo					
			Densidade de drenagem	Densidade dos elementos de relevo	Permeabilidade	Relação escoamento superficial/ infiltração	Espessura e características do manto de alteração	Amplitude altimétrica	Declividade	Formas de encosta	Forma do vale	Forma do topo	Feições particulares
IB	Areias, siltes, argilas e cascalhos de deposição fluvial	Planície fluvial	Baixa	Baixa	Alta	Alta	Não se aplica	Pequena	Muito Baixa	Não se aplica	Aberto	Aplainado	Depósitos de corridas de detritos
Unidade fisiográfica	Fotointerpretação				Observações de campo								
	Características geotécnicas												
	Profundidade do topo rochoso	Espessura dos materiais inconsolidados	Potencial a movimentos gravitacionais		Processos geológicos	Uso e cobertura da terra							
			Corridas de detritos	Escorregamentos									
IB	Não se aplica	Espesso	Alto	Baixo	Registros de campo evidenciaram a ocorrência de corridas de detritos em várias planícies fluviais da área de estudo e inundações				Cultura permanente, floresta, área urbana, silvicultura				

Prancha 3: Caracterização da Unidade fisiográfica II



Detalhe da Unidade II no mapa de compartimentação fisiográfica

Detalhe do Granito esbranquiçado com granulação média e pouco máfico em rampa de tálus



Ponto de campo 24
X: 451088 mE
Y: 7376771,00004 mS

Rampa de tálus com depósito de blocos métricos (Granito)



Ponto de campo 24
X: 451088 mE
Y: 7376771,00004 mS

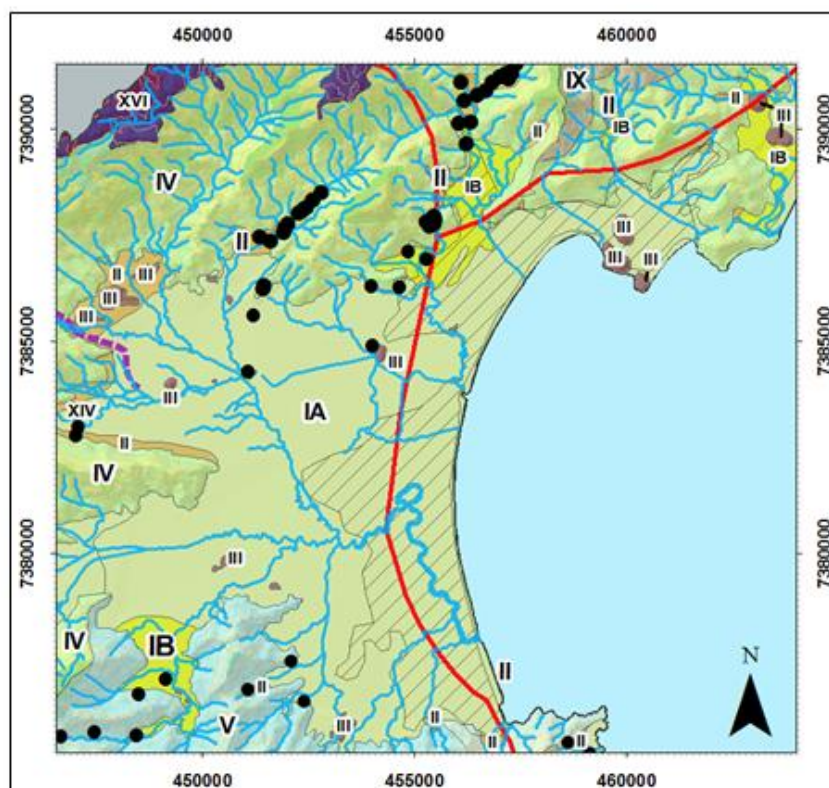


Ponto de campo 45
X: 458659 mE
Y: 7375513,00004 mS

Depósito coluvionar na porção superior da foto (de coloração marrom escura) e solo residual no restante do perfil

Unidade fisiográfica	Geologia	Relevo	Fotoanálise										
			Análise da densidade textural					Análise das formas e características do relevo					
			Densidade de drenagem	Densidade dos elementos de relevo	Permeabilidade	Relação escoamento superficial/ infiltração	Espessura e características do manto de alteração	Amplitude altimétrica	Declividade	Formas de encosta	Forma do vale	Forma do topo	Feições particulares
II	Sedimentos coluvionares e corpos de tálus	Rampas de colúvio e tálus	Baixa	Baixa	Média	Média	Grande	Pequena	Média	Convexa	Aberto	Aplainado	Evidências de escorregamento
Unidade fisiográfica	Fotointerpretação				Observações de campo								
	Características geotécnicas												
	Profundidade do topo rochoso	Espessura dos materiais inconsolidados	Potencial a movimentos gravitacionais		Processos geológicos				Uso e cobertura da terra				
			Corridas de detritos	Escorregamentos									
II	Profundo	Espesso	Alto	Alto	Registros de campo evidenciaram a ocorrência de escorregamentos em algumas rampas de colúvio/ tálus, além de corrida de detritos				Área urbana, floresta, pastagem, silvicultura, complexo industrial				

Prancha 4: Caracterização da Unidade fisiográfica III



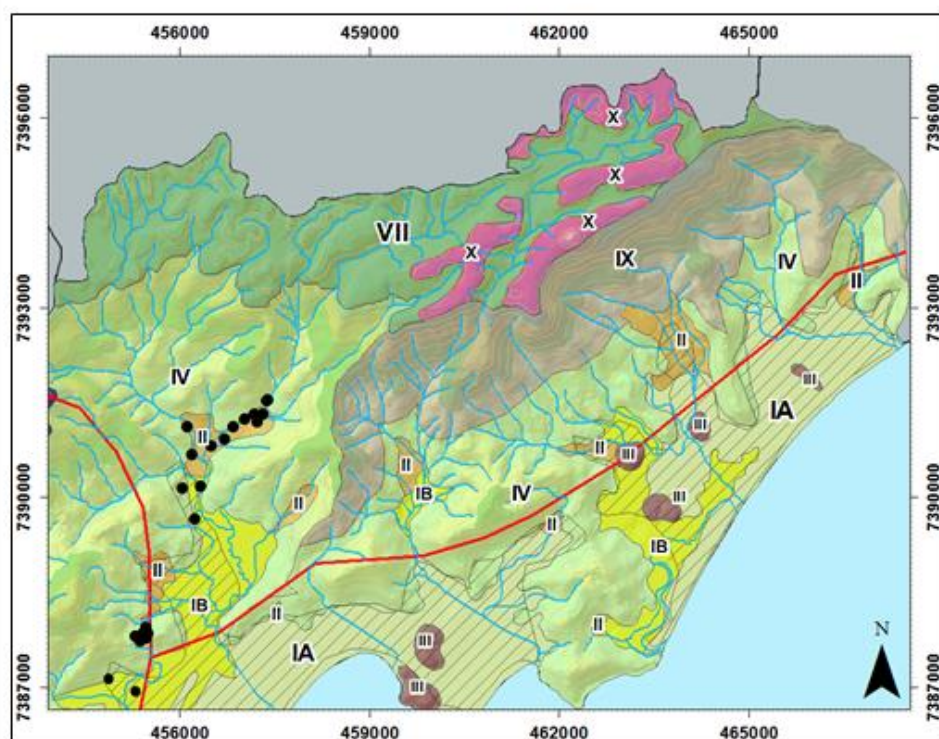
Detalhe da Unidade III no mapa de compartimentação fisiográfica



Morro isolado em planície costeira, principal característica da Unidade III

Unidade fisiográfica	Geologia	Relevo	Fotoanálise										
			Análise da densidade textural					Análise das formas e características do relevo					
			Densidade de drenagem	Densidade dos elementos de relevo	Permeabilidade	Relação escoamento superficial/ infiltração	Espessura e características do manto de alteração	Amplitude altimétrica	Declividade	Formas de encosta	Forma do vale	Forma do topo	Feições particulares
III	Granitos e gnaisses em corpos insulares	Morros isolados	Baixa	Baixa	Média	Média	Grande	Pequena	Média	Convexa	Não se aplica	Aplainado	Morros isolados graníticos-gnáissicos
Unidade fisiográfica	Fotointerpretação						Observações de campo						
	Características geotécnicas												
	Profundidade do topo rochoso	Espessura dos materiais inconsolidados	Potencial a movimentos gravitacionais				Processos geológicos	Uso e cobertura da terra					
			Corridas de detritos		Escorregamentos								
III	Profundo	Intermediário	Baixo		Médio		Foram observados pontos de rastejo em campo		Floresta, pastagem, cultura temporária, área urbana				

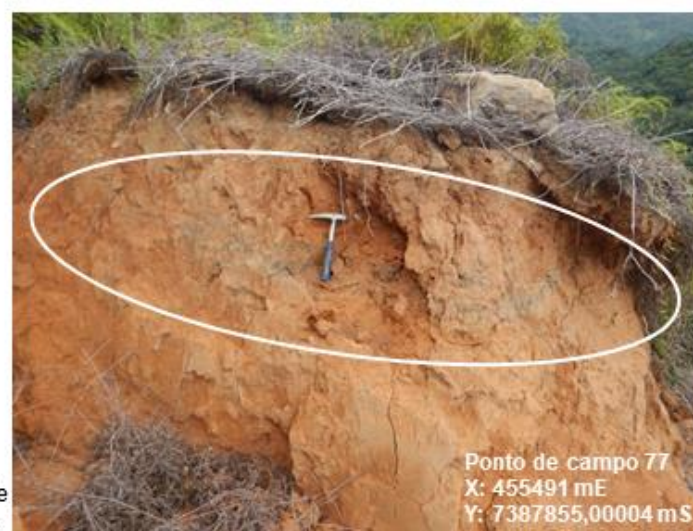
Prancha 5: Caracterização da Unidade fisiográfica IV



Detalhe da Unidade IV no mapa de compartimentação fisiográfica



Visão geral da Unidade IV a partir da Unidade IA



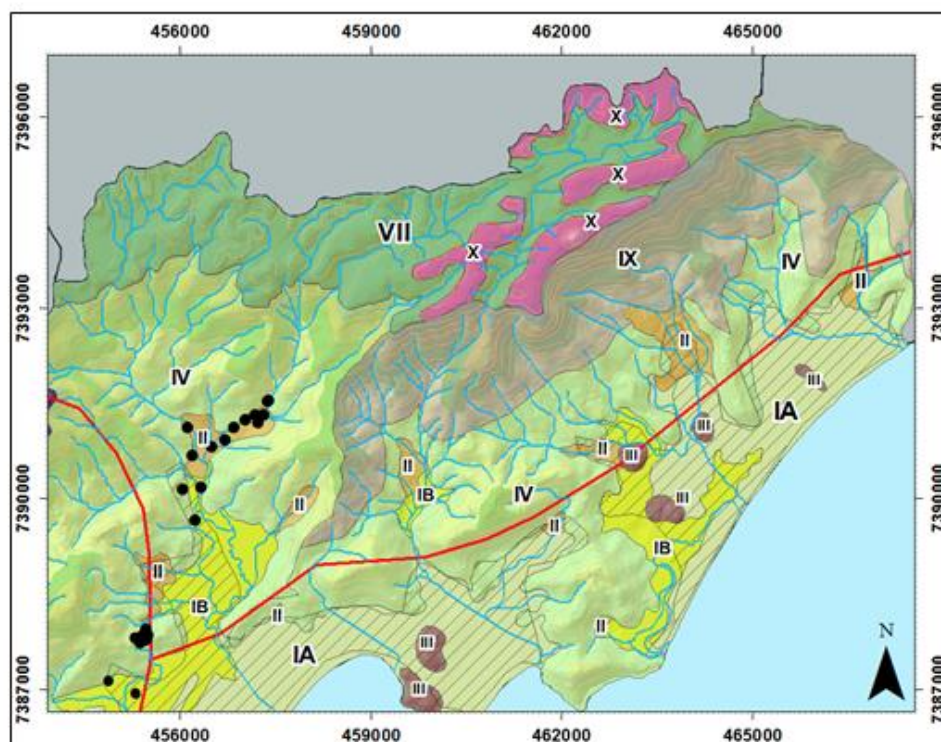
Perfil da Unidade IV com presença de colúvio, indicando local de ocorrência de escorregamentos. O destaque em branco indica o nível do material coluvionar



Perfil de Gnaiss muito alterado da Unidade IV

Unidade fisiográfica	Geologia	Relevo	Fotoanálise										
			Análise da densidade textural					Análise das formas e características do relevo					
			Densidade de drenagem	Densidade dos elementos de relevo	Permeabilidade	Relação escoamento superficial/ infiltração	Espessura e características do manto de alteração	Amplitude altimétrica	Declividade	Formas de encosta	Forma do vale	Forma do topo	Feições particulares
IV	Granito e Gnaiss Pico do Papagaio	Escarpas em anfiteatros com espigões digitados e Morros	Alta/Média	Alta/Média	Média	Média	Média	Grande	Alta	Retilíneas (predominantemente) e Côncavas	Fechado	Anguloso	Cristas angulosas
Unidade fisiográfica	Fotointerpretação					Observações de campo							
	Características geotécnicas												
	Profundidade do topo rochoso	Espessura dos materiais inconsolidados	Potencial a movimentos gravitacionais			Processos geológicos				Uso e cobertura da terra			
			Corridas de detritos		Escorregamentos								
IV	Raso a sub aflorante	Delgado a inexistente	Médio		Alto	Nas atividades de campo foram observados registros de escorregamento (material coluvionar e cicatrizes de escorregamento)				Floresta (em grande parte), pastagem, área urbana			

Prancha 8: Caracterização da Unidade fisiográfica VII



Detalhe da Unidade VII no mapa de compartimentação fisiográfica

Aspecto geral da Unidade VII

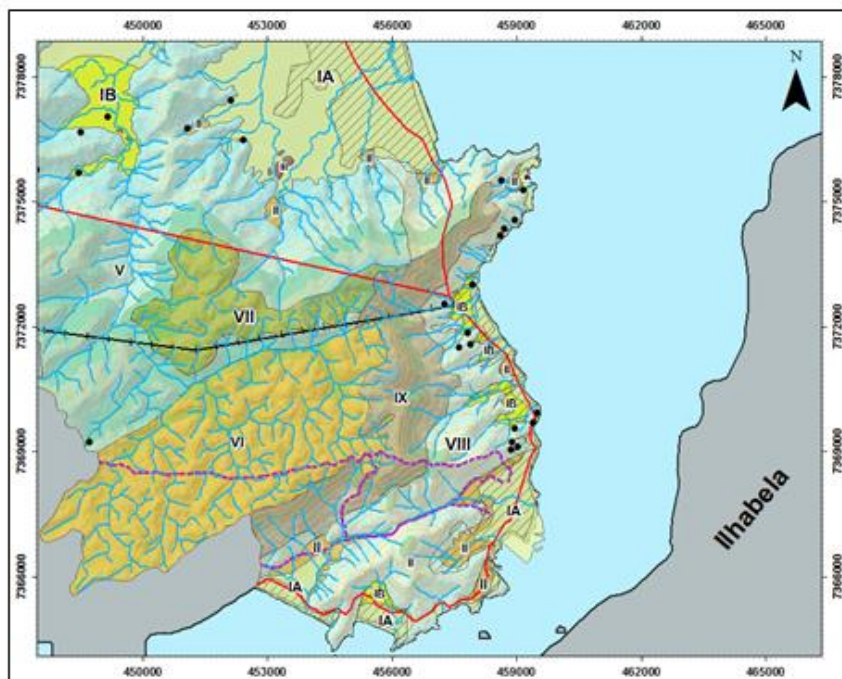


Topos arredondados e angulosos da Unidade VII



Unidade fisiográfica	Geologia	Relevo	Fotoanálise										
			Análise da densidade textural					Análise das formas e características do relevo					
			Densidade de drenagem	Densidade dos elementos de relevo	Permeabilidade	Relação escoamento superficial/ infiltração	Espessura e características do manto de alteração	Amplitude altimétrica	Declividade	Formas de encosta	Forma do vale	Forma do topo	Feições particulares
VII	Gnaiss Migmatíticos	Morros	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Média	Côncava (predominante) a Retilínea	Fechado	Arredondado a anguloso	Não se aplica
Unidade fisiográfica	Fotointerpretação				Observações de campo								
	Características geotécnicas												
	Profundidade do topo rochoso	Espessura dos materiais inconsolidados	Potencial a movimentos gravitacionais		Processos geológicos						Uso e cobertura da terra		
			Corridas de detritos	Escorregamentos									
VII	Intermediário	Intermediário	Baixo	Médio	Foram observadas nas atividades de fotointerpretação evidências de escorregamento (presença de cicatrizes)						Floresta		

Prancha 9: Caracterização da Unidade fisiográfica VIII



Detalhe da Unidade VIII no mapa de compartimentação fisiográfica



Ponto de campo 35
X: 458879 mE
Y: 7369038,00004 mS

Perfil de gnaiss bem alterado (argiloso) com presença de seixos, sinalizando ocorrência de escorregamentos no local



Ponto de campo 35
X: 458879 mE
Y: 7369038,00004 mS

Detalhe dos seixos no perfil de gnaiss alterado (em vermelho)



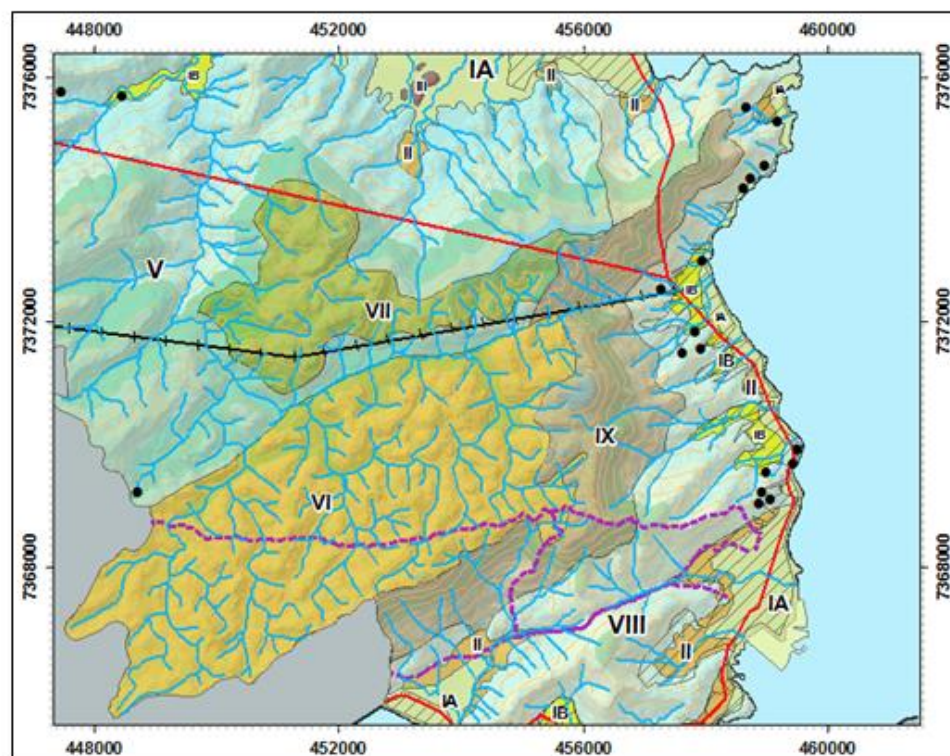
Ponto de campo 38
X: 459050 mE
Y: 7369105,00004 mS

Depósito de talus (bloco de Gnaiss em vermelho)

Unidade fisiográfica	Geologia	Relevo	Fotoanálise										
			Análise da densidade textural					Análise das formas e características do relevo					
			Densidade de drenagem	Densidade dos elementos de relevo	Permeabilidade	Relação escoamento superficial/ infiltração	Espessura e características do manto de alteração	Amplitude altimétrica	Declividade	Formas de encosta	Forma do vale	Forma do topo	Feições particulares
VIII	Granito e Gnaiss Migmatítico	Escarpas com espigões digitados e morros	Média	Média	Média	Média	Pequena	Média	Média	Côncava (predominante) a Retilínea	Fechado	Anguloso	Escarpas angulosas

Unidade fisiográfica	Fotointerpretação				Observações de campo			
	Características geotécnicas							
	Profundidade do topo rochoso	Espessura dos materiais inconsolidados	Potencial a movimentos gravitacionais		Processos geológicos	Uso e cobertura da terra		
			Corridas de detritos	Escorregamentos				
VIII	Raso a sub aflorante	Delgado a inexistente	Médio	Alto	Nas atividades de campo e de escritório foram observados registros de escorregamento (material coluvionar e cicatrizes de escorregamento)	Floresta, pastagem, mineração, cultura temporária, área urbana		

Prancha 10: Caracterização da Unidade fisiográfica IX



Detalhe da Unidade IX no mapa de compartimentação fisiográfica



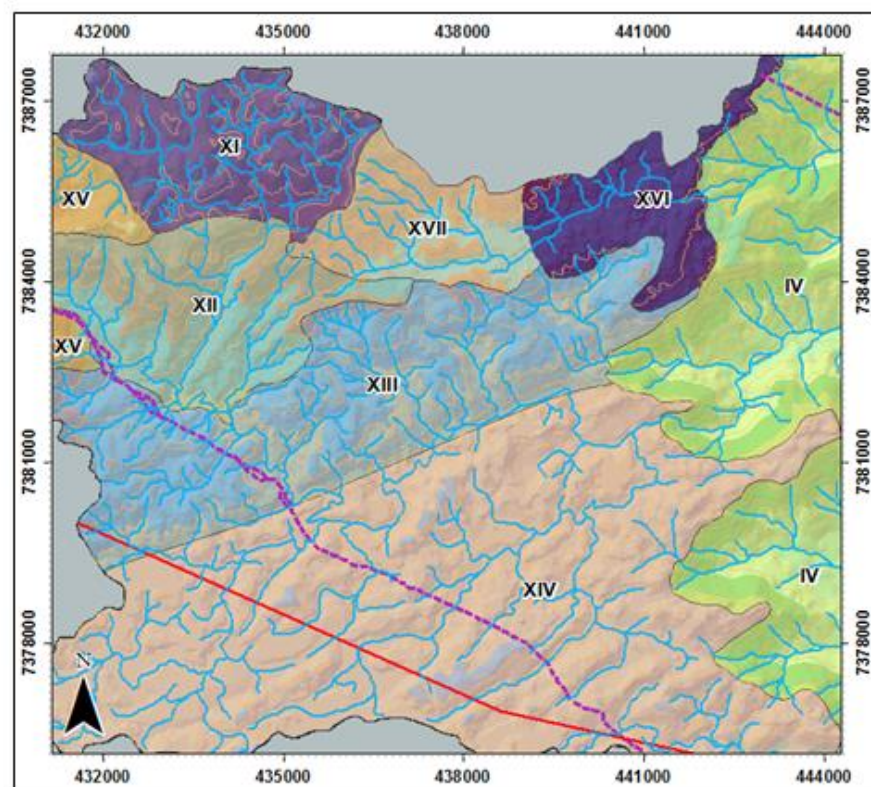
Aspectos do relevo na Unidade IX em Caraguatatuba (superior à direita) e em São Sebastião (inferior)



Topos angulosos da Unidade IX

Unidade fisiográfica	Geologia	Relevo	Análise da densidade textural					Fotoanálise					
			Densidade de drenagem	Densidade dos elementos de relevo	Permeabilidade	Relação escoamento superficial/ infiltração	Espessura e características do manto de alteração	Análise das formas e características do relevo					
								Amplitude altimétrica	Declividade	Formas de encosta	Forma do vale	Forma do topo	Feições particulares
IX	Gnaiss Migmatítico	Escarpas com espigões digitados	Baixa	Media	Baixa	Média	Pequena	Grande	Alta	Retilínea	Fechado	Anguloso	Cristas orientadas
Unidade fisiográfica	Fotointerpretação				Observações de campo								
	Características geotécnicas												
	Profundidade do topo rochoso	Espessura dos materiais inconsolidados	Potencial a movimentos gravitacionais		Processos geológicos						Uso e cobertura da terra		
			Corridas de detritos	Escorregamentos									
IX	Raso a sub aflorante	Delgado a inexistente	Médio	Alto	Foram observadas nas atividades de fotointerpretação evidências de escorregamento (presença de cicatrizes)						Floresta, pastagem		

Prancha 12: Caracterização da Unidade fisiográfica XI



Detalhe da Unidade XI no mapa de compartimentação fisiográfica

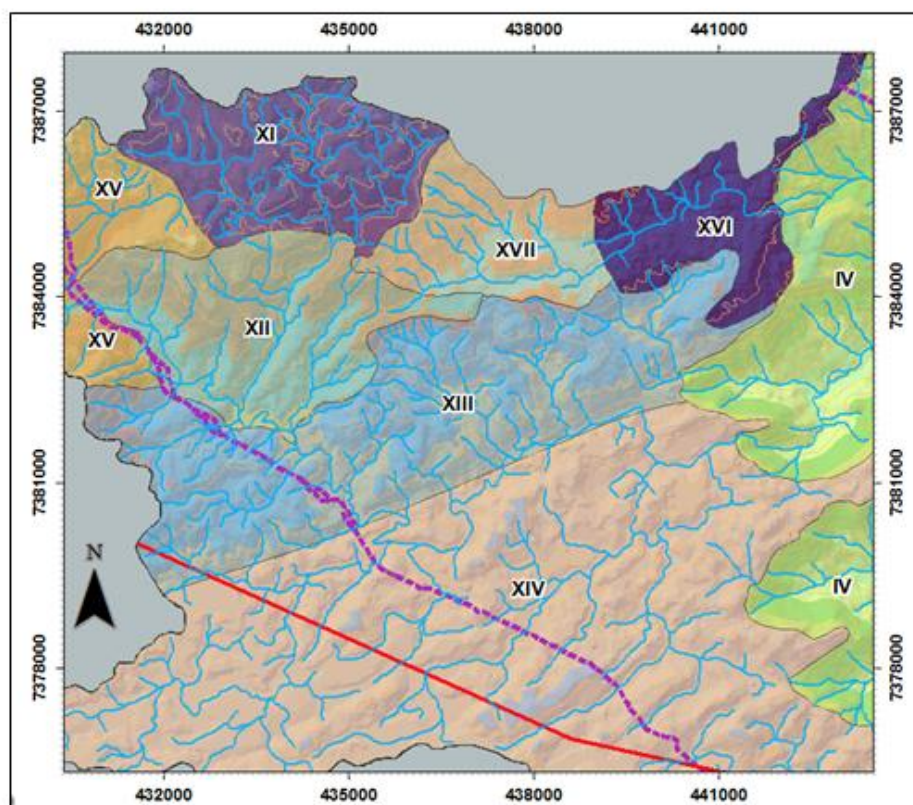


Aspectos fisiográficos da Unidade XI

Unidade fisiográfica	Geologia	Relevo	Fotoanálise										
			Análise da densidade textural					Análise das formas e características do relevo					
			Densidade de drenagem	Densidade dos elementos de relevo	Permeabilidade	Relação escoamento superficial/ infiltração	Espessura e características do manto de alteração	Amplitude altimétrica	Declividade	Formas de encosta	Forma do vale	Forma do topo	Feições particulares
XI	Granito Gnáissico Pico do Papagaio	Montanhoso	Média	Média	Baixa a média	Média a alta	Pequena	Média	Média	Retilínea	Fechado	Arredondado	Não se aplica

Unidade fisiográfica	Fotointerpretação				Observações de campo							
	Características geotécnicas				Processos geológicos							Uso e cobertura da terra
	Profundidade do topo rochoso	Espessura dos materiais inconsolidados	Potencial a movimentos gravitacionais									
			Corridas de detritos	Escorregamentos								
XI	Raso a sub aflorante	Intermediário a raso/ sub aflorante	Médio	Médio	Foram observadas nas atividades de fotointerpretação evidências de escorregamento (presença de cicatrizes)							Floresta

Prancha 14: Caracterização da Unidade fisiográfica XIII



Detalhe da Unidade XIII no mapa de compartimentação fisiográfica

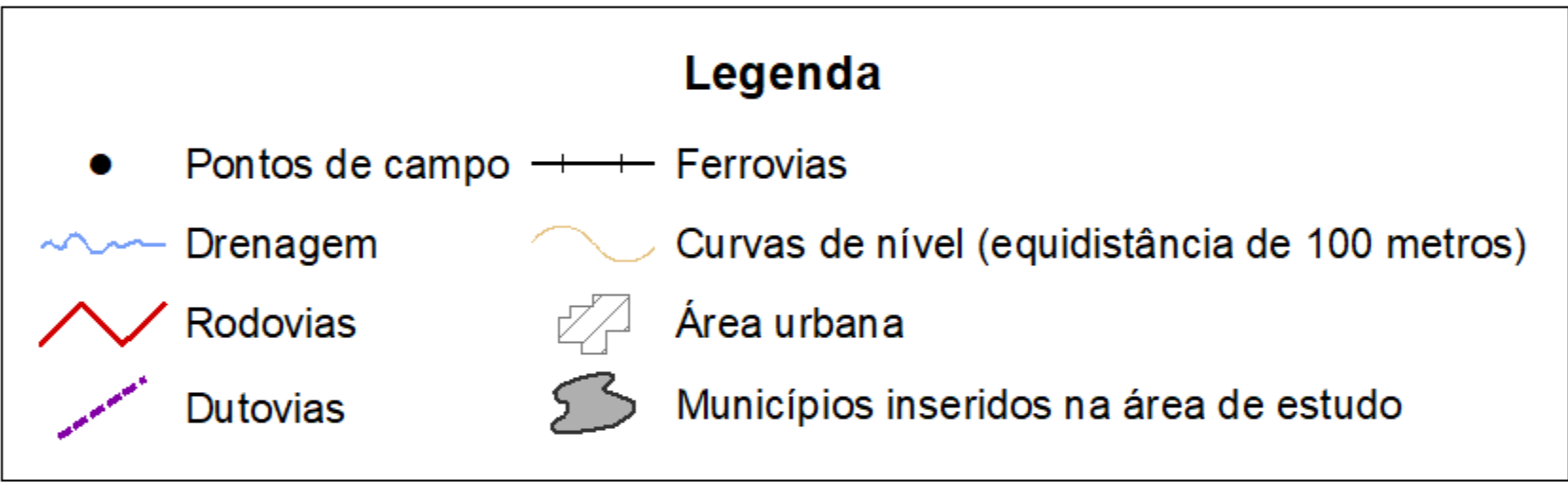
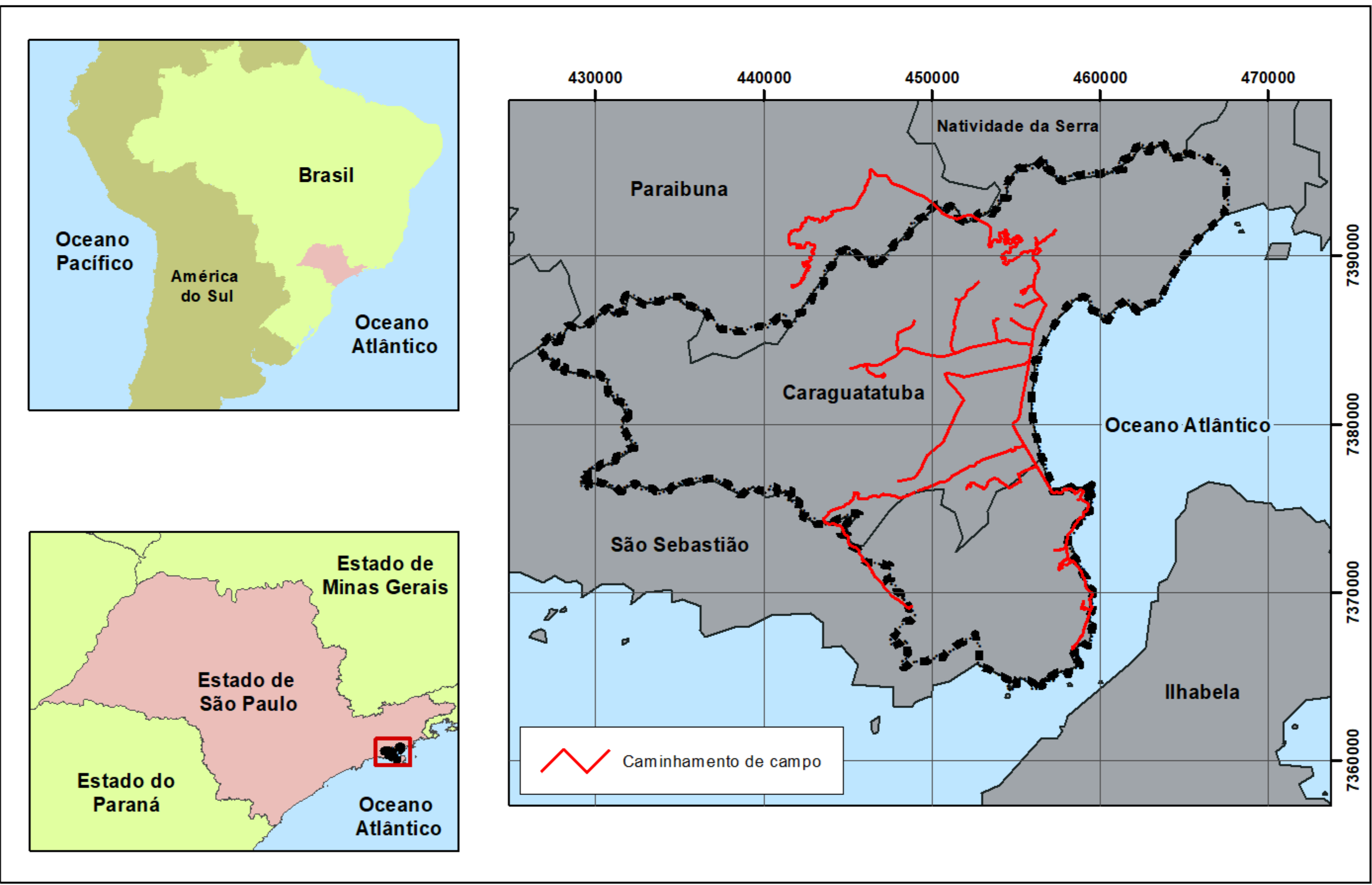
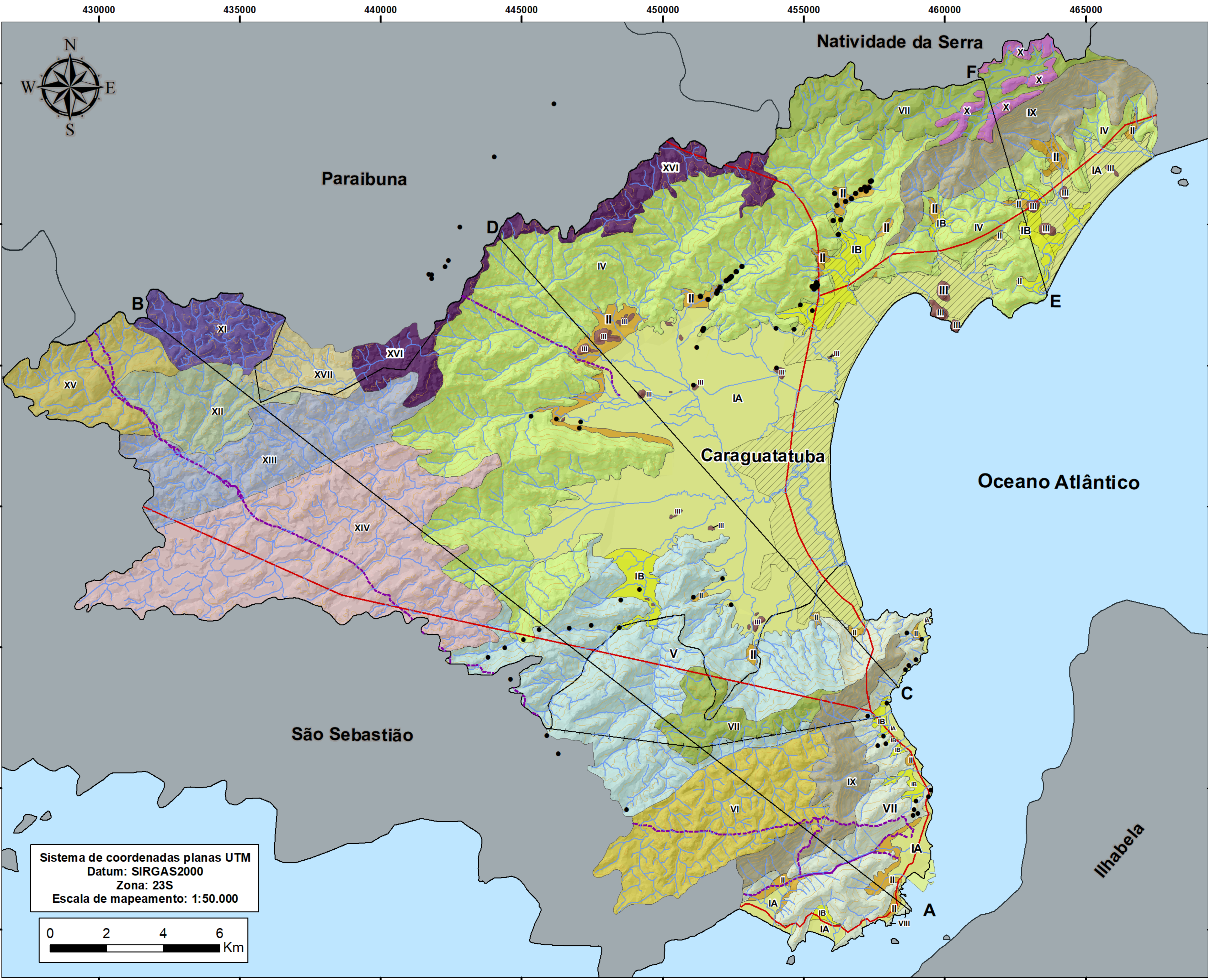
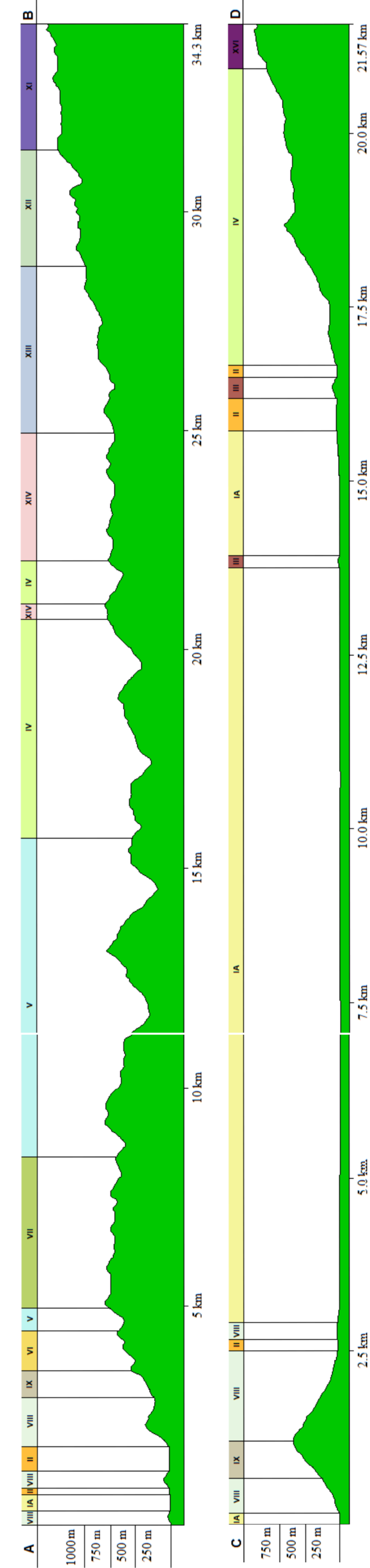


Aspectos fisiográficos da Unidade XIII

Unidade fisiográfica	Geologia	Relevo	Fotoanálise										
			Análise da densidade textural					Análise das formas e características do relevo					
			Densidade de drenagem	Densidade dos elementos de relevo	Permeabilidade	Relação escoamento superficial/ infiltração	Espessura e características do manto de alteração	Amplitude altimétrica	Declividade	Formas de encosta	Forma do vale	Forma do topo	Feições particulares
XIII	Granito Gnáissico Pico do Papagaio (Rochas metabásicas isoladas subordinadas)	Morros arredondados	Média	Média	Média	Média	Média	Alta	Média	Convexa a retilínea	Fechado	Arredondado a anguloso	Vertentes retilinizadas

Unidade fisiográfica	Fotointerpretação				Observações de campo			
	Características geotécnicas							
	Profundidade do topo rochoso	Espessura dos materiais inconsolidados	Potencial a movimentos gravitacionais		Processos geológicos	Uso e cobertura da terra		
			Corridas de detritos	Escorregamentos				
XIII	Intermediário	Intermediário	Médio	Médio	Não foram observados processos geológicos na Unidade nas atividades de fotointerpretação		Floresta	

Apêndice 2. Mapa de compartimentação fisiográfica



Contexto regional			Unidade Fisiográfica	Nomenclaturas das unidades	Geologia dominante	Geomorfologia	
Província	Zonas	Sub- zonas				Modelado	
PROVÍNCIA COSTEIRA	BAIXADA LITORÂNEA		IA	Planície Costeira	Sedimentos inconsolidados marinhos, fluviais e flúvio-marinhos	Planície	
			IB	Planície Fluvial	Sedimentos inconsolidados fluviais	Planície	
			II	Rampas de colúvio e talús	Sedimentos coluvionares e corpos de talús	Rampas de colúvio e talús	
	SERRANIA COSTEIRA	SERRA DO MAR	III	Morros isolados granítico-gnáissicos	Granitos e gnaisse em corpos insulares	Morros isolados	
			IV	Escarpas e morros em granitos e gnaisse	Granito e Gnaisse Pico do Papagaio	Escarpas em antefleitos com espigões digitados e Morros	
			V	Escarpas com cristas orientadas gnáissicas	Gnaisse Migmatítico (Metabásicas associadas)	Escarpas com espigões digitados	
			VI	Morros em gnaisse migmatítico	Gnaisse Migmatítico (Metabásicas associadas)	Morros paralelos	
			VII	Morros planálticos gnáissicos	Gnaisse Migmatíticos	Morros	
			VIII	Escarpas gnáissicas migmatíticas	Granito e Gnaisse Migmatítico	Escarpas com espigões digitados e morros	
			IX	Escarpas retílineas gnáissicas	Gnaisse Migmatítico	Escarpas com espigões digitados	
			X	Relevo montanhoso em gnaisse	Gnaisse Migmatítico	Montanhoso	
PLANALTO ATLÂNTICO	PLANALTO DO JUQUERIQUÊ		XI	Relevo montanhoso com afloramentos rochosos	Granito Gnáissico Pico do Papagaio	Montanhoso	
			XII	Relevo montanhoso granítico-gnáissico	Granito Gnáissico Pico do Papagaio	Montanhoso	
			XIII	Morros planálticos graníticos-gnáissicos	Granito Gnáissico Pico do Papagaio (Rochas metabásicas isoladas subordinadas)	Morros arredondados	
			XIV	Morros graníticos-gnáissicos	Granito Gnáissico (Metabásicas)	Morros paralelos	
			XV	Monólitos graníticos-gnáissicos	Granito Gnáissico Pico do Papagaio	Montanhoso	
			XVI	Mar de morros granítico-gnáissico	Granito Gnáissico (Micaxistos e quartzitos)	Mar de morros	
			XVII	Relevo montanhoso em micaxistos e quartzitos	Granito Gnáissico (Micaxistos e quartzitos)	Montanhoso	

Unidade Fisiográfica	FOTOANÁLISE							
	Análise da densidade textural				Análise das formas e características do relevo			
	Densidade dos elementos de drenagem	Densidade dos elementos no relevo	Amplitude local	Declividade dominante	Forma das encostas	Forma dos vales	Forma dos topos	
IA	Baixa	Baixa	Pequena	Muito Baixa	Não se aplica	Abertos	Aplanados	
IB	Baixa	Baixa	Pequena	Muito Baixa	Não se aplica	Abertos	Aplanados	
II	Baixa	Baixa	Pequena	Média	Convexas	Abertos	Aplanados	
III	Baixa	Baixa	Pequena	Média	Convexas	Não se aplica	Arredondados	
IV	Alta/Média	Alta/Média	Grande	Alta	Retilíneas (predominantemente) e Côncavas	Fechados	Angulosos	
V	Média	Média	Grande	Alta	Côncavas (predominante) a Retilíneas	Fechados	Arredondados a angulosos	
VI	Alta	Alta	Média	Média a baixa	Côncavas	Fechados	Aplanados a arredondados	
VII	Média	Média	Média	Média	Côncavas (predominante) a Retilíneas	Fechados	Arredondados a angulosos	
VIII	Média	Média	Média	Média	Côncavas (predominante) a Retilíneas	Fechados	Angulosos	
IX	Baixa	Média	Grande	Alta	Retilíneas	Fechados	Angulosos	
X	Média	Média	Pequena	Média a baixa	Côncavas a retilíneas	Fechados	Arredondados a angulosos	
XI	Média	Média	Pequena	Média	Retilíneas	Fechados	Arredondados	
XII	Média	Média	Média	Média	Convexas (predominantemente) e Retilíneas	Fechados	Angulosos	
XIII	Média	Média	Alta	Média	Convexas a retilíneas	Fechados	Arredondados a angulosos	
XIV	Média	Média	Média	Média	Convexas a côncavas	Fechados a abertos	Arredondados	
XV	Média	Média	Grande	Alta	Retilíneas	Fechados	Angulosos a arredondados	
XVI	Baixa	Baixa	Pequena	Média a baixa	Côncavas a retilíneas	Fechados	Arredondados	
XVII	Média	Média	Pequena	Média a baixa	Convexas a retilíneas	Fechados	Arredondados	

Unidade Fisiográfica	FOTOINTERPRETAÇÃO					
	Características geotécnicas					
	Permeabilidade (intergranular)	Relação escoamento superficial/infiltração	Características do manto de alteração	Profundidade do topo rochoso	Espessura dos materiais inconsolidados	Potencial a movimentos gravitacionais de massa
IA	Alta	Alta	Não se aplica	Não se aplica	Espesso	Baixo
IB	Alta	Alta	Não se aplica	Não se aplica	Espesso	Baixo
II	Média	Média	Grande	Profundo	Espesso	Alto
III	Média	Média	Grande	Profundo	Intermediário	Médio
IV	Média	Média	Média	Raso a sub aflorante	Delgado a inexistente	Alto
V	Médio	Média	Média	Intermediário	Intermediário	Alto
VI	Média	Média	Média	Intermediário	Intermediário	Médio
VII	Média	Média	Média	Intermediário	Intermediário	Médio
VIII	Média	Média	Pequena	Raso a sub aflorante	Delgado a inexistente	Alto
IX	Baixa	Média	Pequena	Raso a sub aflorante	Delgado a inexistente	Alto
X	Média	Média	Grande	Intermediário	Intermediário	Médio
XI	Baixa a média	Média a alta	Pequena	Raso a sub aflorante	Intermediário a raso/ sub aflorante	Médio
XII	Média	Média	Média	Intermediário	Intermediário a raso/ sub aflorante	Médio
XIII	Média	Média	Média	Intermediário	Intermediário	Médio
XIV	Média	Média	Média	Intermediário	Intermediário	Baixo
XV	Baixa a média	Baixa a média	Média	Intermediário	Intermediário	Médio
XVI	Média	Média	Média	Intermediário	Intermediário	Médio
XVII	Média	Média	Grande	Intermediário	Intermediário	Médio

Modelagem morfométrica para avaliação da potencialidade de bacias hidrográficas a partir de detritos: proposta aplicada em Caraguatatuba (SP) e São Sebastião (SP)

Apêndice 1: Compartimentação fisiográfica do trecho da Serra do Mar e Planície Costeira entre os municípios de Caraguatatuba e São Sebastião (SP)

ESCALA DE MAPEAMENTO: 1:50.000
ESCALA DE REPRESENTAÇÃO: 1:70.000

Claudia Vanessa dos Santos Corrêa
Tese de Doutorado
Orientador: Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis
Coorientadora: Dra. Lucília do Carmo Jordano

Rio Claro, Março de 2018

Apêndice 3. Estruturação do banco de dados. Fonte: Reis e Zaine (2018).

