

**PROPOSTA DE GESTÃO DE RISCO ASSOCIADO À
OCORRÊNCIA DE CORRIDAS DE DETRITO EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS NA SERRA DO MAR – CUBATÃO – SP**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

VINICIUS QUEIROZ VELOSO

Março
2019

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

VINICIUS QUEIROZ VELOSO

**PROPOSTA DE GESTÃO DE RISCO ASSOCIADO À
OCORRÊNCIA DE CORRIDAS DE DETRITO EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS NA SERRA DO MAR – CUBATÃO – SP**

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

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo Zaine

Rio Claro (SP)
2019

V443p

Veloso, Vinicius Queiroz

Proposta de gestão de risco associado à ocorrência de corridas de detrito em bacias hidrográficas na serra do mar – Cubatão – SP /
Vinicius Queiroz Veloso. -- Rio Claro, 2019

114 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro

Orientador: José Eduardo Zaine

1. Eventos extremos. 2. Suscetibilidade. 3. Parâmetros físicos. 4.
Monitoramento de corridas de detrito. 5. Sistema automatizado de
aviso e alerta. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

VINICIUS QUEIROZ VELOSO

**PROPOSTA DE GESTÃO DE RISCO ASSOCIADO À
OCORRÊNCIA DE CORRIDAS DE DETRITO EM BACIAS
HIDROGRÁFICAS NA SERRA DO MAR – CUBATÃO – SP**

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

Comissão examinadora

Prof. Dr. José Eduardo Zaine
Orientador (UNESP)

Prof. Dr. Fabio Augusto Gomes Vieira Reis
Departamento de Geologia Aplicada
(UNESP)

Prof. Dr. Bianca Carvalho Vieira
FFLCH/USP

Conceito: **Aprovado**

24 de maio de 2019

Este trabalho é dedicado a todos os pesquisadores, técnicos, professores e agentes de defesa civil que tem em seu ofício uma causa.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo apoio incondicional, aos professores José Eduardo Zaine e Fabio Augusto Vieira Reis pelas oportunidades de aprendizado e crescimento.

Aos amigos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, Marcelo Gramani e Agostinho Ogura por todo o tempo de companheirismo e aprendizado.

Aos meus amigos de Unesp Marcelo Santos, Victor Cabral, Vitor Laubstein, Claudia Vanessa, Vitor Caritá, Bruna Santos e tantos outros.

A Ivan Boesing e Guilherme Balbinot da Upsensor.

A Isadora Francesconi de Oliveira por todo o apoio e companheirismo.

A Universidade Estadual Paulista.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.

Ao CNPQ.

Ao Super Caetano, meu filho.

E a todos que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

Muito obrigado.

RESUMO

As corridas de detritos ou *debris flows* são os fenômenos de movimentação de massa mais impactantes no Brasil, com destaque para a região serrana do Estado de São Paulo. São movimentos de massa complexos, que se comportam na forma de fluxos altamente densos, responsáveis pelo grande aporte de material grosseiro no decorrer das drenagens, com grande poder de impacto e raio de destruição. Esta pesquisa buscou aprimorar o conhecimento acerca dos movimentos de massa do tipo corrida de detritos, por meio de uma classificação bibliográfica sistemática do fenômeno, assim como dos seus principais fatores indutores na região da Serra do Mar. A área escolhida para o estudo foi uma bacia hidrográfica no município de Cubatão/SP, devido ao grande histórico de eventos desse tipo, como os ocorridos em 1994, que foram responsáveis pela paralização das operações na Refinaria Presidente Bernardes, resultando em altos prejuízos financeiros. Em 2013, no Rio Pilões, outro evento de magnitude similar comprometeu a infraestrutura da Sabesp, resultando em uma morte. Tomando como recorte de estudo a bacia hidrográfica do Rio das Pedras, o objetivo principal foi desenvolver, por meio de metodologias de gestão e mapeamento uma proposta de gerenciamento preventivo à ocorrência de corridas de detrito em bacias hidrográficas na Serra do Mar. Assim, por meio da avaliação da suscetibilidade, aplicação de equações empíricas, mapeamento geológico-geomorfológico e definição de cenários de risco com precipitação crítica, obteve-se o resultado de uma melhor estimativa de um cenário de risco mais próximo do real possível. Propõe-se que, por meio de uma adequada abordagem fenomenológica e conhecimento dos limiares críticos de precipitação, da correlação chuva e escorregamento e da ponderação dos principais fatores condicionantes da ocorrência das corridas de detrito, a adoção de medidas não estruturais sejam otimizadas, como a elaboração de um plano preventivo específico para corridas de detrito e implantação de um sistema automatizado de monitoramento e alerta, visando antever a eclosão do fenômeno. Como principais produtos e resultados dessa pesquisa foram obtidos a suscetibilidade da bacia hidrográfica, o mapeamento e caracterização dos principais condicionantes geológicos e geomorfológicos para a deflagração do fenômeno, estimativa dos parâmetros físicos, proposta de monitoramento e alerta pluviométrico e implantação de um sistema de monitoramento automatizado em tempo real.

Palavras-chave: Eventos extremos, suscetibilidade, parâmetros físicos, Monitoramento de corridas de detrito, Sistema automatizado de aviso e alerta

ABSTRACT

The debris flows are the most striking mass movement phenomena in Brazil, with emphasis on the mountain region of the State of São Paulo. They are complex mass movements, which behave in the form of highly dense flows, responsible for the great contribution of coarse material during the drainage, with great impact power and radius of destruction. This research aimed to improve the knowledge about mass movements of the type of debris run, through a systematic bibliographic classification of the phenomenon, as well as its main inductive factors in the Serra do Mar region. The area chosen for the study was a basin in the municipality of Cubatão / SP, due to the great history of events of this type, such as those occurred in 1994, which were responsible for the paralysis of operations at the Presidente Bernardes Refinery, resulting in high financial losses. In 2013, at Rio Pilões, another event of similar magnitude compromised Sabesp's infrastructure, resulting in one death. Taking as a study study the Rio das Pedras river basin, the main objective was to develop, through management and mapping methodologies, a proposal of preventive management to the occurrence of detritus races in watersheds in the Serra do Mar. Thus, through the evaluation of susceptibility, the application of empirical equations, geological-geomorphological mapping and the definition of risk scenarios with critical precipitation, resulted in a better estimate of a risk scenario closer to the real one possible. It is proposed that, through an adequate phenomenological approach and knowledge of critical precipitation thresholds, rainfall and slip correlation, and the weighting of the main conditioning factors for the occurrence of detritus races, the adoption of non-structural measures is optimized, such as elaboration of a specific preventive plan for detritus races and implementation of an automated system of monitoring and alert, aiming to anticipate the outbreak of the phenomenon. The main products and results of this research were the susceptibility of the hydrographic basin, the mapping and characterization of the main geological and geomorphological conditions for the formation of the phenomenon, the estimation of the physical parameters, the proposal of monitoring and pluviometric alert and the implementation of an automated monitoring system In real time.

Keywords: extreme events, susceptibility, physical parameters, debris flow monitoring, automated system and warning and alert

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|-----|
| Figura 1 - Localização da área de estudo | 19 |
| Figura 2 - Contexto geológico área de estudo | 21 |
| Figura 3 - Contexto geomorfológico área de estudo..... | 23 |
| Figura 4 - Zonas numa corrida de detritos com fluxo canalizado (VANDINE, 1996)..... | 33 |
| Figura 5 - Feições apresentadas por um debris flow (GRAMANI, 2001). | 34 |
| Figura 6 - Detalhe de uma frente de uma corrida de detrito (GRAMANI, 2001). | 34 |
| Figura 7 - Tipos de origem de corrida de detritos: primário e secundário (Adapt. NETTLETON et. al., 2005)..... | 35 |
| Figura 8 - Gráfico de Envoltórias de Escorregamentos (Tatizana, et al. 1987). 40 | |
| Figura 9 - Gráfico de chuvas acumuladas com o tempo Kanji et. al. (2003). | 41 |
| Figura 10 - Etapas de desenvolvimento do trabalho | 44 |
| Figura 11 - Arquitetura do sistema de monitoramento | 59 |
| Figura 12 – Mapa topográfico da área de estudo e perfis transversais e longitudinais da drenagem principal | 63 |
| Figura 13 - Registro da encosta a médio curso (ponto 9)..... | 63 |
| Figura 14 - Vista frontal do depósito lateral da encosta (ponto 10)..... | 64 |
| Figura 15 - Material presente na drenagem principal (ponto 3) | 66 |
| Figura 16 - Material presente na drenagem (ponto 7) | 66 |
| Figura 17 - Vista frontal do barramento total e seção na drenagem principal com perfil esquemático (ponto 19)..... | 69 |
| Figura 18 - Vista frontal de barramento total e seção na drenagem principal com perfil esquemático (ponto 20)..... | 70 |
| Figura 19 - Vista frontal de barramento total e seção na drenagem principal com perfil esquemático (ponto 16)..... | 71 |
| Figura 20 - Vista frontal de barramento total e seção na drenagem principal com perfil esquemático (ponto 7) | 72 |
| Figura 21 - Localização das principais situações de risco na área de estudo .. | 76 |
| Figura 22 - Representação do raio de alcance do debris flow para o cenário 1, 2 e 3..... | 84 |
| Figura 23 - Representação da altura do debris flow para os cenários 1, 2 e 3. 91 | |
| Figura 24 - Correlação de chuva e escorregamento para os cenários 1, 2 e 3 93 | |
| Figura 25 - Correlação de chuva e corridas de detrito para os cenários 1, 2 e 3 | 94 |
| Figura 26 - Proposta de Plano de monitoramento para escorregamentos e corridas de detrito para Cubatão (SP)..... | 97 |
| Figura 27 - Tela de monitoramento do Sistema automatizado à ocorrência de escorregamentos | 99 |
| Figura 28 - Tela de monitoramento do sistema à ocorrência de corridas de detrito | 99 |
| Figura 29 - Tela de monitoramento das chuvas acumuladas com níveis de alerta em barra | 100 |
| Figura 30 - Localização do pluviômetro e seu raio de abrangência na área de estudo | 100 |
| Figura 31 - Evento pluviométrico em andamento e registrado em tempo real na madrugada do dia 04/02/2019 as 05:00 horas | 103 |

| | |
|--|-----|
| Figura 32 - Evento pluviométrico em andamento e registrado em tempo real na noite do dia 12/02/2019 as 20:00 horas..... | 104 |
| Figura 33 - Evento pluviométrico em andamento e registrado em tempo real na madrugada do dia 04/02/2019 as 05:00 horas (monitoramento de corrida de detritos)..... | 105 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|-----|
| Tabela 1 - Sistematização dos movimentos de massa (Sharpe, 1938) | 26 |
| Tabela 2 - Classificação sintética dos tipos de movimento (VARNES, 1978) ... | 27 |
| Tabela 3 - Classificação dos movimentos de massa. (Hutchinson, 1988)..... | 28 |
| Tabela 4 - Classificação dos movimentos de massa. (Augusto Filho, 1992) ... | 29 |
| Tabela 5 - Classificação das corridas de detrito de Hungr (2001)..... | 30 |
| Tabela 6 - Relação de materiais utilizados na base cartográfica | 45 |
| Tabela 7- Pesos e notas parciais dos fatores intervenientes na ocorrência de corrida de detritos. Fonte: Gramani e Kanji. (2001)..... | 48 |
| Tabela 8 - Pesos e notas parciais dos fatores intervenientes na ocorrência de corrida de detritos. | 49 |
| Tabela 9 - Correlações empíricas definidas para realização do trabalho | 50 |
| Tabela 10 - Níveis operacionais do PPDC (adaptado, Macedo et. al., 2006) ... | 58 |
| Tabela 11 - Casos de eventos extremos com ocorrência de corridas de detrito em Cubatão | 74 |
| Tabela 12 - Cenários de precipitação crítica para ocorrência de corrida de detritos..... | 75 |
| Tabela 13 - Fatores e pesos utilizados para definição da suscetibilidade na Bacia do Rio Cachoeira, Cubatão – SP (Cenário 1 – 40mm/h)..... | 78 |
| Tabela 14 - Fatores e pesos utilizados para definição da suscetibilidade na Bacia do Rio Cachoeira, Cubatão – SP (Cenário 2 – 80mm/h)..... | 78 |
| Tabela 15 - Fatores e pesos utilizados para definição da suscetibilidade na Bacia do Rio Cachoeira, Cubatão – SP (Cenário 3 – 100mm/h)..... | 79 |
| Tabela 16 - Volume de material transportado para os cenários de 1, 2 e 3..... | 80 |
| Tabela 17- Valor de vazão de pico para os cenários 1, 2 e 3..... | 83 |
| Tabela 18 - Valores de velocidade e tempo de impacto do fluxo pós deflagração na bacia hidrográfica | 85 |
| Tabela 19 - Valores de velocidade da corrida de detritos para os cenários 1, 2 e 3..... | 86 |
| Tabela 20 - Forças de impacto do debris flow para os cenários 1, 2 e 3..... | 88 |
| Tabela 21 - Classificação de magnitude da corrida de detritos de acordo com, profundidade, força de impacto e tamanho de blocos..... | 89 |
| Tabela 22 - Valores estimados de altura do fluxo para os três cenários distintos | 90 |
| Tabela 23- Valores de precipitação horária do dia 3 de fevereiro | 102 |
| Tabela 24 – Valores de precipitação horária do dia 12 de fevereiro..... | 102 |

LISTA DE GRÁFICOS

| | |
|--|-----|
| Gráfico 1 - Comparação de material transportado para o cenário 1, 2 e 3..... | 81 |
| Gráfico 2 - Comparação dos valores de volume total estimado e volume de blocos de acordo com Znamensky e Gramani (2000)..... | 82 |
| Gráfico 3 - Comparação de valores de velocidade de debris flows para o cenário 1,2 e 3..... | 87 |
| Gráfico 4 - Valores de precipitação diária dos eventos acompanhados no mês de fevereiro de 2019 | 101 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|---|----|
| Equação (1) Correlação chuva x escorregamentos | 40 |
| Equação (2) Correlação chuva x tempo | 41 |
| Equação (3) Nota final da suscetibilidade da bacia..... | 49 |
| Equação (4) Volume de material mobilizado | 52 |
| Equação (5) Vazão de pico | 52 |
| Equação (6) Concentração de sólidos | 53 |
| Equação (7) Distância percorrida | 54 |
| Equação (8) Velocidade do fluxo..... | 54 |
| Equação (9) Transporte de blocos | 55 |
| Equação (10) Força de impacto do debris flow | 55 |
| Equação (11) Altura da lâmina | 56 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 HIPÓTESE E OBJETIVOS | 16 |
| 1.2 OBJETIVO PRINCIPAL..... | 16 |
| 1.3 Objetivos Específicos..... | 16 |
| 2. ÁREA DE ESTUDO | 18 |
| 2.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOMORFOLÓGICA..... | 19 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 25 |
| 3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA..... | 25 |
| 3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS CORRIDAS DE DETRITO | 31 |
| 3.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS CORRIDAS DE DETRITO | 31 |
| 3.3.1 Mecanismos de formação | 33 |
| 3.4 FATORES CONDICIONANTES PARA A FORMAÇÃO DE CORRIDAS DE DETRITO | 37 |
| 3.4.1 Condicionantes de encosta..... | 37 |
| 3.4.2 Condicionantes das drenagens..... | 37 |
| 3.4.3 Condicionantes da bacia de captação | 38 |
| 3.5 CORRELAÇÕES CHUVA X MOVIMENTAÇÃO DE MASSA | 39 |
| 3.6 MONITORAMENTO DE CORRIDAS DE DETRITO..... | 42 |
| 4 MATERIAIS E MÉTODOS | 44 |
| 4.1 MÉTODO DA PESQUISA | 44 |
| 4.2 BASE DE DADOS | 45 |
| 4.3 MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO..... | 46 |
| 4.4 DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS DE RISCO | 47 |
| 4.5 DEFINIÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DA BACIA À OCORRÊNCIA DE CORRIDAS DE DETRITO | 47 |
| 4.6 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS..... | 50 |
| 4.6.1. Volume de material transportado..... | 51 |
| 4.6.2. Vazão de pico | 52 |
| 4.6.3 Concentração de sólidos..... | 53 |
| 4.6.4 Distância percorrida | 53 |
| 4.6.5. Velocidade da corrida de detritos | 54 |
| 4.6.7 Forças de impacto da corrida de detritos | 55 |
| 4.6.8 Altura da lâmina da corrida de detrito | 56 |
| 4.7. PLANO DE CONTINGÊNCIA..... | 56 |
| 4.8 SISTEMA DE MONITORAMENTO AUTOMATIZADO..... | 58 |
| 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES | 61 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 4.2.1 | Condicionantes de encosta..... | 62 |
| 5.2.2 | Condicionantes das drenagens..... | 65 |
| 5.2.2.1 | Barramentos..... | 68 |
| 5.3 | CENÁRIOS DE RISCO | 73 |
| 5.3.1 | Casos de eventos com corridas de detrito em Cubatão (SP)..... | 73 |
| 5.3.2 | Diagnóstico das situações de risco | 75 |
| 5.4 | GRAU DE SUSCETIBILIDADE | 77 |
| 5.5 | DIMENSIONAMENTO DA CORRIDA DE DETRITOS..... | 80 |
| 5.5.1 | Volume de material mobilizado | 80 |
| 5.5.2 | Vazão de pico | 82 |
| 5.5.3 | Distância percorrida | 83 |
| 5.5.4 | Velocidade | 85 |
| 5.5.5 | Força de impacto e tamanho de blocos transportados | 87 |
| 5.5.6 | Altura da lâmina | 90 |
| 5.6 | CORRELAÇÃO CHUVA x MOVIMENTAÇÃO DE MASSA..... | 92 |
| 5.6.1 | Proposta de plano de monitoramento a corridas de detrito..... | 94 |
| 5.7 | APLICAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO AUTOMÁTICO – BACIA HIDROGRÁFICA RIO DAS PEDRAS – CUBATÃO – SP..... | 98 |
| 6. | CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES | 107 |
| 7. | BIBLIOGRAFIA..... | 109 |

1 INTRODUÇÃO

A ocupação de locais com possibilidade de ocorrência de desastres naturais é um processo recorrente na história da humanidade, principalmente em regiões com adensamentos populacionais, na maioria das vezes associados a fatores ambientais cuja natureza induz o acontecimento de eventos extremos.

Em regiões serranas, onde o registro de desastres naturais é recorrente, os principais condicionantes de eventos catastróficos são o relevo e a alta pluviosidade, e se manifestam na forma de movimentos de massa, que podem ser definidos “como uma grande movimentação de solo, condicionadas por fatores ambientais, manifestando-se de diversas maneiras” (AUGUSTO FILHO, 1992).

Este tipo de evento irá ocorrer onde houver condições particulares de suscetibilidade a processos de movimentos gravitacionais de massa. A atual variabilidade climática global, com propensão ao aumento significativo do registro de volumes de chuva acima das médias, caracteriza-se como um cenário favorável à ocorrência cada vez mais frequente deste fenômeno.

Na Serra do Mar, o clima, as características das bacias hidrográficas e a predominância de solos pouco espessos, de origens residuais tropicais, geram a necessidade de estudos específicos, onde a correlação das variáveis climáticas com as propriedades morfológicas e geotécnicas pode ser fundamental para melhor compreender o comportamento deste fenômeno, agindo de maneira preventiva e salvando vidas.

Neste cenário, destacam-se diversos trechos da Serra do Mar (Caraguatatuba, 1967; Serra das Araras, 1967; Santos, 1971; Santa Catarina, 1974; Petrópolis, 1988; Rio de Janeiro, 1996; Cubatão, 1999; Santa Catarina, 2008; Rio de Janeiro, 2011; Cubatão, 2013; Itaoca, 2014) onde já houve eventos de ordem catastrófica, gerando milhões de reais em prejuízos e tirando a vida de milhares de pessoas (MASSAD, 2002).

No Estado de São Paulo, as atividades sistemáticas de identificação, avaliação e gerenciamento de áreas de risco de movimentos de massa tiveram início a partir de iniciativas do poder público, como resposta aos inúmeros

acidentes em larga escala e com graves consequências, ocorridos no verão de 1987-1988.

Na região de Cubatão/SP, as diversas formas de uso e ocupação do solo presentes nas planícies aluvionares, localizadas no sopé da escarpa serrana, e ao longo de travessias de drenagem, apresentam situações potenciais de risco. Nestes locais, a deflagração de movimentos de massa se dá majoritariamente por extremos pluviométricos e por condicionantes de ordem geomorfológica, geotécnica e geológica.

No caso específico das corridas de detrito, é essencial a classificação do fenômeno, dos seus condicionantes, da sua mecânica de formação e correlação com a precipitação, utilizando o histórico de eventos já ocorridos. Deste modo, pode-se saber quais variáveis devem ser monitoradas – sejam elas climáticas, geotécnicas ou geológicas para subsidiar um plano preventivo.

Desta forma, esta pesquisa analisou um dos trechos de maior suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa no Brasil, onde as condições climáticas, as características geomorfológicas, geológicas e o comportamento geotécnico, juntamente com o histórico de eventos, são preponderantes para a ocorrência do fenômeno.

A metodologia acerca da investigação da suscetibilidade, bem como o mapeamento e dimensionamento do poder de impacto e raio de alcance deste fenômeno é uma ferramenta fundamental na elaboração de um plano preventivo para corridas de massa. Especificamente em área piloto na bacia do Rio das Pedras, na região de Cubatão, onde estão presentes sob risco direto de atingimento uma rede de dutos da Transpetro e a Rodovia Anchieta (SP – 050), além de dezenas de moradias.

Nestas condições, verifica-se que é imprescindível aprimorar os critérios técnicos atualmente utilizados para a gestão e monitoramento dos movimentos de massa na Serra do Mar, avançando nos trabalhos referentes a corridas de massa. Estes devem ser conduzidos a partir de trabalhos de campo e gabinete, onde devem ser identificados os principais responsáveis pela deflagração do fenômeno na bacia. Também deve ser considerado o uso de correlações pluviométricas empíricas na elaboração dos planos de prevenção e alerta.

A concepção de um plano preventivo específico para corridas de massa é imprescindível para o avanço das políticas de gestão de riscos no município de

Cubatão, pois lá existe um imenso pátio de infraestrutura (rodovias, dutos de combustíveis e gases) e adensamentos populacionais onde já houve registros de mortes no raio de atingimento.

Por fim, esta metodologia almejou contribuir e aprimorar os parâmetros técnicos atualmente utilizados para a criação de planos preventivos de monitoramento e alerta aos movimentos de massa. Além de servir como base para a implantação de um sistema automatizado de monitoramento e alerta (específico para corridas de massa e deslizamentos) em que a redução do tempo de resposta evite ou minimize os impactos catastróficos decorrentes deste fenômeno.

1.1 HIPÓTESE E OBJETIVOS

A pesquisa teve como premissa desenvolver uma sistemática para abordar o problema recorrente advindo do impacto das corridas de detrito na região serrana de Cubatão, partindo da hipótese de que por meio do mapeamento geológico, geomorfológico, dos condicionantes deflagradores e estabelecimento de cenários de risco, possam ser definidos os limiares de segurança para monitoramento e emissão de alertas.

1.2 OBJETIVO PRINCIPAL

Propor método para gestão à ocorrência de corridas de detrito em bacias hidrográficas utilizando a bacia hidrográfica do Rio das Pedras localizado na Serra do Mar no município de Cubatão – SP, como piloto.

1.3 Objetivos Específicos

1. Classificar o fenômeno de corridas de detrito, assim como seus condicionantes de formação;
2. Mapear e caracterizar a drenagem principal da bacia hidrográfica e definir seu grau de suscetibilidade à ocorrência de corridas de detrito;
3. Estimar, por meio dos fatores que levam em consideração seu desenvolvimento, os parâmetros físicos para diferentes cenários;

4. Estabelecer níveis críticos de monitoramento e alerta a partir das variáveis pluviométricas, em conjunto com os condicionantes indutores do processo de corrida de detrito.
5. Desenvolver sistema automático de monitoramento e alerta baseado nos índices pluviométricos da área de estudo.

2. ÁREA DE ESTUDO

A área da pesquisa está inserida no município de Cubatão, na bacia hidrográfica do Rio das Pedras. Possui uma área de 4,2 km² e uma amplitude altimétrica na ordem de 600 metros (Figura 1) em um trecho de drenagem principal com aproximadamente 1,7 km. Está localizado na província geomorfológica costeira, na subzona Serra do Mar, mais especificamente no subsistema de escalas festonadas em anfiteatro (HASUI & SADOWSKY, 1976).

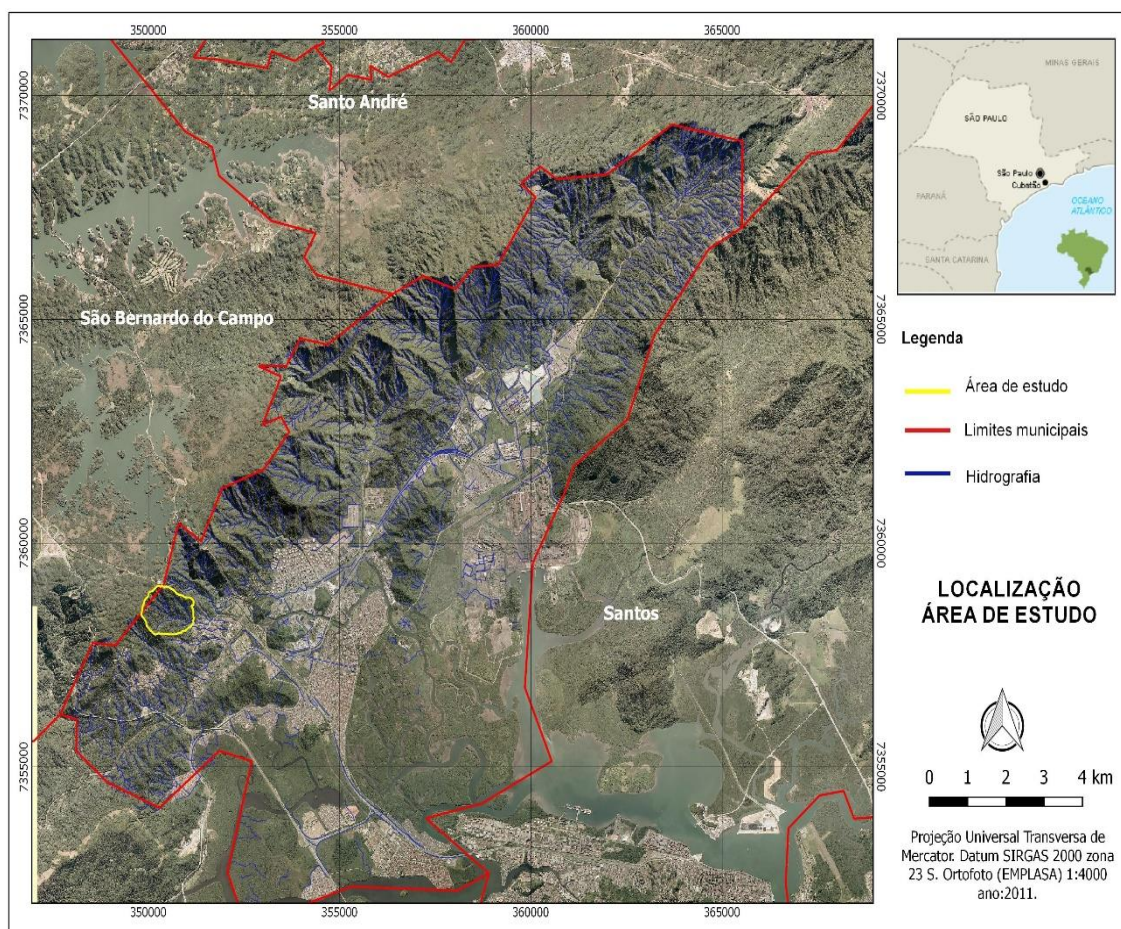
Este município possui um complexo industrial situado no trecho de baixada, que se estende ao longo dos vales dos rios Mogi e Cubatão. Estas instalações industriais, especialmente aquelas situadas nas proximidades do sopé da Serra do Mar, correm risco frequente de atingimento por eventos periódicos de enchentes, escorregamentos e processos como corridas de detrito e enchentes sujas.

Junta-se a isso os adensamentos populacionais em locais de risco, fruto de ocupação irregular e padrão construtivo precário. Com históricos de remoção que remontam a década de 1980, estes permanecem nas áreas de sopé da Serra e convivem diretamente com o risco iminente de atingimento desses fenômenos de movimentação de massa.

Assim, apenas o trecho serrano de Cubatão, contabiliza mais de 10 eventos de corridas de detrito, dentre os mais significativos o ocorrido na Refinaria de Presidente Bernardes (RBPC) – Petrobras, paralisando as atividades da planta durante uma semana, gerando imensos prejuízos

Dessa forma, os critérios para a escolha da área levaram em consideração os seguintes aspectos: contexto pluviométrico e climático; características regionais e de relevo, com alta variação altimétrica; histórico de eventos de corridas de detrito; e presença de habitações e infraestrutura em área de risco.

Figura 1 - Localização da área de estudo



Fonte: elaborado pelo autor

2.1 CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA E GEOMORFOLÓGICA

O município de Cubatão fundado em 1833, pertencente a Região Metropolitana da Baixada Santista, na microrregião de Santos com população aproximada de 130 mil habitantes, consolidado como grande polo industrial petroquímico do Estado de São Paulo. (IBGE, 2019).

Do ponto de vista de sua geologia, é transpassado por 2 grandes lineamentos (Figura 2), a Zona de Falhamento de Cubatão, e a Faixa Cataclástica (SADOWSKY, 1974). De acordo com o autor, a primeira se estende na costa sudeste dos vales do rio Mogi, Cubatão e Branco, perfazendo o limite sul de uma faixa de rochas ectiníticas, presente no vale desses rios, intercalando entre características de empurrão e de transcorrência normal.

O Lineamento Cubatão separa dois blocos distintos do ponto de vista litológico estrutural. No trecho norte ocorre o bloco com predominância de

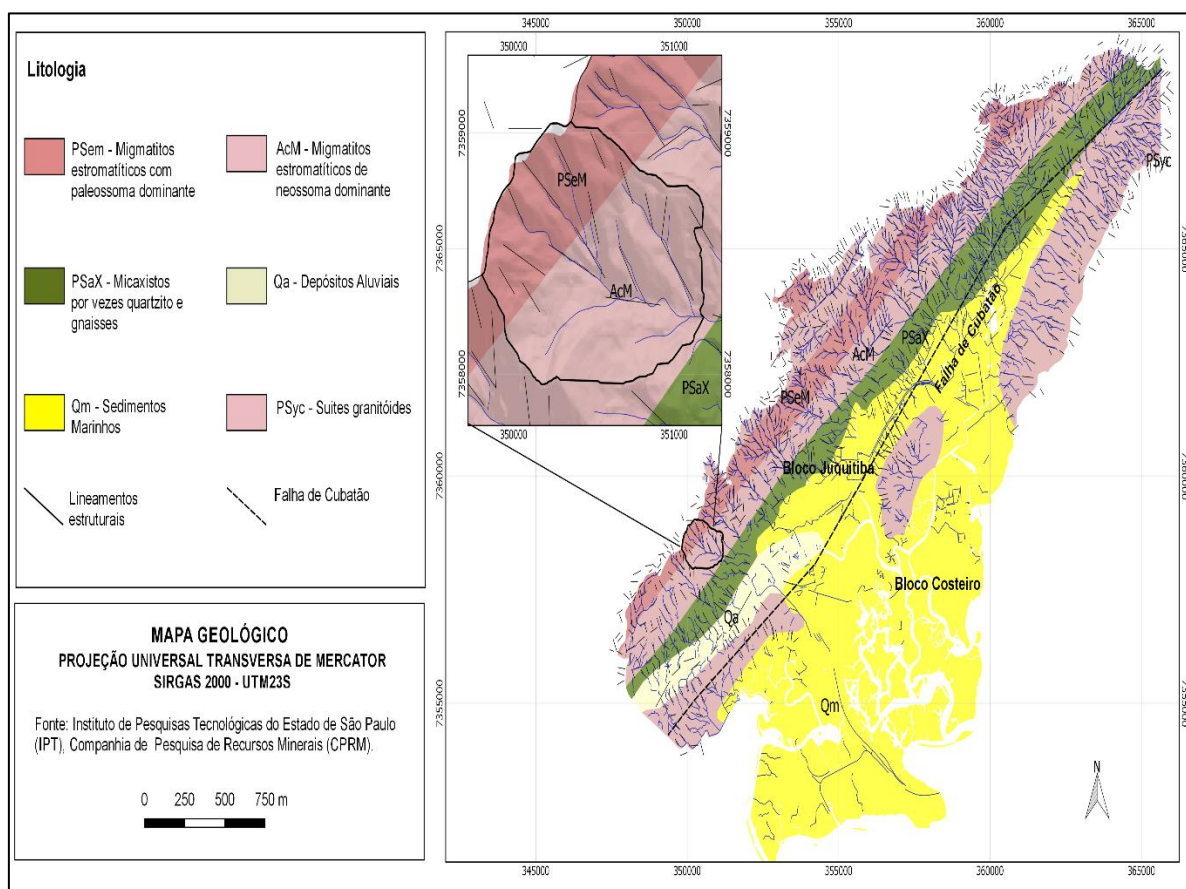
ectinítos e migmatitos estromatíticos e paleossoma xistosos. Correspondendo ao Bloco Juquitiba com direção de mergulho predominante SW.

Já o bloco Sul, diz respeito ao Bloco Litorâneo, e é composto por migmatitos essencialmente oftálmicos e de paleossoma de composição gnáissica, com predominância de mergulho para NE.

Com relação aos sedimentos Cenozoicos, Hasui e Martin (1976), os diferenciam de 3 formas distintas:

- a) Depósitos Coluviais: correspondem aos depósitos correlacionáveis ao intemperismo das encostas, onde os detritos são transportados por fluxos de massa densas, constituídos por cascalho de matriz areno-argilo-siltosa e lamitos. Esses fragmentos são oriundos do embasamento rochoso das encostas, e podem se diferenciar em dois tipos, o primeiro com espessuras que variam de centímetros a metros com composição predominantemente de quartzo, quartzito incrementados por uma massa areno-argilosa. O segundo tipo, menos intemperizado é mais heterogêneo, composto por grânulos, seixos e matacões com matriz areno-argilosa (Hasui et al 1994).
- b) Depósito de Talus: são referentes ao acúmulo de blocos de rochas no sopé de elevações mais íngremes, como resultado de processos gravitacionais de movimentação de massa.
- c) Depósitos Aluviais: depósitos dendrítico resultante da sedimentação por meio das drenagens, planícies de inundação e leques aluviais.

Figura 2 - Contexto geológico área de estudo



Fonte: IPT/CPRM (2013)

A bacia hidrográfica selecionada para a pesquisa encontra-se, situada no Bloco Norte Juquitiba, onde ocorre a predominância de rochas migmatíticas, relacionadas ao Complexo Costeiro de idade arqueana. Dentro desta unidade são frequentes os de estruturas estromatítica, com bandas de paleossoma xistoso com intercalações de quartzito, alternando-se com estruturas de estrutura granitoide (IPT, 1986).

Nas partes superiores das encostas são destacados anatexitos e nebulito, onde o paleossoma é menos frequente. No sopé e terço inferior, predominam os micaxistos com intercalações de filitos e quartzitos, do Proterozóico Superior, relacionados ao Complexo Pilar do Grupo Açungui (IPT, 1986). Esses micaxistos apresentam-se de maneira levemente migmatizada e juntamente com os filitos, exibem uma foliação extremamente desenvolvida.

Já na drenagem principal, unidades mais recentes são representadas por depósitos de clastos mais grosseiros contidos na drenagem principal.

Do ponto de vista geomorfológico a Serra do Mar caracteriza-se como uma unidade geomorfológica (Figura 3) que se estende pela costa ocidental brasileira, apresentando escarpas recuadas, com desnível superior a 800m de declividade (TATIZANA et al., 1987).

Esse subsistema de relevo tem destaque por apresentar drenagens de terceira e quarta ordem, desenvolvidas em anfiteatros típicos e bem definidos por interflúvios, que se estreitam na saída das drenagens (IPT, 1986).

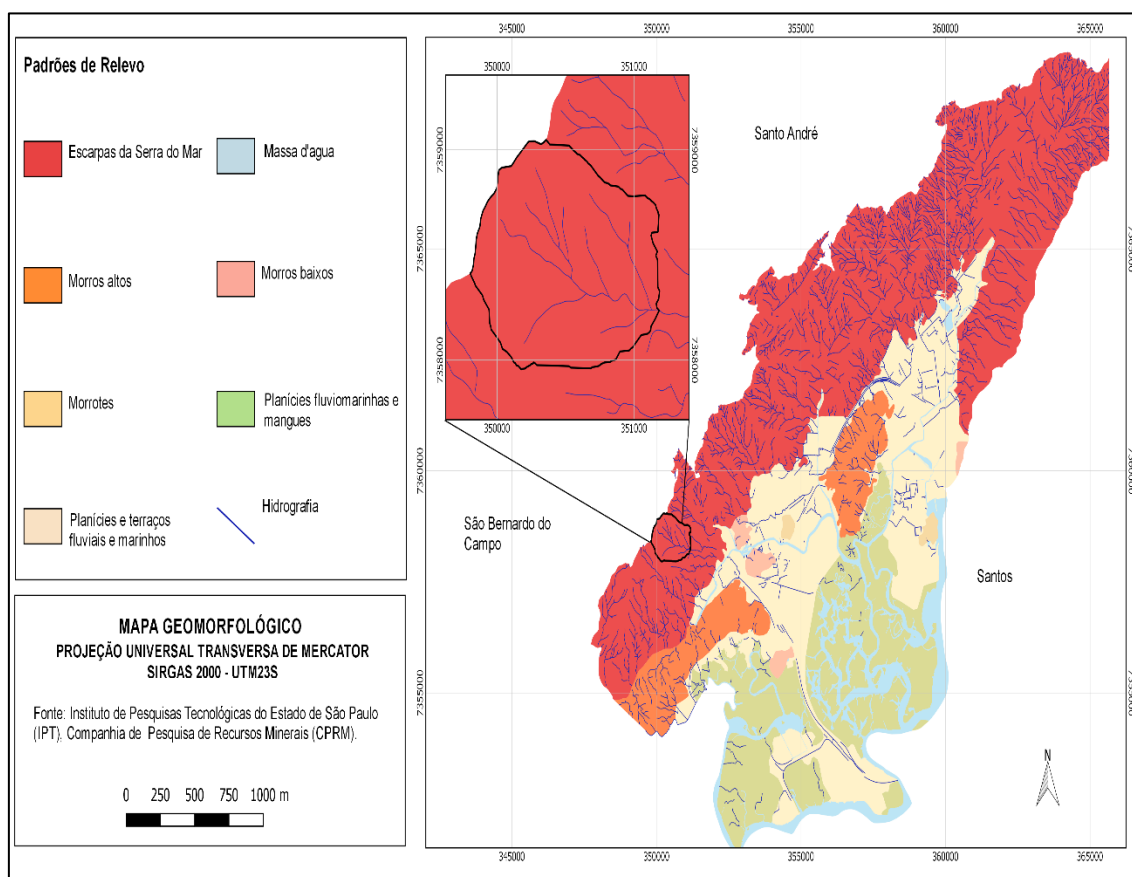
Neste setor pode se notar a presença de extensa ruptura de declive a média encosta, que por sua vez separa as formas de processos atuantes nas duas porções distintas. Na porção superior predominam escarpas retilíneas alongadas com declividades acima de 30°, com indícios de escorregamentos pretéritos e outros processos de movimentação.

Na porção inferior, predominam encostas de perfil convexo, com declividade médias entre 20 e 30°, que tendem a suavizar em direção aos vales, onde estão localizados os depósitos de clastos grosseiros.

Os solos desse setor apresentam grande variação ao longo da encosta, sendo praticamente inexistentes em zonas de alta declividade. O perfil do solo quando desenvolvido em regiões menos íngremes é constituído na porção superior por um colúvio marrom-amarelado, argilo-silto-arenoso, plástico, de baixa permeabilidade, com espessura média de 1 metro, raramente ultrapassando 2 metros. Abaixo do colúvio existe um solo residual areno-siltoso, com teores variáveis de argila, mais permeável, com espessura variando entre 1 e 2 metros, aumentando a granulometria com a profundidade. A superfície de escorregamento comumente coincide com a superfície de separação entre solo coluvial e o solo residual subjacente. (TATIZANA et al, 1987).

Corpos de talus podem ser encontrados ao sopé das escarpas com feições de encostas convexas, apresentando grandes espessuras, podendo atingir 60 metros. Já no contexto geológico, (Figura 11). A área de estudo, pode ser dividida em três principais porções, onde a primeira corresponde ao terço superior com declividades acima de 45°, vertentes alongadas, alto grau de entalhamento na drenagem e solos de pouca ou nenhuma espessura.

Figura 3 - Contexto geomorfológico área de estudo



Fonte: IPT/CPRM (2013)

Já o terço médio é constituído por vertentes que altura variável entre 5 e 15 metros e declividades entre 20 e 35°, com alto grau de entalhamento nas drenagens, sinais de escorregamentos planares rasos e grande quantidade de barramentos, constituídos predominantemente de blocos rochosos métricos e material vegetal de grande porte advindo de escorregamentos.

E por fim, o Terço inferior composto pela área deposicional, com declividade suavizada e alto grau de antropização, ocorre a predominância de material heterogêneo, variando de areia grossa até blocos com 0,5 metros.

Neste trecho da Serra do Mar os solos apresentam grande variação ao longo da encosta, tendo perfis.

A vegetação predominante por sua vez é a Mata Atlântica, apresentando-se degradada nos terços inferiores da escarpa, sendo substituída por vegetação arbustiva ou gramíneas nas zonas mais afetadas.

O clima da região é classificado de acordo com IPT (1987), como tropical de altitude, com patamares pluviométricos anuais da ordem de 3000 mm/ano,

ainda de acordo com Tatizana et al (1987), a proximidade da escarpa serrana provoca ascensão das massas de ar, propiciando o desenvolvimento de chuvas orográficas. Esse fenômeno tem é diretamente responsável pela grande variação nos índices pluviométricos.

Para o autor as chuvas mais frequentes e mais longas são associadas com frentes frias vindas do Sul com períodos de 2 a 3 dias de retorno, estas frentes quando se encontram em estado estacionário ou semi-estacionário na Serra do Mar permanecem por 2 a 4 dias em regime de chuva contínua ou intermitente.

Tatizana et al (1987), ainda associa a maior parte dos escorregamentos ocorridos nesse setor da Serra do Mar, a essas frentes, responsáveis por resultar em chuvas de longa duração e altas intensidades horárias com altos índices de saturação no solo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CLASSIFICAÇÃO DOS MOVIMENTOS DE MASSA

Os movimentos de massa são considerados como fenômenos que fazem parte da evolução natural da paisagem e são referentes a forma como os processos de deslocamentos de encosta agem sobre o modelado terrestre. Estes são os principais agentes modificadores do relevo nos domínios montanhosos, e as corridas de detrito são os que apresentam o maior potencial destrutivo e magnitude podendo alcançar dimensões em muitos casos catastróficas. (JOHNSON & RODINE, 1984; PIERSON & COSTA, 1987; TAKAHASHI, 2007; HUNGR, 2001).

Os movimentos de massa, especialmente as corridas de detrito (ou *debris flows*) tem sido objeto de aprofundados estudos nas últimas décadas, no Brasil e em outros países do mundo. Diversos pesquisadores avançam no sentido de compreender e melhor classificar esses fenômenos proporcionando maiores ferramentas para a previsão ou na gestão destes eventos.

Neste tópico, procurou-se trazer a importância na classificação e descrição e dos movimentos de massa, por meio da apresentação das conceituações consolidadas no cenário técnico-científico. Assim, vários autores se destacam como (SHARPE, 1958; VARNES, 1978; HUTCHINSON, 1988; AUGUSTO FILHO, 1992; VANDINE, 1996; IVERSON, 1997; TAKAHASHI, 2007; HUNGR *et al.* 2014)

Desta forma, Sharpe (1938) classificou os movimentos de massa de maneira generalista, englobando todos os tipos de movimentos que ocorrem em encostas naturais segundo a forma de movimentação e a natureza do material, correlacionados com a velocidade do deslocamento. Estes são divididos em escorregamentos e escoamentos e os materiais considerados são gelo, solo e água. (Tabela 1)

Tabela 1 - Sistematização dos movimentos de massa (Sharpe, 1938)

| | Movimento | | GELO | SOLO OU ROCHA | ÁGUA | | | | |
|----------------------------------|-----------------------|---|--------------------|---------------------------|----------------------------|------------------------|---|-------------------------|-------------------|
| | Tipo | Velocidade | | | Gelo predominante | Solo ou Rocha com Gelo | solo ou rocha, secos ou com reduzida quantidade de gelo ou água | solo ou rocha com água | água predominante |
| Com Frente Livre de movimentação | Escoamento | Lento a rápido - imperceptível Rápido - perceptível | TRANSPORTE GLACIAL | Rastejo de Rocha | | Transporte Fluvial | | | |
| | | | | Rastejo de Talús | | | | | |
| | | | | Solifluxão | Rastejo de solo | | Solifluxão | | |
| | | | | | Avalanche de detritos | | Corrida de solo | | |
| | | | | Corrida de Lama | | | | | |
| | Avalanche de detritos | | | | | | | | |
| | Escorregamento | Lento a rápido - imperceptível rápido - perceptível | | Escorregamento Rotacional | Escorregamento de detritos | | Queda de detritos | | |
| | | | | | | | | Escorregamento de rocha | |
| | | | | | | | | Queda de rocha | |
| | | | | Subsidência | | | | | |
| Sem frente livre | Escoam. ou Escorreg. | Rápido ou Lento | | | | | | | |

Fonte: Sharpe (1938)

Já Varnes (1958) classifica os mesmos segundo sua forma de movimentação, que depende da superfície de ruptura da massa em movimento e o tipo de material que a compõe. Esta definição foi ampliada e revisada em Varnes (1978).

O autor vai separá-los em três tipos básicos: *fall* (queda), *slide* (escorregamentos) e *flow* (fluxos); classificando também pelo tipo de material mobilizado (solos, regolitos e rochas), conforme apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Classificação sintética dos tipos de movimento (VARNES, 1978)

| Tipo de movimento | | Tipo de material | | |
|---|---------------|--------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| | | Matriz | Engenharia de Solos | |
| | | | Predominantemente grosseiro | Predominantemente Fino |
| Quedas | | Quedas de rochas | Queda de detritos | Queda de terra |
| Tombamentos | | Tombamento de rochas | Tombamento de detritos | Tombamentos de terra |
| Escorregamento | Rotacional | Deslizamento de rochas | Deslizamento de detritos | Deslizamento de terra |
| | Translacional | | | |
| Expansões laterais | | Expansões de rocha | Expansões de detrito | Expansões de terra |
| Corridas/escoamentos | | Corrida de rochas (rastejo profundo) | Corrida de detritos | Corrida de terra |
| Complexos: combinação de 2 ou mais dos principais tipos de movimentos | | | | |

Fonte: Varnes (1987)

Hutchinson (1988) designou os movimentos de massa por meio de uma classificação embasada na forma dos movimentos das encostas e no tipo de material envolvido, levando em consideração o mecanismo de deflagração, material e razão do seu deslocamento. Nesta classificação a composição litológica, a geologia estrutural, hidrogeologia, topografia, clima e vegetação são os principais fatores condicionantes para a ocorrência das movimentações de massa.

O autor faz uma divisão em seis classes específicas sendo estas: subsidência, rastejo, movimentação de encostas serranas, escorregamentos, movimentos de fluxo com detritos, tombamentos, quedas e movimentos complexos de encostas (Tabela 3).

Tabela 3 - Classificação dos movimentos de massa. (Hutchinson, 1988)

| Tipos | | Subtipos |
|-----------------------------------|--|---|
| Rebound | | Artificiais Naturais |
| Rastejo | Superficial A grandes profundidades (deep - seated) Anterior a ruptura (pre failure) Posterior a ruptura (post failure) | Rastejo de ou ou talus Rastejo de gelo, gelifluxão |
| Sagging of mountain slopes | Um lado da encosta Dois lados da encosta Combinado com tombamento | Rotacional Combinado Rotacional Combinado |
| Escorregamentos | Ruptura confinada | Taludes naturais |
| | Rotacional Compostos Translacionais | Taludes artificiais Simples Sucessivos Múltiplos Liberados por cisalhamento interno Progressivos em placas (sheat) em lascas (salb/flake) em turfas (peat/bog) em rochas (planar, escalonado, cunha) detritos (não periglacial e periglacial) espalhamento lateral repentino |
| Escoamento ou fluxo | mudslide flow slide debris flows sturzstroms | Placas Alongamentos Sem coesão Materiais ligeiramente cimentados Rochas brandas muito porosas Detritos de rochas intemperizadas Materiais provenientes de vulcões |
| Tombamentos | Descontinuidades pré-existentes Secundárias | Simples Múltiplos |
| Quedas | Primárias Secundárias | |
| Complexos | | |

Fonte: Hutchinson (1988)

No Brasil, Augusto Filho (1992), por meio de uma adaptação dos trabalhos de Varnes (1978), adaptou a classificação dos movimentos de massa de acordo

com os casos ocorridos no Brasil, apresentando diferenciação dos movimentos de acordo com os planos de ruptura, materiais e velocidades associadas ao movimento. Assim, os processos são diferenciados em 4 tipos: Rastejo (*creep*), Queda de blocos (*rock fall*), fluxo ou corrida de detritos (*debris flow*) e deslizamento ou escorregamento (*landslide*), conforme Tabela 4.

Tabela 4 - Classificação dos movimentos de massa. (Augusto Filho, 1992)

| Tipo de Movimento | Característica do movimento/Material/geometria |
|---------------------------------|---|
| Rastejos | Vários planos de deslocamento (internos) Velocidade muito baixa (cm/ano) a baixas e decrescentes com profundidade Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada Geometria indefinida |
| Escorregamentos (slides) | Poucos planos de deslocamento (externos) Velocidade média (m/h) e altas (m/s) Pequenos e grandes volumes de material Geometria e materiais variáveis Planares - solos pouco espessos, solo e rochas com um plano de fraqueza Circulares - Solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas Em cunha - solos e rochas com dois planos de fraqueza |
| Quedas (falls) | Sem planos de deslocamento Movimentos tipo queda ou em plano inclinado Velocidades muito altas (vários m/h) Material rochoso Pequenos e médios volumes Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc. Rolamento de matacão Tombamento |
| Corridas (flows) | Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas a massa em movimentação) Movimento semelhante ao de um líquido viscoso Desenvolvimento ao longo das drenagens Velocidades médias a altas Mobilização de solo, rocha, detritos e água Grandes volumes de material Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas |

Fonte: Augusto Filho (1992)

Com a grande quantidade de classificações internacionais, a proposta que apresenta maior aderência entre os pesquisadores é a de Varnes (1978),

apresentada na Tabela 2, complementada posteriormente por uma classificação de velocidades por Cruden e Varnes (1996).

Dessa maneira, foi apresentada uma revisão conceitual acerca dos movimentos de massa por Hungr *et. al.* (2001). Nesta, as definições estão mais claras e se adequam tanto em outros idiomas tendo sua base nas propriedades mecânica dos fenômenos.

Esta classificação foi adotada como pressuposto teórico deste trabalho e segue sintetizada na Tabela 5.

Tabela 5 - Classificação das corridas de detrito de Hungr (2001)

| Tipo de Movimento | Característica do Fenômeno |
|--|---|
| Corrida de Detritos (Debris Flow) | Movimento rápido a extremamente rápido de detritos saturados, não plásticos, e em canal com IP < 5% na fração solo; |
| Corrida de Lama (Mud Flow) | Movimento rápido a extremamente rápido de lama e/ou detritos saturados, e em canal, com alto teor de água e alta plasticidade, IP>5%; |
| Enxurrada de Detritos (Debris Flood) | movimento muito rápido com grande quantidade de detrito, afloramento de água |
| Avalanche de Detritos (Debris Avalanche) | Movimento muito a extremamente rápido, de material superficial, parcial ou totalmente saturado |

Fonte: Hungr (2001), adaptado pelo autor

Nesta classificação os termos *debris* (detritos), são utilizados para se referir a material solto de baixa plasticidade, oriundo dos colúvios, alúvios, material vegetal e até rejeitos advindos da atividade humana. Do ponto de vista da granulometria seu arranjo é heterogêneo, constituído por areia, cascalho, rocha, blocos de rocha com porções significantes de silte e argila e muito material orgânico. Já o termo *Mud* (lama), vem associado aos solos argilosos, com matriz especificamente composta por areia e finos, com alta plasticidade, tendo uma instabilidade potencial ao ser incrementado por águas superficiais ou subsuperficiais (HUNGR *et. al.*, 2001).

3.2 CLASSIFICAÇÃO DAS CORRIDAS DE DETRITO

As corridas de detrito são movimentos gravitacionais de massa complexos que se movimentam em forma de um fluxo por escoamento. Estes fenômenos podem ocorrer a partir de escorregamentos generalizados em encostas, mobilizando uma grande quantidade de solo, fragmentos de rocha e detritos vegetais que escoam em direção às calhas secundárias de drenagem, até atingir os cursos d'água principais, ganhando energia e alcançando os terrenos mais baixos e planos onde se depositam na forma de leques aluvionares.

Stiny (1910) define as corridas de detrito como um tipo específico de movimento de massa, referindo-as como um fluído percorrendo uma montanha, transportando sólidos e sedimentos em suspensão.

O processo também pode ser definido como um fluxo de minerais não-plásticos saturados e de detritos orgânicos em um canal íngreme, que incluem cerca de 50-70% de grãos sólidos em volume, podendo variar entre 10 e 109 m³, e atingir velocidades de até 10 m/s (HUNGR et al., 2004; IVERSON, 1997).

Esses fenômenos podem ser definidos de acordo com MASSAD et. al. (2002), como fluxos que se diferenciam dos demais movimentos de massa devido as suas características como, velocidades elevadas, alto potencial erosivo e destrutivo, aliados a uma grande competência para transportar materiais a grandes distâncias em pequenos períodos.

Takahashi (2007) classifica as corridas de detrito como uma mistura de sedimento e água, que flui continuamente por ação da gravidade com enorme mobilidade. Em análise da complexidade do fenômeno, Coussot e Meunier (1996), consideram o fluxo de detritos intermediário entre fluxo hiperconcentrado e escorregamento de vertentes.

3.3 CARACTERÍSTICAS GERAIS DAS CORRIDAS DE DETRITO

Uma corrida de detrito trata-se de um fluxo hiperconcentrado, caracterizado pela forma de movimentação em fluxo visco-plástico turbulento com presença de grandes partículas. A composição dos materiais pode apresentar grande variação, desde pequenos seixos até blocos métricos.

As corridas de detrito se diferenciam dos demais movimentos de massa devido a suas superfícies de desenvolvimento, seus elevados índices de vazão e velocidade, o tamanho do material envolvido e principalmente o seu poder destrutivo e raio de alcance.

Nesse processo são características marcantes as altas velocidades oscilando entre 5 e 20 m/s e vazões de pico de 10 a 20 vezes maior que um evento de cheia, bem como sua alta capacidade erosiva e poder de impacto com registros que variam de 30 a 1.000 kN/m², responsável pelo alto poder de transporte de blocos e rochas de dimensões métricas por quilômetros e altas taxas de concentração de sólidos e feições estratigráficas de deposição típicas, caracterizadas por inversão granulométrica (Johnson, 1970; Vandine, 1996; Massad et al. 2002; Gramani, 2001).

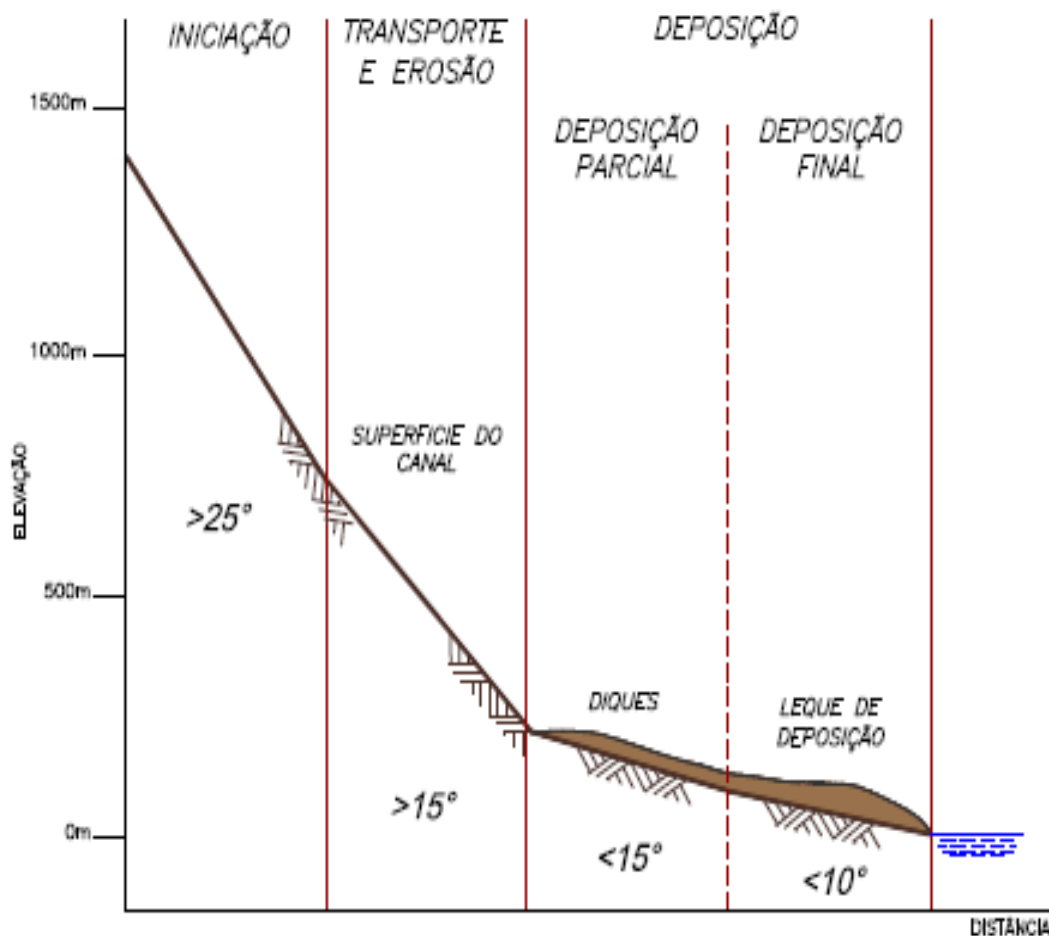
Guidicini e Nieble (1984) por sua vez, classificam as corridas de detrito, como fluxos de corrida com excesso de água, responsáveis pela perda de atrito interno da massa, tendo como característica a rápida velocidade de deslocamento.

Com relação aos aspectos da tipologia de desenvolvimento do processo de uma corrida de detrito, Vandine (1996), divide sua ocorrência em três fases, associadas as declividades do canal principal. A zona de iniciação, onde são deflagrados os principais escorregamentos responsáveis pelo incremento de material a ser transportado na drenagem, com declividades superiores a 25°.

A zona de transporte onde todo esse material se move através de pulsos com altas velocidades e grande competência erosiva nas margens este se dá em declividades na ordem de 15°, e a zona de deposição onde os fluxos se depositam na forma de leques onde as declividades tendem a suavizar ficando abaixo de 10°, (Figura 4).

Basicamente, o grande poder de competência da corrente viscosa pode ser atestado pelo transporte de blocos rochosos de dimensões métricas ao longo de grandes distâncias. Gramani e Arduin (2014), por exemplo, fazem relato de blocos de 2 a 5 metros de diâmetro no processo de corrida de detritos ocorrido em Itaóca – SP em janeiro de 2014.

Figura 4 - Zonas numa corrida de detritos com fluxo canalizado (VANDINE, 1996).



Fonte: (Vandine, 1996) adaptado pelo autor.

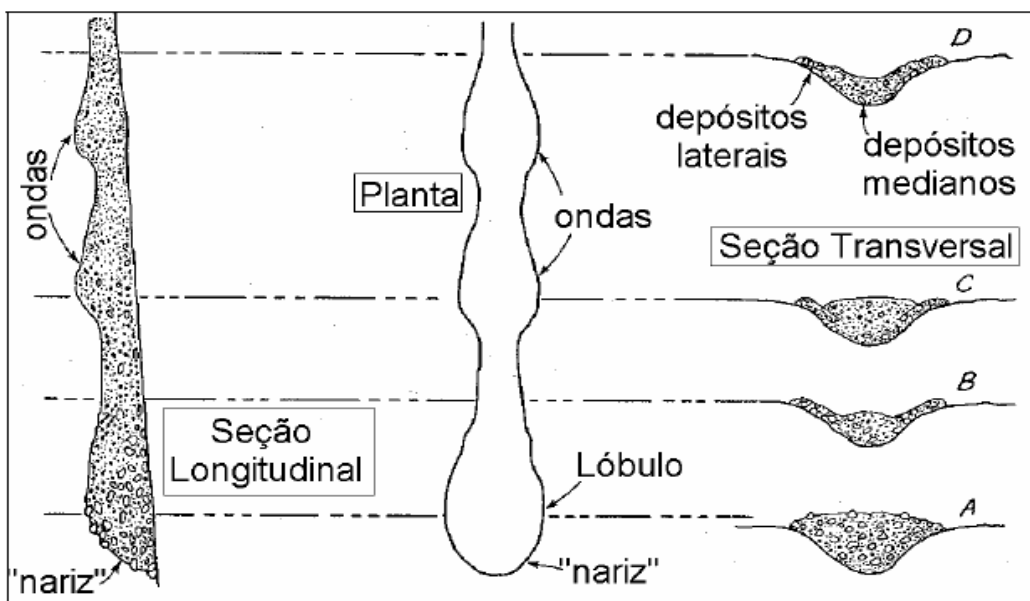
3.3.1 Mecanismos de formação

As corridas de detrito se formam geralmente nas cabeceiras de drenagens primárias ou secundárias, associados ao incremento de água por precipitação, e a um cenário com muito material sedimentar.

A Figura 5 ilustra em perfil esquemático as principais feições de uma corrida de detritos e a maneira como ocorre sua deposição. Note-se que as corridas tendem a seguir os canais de drenagem, movimentando-se na forma de pulsos, ocasionados por grandes picos de descarga de sedimento e água.

É possível observar que na porção frontal do fluxo há a predominância de material grosseiro, inversão granulométrica caracterizada pelos grandes blocos que se deslocam na parte superior do material de tamanho reduzido.

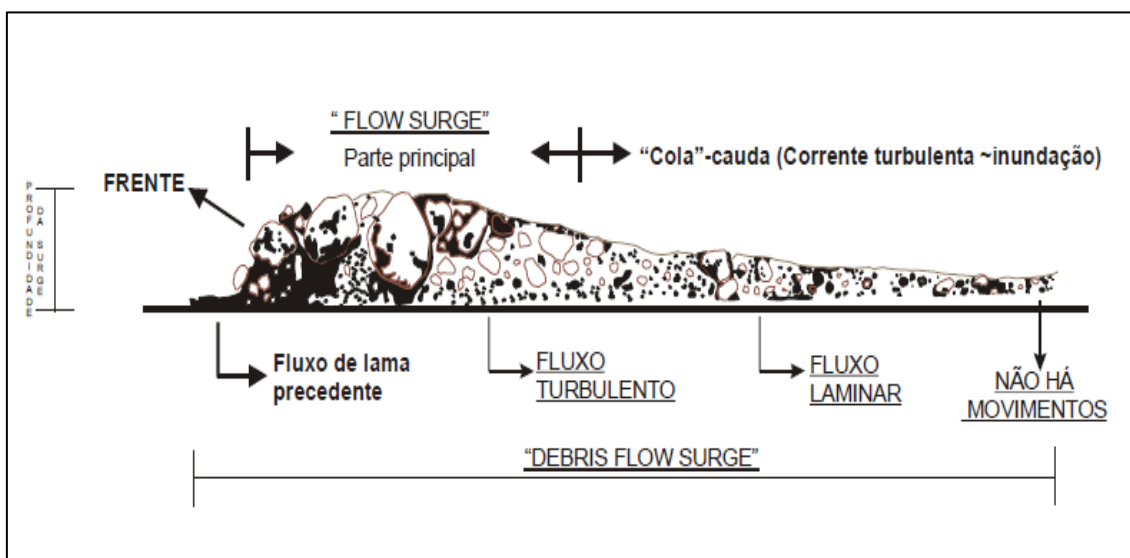
Figura 5 - Feições apresentadas por um debris flow (GRAMANI, 2001).



Fonte: Gramani (2001)

Conforme esse fluxo avança, novas ondas podem se formar, provavelmente com granulometrias menores até que o fenômeno cesse. Porém nota-se em planta que a frente é mais ampla e larga, responsável pela maior erosão dos materiais localizados no fundo e nas margens dos canais, (Figura 6).

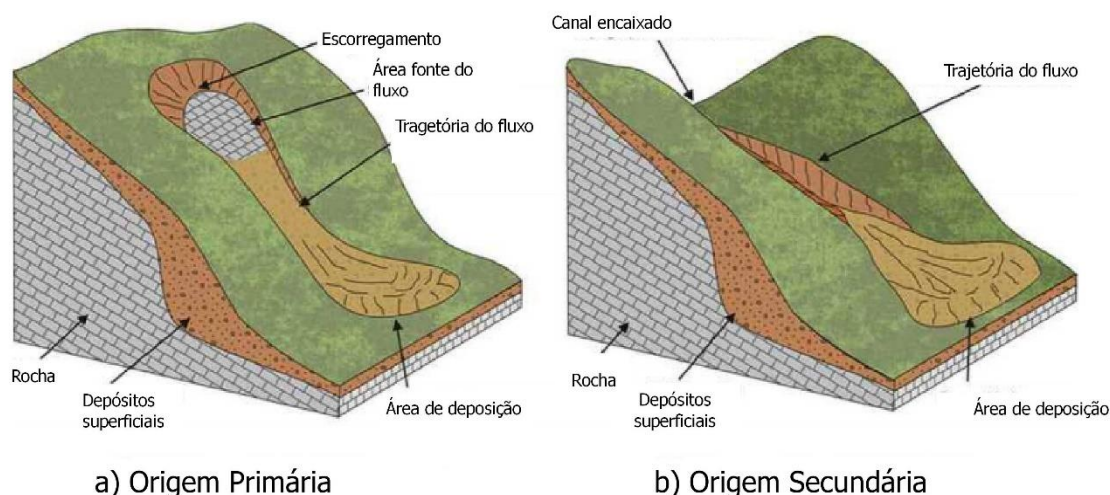
Figura 6 - Detalhe de uma frente de uma corrida de detrito (GRAMANI, 2001).



Fonte: Gramani (2001)

Assim, para compreender e mensurar um processo de corrida de detritos é necessário entender e diferenciar as etapas de seus processos de formação, juntamente com seus mecanismos. Dessa forma, pode-se agrupá-los quanto à origem e deflagração em 2 grupos principais: origem primária e origem secundária (Figura 7):

Figura 7 - Tipos de origem de corrida de detritos: primário e secundário (Adapt. NETTLETON et. al., 2005).



Fonte: Nettleton et al (2005) adaptado pelo autor

- a) Origem Primária: tem sua origem nas encostas, deflagrado pela ocorrência de deslizamentos rotacionais e/ou translacionais nas altas declividades a montante da drenagem principal, alimentando o canal com material inconsolidado pronto para ser transportado (CRUDEN e VARNES, 1996). Nesse caso, por meio de fenômenos de dilatância ou liquefação espontânea o processo de fluxo seria iniciado nas encostas ou vertentes de drenagens principais. (HAMPTON, 1972; PIERSON, 1977).
- b) Origem Secundária: são deflagrados nas drenagens principais, a partir do colapso de material acumulado em barramentos naturais, ou a partir de acumulação de material sem coesão ao longo do leito da drenagem onde possa haver estrangulamentos (TAKAHASHI, 1981). Os fluxos de origem secundária geralmente têm uma densidade maior, e 80 % do peso em sólidos (CRUDEN e VARNES, 1996).

Assim, partindo desses tipos de deflagração, existem três principais descrições de mecanismos de formação das corridas de detritos: dilatância, liquefação, barramentos naturais ou acumulação, sendo os dois primeiros se desenvolvem nas encostas e os dois últimos na rede de drenagem.

A dilatância, refere-se à propriedade que as massas granulares têm de se expandir em volume com a mudança em sua forma. Para Mead (1925), baseia-se no fato de que um conjunto de partículas dispostas conjuntamente em repouso tendem a procurar um arranjo de maior estabilidade, que corresponde ao empacotamento de máxima densidade, de modo que é impossível mudar a forma sem incrementar o volume. Ou seja, a massa sólida presente nas encostas ao sofrer o processo de deslizamento e incremento de água, acaba por se deformar a primeiro momento, em seguida com a incorporação de água e perda de resistência interna, transforma-se em fluido viscoso.

Já a liquefação espontânea, ocorre quando uma massa sólida e coesa se transforma em fluido viscoso, por incremento de água. Esse processo descrito por Johnson (1970) e Hampton (1972), trata-se da saturação do solo, onde ocorre o aumento da pressão neutra, reduzindo a resistência interna e conseqüente perda de resistência ao cisalhamento. A encosta sofre incremento de água saturando seu perfil de solo, fazendo com que a pressão neutra aumente. Dessa forma a resistência ao cisalhamento diminui fazendo com que a estrutura interna do solo colapse, gerando um fluxo direcionado na drenagem.

Por fim, os barramentos naturais, são caracterizados como represamentos de materiais sólidos incoerentes, podendo entrar em colapso, deflagrando uma corrida de detritos (TAKAHASHI, 1981).

Sua relação é diretamente relacionada à quantidade de material presente nas drenagens, seja em forma de depósitos, colúvios ou troncos e galhagens, formando barramentos, onde durante extremos pluviométricos pode ocorrer acúmulo de energia potencial e conseqüente rompimento e liberação de fluxos destrutivos.

Essa lógica de colapso, pode se dar por meio de deslizamentos a montante nas declividades mais altas e mobilização do material para as linhas de drenagem, que ficaria retido nos barramentos, até que o colapso se daria diante da alta vazão e material carregado na drenagem.

3.4 FATORES CONDICIONANTES PARA A FORMAÇÃO DE CORRIDAS DE DETRITO

O desenvolvimento do processo de uma corrida de detrito em linhas de drenagem ou a partir de encostas tem íntima associação à concentração do material sólido e água que estão envolvidos no sistema. Para que o processo seja deflagrado é necessária uma quantidade imensa de água ocasionada por chuvas excepcionais de ordem horária e/ou com acumulados de 72 horas (TATIZANA et. al. 1987; KANJI et al., 1997; GRAMANI e KANJI, 2001). Essa proporção de água e material sólido é dada por três fatores condicionantes principais:

- i) Condicionantes de encosta;
- ii) Condicionantes de drenagem;
- iii) Condicionantes da bacia de captação.

3.4.1 Condicionantes de encosta

As encostas que tem maior pré-disposição a ocorrência de corridas de detrito são aquelas com grande quantidade de material sólido mobilizável por meio de escorregamentos ou erosão. Este material tende a se concentrar nas drenagens por processo de erosão laminar ou rastejo de solo, sendo uma fonte potencial para eventuais deflagrações. São as de mais comum ocorrência e as que apresentam maior mobilidade, volume transportado e poder de impacto.

Sua alta susceptibilidade a escorregamentos ou queda de blocos segundo Pierson (1970), tem relação com as declividades entre 30 e acima 45°, a forma das encostas com destaque para as retilíneas alongadas, ausência de vegetação, degradação e alta erosividade das encostas e leito do canal de drenagem

2.4.2 Condicionantes das drenagens

Os processos de corrida de detritos em sua maioria se formam nas linhas de drenagem primárias ou secundárias, seja por meio do rompimento de

barragens naturais, ou pela movimentação de material inconsolidado. Basicamente, as características geomorfológicas e estratigráficas da linha de drenagem e depósitos correlatos são fundamentais para identificação da susceptibilidade a deflagração de um evento. Dessa forma, é possível relacionar os aspectos do meio físico favoráveis para o desenvolvimento de uma corrida de detritos de duas formas: material presente na drenagem e características geomorfológicas. A primeira refere-se aos alúvios e terraços antigos ou depósitos de tálus e colúvio que formam as vertentes na drenagem. A segunda relaciona-se com os aspectos geomorfológicos desfavoráveis à estabilidade, como altas declividades superiores a 15°, (TAKAHASHI, 1981).

Outras características, como vales encaixados, com altos raios hidráulicos, possibilitam que a espessura e poder erosivo de uma corrida de detritos se mantenham intensos e acima da taxa crítica, além de aumentarem a taxa de incorporação de sedimentos ao longo da drenagem (PIERSON, 1981). Outro fator responsável é o estrangulamento de drenagens, número alto de meandros e presença de soleiras de rochas, que tendem a favorecer a acumulação de material sólido, aumentando as possibilidades de colapso e deflagração de uma corrida de detritos.

3.4.3 Condicionantes da bacia de captação

As características da bacia hidrográfica são fundamentais no que diz respeito a magnitude do evento, pois controlam a concentração de água e do material presente nas encostas que pode ser disponibilizado nas drenagens. O tempo de concentração da água, a vazão e a relação de água e sólidos também são determinados pelas características da bacia hidrográfica.

Bacias hidrográficas que permitem rápida concentração e altas taxas de vazão são ideais para o desenvolvimento de corridas de detrito. Naturalmente é necessária uma alta concentração de material sólido mobilizável. Assim, os fatores que podem ser elencados como favoráveis para a sua formação, ligados a superfície geomorfológica são classificados como de encosta, drenagem e anfiteatro.

Na encosta, a abundância de material passível de mobilização é relacionada à alta taxa de escorregamentos, quedas de blocos e susceptibilidade

à erosão. Na drenagem, o excesso de material sólido mobilizável, aliado a estruturas de acumulação de sedimentos e altas declividades e raio hidráulico. E, nos anfiteatros, as bacias com baixo tempo de concentração, com chuvas de alta intensidade e grande quantidade de material mobilizável.

Para Costa (1984), as bacias mais suscetíveis ao processo de corridas de detrito, são as pequenas e íngremes por três motivos principais:

- a) as chuvas caem com intensidade média por área mais uniforme do que em bacias grandes, ocasionando em tempo maior de concentração;
- b) bacias menores, em geral, localizam-se em topografia mais elevada, com tendência a apresentar maiores taxas pluviométricas e sofrer maior efeito orogenético;
- c) em geral apresentam maior declividade média, e, portanto, maior susceptibilidade de escorregamentos, erosão e menor tempo de concentração.

3.5 CORRELAÇÕES CHUVA X MOVIMENTAÇÃO DE MASSA

Para que ocorra a deflagração de uma corrida de detritos, além dos condicionantes físicos citados anteriormente como topografia e material disponível nas drenagens é extremamente necessário que chuvas excepcionais ocorram (KANJI et. al.,1997)

Estudos de correlação para movimentações de massa e chuva são muito importantes para a definição de limiares específicos para identificação dos gatilhos que precedem e deflagram as corridas de detrito. (ENDO, 1970; CAMPBELL, 1975; NIELSEN et al., 2004; GUIDICINI & IWASA, 1977; TATIZANA et. al., 1987; KANJI et. al. 2003).

Nesse sentido, o trabalho pioneiro de Tatizana et al (1987), desenvolvido na região da Serra do Mar em Cubatão, teve como referência os dados pluviométricos dos eventos ocorridos em um período de 30 anos, nesse trecho da Serra do Mar mostra uma série de envoltórias que permitem a visualização de limiares de segurança, de períodos de chuva acumulada durante 4 dias.

As envoltórias de escorregamentos foram determinadas de acordo com 4 níveis, que são: escorregamentos induzidos, esparsos, generalizados e corridas de detritos, fundamentados pela Equação 1.

$$I(AC) = K \times Ac^{-0,933} \quad (1)$$

Onde:

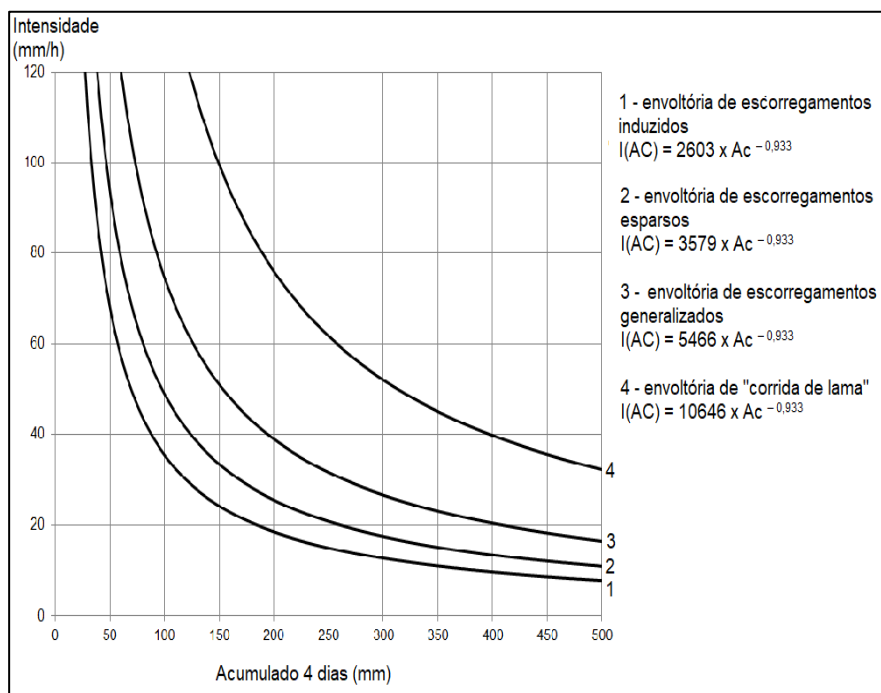
I = intensidade suficiente para desencadeamento de escorregamentos;

K = parâmetro dependente das condições geotécnicas da encosta e da intensidade de escorregamentos;

Ac = acumulada de chuva de 4 dias anteriores;

A Figura 8 representa o gráfico da correlação entre chuvas e escorregamentos realizada por Tatizana et. al. (1987).

Figura 8 - Gráfico de Envoltórias de Escorregamentos (Tatizana, et al. 1987)



Fonte: Tatizana et al (1987)

Outras propostas de correlação também foram feitas (NEYAMA, 1989; IKEYA, 1989; KANJI et al., 1997), na intenção de estabelecer limiares para precipitações mais pontuais em períodos mais curtos de tempo. Então (KANJI et

al., 1997; GRAMANI e KANJI, 2001; KANJI et al. 2003) reuniram os dados de chuva que especificamente deflagraram corridas de detrito, em uma correlação que levou em consideração chuvas acumuladas e o tempo de duração em horas.

Encontrando uma função (Equação 2), onde se define o limiar crítico horário de chuva necessária para deflagração de uma corrida de detritos.

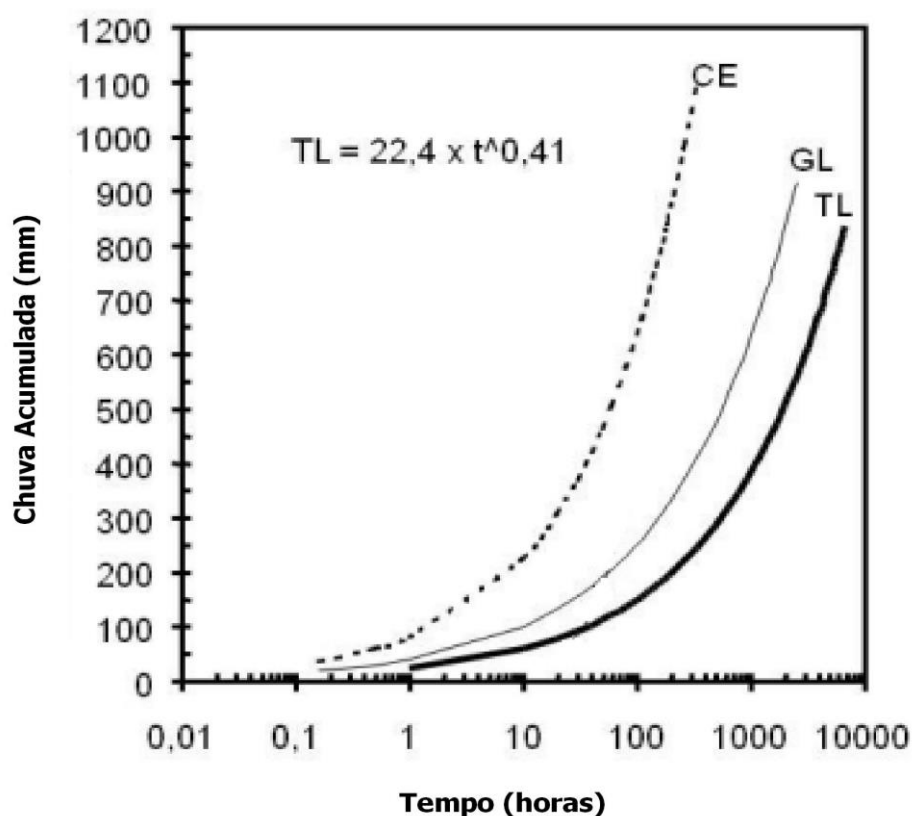
$$P_{acum} = 22,4 * t^{0,41} \quad (2)$$

Onde:

P_{acum} = limite inferior da precipitação acumulada de deflagração (mm)

t = duração total da precipitação (mm/h)

Figura 9 - Gráfico de chuvas acumuladas com o tempo Kanji et. al. (2003).



Fonte: Kanji et al. 2003

Onde:

CE – Curva de limite casos catastróficos

GL – Curva de escorregamentos generalizados

TL – Curva crítica (limite de deflagração)

3.6 MONITORAMENTO DE CORRIDAS DE DETRITO

As corridas de detrito têm como característica serem resultantes do deslocamento de uma grande quantidade de material na drenagem em alta velocidade, tornando difícil fornecer a previsão de sua ocorrência.

Assim, os planos e sistemas de monitoramento preventivos específicos para corridas de detrito que envolvem bacias hidrográficas são fortemente dependentes de análise pluviométrica e meteorológica em tempo real, e conhecimento dos parâmetros morfológicos e geológicos da área.

O monitoramento e a emissão de alertas para situações com potencial de deflagração em áreas sob risco, se baseiam na capacidade de análise de modelos meteorológicos de previsão associados a correlações empíricas de chuva versus movimentação.

Um dos exemplos promissores aplicados no Brasil foi a implantação do Plano Preventivo de Defesa Civil (PPDC), que tem seu funcionamento baseado na correlação de precipitação crítica para escorregamentos e fenômenos de instabilização para o município de Cubatão (SP), realizada por Tatizana et. al. (1987).

Kanji et. al. (1997), Gramani & Kanji (2001) e Kanji et. al. (2003), por meio de estudos conduzidos na região de Cubatão, desenvolveram metodologia de correlação específica para os casos de chuva, que pode se dar de maneira horária ou em períodos de acumulação, estabelecendo um limiar crítico na deflagração dos processos de corridas de detrito.

Já Gramani (2001; 2014) propôs uma metodologia de verificação em bacias hidrográficas para estimar o grau de risco de desenvolvimento de uma corrida de detritos, conjuntamente determinando o grau de suscetibilidade de sua ocorrência. Arattano e Franzini (2003) também relacionam o monitoramento das corridas de detrito com correlações empíricas entre precipitações e movimentação de massa, com o auxílio de sensores e instrumentação geotécnica.

Nessa mesma linha, o Serviço Geológico dos Estados Unidos (USGS) desenvolveu, entre os anos de 1986 e 1995 na Baía de São Francisco, um projeto para conceber uma rede de monitoramento e alerta para corridas de

de trito 24 horas por dia, 7 dias por semana, baseado em previsões meteorológicas, medições em campo e correlações de chuva x movimentações de massa.

Entre as principais metas deste programa estavam uma parceria fundamental com a Administração Oceânica e Atmosférica Nacional (NOAA), almejando a melhoria na quantificação das estimativas e previsões de movimentação de massas, desenvolvimento de modelos para delinear perigos de escorregamentos, e avanços em tecnologia de informação geográfica que permitem uma ligação especial e temporal mais forte entre as previsões de precipitação e modelos estimados.

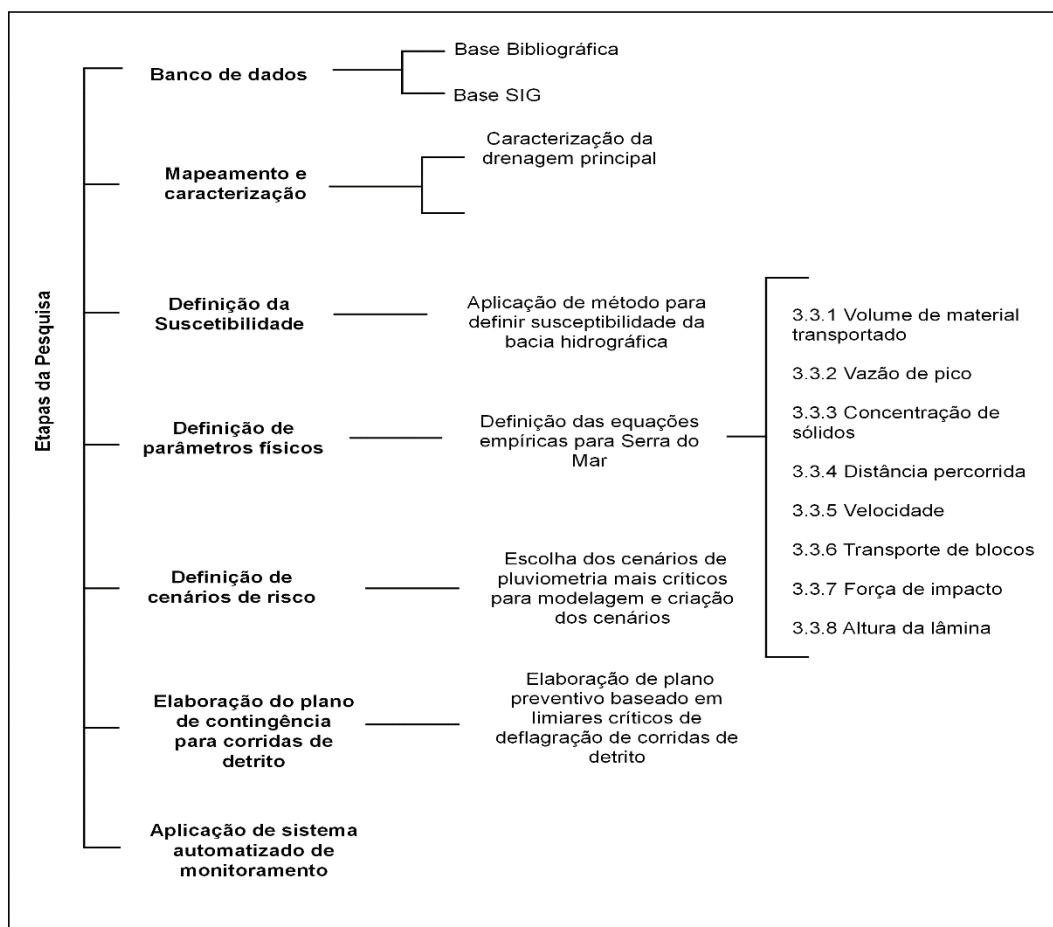
4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MÉTODO DA PESQUISA

A metodologia deste trabalho foi desenvolvida no sentido de subsidiar a escolha e aplicação de métodos que permitissem a execução de todas as etapas de desenvolvimento e operacionalização de um plano de gestão à ocorrência de corridas de detrito na bacia hidrográfica do Rio das Pedras em Cubatão/SP.

Baseando-se no método de Gramani e Augusto Filho (2005); Gramani et.al. (2005) e Gramani (2015) a abordagem metodológica buscou o conhecimento de mecanismos de deflagração e desenvolvimento de corridas de detrito, histórico de ocorrências na Serra do Mar, identificação e caracterização dos parâmetros geológico-geotécnicos de interesse e análises quantitativas e qualitativas, apoiadas em modelagens de Sistema de informações geográficas (SIG).

Figura 10 - Etapas de desenvolvimento do trabalho



Fonte: elaborado pelo autor

Assim, a Figura 8 ilustra as etapas que consistem na escolha e levantamento da base de dados, mapeamento e caracterização da área de estudo, escolha dos métodos para melhor dimensionamento de possíveis eventos, definição de cenários de risco e concepção de um sistema automatizado de monitoramento e alerta.

4.2 BASE DE DADOS

A base de dados utilizada para o desenvolvimento deste trabalho foi adquirida por meio de levantamento bibliográfico, constituída de artigos nacionais e internacionais, periódicos, teses e dissertações e documentos técnicos acerca do tema, com o intuito de criar uma base conceitual para subsidiar a pesquisa.

Concomitantemente, uma base de arquivos em Sistema de Informação Geográfica (SIG), foi elaborada, sendo que os produtos utilizados foram de uso público. Assim foram utilizadas, ortofotos da área de estudo e fotografia aérea, base topográfica do município de Cubatão/SP e mapa geomorfológico e geológico do município (Tabela 6).

Tabela 6 - Relação de materiais utilizados na base cartográfica

| MATERIAL | ESCALA | FONTE |
|--|-----------|---|
| Fotografia aérea | 1: 25.000 | Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) |
| Ortofoto | 1: 4.000 | Empresa de Planejamento Metropolitano do Estado de São Paulo (Emplasa) |
| MDE Mapa Geológico Mapa Geomorfológico Base Topográfica | 1:25.000 | IPT (1985) Projeto Cartas Municipais a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações (CPRM/IPT/IBGE, 2015) |

Fonte: elaborado pelo autor

A fotografia aérea utilizada, cedida pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), corresponde ao ano de 1972, na escala de 1:25.000, as ortofotos foram cedidas pela Empresa de Planejamento Metropolitano de São Paulo (Emplasa) correspondem ao ano de 2011, e possuem escala de 1: 4.000.

As bases topográficas, geológicas, geomorfológicas foram obtidas por meio do Projeto das Cartas Municipais a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações resultado da cooperação entre o Serviço Geológico do Brasil (CPRM), Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) e Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) desenvolvido no ano de 2015, em escala de 1:25.000.

4.3 MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO

A estimativa de uma corrida de detritos é tarefa complexa e pode ser feita por meio de fórmulas empíricas e trabalhos de campo, considerando sempre o fator geológico-geotécnico e geomorfológico, como fatores condicionantes desse processo.

O mapeamento e caracterização deste trabalho buscou o método investigativo direto proposto por Gramani et al. (2005), com foco na identificação e análise da potencialidade de geração de uma corrida de detritos, correspondendo as etapas de campo onde são realizados os primeiros zoneamentos das áreas sob risco, bem como a identificação de evidências estratigráficas de depósitos para evidenciar eventos anteriores.

Sob a ótica dos fatores geológicos-geotécnicos, é primordial atentar para a importância da disponibilidade de material inconsolidado na bacia, como depósitos aluviais e coluviais, ou grandes pacotes de solos residuais pois estes podem ser removidos e contribuir para o incremento ou formação do processo. Da mesma forma, as encostas com altas declividades devem ser mapeadas, por representarem áreas fontes de materiais para as corridas de detrito.

No que tange o contexto geomorfológico, os parâmetros que influenciam a dinâmica e deflagração desses fenômenos são a área total da bacia, as declividades acima de 30°, a variação altimétrica, e as características do canal principal. Os fatores antrópicos, tais como degradação de vegetação, cortes e

escavações devem ser contabilizados, pois são fatores potencializadores que contribuem no aumento da dinâmica erosiva e conseqüentemente no aumento da taxa de escorregamentos.

4.4 DEFINIÇÃO DE CENÁRIOS DE RISCO

A definição dos cenários de risco na bacia hidrográfica tem como referência o objeto sob risco, com a premissa de identificar e dimensionar quais elementos podem ser atingidos pelas corridas de detrito.

Para Gramani (2014), a elaboração de um cenário de risco corresponde ao mapeamento e mensuração do impacto de materiais grosseiros com destruição parcial ou total das obras, destruição das estradas de acesso (rodovias, pontes e travessias) e moradias vulneráveis.

Para isso, é necessário um grande conhecimento a respeito da tipologia dos processos geodinâmicos em questão, a fim de identificar feições de instabilização, evidências estratigráficas e principalmente, estabelecer o provável raio de alcance e poder de impacto nos objetos sob risco.

Também foi proposta, com embasamento no estudo e levantamento da ocorrência das corridas de detrito pretéritas na região de estudo a utilização de cenários críticos de análise, que consiste em panoramas de chuva extrema.

4.5 DEFINIÇÃO DA SUSCETIBILIDADE DA BACIA À OCORRÊNCIA DE CORRIDAS DE DETRITO

O método utilizado para definição da suscetibilidade a ocorrência de uma corrida de detritos, baseia-se nas proposições de Gramani e Kanji (2001) e Gramani (2001), onde os principais fatores envolvidos na deflagração deste fenômeno como, precipitação, inclinação de encostas, declividade do canal, área da bacia, altura da encosta uso e ocupação do solo e vegetação e aspectos geológicos são elencados em um *check list*.

Por meio de vistorias em campo e análise morfométrica, pesos e notas são inferidos a fim de chegar a uma soma final, que define o grau de suscetibilidade. A Tabela 4 apresenta os fatores, pesos e classes utilizados para a definição das notas parciais de cada fator, cuja somatória será o grau de suscetibilidade, presente na Tabela 5.

Tabela 7- Pesos e notas parciais dos fatores intervenientes na ocorrência de corrida de detritos. Fonte: Gramani e Kanji. (2001).

| FATORES | CLASSES | PESO (P) | ATRIBUTOS | NOTA PARCIAL (NP) |
|--|---------|----------|-----------|-------------------|
| (R) Chuva (mm/h) | R1 | 3 | > 80 | 10 |
| | R2 | | 60 – 80 | 6,6 |
| | R3 | | 30 – 60 | 3,3 |
| | R4 | | < 30 | 0 |
| (S) Inclinação da Encosta (°) | S1 | 2,5 | > 45 | 10 |
| | S2 | | 45 – 30 | 6,6 |
| | S3 | | 15 – 30 | 3,3 |
| | S4 | | < 15 | 0 |
| (D) Declividade do Canal (°) | D1 | 0,5 | > 25 | 10 |
| | D2 | | 15 – 25 | 6,6 |
| | D3 | | 10 – 15 | 3,3 |
| | D4 | | < 10 | 0 |
| (A) Área da bacia (km²) | A1 | 1 | < 5 | 10 |
| | A2 | | 5 – 10 | 6,6 |
| | A3 | | 10 – 20 | 3,3 |
| | A4 | | > 20 | 0 |
| (H) Altura da encosta (m) | H1 | 1 | > 750 | 10 |
| | H2 | | 500 – 750 | 6,6 |
| | H3 | | 200 – 500 | 3,3 |
| | H4 | | < 200 | 0 |
| (V) Uso e ocupação/vegetação (% da área ocupada ou desmatada) | V1 | 0,5 | 90 – 100 | 10 |
| | V2 | | 50 – 90 | 6,6 |
| | V3 | | 30 – 50 | 3,3 |
| | V4 | | < 30 | 0 |
| (G) Aspectos geológicos | G1 | 1,5 | G1 | 10 |
| | G2 | | G2 | 6,6 |
| | G3 | | G3 | 3,3 |
| | G4 | | G4 | 0 |

Fonte: Gramani e kanji (2001)

De acordo com Gramani (2001), a observância destes fatores é fundamental para uma boa validação desta metodologia, possibilitando determinar e definir os pesos e fatores de acordo com sua importância na deflagração das corridas de detrito e por meio de estudos de casos anteriores.

O fator chuva (R) destaca-se como o mais importante do ponto de vista de deflagração dos eventos de corrida de detrito, possuindo um peso maior na análise final. Especificamente neste tipo de fenômeno as chuvas mais críticas, têm como característica principal, períodos acumulados da ordem de 72 horas com picos horários excepcionais, com as medidas expressas em mm/h. O fator inclinação de encostas (S) é um fator chave quanto aporte de material para as

drenagens principais por meio de escorregamentos planares rasos, alimentando as corridas de detritos.

A declividade dos canais (D), por sua vez, é fundamental para a análise da suscetibilidade pois nesta superfície que os fluxos hiperconcentrados desenvolvem sua trajetória, tendo uma relação diretamente proporcional entre o aumento das declividades e sua velocidade.

Já o conhecimento da área da bacia (A), é necessário para dimensionamento da captação e concentração das águas pluviais e definição das principais trajetórias e dinâmicas de uma corrida de detrito no caso de deflagração. A altura das encostas (H) é por sua vez importante para mensuração dos escorregamentos.

Os aspectos geológicos (G) incluem a identificação da litologia predominante da área de estudo, bem como, padrão de fratura dos maciços, espessura dos solos e mapeamento de depósitos que evidenciem corridas pretéritas.

O uso e ocupação (V) diz respeito ao padrão de ocupação da área de estudo, devendo ser observado se a presença de solo exposto e infraestruturas sob situações de risco.

Assim, com os fatores definidos a nota final (NF), é alcançada com a somatória das notas parciais (NP) de cada classe, multiplicadas pelo seu peso (P). (Equação 3).

$$NF = \sum NP \times P \quad (3)$$

Por fim, a definição do grau de suscetibilidade à ocorrência de uma corrida de detritos nas bacias hidrográficas, se dá por meio dos critérios exibidos na Tabela 8.

Tabela 8 - Pesos e notas parciais dos fatores intervenientes na ocorrência de corrida de detritos.

| NOTA FINAL | GRAU DE SUSCEPTIBILIDADE |
|------------|--------------------------|
| 80 - 100 | Muito alto |
| 60 - 80 | Alto |
| 40 - 60 | Médio |
| 20 - 40 | Baixo |
| 0 - 20 | Muito Baixo |

Fonte: Gramani e Kanji (2003)

4.6 DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS FÍSICOS

As corridas de detrito são fenômenos com alto poder destrutivo que possuem variáveis hidráulicas e morfológicas que extrapolam qualquer cenário de normalidade. Dessa forma, seus parâmetros podem ser estimados por meio de equações e modelos empíricos.

Assim, foi realizado um levantamento bibliográfico para seleção dos modelos que melhor se adaptam aos cenários de risco da Serra do Mar, dessa forma os parâmetros e fórmulas selecionados estão mostrados na Tabela 9, a seguir:

Tabela 9 - Correlações empíricas definidas para realização do trabalho

| PARÂMETRO | FÓRMULA | REFERÊNCIA |
|---------------------------------|--|--|
| Volume de material transportado | $V_t = 500 \cdot q_t$ | Takahashi (1991) |
| Vazão de pico | $q_t = \frac{2}{(1 - C_v)} \cdot A_t \cdot I_1$ | Massad <i>et al.</i> (1997) |
| Concentração de sólidos | $C_v = \frac{\text{tg } \theta}{(\delta - \gamma_0) [\text{tg } (\varphi) - \text{tg } (\theta)]}$ | Takahashi (1991) |
| Distância percorrida | $\frac{H}{L} = 1,87 \cdot Q^{-0,146}$ | Kanji (2002) |
| Velocidade | $U = 1,3 \cdot \text{sen}^{0,2} (\theta) \cdot \frac{q_0^{0,2} \cdot g^{0,2}}{d_{50}^{0,4}}$ | Rickemann (1991) |
| Transporte de blocos | $D \leq 0,04 \cdot V^2$ $D \leq 0,08 \cdot V^2$ $D \leq 0,12 \cdot V^2$ | Hang <i>et. al.</i> (1985) Gramani (2001) |
| Força de impacto | $F = \alpha \cdot A_1 \cdot \gamma_0 \cdot V^2/g$ | Cruz & Massad (1997) |
| Altura da Lâmina | $h = q_t / V \cdot b$ | Kanji <i>et al.</i> (2017) |

Fonte: Elaborado pelo autor

Essas estimativas, segundo Massad (2002), podem ser feitas através de fórmulas empíricas baseadas em experiências regionais e comparação de casos propostos por autores do Japão, Canadá e América do Sul. Nesse cenário as equações foram validadas por meio de comparações de parâmetros estimados e medidos em campo, relacionados a ocorrências de corridas de detrito no Brasil e no Japão.

Assim, esse dimensionamento por meio de equações empíricas e modelos aplicados é fundamental para dimensionamento de planos de contingência ou implantação de obras de mitigação. A seguir, serão descritos os respectivos métodos e correlações empíricas definidas para essa pesquisa, baseados em estudos de Cruz e Massad (1997), Gramani (2001), Massad (2002) e posteriormente compilados por Sakai (2014).

4.6.1. Volume de material transportado

A estimativa do volume de material mobilizado é um fator importante pois fornece dados sobre a quantidade de material envolvido durante um fluxo, que pode ser avaliado através da análise dos sedimentos passíveis de serem transportados. Kanji et. al. (2017) define esses sedimentos em três principais áreas fonte:

1. Solos de encostas, passíveis de escorregamentos;
2. Materiais pedregosos e arenosos remobilizáveis do leito;
3. Materiais das margens erodíveis dos rios e córregos que formam as vertentes.

Dessa forma, Takahashi (1991), propõe uma equação para estimar o volume de sedimentos transportáveis por meio de uma correlação entre o volume total e a vazão de pico das corridas de detrito, descrita pela Equação 4 a seguir:

Equação 4: Correlação empírica do volume de material transportado em uma corrida de detritos. Fonte: Takahashi (1991)

$$V_t = 500 \cdot q_t \quad (4)$$

Onde:

V_t = volume total (m³)

q_t = vazão de pico de uma corrida de detritos (m³/s)

Takahashi (1991), adverte que esta equação apresenta grande dispersão dependendo das condições e geometria do canal, bem como nas características do fluxo.

4.6.2. Vazão de pico

A vazão de pico é uma grandeza que deve ser conhecida devido a sua complexidade e importância nos dimensionamentos das corridas de detrito, Cruz e Massad (1997) estimam que as vazões de pico de um processo de corrida de detritos tendem a ser de 10 a 20 vezes maiores que enchentes normais.

Dessa forma, este parâmetro pode ser estimado por meio da expressão proposta por Massad *et. al.* (1997), conforme apresentado a seguir:

Equação 5: Cálculo de vazão de pico de corridas de detrito. Fonte: Massad (1997).

$$q_t = \frac{2}{(1 - c)} \cdot A \cdot I_1 \quad (5)$$

Onde:

q_t = vazão de pico de uma corrida de detritos (m³/s)

A = área total da bacia (km²)

I_1 = intensidade de precipitação horária pré deflagração da corrida de detritos (mm/h)

c = concentração volumétrica de sólidos

4.6.3 Concentração de sólidos

A concentração de sólidos é parâmetro importante a ser estimado pois compõe grande parte das equações empíricas na estimativa da corrida de detritos, segundo Gramani (2001), sua estimativa é muito difícil de ser determinada, devido a dificuldade de amostragem de material ao longo da drenagem.

Segundo Costa (1984) as concentrações volumétricas de sólidos relacionadas a amostragens de depósitos, relatam valores entre 25% a 86%.

Assim Takahashi (1991) propôs a seguinte correlação empírica para o cálculo da concentração de sólidos no fluxo das corridas.

Equação 6: Cálculo de concentração de sólidos. Fonte: Takahashi (1991).

$$c = \frac{\gamma_0 \cdot \operatorname{tg}(\theta)}{(\delta - \gamma_0) \cdot [\operatorname{tg}(\varphi) - \operatorname{tg}(\theta)]} \quad (6)$$

Onde:

c = concentração volumétrica de sólidos

γ_0 = peso específico do fluido da fase líquida da corrida de detritos (kN/m^3)

θ = declividade do canal ($^\circ$)

δ = peso específico das partículas sólidas ($\sim 26,5 \text{ kN/m}^3$)

φ = ângulo de atrito do material sólido ($^\circ$)

4.6.4 Distância percorrida

A determinação da distância percorrida é um parâmetro fundamental após a definição dos cenários de risco da área de estudo, devido ao grande raio de alcance e destruição das corridas de detrito. Assim a estimativa dos fluxos pode ser realizada por meio, das relações feitas por HSU (1975) e Hutchinson (1988) de altura total do deslocamento do fluxo e distância total percorrida.

Posteriormente Kanji (2002), por meio de trabalhos desenvolvidos no Brasil, estabeleceu um limite superior de distância percorrida pela corrida de detritos, dado pela equação a seguir:

Equação 7: Equação para determinação de distância percorrida de uma corrida de detritos. Fonte: Kanji (2002).

$$\frac{H}{L} = 1,87 \cdot Q^{-0,146} \quad (7)$$

Onde:

H = gradiente altimétrico da rampa percorrida pela corrida de detritos (m)

L = distância horizontal percorrida pela corrida de detritos (m)

Q = volume mobilizado (m³)

4.6.5. Velocidade da corrida de detritos

As corridas de detrito no geral, tem como característica a alta velocidade de desenvolvimento, Gramani (2001), realizou estudos a fim de estimar e validar uma série de equações para verificar diferentes faixas de velocidade e qual apresentaria maior aderência aos casos registrados na Serra do Mar.

Para este trabalho a equação que melhor se adequou foi a Rickemann (1991), por ser independente da variável de altura (h) da frente de avanço da corrida de detritos, visto que não há registro de evento recente para estima-la. Equação 8 e 9: Cálculo de estimativa de velocidade da corrida de detritos. Fonte: Gramani (2001).

$$U = 1,3 \cdot \text{sen}^{0,2}(\theta) \cdot q_w^{0,2} \cdot \frac{g^{0,2}}{d_{50}^{0,4}} \quad (8)$$

Onde:

U = velocidade do fluxo (m/s)

θ = inclinação média do canal

g = aceleração da gravidade

d_{50} = diâmetro dos grãos

q_w = vazão só de água

3.6.6 Transporte de blocos

Outro parâmetro diretamente associado a velocidade do fluxo, é a competência da corrida de detritos de transportar materiais de tamanhos que variam de pequenos seixos a blocos de proporções métricas. Gramani (2001), chama atenção para o fato de blocos métricos serem carregados por dezenas de metros em eventos ocorridos na Serra do Mar.

Assim, Hong *et. al.* (1985) e Gramani (2001), estimaram uma relação entre transporte de material aliada a velocidade do fluxo. Por meio de estudo de casos, concluiu que a mobilização de blocos de maiores dimensões tem mobilidade maior associada a declividades maiores, como descrito nas equações abaixo:

$$D \leq 0,04 \cdot V^2 \quad (9)$$

$$D \leq 0,08 \cdot V^2 \quad (10)$$

$$D \leq 0,12 \cdot V^2 \quad (11)$$

4.6.7 Forças de impacto da corrida de detritos

Como supracitado, as corridas de detrito possuem imenso poder de impacto destrutivo, podendo comprometer grandes infraestruturas. Gramani (2001) afirma que construções, barragens, árvores de grande porte, pontes e casas podem ser totalmente destruídas pela passagem do respectivo fenômeno.

Portanto, sua estimativa é fundamental para dimensionar obras de contenção, estabelecer planos de contingência e selecionar locais apropriados para a locação de aparelhos de infraestrutura.

Cruz e Massad (1997), estimam as forças de impacto das corridas de detrito, por meio da equação abaixo:

Equação 13: Cálculo da estimativa de força de impacto das corridas de detrito.

Fonte: Cruz e Massad (1997).

$$F = \alpha \cdot A1 \cdot \gamma0 \cdot V^2/g \quad (12)$$

Onde:

F = força de impacto (kN/m²)

α = coeficiente de impacto (1 para fluxo turbulento/ 2 para fluxo laminar)

$A1$ = área de impacto (m²)

γ_0 = peso específico da corrida de detritos (kN/m³)

V = velocidade do fluxo (m/s)

g = aceleração da gravidade (m/s²)

4.6.8 Altura da lâmina da corrida de detrito

Em casos específicos, onde se tem aparelhos de infraestruturas suspensos como pontes ou dutos, é fundamental estimar a altura da lâmina da corrida de detritos, com a finalidade de reduzir os impactos.

Dessa forma, Kanji *et. al.* (2017), propõem a estimativa de altura da lâmina pela seguinte equação:

Equação 14: Cálculo da altura da lâmina da corrida de detritos. Fonte: Kanji *et. al.* (2017).

$$h = \frac{qt}{V.b} \quad (13)$$

Onde:

h = altura da lâmina da corrida de detritos (m)

qt = vazão de pico da corrida de detritos (m³/s)

b = largura do canal (m)

4.7. PLANO DE CONTINGÊNCIA

Planos de contingência são ações de natureza não estrutural que tem como finalidade estabelecer procedimentos operacionais preventivos para redução do risco em áreas onde este está presente.

Para Cerri (1993), as medidas de prevenção têm por objetivo eliminar e/ou reduzir os riscos instalados, e evitar a instalação de novas áreas de risco ou ainda, além de conviver com os riscos atuais. Para Macedo *et. al.* (2004), planos de contingências como o Plano Preventivo de Defesa Civil do Estado de São Paulo (PPDC) correspondem a uma ação de convivência com os riscos presentes nas áreas de ocupação de encostas, em razão da gravidade do problema e a impossibilidade de eliminação, no curto prazo, dos riscos identificados.

A concepção de um plano de contingência, é fundamentada no conceito de ações a serem tomadas previamente à deflagração de eventos geodinâmicos por meio do acompanhamento dos principais agentes deflagradores como: precipitação pluviométrica e previsão meteorológica e acompanhamento de feições de instabilização em campo.

A estrutura lógica de um plano preventivo específico para corridas é concebida a partir da premissa de Cerri (1993), Cerri e Barbosa (1990), Cerri e Carvalho (1990), Macedo et. al. (2002) Macedo et. al. (2006), no qual os eventos ocorrem após chuvas específicas em bacias que já possuem predisposição para ocorrência de tal fenômeno. Portanto, primordialmente os parâmetros operacionais para mudança de nível de operação são as informações meteorológicas, o acompanhamento pluviométrico em tempo real e o acompanhamento dos canais e sistemas de drenagem.

A elaboração do plano preventivo leva em consideração os parâmetros físicos e pluviométricos (chuvas acumuladas em 72 horas) e previsão meteorológica. Seu funcionamento é condicionado em quatro níveis de operação (Tabela 10), (observação, atenção, alerta e alerta máximo), fundamentados no estudo de correlação entre chuvas e deslizamentos desenvolvido por Tatizana et. al. (1987).

Tabela 10 - Níveis operacionais do PPDC (adaptado, Macedo et. al., 2006)

| Nível do Plano | Critério de Entrada no Nível |
|-----------------------|---|
| Observação | Início da Operação |
| Atenção | Quando o acumulado de chuvas ultrapassar o valor de referência combinado com a previsão meteorológica |
| Alerta | Quando as vistorias de campo indicarem a existência de feições de instabilidade ou mesmo deslizamentos pontuais |
| Alerta Máximo | Quando ocorrem deslizamentos generalizados |

Fonte: Cerri (1993)

Estes estudos de correlação também consideram a ocorrência de corridas de massa, porém não são incorporados nos planos vigentes, visto que esse fenômeno tem deflagração muito rápida e desenvolvimento ao longo da linha de drenagem, com velocidades que podem ultrapassar 100km/h (KANJJI et al., 2017), e não depende apenas dos valores de precipitação.

Como definido por Hungr et al. (2001), as corridas de massa são movimentos de massa extremamente complexos, sendo necessário uma vistoria nas drenagens principais e um zoneamento detalhado para definir as que possuem maior probabilidade de desenvolver o fenômeno.

Assim, por meio do uso de correlações de chuva com movimentos de massa, pode se chegar o mais próximo possível de limiares pluviométricos de risco, que permitem subsidiar os quatro níveis de operação do Plano Preventivo, sempre avançando o nível de criticidade conforme os acumulados e precipitações horárias forem aumentando.

4.8 SISTEMA DE MONITORAMENTO AUTOMATIZADO

Um sistema de previsão de monitoramento a movimentação de massa ou corridas de detrito tem duas principais premissas, a eficiência na coleta de dados

observacionais em tempo real que inclui dados de campo e remotos e a assimilação destes por sistemas operacionais também em tempo real baseados nos limiares de segurança e previsão.

Dessa forma, para realizar o monitoramento das chuvas na área de estudo foi elaborado um sistema automatizado, pensando em uma melhor efetividade e tempo de resposta. Esse sistema foi elaborado segundo a concepção de Bressani et al (2018).

Seu funcionamento está atrelado a sensores em uma ponta, neste caso específico pluviômetros automáticos, inseridos em uma rede de comunicação podendo ser feita ponto-a-ponto, ou por meio de *gateways*. Os dados são enviados para uma nuvem, onde ocorre sua validação e consequente armazenamento em um banco de dados. (Figura 11)

Figura 11 - Arquitetura do sistema de monitoramento



Fonte: elaborado pelo autor

A transmissão desses dados pode ser feita via GPRS (General Packet Radio Service), 3G/4G, wi-fi ou outras tecnologias disponíveis, em seguida os dados são processados, e inseridos na lógica de monitoramento e

disponibilizados para plotação, visualizados ou impressos em plataformas como computadores, smartphome e etc.

A linguagem de programação usada foi o PHP, junto com o servidor NGINX e o banco de dados TimescaleDB, um banco de dados de séries temporais de código aberto (Bressani et al, 2018).

Seu funcionamento é fundamentado na análise de dados variando de cenário ou parâmetro a ser monitorado, no caso específico desta pesquisa o objetivo é trabalhar com séries temporais de precipitação em tempo real, com o incremento de *machine learning*, equações e correlações empíricas, para predição de eventos de chuva extremos.

No processo da mineração e análise desses dados, é inserida a lógica dessas correlações e cenários de risco, e o sistema tem os inputs brutos e os devolve como informação e subsídio para a tomada de decisão.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresentará os resultados e apontamentos pertinentes, bem como algumas discussões sobre os valores e cenários resultantes. Assim, serão expostos e discutidos os métodos utilizados para estimar e dimensionar a ocorrência à corridas de detrito na área de estudo e a contribuição para o monitoramento preventivo desses fenômenos.

5.2 MAPEAMENTO E CARACTERIZAÇÃO

Este trabalho teve como um dos seus objetivos estimar as zonas de risco e prever a possibilidade de deflagração de corridas de detrito e determinar os parâmetros para elaboração de plano de contingência.

Com base no trabalho de campo e modelo fenomenológico adotado, pode-se afirmar que a bacia hidrográfica em questão tem propensão à geração das corridas de detrito, tanto na sua drenagem principal, que foi o foco do estudo, como nas secundárias.

O mapeamento e caracterização teve como premissa analisar a drenagem principal por meio de seções transversais, buscando identificar os principais condicionantes de encosta e de drenagem, quantidade de material mobilizável, barramentos e trechos de maior entalhamento.

Por meio de zoneamento da área de risco e a escolha dos parâmetros que podem ser estimados conjuntamente com investigações geológicas e geotécnicas, da análise de eventos pretéritos, da comparação de volumes, magnitude, das características dos depósitos e chuvas deflagradoras foi possível elaborar um cenário de análise que torna possível modelar e estimar eventos futuros, uma vez que o desenvolvimento de uma corrida de detritos em uma linha de drenagem está associado à concentração de material sólido e água, condicionado por fatores de encosta, fatores de drenagem e de fatores referentes a bacia de captação.

4.2.1 Condicionantes de encosta

Na área de estudo foram verificados nas encostas feições e fatores favoráveis a processos de instabilizações (escorregamentos planares rasos e em cunha, quedas de bloco, erosão), devido ao alto entalhamento a partir da cota de 180 metros e a grande extensão de encostas alongadas e retilíneas.

Verificou-se a predominância de encostas com declividades maiores que 30° , consideradas as mais críticas para o desenvolvimento de escorregamentos (IPT, 1986), associadas na maior parte do tempo a feições retilíneas, como pode ser verificado na Figura 12.

A vegetação da área encontra-se em maior parte preservada ou em processo de regeneração, indicando que o estado de degradação não é diretamente responsável por processos de instabilização, uma vez que o terço superior da bacia hidrográfica ou zona de deflagração encontra-se preservado sem sinais de atividades antrópicas.

Entretanto, pode ser notado considerável a quantidade de material inconsolidado ou mobilizável, nas encostas com espessuras médias não ultrapassando 3 metros, além de rochas expostas (migmatitos, quartzitos, granitos) relativamente resistentes, porém com um padrão de fraturamento métrico, o que poderia ocasionar em um grande fornecimento de material para a drenagem mediante um cenário de fortes impactos. (Figura 13 e 14).

Desta maneira, a predominância das encostas com altas declividade e retilíneas são os principais fatores que exercem maior responsabilidade pelas instabilizações na bacia hidrográfica, entretanto não foi verificada fonte abundante de material mobilizável nestas encostas. Sendo que, apesar dos fatores favoráveis, e a ocorrência de diversos processos de instabilizações nas encostas, é provável que um evento de chuva forte dificultaria o desenvolvimento de uma corrida de detritos, favorecendo a ocorrência de uma enchente rápida ou suja.

Figura 12 – Mapa topográfico da área de estudo e perfis transversais e longitudinais da drenagem principal

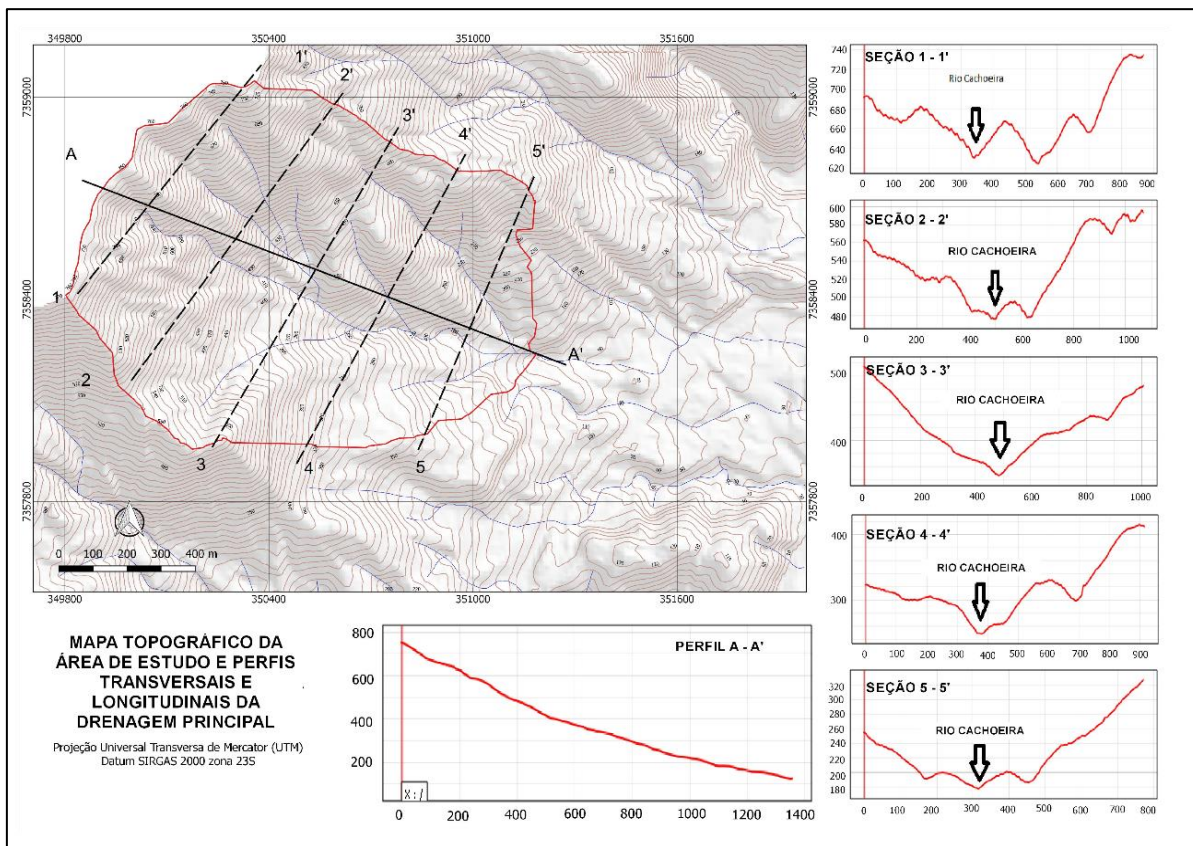
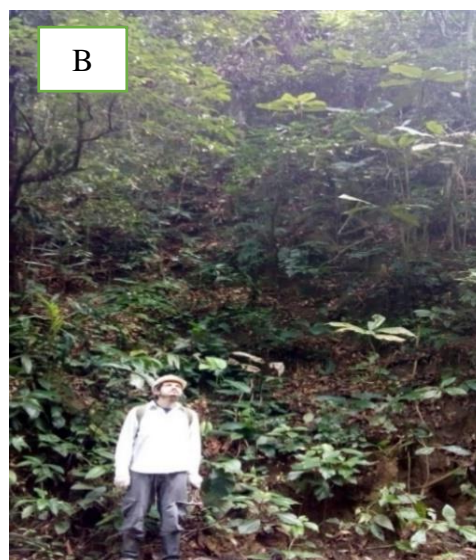


Figura 13 - Registro da encosta a médio curso (ponto 9). A) Quartzitos, migmatitos e granitos, solo com espessura média não ultrapassando 3 metros. B) Encostas altas e retilíneas com declividades acentuadas



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 14 - Vista frontal do depósito lateral da encosta (ponto 10). A) Migmatitos e Granito, solo pouco espesso, encosta retilínea com feições erosivas intensas. B) Depósito erodido com tipologia de inversão granulométrica típico de corridas de detrito. C) Granito altamente alterado, encosta com sinais de movimentação recente.



Fonte: elaborado pelo autor

5.2.2 Condicionantes das drenagens

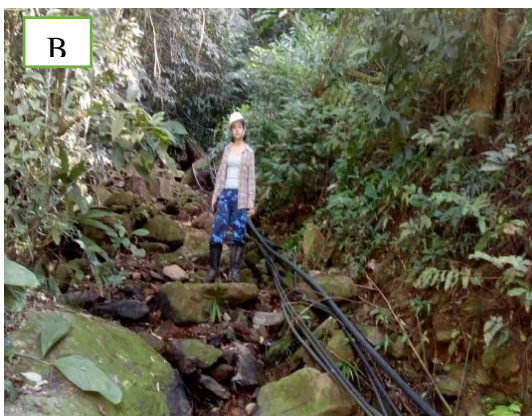
Os canais de drenagens têm influência direta no processo de formação e desenvolvimento de uma corrida de detritos através das características geomorfológicas e os depósitos associados. O material mobilizado em uma corrida de detrito não advém apenas das encostas, mas uma parcela significativa, especialmente os mais grosseiros, é incorporada por deposições superficiais posicionadas ao longo da drenagem (tálus, colúvio, alúvios, terraços fluviais, antigos depósitos de corridas pretéritas).

Na área de estudo, as coberturas observadas ao longo da linha da drenagem principal, podem ser divididas em alguns tipos de depósitos:

- a) Terraços aluviais de pequena espessura, variando de 1 a 2 metros com pequena extensão, distribuídos no terço final da drenagem, entre a zona de transporte e de deposição. Nesta porção ocorre o predomínio de cascalhos e de uma matriz arenosa grosseira. Em direção às cabeceiras, é notório o aumento da granulometria, passando os terraços a apresentar um predomínio de blocos e matacões com dimensões métricas;
- b) Colúvios e solos residuais, formados em algumas porções a vertente da drenagem;
- c) Alúvios grosseiros que cobrem o leito da drenagem, produtos de retrabalhamento;
- d) Blocos métricos variando de 1 a 5 metros formando barramentos a partir do terço superior da encosta;

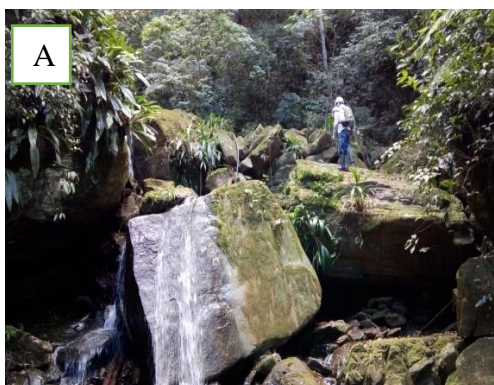
Abaixo, segue registro nas Figuras 15, 16 do material encontrado na drenagem principal da bacia hidrográfica da área de estudo:

Figura 15 - Material presente na drenagem principal (ponto 3). A) Terraços aluviais com material grosseiro variando de 1 a 2 metros, com predomínio de cascalhos e de material de matriz arenosa grossa. B) Alúvios grosseiros que recobrem a drenagem. C) Blocos métricos imbricados variando de 1 a 4 metros.



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 16 - Material presente na drenagem. A) Bloco métricos imbricados formando barramento total na linha de drenagem (ponto 7). B) Blocos métricos e material grosseiro composto por alúvios e colúvios residuais (ponto 15)

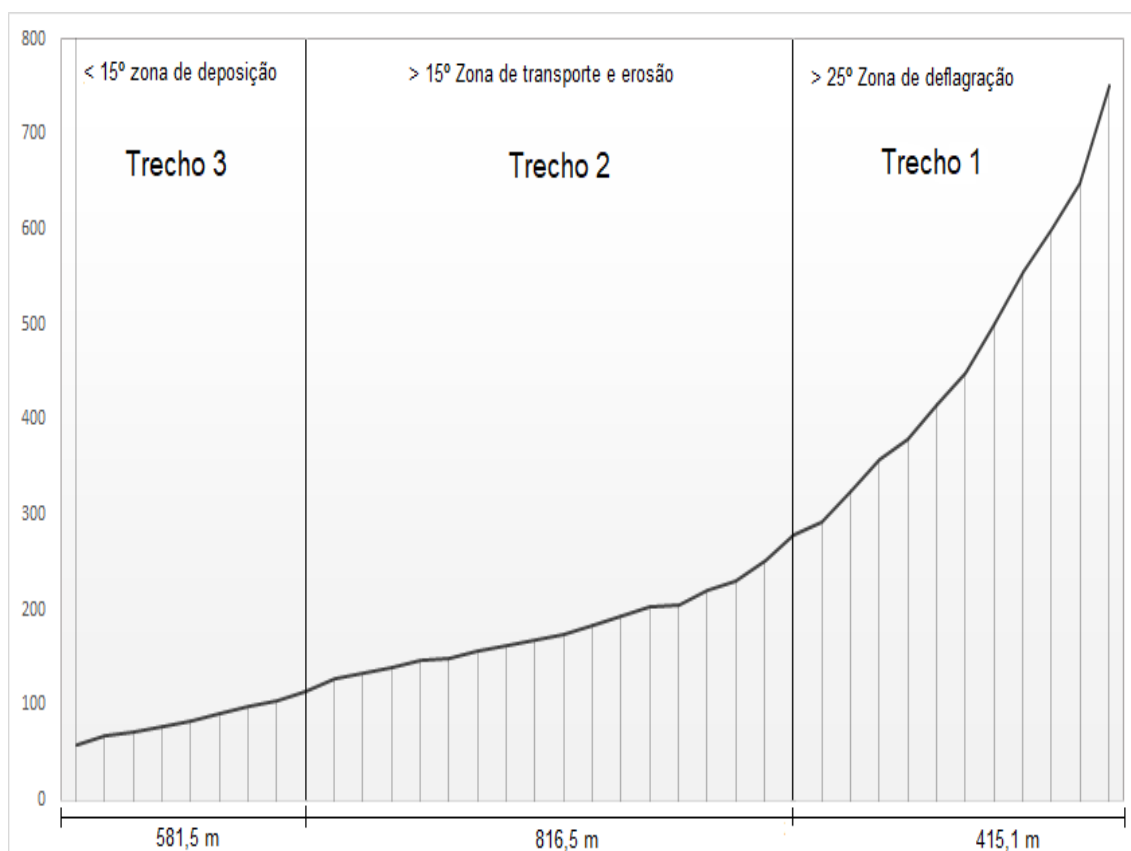


Fonte: elaborado pelo autor.

As coberturas superficiais mais suscetíveis a remobilização, formam fonte abundante de material ao longo da drenagem, principalmente nos trechos onde as declividades se acentuam e a drenagem apresenta entalhamento mais agudo.

O perfil da drenagem (Figura 17) principal foi aferido em campo por meio das medidas de altitude com o GPS, e representado com suas zonas de movimentação, e tem como base a área de deposição a partir da Rodovia Anchieta (SP – 050), e vai até o limite altimétrico da Escarpa da Serra do Mar.

Figura 17 - Perfil de declividade da drenagem principal da bacia



Fonte: elaborado pelo autor

As declividades na região da cabeceira apresentam valores próximos a 70°, com reduções para valores de 30° até o limite da zona de deflagração, totalizando 415 metros. No trecho de média encosta os valores estão entre 25 e 15° com registro de alguns patamares abruptos. Por fim, no trecho a jusante a partir da cota altimétrica de 100 metros a declividade sofre suavização ficando com os valores abaixo de 15°, evidenciando o trecho final de deposição.

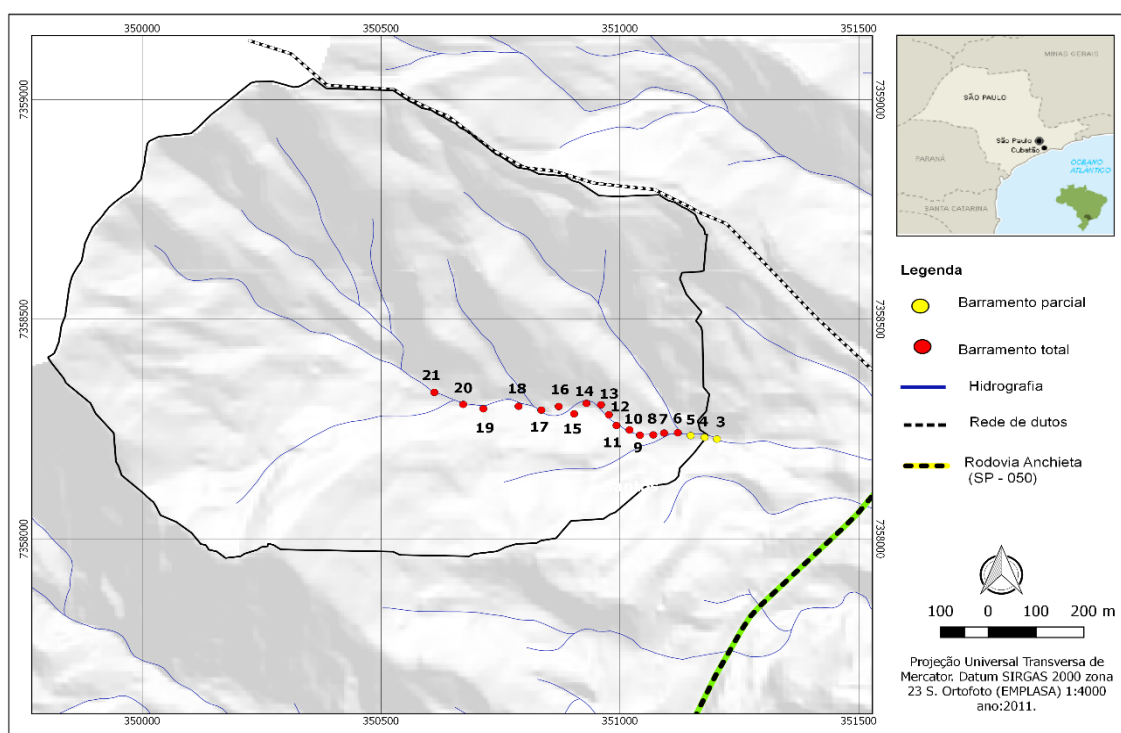
5.2.2.1 Barramentos

Os barramentos consistem em um elemento agravante no que diz respeito a deflagração das corridas de detrito, sua origem é condicionada ao entulhamento de troncos e blocos rochosos, responsáveis por bloquear total, ou parcialmente a drenagem.

Tanto nas drenagens principais quanto nas secundárias, esses barramentos se comportam de maneira a reter o fluxo parcialmente, dando origem a uma espécie de reservatório.

Com o incremento de água no sistema e aumento drástico da vazão, a energia potencial acumulada faz com que ocorra o rompimento desse dique, liberando todo o fluxo denso de detrito contido, resultando em inúmeros pulsos de detritos. Na área de estudo, dos 17 pontos que foram possíveis mapear na drenagem principal, 3 correspondem a barramentos parciais, e 14 são barramentos totais, ou seja, bloqueando toda a drenagem principal, com estrangulamentos e alto grau de entalhamento, fazendo com que em diversos casos ocorra uma readaptação da drenagem, abrindo novos caminhos paralelamente aos trechos barrados. (Figura 18)

Figura 18 - Localização dos barramentos mapeados na drenagem principal

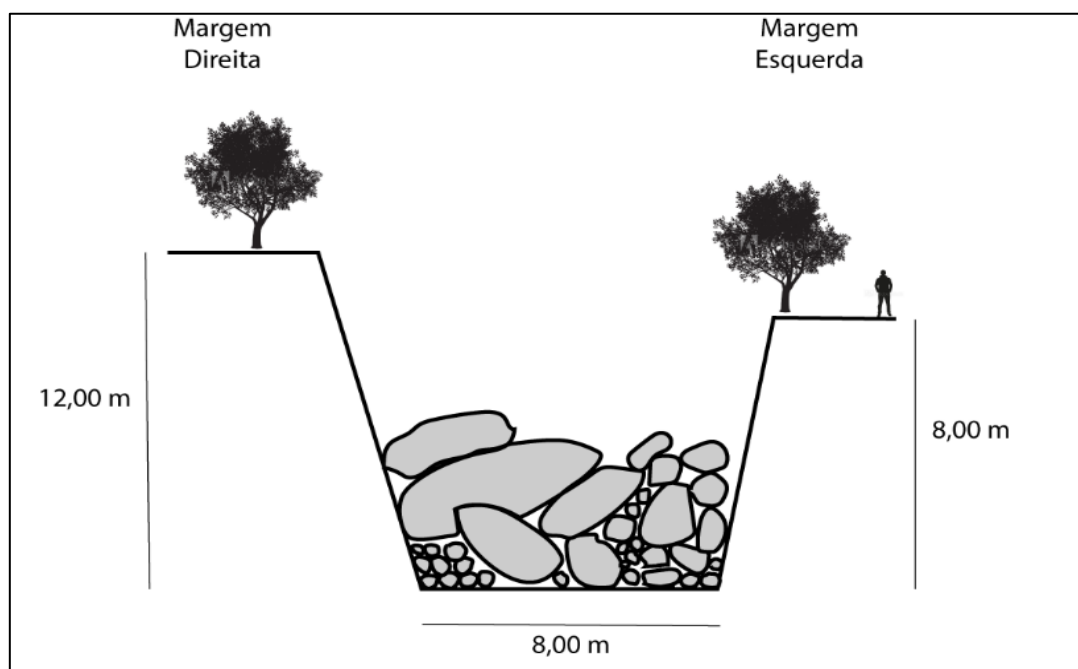
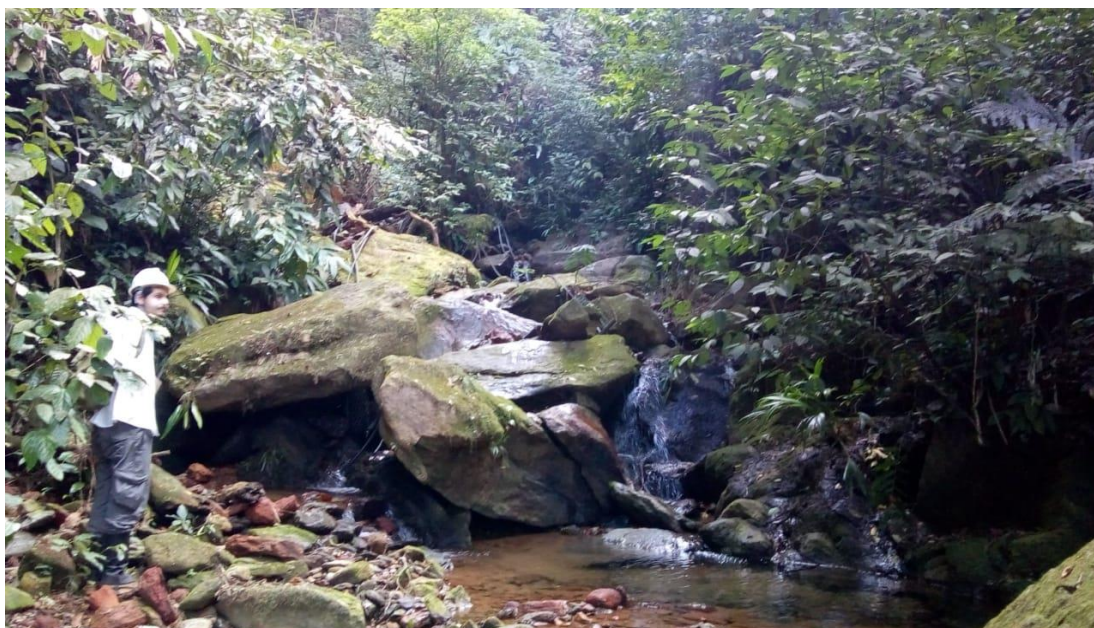


Fonte: elaborado pelo autor

Essa grande quantidade de barramentos é uma grande evidência que esta bacia hidrográfica apresenta condições favoráveis para desenvolvimentos de um fenômeno de corridas de detrito, mediante cenário de chuva específico.

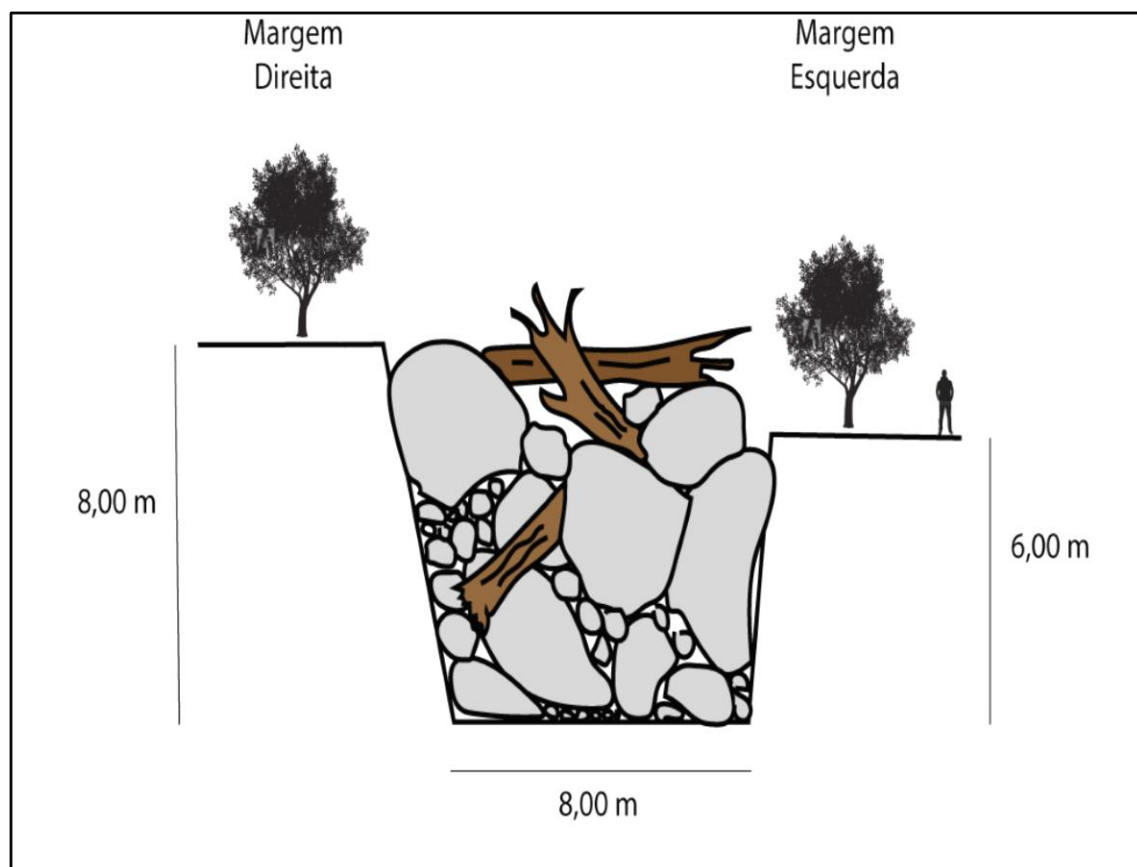
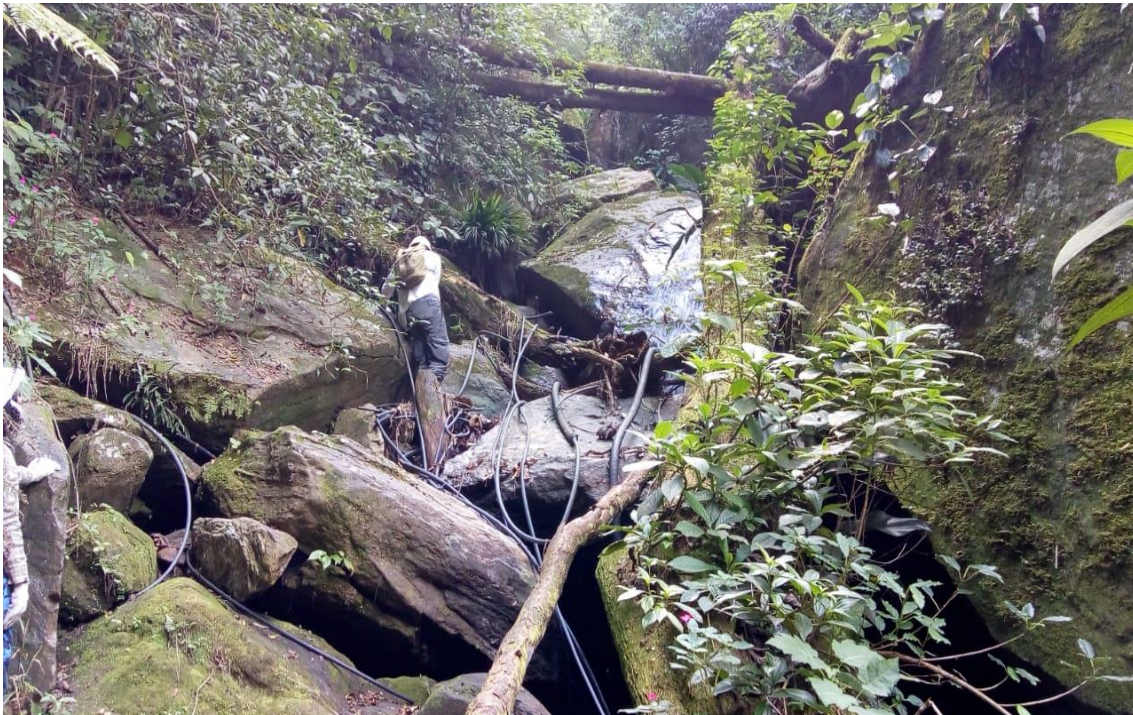
A seguir nas Figuras 19, 20 e 22 são destacados casos de alguns barramentos significativos, acompanhados de um esquema demonstrativo dessas seções.

Figura 17 - Vista frontal do barramento total e seção na drenagem principal com perfil esquemático (ponto 19)



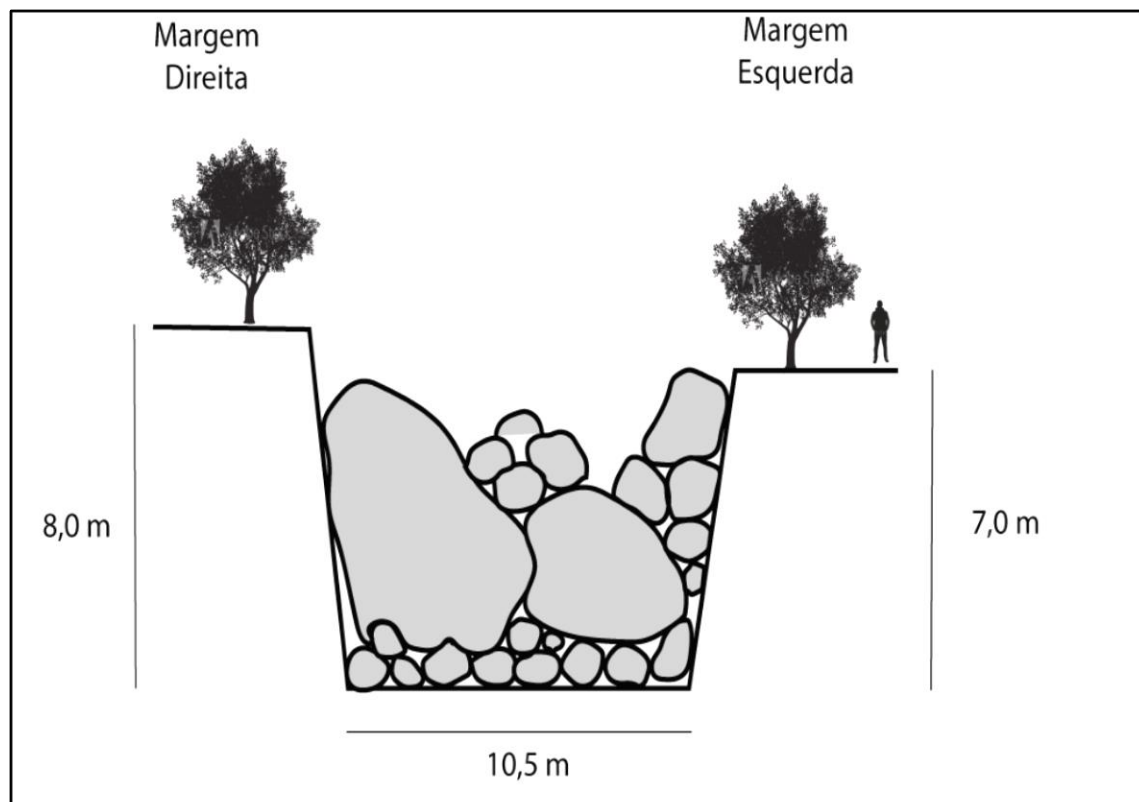
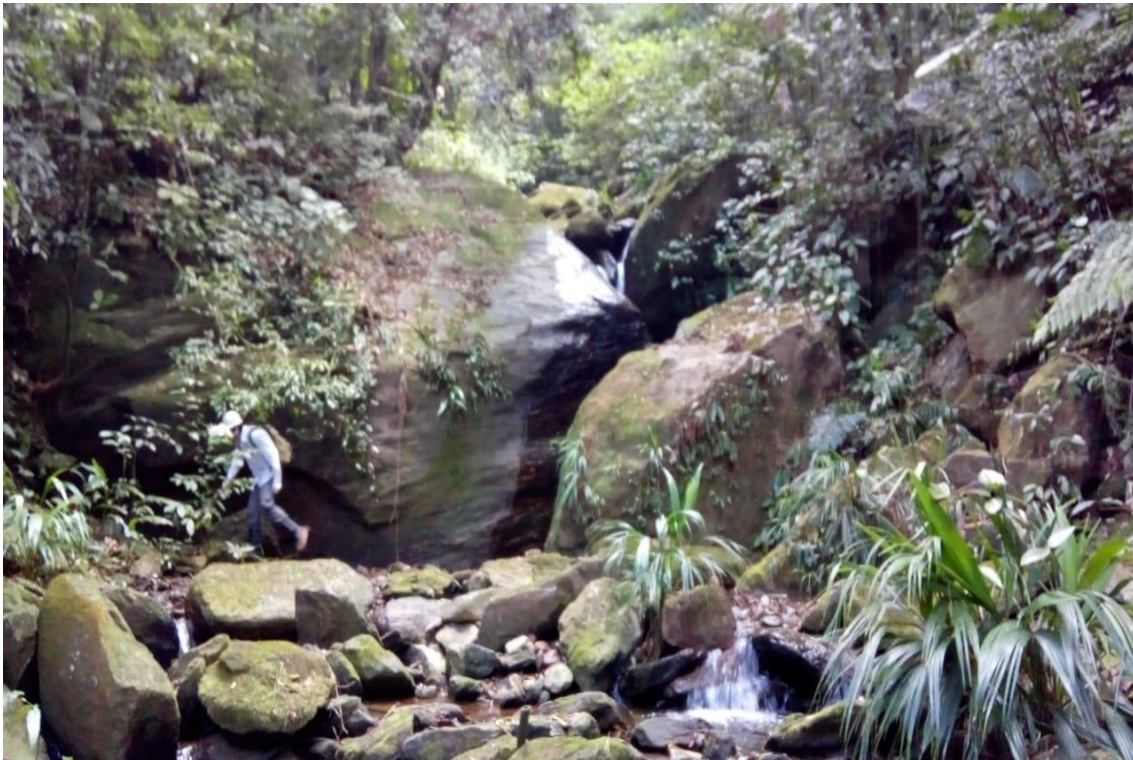
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 18 - Vista frontal de barramento total e seção na drenagem principal com perfil esquemático (ponto 20)



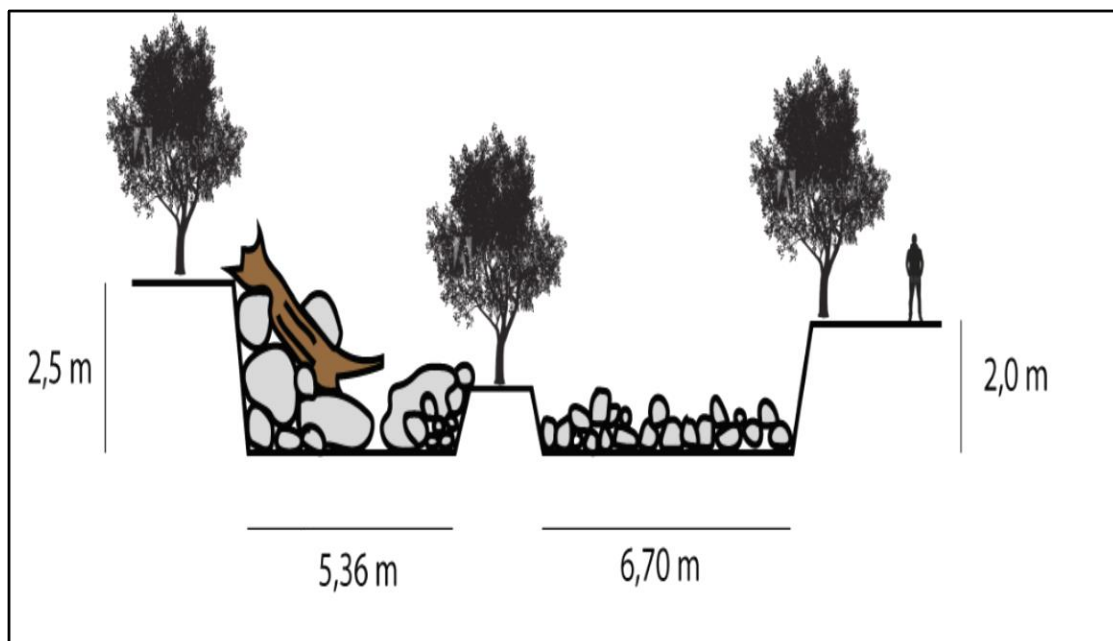
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 19 - Vista frontal de barramento total e seção na drenagem principal com perfil esquemático (ponto 16)



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 20 - Vista frontal de barramento total e seção na drenagem principal com perfil esquemático (ponto 7)



Fonte: elaborado pelo autor

5.3 CENÁRIOS DE RISCO

A elaboração do cenário de risco teve como objetivo identificar os principais processos de instabilização com foco na formação de corridas de detrito, propensos a deflagração, juntamente com seus condicionantes, e dimensiona-los de maneira a estimar seu impacto e alcance. Para que esse objetivo fosse alcançado, foi fundamental definir e mapear o objeto sob risco, sejam moradias ou infraestruturas presentes na área, assim essa etapa foi desenvolvida em três fases:

- a) Definição dos cenários de precipitação crítica para dimensionamento dos eventos, com base nos eventos pretéritos;
- b) Identificação e mapeamento das principais corridas de detrito já ocorridas na área de estudo e seus valores e parâmetros físicos;
- c) Mapeamento das formas de ocupação no raio de atingimento.

Assim, a definição dos cenários de risco e precipitação crítica, conjuntamente com o mapeamento das feições de instabilidade geológica-geotécnica subsidiou a confecção de modelos baseados nos limiares críticos parte fundamental de um plano preventivo.

Dessa forma, a seguir são apresentados os resultados referentes a classificação e definição dos cenários de risco para a bacia hidrográfica do Rio Cachoeira.

5.3.1 Casos de eventos com corridas de detrito em Cubatão (SP)

Primeiramente foram compilados os eventos relacionados a corridas de detrito, com ocorrência na área de estudo, com base em Gramani (2001) e Massad (2002), na Tabela 11 a seguir.

Este registro é fundamental para compreender quais foram as principais causas da deflagração destes eventos, do ponto de vista dos condicionantes geológicos-geotécnicos, geomorfológicos e de precipitação.

Utilizando também a razão das áreas de bacia hidrográfica, componente de variação altimétrica, ocorrência de chuvas (mm/h) velocidade dos fluxos e o seu volume.

Tabela 11 - Casos de eventos extremos com ocorrência de corridas de detrito em Cubatão

| | CASOS | Data | H/L | ÁREA BACIA (km ²) | CHUVA | VELOCIDADE (m/s) | VOLUME (m ³) |
|----|-----------------------------|------|-------|-------------------------------|------------------------|------------------|--------------------------|
| 1 | GROTA FUNDA, SP | 1975 | ~0,15 | 10,4 | >140 mm/24h | 8,4 | >10x10 ⁶ |
| 2 | RIO CACHOEIRA, CUBATÃO, SP | 1976 | N/D | 4 | 40 mm/1h - 276mm / 24h | N/D | 1x10 ⁵ |
| 3 | CÓRREGO DAS PEDRAS, SP | 1985 | N/D | 2,64 | 84 mm/h - 265 mm/24h | N/D | N/D |
| 4 | RIO DAS PEDRAS, CUBATÃO, SP | 1988 | N/D | 3,4 | 25 mm/h - 135 mm/24h | N/D | N/D |
| 5 | RIO DAS PEDRAS, CUBATÃO, SP | 1994 | 0,27 | 2,64 | 60mm/1h - 214 mm/24 h | 10 | 3x10 ⁵ |
| 6 | RIO DAS PEDRAS, CUBATÃO, SP | 1996 | 0,27 | 2,64 | 18 mm/1h | 10 | 1,6X10 ⁴ |
| 7 | ESTRADA ANCHIETA, SP | 1999 | 0,18 | N/D | 128 mm/24h - 274mm/72h | N/D | 3x10 ⁵ |
| 8 | RIO PILÕES, SP | 2000 | N/D | 2,54 | 118/1h - 312mm/24 h | N/D | N/D |
| 9 | RIO MARCOLINO, SP | 2013 | N/D | 1,37 | 118/1h - 312mm/24 h | N/D | N/D |
| 10 | RIBEIRÃO CÁGADO, SP | 2013 | N/D | 0,55 | 118/1h - 312mm/24 h | N/D | N/D |

Fonte: adaptado de Gramani (2001) e Massad (2002)

Nela estão descritos os principais eventos, com danos significativos, contendo também os gradientes altimétricos das bacias, sua área em km², velocidades e volume estimado das corridas de detrito e principalmente as precipitações responsáveis pela deflagração.

Dessa forma, com base no tamanho médio das bacias hidrográficas e os índices de precipitação horária definiu-se três cenários de precipitação crítica horária, para serem utilizadas como *input* nas equações empíricas de volume e vazão com base em Kanji et al. (1997), e um valor de chuva acumulada para o cenário de chuva acumulada para 72 horas, com base nas envoltórias de Tatizana et al. (1987).

Tabela 12 - Cenários de precipitação crítica para ocorrência de corrida de detritos

| Cenários | Precipitação (mm/h) (Kanji et. al. 1997) | Precipitação (acumulado 72 horas) Tatizana et al. 1987 |
|-----------------|---|---|
| 1 | 40 | |
| 2 | 80 | 120 |
| 3 | 100 | |

Fonte: elaborado pelo autor

Já os eventos extremos registrados, dão conta de 10 corridas de detrito documentadas em um período de 38 anos, sendo que um ocorreu na bacia onde a pesquisa foi desenvolvida, com registros aproximados de precipitação horária na ordem de 40 mm em uma hora e 276 mm em 24 horas. Com volume estimado por Massad (2002), ultrapassando 1.000.000 m³. Resultando em uma morte, destruição de infraestrutura local e remoção de todo o conjunto habitacional de adensamento relevante, presente a jusante da drenagem principal.

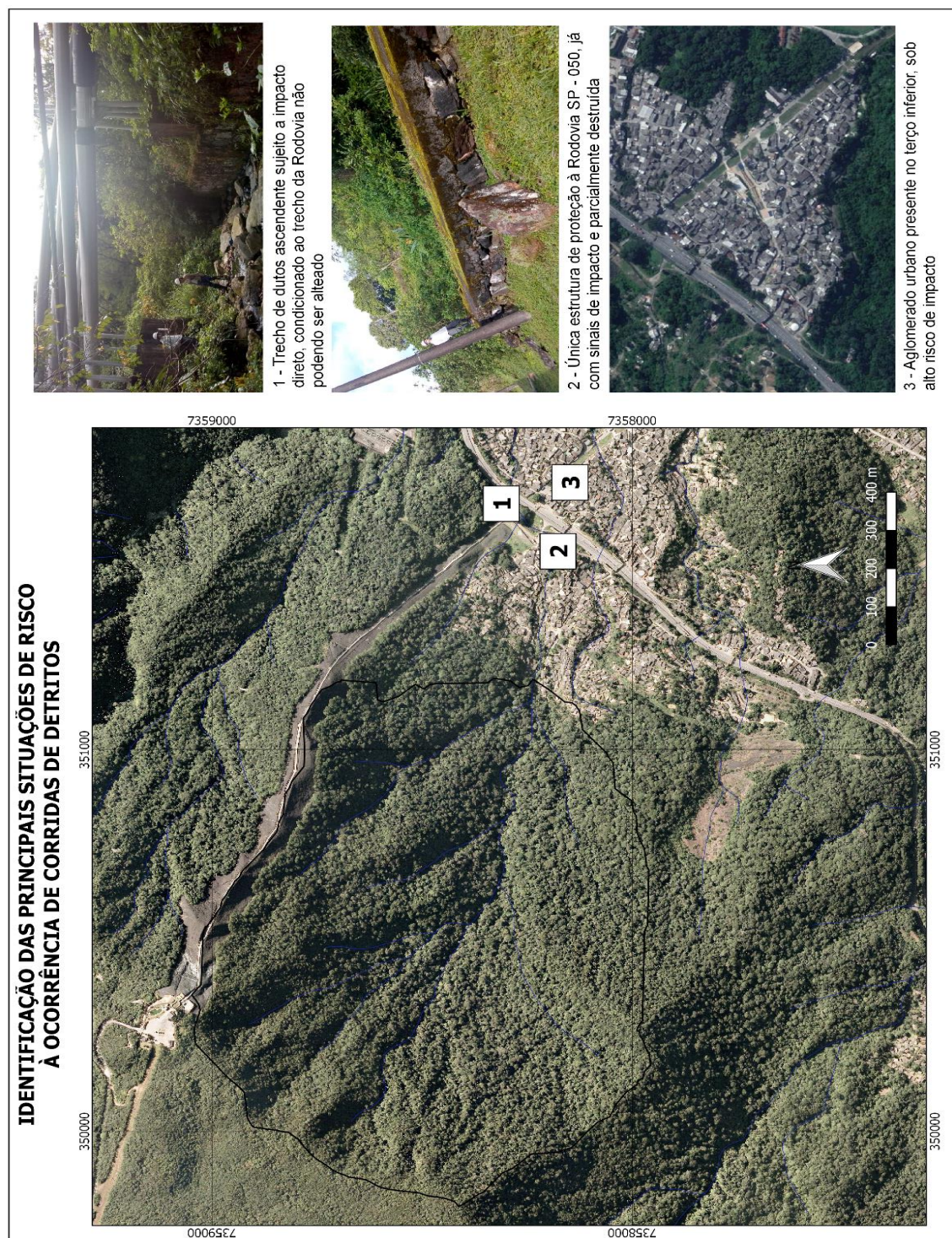
5.3.2 Diagnóstico das situações de risco

Como resultado do trabalho de campo, puderam ser identificadas diversas situações de risco, definidas pela possibilidade de impacto direto durante a ocorrência do processo de uma corrida de detritos.

Dessa forma, o risco está diretamente ligado ao porte do processo em questão e os padrões de ocupação apresentados na área de estudo.

O registro das situações de risco identificadas em campo é apresentado na figura 22.

Figura 21 - Localização das principais situações de risco na área de estudo



Fonte: elaborado pelo autor

Primeiramente, verificou-se no ponto 1, a existência da rede de dutos ascendente da Transpetro limitado a 4,12 metros de altura, passando por baixo de trecho da Rodovia Imigrantes (SP – 050), a determinação da altura máxima de um eventual pulso de detritos é fundamental para estimar o risco de atingimento destas estruturas.

No ponto 2, é o trecho onde a drenagem principal da bacia hidrográfica verte sentido a rodovia, sendo desviada por meio de uma retificação do canal, formando um desvio da ordem de 90°, onde a rodovia é protegida por um frágil muro de contenção já bastante impactado por eventos pretéritos.

E no ponto 3, foi mapeado o adensamento populacional a jusante da bacia hidrográfica, possuindo algumas dezenas de moradias, também em zona de atingimento com eventuais corridas de detrito.

5.4 GRAU DE SUSCETIBILIDADE

Após definição dos cenários de risco e análise da área de estudo, a metodologia de Gramani e Kanji (2001) foi aplicada para fins de validação e comparação, dessa forma os critérios foram mensurados através de trabalho de campo e análises morfométricas em modelo digital de elevação.

Os cenários escolhidos para precipitação foram respectivamente de 40, 80 e 100 mm/h, devido ao histórico desta bacia hidrográfica, abaixo na Tabela 13, 14 e 15, são apresentados os valores mensurados para cada critério da metodologia e seu grau de suscetibilidade.

A nível de comparação, Gramani (2001), aplicou esta metodologia afim de validação, na Bacia do Córrego das Pedras, trecho próximo a área de estudo com características geológicas, geomorfológicas e geotécnicas semelhantes às da área de estudo, nela os valores considerados foram: R2 - 60mm/h; S2 – 35°; D2 – 15°; A1 – 1,39 km²; H2 – 650m; V4 – 30%, G = G1, com nota final de 71,2, tendo esta bacia uma vulnerabilidade alta.

Em um segundo caso, em uma Bacia próxima ao Córrego das Pedras, com condições geológicas e geomorfológicas desfavoráveis a deflagração de corridas de detrito os valores obtidos foram: R3 – 40mm/h; S3 – 30°; D2 – 15°; A1 – 1km²; H3 – 500 m; V4 - <30%; G – G2, obtendo nota final 44,65, com vulnerabilidade baixa.

A seguir são apresentados, os valores obtidos para os três cenários na área de estudo:

Tabela 13 - Fatores e pesos utilizados para definição da suscetibilidade na Bacia do Rio Cachoeira, Cubatão – SP (Cenário 1 – 40mm/h)

| Fatores | Parâmetros | Classe | Nota Final | Grau de suscetibilidade |
|-----------------------|----------------------|--------|------------|-------------------------|
| Chuva | 40 mm/h | R3 | 57,9 | MÉDIO |
| Inclinação da encosta | 30 - 45° | S2 | | |
| Declividade do canal | 15° | D2 | | |
| Área da bacia | 1,39 km ² | A2 | | |
| Altura da encosta | 676 m | H2 | | |
| Uso e Ocupação | <30% | V4 | | |
| Aspectos geológicos | G1 | G1 | | |

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 14 - Fatores e pesos utilizados para definição da suscetibilidade na Bacia do Rio Cachoeira, Cubatão – SP (Cenário 2 – 80mm/h)

| Fatores | Parâmetros | Classe | Nota Final | Grau de suscetibilidade |
|-----------------------|----------------------|--------|------------|-------------------------|
| Chuva | 80 mm/h | R2 | 67,8 | ALTA |
| Inclinação da encosta | 30 - 45° | S2 | | |
| Declividade do canal | 15° | D2 | | |
| Área da bacia | 1,39 km ² | A2 | | |
| Altura da encosta | 676 m | H2 | | |
| Uso e Ocupação | <30% | V4 | | |
| Aspectos geológicos | G1 | G1 | | |

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 15 - Fatores e pesos utilizados para definição da suscetibilidade na Bacia do Rio Cachoeira, Cubatão – SP (Cenário 3 – 100mm/h)

| Fatores | Parâmetros | Classe | Nota Final | Grau de suscetibilidade |
|-----------------------|----------------------|--------|------------|-------------------------|
| Chuva | 100 mm/h | R1 | 78 | ALTA |
| Inclinação da encosta | 30 - 45° | S2 | | |
| Declividade do canal | 15° | D2 | | |
| Área da bacia | 1,39 km ² | A2 | | |
| Altura da encosta | 676 m | H2 | | |
| Uso e Ocupação | <30% | V4 | | |
| Aspectos geológicos | G1 | G1 | | |

Fonte: Elaborado pelo autor

Assim, fica evidente que a aplicação dos parâmetros morfométricos, geomorfológicos e geológicos tem influência direta na deflagração dos eventos e não devem ser menosprezados, mas o agente deflagrador de fenômenos desse porte são as chuvas excepcionais, especificamente aquelas com acumulados elevados e altos picos de intensidade.

De acordo com Kanji et al (2018), a aplicação desta metodologia a casos práticos de avaliação da suscetibilidade já indicou sua validade, onde em áreas com suscetibilidade alta, ou muito alta, já haviam apresentado eventos anteriores. Porém esta avaliação deve levar em consideração o tamanho das bacias hidrográficas a serem avaliadas, pois nas bacias hidrográficas de tamanho menor, o elemento Área da Bacia, pode superestimar a nota final suscetibilidade.

Mas é importante deixar claro que sua principal função é como mapeamento inicial, métodos de dimensionamento com equações empíricas como as de Massad (2002), adoção de correlações de chuva versus deflagração de corridas de detrito e modelagens em softwares específicos devem ser feitas com o intuito de quantificar volumes, trajetórias e objetos sob risco, para se reduzir ao máximo o impacto desses fenômenos de magnitude destrutiva, auxiliando em planos de contingência ou na implantação de obras de contenção.

5.5 DIMENSIONAMENTO DA CORRIDA DE DETRITOS

O dimensionamento e modelagem de eventos na bacia hidrográfica foi realizado por meio da utilização das equações selecionadas como descrito na metodologia, os parâmetros morfométricos e morfológicos foram definidos em campo para subsidiar os valores de entrada.

Os parâmetros selecionados para análise levaram em consideração a proposta de gestão à ocorrência de corridas de detrito na bacia hidrográfica e sua importância no auxílio de dimensionamento do fluxo, os parâmetros físicos estimados foram: volume de material mobilizado, vazão de pico, distância percorrida, velocidade, força de impacto e tamanho dos blocos transportados e altura da lâmina da corrida de detritos.

Dessa forma, abaixo estão descritos os resultados das modelagens, realizadas para os três cenários de precipitação distintos (40 mm/h, 80 mm/h e 100 mm/h), definidos com base na análise de eventos pretéritos no município de Cubatão/SP.

5.5.1 Volume de material mobilizado

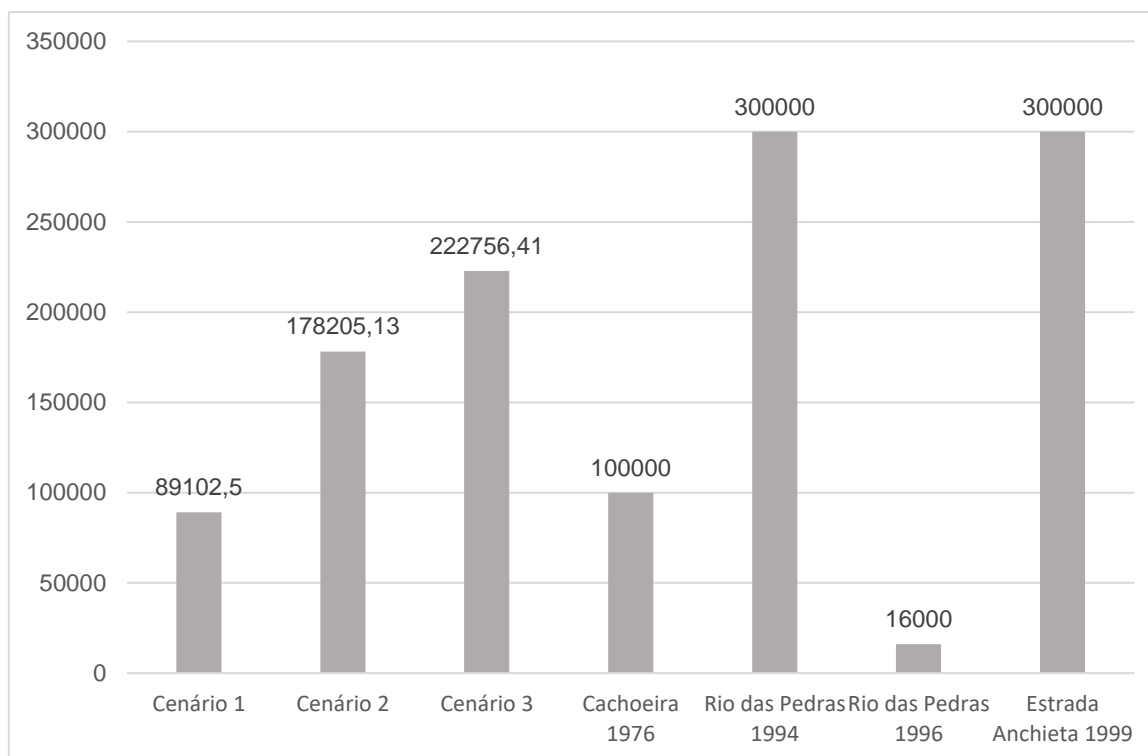
A estimativa dos valores de volume para os três cenários, diz respeito a quantidade de material que pode ser transportado pela corrida de detritos até a área de deposição, a origem do material transportado está associada aos solos de encosta passíveis de escorregamento, material presente na drenagem e das margens erodíveis. A Tabela 16 e o Gráfico 1, mostram os valores encontrados com a equação 4, para a área de estudo em comparação com os valores quantificados em eventos pretéritos.

Tabela 16 - Volume de material transportado para os cenários de 1, 2 e 3

| Eventos | Cenário 1 | Cenário 2 | Cenário 3 | Cachoeira 1976 | Rio das Pedras 1994 | Rio das Pedras 1996 | Estrada Anchieta 1999 |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|----------------|---------------------|---------------------|-----------------------|
| Volume (m ³) | 89102,5 | 178205,1 | 222756,4 | 100000 | 300000 | 16000 | 300000 |
| Área da bacia (km ²) | 1,39 | 1,39 | 1,39 | 4,5 | 3,4 | 3,4 | 0,18 |

Fonte: elaborado pelo autor

Gráfico 1 - Comparação de material transportado para o cenário 1, 2 e 3



Fonte: elaborado pelo autor

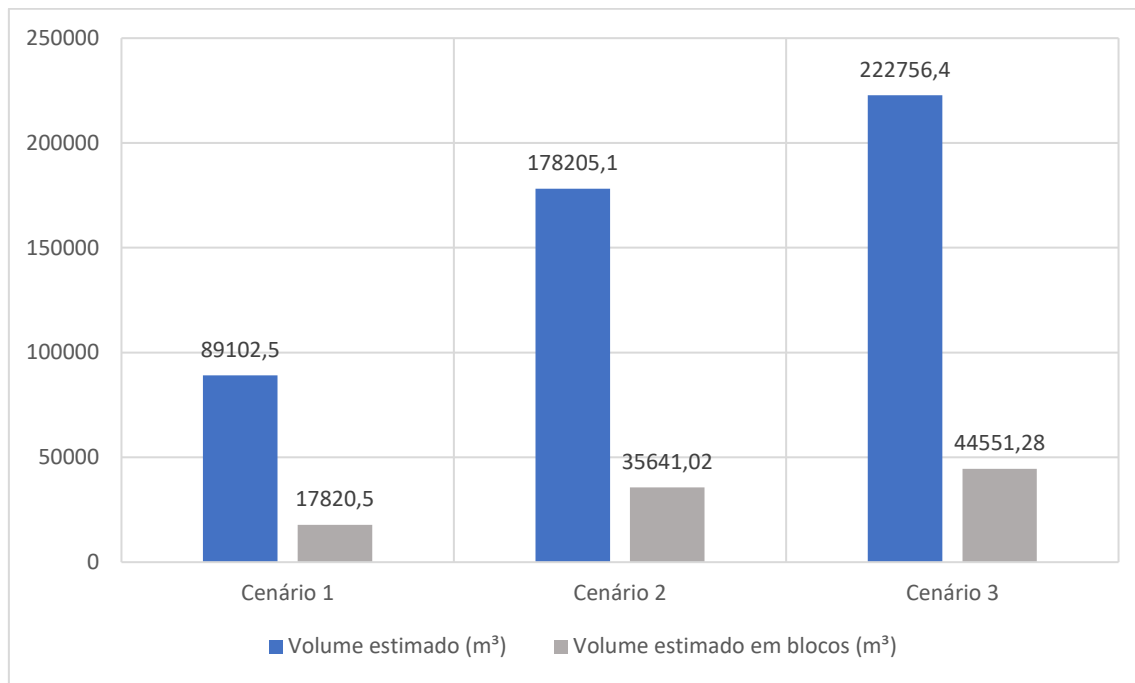
Pode-se avaliar que nos três cenários estimados o volume é crítico e em comparação com os eventos já deflagrados em Cubatão, como os eventos já ocorridos tem estimativa de 40 mm/h os valores são parecidos, com notável evolução nos cenários 2 e 3, lembrando que a área da bacia tem influência direta nesse valor.

Znamensky e Gramani (2000), após aprofundado estudo de correlação acerca da granulometria dos depósitos de diversas corridas de detrito ocorridas no Brasil chegaram a um valor aproximado de que apenas 20% do material decorrendo dos fluxos são de fração grosseira (> 500 mm). Em posse dessa correlação, os dados referentes ao volume estimado caem consideravelmente, sendo palpável e claro que a lama oriunda dos fluxos possui alta densidade e poder de impacto, mas a maior preocupação nesta pesquisa são os blocos métricos com potencial de carregamento e impacto no terço inferior da encosta.

No cenário 1, a quantidade de blocos em volume estimado fica na ordem de 17820,5 m³; no cenário 2 35641,02 m³ e no cenário 3, 44.551,28 m³, para

melhor visualização desse importante dado, segue a comparação no Gráfico 2, abaixo.

Gráfico 2 - Comparação dos valores de volume total estimado e volume de blocos de acordo com Znamensky e Gramani (2000)



Fonte: elaborado pelo autor

Estimada a grandeza dos valores dos três cenários, pode-se estabelecer uma relação de grandeza para esses volumes a fim de comparação, Jakob (2005) considera uma relação entre volume, vazão de pico e área total inundada para estabelecer a magnitude.

Dessa forma, de acordo com essa classificação os cenários de risco estimados de volume total para a bacia hidrográfica, se enquadram na categoria de destruição parcial de parte de uma cidade, entulhamento dos vales e formação de depósitos com mais de 10 km², formando grandes barramentos nas drenagens da região.

5.5.2 Vazão de pico

Os valores de vazão de pico encontrados para o cenário 1 foram obtidos de acordo com a equação 5, e estão representados na tabela 12, e foram

comparados aos valores de vazão encontrados por Cruz e Massad (1997) e Massad (1997) em Evento ocorrido em Cubatão que atingiu a Refinaria da Petrobras, para um cenário de precipitação com 60 mm/h.

Tabela 17- Valor de vazão de pico para os cenários 1, 2 e 3

| Evento | Vazão de Pico (m ³ /s) |
|-------------------------|-----------------------------------|
| Cenário 1 (40 mm/h) | 178,21 |
| Cenário 2 (80 mm/h) | 356,41 |
| Cenário 3 (100 mm/h) | 445,51 |
| Cubatão * | 630 |

- Valor de referência adotado para 60 mm/h em Cubatão

Fonte: Massad (2002)

É importante salientar que a equação utilizada de Massad et al (1997), foi concebida para eventos com um único pico de onda ou fluxo de corrida de detritos, sendo que este parâmetro necessita de estudo mais aprofundados, com instrumentação de campo para melhor correlação.

Porém, os valores obtidos nos três cenários estimados são coerentes com a literatura e autores como Cruz e Massad (1997), que afirmam que os valores de vazão de pico de uma corrida de detritos pode ser de 10 a 20 vezes maior que uma enchente normal e tempo de pico de 30 a 60 vezes menor no tempo de pico. Isso se deve ao aumento do volume do material mobilizado oriundo dos escorregamentos nas encostas e material na drenagem e aumento da velocidade do fluxo.

5.5.3 Distância percorrida

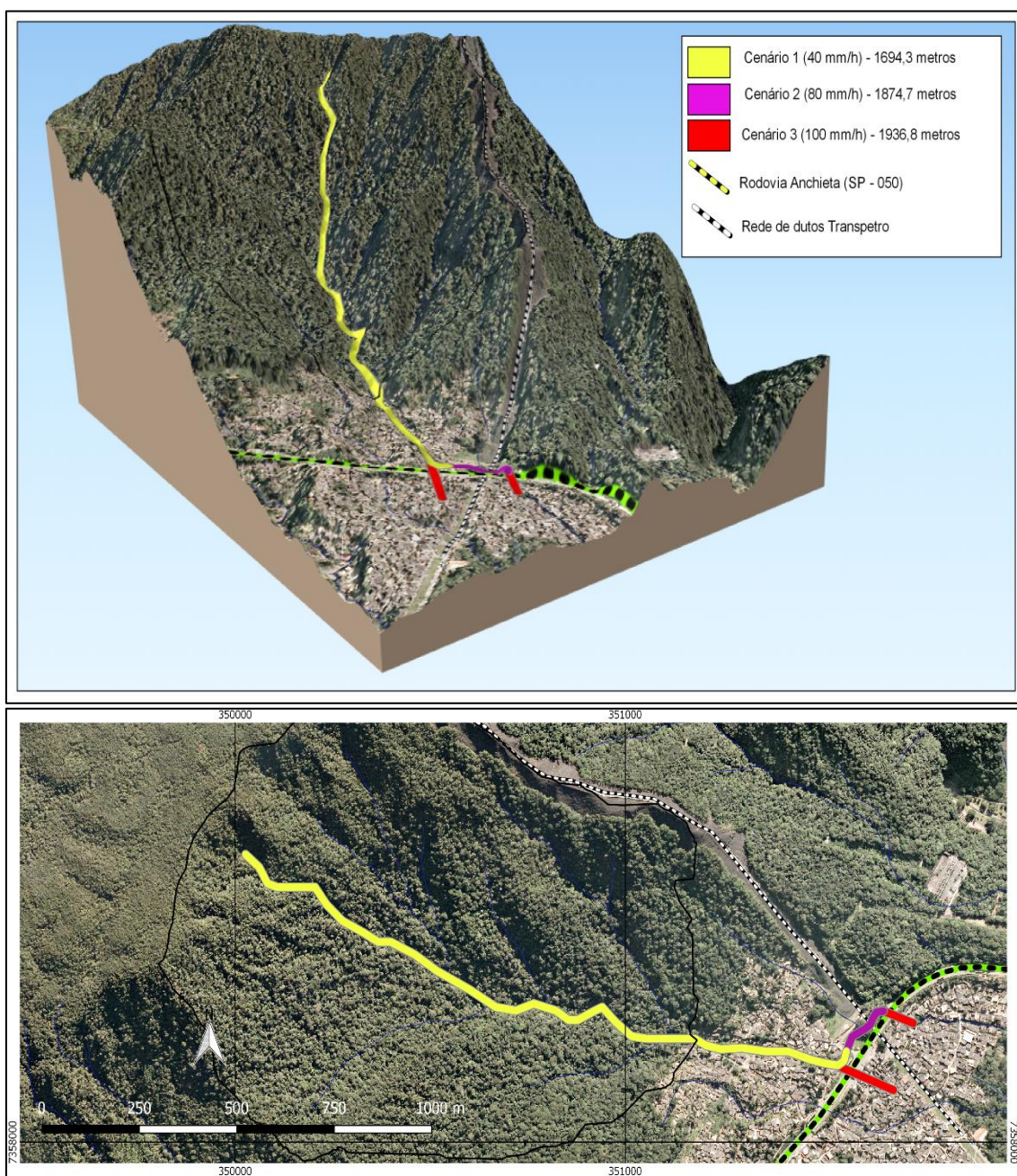
A quantificação da distância percorrida pela corrida de detritos é fundamental para poder estimar o raio de alcance e quais aparelhos de infraestrutura, bem como moradias poderão ser impactados.

Dessa forma, a distância percorrida pela corrida de detritos estimada no cenário 1 (40 mm/h), obtida por meio da equação 7, foi de 1694 metros tendo

como ponto de partida o terço superior da drenagem principal, onde está a principal zona de deflagração, já no cenário 2 (80 mm/h) o fluxo atinge 1874 metros e no cenário 3 (100 mm/h), 1936 metros, ou seja, todos os cenários colidem pelo menos com as moradias e a rodovia.

Na figura 23, estão representados tridimensionalmente e em planta, os raios de alcance da simulação desses fluxos perante infraestrutura sob risco.

Figura 22 - Representação do raio de alcance do debris flow para o cenário 1, 2 e 3



Fonte: elaborado pelo autor

No tocante das velocidades obtidas, faz-se extremamente importante estimar o tempo de chegada para definição de planos de contingência destinados a preservar vidas e reduzir de maneira significativa os impactos do fluxo da corrida de detritos nos trechos de baixada, onde estão presentes os adensamentos populacionais e as infraestruturas.

Assim, para o cenário 1, uma deflagração no terço superior da encosta resultaria em um tempo de 4 minutos e 43 segundos para o fluxo percorrer os 1771 metros da drenagem principal e impactar o terço inferior da bacia hidrográfica; no cenário 2, 3 minutos e 8 segundos e no cenário 3, 2 minutos e 43 segundos. (Tabela 18).

Tabela 18 - Valores de velocidade e tempo de impacto do fluxo pós deflagração na bacia hidrográfica

| | Extensão drenagem principal (m) | Velocidade (m/s) | Tempo aproximado de impacto |
|-----------|---------------------------------|------------------|-----------------------------|
| Cenário 1 | 1771 | 6,25 | 4' 43" |
| Cenário 2 | 1771 | 9,47 | 3' 08" |
| Cenário 3 | 1771 | 10,83 | 2' 43" |

Fonte: elaborado pelo autor

5.5.4 Velocidade

Este parâmetro é de fundamental importância, pois seu valor tem relação direta com o poder de impacto, e no tempo necessário para se estimar um plano de contingência efetivo baseado em monitoramento e alerta. Massad (1997) e Gramani (2001), adotam valores para a região de Cubatão em torno de 10 m/s.

Para este trabalho optou-se para dimensionar de acordo com a equação 8, tendo abaixo na Tabela 13 e no Gráfico 2 a comparação com outros casos ocorridos em Cubatão, relacionando a velocidade e o gradiente altimétrico da drenagem principal (H/L).

Tabela 19 - Valores de velocidade da corrida de detritos para os cenários 1, 2 e 3

| Evento | Velocidade (m/s) | Velocidade (km/h) | H/L |
|---------------------|------------------|-------------------|------|
| Cenário 1 | 6,25 | 22,5 | 0,3 |
| Cenário 2 | 9,47 | 34 | 0,3 |
| Cenário 3 | 10,8 | 39 | 0,3 |
| Grota Funda 1975 | 8,4 | 30,24 | 0,15 |
| Rio da Pedras 1994 | 10 | 36 | 0,27 |
| Rio das Pedras 1996 | 10 | 36 | 0,27 |

Fonte: elaborado pelo autor

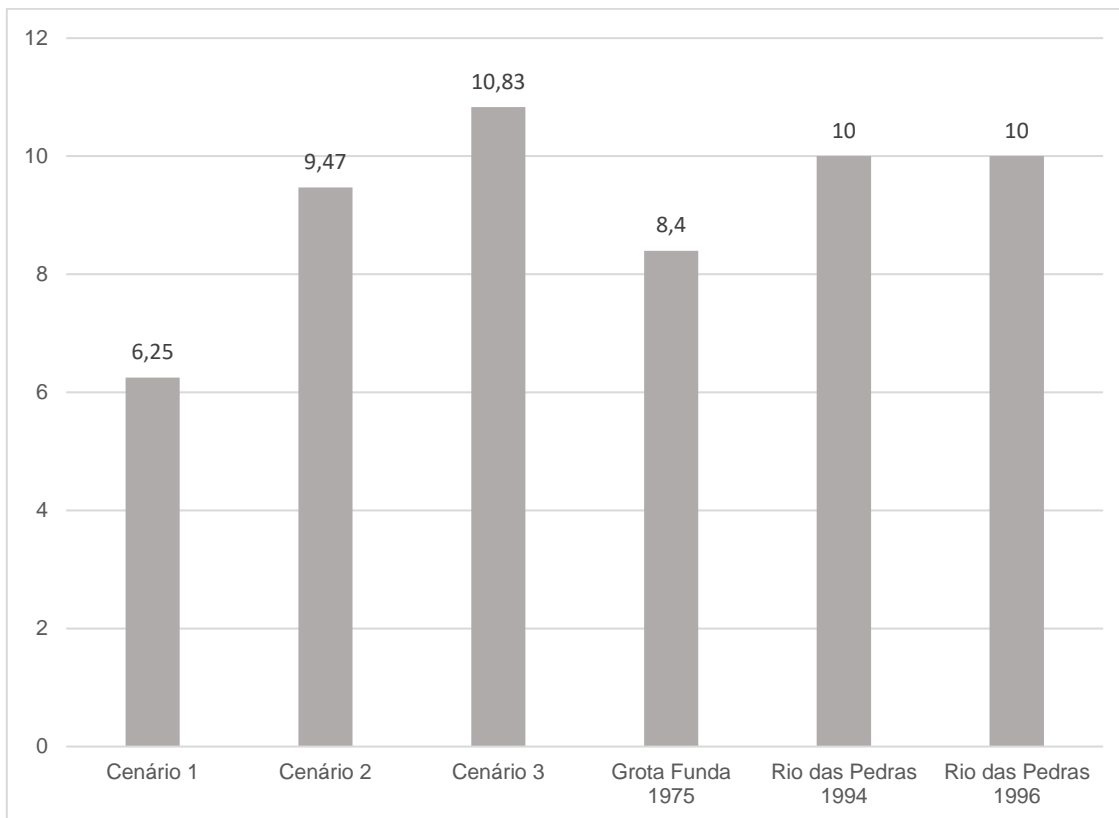
Znamensky (2001), ao estudar os principais parâmetros físicos das corridas de detrito estabelece correlações entre a velocidade dos fluxos, o tamanho dos blocos transportados e a declividade dos canais principais ou superfície de desenvolvimento e sua profundidade.

No caso específico das inclinações do canal, ao correlacionar diversos casos, o autor percebeu que a inclinação do canal só é determinante quando a altura do fluxo for maior que 2 metros, ou seja, se fluxos de espessura reduzida se desenvolverem a declividade do canal não será relevante.

Outro aspecto fundamental também, é a relação das velocidades médias e o tamanho dos blocos mobilizados em função da declividade do canal. Basicamente, quanto maior a velocidade dos fluxos, e maior a inclinação do canal, maior será a dimensão dos blocos transportados, dois elementos contidos

na drenagem da área de estudo, uma grande quantidade de blocos métricos e acentuada declividade.

Gráfico 3 - Comparação de valores de velocidade de debris flows para o cenário 1,2 e 3



Fonte: elaborado pelo autor

5.5.5 Força de impacto e tamanho de blocos transportados

O parâmetro de força de impacto foi calculado por meio da equação 10, sendo que este deve ser considerado quando há infraestrutura no raio de atingimento do fluxo. O valor para o cenário 1, ficou em 438 kN/m², o cenário 2 com 574,47 kN/m² e o cenário 3 com 964 kN/m²,

Ainda em Cubatão, Cruz e Massad (1997), fazendo o uso das equações empíricas para estimativa de força de impacto e chegaram ao valor máximo de 306 kN/m² para velocidades de 10 m/s.

As corridas de detrito são fenômenos, que além de altamente destrutivos, são responsáveis pelo transporte de muito material sólido, incluindo blocos de dimensões métricas.

Takahashi (1991), relata um bloco transportado durante uma corrida de detritos no Japão pesando cerca de 3 mil toneladas, por vários quilômetros. Já Costa (1984), registrou um bloco de aproximadamente 37 toneladas transportado por 57 quilômetros na Nova Zelândia.

Ainda Takahashi (1981), descreve um fenômeno de corrida de detritos com um impacto produzido na casa dos 4000 kN/m².

Dessa forma, por meio de aplicação da equação 9, chegou-se ao diâmetro máximo de blocos transportados, com 1,56 metros para o cenário 1, 3,59 metros para o cenário 2 e 4,69 metros no cenário 3.

Assim na Tabela 20, a seguir estão representados os valores das forças de impacto e tamanho máximo de blocos transportáveis.

Tabela 20 - Forças de impacto do debris flow para os cenários 1, 2 e 3

| Cenário | Força de impacto (kN/m ²) | Tamanho de Blocos (diâmetro/metros) |
|---------|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 438 | 1,56 |
| 2 | 574 | 3,59 |
| 3 | 964 | 4,69 |

Fonte: Elaborado pelo autor

Wu et al (1993), baseado em episódios de corridas de detrito ocorridos na Rússia, estabelece uma correlação entre a profundidade máxima do fluxo, diâmetro dos blocos e a força de impacto para atribuir a magnitude do fenômeno,

Como resultado o autor propõe uma classificação de magnitude dos fenômenos de corrida de detrito como pode ser visualizado na (Tabela 21) a seguir.

Tabela 21 - Classificação de magnitude da corrida de detritos de acordo com, profundidade, força de impacto e tamanho de blocos

| Magnitude do fluxo de detritos | Máxima Profundidade do Fluxo (m) | Diâmetro do Bloco Maior (m) | Força de Impacto (kPa) |
|--------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| Pequeno | < 2 | < 0,5 | 50 a 60 |
| Meio | 2 a 3 | < 0,7 | 70 a 80 |
| Meio - Grande | 3 a 5 | < 1,5 | 90 a 100 |
| Grande | 5 a 10 | 2,5 a 3 | 110 a 150 |
| Gigante | > 10 | < 3 | 150 a 300 |

Fonte: Wu et al (1993)

Esta correlação claramente não se enquadra nos parâmetros estudados e inferidos na Serra do Mar no Estado de São Paulo, inclusive no que diz respeito às grandezas quantificadas e diâmetros de bloco, visto que o contexto geológico brasileiro é muito distinto.

Polanco (2010), destaca com relação aos parâmetros de estimativa de poder de impacto que os fluxos de detrito não necessariamente se chocam com estruturas ou barreiras de forma reta, mas sim muitas vezes em um ângulo diferente daquele demonstrado durante sua trajetória, sendo fundamental levar em consideração as formas de impacto laterais.

A autora ainda destaca a escassez de estudos, ou medições de campo disponíveis acerca das forças de impacto das corridas de detrito, recomendando a utilização da proposta de HÜBL et al (2009), onde é sugerido o emprego de 1/5 até 1/3 da força de impacto frontal para o dimensionamento de estruturas de proteção.

5.5.6 Altura da lâmina

Por fim, verificou-se um elemento de risco determinante para definição da área de estudo, uma rede de dutos pertencendo a Transpetro passando abaixo da rodovia Anchieta, não podendo ser alteada, podendo estar sob risco de atingimento de eventual ocorrência de uma corrida de detritos ou uma enchente suja.

É notório o risco que essas estruturas apresentam e estão sujeitas, principalmente se atingidas e vazamentos ocorrerem, os passivos ambientais e sociais seriam incalculáveis, como o ocorrido em fevereiro de 1984, no km 58, Vila Socó, onde, de acordo com a Folha de São Paulo, um vazamento de 700 mil litros de gasolina de um duto, resultou em um incêndio de proporções trágicas vitimando 508 pessoas dos quais 300 crianças.

Dessa forma, a fim de conhecer a vulnerabilidade dessas estruturas, estimou-se a altura do fluxo por meio da equação 11. (Tabela 22).

Tabela 22 - Valores estimados de altura do fluxo para os três cenários distintos

| Cenário | Altura do fluxo (m) |
|---------|---------------------|
| 1 | 1,14 |
| 2 | 1,51 |
| 3 | 1,65 |

Fonte: elaborado pelo autor

A seguir, na Figura 28, é representada a altura do fluxo, no trecho dos dutos para os três cenários.

Figura 23 - Representação da altura do debris flow para os cenários 1, 2 e 3



Fonte: elaborado pelo autor

5.6 CORRELAÇÃO CHUVA x MOVIMENTAÇÃO DE MASSA

A definição da melhor forma de monitorar as chuvas causadoras de eventos extremos, passa pelo uso de correlações empíricas, baseadas em séries históricas de eventos pretéritos. Assim, para os valores de chuva acumulada em 72 horas, foi aplicada a correlação de Tatizana et al. (1987), para estimar o padrão de escorregamentos que teriam maior possibilidade de ocorrência.

O serviço Geológico Americano (2005), também aponta que a definição de correlações e limiares de intensidade e duração combinados com previsões meteorológicas e medição de chuva em tempo real, são a base para sistemas operacionais de alerta a movimentos de massa.

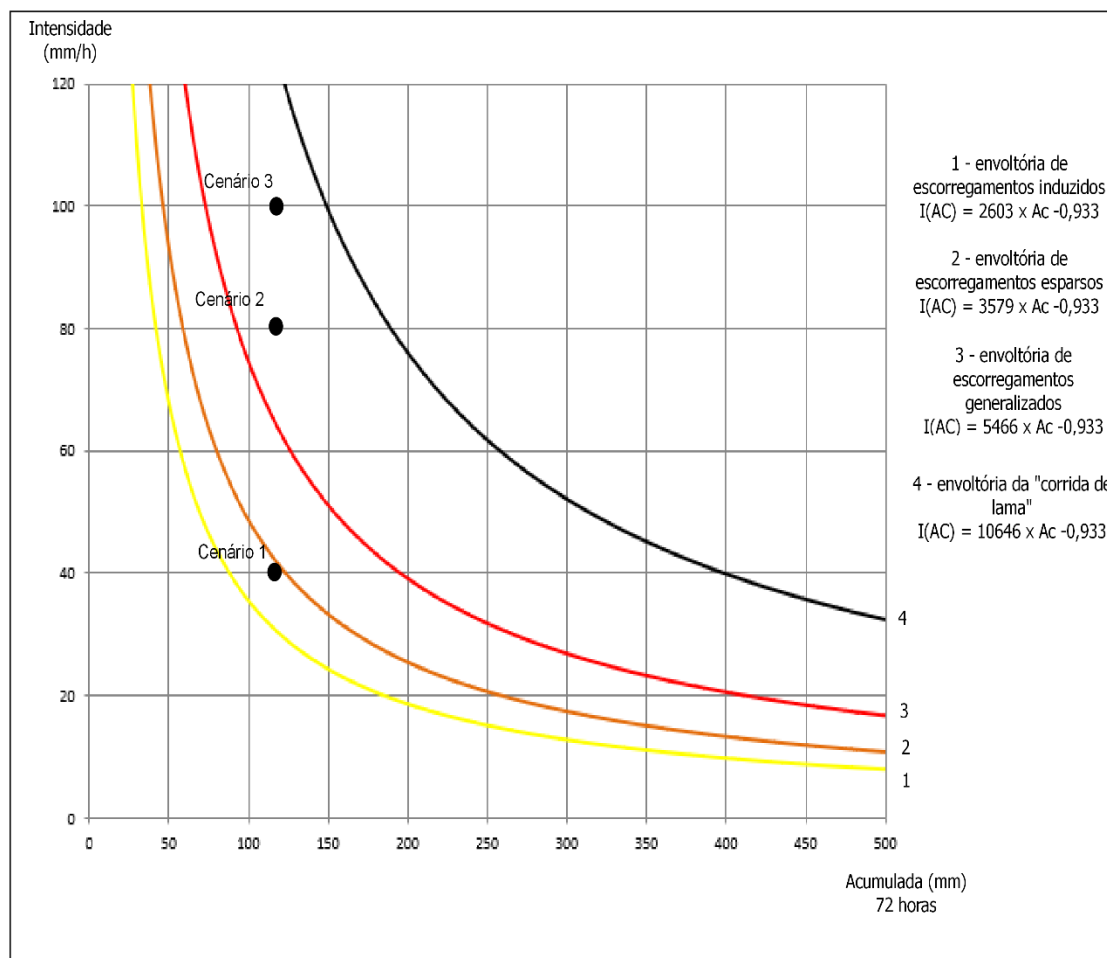
Para Tatizana et al (1987), as precipitações são fenômenos de instabilização de encostas que assumem papel de agente de ação progressiva e agente de ação instantânea. Como agente de ação progressiva, prepara o terreno através da alteração de parâmetros de substrato e do aumento de sollicitação externa, e evolui com o desenvolvimento da chuva. A água infiltrando no solo altera sua densidade, aumentando o peso diminuindo a coesão pela eliminação de capilaridade e dissolução dos cimentos do solo.

O aumento de peso ocasiona um aumento das forças atuantes e a diminuição da coesão, um decréscimo da resistência ao cisalhamento e compressão.

Dessa forma, em um cenário com 120 mm em 72 horas, com pico de intensidade máximo de 40 mm em uma hora, já se apresenta um cenário onde a instabilidade já é real, ultrapassando a envoltória dos escorregamentos induzidos e já no limiar dos escorregamentos esparsos.

Com variação na precipitação horária para 80 mm/h, e 120 mm/72h, já temos uma evolução para o cenário 2, com aumento da criticidade ultrapassando a envoltória dos escorregamentos generalizados. E por fim, na simulação do cenário 3, com 100 mm/h e 120 mm/72h tem-se uma piora do ponto de vista da instabilidade, onde provavelmente já haveria indícios de movimentação de massa evidente, com escorregamentos e possível ocorrência de corridas de detrito. (Figura 29)

Figura 24 - Correlação de chuva e escoamento para os cenários 1, 2 e 3



Fonte: Tatizana et al (1987)

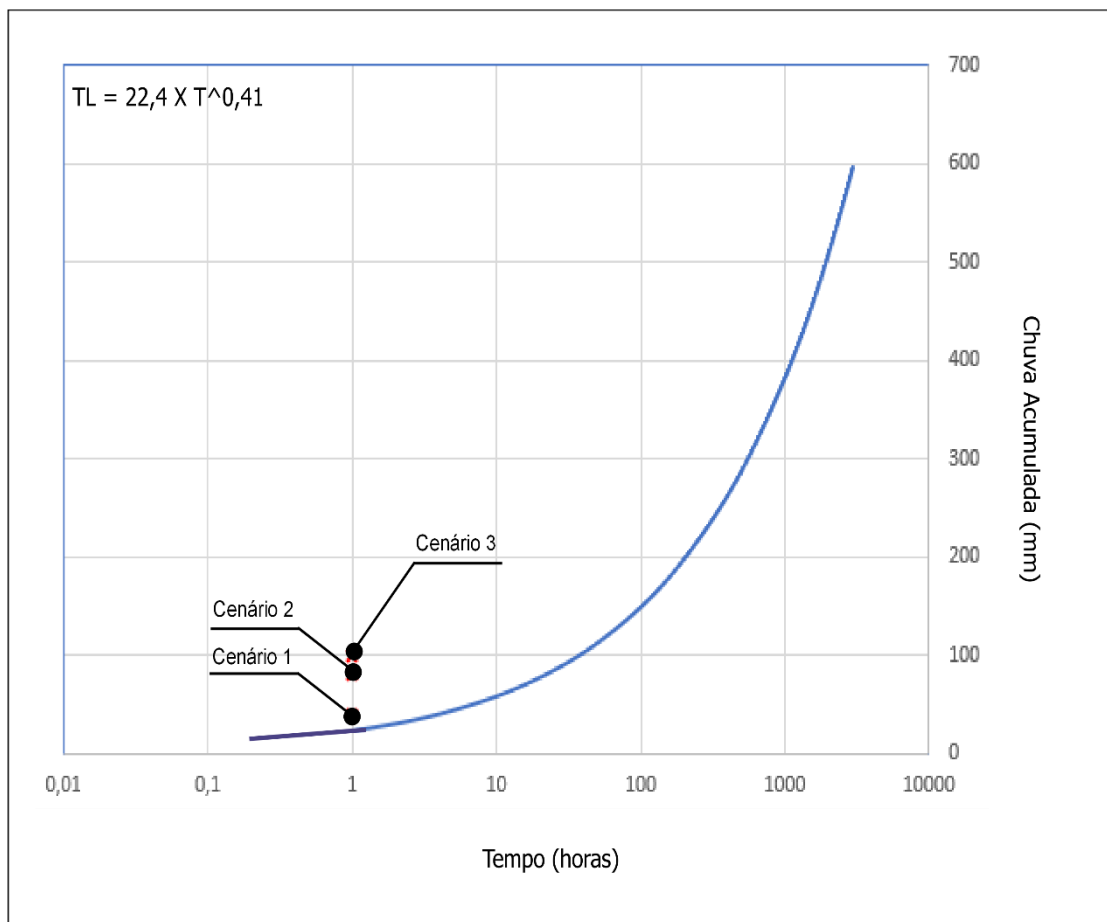
Assim, como supracitado, as corridas de detrito podem ter deflagração decorrente de chuvas com duração de minutos até horas, a correlação de chuva x escoamentos pode não ser eficiente a ponto de detectar uma chuva excepcional instantânea, pois quanto foi elaborada não havia registros suficientes para atestar sua eficiência, aplicando-se muito bem apenas à escoamentos, Tatizana et al (1987), deixou claro que a envoltória de corrida de detritos é a que apresenta maior limitação, uma vez que na sua elaboração não houve registros de corridas significativas como as ocorridas em Caraguatatuba (1967) e Serra das Araras (1967), como solução foi traçado um limiar mais distante da envoltória de escoamento induzidos, representando uma zona de comportamento desconhecido.

Por esse motivo optou-se por fazer um monitoramento específico das chuvas minuto a minuto, por meio da correlação de Kanji et. al. (2003) que foi

elaborada especificamente para corridas de detrito, tendo como base uma quantidade maior de eventos no monitoramento específico de corridas de detrito no município de Cubatão.

Nos três cenários escolhidos os valores de precipitação ultrapassaram a curva crítica de segurança à deflagração de corridas de detritos (Figura 21).

Figura 25 - Correlação de chuva e corridas de detrito para os cenários 1, 2 e 3



Fonte: Kanji et al (2003)

5.6.1 Proposta de plano de monitoramento a corridas de detrito

Baseado nas correlações utilizadas nesta pesquisa e nos mapeamentos realizados na bacia hidrográfica, apresenta-se como produto a proposta de adoção de alguns limiares de precipitação crítica, como forma de segurança.

Propõe-se quatro níveis de operação como mencionado na metodologia: OBSERVAÇÃO, ATENÇÃO, ALERTA e ALERTA MÁXIMO, para escorregamentos.

O nível de OBSERVAÇÃO, diz respeito ao monitoramento, e é caracterizado pelo estado e condição de normalidade, constituído pelo monitoramento de rotina dos parâmetros meteorológicos, pluviométricos e geotécnicos,

Já o nível de ATENÇÃO, é importante pois caracteriza momento chave onde ocorre a condição pluviométrica prévia com potencial de ocorrência de escorregamentos induzidos, tem como critério de entrada os acumulados superando ou se igualando a 120 mm em 72 horas e previsão meteorológica indicando continuidade de chuvas de intensidade forte a muito forte. Os critérios de saída são redução dos índices de precipitação e os totais acumulados reduzirem para 50 mm/72.

O nível de ALERTA tem como característica o estado e condição pluviométrico, geológico-geotécnico com potencial de escorregamentos pontuais ou localizados, com registros de ocorrências de feições de instabilidade nas encostas como escorregamentos, degraus de abatimento nos terrenos, escoamento de água concentrada no taludes, que indiquem mudanças na estabilidade das encostas e risco iminente de deslizamentos e previsão meteorológica de chuvas de intensidade forte a muito forte.

Os critérios de saída são, previsão meteorológica de não ocorrência de chuvas de intensidade forte ou muito forte.

E por fim, o nível de ALERTA MÁXIMO tem a característica a faixa preferencial de ocorrência de corridas de detrito, tem taxas pluviométricas extremas com acumulado de 150 mm em 72 horas, acompanhadas de grande instabilidade nas encostas, com possibilidade de escorregamentos esparsos ou generalizados, e nos piores casos a deflagração de corridas. Como critério de saída, adota-se também, a previsão meteorológica de não ocorrência de chuvas com intensidade forte a muito forte.

De acordo com Cerri (1993), a observância destes parâmetros é fundamental para o avanço do nível de operação durante um evento extremo melhorando o tempo de resposta na previsão, emitindo os alertas com tempo hábil para remover as pessoas das áreas de risco e se preparar para os impactos nas infraestruturas, minimizando os impactos.

Nessa lógica do Plano Preventivo já consolidado, buscou-se inserir um mecanismo de plano anexo para corridas de detrito e enchente suja, sendo que

esses fenômenos possuem característica de deflagração e desenvolvimento diferentes dos escorregamentos translacionais típicos, necessitando de uma sensibilidade e monitoramento específicos desde a previsão meteorológica, início do monitoramento e emissão de eventuais alertas.

Como pode ser visualizado na Figura 31, quando o monitoramento à escorregamentos que trabalha com acumulados de 72 horas avançar para o nível de ATENÇÃO, o monitoramento específico a corridas de detrito se inicia.

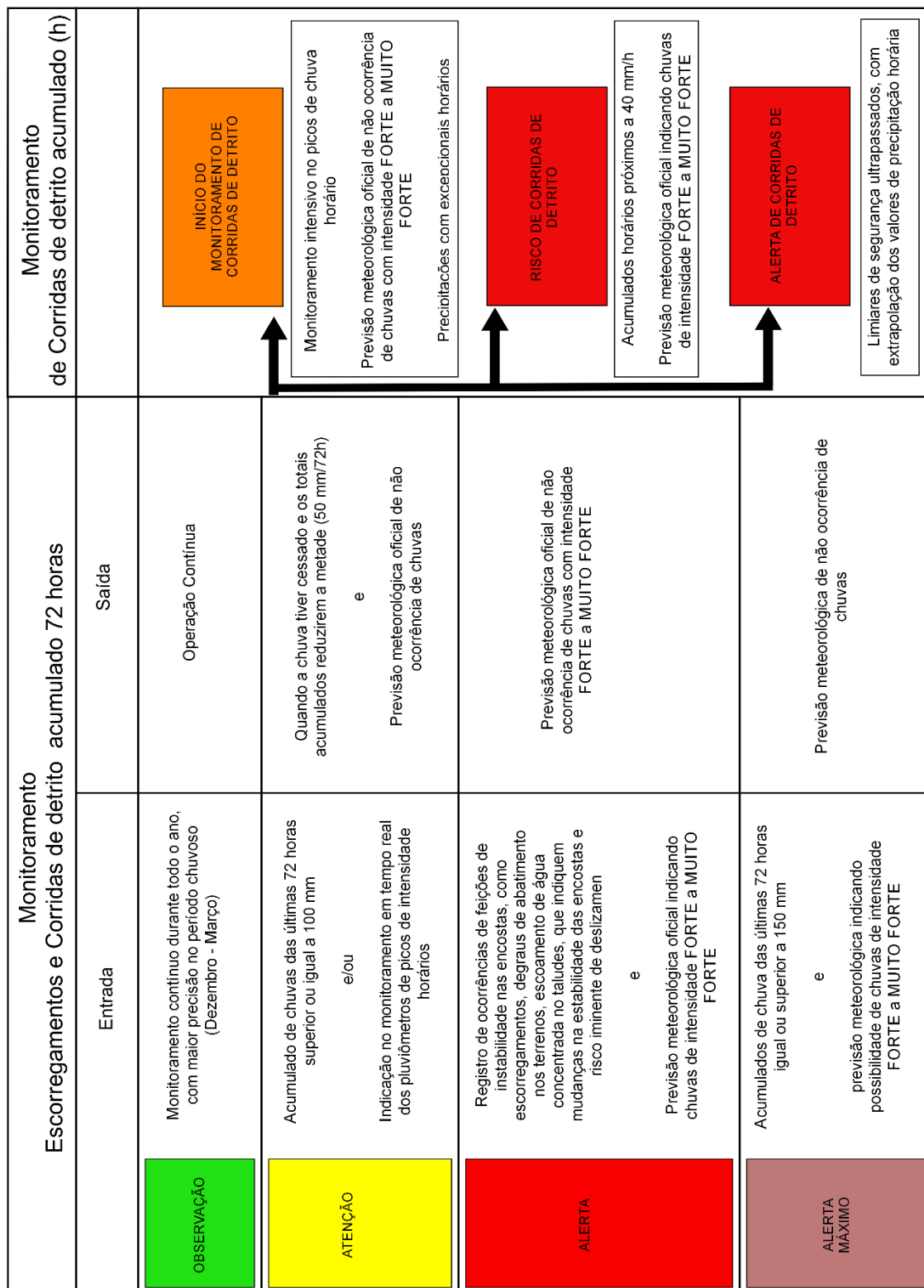
A partir do momento em que os acumulados ultrapassarem os limiares de 120mm em 72 horas, é imprescindível acompanhar a evolução pluviométrica de hora em hora e se possível minuto a minuto, Kanji et al (1997) por exemplo, relaciona a ocorrência de escorregamentos com chuvas de intensidade média a forte com duração de dias a semanas, já as corridas de detrito estão associadas a chuvas de curto período, após grandes acumulados.

Dessa forma, o primeiro nível do Plano de monitoramento de corridas de detrito é o INÍCIO DO MONITORAMENTO DE CORRIDAS, onde se inicia o acompanhamento intensivo das chuvas horárias, e das previsões meteorológicas.

O segundo nível é o RISCO DE CORRIDAS DE DETRITO, caracterizado por exceder ou igualar os 40 mm/h somados aos 120 mm em 72 horas e a previsão meteorológica de continuidade das chuvas com intensidade FORTE a MUITO FORTE.

E por fim, o terceiro nível como ALERTA DE CORRIDAS, quando os limiares de chuva horária já tiverem ultrapassado 40 mm/h, mais chuvas acumuladas da ordem de 120 mm em 72 horas e a previsão meteorológica continuar indicando chuvas de intensidade forte a muito forte.

Figura 26 - Proposta de Plano de monitoramento para escorregamentos e corridas de detrito para Cubatão (SP)



Fonte: elabora do pelo autor

5.7 APLICAÇÃO DO SISTEMA DE MONITORAMENTO AUTOMÁTICO – BACIA HIDROGRÁFICA RIO DAS PEDRAS – CUBATÃO – SP

O município de Cubatão, como dito anteriormente, sofre frequentemente com os extremos pluviométricos e é um dos trechos com o maior número de registros de corridas de detrito do Brasil.

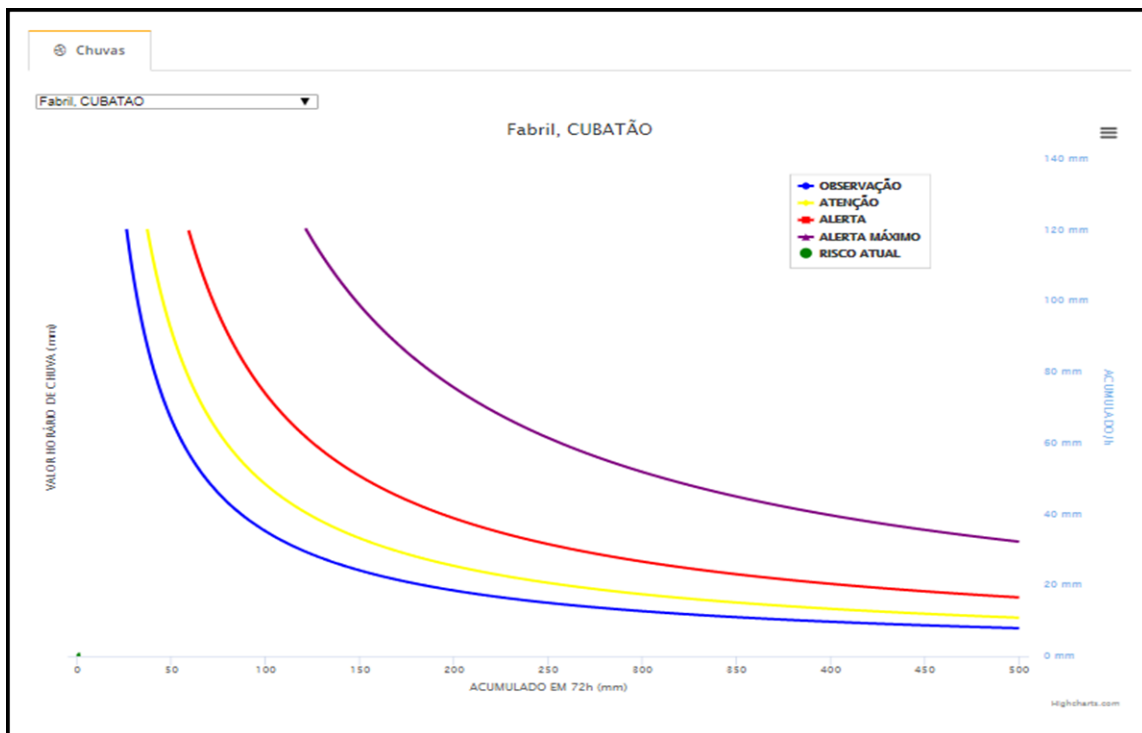
Dessa forma, por meio do uso do Sistema Automatizado de Monitoramento, concebido para essa pesquisa, e das correlações empíricas de chuva x Escorregamentos (Tatizana et al. 1987) e chuva x corridas de massa Kanji et al (1997). Foi possível definir uma interface de sistema de monitoramento baseado em pluviometria e limiares de segurança para o município.

Para a implementação do sistema foi selecionado dentre a rede de pluviômetros pertencente ao Centro Nacional de Desastres Naturais (CEMADEN), o mais próximo a área de estudo do ponto de vista de representatividade das chuvas. Foi utilizado o pluviômetro FABRIL (351350405A), localizado nas coordenadas -23.882 e -46.455, com distância de aproximadamente 290 metros da área de estudo e definida sua área de abrangência de acordo com IPT (2016), de 2 quilômetros.

Este pluviômetro foi inserido no sistema como um sensor, recebendo atualização dos dados a cada 30 segundos no monitoramento e para conseguinte validação dos dados esperou-se um evento pluviométrico excepcional.

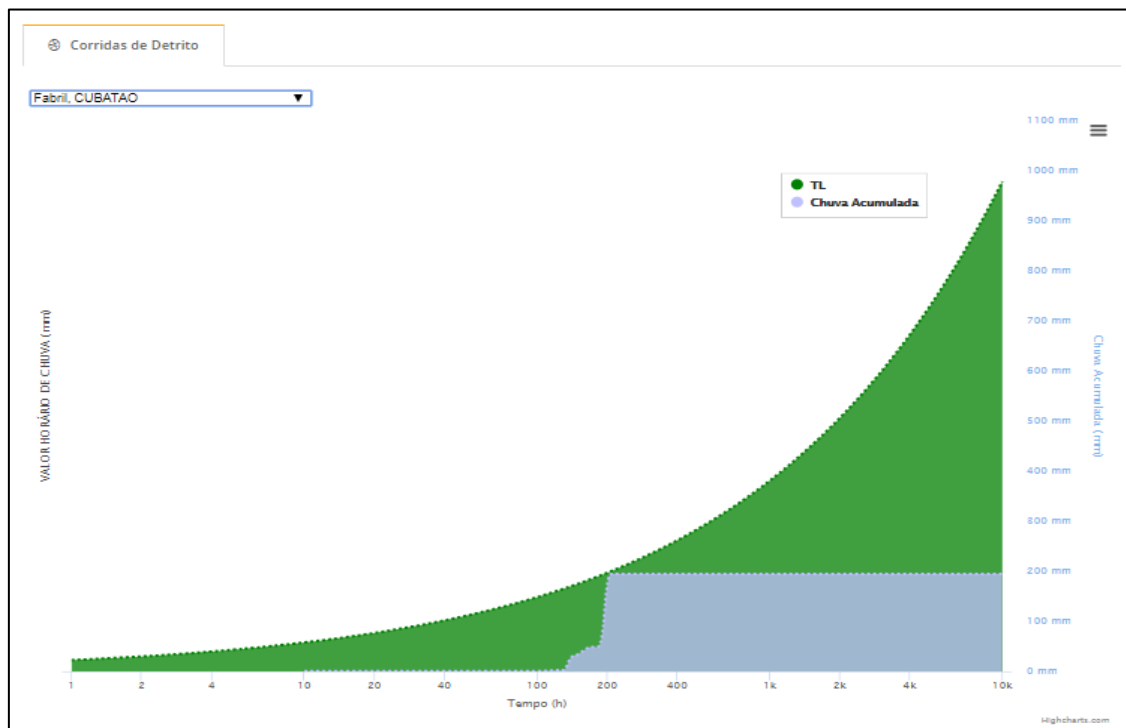
A seguir, nas Figuras 32, 33, 34 e 35, está representado o sistema em funcionamento para o município de Cubatão.

Figura 27 - Tela de monitoramento do Sistema automatizado à ocorrência de escorregamentos



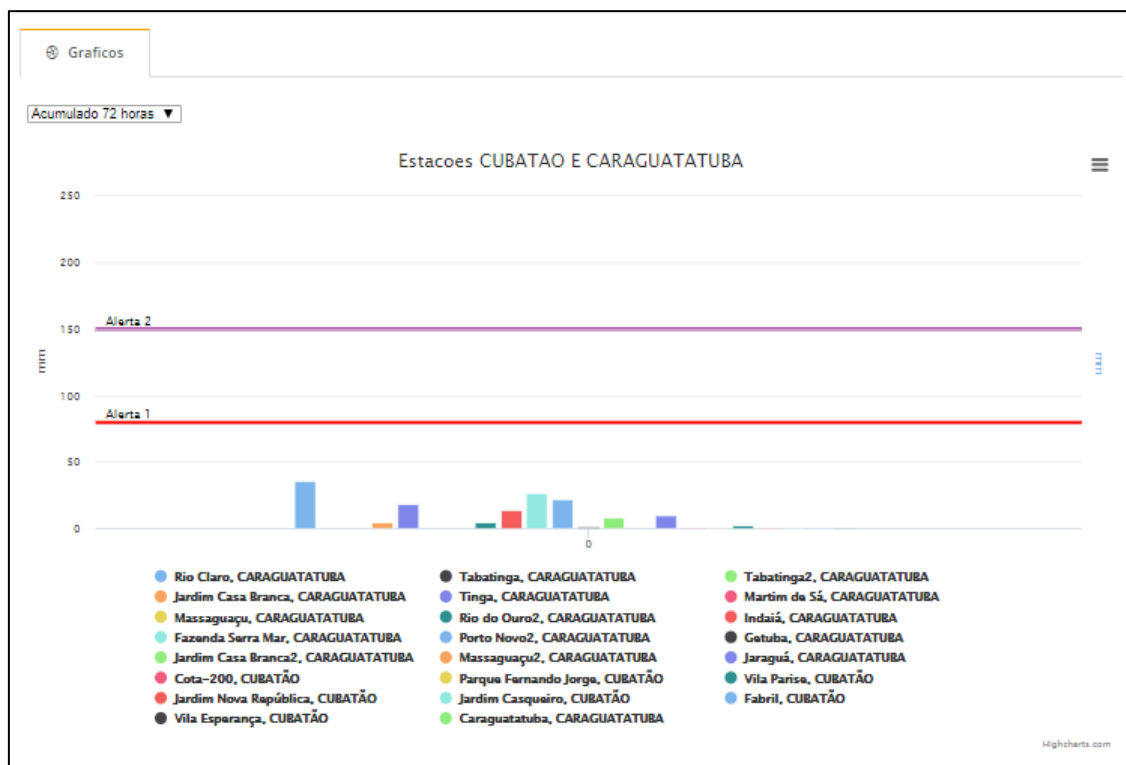
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 28 - Tela de monitoramento do sistema à ocorrência de corridas de detrito



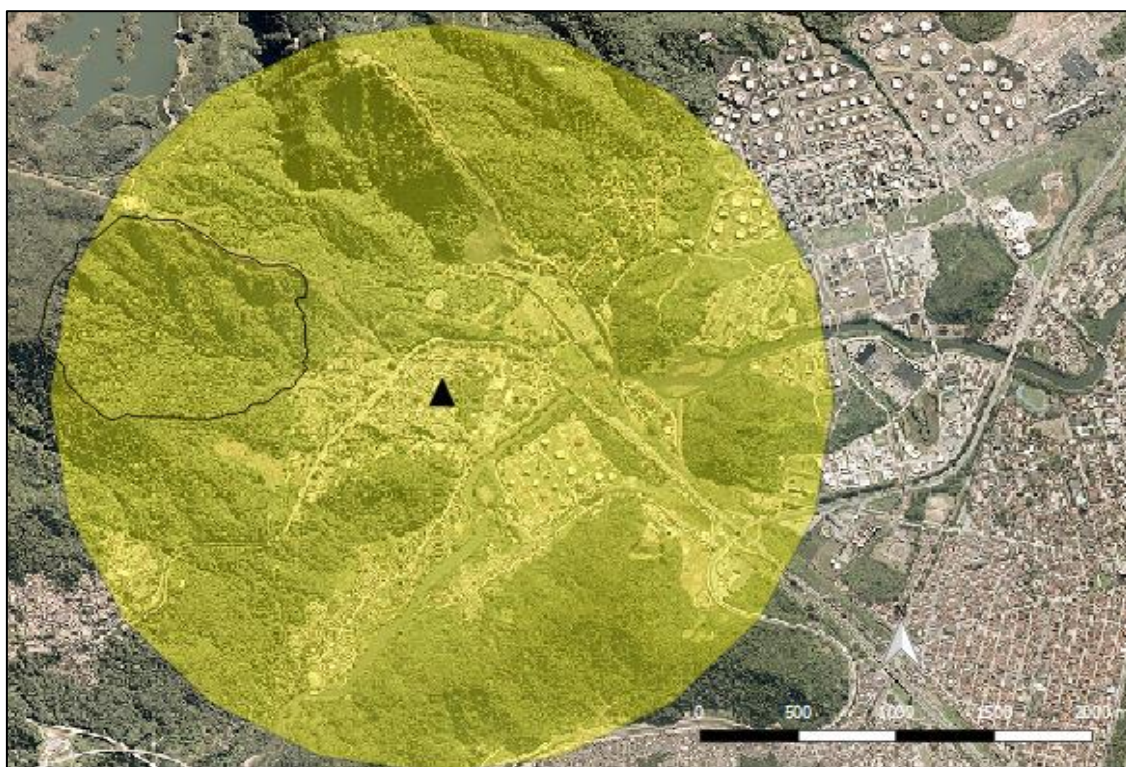
Fonte: elaborado pelo autor

Figura 29 - Tela de monitoramento das chuvas acumuladas com níveis de alerta em barra



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 30 - Localização do pluviômetro e seu raio de abrangência na área de estudo



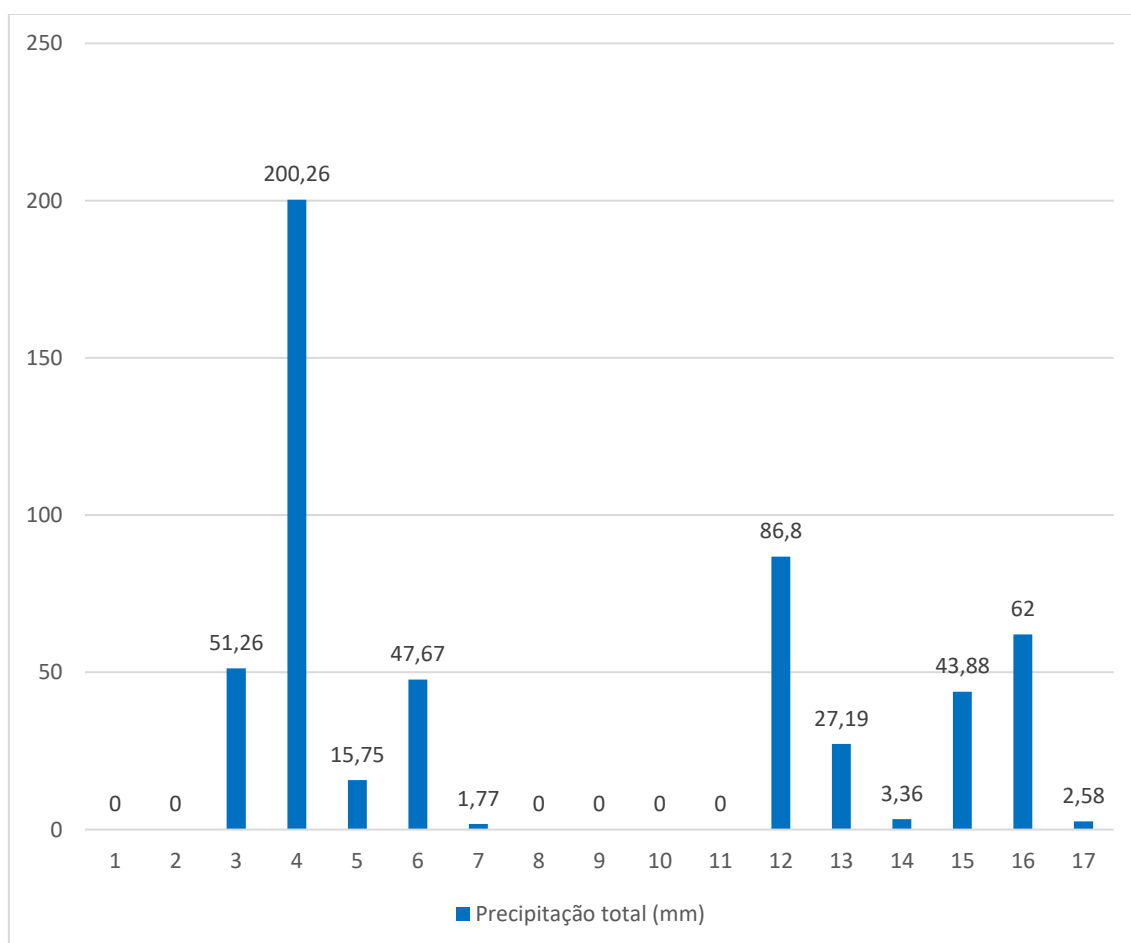
Fonte: elaborado pelo autor

A análise das chuvas das precipitações compreendeu o mês de fevereiro de 2019, onde houve a ocorrência de alto volume de chuvas. Esses eventos ocorreram nas três semanas iniciais do mês de fevereiro de 2019, na madrugada do dia 3 até o dia 6, seguido de curta estiagem e retomada no dia 12 até 16.

Alguns valores de precipitação diária e horária chamaram a atenção (Gráfico4) e (Tabelas 23 e 24), como no dia 4 com 200 mm (59% da chuva esperada para o mês), picos de intensidade horária de 33,7 mm, e dia 12 com 86,5 mm (25% da chuva esperada para o mês*), com picos horários de 38 mm.

Esses picos foram de grande valia para fins de validação do tempo de resposta e visualização do sistema automatizado de monitoramento, bem como o acompanhamento em tempo real das chuvas de escorregamentos de massa e corridas de detrito.

Gráfico 4 - Valores de precipitação diária dos eventos acompanhados no mês de fevereiro de 2019



Fonte: CEMADEN

Tabela 23- Valores de precipitação horária do dia 3 de fevereiro

| Dia | horário | precipitação total (mm/h) | Precipitação acumulada (mm) | % da Chuva total do mês |
|-----|---------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 4 | 00:00 | 4,17 | 27,6 | 59% |
| | 01:00 | 28,77 | 32,94 | |
| | 02:00 | 29,21 | 57,98 | |
| | 03:00 | 15,35 | 44,56 | |
| | 04:00 | 28,81 | 44,16 | |
| | 05:00 | 33,76 | 62,57 | |
| | 06:00 | 9,87 | 43,63 | |
| | 07:00 | 15,43 | 25,3 | |
| | 08:00 | 2,16 | 17,59 | |
| | 09:00 | 2,75 | 4,91 | |
| | 10:00 | 2,96 | 5,71 | |
| | 11:00 | 8,47 | 11,43 | |
| | 12:00 | 8,67 | 17,14 | |
| | 13:00 | 4,51 | 13,18 | |
| | 14:00 | 2,18 | 6,69 | |
| | 15:00 | 0 | 2,18 | |
| | 16:00 | 0,4 | 0,4 | |
| | 17:00 | 0 | 0,4 | |
| | 18:00 | 0,4 | 0,4 | |
| | 19:00 | 0,59 | 0,99 | |
| | 20:00 | 0 | 0,59 | |
| | 21:00 | 0 | 0 | |
| | 22:00 | 0 | 0 | |
| | 23:00 | 0 | 0 | |

Fonte: elaborado pelo autor

Tabela 24 – Valores de precipitação horária do dia 12 de fevereiro

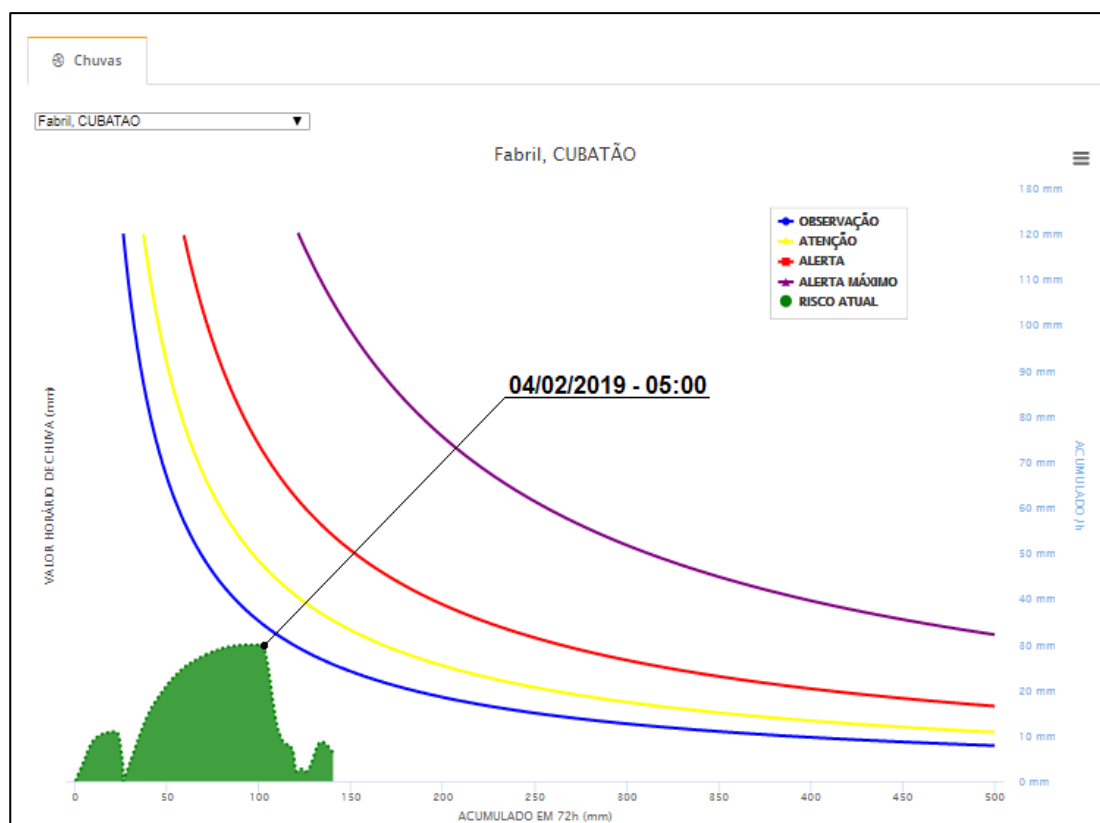
| Dia | horário | precipitação total (mm/h) | Precipitação acumulada (mm) | % da Chuva total do mês |
|-----|---------|---------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| 12 | 00:00 | 0 | 0 | 25,0% |
| | 01:00 | 0 | 0 | |
| | 02:00 | 0 | 0 | |
| | 03:00 | 0 | 0 | |
| | 04:00 | 0 | 0 | |
| | 05:00 | 0 | 0 | |
| | 06:00 | 0 | 0 | |
| | 07:00 | 0,4 | 0,4 | |
| | 08:00 | 0,2 | 0,6 | |
| | 09:00 | 0 | 0,2 | |
| | 10:00 | 0 | 0 | |
| | 11:00 | 0 | 0 | |
| | 12:00 | 0 | 0 | |
| | 13:00 | 0 | 0 | |
| | 14:00 | 0 | 0 | |
| | 15:00 | 0 | 0 | |
| | 16:00 | 0 | 0 | |
| | 17:00 | 0 | 0 | |
| | 18:00 | 0 | 0 | |
| | 19:00 | 15,42 | 15,42 | |
| | 20:00 | 38,96 | 54,38 | |
| | 21:00 | 29,45 | 68,41 | |
| | 22:00 | 1,97 | 31,42 | |
| | 23:00 | 0,2 | 2,17 | |

Fonte: elaborado pelo autor

As Figuras 32 e 33, respectivamente mostram os eventos pluviométricos registrados no dia 04 de fevereiro de 2019, as 5 horas da manhã e 12 de fevereiro

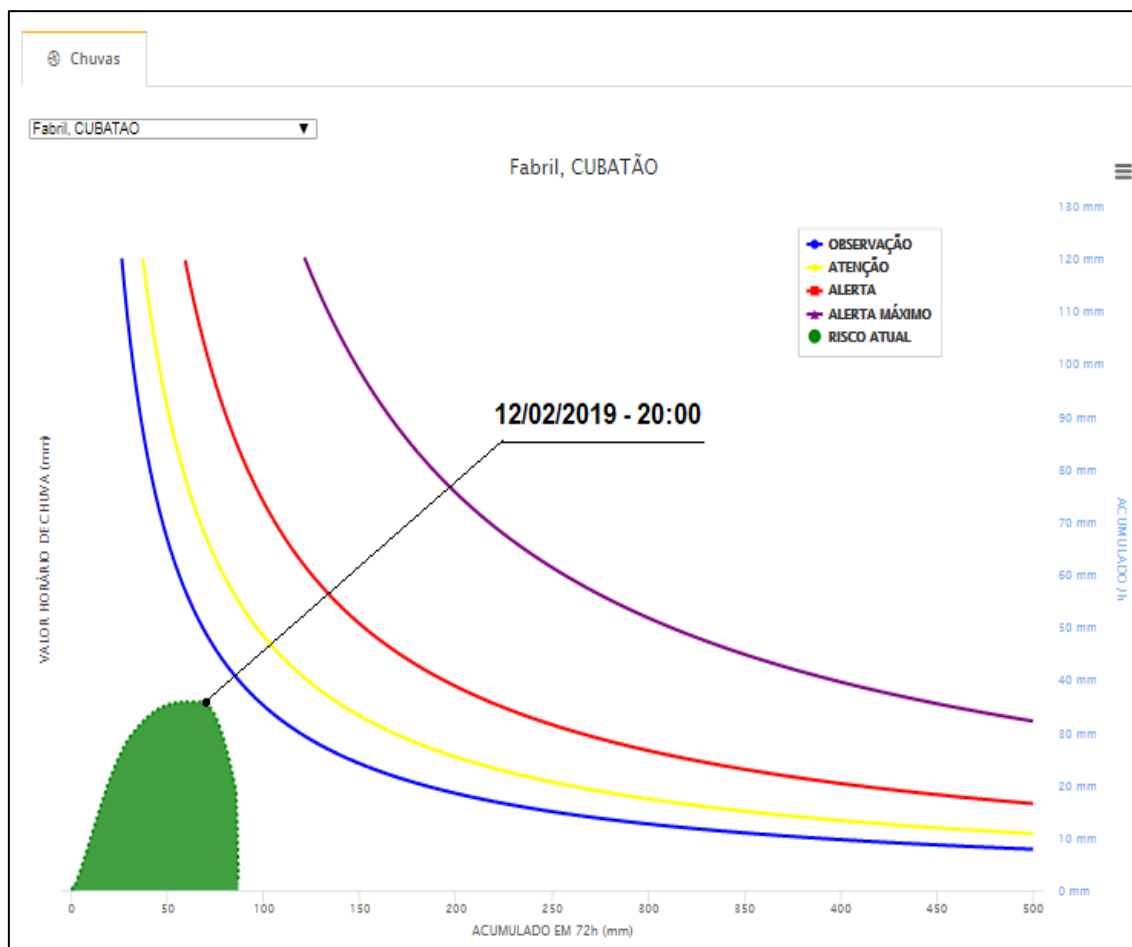
as 20 horas da noite, no posto pluviométrico monitorado pelo CEMADEN Fabril, mostrados em tempo real pelo Sistema Automático de Monitoramento. As envoltórias representam os limiares das correlações estimadas de chuvas acumuladas (eixo x horizontal das abscissas) e picos de chuvas horárias (eixo y vertical das ordenadas) para diferentes tipologias de cenários de risco de escorregamentos: escorregamentos induzidos em taludes de corte e aterro (OBSERVAÇÃO), escorregamentos esparsos em encostas naturais (ATENÇÃO), escorregamentos generalizados em encostas naturais (ALERTA) e corridas de detritos (ALERTA MÁXIMO).

Figura 31 - Evento pluviométrico em andamento e registrado em tempo real na madrugada do dia 04/02/2019 as 05:00 horas



Fonte: elaborado pelo autor

Figura 32 - Evento pluviométrico em andamento e registrado em tempo real na noite do dia 12/02/2019 as 20:00 horas



Fonte: elaborado pelo autor

Nos dois eventos, acompanhados pelo monitoramento, não houve avanço nos níveis de OBSERVAÇÃO para ATENÇÃO, principalmente devido a não ocorrência de chuvas e ausência de previsões meteorológicas mais severas como previsto no Plano de Contingência.

As chuvas ocorridas nos dois episódios não representaram grande criticidade, segundo Tatizana et al (1987), as situações de maior risco e instabilidade são ocasionadas por chuvas contínuas, com picos de intensidade no final do período chuvoso. Nos casos de chuvas intensas mais comuns os picos de intensidade horária são registrados no começo do evento chuvoso, como pode ser notado nestes dois casos.

Ainda nas chuvas convectivas mais fortes, o pico mais intenso localiza-se nas três primeiras horas de chuva, não obstante na primeira hora, ao passo

que nas chuvas associadas as frentes frias semi-estacionárias, os picos de chuva mais fortes estão localizados nas seis primeiras horas.

Os autores relacionam ainda os casos dos escorregamentos de grande porte serem anomalias da distribuição das chuvas, com picos de intensidade mais fortes localizados na porção média ou final do evento chuvoso, ou seja, com altos acumulados anteriores.

Já com relação ao monitoramento das corridas de detrito, não houve acumulado anterior, nem precipitação suficiente para fazer o Plano de Contingência, avançar para o nível de ATENÇÃO, onde o monitoramento seria iniciado. Dessa forma, na figura 34, está representado o monitoramento de corridas de detrito.

Figura 33 - Evento pluviométrico em andamento e registrado em tempo real na madrugada do dia 04/02/2019 as 05:00 horas (monitoramento de corrida de detritos)



Fonte: elaborado pelo autor

Para Kanji et al (1997), uma chuva de aproximadamente 1 mm por minuto pode ocasionar uma corrida de detritos, mas antes disso os autores dizem ser necessário que tenha ocorrido uma chuva de longa duração e baixa intensidade. Eles associam grandes e catastróficas movimentações de massa, a altos valores de precipitação em longos período de tempo, com picos de chuvas no final, assim como Tatizana et al (1987).

Dessa forma, recomenda-se estudos mais longos em que os dados pluviométricos das estações chuvosas possam ser coletados e utilizados para melhorar a confiabilidade das envoltórias de monitoramento, permitindo identificação de padrões de comportamento atmosférico e pluviométrico, melhorando também a eficiência do sistema de monitoramento como um todo.

6. CONSIDERAÇÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicação das metodologias do ponto de vista do mapeamento a bacia hidrográfica, identificando suas principais vulnerabilidades e estimando os principais parâmetros de ocorrência de eventos extremos, mostrou-se bastante satisfatória.

Com base nos modelos fenomenológicos adotados, e nos indicadores dos condicionantes de encostas e drenagem pode-se afirmar que há condições de geração de corridas de detrito, na drenagem principal e secundárias, que drenam suas águas para a baixada fluvial da bacia do Rio das Pedras, onde se encontram as infraestruturas sob risco mapeadas.

Os 3 cenários de risco estimados para a bacia hidrográfica, puderam ser comparados com outros eventos ocorridos no mesmo trecho da Serra do Mar e mostraram certa semelhança, e confirmação empírica, principalmente no que diz respeito a volumes, padrão de deflagração e deslocamento, apesar da dispersão inerente a essas equações.

O cenário de risco mapeado, a Rodovia Anchieta (SP – 050), a rede de dutos ascendente da Transpetro, e o aglomerado habitacional, em um cenário de chuva semelhante ao descrito neste trabalho, com longas intensidades e picos horários extremos, estão sob alto risco à ocorrência de movimentos de massa de magnitude preocupante.

Com relação a validação do sistema de monitoramento automático, o período chuvoso foi muito curto, sendo necessário um período maior de monitoramento, para inclusive atualizar as envoltórias tanto de escorregamentos, quanto as de corridas de detrito inserindo novos casos e parâmetros, a fim de trabalhar com limiares de segurança mais confiáveis.

A concepção de um sistema de monitoramento de corridas de detrito passa por um sistema de avisos específicos com tempo de emissão útil para que os usuários do sistema tenham tempo hábil para executar os protocolos e planejamento.

Dessa forma, apenas o monitoramento pluviométrico se mostrou inconsistente para esse monitoramento específico.

Também paramentos como vazão na drenagem no terço inferior, vibração de solo e movimentos de massa nas encostas, devem ser monitorados in situ e

enviados também em tempo real, pois são variáveis correlacionáveis com a precipitação e fortes indicadores de deflagração, podendo aumentar a robustez do sistema de monitoramento e alerta.

Por fim, a adoção de uma bacia hidrográfica com área semelhante a utilizada nesta pesquisa, para projeto piloto de instrumentação de sensores seria de grande valia para o avanço do conhecimento das variáveis envolvidas na deflagração das corridas de detrito e movimentações de massa, melhorando o tempo de resposta dos sistemas de aviso e alerta na Serra do Mar.

7. BIBLIOGRAFIA

ARATTANO, M.; FRANZI, L. On the evaluation of debris flows dynamics by means of mathematical models. **Natural Hazards and Earth System Science**, v. 3, n. 6, p. 539-544, 2003.

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: **Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas-COBRAE. Anais**. 1992. p. 721-733.

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. **GEOLINE, Geology and linear structures, Lyon**, 2005.

BRESSANI, LUIZ A. ; SIMOES, E. B. ; BOESING, I. J. ; HANAUER, D. S. ; BALBINOT, G. . Monitoring System for Landslides and Geotechnical Works Using Statistical and Artificial Intelligence Models. In: **Sympsiun on Field Measurements in Geomechanics**,, 2018, Rio de Janeiro.

CAMPBELL, R. H. Soil slip, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, Southern California. **US Geological survey professional paper**, v. 851, p. 51, 1975.

CERRI, L. E. S.; CARVALHO, C. S. Hierarquização de situações de risco em favelas do município de São Paulo, Brasil-critérios e metodologia. **SIMPÓSIO LATINO-AMERICANO SOBRE RISCO GEOLÓGICO URBANO, I, São Paulo, Atas...** ABGE, p. 150-157, 1990.

CERRI, L. E. S.; BARBOSA, M. N. L. Os escorregamentos como riscos geológicos no Brasil: aspectos legais. **Simpósio Latino-Americano sobre Risco Geológico Urbano**, v. 1, p. 448-56, 1990.

CERRI, L. E. S. 1993. **Riscos geológicos associados a escorregamentos: uma proposta para prevenção de acidentes**. Tese de Doutorado em Geociências e Meio Ambiente Instituto de Geociências e Ciências Exatas. UNESP, Rio Claro. 197p.

CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, v. 9, n.18, p. 35-64, 1969.

COSTA, J. E. Physical geomorphology of debris flows. In: **Developments and applications of geomorphology**. Springer, Berlin, Heidelberg, 1984. p. 268-317.

CPRM, IPT. Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000 (livro eletrônico): **nota técnica explicativa / coordenação Omar Yazbek Bitar**. -- São Paulo: IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo Brasília, DF: CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2013.

CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslides: investigation and mitigation. Chapter 3-Landslide types and processes. **Transportation research board special report**, n. 247, 1996.

Kanji, M. A.; Cruz, P. T.; Massad, F. Debris Flows in Serra do Mar, Cubatão, Brazil: Control Works and Design Parameters, CD-ROM. In: **International Workshop on the Debris Flow Disaster of December**. 1999. p. 8.

ENDO, T. Probable distribution of the amount of rainfall causing landslides, Annual report, **Hokkaido Branch**, Govern. Forest Experiment Station, Sapporo, 123–136, 1970

FORCE, NOAA-USGS Debris-Flow Task. NOAA-USGS Debris-Flow Warning System—Final Report: US Geological Survey Circular 1283. 2005.

GRAMANI, M. F. Caracterização geológica-geotécnica das corridas de detritos (“Debris Flows”) no Brasil e comparação com alguns casos internacionais. **Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EP-USP)-Departamento de Engenharia de Estruturas e Geotécnica (PEF)**. São Paulo, 2001.

GRAMANI, M. F. A corrida de detritos (debris flow) no Ribeirão Cágado, Serra do Mar, Município de Cubatão, SP. In: **Conferência Brasileira de Encostas**. 2013. p. 41-73.

GRAMANI, M. F.; ARDUIN, D. H. Morfologia dos Depósitos de Debris Flow de Itaoca, São Paulo. In: **Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental**. 2015.

GRAMANI, M. F.; MIRANDOLA, F. A. A.; Corrida de Massa no córrego Guarda-Mão-Município de Itaóca-SP: Impacto e observações de campo. **Desastres**, p. 28-36, 2014.

GRAMANI, M. F.; KANJI, M. A. Inventário e análise das corridas de detritos no Brasil. **COBRAE 2001**, 2001.

GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y. **Ensaio de correlação entre pluviosidade e escorregamentos em meio tropical úmido**. IPT, 1976.

NIEBLE, C. M.; GUIDICINI, G. Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. **Editora Edgard Blücher**. 2ª. Ed. São Paulo, 1984.

HAMPTON, M. A. The role of subaqueous debris flow in generating turbidity currents. **Journal of Sedimentary Research**, v. 42, n. 4, 1972.

HASUI, Y.; SADOWSKI, G. R.. Evolução geológica do Pré-Cambriano na região sudeste do Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 6, n. 3, p. 182-200, 1976.

HUNGR, O.; EVANS, S. G.; HUTCHINSON, I. N. A Review of the Classification of Landslides of the Flow Type. **Environmental & Engineering Geoscience**, v. 7, n. 3, p. 221-238, 2001.

HUNGR, O.; EVANS, S. G. Entrainment of debris in rock avalanches: an analysis of a long run-out mechanism. **Geological Society of America Bulletin**, v. 116, n. 9-10, p. 1240-1252, 2004.

HUNGR, O.; LEROUEIL, S.; PICARELLI, L. The Varnes classification of landslide types, an update. **Landslides**, v. 11, n. 2, p. 167-194, 2014.

HUTCHINSON, J. N. Mass movement. In: FAIRBRIDGE, R. W. **Encyclopedia of geomorphology**. New York: Reinhold Book Corp, p. 688-696, 1968.

HUTCHINSON, J. H. General report, morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. In: **Landslides, Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides, 1988**. 1988.

HONG, X. Y. et al. The debris flow in Han Yu Forest of Mi Yun County of Beijing. In: **Proc., Int. Symp. of Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention**. Tsukuba, Japan: Erosion Control Society of Japan, 1985. p. 191-193.

HSU, K. J. Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls. **Geological Society of America Bulletin**, v. 86, n. 1, p. 129-140, 1975.

IKEYA, H. Debris flow and its countermeasures in Japan. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology-Bulletin de l'Association Internationale de Géologie de l'Ingénieur**, v. 40, n. 1, p. 15-33, 1989.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. Elaboração de subsídios técnicos para um plano de emergência para a área de Cubatão, Estado de São Paulo. São Paulo. 1986 (IPT, Relatório nº 22.797)

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO – IPT. Assessoria técnica especializada para elaboração de Plano Municipal de Redução de Riscos de Salvador, BA. 2016 (IPT, Relatório nº 147.695)

IVERSON, R. M.; REID, M. E.; LAHUSEN, Richard G. Debris-flow mobilization from landslides. **Annual Review of Earth and Planetary Sciences**, v. 25, n. 1, p. 85-138, 1997.

JOHNSON, A. M. **Physical processes in geology: A method for interpretation of natural phenomena; intrusions in igneous rocks, fractures, and folds, flow of debris and ice**. Freeman, Cooper, 1970.

JOHNSON, A. M.; RODINE, J. R. Debris flow, Slope Instability D. Brunnsden, DB Prior, 257–361. 1984.

KANJI, M. A. et al. Basic and common characteristics of debris flows. In: **2nd Panamerican Symposium on Landslides and**. 1997. 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. p. 1-11.

KANJI, M. Assis; GRAMANI, M. F. Metodologia para determinação da vulnerabilidade a corridas de detritos em pequenas bacias hidráulicas. **COBRAE 2001**, 2001.

MACEDO, E. S; SANTORO, J.; CERRI, L. E. S.; OGURA, A.T. Plano preventivo de defesa civil (PPDC) para escorregamentos no trecho paulista da Serra do Mar, SP. **Geologia de Engenharia: conceitos, método e prática, ABGE/IPT, São Paulo**, v. 1, p. 42-46, 2002.

MACEDO, E. S.; SANTORO, J.; ARAÚJO, R. E. Plano Preventivo de Defesa Civil (PPDC) para deslizamentos, Estado de São Paulo, Brasil. **Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais. Florianópolis: GEDN/UFSC**, 2004.

MACEDO, E. S.; OGURA, A. T.; SANTORO, J. O que é um Plano de Contingência ou Preventivo de Defesa Civil. **BRASIL, Ministério das Cidades/Cities Alliance. Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas: Guia para elaboração de Políticas Públicas Municipais. Brasília: Ministério das Cidades**, p. 76-91, 2006.

MAGALHÃES, F. S.; CORSI, A. C.; GRAMANI, M. F.; BARBOSA, T. T. A.; AUGUSTO FILHO, O.; Análise da potencialidade de geração de corridas de massa nos trechos serranos do duto OSBAT. In: **11º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental. Anais. Florianópolis, 15p.** 2005.

MASSAD, F.; CRUZ, P. T.; KANJI, M. A.; ARAUJO FILHO, H. A. Characteristics and volume of sediment transported in debris flows in Serra do Mar, Cubatão, Brasil. In: **International workshop on debris flow disaster of December**. 1999.

MASSAD, F.; CRUZ, P. T.; KANJI, M. A.; ARAUJO FILHO, H. A. Comparison between estimated and measured debris flow discharges and volume of sediments/Comparações entre valores estimados e medidas de vazões e de volumes de sedimentos de debris-flows. II **PSL COBRAE: landslides, desligamentos, escorregamentos**, 1997.

MASSAD, F. Corridas de massas geradas por escorregamentos de terra: relação entre a área deslizada e a intensidade de chuva. **XII COBRAMSEG 2002: anais**, 2002.

MEAD, W. J. The geologic role of dilatancy. **The Journal of Geology**, v. 33, n. 7, p. 685-698, 1925.

MINISTÉRIO DAS CIDADES/INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT. CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S.; OGURA, A. T., organizadores. **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margens de Rios**. 1ª Ed. Brasília: Ministério das Cidades; Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007.

NEYAMA, Y. Relationship between the nature of heavy rains and landslides in western Japan. In: Proc. Japan – China (Taipei) **Joint Seminar on Natural Hazards Mitigation**. Kyoto, Japan, July. 16 – 20th. P.244 – 260. 1989.

NIELSEN, T.; KUIJPERS, A. Geohazard studies offshore the Faroe Islands: Slope instability, bottom currents and sub-seabed sediment mobilisation. **Geological Survey of Denmark and Greenland Bulletin**, v. 4, p. 57-60, 2004.

OGURA, A. T. ; GRAMANI, M. F. . The debris flow in Lavrinhas: stratigraphical and sedimentological features for debris flow risk assessment. In: **31st International Geological Congress**, 2000, Rio de Janeiro/BR. CD-Rom/Resumos, 2000.

PETRI, S.; SUGUIO, K. Características granulométricas dos materiais de escorregamentos de Caraguatatuba, São Paulo, como subsídio para o estudo da sedimentação neoceno-zóica no Sudeste Brasileiro. **Resumos das Comunicações**, 1971.

PIERSON, T. C. Factors controlling debris-flow initiation on forested hillslopes in the Oregon Coast Range. 1979.

PIERSON, T. C.; COSTA, J. E.; VANCOUVER, W. A rheologic classification of subaerial sediment-water flows. **Debris flows/avalanches: process, recognition, and mitigation. Reviews in Engineering Geology**, v. 7, p. 1-12, 1987.

POLANCO, L. S. E. Correlações Empíricas para Fluxo de Detritos. **Rio de Janeiro, RJ: COPPE/UFRJ**, 2010.

SAKAI, R. O. **Estudo do impacto de Debris Flows: caso da bacia do rio Santo Antônio em Caraguatatuba (Brasil)**. 2014. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

SHARPE, C. F. S. Landslides and Related Phenomena. **Pageant**, N.J., p. 125. 1938.

STINI, J. Die Muren. Verlag der Wagner'shen Universitätsbuchhandlung, Innsbruck (Debris flows, English translation by M. Jakob and N. Skermer, 1997, **EBA Engineering Consultants**, Vancouver, Canada, p.106. 1910.

TAKAHASHI, T. Debris Flows. **Annual Review Fluid Mechanics**. v.13. p. 57-77. 1981

TAKAHASHI, T. Debris Flow. IAHR, Monograph. Balkema, Rotterdam. p..168 1991.

TAKAHASHI, T. Debris Flow: Mechanics, Prediction and Countermeasures. Taylor & Francis Group, London, UK. p..439. 2007.

TATIZANA, C.; OGURA, A.T.; CERRI, L.E.S.; ROCHA, M.C.M. Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos-Serra do Mar, município de Cubatão. In: **Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**. 1987. p. 225-236.

VARNES, D. J. Landslide types and processes. **Landslides and engineering practice**, v. 24, p. 20-47, 1958.

VARNES, D. J. Slope movement types and processes. **Special report**, v. 176, p. 11-33, 1978.

WU, J., TIAN, L., KANG, Z., ZHANG, Y. & LIU, J. (1993) Debris flow and its comprehensive control. **Science Press**, 332 p.

VANDINE, D. F. Debris flow control structures for forest engineering. **Res. Br., BC Min. For., Victoria, BC, Work. Pap**, v. 8, p. 1996, 1996.

ZNAMENSKY, D.; GRAMANI, M. F. Debris-flow grain-size analysis. In: **Proceedings of the Second International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation**. Taipei. 2000. p. 537-545.