

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE CORRIDAS DE MASSA  
NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO PAU D'ALHO, CARAGUATATUBA-SP.

Flávia Beatriz Demarchi

Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis (Orientador)

Rio Claro (SP)

2016

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Campus de Rio Claro

FLÁVIA BEATRIZ DEMARCHI

AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE  
CORRIDAS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
RIBEIRÃO PAU D'ALHO, CARAGUATATUBA-SP.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas -  
Câmpus de Rio Claro, da Universidade  
Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para  
obtenção do grau de Geóloga.

Rio Claro - SP  
2016

## AGRADECIMENTOS

Em momentos tão decisivos de nossas vidas, tais como este, é maravilhoso olhar para o lado e reconhecer quem te acompanhou durante toda a jornada. Inicialmente, gostaria de agradecer à pessoa que esteve ao meu lado e é minha melhor amiga desde meu primeiro segundo de vida, minha mãe Rita. Serei eternamente grata por todas as lutas que você enfrentou por mim. Obrigada por sempre apoiar minhas decisões e ser meu maior exemplo de vida; você é a mulher mais forte e mais doce que eu conheço. Te amo.

Agradeço ao meu pai João por ter me incentivado tanto na decisão de dar um passo para trás e correr atrás da profissão dos meus sonhos. Mesmo em outro plano espiritual, tenho certeza que você olha por mim e está muito satisfeito com minhas conquistas. Um dia a gente se encontra...

A meu namorado (e melhor amigo) Sergio, por dividir comigo todos os momentos, sejam eles felizes ou tristes. Agradeço pela paciência nos momentos de ansiedade, pelos conselhos no trabalho e por sempre me motivar a acreditar em mim mesma e nunca desistir. Você é essencial na minha vida, te amo.

Ao meu orientador Fábio Reis, por toda orientação e suporte nesses anos de trabalho e a todos os companheiros de projeto, Ana Amaral, Beatriz Gabelini, Fernanda Menin, Rodrigo Cerri, Felipe Sisto, Camila Jardimetti e Alan, muito obrigada. Agradeço em especial à Cláudia Vanessa, pela enorme paciência e dedicação em me ajudar a sanar todas as dúvidas, que não foram poucas (rs).

A todos os Geobilados, companheiros da turma de 2011, pelos momentos de tensão e diversão compartilhados. Em especial às amigas geólogas Yasmim, Marina, Tatiany, Laura, Tatiana e Isabella, que fizeram parte das melhores histórias da graduação; obrigada pelas conversas, conselhos, choros, risadas, festas e viagens inesquecíveis!

Agradeço também à amiga de mais longa data, Vanessa, por sempre se manter presente de alguma forma na minha vida e topa qualquer tipo de aventura ao meu lado.

Por fim, agradeço a todos que direta ou indiretamente contribuíram para minha formação pessoal e profissional, permitindo que eu chegasse até aqui.

*“Às vezes é um erro subir, mas é sempre um erro nunca tentar.  
Se você não subir, não vai cair, a verdade é essa.  
Mas será tão ruim assim fracassar, tão duro cair?  
Às vezes, você desperta... Outras, sim, você morre  
Mas há uma terceira alternativa: você voa”*

***Sandman – Neil Gaiman***

## RESUMO

As corridas de massa são fenômenos de grande potencial destrutivo que causam muitos prejuízos sociais, econômicos e ambientais em todo o mundo. Diversos fatores podem estar associados a esses processos, entretanto há maior influência das características geológico-geotécnicas. Em decorrência disso, o mapeamento geológico-geotécnico e avaliação da suscetibilidade à ocorrência de corridas de massa nas bacias hidrográficas são essenciais para que possam ser elaborados planos preventivos e emergenciais a esses eventos. Nesse sentido, o principal objetivo do presente trabalho é avaliar a suscetibilidade da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho por meio da análise de atributos fisiográficos e de uso e ocupação do solo. A princípio foram elaborados o mapa de declividade e modelo digital de elevação a fim de auxiliar as etapas seguintes. Posteriormente, realizou-se a compartimentação fisiográfica da área através de técnicas de fotoanálise e fotointerpretação, onde foi possível a definição da suscetibilidade preliminar da bacia. Ainda nessa etapa, foram delimitadas as cicatrizes de escorregamento que ocorrem na área e também foram definidas as classes de uso e ocupação do solo. A partir da metodologia de Reis (2016) foram elaborados os mapas de suscetibilidade natural e suscetibilidade antrópica, posteriormente integrados para definição da suscetibilidade total. Foram reconhecidas e delimitadas cinco unidades fisiográficas, sendo que as mais expressivas na área se caracterizam por possuir alta declividade, grande amplitude, média a alta densidade de elementos de drenagem e relevo, e encostas de forma côncava a retilínea, além de representarem as áreas de ocorrências das cicatrizes de escorregamento. A fotointerpretação destes atributos sugeriu suscetibilidade média a alta para a bacia. Há grande homogeneidade em termos de classes de uso e ocupação do solo, sendo predominantes áreas florestais e de mata nativa, seguida por pastagens. Já na etapa de avaliação, o mapa de suscetibilidade natural ressaltou o maior risco de ocorrência de corridas de massa nos contextos de alta declividade, encostas côncavas e alta densidade de drenagem. O mapa de suscetibilidade antrópica apontou baixa suscetibilidade para a área em termos das classes de uso e ocupação. A partir da integração destes dois mapas, foi gerado o mapa de suscetibilidade final, classificando a área com suscetibilidade média a alta à ocorrência de corridas de massa. O mapa final destaca a influência das características fisiográficas, hidrológicas e pluviométricas nos movimentos de massa. Além disso, a metodologia adotada se mostrou eficiente, podendo ser adotada como importante ferramenta na elaboração de planos preventivos e emergenciais nestas áreas de risco.

**Palavras-chave:** corridas de massa; compartimentação fisiográfica e suscetibilidade a movimentos de massa.

## ABSTRACT

The debris flows are phenomena with great potential of destruction that causes a lot of social, economic and environmental losses all around the world. Many features are associated with these processes, but the geological-geotechnical features have more influence. Because of this, the geological-geotechnical mapping and the susceptibility evaluation of the debris flow occurrence are essential to the planning of warning and emergency projects. The main objective of this study is to evaluate the susceptibility of the Pau D'Alho River Basin through the physiographic features and land use analysis. At first, there was made the declivity map and the digital elevation model to support next stages. After that, the physiographic compartmentalization was made using photoanalysis and photointerpretation techniques, and the preliminary susceptibility was defined. The landslides scars were delimited and the land use classes were defined too. The natural and anthropic susceptibility maps were developed using Reis (2016) methodology, and it were integrated to find the total susceptibility of the area. Five physiographic units were recognized and delimited, and the units with most expressive occurrence in area are characterized with high declivity, wide topographic range, medium-high density of drainage and landform features, and concave hillsides, with many landslide scars. The photointerpretation of these features suggests medium-high debris flows susceptibility to the basin. The land use classes are too uniform, with prevalence of forest and grazing areas. In the evaluation stage, the natural susceptibility map showed more risk of debris flows in areas with high declivity, concave hillsides and high drain features. The anthropic susceptibility map showed low susceptibility according to land use classes. Integrating these two maps, the final susceptibility map was developed, classifying the area with medium-high debris flows susceptibility. The final map stands out the physiographic, hydrological and pluviometric influence in the mass movements. Furthermore, the methodology adopted was efficient, and can be used as working tool in the preventive plans develops in these areas.

**Keywords:** debris flows, physiographic compartmentalization and mass movement susceptibility.

FLÁVIA BEATRIZ DEMARCHI

AVALIAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE À OCORRÊNCIA DE  
CORRIDAS DE MASSA NA BACIA HIDROGRÁFICA DO  
RIBEIRÃO PAU D'ALHO, CARAGUATATUBA-SP.

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Instituto de Geociências e Ciências Exatas -  
Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual  
Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do  
grau de Geóloga.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Fábio Augusto Gomes Vieira Reis (orientador)

Prof. Dra. Vania Silvia Rosolen

Msc. Flavio Henrique Rodrigues

Rio Claro, 25 de Novembro de 2016.

Assinatura do(a) aluno(a)

Assinatura do(a) orientador(a)

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1:</b> Modelo ilustrativo da classificação de movimentos de massa, baseado na proposta de Varnes (1978). .....   | 16 |
| <b>Figura 2:</b> Zonas diferenciadas em corridas de detritos canalizadas. ....   | 20 |
| <b>Figura 3:</b> Esquema simplificado de uma corrida de detritos .....   | 21 |
| <b>Figura 4:</b> Cicatrizes do escorregamento de 1967 nas escarpas da Serra do Mar em Caraguatatuba/SP. ....   | 25 |
| <b>Figura 5:</b> Depósito de blocos rochosos mobilizados no evento de 1967, em Caraguatatuba/SP. Os blocos possuem dimensões métricas e estão suportados por matriz granulométrica mais fina. .... | 26 |
| <b>Figura 6:</b> Fases e produtos das etapas de análise e interpretação fotogeológica, segundo Zaine (2011). : .....   | 29 |
| <b>Figura 7:</b> Fases e etapas de trabalho .....  | 32 |
| <b>Figura 8:</b> Quadro de análise fotogeológica I. ....   | 36 |
| <b>Figura 9:</b> Quadro de análise fotogeológica II. ....  | 37 |
| <b>Figura 10:</b> Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho. ....   | 43 |
| <b>Figura 11:</b> Mapa geológico da Bacia do Ribeirão Pau D'Alho. ....   | 46 |
| <b>Figura 12:</b> Pluviograma referente à cidade de Caraguatatuba/SP, de clima tropical chuvoso .....  | 47 |
| <b>Figura 13:</b> Mapa de declividade da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho. ....   | 48 |
| <b>Figura 14:</b> Modelo digital de elevação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho. ....  | 49 |
| <b>Figura 15:</b> Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho. .   | 54 |
| <b>Figura 16:</b> Mapa de suscetibilidade natural à corridas de massa na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho .....   | 56 |
| <b>Figura 17:</b> Mapa de suscetibilidade antrópica na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho. .  | 57 |
| <b>Figura 18:</b> Mapa final de suscetibilidade a corridas de massa na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho.....  | 58 |

## LISTA DE QUADROS

|   |    |
|---|----|
| <b>Quadro 1:</b> Características dos principais tipos de movimentos de massa associados a encostas. ....                    | 17 |
| <b>Quadro 2:</b> Classificação das corridas de massa baseada no tipo de material e velocidade. ....                         | 19 |
| <b>Quadro 3:</b> Principais eventos de movimentos de massa no sul e sudeste do Brasil. ....                                 | 24 |
| <b>Quadro 4:</b> Caracterização das abordagens integrada e multitemática. ....  | 27 |
| <b>Quadro 5:</b> Características dos diferentes tipos de análise de suscetibilidade: ....                                   | 31 |
| <b>Quadro 6:</b> Classes de declividade de acordo com o intervalo em graus. ....  | 34 |
| <b>Quadro 7:</b> Parâmetros para classificação do terreno quanto à suscetibilidade aos processos de corridas de massa. .... | 42 |
| <b>Quadro 8:</b> Porcentagem e área da bacia ocupada por cada classe de declividade. ....                                   | 49 |
| <b>Quadro 9:</b> Porcentagem e área da bacia ocupada pelas unidades fisiográficas. ....                                     | 50 |
| <b>Quadro 10:</b> Porcentagem e área da bacia ocupada por cada classe de uso e ocupação. ....                               | 54 |
| <b>Quadro 11:</b> Porcentagem e área ocupada pelas classes no Mapa de Suscetibilidade Natural. ....                         | 55 |
| <b>Quadro 12:</b> Porcentagem e área ocupadas pelas classes no Mapa Final de Suscetibilidade. ....                          | 58 |

## SUMÁRIO

|   |    |
|---|----|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....  | 12 |
| <b>2. OBJETIVO</b> .....  | 14 |
| <b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....   | 15 |
| 3.1 Movimentos de Massa .....   | 15 |
| 3.2 Caracterização das corridas de massa.....                                 | 19 |
| 3.3 Condicionantes das corridas de detritos .....                             | 21 |
| 3.4 Movimentos de massa na região sul e sudeste do Brasil .....               | 23 |
| 3.4.1 <i>Evento de Caraguatatuba – 1967</i> .....                             | 25 |
| 3.5 Mapeamento Geotécnico .....   | 26 |
| 3.5.1 <i>Compartimentação fisiográfica</i> .....                              | 28 |
| 3.6 Avaliação de Suscetibilidade.....   | 30 |
| <b>4. MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO</b> .....                                  | 32 |
| 4.1 Etapas da Pesquisa.....   | 32 |
| 4.2 Levantamento bibliográfico.....   | 33 |
| 4.3 Aquisição e organização dos produtos cartográficos .....                  | 33 |
| 4.4 Digitalização da base cartográfica e geração dos produtos auxiliares..... | 34 |
| 4.4.1 <i>Mapa de declividade</i> .....  | 34 |
| 4.4.2 <i>Modelo Digital de Elevação (MDE)</i> .....                           | 35 |
| 4.5 Compartimentação Fisiográfica.....  | 35 |
| 4.5.1 <i>Mapa de cicatrizes de escorregamento</i> .....                       | 38 |
| 4.5.2 <i>Mapa de Uso e Ocupação do Solo</i> .....                             | 39 |
| 4.6 Trabalho de campo .....   | 39 |
| 4.7 Avaliação da suscetibilidade a corridas de massa .....                    | 39 |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....                                       | 43 |
| 5.1 Caracterização da área de estudo .....                                    | 43 |
| 5.2 Mapas temáticos auxiliares.....   | 48 |
| 5.3 Compartimentação Fisiográfica.....  | 50 |
| 5.3.1 <i>Unidade I – Planície Fluvial</i> .....                               | 51 |
| 5.3.2 <i>Unidade II – Corpos graníticos isolados</i> .....                    | 51 |
| 5.3.3 <i>Unidade III – Granitos e gnaisses em escarpas</i> .....              | 52 |
| 5.3.4 <i>Unidade IV – Granitos e gnaisses em mar de morros</i> .....          | 52 |
| 5.3.5 <i>Unidade V - Granitos e gnaisses em morros paralelos</i> .....        | 53 |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| 5.3.6     | <i>Mapa de cicatrizes de escorregamento</i>              | 53        |
| 5.3.7     | <i>Mapa de Uso e Ocupação do Solo</i>                    | 54        |
| 5.4       | Avaliação da suscetibilidade a corridas de massa         | 55        |
| 5.4.1     | <i>Mapa de suscetibilidade natural</i>                   | 55        |
| 5.4.2     | <i>Mapa de Suscetibilidade antrópica</i>                 | 57        |
| 5.4.3     | <i>Mapa final de suscetibilidade à corridas de massa</i> | 58        |
| <b>6.</b> | <b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b>                        | <b>60</b> |
|           | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS                               | 62        |

## 1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas têm sido crescentes os impactos sociais, econômicos e ambientais gerados pelos processos de dinâmica superficial. Dentre estes processos há destaque para os movimentos de massa, que de acordo com dados da UNISDR (2015) provocaram aproximadamente 20.000 mortes e afetaram mais de 8 milhões de pessoas ao longo de todo o mundo nos últimos vinte anos (1995-2015).

Os movimentos de massa são considerados importantes processos evolutivos das encostas e de modificação da paisagem, sendo definidos como “movimento de solo, rocha ou qualquer outro material em encostas devido à influência direta da gravidade” (SELBY, 1982). Neste sentido, os escorregamentos e corridas de detritos são os movimentos de massa de maior impacto.

As corridas de massa são fenômenos de grande potencial destrutivo, que historicamente causam muitos danos, pois destroem paisagens, moradias e grandes construções como barragens e dutos, existentes ao longo de seu percurso. De acordo com Augusto Filho (1992) as corridas de massa podem ser definidas como “conjunto de movimentos gravitacionais de massa de grandes dimensões que se desenvolvem na forma de escoamento ao longo dos talwegues principais, possuindo extenso raio de alcance”.

As instabilizações nos taludes podem ser geradas por diversas variáveis, porém grande parte está correlacionada a fatores intrínsecos às suas características geológicas e geomorfológicas (INFANTI JR, 1998). Aspectos fisiográficos, tais como tipo e espessura de solo, rocha e depósitos superficiais, amplitude topográfica, declividade de encostas e densidade de drenagens, influenciam sobremaneira nestes processos.

Os regimes pluviométricos são também considerados importantes deflagradores destes movimentos. Dados de Guidicini e Iwasa (1976) sugerem que eventos pluviométricos que excedem 20% da pluviosidade média anual geram alta possibilidade de ocorrência de movimentos de massa. Resultados de Tatizana et al. (1987) e IPT (1988) corroboram essa afirmação, mostrando que os escorregamentos e corridas de massa estão diretamente correlacionados à saturação do solo pelas águas das chuvas.

No Brasil, os eventos de corridas de massa se concentram principalmente no litoral sul e sudeste, em regiões inseridas no contexto geológico-geomorfológico da Serra do Mar, que possui condições fisiográficas e de pluviosidade mais favoráveis a esses processos. Nesse cenário, há

destaque para a cidade de Caraguatatuba e o episódio ocorrido no dia 18 de Março de 1967, classificado como o terceiro maior evento destrutivo do gênero registrado no país.

Devido ao crescimento populacional nas regiões suscetíveis a estes processos, seu poder de impacto tende a ser potencializado. Nesse sentido, a principal forma de se traçar medidas preventivas a estes prejuízos é compreender como as características geológico-geotécnicas da região influenciam nos processos de corridas de massa e detritos. Isso é possível através do mapeamento e avaliação de suscetibilidade das áreas, importantes instrumentos técnico-científicos para gestão de riscos (BRITO, 2014).

Nos últimos anos, várias técnicas de avaliação de suscetibilidade têm sido desenvolvidas, muitas apoiadas em ferramentas de geoprocessamento (BRITO, 2014; REIS, 2016). Essas ferramentas possibilitam identificar e mapear as áreas suscetíveis, otimizando a aplicação de recursos e detalhamento de informações, inclusive em áreas onde as condições geomorfológicas dificultam os acessos em trabalhos de campo.

Partindo deste contexto, o presente trabalho visa avaliar áreas suscetíveis a corridas de massa, servindo como um instrumento para minimização das situações de risco. A área de estudo escolhida compreende a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho, localizada no município de Caraguatatuba/SP. Esta foi uma das bacias hidrográficas afetadas durante o evento de 1967, e devido ao avanço populacional, a avaliação de sua suscetibilidade aos processos de corridas de massa é fundamental para a elaboração de medidas preventivas e minimizadoras de danos caso haja reincidência de índices pluviométricos semelhantes aos de 1967.

Ainda, o presente trabalho se insere no projeto maior intitulado “Alertas meteorológicos para avaliação de risco geológico e geotécnico nas regiões Sul e Sudeste do Brasil/ Alertas meteorológicos associados a risco de origem geológico e geotécnico” financiado pela PETROBRAS.

## **2. OBJETIVO**

O objetivo principal do presente trabalho é mapear e avaliar a suscetibilidade à ocorrência de corridas de massa na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho, localizada no município de Caraguatatuba-SP. Para tal, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar a compartimentação fisiográfica da área, a fim de delimitar diferentes unidades fisiográficas e caracterizá-las de acordo com seus atributos naturais e antrópicos.
- Correlacionar às características do meio físico e de uso e ocupação do solo, com o comportamento geotécnico.
- Avaliar a suscetibilidade da bacia hidrográfica aos processos de corrida de massa, através da integração do Grau de Suscetibilidade Natural e do Grau de Suscetibilidade Antrópica.
- Gerar o mapa final de suscetibilidade a corridas de massa em escala 1:50.000.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os diferentes tipos de movimentos de massa, com enfoque na caracterização do processo de corridas de massa e detritos. Será apresentado também um breve histórico sobre os principais movimentos de massa que ocorreram no sul e sudeste do Brasil nos últimos anos. Buscou-se ainda uma breve contextualização dos conceitos da compartimentação fisiográfica e avaliação de suscetibilidade.

#### 3.1 Movimentos de Massa

A paisagem na Terra é constantemente modificada pelas forças que atuam em sua superfície, relacionadas a processos de dinâmica interna e externa. Essas modificações podem ser perceptíveis ou não à observação humana, dependendo da velocidade do processo em relação ao tempo geológico (INFANTI JR, 1998).

Os movimentos de massa são processos de dinâmica externa da Terra, correlacionados ao processo evolutivo das encostas e que desempenham importante papel na modificação da paisagem. São definidos como o movimento de materiais em encostas devido à influência direta da gravidade. Os materiais mobilizados podem ser solos, blocos rochosos, vegetação, ou qualquer outro tipo de material, tais como construções. (SELBY, 1982).

Os fatores que influenciam na ocorrência destes processos envolvem tanto características naturais do meio físico, quanto atividades antrópicas. A respeito desses condicionantes Bigarella (2003) expõe que

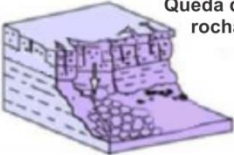
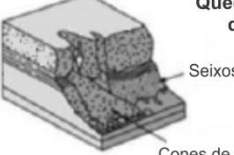
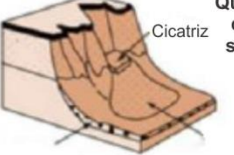

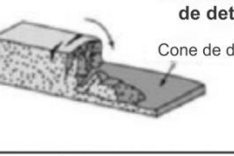
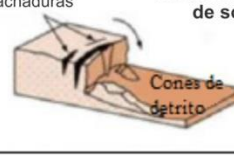
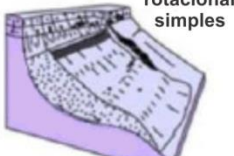
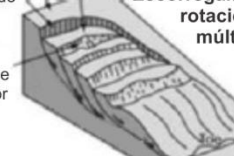
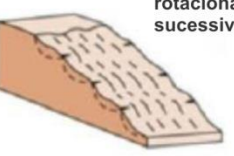



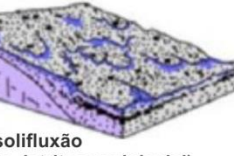
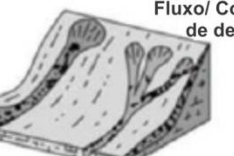

As condições que favorecem os movimentos de massa dependem principalmente da estrutura geológica, da declividade da vertente (forma topográfica), do regime de chuvas (em especial de episódios pluviais intensos), da perda de vegetação e da atividade antrópica, bem como pela existência de espessos mantos de intemperismo, além da presença de níveis ou faixas impermeáveis que atuam como planos de deslizamento (BIGARELLA *et al*, 2003, p.1026).

Pesquisas acerca dos movimentos de massa estão sendo cada vez mais realizadas em todo o mundo devido aos seus impactos sociais e econômicos. Desta forma, existe uma ampla gama de propostas de classificação dos processos em função de seu potencial destrutivo, velocidade, tipo de material e geometria.

Atualmente, a classificação mais aceita internacionalmente é a de Varnes (1978), adotada pela *International Association of Engineering Geology (IAEG)*. Esta classificação é bastante simplificada, baseada nos tipos de movimento e de material transportado (Figura 1), facilitando a

aplicação entre teoria e prática (SILVEIRA, 2003; TOMINAGA, 2007). De acordo com Varnes (1978) os tipos de movimentos são quedas, tombamentos, deslizamentos (rotacionais e translacionais), espraio lateral, corrida ou fluxo e movimentos complexos (resultado da combinação de dois ou mais tipos de movimentos). Os materiais mobilizados podem ser rochas, detritos (partículas > 2 mm) e solo (partículas < 2 mm).

**Figura 1:** Modelo ilustrativo da classificação de movimentos de massa, baseado na proposta de Varnes (1978).

| Material          |               | ROCHA  | DETRITO  | SOLO  |
|-------------------|---------------|--|--|---|
| Tipo de movimento |               |  |  |   |
| QUEDA             |               |  Queda de rocha   |  Queda de detrito<br>Seixos<br>Cones de detrito                                    |  Queda de solo<br>Cicatriz                             |
|                   | TOMBAMENTO    |  Tombamento de rocha                                       |  Tombamento de detrito<br>Cone de detrito   |  Rachaduras<br>Tombamento de solo<br>Cones de detrito |
| ESCORREGAMENTO    | ROTACIONAL    |  Escorregamento rotacional simples                        |  Coroa Cabeceira<br>Talude<br>Talude menor<br>Escorregamento rotacional múltiplo |  Escorregamento rotacional sucessivo                 |
|                   | TRANSLACIONAL |  Escorregamento de rocha                                  |  Escorregamento de detrito   |  Escorregamento de solo                              |
| FLUXO (CORRIDA)   |               |  Fluxo de solifluxão<br>(Corrida de detritos periglacial) |  Fluxo/ Corrida de detritos  |  Fluxo/ Corrida de solo                              |

Fonte: Modificado de British Geological Survey (2015).

Na literatura brasileira muitos autores deram suas contribuições para a classificação dos movimentos de massa. Destaca-se a classificação de Augusto Filho (1992), que divide os movimentos em: rastejo (*creep*), escorregamentos (*slides*), quedas (*falls*) e corridas (*flows*),

baseados na dinâmica do ambiente brasileiro. De acordo com Gramani (2001) esta classificação tem aplicação mais ampla, podendo ser utilizada nos diferentes cenários serranos encontrados no país. O Quadro 1 resume a caracterização de Augusto Filho (1992).

**Quadro 1:** Características dos principais tipos de movimentos de massa associados a encostas.

| <b>Processos</b>                          | <b>Características do movimento, material e geometria</b>   |
|---|---|
| <b>Rastejo</b><br><i>(creep)</i>          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vários planos de deslocamento (internos)</li> <li>- Velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade</li> <li>- Movimentos constantes, sazonais ou intermitentes</li> <li>- Materiais: solo, depósitos, rocha alterada/ fraturada</li> <li>- Geometria indefinida</li> </ul>   |
| <b>Escorregamentos</b><br><i>(Slides)</i> | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Poucos planos de deslocamento (externos)</li> <li>- Velocidades médias (m/h) a altas (m/s)</li> <li>- Pequenos a grandes volumes de material</li> <li>- Geometria e materiais variáveis</li> <li>- Planares: solos poucos espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza</li> <li>- Circulares: solos espessos, homogêneos e rochas muito fraturadas</li> <li>- Em cunha: solos e rochas com dois planos de fraqueza</li> </ul> |
| <b>Quedas</b><br><i>(falls)</i>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Sem planos de deslocamento</li> <li>- Movimento tipo queda livre ou em plano inclinado</li> <li>- Velocidades muito altas (vários m/s)</li> <li>- Material rochoso</li> <li>- Pequenos a médios volumes</li> <li>- Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc.</li> <li>- Rolamento de matacão</li> <li>- Tombamento</li> </ul>   |
| <b>Corridas</b><br><i>(flows)</i>         | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação)</li> <li>- Movimento semelhante ao de um líquido viscoso</li> <li>- Desenvolvimento ao longo das drenagens</li> <li>- Velocidades médias a altas</li> <li>- Mobilização de solo, rocha, detritos e água</li> <li>- Grandes volumes de material</li> <li>- Extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas</li> </ul>                               |

Fonte: Augusto Filho (1992)

Os rastejos ou rastejamentos são movimentos de massa lentos, de caráter contínuo, que mobilizam diferentes tipos de materiais sob influência da gravidade. São processos de geometria indefinida e não apresentam superfície de ruptura evidente, correspondendo a uma deformação de

caráter plástico. (GUIDICINI E NIEBLE, 1984; AUGUSTO FILHO, 1992; INFANTI JR., 1998; BIGARELLA, 2003).

A velocidade dos rastejamentos varia de acordo com fatores locais, tais como tipo de material, clima regional, grau de declividade da encosta, etc. Entretanto Press et al. (2006) define um intervalo de velocidade para os rastejos de 1 a 10 mm/ano. Em função dessa velocidade baixa, na grande maioria dos casos é um processo imperceptível, de indícios indiretos, tais como surgimento de pequenas trincas, inclinação de postes e árvores e “embarrigamento” das encostas (INFANTI JR, 1998).

Os escorregamentos de acordo com Infanti Jr. (1998) podem ser definidos como “movimento rápido de massas de solo ou rocha, geralmente bem definidas quanto ao seu volume, cujo centro de gravidade se desloca para baixo e para fora de um talude”. IPT (1991) e Infanti Jr. (1998) salientam ainda as diferentes geometrias que os escorregamentos podem assumir, permitindo sua divisão em escorregamentos rotacionais, translacionais ou planares e em cunha.

No contexto das encostas serranas brasileiras, os escorregamentos translacionais são os mais frequentes. Sua geometria de ruptura é planar, muitas vezes relacionada a descontinuidades mecânicas e/ ou hidrológicas desfavoráveis à manutenção da estabilidade. Essas descontinuidades podem ser feições geológicas como planos de estratificação, foliação, xistosidade, fraturas, etc. (GUIDICINI E NIEBLE, 1984; INFANTI JR, 1998). Para Fernandes e Amaral (1996) declividades em torno de 30° ou mais, também influenciam diretamente nesses eventos. De acordo com os autores, os escorregamentos geralmente se associam a períodos de chuvas fortes e prolongadas, quando ocorre saturação dos solos.

As quedas de blocos representam o deslocamento de blocos rochosos em alta velocidade por ação da gravidade. Para Augusto Filho (1992) e Infanti Jr. (1998) esse processo engloba outros tipos de movimentos, tais como o deslocamento, tombamento e rolamento de blocos. A queda ocorre em encostas muito íngremes a verticais, em movimentos do tipo queda livre. O tombamento e rolamento por sua vez, estão relacionados com movimentos em encostas menos verticalizadas, com menor velocidade. Os autores destacam que todos os tipos são favorecidos por planos de fraqueza e descontinuidades existentes nos maciços rochosos.

As corridas de massa são movimentos de alta velocidade e grandes dimensões, onde os materiais apresentam comportamento de fluidos viscosos, se deslocando na forma de escoamento

rápido (AUGUSTO FILHO, 1992; FERNANDES E AMARAL, 1996; INFANTI JR. 1998). Por ser o movimento de interesse no presente trabalho, as corridas de massa serão detalhadas a seguir.

### 3.2 Caracterização das corridas de massa

As corridas de massa têm sido objeto de estudos em todo o mundo em função do grande potencial destrutivo que possuem. Os danos causados estão relacionados com a intensidade do processo, sua dimensão e área de abrangência. O entendimento dos fatores que influenciam nesses eventos permite a previsão de sua ocorrência e frequência de retorno, bem como avaliação dos danos, projeção de obras de contenção e monitoramento das áreas de risco.

Para Guidicini e Nieble (1984), as corridas de massa podem ser conceituadas como:

[...] formas rápidas de escoamento, de caráter essencialmente hidrodinâmico, ocasionadas pela perda de atrito interno, em virtude da destruição da estrutura, em presença de excesso de água. Uma massa de solo, ou de solo e rocha, pode fluir como um líquido se atingir certo grau de fluidez. (GUIDICINI E NIEBLE, 1984).

Nas definições de Augusto Filho (1992), Infanti Jr. (1998), Takahashi (1998) e Gramani (2001), as corridas possuem dinâmica híbrida, regida pela mecânica dos solos e dos fluídos, e mobilizam grandes volumes de material em extenso raio de alcance. Para Varnes (1978) a corrida é uma forma de movimento rápido, que envolve uma massa composta por sólidos granulares, ar e água, e as propriedades do fluxo variam de acordo com o conteúdo de água-argila.

Segundo Infanti Jr. (1998) há divergências na literatura quanto às denominações dos processos de corridas de massa. Muitos autores adotam classificações conforme o tipo de material mobilizado e a velocidade do processo. Hungr *et al.* (2000) e Polanco (2010), classificam as corridas de massa de acordo com o Quadro 2.

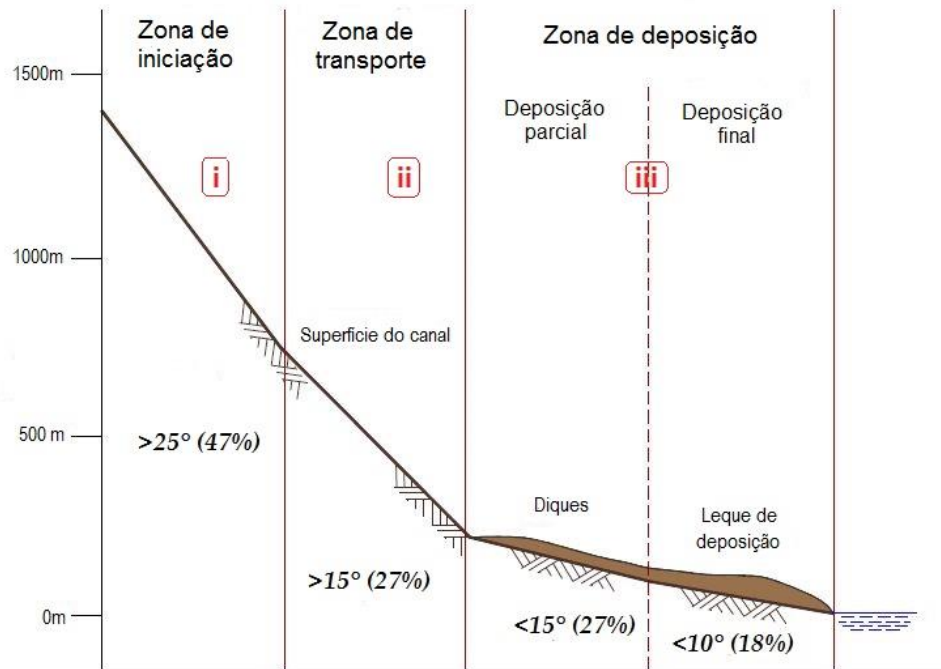
**Quadro 2:** Classificação das corridas de massa baseada no tipo de material e velocidade.

| Classificação   | Tipo de material   | Velocidade                                   |
|---|--|--|
| <b>Fluxo de detritos</b><br>( <i>Debris Flow</i> )          | Detritos saturados, não plásticos, em canal, com índice de plasticidade (IP) <5%.          | Movimento rápido a extremamente rápido       |
| <b>Fluxo de lama</b><br>( <i>Mud Flow</i> )                 | Lama e/ ou detritos saturados, em canal, com alto teor de água e alta plasticidade, IP>5%. | Movimento rápido a extremamente rápido       |
| <b>Enxurrada de detritos</b><br>( <i>Debris flood</i> )     | Afloramento de água com grandes quantidades de detritos, confinado em canal.               | Movimento muito rápido                       |
| <b>Avalanche de detritos</b><br>( <i>Debris Avalanche</i> ) | Material superficial, parcial ou totalmente saturado, não confinado em canal.              | Movimento muito rápido a extremamente rápido |

**Fonte:** Polanco (2010).

As corridas de massa podem ainda ser analisadas em três aspectos ou zonas: geração, transporte e sedimentação. Assim, Vandine (1996) resume essas características (Figura 2):

**Figura 2:** Zonas diferenciadas em corridas de detritos canalizadas.



Fonte: Vandine (1996).

- (i) A zona de iniciação, onde são geradas as corridas de massa, corresponde a áreas que possuem declividade maior que 25°;
- (ii) A zona de transporte e erosão, correspondente a área de ocorrência do fluxo, apresenta declividades entre 15°-25°.
- (iii) A zona de deposição, onde ocorre a sedimentação, é subdividida em zona de deposição parcial e zona de deposição final. A primeira corresponde aos diques, em geral com declividade entre 10°-15° e a segunda aos leques de deposição, com declividade menor que 10°.

O autor expõe que esses parâmetros podem variar de acordo com a geometria dos canais, composição, granulometria dos detritos, etc. Além disso, os diferentes processos classificados dentro das corridas de massa tendem a ocorrer em porções específicas do perfil apresentado por

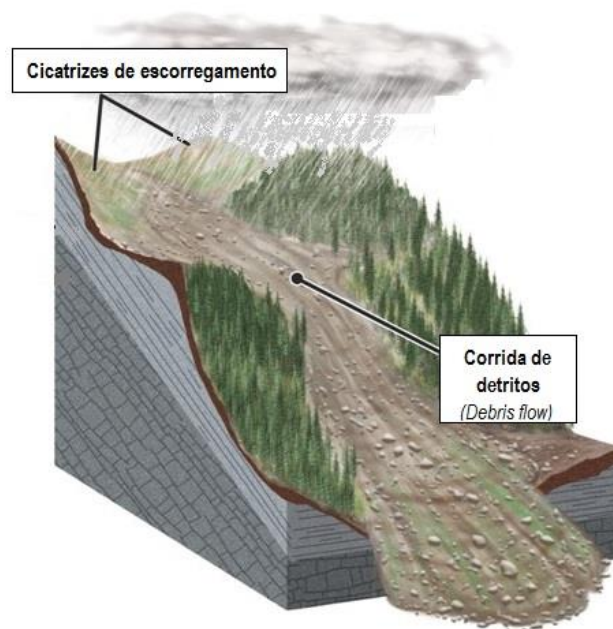
Vandine (1996). Por exemplo, a corrida de detritos geralmente se associa à zona de iniciação e conforme o processo evolui, o fluxo de lama se concentra na zona de transporte e erosão.

Além da declividade, outros fatores geomorfológicos e geológicos influenciam o processo. No subcapítulo a seguir estes serão detalhados para as corridas de detritos (*debris flow*).

### 3.3 Condicionantes das corridas de detritos

As corridas de detritos envolvem o fluxo de uma massa composta por lama, rochas e outros detritos superficiais (Figura 3). Sua dinâmica se relaciona a fatores geológicos, pedológicos, geomorfológicos, hidrológicos, climáticos, de vegetação, além da ação antrópica (HONG *et al.*, 1985; NELSON e Rasely, 1990 *apud* GRAMANI, 2001). Estes fatores contribuem tanto na deflagração, quanto no desenvolvimento do processo.

**Figura 3:** Esquema simplificado de uma corrida de detritos



**Fonte:** Press. (2006).

As corridas de detritos podem ser resultado da evolução de outros tipos de movimentos de massa, com destaque para os escorregamentos; em seu percurso, a massa escorregada pode encontrar canais de drenagem, aumentando sua fluidez e velocidade do processo, que se torna um fluxo de detritos/lama. (TAKAHASHI, 1981; IPT, 1987; GRAMANI, 2001; MARCELINO, 2003; NERY, 2016). Para Polanco (2010) os movimentos de rastejo também podem evoluir para

corridas, caso adquiram uma superfície de ruptura definida. Avelar *et al.* (2006) apresentam as quedas de blocos como um importante deflagrador das corridas de detritos, pois seu impacto no material saturado pode levar à liquefação instantânea.

Quanto ao contexto geológico, para Gramani (2001) não há necessariamente um terreno mais suscetível a corridas de massa, porém há maior frequência em ambientes de solos residuais espessos, depósitos coluvionares e tálus, aluviões e terraços aluvionares. O autor destaca que as corridas de detritos são mais frequentes em terrenos cristalinos, pois sua alteração gera partículas mais grosseiras, enquanto nos terrenos sedimentares predominam as corridas de lama (*mud flows*). Polanco (2010) cita a instabilização provocada por estruturas geológicas complexas, tais como falhas e dobras intemperizadas, bem como descontinuidades litológicas.

Os atributos das encostas influenciam sobremaneira na suscetibilidade desses processos. Há destaque para a declividade, pois como demonstrado por Guidicini e Nieble (1984) a tensão cisalhante do solo aumenta com o aumento da declividade da encosta, diminuindo seu fator de segurança. Declividades altas também permitem um maior fornecimento de materiais para as corridas de detritos.

O grau de declividade no qual os movimentos de massa começam a ocorrer é bastante discutido na literatura. Takahashi (1981); Lee *et al.* (2004); Vanacôr (2006), e Filho e Magalhães (2004) mostram estudos que sugerem um intervalo de início entre 15°-20°. É importante ressaltar que esse valor varia de acordo com a natureza do material instabilizado, grau de fraturamento, saturação, etc. Gramani (2005) por sua vez frisa que a faixa mais crítica de eventos está nas declividades acima de 30°.

A morfologia das encostas também é um fator condicionante; de acordo com Gramani (2001) as encostas côncavas a retilíneas são as mais suscetíveis ao desenvolvimento de corridas de detritos, pois possuem maior disponibilidade de material a ser mobilizado.

Características como área e forma da bacia hidrográfica, sistema de drenagens e formas de relevo, também atuam como condicionantes às corridas de detritos. Esses atributos controlam a concentração e distribuição das águas ao longo do terreno, além da magnitude de vazão. As áreas que possuem tempo curto de concentração e picos de vazão elevados serão mais propensas ao desenvolvimento de corridas de detritos (GRAMANI, 2001).

As bacias menores e circulares são mais críticas à ocorrência de corridas de detritos. Autores sugerem valores de até 10 km<sup>2</sup> de área e Índice de Circularidade (*Ic*) próximo a 1, de

modo que nessas bacias o tempo de concentração é menor e a vazão maior (COSTA, 1984; VANDINE, 1996; GRAMANI, 2001; IPT, 2002). Em situações que as águas pluviais se concentram mais rapidamente, o potencial erosivo se torna maior e pode mobilizar materiais mais grosseiros, favorecendo assim as corridas de detritos.

Para Costa (1984), as bacias menores e circulares são mais suscetíveis também por frequentemente estarem próximas a barreiras geográficas, que devido a seu efeito orogênético, apresentam maiores índices pluviométricos. Atualmente, as chuvas são consideradas um dos principais agentes deflagradores de corridas de detritos (VARNES, 1978; TAKAHASHI, 1981; GUIDICINI E NIEBLE, 1984; IPT, 1987; GRAMANI, 2001; AUGUSTO FILHO, 1998).

Sobre a relevância da pluviosidade, Guidicini e Nieble (1984, p.11) afirmam “[...] quase todos os escorregamentos registrados em nosso meio fisiográfico estão associados a episódios de elevada pluviosidade, de duração compreendida entre algumas horas até alguns dias”. Gramani (2001) afirma a importância das chuvas fortes nos processos de corridas de detritos, pois promovem instabilizações por escorregamentos e mobilização dos materiais, provocando intensa erosão da encosta.

Os índices pluviométricos críticos serão diferentes para cada região, variando em função de fatores geológicos, geomorfológicos e climáticos locais. Apesar disso, Guidicini e Nieble (1984) assumem que eventos de índices pluviométricos acima de 250 mm-300 mm são capazes de desencadear movimentos de massa em praticamente qualquer circunstância. Contudo, não se pode desprezar a importância das chuvas acumuladas anteriormente, que diminuem a estabilidade e a resistência das encostas, condicionando o ambiente aos eventos de escorregamento e corridas de detritos. Para Tatizana *et al.* (1987a) chuvas acumuladas a partir de quatro dias são efetivas no processo de escorregamentos.

Os parâmetros supracitados podem ter maior ou menor grau de influência no processo de corridas de detritos, a depender da área estudada. Desse modo, é importante que a suscetibilidade seja calculada a partir da análise integrada destes fatores. Em áreas habitadas ou próximas aos centros urbanos, as atividades antrópicas devem ser consideradas, visto que podem intensificar ou até mesmo deflagrar os processos de escorregamento e/ ou corridas de massa.

### **3.4 Movimentos de massa na região sul e sudeste do Brasil**

O Brasil é atualmente o sétimo país do mundo mais afetado por desastres naturais, sendo a maioria dos casos referentes a escorregamentos e/ ou corridas de lama e detritos (UNISDR,

2015). Historicamente há destaque para a região Sul e Sudeste no cenário de movimentos de massa (Quadro 3).

**Quadro 3:** Principais eventos de movimentos de massa no sul e sudeste do Brasil.

| Local  | Ano  | Área (km <sup>2</sup> )                                      | Precipitação (mm/h)          | Danos   |
|--|------|--|------------------------------|---|
| Serra das Araras, RJ                                     | 1967 | —  | 114 mm/ 1h<br>275 mm/ 24h    | Aprox. 1200 mortos, > 100 casas destruídas, danos em rodovias.                |
| Caraguatatuba, SP  | 1967 | —  | 420 mm/ 24h<br>586 mm/ 48h   | 120 mortos, 400 casas destruídas, danos em rodovias.                          |
| Campos do Jordão, SP                                     | 1972 | —  | —                            | 17 mortos, 60 casas soterradas.   |
| Tubarão, SC  | 1974 | —  | 394 mm/ 72h<br>742 mm/ 16 d  | 195 mortos; cidade inundada com detritos                                      |
| Grota Funda, SP  | 1975 | —  | —                            | Danificação dos pilares da ponte ferroviária                                  |
| Rio Cachoeira, SP  | 1976 | 4 km <sup>2</sup>  | 40 mm/ 1h<br>276 mm/ 24h     | Inundação da indústria da Copebrás com lama e detritos.                       |
| Petrópolis, RJ   | 1988 | —  | 145 mm/ 24h<br>414 mm/ 144h  | 171 mortos, 5000 casas danificadas  |
| Rio das Pedras, Cubatão, SP                              | 1994 | 2,64 km <sup>2</sup>   | 60 mm/ 1h                    | Inundação da refinaria da Petrobras com detritos, interrompendo as operações. |
| Timbé do Sul, SC   | 1995 | 23,1 km <sup>2</sup>   | 500 mm/ 1h                   | 29 mortos, 20 casas destruídas, perdas na agricultura                         |
| Rodovia de Ubatuba, SP                                   | 1996 | —  | 10 mm/ 10 min<br>442 mm/ 13h | Danificação da rodovia, necessitando estabilização da encosta                 |
| Rodovia Anchieta, SP                                     | 1999 | —  | 128 mm/ 24h<br>274 mm/ 72h   | Tráfego interrompido por várias semanas                                       |
| Lavrinhas, SP  | 2000 | 17,5 km <sup>2</sup>   | 70 mm/ 1h                    | 11 mortos, várias casas e pontes destruídas                                   |
| Vale do Itajaí, SC                                       | 2008 | —  | 185 mm/ 48h                  | 135 mortos, 2 desaparecidos e 32.853 pessoas desalojadas.                     |
| Córrego D'antas e Córrego das Vieiras, Nova Friburgo, RJ | 2011 | 52 km <sup>2</sup> (D'antas)<br>33 km <sup>2</sup> (Vieiras) | 266 mm/ 48h                  | 429 mortos, 3.220 desalojados, 2.031 desabrigados e vários desaparecidos      |
| Teresópolis, RJ  | 2011 | 12 km <sup>2</sup>   | 124 mm/ 24h                  | 343 mortos, 9.110 desalojados, 6.727 desabrigados e vários desaparecidos      |
| Petrópolis, RJ   | 2011 | 36 km <sup>2</sup>   | —                            | 71 mortos, 6.223 desalojados, 191 desabrigados.                               |
| Serra da Prata, PR                                       | 2011 | 50 km <sup>2</sup>   | 231 mm/ 24h<br>348 mm/ 72h   | 1 morto e várias pessoas feridas. Destruição de casas, ruas, estradas.        |
| Ribeirão Cágado, SP                                      | 2013 | 0,26 km <sup>2</sup>   | 273 mm/ 24h                  | Danos na adutora da Sabesp  |
| São Sebastião, SP  | 2016 | —  | 218 mm/ 12h                  | 2 mortos e 26 famílias desalojadas  |
| Grande São Paulo, SP                                     | 2016 | —  | 191 mm/ 12h                  | 25 mortos e 4 mil desabrigados  |

Fonte: Gramani (2001), Kanji *et al.* (2003), Polanco (2010), Nery (2016).

### 3.4.1 Evento de Caraguatatuba – 1967

No contexto da área de estudo, o evento de corridas de massa de Março de 1967 na cidade de Caraguatatuba é muito significativo. Este é considerado o terceiro maior desastre natural ocorrido no Brasil, ficando atrás apenas dos eventos da Serra das Araras – RJ (1967) e de Nova Friburgo – RJ (2011).

**Figura 4:** Cicatrizes do escorregamento de 1967 nas escarpas da Serra do Mar em Caraguatatuba/SP.



**Fonte:** Cruz (1974)

Segundo Gramani (2011) o processo começou a partir de escorregamentos generalizados, que foram canalizados ao atingir as drenagens principais, transformando-se rapidamente em fluxo de detritos. Os processos sofreram variação no tempo e no espaço, passando de corridas de detritos/ blocos de rocha (*debris flow*), para corridas de lama (*mud flows*) e para enchentes com alta concentração de sólidos (*mud flood*).

Em função da maior ocupação existente no Vale do Rio Santo Antônio, os danos gerados nessa área foram maiores e, portanto os estudos se concentram preferencialmente nessa bacia. Apesar disso, Gomes *et al.* (2008) destacam outras bacias afetadas, dentre elas a Bacia do Pau D'Alho. O autor sugere que apesar das perdas econômicas e humanas na Bacia do Santo Antônio, a maior mobilização de material em termos volumétricos teria ocorrido no Vale do Rio Camburu.

Os fatores que mais influenciaram o processo foram as altas declividades das encostas e a pluviosidade anormalmente alta daquele ano. Gramani (2001) ressalta que neste evento, a cobertura vegetal, a natureza da rocha e ação antrópica pouco influenciaram no processo, tendo sido as feições topográficas e pluviométricas determinantes.

Os dados pluviométricos registraram 586 mm em 48 horas, o que representa cerca de 35% da pluviosidade anual da região, índice anormalmente alto de acordo com Wolle (1986) *apud* Gramani (2001). Chuvas acumuladas de dias anteriores influenciaram na saturação do solo.

De acordo com Gramani (2001), os materiais mobilizados pelos escorregamentos no vale do Rio Santo Antônio, percorreram uma distância horizontal de aproximadamente 9 km, em desnível de 700m. O material mobilizado variou de partículas de argila a areia, até grandes blocos rochosos com mais de 4 m de eixo maior (Figura 6); em meio a esses sedimentos havia também grande quantidade de galhos e troncos de árvore (FÚLFARO et al., 1976; GOMES et al., 2008).

**Figura 5:** Depósito de blocos rochosos mobilizados no evento de 1967, em Caraguatatuba/SP. Os blocos possuem dimensões métricas e estão suportados por matriz granulométrica mais fina.



Fonte: Gomes (2008)

Estudos acerca da recorrência desses eventos sugerem que este é um processo relativamente comum na área (CRUZ, 1974; FÚLFARO *et al.* 1976; GRAMANI, 2001). Os prejuízos ambientais, sociais e econômicos são enormes, de tal modo que Gramani (2001) destaca que a ocupação atual de novas áreas de risco pela população de Caraguatatuba, pode levar a catástrofes ainda maiores, até mesmo em eventos de menor intensidade pluviométrica.

### 3.5 Mapeamento Geotécnico

Muitas metodologias de mapeamento geotécnico, tanto internacionais quanto nacionais, são propostas. Em seu trabalho de compilação, Zuquette (1987) as separou em metodologias de uso geral e de uso específico, mostrando que cada metodologia possui diferentes formas de

análise dos atributos do meio físico, algumas com finalidades específicas e outras com diversas finalidades.

Quanto aos métodos de realização, Cendrero (1989) os separa em métodos analíticos e sintéticos. Os analíticos estariam relacionados com a elaboração e sobreposição de mapas temáticos, de modo a se obter mapas-diagnóstico. Por sua vez, os métodos sintéticos se baseiam na delimitação de unidades ambientais homogêneas, que guiam o uso e ocupação do solo. Os termos análise integrada e análise multitemática foram empregados por Ross (1995), segundo o qual a primeira possui natureza analítico-sintética e a segunda natureza inicialmente analítica e posteriormente sintética. O Quadro 4 de Vedovello e Mattos (1998) apresenta breve caracterização dos dois tipos de análise:

**Quadro 4:** Caracterização das abordagens integrada e multitemática.

| <b>Tipo de análise</b> | <b>Produto cartográfico</b>  | <b>Implicações</b>   |
|------------------------|--|--|
| Integrada              | Único. Análise integrada dos componentes ambientais: relevo, solo, geologia, vegetação, uso do solo e individualização de unidades com limites concretos no espaço.  | Facilita ações de planejamento territorial   |
| Multitemática          | Múltiplo. Reflete diferentes concepções teóricas, metodológicas e técnico-operacionais, em função dos temas cartografados: geologia, geomorfologia, pedologia, etc.<br><br>Determinação de unidades geotécnicas com limites abstratos no espaço, ao se cruzar diferentes mapas até o mapa-síntese final. | Perda da visão de integração entre os diferentes temas.<br><br>Dificuldade de visualização e de entendimento por planejadores e gestores ambientais. |

Fonte: Vedovello e Mattos (1998).

A análise integrada se relaciona com o método de avaliação do terreno, que segundo Lollo (1995) envolve o reconhecimento, interpretação e análise das feições de relevo, permitindo a divisão da área de estudo em unidades menores. Assim, a avaliação do terreno pode ser compreendida como uma importante ferramenta de análise ambiental.

De acordo com Zuquette e Gandolfi (2004) a avaliação do terreno pode ser feita sob o enfoque fisiográfico ou paramétrico. Nesse sentido, a compartimentação fisiográfica, método adotado na presente pesquisa, pode ser considerada uma etapa da análise integrada.

### 3.5.1 Compartimentação fisiográfica

A fisiografia de uma área diz respeito à descrição e análise dos elementos do meio físico, de ordem geomorfológica, geológica, pedológica e hidrológica. Assim, o método de compartimentação fisiográfica consiste na divisão de uma região em áreas ou unidades que apresentam características fisiográficas homogêneas e diferentes das áreas adjacentes (VEDOVELLO, 2000). Este método é bastante aplicado na caracterização geológico-geotécnica e avaliação da suscetibilidade a processos em diversos estudos.

De acordo com Vedovello (2000) a análise dos elementos deve ser feita de modo integrado, pois um mesmo elemento fisiográfico pode ter comportamento diferente em função da ocorrência e/ou ausência de outro elemento no terreno. Analogamente, um mesmo elemento pode ter maior ou menor influência na dinâmica dos processos, de acordo com o ambiente em que está inserido.

A compartimentação fisiográfica pode ser realizada em diversas escalas, sendo que alguns elementos fisiográficos se destacam mais em determinadas escalas do que em outras. Vedovello e Mattos (1998) expõem a terminologia adotada para as unidades conforme a escala do estudo, sendo em ordem decrescente: Província, Zona, Subzona e Unidade. Na presente pesquisa será adotada a compartimentação em unidades, que devem apresentar litologia, forma de relevo e perfil de alteração constante em seu limite de ocorrência.

Atualmente, o uso de produtos de sensoriamento remoto, tais como fotografias aéreas e imagens de satélite, tem contribuído significativamente na cartografia geotécnica, sobretudo no método da compartimentação fisiográfica (SOARES & FIORI, 1976; VEDOVELLO & MATTOS, 1998; ZAINÉ, 2011). As técnicas de fotointerpretação tem como vantagem a precisão cartográfica e podem ser facilmente reproduzidas em outras áreas de estudo.

A interpretação de imagens aéreas permite a inferência de informações geotécnicas do terreno, através da correlação entre as propriedades texturais da imagem com propriedades geotécnicas. Diversos trabalhos mostram a correlação entre variações de propriedades físico-químicas dos materiais, com as características e propriedades das imagens aéreas – tons de cinza, densidade de elementos texturais, etc. (SOARES E FIORI, 1976; ZUQUETTE, 1987; LOLLO, 1991; VEDOVELLO, 2000; ZUQUETTE E GANDOLFI, 2004; ZAINÉ, 2011).

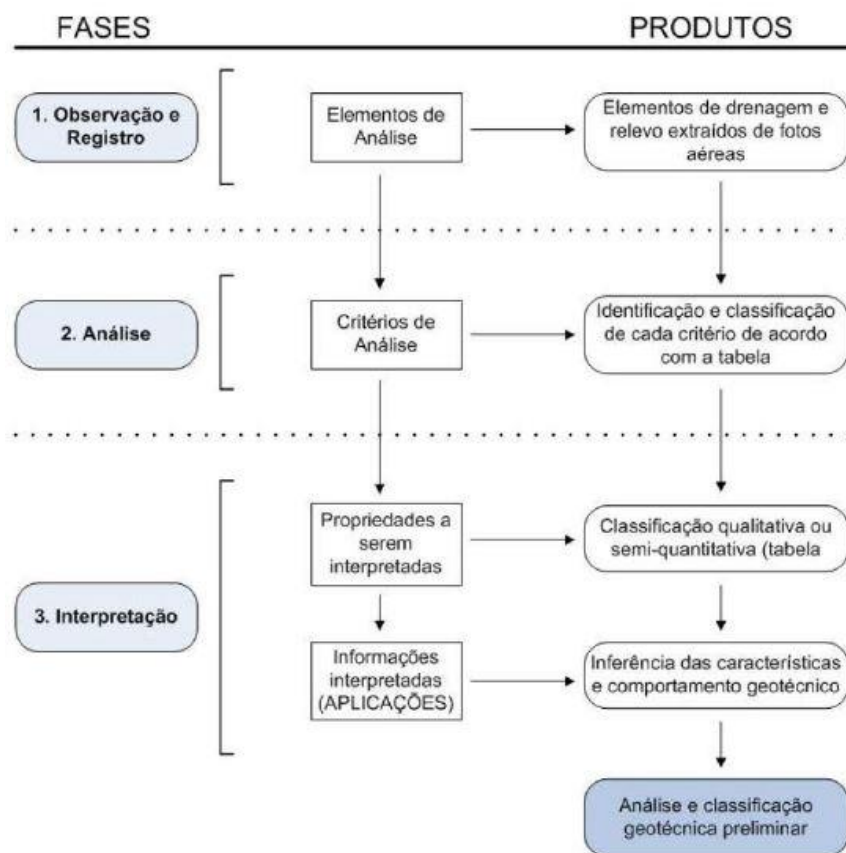
Para Soares e Fiori (1976) a fotointerpretação possui três etapas fundamentais:

- Fotoleitura: Reconhecimento e identificação dos elementos das imagens com os objetos correspondentes e sua repartição;
- Fotoanálise: Estudo das relações entre as imagens, associação e ordenação das partes de imagens;
- Fotointerpretação: Estudo de imagem fotográfica visando à descoberta e avaliação, por métodos indutivos, dedutivos e comparativos do significado, função e relação dos objetos correspondentes às imagens.

Para Zaine (2011), a análise da densidade textural permite a divisão das unidades pela identificação e separação de litologias que apresentam diferentes comportamentos quanto sua permeabilidade e escoamento superficial. Associando essas informações com a delimitação das estruturas geológicas observadas na imagem, é possível traçar uma correlação dessas características com os processos de escorregamento e corridas de massa.

As fases de análise e interpretação geológica na delimitação das unidades fisiográficas, bem como seus produtos segundo Zaine (2011), são apresentadas na Figura 6.

**Figura 6:** Fases e produtos das etapas de análise e interpretação fotogeológica, segundo Zaine (2011). :



### 3.6 Avaliação de Suscetibilidade

O conceito de suscetibilidade pode ser entendido como a predisposição de uma área à ocorrência de determinado fenômeno, independente de seu potencial destrutivo e período de recorrência (BRITO, 2014). Desse modo, a avaliação da suscetibilidade deve considerar os fatores condicionantes de ordem geológica, geomorfológica e antrópica que podem promover a instabilização do terreno.

Atualmente, diversos métodos de avaliação e mapeamento de suscetibilidade aos movimentos de massa têm sido propostos, não havendo um procedimento padrão a ser seguido (TOMINAGA, 2007; BRITO, 2014; REIS, 2016). Porém, a utilização dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG) se tornou muito significativa, pois estes permitem a integração de dados de várias fontes e fornecem diversas ferramentas analíticas (BONHAM-CARTER, 1996; BRITO, 2014; REIS, 2016).

A escolha do método de avaliação da suscetibilidade deve ser baseada nos dados disponíveis, bem como na escala de mapeamento e resultados esperados. Os métodos de mapeamento, porém, podem ser divididos em métodos heurísticos, determinísticos e estatísticos (FERNANDES et al., 2001; VAMN WESTEN, 2004). O Quadro 5 apresenta um resumo das características de cada um destes métodos.

Qualquer método escolhido estará sujeito a incertezas em seus resultados, tanto em função do uso de modelos simplificados em relação à realidade, quanto das variáveis selecionadas, que variam de acordo com a heterogeneidade e anisotropia do meio em que se inserem (SAFAEI et al., 2012; BRITO, 2014).

Na presente pesquisa será adotada metodologia de base heurística, fundamentada na compartimentação fisiográfica para avaliação das características geológico-geotécnicas da bacia de estudo e posteriormente abordagem multitemática para avaliação da suscetibilidade aos processos de corridas de massa.

A base heurística é fundamentada no conhecimento de especialistas que avaliam diretamente a suscetibilidade ou possuem respaldo para ponderar seus condicionantes. Em geral, são realizados a partir de análise geomorfológica ou combinação de mapas (FELL et al., 2008; REIS, 2016).

Na análise geomorfológica, as áreas de risco são avaliadas com base na opinião da equipe de trabalho de campo e apoio de imagens de satélite e fotografias aéreas. Reis (2016) ressalta a dificuldade de reprodução dos dados nesse tipo de análise.

Por sua vez, a combinação de mapas utiliza o conhecimento dos especialistas na atribuição de valores ou “pesos” às características condicionantes aos movimentos de massa. Esse tipo de método possui maior precisão nas decisões adotadas e a reprodução dos resultados é mais satisfatória (MARCELINO, 2003; REIS, 2016).

A vantagem dos métodos heurísticos reside na sua fácil aplicação, gerando resultados rápido. Entretanto, seu uso é mais aconselhável em mapeamentos de pequena e média escala, com objetivo de estabelecer as zonas de maior suscetibilidade (BRITO, 2014; REIS, 2016).

**Quadro 5:** Características dos diferentes tipos de análise de suscetibilidade:

| Tipo de análise       | Técnica                         | Características  | Escala mínima recomendada |                   |                    |
|-----------------------|---------------------------------|--|---------------------------|-------------------|--------------------|
|                       |                                 |  | Pequena<br>1:100.000      | Média<br>1:25.000 | Grande<br>1:10.000 |
| <i>Inventário</i>     | Distribuição dos deslizamentos  | Análise da distribuição espacial dos deslizamentos                                   | Sim <sup>a</sup>          | Sim               | Sim                |
|                       | Atividade dos deslizamentos     | Análise temporal das mudanças das características do meio                            | Não                       | Sim               | Sim                |
|                       | Densidade dos deslizamentos     | Análise da densidade de deslizamentos em unidades de terreno ou a partir de isoietas | Sim <sup>a</sup>          | Não               | Não                |
| <i>Heurística</i>     | Análise geomorfológica          | Considera a opinião de especialistas de campo  | Sim                       | Sim <sup>b</sup>  | Sim <sup>b</sup>   |
|                       | Combinação de mapas             | Considera a opinião de especialistas na atribuição de peso nas variáveis analisadas  | Sim <sup>c</sup>          | Sim <sup>b</sup>  | Não                |
| <i>Estatística</i>    | Análise bivariada               | Calcula a importância da contribuição dos fatores condicionantes                     | Não                       | Sim               | Não <sup>d</sup>   |
|                       | Análise multivariada            | Calcula a equação de previsão a partir de uma matriz de dados                        | Não                       | Sim               | Não                |
| <i>Determinística</i> | Análise de fatores de segurança | Análise baseada em modelos hidrológicos e de estabilidade de encostas                | Não                       | Não               | Sim <sup>d</sup>   |

<sup>a</sup> somente com dados confiáveis de distribuição de cicatrizes de deslizamento

<sup>b</sup> somente com suporte de outras técnicas quantitativas para obtenção de níveis de objetividade aceitáveis

<sup>c</sup> somente se existe uma base de dados confiáveis dos fatores controladores dos escorregamentos

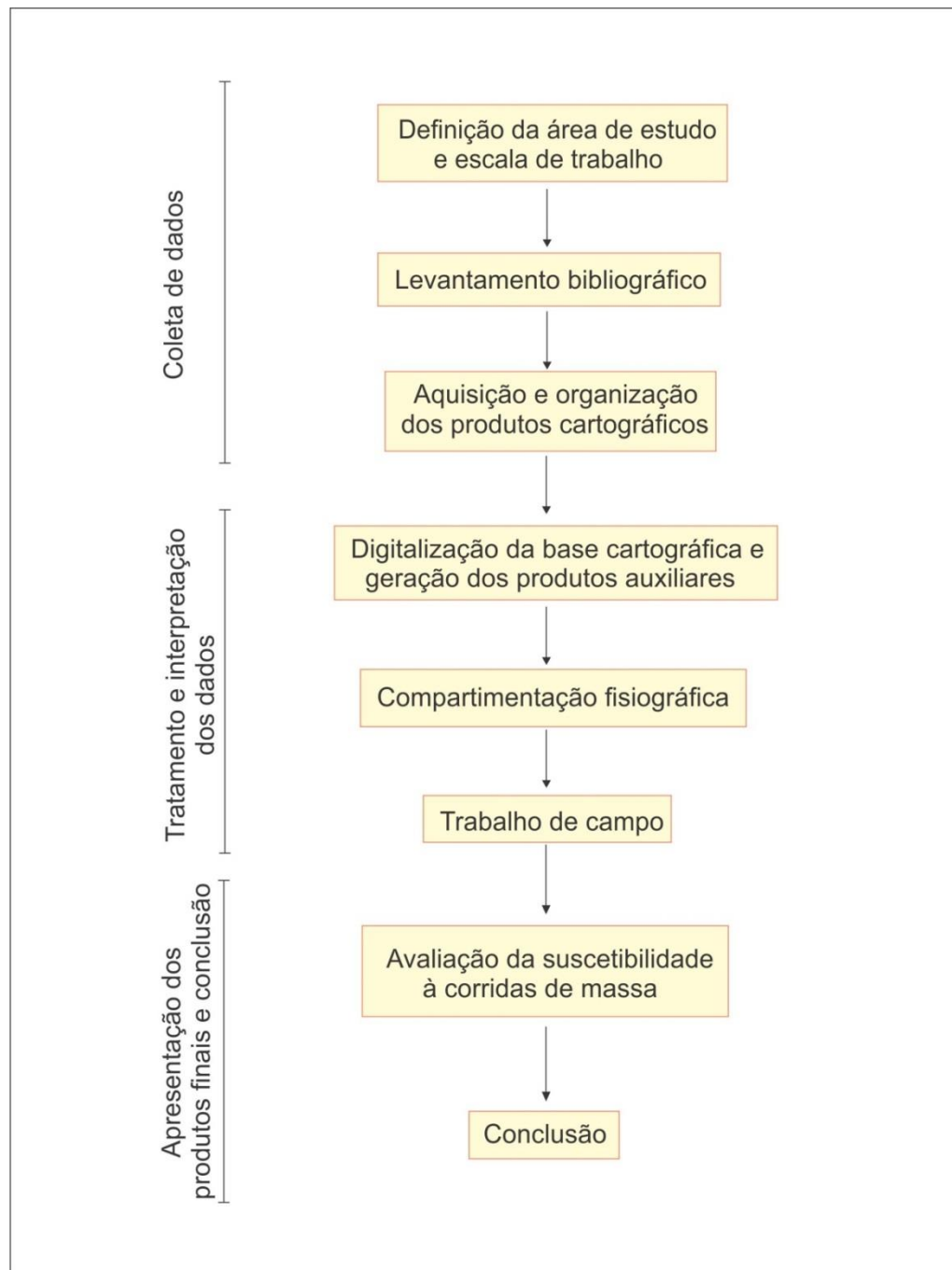
<sup>d</sup> somente em condições de terreno homogêneas, considerando a variabilidade dos parâmetros geotécnicos  
Fonte: adaptado de Soaters e Van Westen (1996).

## 4. MÉTODOS E ETAPAS DE TRABALHO

### 4.1 Etapas da Pesquisa

A pesquisa se dividiu em três fases principais: coleta de dados, tratamento e interpretação dos dados e elaboração dos produtos finais/conclusão. As fases e suas respectivas etapas de trabalho são representadas no fluxograma da Figura 7.

**Figura 7:** Fases e etapas de trabalho



## 4.2 Levantamento bibliográfico

A primeira etapa de trabalho envolveu o levantamento bibliográfico de obras de referência sobre movimentos de massa. Houve enfoque em temas principais como: processos de escorregamentos e corridas de detritos; condicionantes das corridas de detritos; histórico de corridas de massa no litoral sul; métodos de mapeamento geotécnico e avaliação da suscetibilidade a corridas de detritos.

Foram consultados artigos técnicos e científicos, teses, dissertações e relatórios, em bases de dados nacionais e internacionais. Também foram consultados livros base de Geologia de Engenharia, Geologia Ambiental e Geomorfologia, a fim de aprimorar conceitos primordiais.

Esta etapa teve como finalidade a elaboração da fundamentação teórica e caracterização da área de estudo, sendo realizada continuamente ao longo do desenvolvimento do trabalho.

## 4.3 Aquisição e organização dos produtos cartográficos

A aquisição dos produtos cartográficos envolveu o levantamento de mapas geológicos, geomorfológicos, folhas topográficas e imagens aéreas da área de estudo. O material utilizado e suas referências encontram-se abaixo:

- Folhas topográficas em escala 1:50.000 disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas (*IBGE*):
  - Folha de Caraguatatuba (Folha SF 23-Y-D-VI-1) (IBGE, 1974a).
  - Folha do Pico do Papagaio (Folha SF-23-Y-D-V-2) (IBGE, 1975b).
  
- Mapas geológicos em escala 1:50.000 disponibilizados pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (*CPRM*):
  - Mapa geológico da Folha Caraguatatuba (CPRM, 1982).
  - Mapa geológico da Folha Pico do Papagaio (CPRM, 1982).
  
- Ortofotografias de Caraguatatuba em escala 1:10.000 disponibilizadas pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano S.A (*EMPLASA*, 2012).

Os produtos cartográficos foram organizados em um banco de dados criado a partir do *Software ArcGis 10.1*. Com este software também, os mapas e folhas topográficas foram

devidamente georreferenciados em sistema de coordenadas planas UTM (*Universal Transversal de Mercator*), com datum SIRGAS2000.

#### 4.4 Digitalização da base cartográfica e geração dos produtos auxiliares

A geração dos produtos no software *ArcGIS 10.1* necessitou de extração prévia de informações dos materiais cartográficos. Desse modo, inicialmente delimitou-se a bacia hidrográfica de estudo, segundo critérios hidrológicos e geomorfológicos, e gerou-se o arquivo vetorial (*shapefile*) de seu limite.

Dentro do limite estabelecido para a bacia, as folhas topográficas foram utilizadas para vetorização das curvas de nível (de 10 em 10 m), pontos cotados, drenagens e estradas, todos organizados em shapefiles. O limite da bacia também foi aplicado ao mapa geológico, a fim de extrair as informações geológicas referentes à área de estudo.

Os produtos dessa etapa são o Mapa de Declividade e o Modelo Digital de Elevação (MDE).

##### 4.4.1 Mapa de declividade

A elaboração do mapa de declividade foi feita a partir das ferramentas “Create TIN”, “TIN to Raster” e “Slope” do *ArcGIS 10.1*, que utilizam os dados vetoriais das curvas de nível. As duas primeiras ferramentas são algorítmicas e associam a cada pixel um valor relativo à sua cota altimétrica; já a ferramenta “Slope” irá associar aos pixels o valor do ângulo de inclinação do terreno.

Os valores de declividade são expressos em graus e foram pré-estabelecidas 5 classes de declividade (Quadro 6), a fim de detalhar o mapa com maior precisão:

**Quadro 6:** Classes de declividade de acordo com o intervalo em graus.

| Intervalos | Classes de declividade |
|------------|------------------------|
| 0° - 5°    | Muito baixa            |
| 5° - 15°   | Baixa                  |
| 15° - 30°  | Média                  |
| 30° - 45°  | Alta                   |
| >45°       | Muito alta             |

Os intervalos das classes de declividade foram estabelecidos com base em dados da literatura, que sugerem que a maior parte dos movimentos de massa tem início em declividades entre 15°-20°. Em encostas com ângulos abaixo desse intervalo (5°-15°) a ocorrência é baixa e no intervalo de 0°-5° quase não há registro de movimentação. A faixa mais crítica de eventos está nas declividades acima de 30°, sendo então classificada como alta e em encostas com mais de 45° a ocorrência do evento é quase certa (muito alta).

#### 4.4.2 Modelo Digital de Elevação (MDE)

O MDE representa tridimensionalmente a superfície da área de estudo a partir dos dados hipsométricos do terreno. Sua criação foi feita através do software *ArcGis 10.1*, com o uso das ferramentas “Create TIN” e “TIN to Raster”.

O mapa foi separado em classes hipsométricas com intervalos de 20 em 20 metros até ser atingida a cota de 100 m, e acima desta, os intervalos hipsométricos foram definidos de 100 em 100 metros. A divisão de maior detalhe no início teve como objetivo facilitar a caracterização das planícies fluviais.

### **4.5 Compartimentação Fisiográfica**

A compartimentação fisiográfica foi realizada com base no método de Fotogeologia Aplicado de Zaine (2011). O método consiste em três fases de elaboração: observação e registro; análise; interpretação e aplicação. Estas são fundamentadas nas fases de fotoleitura, fotoanálise e fotointerpretação de Soares e Fiori (1976).

Nesta etapa foram analisadas as imagens aéreas da cidade de Caraguatatuba (EMPLASA, 2012) através de estereoscopia e auxílio do *Google Earth*. O mapa de declividade e MDE, gerados em etapa anterior, também foram utilizados para auxiliar na interpretação de algumas informações. Os elementos de relevo e limites das unidades foram cartografados no *ArcGIS 10.1*.

Os elementos identificados e os parâmetros usados para sua classificação e interpretação, foram baseados nos *Quadros de análise fotogeológica* (Figuras 8 e 9) de Zaine (2011).

Os quadros foram aplicados de acordo com a ordem a seguir:

- Análise da densidade textural (elementos de drenagem e relevo)
- Análise das formas e características do relevo
- Análise das estruturas geológicas (elementos estruturais)
- Análise complementar

**Figura 8:** Quadro de análise fotogeológica I.






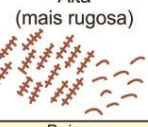





| 1. Análise da densidade textural                         |  | CLASSES   |   |   |
|--|--|---|---|---|
| Elementos de análise                                     | Elementos de drenagem e relevo   | Baixa (0 a 5/10 km <sup>2</sup> )   | Média (5 a 30/10 km <sup>2</sup> )  | Alta (> 30/ km <sup>2</sup> )   |
| Critérios de análise                                     | Densidade dos elementos de drenagem  |    |            |              |
|  | Densidade dos elementos do relevo (dissecação e rugosidade do terreno)                         |    |            |              |
| Propriedade a ser interpretada                           | Permeabilidade (intergranular)   | Alta (Permeável)  | Média   | Baixa (Pouco permeável a impermeável)   |
| Aplicações<br>Informações interpretadas por esta análise | Relação escoamento superficial/infiltração   | Baixa   | Média   | Alta  |
|  | Espessura e características do manto de alteração  | Grande (Espesso; > 5m)  | Média   | Pequena (Raso/rocha aflorante)  |
| 2. Análise das formas e características do relevo        |  | CLASSES   |   |   |
| Elementos de análise                                     | Declives, vertentes, topos, vales, rupturas de declive (quebras de relevo), cristas e escarpas |   |   |   |
| Critérios de análise                                     | a) Amplitude local (variações de cotas na unidade)   | Pequena (0 a 100 m)   | Média (100 a 300 m)   | Grande (> 300 m)  |
|  | b) Declividade   | Baixa (0 - 15%)   | Média (15 - 30%)  | Alta (> 30%)  |
|  | c) Forma de encosta / vertente (* representação em planta)                                     | Convexa   | Côncava  | Retilínea  |
|  | d) Forma do vale (* representação em planta)   | Aberto    |   | Fechado    |
|  | e) Forma do topo   | Aplainados  | Arredondados  | Angulosos   |
|  | f) Feições particulares de relevo  | Identificar e descrever. Associar modelos geológicos já conhecidos<br>*Consultar quadros Howard (1967); Soares e Fiori (1976); Nunes et. al, (1995) |   |   |
| Propriedades a serem interpretadas                       | Solubilidade   | Não solúvel   | Média   | Solúvel   |
|  | Resistência à erosão natural (dureza)  | Baixa (Pouco resistente)  | (Resistência média)   | Alta (Muito resistente)   |
| Aplicações<br>Informações interpretadas por esta análise | Profundidade do topo rochoso   | Profundo  | Intermediário   | Raso a sub aflorante  |
|  | Espessura de materiais inconsolidados  | Espesso   | Intermediário   | Delgado a inexistente   |
|  | Grau de escavabilidade   | Pouco resistente  | Resistência média   | Muito resistente  |
| Registros de processos geológicos                        | Potencial a erosão linear (induzida)   | Médio a alto  | Médio a alto  | Médio a baixo   |
|  | Potencial a movimentos gravitacionais de massa   | Baixo   | Médio a Alto  | Alto  |

Figura 9: Quadro de análise fotogeológica II.

| 3. Análise das estruturas geológicas  |   | CLASSES   |                         |  |  |
|---|---|---|-------------------------|--|--|
| Elementos de análise  | Linhas de rupturas de declive (positivas = proeminentes; negativas = reentrâncias)<br>Lineações e alinhamentos de relevo (traços de foliação e camadas), drenagem e traços de fratura |   |                         |  |  |
| Critérios de análise  | a) Tropa  |   |                         |  |  |
|   | b) Assimetria de relevo e drenagem (geometria das camadas)  |   |                         |  |  |
|   | c) Regra dos Vs   |   |                         |  |  |
|   | d) Sinuosidade* (drenagem)  |   |                         |  |  |
|   | e) Padrões reconhecidos e anomalias   | Identificar e descrever. Associar à modelos geológicos já conhecidos.<br><small>*Consultar quadros Howard (1967); Soares e Fiori (1976); Nunes et. al. (1995)</small> |                         |  |  |
| Propriedades a serem interpretadas  | Planos de estratificação e foliação metamórfica   | Ausentes a pouco marcantes  | Espaciaados             | Adensados                              |  |
|   | Composição e estrutura  | Homogênea   | Mista                   | Heterogênea                            |  |
|   | Plasticidade/ruptibilidade (foliação x fraturas)  | -   | Rúptil                  | Dúctil                                 |  |
|   | Grau de faturamento   | Baixo   | Médio                   | Alto                                   |  |
|   | Permeabilidade Fissural   | Baixa   | Média                   | Alta                                   |  |
| Aplicações informações interpretadas por esta análise   | Partição em blocos: possibilidade de queda de blocos  | Baixa   | Média                   | Alta                                   |  |
| 4. Análise complementar   |   | CLASSES   |                         |  |  |
| Elementos de análise  | Tons de cinza ou coloração; vegetação e uso do solo; feições de processos geológicos  |   |                         |  |  |
| Critérios de análise  | Tons de cinza *   | branco a cinza claro  | cinza médio             | cinza escuro a preto                   |  |
|   | Coloração*  | Claros, amarelados, róseos  |                         | Verdes escuros a pretos                |  |
| Propriedades a serem interpretadas  | Solos derivados de rochas básicas/ácidas ou arenosas/argilosas  | Solos ácidos/ arenosos  | Solos básicos/argilosos |  |  |
|   | Presença de água/umidade no solo  | Solos secos   | Solos úmidos            | Corpos d'água**                        |  |
|   | Cobertura vegetal   | Sem vegetação a pastagem  | Rasteiras e arbustivas  | Arbóreas (florestas e reflorestamento) |  |
| Aplicações informações interpretadas por esta análise   | Solo exposto  | Presente  |                         | Ausente                                |  |
|   | Afloramentos e blocos rochosos  | Presente  |                         | Ausente                                |  |
|   | Presença de N.A. raso/aflorante   | Profundo (> 5m)   | Variável                | Raso (aflorante < 2m)                  |  |
| * A análise deve considerar os diferentes tipos de uso do solo.<br>** Corpos d'água podem apresentar tons claros quando ocorre a reflexão da luz. |   |   |                         |  |  |

Ao fim das etapas de observação, análise e interpretação, foi gerado o Mapa de Unidades Fisiográficas no *ArcGIS 10.1*. Para cada unidade diferenciada foi elaborado um quadro descritivo com suas principais características e análise preliminar de sua suscetibilidade aos processos de corrida de detritos.

#### 4.5.1 Mapa de cicatrizes de escorregamento

O mapeamento das cicatrizes de escorregamento foi realizado durante a etapa de fotoleitura da compartimentação fisiográfica, através do reconhecimento e delimitação de suas feições típicas. De acordo com Barlow *et al.* (2003) *apud* Nery (2016) alguns critérios devem ser considerados nesse processo:

- Tamanho da cicatriz: Reflete a extensão da área atingida pelo processo;
- Vegetação: A presença ou ausência desta é essencial para o reconhecimento das feições na imagem;
- Posição topográfica e declividade.
- Forma: Caracterizada pela concavidade na parte superior e convexidade na parte inferior, indicando a ocorrência de movimento de massa.

As cicatrizes de escorregamento da bacia estudada foram mapeadas a partir da análise visual das Ortofotografias de Caraguatatuba, obtidas junto à EMPLASA (2012). Para cada cicatriz reconhecida foi criado um polígono no *ArcGis 10.1* e extraídas suas informações referentes a posição topográfica, classe de declividade, unidade geológica e forma do perfil de encosta em que ocorrem.

A análise e identificação das cicatrizes nas imagens levou em consideração a diferença de coloração nos locais onde os processos ocorreram, visto que geralmente esses locais apresentam coloração verde mais clara em comparação às áreas não afetadas. Esta cor mais clara ocorre em função da presença de vegetação pioneira, mais jovem, indicando que a vegetação mais antiga foi retirada e possivelmente mobilizada junto a outros materiais nos processos de escorregamentos. Locais de coloração mais amarronzada também são indicativos de cicatrizes de escorregamento, podendo estar relacionados a processos muito recentes onde não houve tempo hábil para o desenvolvimento da vegetação primária, ou ainda locais onde a rocha sã ficou totalmente exposta.

A determinação da posição topográfica e da classe de declividade em que as cicatrizes estão inseridas foi possível através da sobreposição dos polígonos ao MDE e ao Mapa de

Declividade. A mesma técnica foi utilizada para identificação das unidades geológicas correspondentes.

#### 4.5.2 Mapa de Uso e Ocupação do Solo

A elaboração do Mapa de Uso e Ocupação do Solo se deu em duas etapas: a primeira foi a análise visual e interpretação das imagens aéreas, e a segunda o reconhecimento de campo.

As imagens utilizadas foram as Ortofotografias de Caraguatatuba, analisadas através de estereoscópio de espelho e auxílio do *Google Earth*. A diferenciação das áreas foi baseada nos critérios adotados no *Manual Técnico de Uso da Terra* (IBGE, 2013).

Posteriormente, no trabalho de campo foi feito o reconhecimento e detalhamento do uso da terra em alguns pontos visitados, de modo a complementar a delimitação da imagem aérea.

A elaboração do mapa final de Uso e Ocupação do Solo foi feita através do *ArcGIS 10.1*, onde foram criados polígonos para cada classe de uso diferenciada. A ferramenta “*Calculate Geometry*” foi aplicada aos polígonos para obtenção de sua área total e calculou-se a porcentagem que cada classe de uso ocupa na área de estudo.

A nomenclatura adotada para as classes e respectiva cor de mapeamento segue o *Sistema de Classificação de Uso da Terra – SCUT*, do IBGE (2013).

#### **4.6 Trabalho de campo**

Foram realizadas duas etapas de campo, com o objetivo principal de melhor caracterizar as unidades previamente reconhecidas na etapa de compartimentação fisiográfica preliminar, e ajuste dos limites destas unidades.

A definição dos pontos a serem visitados foi feita anteriormente em escritório, e a fim de facilitar a coleta de dados foram elaboradas fichas de campo padronizadas, contendo uma lista de feições geológicas, geomorfológica e geotécnicas a serem observadas em afloramento.

#### **4.7 Avaliação da suscetibilidade a corridas de massa**

A avaliação da suscetibilidade a corridas de massa na bacia de estudo foi feita por meio de análise multitemática (abordagem analítica). A metodologia seguida foi a de Reis (2016), que define o Grau de Suscetibilidade Final (GSF) através da combinação do Grau de Suscetibilidade Natural para Parâmetros da Compartimentação Fisiográfica (GSNF) com o Grau de Suscetibilidade Antrópica (GSA).

O GSNF define classes de suscetibilidade (baixa, média ou alta) com base nos atributos naturais do meio físico, associados a suas propriedades e características geológico-geotécnicas e processos geológicos. Por sua vez, o GSA estabelece classes de suscetibilidade a partir da ocupação e interferência antrópica no ambiente.

Os principais parâmetros, variáveis e condicionantes relacionados ao GSNF e GSA e as respectivas classes de suscetibilidade a que se associam são apresentados no Quadro 7. Também são apresentados os pesos e notas parciais atribuídos a cada classe, definidos para a elaboração dos mapas de suscetibilidade.

Aos atributos de maior influência nos processos de corridas de massa foram atribuídos pesos maiores para o cálculo da suscetibilidade (0,15) e ao restante dos atributos naturais foram mantidos pesos igualitários de 0,10, e de 0,25 para o uso e ocupação do solo.

Os atributos de maior influência dizem respeito ao tipo de solo, declividade e forma/perfil do vale. O tipo de solo influencia no fornecimento de materiais às corridas, visto que materiais de baixa coesão (solos areno-siltosos e aluvionares) são mais facilmente erodidos e tornam a suscetibilidade ao processo mais alta. Já a declividade se relaciona à energia potencial do relevo que influencia na velocidade do processo, sendo que em encostas de declividade alta ( $> 30^\circ$ ) essa velocidade tende a ser maior e conseqüentemente mais alta é a suscetibilidade. Por fim, a forma do vale influencia no processo de erosão fluvial e no transporte de materiais pelos canais, sendo que em vales fechados geralmente ocorre confinamento lateral das drenagens, resultando em aumento da velocidade de erosão e transporte dos materiais mobilizados nas corridas (Reis et al. 2014).

Após a definição dos pesos de influência para cada atributo natural e antrópico, o primeiro mapa gerado foi o GSNF, integrando apenas os fatores físicos. A elaboração deste foi feita a partir do software *ArcGIS 10.1*, onde primeiramente os shapefiles de cada atributo foram convertidos para arquivos do tipo *raster*, e posteriormente integrados de acordo com seus respectivos pesos de influência através da ferramenta *Weighted Overlay (Spatial Analyst Tools)*. Posteriormente, o mapa GSA foi elaborado seguindo o mesmo procedimento, porém considerando apenas os atributos de uso e ocupação da área.

Finalmente, os dados dos mapas GSNF e GSA foram integrados através da ferramenta *Weighted Overlay*, atribuindo peso de 75% de influência para o mapa de suscetibilidade natural e 25% para o de suscetibilidade antrópica. No trabalho de Reis (2016) o autor estabelece o mesmo

peso de influência (50%) para os mapas GSNF e GSA, porém no presente projeto optou-se por diminuir o peso de influência do GSA em função de sua homogeneidade, que acaba por suavizar feições importantes de suscetibilidade das unidades fisiográficas.

Os dados de saída da integração dos mapas diz respeito então ao mapa de suscetibilidade final (GSF) a corridas de massa na área de estudo, elaborado em escala 1:50.00.

**Quadro 7:** Parâmetros para classificação do terreno quanto à suscetibilidade aos processos de corridas de massa.

| FATORES                                | ATRIBUTOS  |  | PESOS  | SUSCETIBILIDADE DE OCORRÊNCIA DE EVENTOS DE CORRIDAS DE MASSA  |   |  |
|--|--|--|--|--|---|--|
|  |  |  |  | BAIXA  | MÉDIA   | ALTA   |
| Naturais/ Intrínsecos<br>(Meio Físico) | Propriedades e Características Geológico-Geotécnicas | Tipo e espessura das rochas, solo e materiais inconsolidados | 0,15   | - Afloramento rochoso e elúvio;<br>- Solos argiloso, areno-argiloso e areno-siltoso espessos (> 5m).   | - Solos arenoso, areno-argiloso e areno-siltoso, com espessuras pequenas e médias (< 5m).   | - Depósitos com blocos rochosos e colúvio;<br>- Sedimentos aluvionares   |
|  |  | Amplitude local  | 0,10   | - Baixa (0 a 100m)   | - Média (100 a 300m)  | - Alta (> 300m)  |
|  |  | Declividade predominante do terreno                          | 0,15   | - Baixa (< 17°)  | - Intermediária (17 a 30°)  | - Alta (> 30°)   |
|  |  | Forma/ Perfil dos vales                                      | 0,15   | - Vales abertos com topos arredondados, em planícies aluviais, baixos topográficos ou em terraços fluviais.  | - Vales abertos em planícies alveolares;<br>- Vales abertos, com topos angulosos ou superfícies planas.   | - Vales fechados e encaixados.   |
|  |  | Formas de encosta e escoamento superficial                   | 0,10   | - Predomínio de encostas divergentes com perfil convexo (dispersoras de água);<br>- Planícies aluviais amplas, com terraços fluviais.                  | - Predomínio de encostas retilíneas e côncavas dispersoras;<br>- Terrenos localizados em meia encosta;<br>- Linhas de concentração de fluxo de água reduzido;   | - Predomínio de encostas convergentes com perfil côncavo (coletoras de água);<br>- Domínio de escoamento concentrado com formação de canais preferenciais e incisão do talvegue; |
|  |  | Densidade textural   | 0,10   | - Baixa densidade de drenagem  | - Média densidade de drenagem.  | - Alta densidade de drenagem.  |
| Antrópicos                             | Ocupação do solo                                     | 0,25   | - Áreas rurais com preservação da mata ciliar e/ou fragmentos florestais;<br>- Área urbana consolidada com crescimento urbano ordenado;<br>- Mata e cultura perene | - Cobertura vegetal deficiente com áreas de solo exposto;<br>- Pastagens, cultural sazonal (plântio de cana de açúcar, milho, soja, etc) e campo sujo. | - Ocupação urbana com alto índice de impermeabilização;<br>- Solo exposto e terraplanagem, áreas de mineração e lixões e área urbana periférica com crescimento desordenado, barramentos e drenagens. |  |
| NOTA PARCIAL                           |  |  | <b>1</b>   | <b>2</b>   | <b>3</b>  |  |

Fonte: Adaptado de Reis (2016).

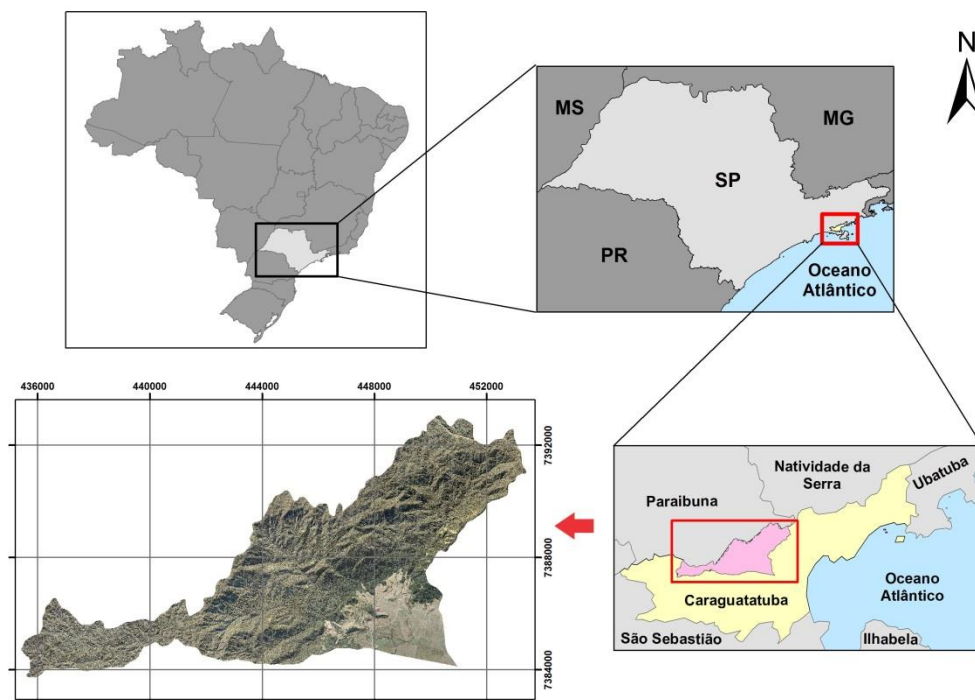
## 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho classificada como uma sub-bacia da Bacia Hidrográfica do Rio Juqueriquerê. Esta última se insere no contexto da Bacia Hidrográfica do Litoral Norte (UGRHI 3), e possui aproximadamente 419,36 km<sup>2</sup> de área, situando-se nas cidades de Caraguatatuba e São Sebastião (CBHLN, 2015).

O Ribeirão Pau D'Alho é um dos principais contribuintes da Bacia Hidrográfica do Rio Juqueriquerê, juntamente com os rios Camburu, Pirassununga, Rio Claro e Perequê, que se unem para formar o Rio Juqueriquerê. A Bacia Hidrográfica Pau D'Alho está totalmente inserida nos limites da cidade de Caraguatatuba, litoral norte do estado de SP (Figura 10):

**Figura 10:** Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho.



A área de estudo está localizada entre três grandes domínios geomorfológicos: A borda sul do Planalto Atlântico, Serra do Mar e Planície Litorânea.

No Domínio do Planalto Atlântico predominam os relevos com altitude entre 800-900m ou com mais de 900 m, com amplitude topográfica variando entre 20 a 200 m. Os padrões de drenagem geralmente estão condicionados à estrutura geológica regional; nas cabeceiras são do

tipo dendrítica, passando à retilínea, retangular e treliça nos médios e baixos cursos (IF, 2006; NERY, 2016).

O Domínio da Serra do Mar é marcado pelas escarpas festonadas como forma de relevo principal, representando uma faixa de encostas com vertentes abruptas, geralmente do tipo côncavo-convexo, intercalados a paredões retilíneos. As encostas geralmente são mais íngremes nas partes altas (declividade  $> 22^\circ$ ), com baixos níveis e patamares na porção intermediária e encostas mais suaves nas partes baixas. Sua amplitude topográfica pode chegar a 800 m e as altitudes até 1200 m. Há forte controle litológico-estrutural, representado principalmente pelo formato em “V” dos vales profundamente entalhados (CRUZ, 1974; CRUZ, 1990; IF, 2006).

O Domínio da Planície Litorânea é marcado por relevos baixos, de altitude inferior a 70 m e de acordo com IF (2006) corresponde à faixa litorânea onde ocorrem os processos geomórficos marinhos e continentais, compreendendo a zona intertidal (delimitada pela linha do litoral e a linha de costa), se estendendo até o sopé das escarpas da Serra do Mar.

Quanto à caracterização geológica da região de Caraguatatuba, esta é constituída predominantemente por rochas do Pré-Cambriano, datadas do Proterozóico Superior e pelos Depósitos Quaternários. De acordo com Gramani (2001), a Serra do Mar é composta por conjuntos litológicos com diferentes graus de fraturamento e alteração, separados por extensas zonas de cisalhamento de direção NE-SW.

As unidades Pré-Cambrianas são representadas pelo Domínio Embu (DE) e Domínio Costeiro (DC). O DE abrange rochas Mesoproterozoicas, constituídas por gnaisses-migmatíticos, com presença de hornblenda e/ou biotita, de composição predominantemente granítica a granodiorítica. Há também no DE ocorrência de rochas metapelíticas, tais como biotita-quartzo-muscovita xistos e granada-biotita xistos, localmente intercalados a filitos e quartzitos (CPRM, 1982; CPRM, 1991).

O DC possui uma complexidade de rochas um pouco maior, abrangendo as rochas do Complexo Costeiro e Rochas ígneas intrusivas, datadas do Neoproterozoico. O Complexo Costeiro é predominantemente composto por rochas gnáissico-migmatíticas de composição granítica a granodiorítica, subordinamente com biotita e hornblenda. Há também gnaisses porfiroblásticos, tais como hornblenda-biotita gnaisse porfiroblástico e granito-gnaisse porfiroblásticos, migmatizados. Em menor escala, há presença de rochas cálcio-silicáticas, relacionadas a gnaisses peraluminosos (CPRM, 1982; CPRM, 1991).

As Rochas Ígneas Intrusivas do DC são representadas por maciços granitoides foliados e pouco foliados, possivelmente com a foliação resguardando relações com fases pré, sin e pós-cinemáticas. São identificados hornblenda-biotita granitos, muscovita-biotita granitos e hornblenda-biotita granitos porfiríticos (CPRM, 1982; CPRM, 1991).

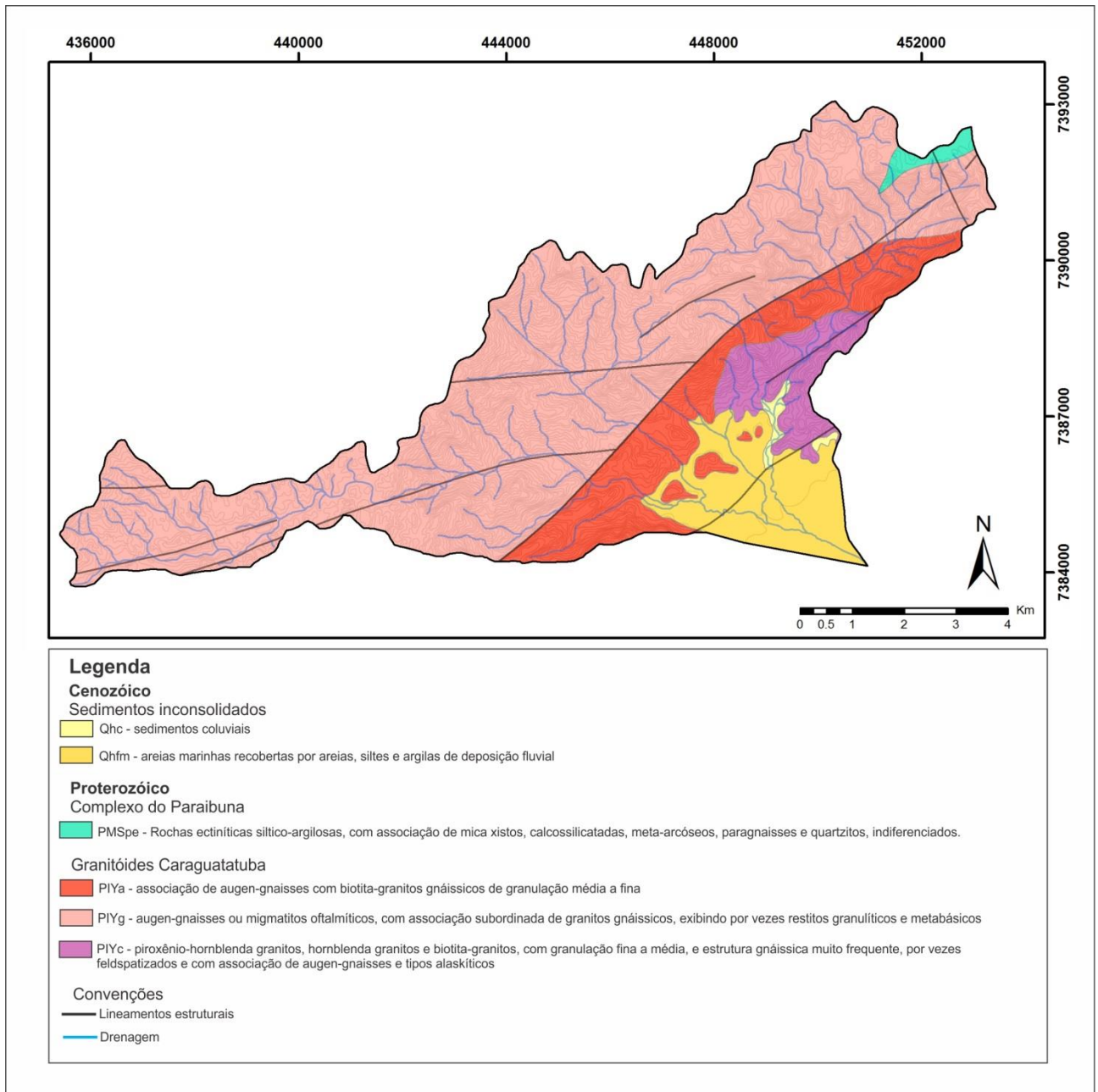
Os Depósitos Quaternários são representados por depósitos lacustre-marinhos indiferenciados, sedimentos praias intermarés constituídos por areias finas, depósitos de areias finas e argilas orgânicas, depósitos fluvio-lagunares (planícies de inundação e meandros abandonados), depósitos fluviais de encosta (colúvios), sedimentos praias atuais, colúvios e elúvios e aluviões em geral.

A identificação destas litologias é muito importante, principalmente no que concerne na identificação de suas características geotécnicas. Um panorama simplificado dos litotipos que compõe a Serra do Mar indica que as rochas graníticas, gnáissicas e migmatíticas possuem grande resistência ao intemperismo, enquanto as rochas xistosas são menos resistentes em função de sua foliação e fraturamento. Os depósitos quaternários também representam áreas muito sensíveis aos processos do meio, devido à sua alta porosidade que favorece a percolação de fluídos. Os litotipos que ocorrem especificamente na bacia de estudo estão representados no Mapa Geológico da Figura 11.

As encostas mais resistentes são compostas predominantemente por granitos, gnaisses e migmatitos. A maior resistência à erosão e alteração destas rochas, faz com que o manto de solo não seja muito espesso nessas áreas, o que de acordo com Gramani (2001) impossibilita que estas encostas forneçam grande quantidade de material para as corridas de massa. O autor ressalta ainda que nestes locais as quedas de blocos são mais comuns, disponibilizando materiais grosseiros que se acumulam nas drenagens.

Aos pés da Serra encontram-se os depósitos coluvionares, geralmente de vários metros de espessura. São reconhecidos pacotes coluvionares relacionados aos antigos movimentos de massa (Mousinho e Silva, 1968 *apud* Gramani, 2001), que podem ser novamente mobilizados em processos de corridas de massa. Nestes depósitos coluvionares são reconhecidos grandes blocos imersos em uma matriz argilo-arenosa e destacada inversão granulométrica, feições características em registros indicativos de corridas de massa.

**Figura 11:** Mapa geológico da Bacia do Ribeirão Pau D'Alho.



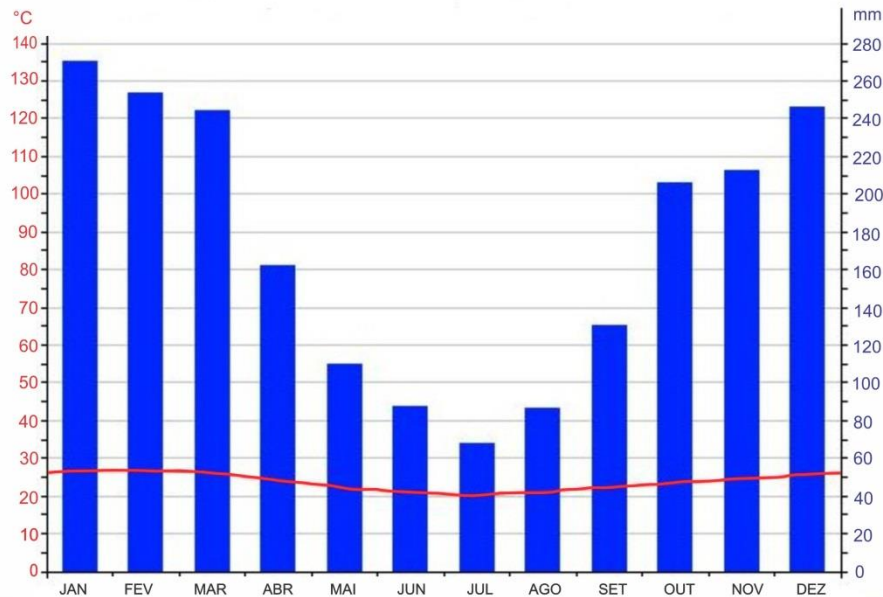
Fonte: Adaptado de CPRM (1982).

Quanto aos aspectos climáticos, Caraguatatuba se situa em uma região de clima tropical chuvoso, sem estação seca definida, com chuvas mais intensas no verão, classificada com *Af* na *Classificação climática de Köepen*. Sua temperatura média anual é de 24,9°C, com máxima média de 28,3°C e mínima média de 20,9°C (CEPAGRI, 2015).

A precipitação média anual da região é de 1757 mm, sendo Julho o mês mais seco com média de 62 mm de precipitação, e Janeiro o mês mais chuvoso com média de 251 mm

(CEPAGRI, 2015). O pluviograma apresentado na Figura 12 ilustra as variações de precipitação e temperatura ao longo do ano, para a cidade de Caraguatatuba.

**Figura 12:** Pluviograma referente à cidade de Caraguatatuba/SP, de clima tropical chuvoso



Fonte: Climate Data (2016).

Nesse quesito, Gramani (2001) ressalta que esta é uma das regiões mais chuvosas do país, pois a Serra do Mar dispõe-se paralelamente à linha de costa, funcionando como uma barreira orogênica que bloqueia as massas de ar e concentra as nuvens de chuva, provocando os altos índices pluviométricos.

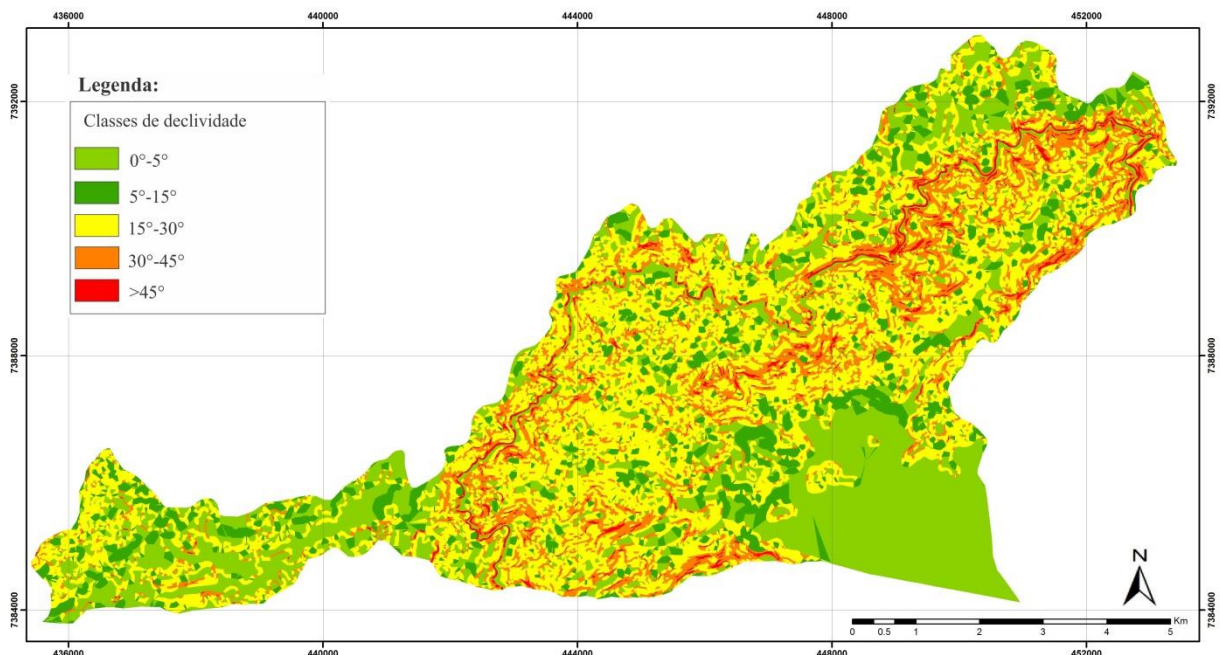
A Serra do Mar destaca-se ainda por sua vegetação, inserida no contexto da Mata Atlântica. De acordo com IF (2006), a região caracteriza-se como *Floresta Ombrófila Densa Montana/ Submontana*, apresentando árvores de porte entre 25-30 m. Por se localizar em uma região de relevo bastante acidentado, as copas das árvores não se tocam, permitindo intensa penetração da luz solar; e em função dessa luz e da alta umidade relativa do ar, há desenvolvimento da mais rica flora de epífitas do país.

## 5.2 Mapas temáticos auxiliares

O Mapa de Declividade e o Modelo Digital de Elevação (MDE) são ferramentas de grande auxílio na realização da compartimentação fisiográfica, pois fornecem informações detalhadas a respeito das encostas e das formas de relevo, respectivamente.

O Mapa de declividade (Figura 13) mostra a distribuição das cinco classes de declividade consideradas, ao longo da bacia de estudo. Cada classe encontra-se representada por uma cor, sendo que as declividades mais baixas são representadas por cores frias, e as cores mais quentes representam as declividades mais altas.

**Figura 13:** Mapa de declividade da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho.



A declividade predominante na área de estudo possui intervalo de 15°-30°, compreendendo cerca de 50,1% da área total da bacia. Sua ocorrência é mais expressiva na porção central, associadamente ao relevo de escarpas. Ainda neste contexto, está a segunda classe de maior ocorrência, com intervalo de declividade de 30°-45°, que ocupa 20,15% da área total.

A classe de declividade de intervalo 5°-15° ocorre principalmente nas áreas de planície fluvial e em algumas pequenas porções distribuídas ao longo de todo o mapa; é a terceira classe de declividade de maior ocorrência na bacia, representando aproximadamente 16,5% de sua área total. Também correlacionada à planície fluvial está a classe de declividade de 0°-5°, que compreende 9,8% da área.

As declividades maiores que 45° representam a classe menos expressiva, ocupando apenas 3,5% da área total e estão geralmente próximas às áreas com declividades mais altas descritas anteriormente.

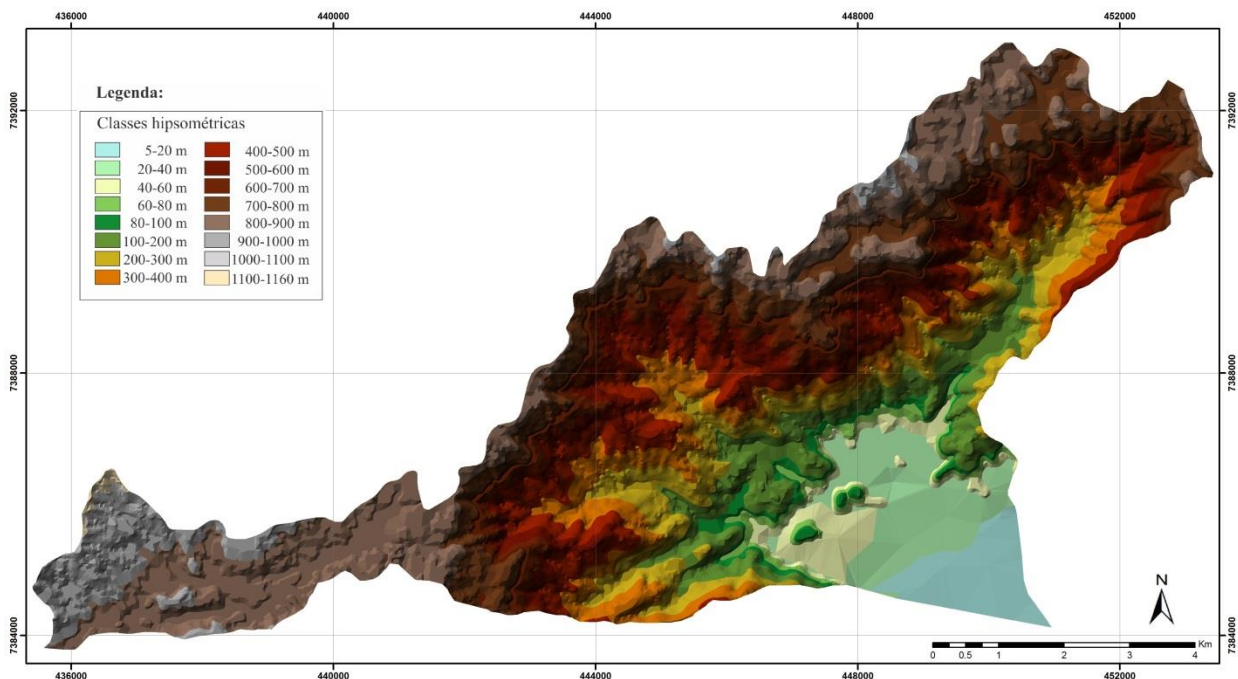
As cinco classes de declividade e seus respectivos valores de área e porcentagem ocupada na bacia são apresentados no Quadro 8.

**Quadro 8:** Porcentagem e área da bacia ocupada por cada classe de declividade.

| Classe de declividade | Área (km <sup>2</sup> ) | Área (%) |
|-----------------------|-------------------------|----------|
| 0° - 5°               | 6,36 km <sup>2</sup>    | 9,77%    |
| 5° - 15°              | 10,74 km <sup>2</sup>   | 16,48%   |
| 15° - 30°             | 32,66 km <sup>2</sup>   | 50,13%   |
| 30° - 45°             | 13,13 km <sup>2</sup>   | 20,14%   |
| > 45°                 | 2,27 km <sup>2</sup>    | 3,49%    |

O Modelo Digital de Elevação (Figura 14) representa o relevo por meio das curvas de nível e subdivide a bacia em classes hipsométricas. Optou-se por separar classes de intervalo 20 em 20 m até ser atingida a cota topográfica de 100 m e acima destes intervalos de 100 em 100 m. Assim, as cores mais frias do mapa representam as porções de menor altitude, que gradualmente vão se tornando cores mais quentes, representando as maiores altitudes.

**Figura 14:** Modelo digital de elevação da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho.



Através do MDE verifica-se que a amplitude topográfica da bacia é bem grande, variando entre cotas topográficas de 18 m até 1160 m. Nota-se que o incremento da altitude ocorre de modo gradual, mas em um intervalo relativamente curto em função dos altos ângulos de declividade das encostas. A maior porcentagem da bacia, porém, é representada por cotas topográficas no intervalo de 700 a 900 m.

A integração dos mapas de declividade e MDE refletem as características do relevo da bacia. A porção sul do mapa é dominada pelo relevo de planície, marcado pelas cotas topográficas baixas e declividades muito baixas. Em sua parte central, o mapa representa o relevo de escarpas, com grande amplitude topográfica ( $> 500$  m) e alta declividade ( $> 30^\circ$ ). No extremo oeste e em pequena porção norte, os relevos de morros paralelos e mares de morros apresentam amplitudes topográficas relativamente menores que a porção central, e predomínio de declividades no intervalo  $15^\circ$ - $20^\circ$ .

### 5.3 Compartimentação Fisiográfica

O Mapa de Unidades Fisiográficas (Apêndice A), elaborado após análise das imagens aéreas, produtos auxiliares e etapa de campo, mostra a delimitação de cinco unidades fisiográficas na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho. A área e respectiva porcentagem ocupada por cada unidade são apresentadas no Quadro 9.

**Quadro 9:** Porcentagem e área da bacia ocupada pelas unidades fisiográficas.

| Unidade Fisiográfica                       | Área (km <sup>2</sup> ) | Área (%) |
|--|-------------------------|----------|
| I – Planície Fluvial                       | 7,31 km <sup>2</sup>    | 11,22%   |
| II – Corpos isolados graníticos            | 0,53 km <sup>2</sup>    | 1,12%    |
| III – Granitos e gnaisses em escarpas      | 40,57 km <sup>2</sup>   | 62,28%   |
| IV- Granitos e gnaisses em mar de morros   | 10,75 km <sup>2</sup>   | 16,8%    |
| V- Granitos e gnaisses em morros paralelos | 6,32 km <sup>2</sup>    | 9,70%    |

Junto ao Mapa de Unidades Fisiográficas encontra-se a tabela descritiva com as principais características geológico-geotécnicas identificadas e interpretadas para cada unidade fisiográfica, elaborada a partir dos parâmetros apresentados nos *Quadros de análise fotogeológica* de Zaine (2011). Para compor a nomenclatura das unidades, utilizou-se a geologia seguida de seu modelado predominante.

### 5.3.1 Unidade I – Planície Fluvial

A Unidade da Planície Fluvial ocupa 11,22% da área da bacia, sendo a terceira mais representativa da área e localiza-se na porção sul do mapa. É formada por depósitos de areias marinhas recobertos por areias, siltes e argilas de deposição fluvial, e está inserida no contexto geomorfológico da Baixada Litorânea.

Representa as porções mais baixas do relevo, com altitudes variando de 18 a 60 metros e apresenta declividades menores que 5°. Não são reconhecidas feições de encostas e vales.

Apresenta baixa densidade de elementos de drenagem e de relevo, o que sugere alta permeabilidade e relação escoamento superficial/ infiltração baixa. Na etapa de campo verificou-se espessa camada de materiais inconsolidados e perfis de solo característicos de depósitos de processos de corridas de massa, com blocos de rocha de tamanhos variados, seixos e troncos envoltos em uma matriz de material areno-argiloso.

A compartimentação fisiográfica sugere baixo potencial à ocorrência de processos de corridas de massa, porém como verificado em campo, é uma importante área de deposição dos materiais provenientes dos movimentos de massa.

Em relação ao uso e ocupação, é dominada por áreas de pastagem e presença de pequeno complexo das instalações da fazenda.

### 5.3.2 Unidade II – Corpos graníticos isolados

Esta é a menor unidade delimitada na bacia de estudo, representando apenas 1,12% de sua área total. Encontra-se em porções restritas e descontínuas em meio a planície, caracterizadas no modelado como elevações isoladas compostas de rochas gnáissico-migmatíticas. Também está inserida no contexto geomorfológico da Baixada Litorânea.

Não possui elementos de drenagem e a densidade de seus elementos de relevo é baixa. Possui amplitude pequena, com cotas topográficas de 40 a 100 m, e declividade média, formando encostas do tipo convexas com topos arredondados.

A permeabilidade da unidade é média e sua relação escoamento superficial/ infiltração é baixa. Possui média espessura do manto de alteração, e também de materiais inconsolidados. A avaliação do potencial aos processos pela fotointerpretação sugere baixa suscetibilidade à ocorrência de corridas de massa.

### 5.3.3 Unidade III – Granitos e gnaisses em escarpas

A unidade ocupa 62,28% de toda a área da bacia, sendo a unidade mais expressiva e está localizada em toda porção central do mapa. Litologicamente é composta por gnaisses de composição granítica a granodiorítica migmatizados, biotita-hornblenda gnaisses e biotita granitos, que tendem a formar solos areno-siltosos a areno-argilosos. Está inserida no contexto geomorfológico da Serra do Mar, com relevo de escarpas com espigões digitados.

Possui média densidade de elementos de drenagem (aproximadamente 20/10 km<sup>2</sup>) e densidade média a alta de elementos de relevo. Apresenta grande amplitude, com cotas variando de 40 a 900 m e declividade predominantemente alta (> 30°), formando vales fechados em encostas de forma côncava a retilínea, com topos angulosos.

A permeabilidade e relação escoamento superficial/ infiltração são intermediárias, assim como o manto de alteração e espessura dos materiais inconsolidados. Em função das altas declividades da área e inexistência de vias de acesso, não foi possível descrever os perfis de alteração desta unidade na etapa de campo.

A avaliação preliminar aponta suscetibilidade média a alta aos processos de corrida de massa.

### 5.3.4 Unidade IV – Granitos e gnaisses em mar de morros

A unidade ocupa 16,8% da área total da bacia, se estendendo de leste a oeste na porção superior do mapa. É composta por rochas granito-gnáissicas, como biotita-hornblenda gnaisses, biotita gnaisses e biotita granito. Geomorfológicamente se insere no contexto do Planalto do Paraitinga, subzona Morraria do Paraitinga, com relevo de mar de morros.

Apresenta média densidade de elementos de drenagem (aproximadamente 25/10 km<sup>2</sup>) e densidade média de elementos de relevo. A amplitude é classificada como média, variando de cotas topográficas de 800 m a 960 m e declividade predominantemente média, resultando em vales fechados com encostas de forma côncava e topos arredondados.

A permeabilidade e relação escoamento superficial/ infiltração são médias. Devido à dificuldade de acesso, os perfis de alteração de solo não foram descritos em etapa de campo. A fotointerpretação, porém, indica média espessura do manto de alteração e também dos materiais inconsolidados. A suscetibilidade preliminar às corridas de massa é avaliada como média a baixa.

### 5.3.5 Unidade V - Granitos e gnaisses em morros paralelos

A Unidade V ocupa 9,7% da área total da bacia, localizando-se no limite extremo oeste do mapa. Seus aspectos geológicos e geomorfológicos são semelhantes ao descrito na unidade anterior, composta por rochas granito-gnáissicas e inserida no contexto do Planalto do Paraitinga, subzona Morraria do Paraitinga, diferenciando-se apenas por seu relevo de morros paralelos.

Apresenta densidade de elementos de drenagem alta (aproximadamente 50/10 km<sup>2</sup>) e alta densidade de elementos de relevo. Suas cotas topográficas variam de 800 a 1200 m, tendo então grande amplitude; a declividade também é alta, configurando vales fechados em encostas de forma côncava com topos arredondados.

Não foi possível a visita de campo para descrição dos perfis de alteração. A permeabilidade é classificada como baixa, e alta relação escoamento superficial/ infiltração. A espessura do manto de alteração é pequena e intermediária para os materiais inconsolidados. A avaliação preliminar sugere suscetibilidade média a alta à ocorrência de corridas de massa nesta unidade.

### 5.3.6 Mapa de cicatrizes de escorregamento

Na análise das imagens aéreas foram identificadas 92 cicatrizes de pequeno porte, apresentadas no Mapa de cicatrizes de escorregamento (Apêndice B). As cicatrizes se concentram majoritariamente no limite sudeste da bacia, e também são identificadas cicatrizes dispersas na porção central da área.

Deste total, 90 cicatrizes se inserem no contexto da Unidade Fisiográfica III (*Granitos e gnaisses em escarpas*) e duas na Unidade IV (*Granitos e gnaisses em mar de morros*). Não foram identificadas cicatrizes de escorregamento nas outras unidades fisiográficas.

A maior parte das cicatrizes localiza-se em encostas de alta declividade, com ângulos de inclinação entre 25° e 40°. Em termos de cotas topográficas, não foi possível traçar um padrão de ocorrência visto que são encontradas tanto em áreas elevadas (500-700 m) quanto em porções mais baixas (80-100 m).

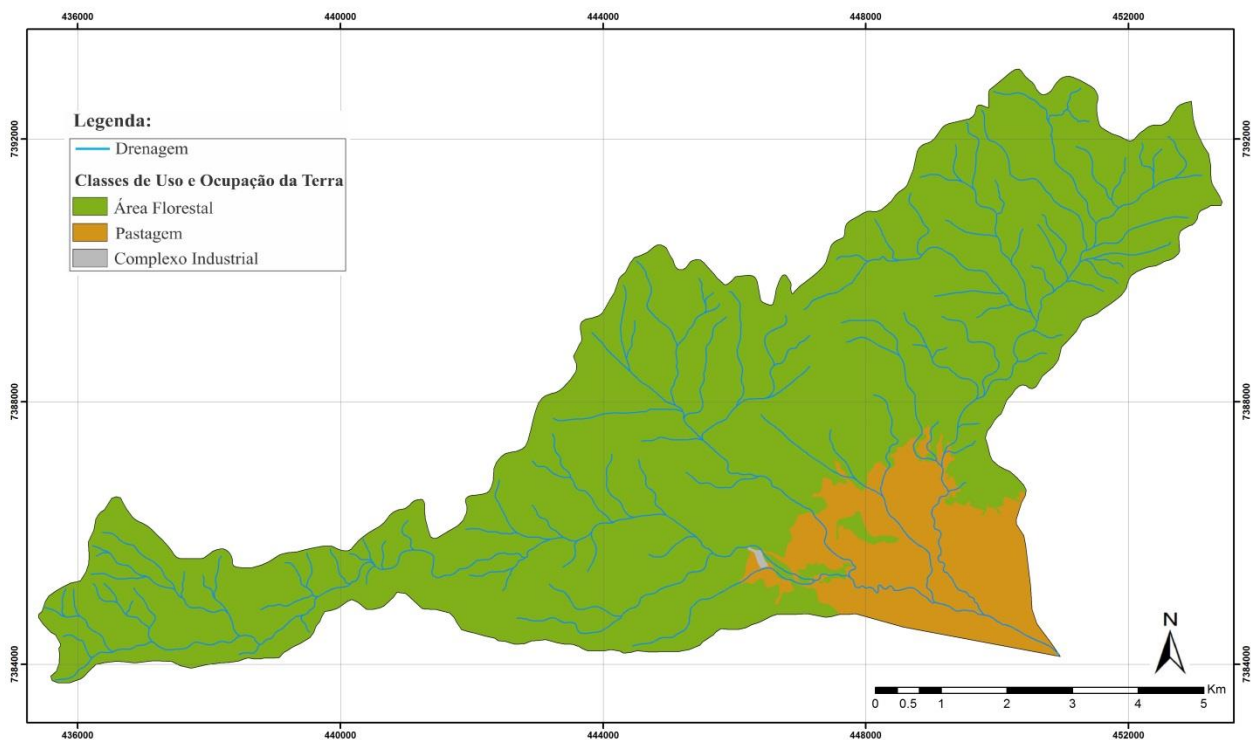
Nota-se que as cicatrizes concentradas na porção sudeste do mapa estão associadas a uma sub-bacia de formato alongado, representando um conflito com alguns dados de literatura. Como exposto anteriormente, muitos autores defendem que a maior suscetibilidade aos movimentos de massa se dá em bacias circulares; no entanto, o que se observa no mapa é que os escorregamentos ocorreram preferencialmente em bacias alongadas e não circulares.

No contexto da área de estudo, as diferenças litológicas não demonstraram influência nos eventos, não sendo possível correlacionar a maior ou menor existência de cicatrizes com um litotipo em especial. Entretanto, na análise das formas de encostas, notou-se que as cicatrizes ocorrem principalmente nas encostas côncavas e côncavas-retilíneas.

### 5.3.7 Mapa de Uso e Ocupação do Solo

Foram identificadas três classes de uso na área de estudo, apresentadas no Mapa de Uso e Ocupação (Figura 15). O Quadro 10 apresenta a denominação de cada classe e suas respectivas áreas.

**Figura 15:** Mapa de Uso e Ocupação do Solo da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho.



**Quadro 10:** Porcentagem e área da bacia ocupada por cada classe de uso e ocupação.

| Classes de Uso e Ocupação | Área (km <sup>2</sup> ) | Área (%) |
|---------------------------|-------------------------|----------|
| Floresta/ Mata Nativa     | 57,29 km <sup>2</sup>   | 87,95%   |
| Pastagem                  | 7,82 km <sup>2</sup>    | 12%      |
| Complexo Industrial       | 0,036 km <sup>2</sup>   | 0,05%    |

A área de Floresta/Mata Nativa possui densa vegetação composta por formações arbóreas de grande porte (> 5m), relacionadas ao contexto da Mata Atlântica, no qual a Serra do Mar está inserida. Possivelmente a área faz parte de uma unidade de conservação, visto os programas desenvolvidos ao longo do *Parque da Serra do Mar* na cidade de Caraguatatuba.

Já a Pastagem é representada por extensas áreas recobertas por vegetação de gramíneas, possivelmente destinadas ao desenvolvimento da pecuária. O pequeno Complexo Industrial identificado diz respeito a galpões de atividade pecuária, desenvolvida pela *Fazenda dos Ingleses*, em parte localizada dentro da área de estudo.

Em grande parte, a Bacia Hidrográfica do Pau D'Alho não possui maior diversificação de atividades em função do seu relevo acidentado, de grande amplitude topográfica e altas declividades, associados a matas densas, aspectos que dificultam qualquer tipo de atividade e/ou ocupação.

#### 5.4 Avaliação da suscetibilidade a corridas de massa

A partir dos critérios estabelecidos para avaliação da suscetibilidade aos processos de corridas de massa na bacia de estudo, foram gerados três mapas: mapa de suscetibilidade natural, mapa de suscetibilidade antrópica e mapa de suscetibilidade total.

##### 5.4.1 Mapa de suscetibilidade natural

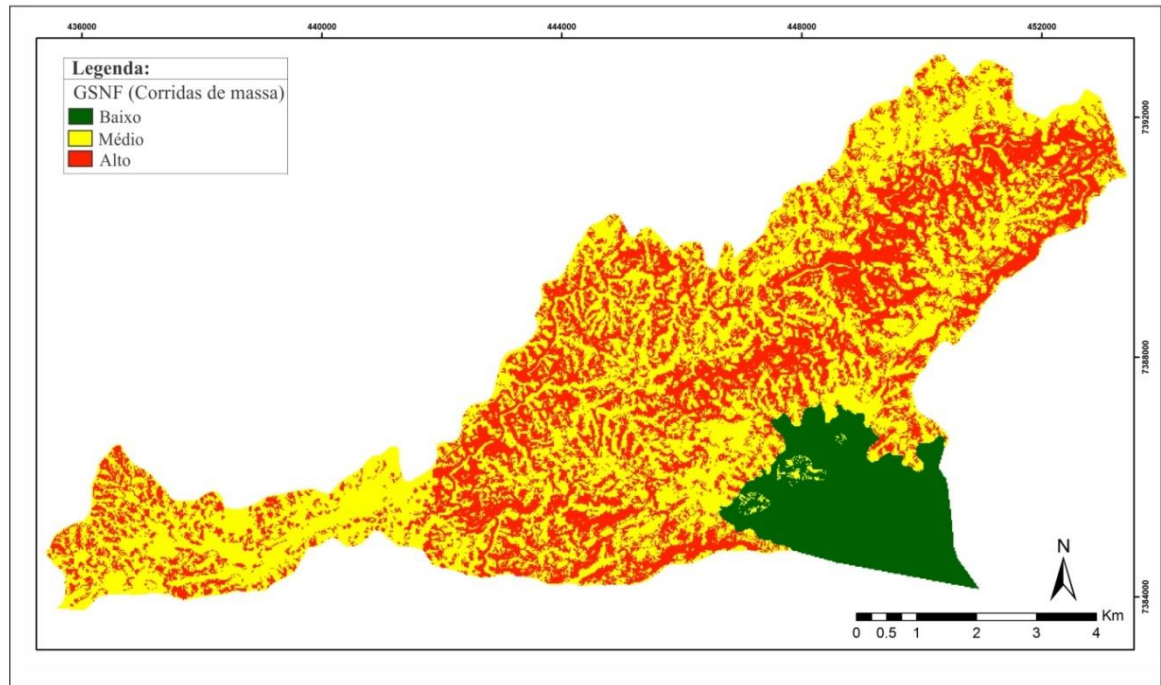
O mapa de suscetibilidade natural (Figura 16) é resultante dos cálculos do Grau de Suscetibilidade Natural de Parâmetros Fisiográficos (GSNF), e ilustra a distribuição espacial das classes de suscetibilidade na área.

A partir da observação do mapa nota-se que as classes de suscetibilidade média e alta são dominantes na área de estudo, ocupando toda a porção central e superior da bacia. A classe de baixa suscetibilidade é a menos expressiva, localizando-se na porção sul da bacia. O Quadro 11 resume a extensão ocupada pelas classes de suscetibilidade:

**Quadro 11:** Porcentagem e área ocupada pelas classes no Mapa de Suscetibilidade Natural.

| Suscetibilidade | Área (km <sup>2</sup> ) | Área (%) |
|-----------------|-------------------------|----------|
| Baixa           | 7,53 km <sup>2</sup>    | 11,55%   |
| Média           | 33,5 km <sup>2</sup>    | 51,41%   |
| Alta            | 24,12 km <sup>2</sup>   | 37,02%   |

**Figura 16:** Mapa de suscetibilidade natural à corridas de massa na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho



A partir da observação do mapa nota-se que as classes de suscetibilidade média e alta são dominantes na área de estudo, ocupando toda a porção central e superior da bacia. A classe de baixa suscetibilidade é a menos expressiva, localizando-se na porção sul da bacia. O Quadro 11 resume a extensão ocupada pelas classes de suscetibilidade:

Correlacionando as áreas de ocorrência das diferentes classes com as unidades fisiográficas, nota-se que a classe de baixa suscetibilidade se restringe aos limites da Unidade Fisiográfica I (*Planície Fluvial*), enquanto as classes média e alta se distribuem ao longo das Unidades III, IV e V. Já a Unidade II apresenta apenas o grau médio de suscetibilidade.

A classe de alta suscetibilidade apresenta maior concentração no contexto da Unidade III (*Granitos e gnaisses em escarpas*), em decorrência das altas declividades associadas a encostas de forma côncava em vales fechados. Sua ocorrência também é expressiva na Unidade V (*Granitos e gnaisses em morros paralelos*) em função dos mesmos fatores, além da baixa permeabilidade atribuída à unidade.

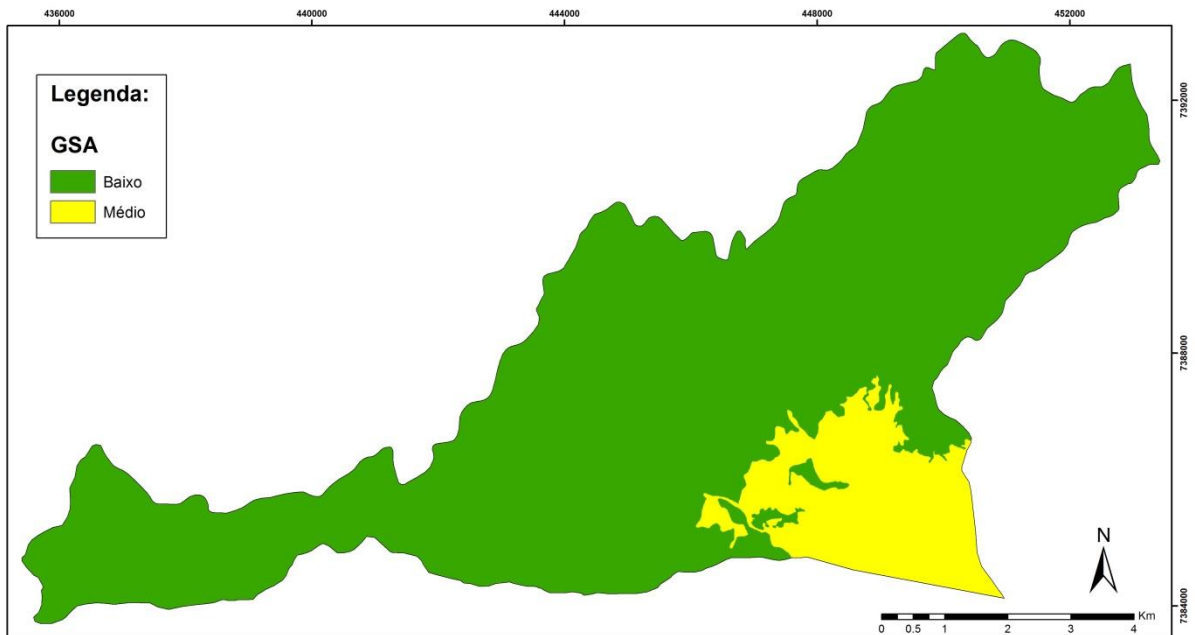
A classe de média suscetibilidade é a mais recorrente na bacia de estudo e se distribui de maneira desordenada por toda a área, sendo encontrada em diferentes porcentagens em todas as unidades fisiográficas, exceto na Unidade I. Entretanto, a Unidade IV (*Granitos e gnaisses em*

*mar de morros*) é a unidade de maior concentração dessa classe, possivelmente em função de sua declividade e amplitude menos acentuadas que nas unidades III e V.

#### 5.4.2 Mapa de Suscetibilidade antrópica

O mapa de suscetibilidade antrópica (Figura 17) é derivado do Grau de Suscetibilidade Antrópica (GSA) atribuído às formas de uso e ocupação reconhecidas na área de estudo.

**Figura 17:** Mapa de suscetibilidade antrópica na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho.



Como exposto anteriormente (*ver item 6.2.7*), a área possui baixa complexidade em termos de uso e ocupação do solo, apresentando apenas duas classes referentes às áreas de floresta/ mata nativa e de pastagens. Consequentemente, o mapa resultante do Grau de Suscetibilidade Antrópica para a área é bastante homogêneo.

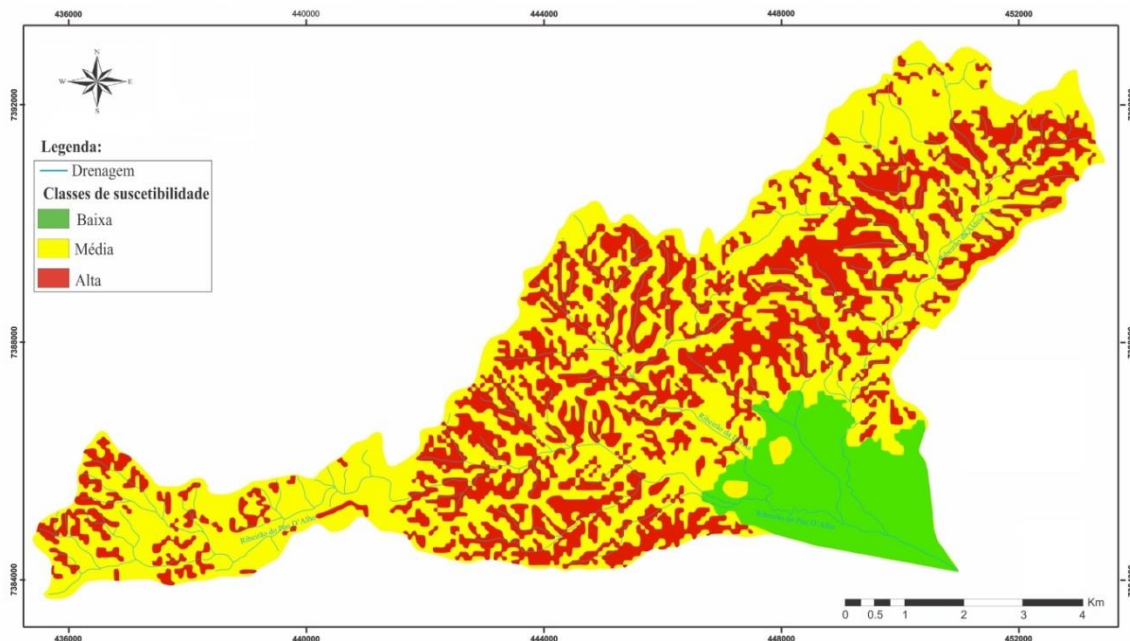
A classe de baixa suscetibilidade representa mais de 70% do mapa e é relativa às áreas florestais. Regiões de florestas preservadas possuem suscetibilidade significativamente menor em função da influência das árvores no ambiente, que ajudam a reduzir os impactos das chuvas no solo, diminuindo a desagregação dos materiais e consequente taxa de erosão. Além disso, em áreas florestais as velocidades de infiltração de água no solo são menores, retardando sua saturação, que é um dos principais fatores associados à deflagração dos processos de corridas de massa.

Diferentemente, às áreas de pastagem são classificadas com médio grau de suscetibilidade, pois deixam os solos mais expostos, favorecendo a rápida infiltração de água e saturação.

#### 5.4.3 Mapa final de suscetibilidade à corridas de massa

O mapa final de suscetibilidade a corridas de massa (Figura 18 e Apêndice C) é resultante do Grau de Suscetibilidade Final, calculado a partir da integração do GSNF e GSA.

**Figura 18:** Mapa final de suscetibilidade a corridas de massa na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho



É possível notar que o mapa de suscetibilidade final é bastante similar ao mapa de suscetibilidade natural apresentado anteriormente; porém a integração com o mapa antrópico permitiu melhor definição na ocorrência das classes, eliminando “manchas” ou pequenas áreas anteriormente identificadas com maior suscetibilidade.

As áreas ocupadas pelas classes no mapa final evidenciam a suavização da suscetibilidade promovida pela integração dos mapas natural e antrópico, conforme apresentado no Quadro 12.

**Quadro 12:** Porcentagem e área ocupadas pelas classes no Mapa Final de Suscetibilidade.

| Suscetibilidade | Área (km <sup>2</sup> ) | Área (%) |
|-----------------|-------------------------|----------|
| Baixa           | 7,21 km <sup>2</sup>    | 11,08%   |
| Média           | 37,70 km <sup>2</sup>   | 57,87%   |
| Alta            | 20,22 km <sup>2</sup>   | 31,04%   |

Esta suavização na suscetibilidade ocorre em decorrência da homogeneidade e grande extensão das classes de uso e ocupação na área de estudo. Devido a esse efeito optou-se por diminuir o peso do mapa antrópico no cálculo do grau final de suscetibilidade, ao contrário dos pesos igualitários (50%) adotados por Reis (2016).

Especificamente para este trabalho, notou-se que a adoção de pesos acima de 25% para o mapa antrópico promove brusca queda nos graus de suscetibilidade da área como um todo, atribuindo média suscetibilidade a quase toda sua extensão. Entende-se que esse tipo de classificação seria equivocado para a área, pois unidades fisiográficas de atributos muito distintos seriam equiparadas, além de se mascarar características específicas das mesmas.

Em relação às unidades fisiográficas, nota-se que novamente as altas suscetibilidades se concentram nas Unidades III e V. Na Unidade IV, as pequenas manchas de classe alta que apareciam no mapa de suscetibilidade natural foram em grande parte eliminadas pela associação com o mapa antrópico, ficando restritas a pequenas porções da unidade. Os graus de suscetibilidade baixo e médio foram mantidos para as Unidades I e II, respectivamente.

Juntas, as Unidades III e V representam mais de 70% de toda a área, demonstrando assim sua influência na suscetibilidade da bacia de modo geral. Além disso, a existência das cicatrizes de escorregamento na Unidade III comprova a ocorrência de processos de movimentação de massa, agravando a suscetibilidade da área. Portanto, a Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho pode ser classificada como uma bacia de suscetibilidade média a alta aos processos de corrida de massa e detritos.

## 6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através dos resultados obtidos durante o desenvolvimento da pesquisa pode-se concluir que a suscetibilidade da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pau D'Alho a corridas de massa está diretamente relacionada com suas características fisiográficas, hidrológicas e pluviométricas.

O mapa final de suscetibilidade corrobora a influência dos atributos fisiográficos apontados na literatura como mais críticos ao processo, principalmente da declividade e formas de encosta e vale, visto que as áreas de maior suscetibilidade, encontradas na porção centro-leste, são equivalentes a encostas côncavas com altas declividades. Além disso, estas áreas correspondem a regiões com maior número de cicatrizes de escorregamento, registros estes que apontam diretamente os locais mais críticos na bacia.

Os parâmetros naturais do meio físico revelam condições extremamente favoráveis aos escorregamentos, mesmo para os índices pluviométricos considerados “normais” na região. Entretanto, vale ressaltar que eventos pluviométricos muito acima da média não são raros na região e agregam grande fluidez aos processos, que tendem a evoluir para corridas de massa. As encostas côncavas concentradoras associadas aos vales fechados e entalhados, característicos da área de estudo, contribuem para a concentração do fluxo nas drenagens, aumentando a energia potencial e velocidade do processo, que poderá então mobilizar materiais cada vez maiores.

Em áreas historicamente afetadas por movimentações de massa, a avaliação geológico-geotécnica é essencial para reconhecimento das feições de maior influência nos processos, permitindo a elaboração de planos de gestão adequados às fragilidades da área. Esses estudos são ainda mais relevantes quando são consideradas as proximidades entre as bacias de alta suscetibilidade e os centros urbanos, tais como ocorre entre a Bacia do Pau D'Alho e a cidade de Caraguatatuba.

O método de compartimentação fisiográfica se mostrou bastante eficiente, trazendo resultados satisfatórios e permitindo grande precisão no detalhamento das características das unidades fisiográficas, inclusive em áreas inacessíveis em trabalho de campo. Além do mais, as inferências geotécnicas e de suscetibilidade preliminar obtidas através da fotointerpretação, mostram grande coerência em relação aos resultados do mapa final.

A metodologia utilizada para avaliação da suscetibilidade se mostrou relativamente adequada, considerando as modificações necessárias nos pesos atribuídos aos mapas de suscetibilidade natural e antrópica. Notou-se que em regiões onde o uso e ocupação é bastante

homogêneo ou predominantemente composto por classes de baixa suscetibilidade, os parâmetros naturais tendem a ser muito suavizados, mascarando a suscetibilidade da área como um todo.

Nesse sentido, seria interessante agregar os atributos morfométricos na avaliação da suscetibilidade final, a fim de minimizar os efeitos provocados pela homogeneidade do mapa antrópico; além de que, as características morfométricas também exercem grande influência nos processos de corrida de massa, tal como apontado na literatura.

Resguardadas suas particularidades, o método é uma ferramenta bastante adequada para definição da suscetibilidade a movimentos de massa em bacias hidrográficas, podendo auxiliar diretamente na elaboração de planos preventivos e emergenciais a esses eventos, a fim de evitar a destruição de moradias, dutos, empreendimentos, barragens e a perda de vidas humanas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 1, 1992, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABMS/ ABGE/ PCRJ. v.2, p. 721-733.

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

AVELAR, A.S.; LACERDA, W.A.; COELHO NETO, A.L. Mecanismos de iniciação de fluxos detriticos no maciço da Tijuca, Rio de Janeiro (RJ): o caso da encosta do Soberbo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, 7, p. 73-83, 2006.

BARLOW, J.; MARTIN, Y.; FRANKLIN, S.E. Detecting translational landslide scars using segmentation of Landsat ETM+ and DEM data in the northern Cascade Mountains, British Columbia. **Can, J. Remote Sensing**, v. 29, p. 510-517, 2003.

BIGARELLA, J.J. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais**. Volume 3. Ed. Florianópolis: UFSC, 2003.

BONHAM-CARTER, G.F. **Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS**. Ottawa: Pergamon, 1996. 398 p.

BRITISH GEOLOGICAL SURVEY. **How does BGS classify landslides?** 2015. Disponível em: <[www.bgs.ac.uk/landslides/how\\_does\\_BGS\\_classify\\_landslides.html](http://www.bgs.ac.uk/landslides/how_does_BGS_classify_landslides.html) > Acesso em: 10 ago. 2016.

BRITO, M.M. **Geoprocessamento aplicado ao mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos no município de Porto Alegre, RS**. Porto Alegre, 2014. 167 p. Dissertação Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2014.

BUENO, B.S.; VILAR, O.M. **Mecânica dos Solos**. Vol. 1. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Geotecnia, 1979.

CBHLN – Comitê de Bacia Hidrográfica do Litoral Norte. Fundamentação da Cobrança pelo Uso da Água UGRHI 03 – Litoral Norte. **Relatório Técnico**. 2015. 111p.

CENDRERO, A. Mapping and evaluation of coastal áreas for planning. **Ocean and Shoreline Management**, v. 12, n. 5, p. 427-462, 1989.

CEPAGRI – Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura. **Clima dos municípios paulistas**. Campinas, 2015. Disponível em: <[www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima\\_muni\\_121.html](http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_121.html)>. Acesso em: 10 set. 2016.

COSTA, J.E. Physical geomorphology of debris flow. In: Costa, J.E., and Fleisher, J. P., eds., **Developments and applications of geomorphology**, New York: Springer-Verlag. P. 268-317, 1984.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa geológico da Folha Caraguatatuba**. SF-23-Y-D-VI-1. São Paulo: CPRM, 1982. Escala 1:50.000.

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. **Mapa geológico da Folha Pico do Papagaio**. SF-23-Y-D-V-2. São Paulo: CPRM, 1991. Escala 1:50.000.

CRUZ, O. (1974) – **A Serra do Mar e o litoral na área de Caraguatatuba-SP – contribuição à geomorfologia litorânea tropical**. Tese (Doutorado) Geografia, Universidade de São Paulo. 181p.

CRUZ, O. Contribuição geomorfológica ao estudo de escarpas da Serra do Mar. **Revista do Instituto Geológico**, vol. 11 (1), p. 9-20, 1990.

FERNANDES, N.F.; AMARAL, C.P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra, A.J.T.; Cunha, S.B. (Orgs.). **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand, 1996.

FELL, R.; COROMINAS, J.; BONNARD, C.; CASCINI, L.; LEROI, E.; SAVAGE, W.Z. Joint Technical Committee on landslides and engineered slopes, JTC-1. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. **Engineering Geology**, v. 102, n. 3-4, p. 99-111, 2008.

FILHO, O. A.; MAGALHÃES, F.S. (2004). Identification of slope instability hazard áreas in the Anchieta – Imigrantes highway system, located in the Serra do Mar mountain range, São Paulo State, Brazil. In: LACERDA, EHRLICH, FOUNTOURA & SAYÃO (Eds) **Landslides: Evaluation and Stabilization**. Taylor & Francis Group, London, p. 273-279.

FÚLFARO, V.J., et al. **Escorregamentos de Caraguatatuba: expressão atual, e registro na coluna sedimentar da planície costeira adjacente**. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia., 1, RJ, v.2, p.341-350.

GOMES, C.L.R. et al. **Retroanálise da corrida de massa ocorrida no ano de 1967 nas encostas da Serra do Mar, vale dos rios Camburu, Pau D’Alho e Canivetal, Município de Caraguatatuba-SP: Quantificação volumétrica dos sedimentos depositados na planície de inundação**. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, 2008, Porto de Galinhas.

GRAMANI, M.F. **Caracterização geológico-geotécnica das corridas de detritos (“Debris Flows”) no Brasil e comparação com alguns casos internacionais**. Dissertação de Mestrado. EPUSP- Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo. 2001. 372 p.

GRAMANI, M.F.; OLIVITO, J. P. R.; AUGUSTO FILHO, O., MAGALHÃES, F.S. Análise da potencialidade de geração de corridas de massa nos trechos serranos do duto OSBAT. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 11, 2005, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: ABGE, v.1. p.1350 – 1365, 2005.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C.M. **Estabilidade de taludes naturais e sua escavação**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1984.

HONG, X.Y. *et al.* (1985) – **The Debris Flow in Han Yu Torrent of Mi Yun county of Beijing**. In: International Symposium on Erosion, Debris Flow and Disaster Prevention. Sept, Tsukuba-Japan, p.191-193.

HUNGR, O., 2000. “Analysis of debris flow surges using the theory of uniformly progressive flow”. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 25, pp. 483-495.

INFANTI JR, N.; FORNASARI FILHO, N. Processos de dinâmica superficial. In: OLIVEIRA, A.M.S.; BRITO, S.N.A. (Eds). **Geologia de Engenharia**. São Paulo: ABGE, 1998. P. 131-152.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Folha de Caraguatatuba**. São Paulo: IBGE, 1974a. SF-23-Y-D-VI-1. Escala 1:50.000.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Folha do Pico do Papagaio**. São Paulo: IBGE, 1974b. SF-23-Y-D-V-2. Escala 1:50.000.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Manual técnico de uso da terra**. 3 ed. IBGE: Rio de Janeiro, 2013.

IF – Instituto Florestal do Estado de São Paulo. **Plano de Manejo do Parque Estadual da Serra do Mar**. 2006.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Estudos das instabilizações de encosta da Serra do Mar na região de Cubatão objetivando a caracterização do fenômeno “corrida de lama” e da prevenção dos seus efeitos**. São Paulo, 1987. Relatório 26.258, volume 1.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. **Ocupação de encostas**. São Paulo, 1991.

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. **Reconhecimento e caracterização da potencialidade de instabilizações na Serra do Mar na área de influência do Sistema Anchieta-Imigrantes**. Relatórios Parciais 7 e 8. Relatório Técnico n° 61785. 154p.

KANJI, M.A.; MASSAD, F.; CRUZ, P. T. Debris Flows in Areas of Residual Soils: Occurrence and Characteristics. In: International Workshop on Occurrence and Mechanism of Flows in Natural Slopes and Earthfills, 2003, Sorrento. International Workshop on Occurrence and Mechanism of Flows in Natural Slopes and Earthfills. **Anais...** Napoles: Associazione Geotecnica Italiana, 2003. V. 2. P. 1-9.

LEE, S.; RYU, J. (2004) Probabilistic landslide hazard mapping using GIS and Remote Sensing data at Boun, Korea. In: LACERDA, EHRLICH, FONTOURA & SAYÃO (Eds) **Landslides: Evaluation and Stabilization**. Taylor & Francis Group, London, p. 91-95.

LOLLO, J.A. **O uso da Técnica de Avaliação do Terreno no processo de elaboração de mapeamento geotécnico: sistematização para a quadrícula de Campinas (SP)**. 267 p. Tese de Doutorado em Geotecnia – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos (SP), 1995.

MARCELINO, E.V., 2003. **Mapeamento de Áreas suscetíveis à Escorregamentos no Município de Caraguatatuba (SP) Usando Técnicas de Sensoriamento Remoto**. Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto, INPE, São José dos Campos.

MOUSINHO, M.R.M.; SILVA, J.X. (1968) – **Considerações Geomorfológicas a Propósito dos Movimentos de Massa ocorridos no Rio de Janeiro**. Revista Brasileira de Geografia. Fundação IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia. N. 1, ano 30. Jan/1968. p. 55-73.

NERY, T.D. **Dinâmica das corridas de detritos no Litoral Norte de São Paulo**. Tese de Doutorado. Departamento de Geografia, Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, 2016. 164 p.

NELSON, C.V.; RASELY, R.C. (1990) – **Debris flow potential and sediment yield analysis following wild fire events in mountainous terrain**. In: FRENCH, R.H. (ed.) – *Hydraulics/Hidrology of Arid Lands (H2AL)*. p.54-59.

NIELSEN, T.H. & TURNER, B.L. – Influence of rainfall and ancient landslides deposits on recent landslides. **Geological Survey Bulletin** (1388), U. S. Department of the Interior, Washington, 1975, 18 p. il.

POLANCO, L.S.E. **Correlações empíricas para fluxo de detritos**. (2010). P. 126. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

REIS, F.A.G.V.; CERRI, L.E. da S; ZAINÉ, J.E.; AUGUSTO FILHO, O.; GIORDANO, L do C. Metodologia para avaliação de áreas sujeitas à ocorrência de ondas de cheia e corridas de massa/detritos: Estudo piloto no duto OSBRA no Estado de São Paulo. **Relatório Técnico 4**. FUNDUNESP/PETROBRAS. 2014. 246p.

REIS, F.A.G.V. **Proposta metodológica para definição da vulnerabilidade de bacias hidrográficas ao rompimento de barragens**. Tese (livre docência) – Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro, 2016.

ROSS, J.L.S. **Análise e Síntese na Abordagem Geográfica da Pesquisa para o Planejamento Ambiental**. In: Revista do Departamento de Geografia nº9, p. 65-75, FFLCH-USP, São Paulo, 1995.

SAFAEI, M.; OMAR, H.; HUAT, B.K.; YOUSOF, Z.B.M. Deterministic rainfall induced landslide approaches, advantage and limitation. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 16, n. 1, p. 1619-1650, 2012.

SELBY, M.J. **Hillslope: materials and process**. Oxford: Oxford University Press, 1982.

SILVEIRA, R. M. da. **Propriedades geotécnicas dos solos coluvionares do gasoduto Bolívia-Brasil em Timbé do Sul (SC)**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SOARES, P.C.; FIORI, A.P. **Lógica e sistemática na análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia**. Notícia geomorfológica, v. 16, n. 32, p. 71-104, 1976.

TAKAHASHI, T. Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster. **Journal of Natural Disaster Science**, vol. 3, nº1, 1981.

TAKAHASHI, T. (1998) – **Mechanics and Countermeasures for the Debris Flows**. Curso ministrado pelo Professor T. Takahashi, Convênio Escola Politécnica com o Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University. Junho/98. 103p.

TATIZANA, C.; Ogura, A. T.; Cerri, L.E.S. e Rocha, M.C.M. 1987a. Análise de correlação entre chuvas e escorregamentos na Serra do Mar, município de Cubatão. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 5, 1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, v.2, p. 225-236.

TOMINAGA, L.K. **Avaliação de metodologias de análise de risco a escorregamentos: Aplicação de um ensaio em Ubatuba, SP.** Tese de Doutorado. Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

UNISDR – United Nations International Strategy for Disaster Reduction. **The Human cost of weather related disasters.** Disponível em: <[www.unisdr.org/2015/docs/climatechange/COP21\\_WeatherDisastersReport\\_2015\\_FINAL.pdf](http://www.unisdr.org/2015/docs/climatechange/COP21_WeatherDisastersReport_2015_FINAL.pdf)> . Acesso em: 02 set.2016.

VAN WESTEN, C.J. Geo-information tools for landslide risk assessment: na overview of recent developments. In: EHRLICH, L.; FONTOURA, S.A.B.; SAYÃO A.S.F. (Eds.). **Landslides: Evaluation and stabilization.** London: Taylor & Francis Group, 2004.

VANACÔR, R.N. (2006). **Sensoriamento Remoto e geoprocessamento aplicados ao mapeamento das áreas susceptíveis a movimentos de massa na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul.** Dissertação de Mestrado. Centro Estadual de Pesquisas em Sensoriamento Remoto e Meteorologia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2006.

VANDINE, D.F., 1996. **Debris flow control structures for forest engineering.** Res. Br., B.C. Min. For., Victoria, B.C., Work. Pap. 08/1996.

VARNES, D.J. (1978) Slope Movement Types and Processes. In: **Special Report 176: Landslides: Analysis and Control** (Eds: Schuster, R.L. & Krizek, R.J.). Transportation and Road Research Board, National Academy of Science, ashington D.C., p. 11-33.

VEDOVELLO, R. & MATTOS, J.T. 1998. A utilização de Unidades Básicas de Compartimentação (UBCs) como base para a definição de unidades geotécnicas: Uma abordagem a partir de sensoriamento remoto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CARTOGRAFIA GEOTÉCNICA, 3, 1998, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis, ABGE, CD-ROM, p. 6, 1998.

VEDOVELLO, R. **Zoneamentos Geotécnicos Aplicados à Gestão Ambiental, a partir de Unidades Básicas de Compartimentação (UBCs)**. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Ciências Exatas – IGCE, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 154 p. 2000.

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

ZAINE, J.E. **Método de Fotogeologia Aplicado a Estudos Geológico-Geotécnicos: Ensaio em Poços de Caldas, MG**. Tese (Livre-docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2011.

ZUQUETTE, L.V. **Análise crítica da cartografia geotécnica e proposta metodológica para as condições brasileiras**. Tese de Doutorado – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 1987.

ZUQUETTE, L.V.; GANDOLFI, N. **Cartografia Geotécnica**. Ed. Oficina de Textos. São Paulo, 2004.

APÊNDICE A  
MAPA DE UNIDADES FISIAGRÁFICAS

APÊNDICE B  
MAPA DE CICATRIZES DE ESCORREGAMENTO

APÊNDICE C  
MAPA FINAL DE SUSCETIBILIDADE À CORRIDAS DE  
MASSA

