



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA

HELEN CRISTINA DIAS

Modelagem da suscetibilidade a escorregamentos rasos com base em análises estatísticas
(Modeling shallow landslides susceptibility based on statistical analysis)

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Versão corrigida

São Paulo
2019



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOGRAFIA FÍSICA

HELEN CRISTINA DIAS

Modelagem da suscetibilidade a escorregamentos rasos com base em análises estatísticas

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Mestre.

Linha de Pesquisa: Estudos Interdisciplinares em Pedologia e Geomorfologia.

Agência de fomento: Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Programa Novos Talentos – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

Orientadora: Profa. Dra. Bianca Carvalho Vieira.

Versão corrigida

São Paulo
2019

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

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

D541m Dias, Helen Cristina
Modelagem da suscetibilidade a escorregamentos rasos com base em análises estatísticas / Helen Cristina Dias ; orientador Bianca Carvalho Vieira. - São Paulo, 2019.
117 f.

Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo. Departamento de Geografia. Área de concentração: Geografia Física.

1. Escorregamentos. 2. Parâmetros Morfológicos e Geológicos. 3. Caraguatatuba. I. Vieira, Bianca Carvalho, orient. II. Título.



fflch UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
FACULDADE DE FILOSOFIA, LETRAS E CIÊNCIAS HUMANAS

ENTREGA DO EXEMPLAR CORRIGIDO DA DISSERTAÇÃO/TESE

Termo de Ciência e Concordância do (a) orientador (a)

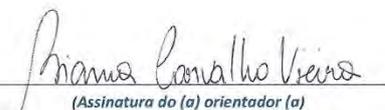
Nome do (a) aluno (a): Helen Cristina Dias

Data da defesa: 31/05/2019

Nome do Prof. (a) orientador (a): Bianca Carvalho Vieira

Nos termos da legislação vigente, declaro **ESTAR CIENTE** do conteúdo deste **EXEMPLAR CORRIGIDO** elaborado em atenção às sugestões dos membros da comissão Julgadora na sessão de defesa do trabalho, manifestando-me **plenamente favorável** ao seu encaminhamento e publicação no **Portal Digital de Teses da USP**.

São Paulo, 10/07/2019


(Assinatura do (a) orientador (a))

<p>Helen Cristina Dias</p>	<p>Modelagem da suscetibilidade a escorregamentos rasos com base em análises estatísticas</p>	<p>Mestrado FFLCH 2019</p>
----------------------------	---	------------------------------------

Helen Cristina Dias

Modelagem da suscetibilidade a escorregamentos rasos com base em análises estatísticas

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física, do Departamento de Geografia da Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas da Universidade de São Paulo como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciências.

Banca Examinadora

Profª. Dra. Bianca Carvalho Vieira (Orientadora)
Departamento de Geografia – Universidade de São Paulo

Prof. Dr. Carlos Valdir de Meneses Bateira
Universidade do Porto

Prof. Dr. Tiago Damas Martins
Universidade Federal de São Paulo

Prof. Dr. Jefferson de Lima Picanço
Universidade Estadual de Campinas

Aos meus pais, Cristina e Valter.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Cristina e Valter, que me incentivaram a lutar por meus objetivos, sempre acreditando em mim e me dando confiança para seguir em frente.

À minha irmã, Vivian, pela amizade, companheirismo, incentivo e por sempre estar comigo.

Ao Victor, por aparecer de forma inesperada e tornar minha vida mais leve.

À minha querida amiga, Rebeca, pela amizade, confiança, conselhos nos momentos de dúvida e companhia nas minhas manhãs aquáticas.

À minha orientadora, Bianca Carvalho Vieira, por todo o apoio, incentivo, ensinamentos e confiança no meu trabalho.

Ao Professor Carlos V. M. Bateira da Universidade do Porto, por todo o suporte durante a aplicação da avaliação estatística, mesmo estando a um Oceano Atlântico de distância.

Ao Pesquisador Msc. Marcelo F. Gramani, pela amizade e por todo suporte em momentos de dúvida.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), por possibilitar minha participação no Programa Novos Talentos, auxiliando de maneira significativa o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos companheiros do GPMorfo, pela amizade e apoio em campo.

Ao Cnpq e ao PPGF-USP, pelo auxílio financeiro para a realização desta pesquisa.

À todos os familiares, colegas e professores que de alguma maneira contribuíram para a realização desta pesquisa e fizeram parte da minha formação.

Muito obrigada!

*“(...) My bags are all packed
Filled with all I want to be
Hollow for all that is new
The road, it is calling for me (...)”*

(The Road – Gustavo Bertoni)

RESUMO

Os escorregamentos rasos são um tipo de movimento de massa muito frequente em território nacional. Sua ocorrência está condicionada a uma junção de diferentes condições geomorfológicas, Lito-estruturais, climáticas e antrópicas. Nas regiões sul e sudeste do Brasil, a Serra do Mar, conjunto de escarpas de alta declividade, é um compartimento de extrema importância para o entendimento desses processos, uma vez que apresenta todas as condições favoráveis para esses eventos. A análise estatística surge então, como uma maneira de avaliar o papel dessas condições naturais para o processo, permitindo identificar qual condição apresenta maior influência para a ocorrência de escorregamentos no futuro. Assim, o objetivo geral desta pesquisa foi a modelação da suscetibilidade a escorregamentos rasos a partir da avaliação estatística dos parâmetros geológicos (Litologia e Estruturas) e morfológicos (Curvatura, Elevação, Ângulo de Encostas e Aspecto) no município de Caraguatatuba/SP. Para isso os procedimentos adotados foram: (a) Construção dos mapas morfológicos e geológicos; (b) Aplicação da estatística bivariada e definição dos pesos pelo Valor Informativo para cada classe de cada parâmetro e; (c) Construção e validação dos cenários de suscetibilidade. O método utilizado se mostrou eficiente, uma vez que os resultados indicaram que o parâmetro Litologia é o mais relevante para a ocorrência de escorregamentos rasos, seguido da Elevação e do Ângulo de encosta. As encostas mais suscetíveis apresentaram formação de rochas quartzíticas e/ou graníticas, entre 200 – 600 m de elevação, com ângulos entre 30 e 55°, orientação S e proximidade de falhas e fraturas. A análise dos cenários de suscetibilidade também permitiu identificar que a utilização dos parâmetros de maior Valor Informativo tornou o mapeamento mais acurado. Esta pesquisa contribui para os estudos referentes aos escorregamentos rasos, sobretudo sob uma perspectiva geomorfológica, agregando mais informações relativas ao processo e enriquecendo o entendimento de sua dinâmica na Serra do Mar.

Palavras-chave: Movimentos de massa; Morfologia; Geologia; Serra do Mar.

ABSTRACT

Shallow landslides are a frequent kind of mass movement in the Brazilian territory. Their occurrence is conditioned to a set of geomorphological, lithological, structural, climatic and anthropic conditions. The Serra do Mar is a mountain range of steep slopes, located in southern and southeastern regions of Brazil, with favorable conditions to occurrence of shallow landslides. The identification of morphological and geological conditions are important to evaluate the susceptibility of shallow landslide events. The statistical analysis evaluates the role of natural conditions of the study area to understand the occurrence of landslides and identify the most relevant condition, helping to predict new occurrences in the future. The aim of this research was to model shallow landslide susceptibility based on a statistical evaluation of geological (Lithology and structures) and morphological condition factors (Curvature, Elevation, Slope and Aspect) in the city of Caraguatatuba, São Paulo state. The procedures adopted were: (a) Morphological and geological map construction; (b) Bivariate statistical application and definition of the weights by the Information Value for each class of each parameter and; (c) Construction and validation of susceptibility scenarios. The methodology used to determine the susceptibility was efficient. The results indicated Lithology as a parameter more relevant to the occurrence of shallow landslides on the study area, followed by Elevation and Slope. Accordingly, the environment more susceptible to the occurrence of shallow landslides were those with the presence of quartzite and / or granite rocks, between 200 – 600 m of elevation, slopes between 30 – 55°, South orientation and proximity of faults and fractures. The susceptibility scenario analysis identified that the use of condition factors with the highest Informative Value generated the most accurate mapping. This research contributes to shallow landslides studies, especially from a geomorphological perspective, adding more information regarding the process and enriching the understanding of its dynamics in the Serra do Mar.

Key-words: Mass movement; Morphology; Geology; Serra do Mar.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Eventos de alta magnitude que ocorreram em território nacional - (A) Caraguatatuba / SP, 1967; (B) Cubatão / SP, 1985; (C) Região Serrana do Rio de Janeiro, 2011 e (D) Itaóca / SP, 2014. Fonte: Marcelo F. Gramani; GPmorfo e Arquivo Público.....	18
Figura 2 - Escorregamentos planares/rasos em que podemos observar o solo raso e o plano de ruptura entre este e a rocha. A: Escorregamento planar/raso na Serra do Mar em 2010; B: Escorregamento planar/raso na Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011. Fonte: Nelson Fernandes; Bianca Carvalho Vieira.....	22
Figura 3 - CF para cada classe de ângulo de encosta definidas por Lan <i>et al.</i> (2004).	25
Figura 4 - Frequência dos escorregamentos para cada classe de elevação definida por Pachauri e Pant (1992).....	27
Figura 5 - CF para cada classe de elevação definida por Lan <i>et al.</i> (2004).....	27
Figura 6 - Pixels afetados por escorregamentos para cada classe de elevação definida por Nery e Vieira (2014).....	28
Figura 7 - PD para cada classe de curvatura encontradas por Fernandes <i>et al.</i> (2001).....	29
Figura 8 - PE para cada classe de curvatura encontradas por Dias <i>et al.</i> (2017).....	30
Figura 9 - PE para cada classe de curvatura encontradas por Nery e Vieira (2014).....	30
Figura 10 - Frequência para cada classe de aspecto encontradas por Dai e Lee (2002).	32
Figura 11 - Pixels afetados por escorregamentos para cada classe de aspecto encontradas por Nery e Vieira (2014).....	32
Figura 12 - Pixels afetados por escorregamentos para cada classe de aspecto encontradas por Marcelino (2004).....	33
Figura 13 - Fluxograma das metodologias possíveis de análises de processos. Fonte: Adaptado de Aleotti e Chowdhury (1999).	37
Figura 14 - Gráfico elaborado para as classes de unidades litológicas a partir da aplicação do VI, em que fica evidente o caráter negativo ou positivo de cada uma das classes. Fonte: Piedade <i>et al.</i> (2011).....	40
Figura 15 - Carta de suscetibilidade a escorregamentos elaborada através do Valor informativo, em que é possível observar que áreas com valores positivos (vermelho) são áreas suscetíveis e áreas com valores negativos (amarelo) são áreas não suscetíveis. Fonte: Pereira (2009).	41
Figura 16 - Localização do município de Caraguatatuba em relação ao estado de São Paulo e ao Brasil.	42
Figura 17 - Comparação das cicatrizes de escorregamentos. A – Cicatrizes de escorregamentos do Evento de 1967 em Caraguatatuba; B – Situação atual das cicatrizes de escorregamentos com a presença de samambaia gleichênia. Fonte: Arquivo Público de Caraguatatuba; GPmorfo.	44
Figura 18 - Escorregamento raso deflagrado no evento de 1967. Fonte: Arquivo Público de Caraguatatuba.	45
Figura 19 - Rodovia Tamoios atingida por escorregamento raso. Fonte: Arquivo Público de Caraguatatuba.	46

Figura 20 - Material mobilizado nas vias de circulação e ao fundo o Morro do Jaraguá com grande quantidade de escorregamentos. Fonte: Arquivo Público de Caraguatatuba.	46
Figura 21 - Procedimentos metodológicos da dissertação, com detalhe para os materiais utilizados, base de dados, forma de análise e os resultados.	47
Figura 22 - Parte do mapa geológico utilizado para a vetorização e confecção dos mapas litológico e estrutural. Fonte: Chierigati <i>et al.</i> (1982).	49
Figura 23 - Cicatrizes de escorregamentos de 1967 baseadas em Fúlfaro <i>et al.</i> (1976).	50
Figura 24 - Curva de sucesso que compara a eficácia do uso de duas ou mais variáveis na predição de escorregamentos. Nota-se que não há uma diferença relevante entre os cenários que utilizam cinco e sete variáveis Fonte: Piedade <i>et al.</i> (2011).	53
Figura 25 - Curvas das taxas de sucesso da suscetibilidade a escorregamentos rasos por condicionante. Nota-se que o parâmetro Litologia apresentou a maior Taxa de Sucesso.....	55
Figura 26 - Mapa geológico do município de Caraguatatuba, evidenciando o tipo litológico e as estruturas presentes na área.	59
Figura 27 - Relação entre a coesão aparente e o grau de saturação dos solos coluvionares da Serra do Mar. Fonte: Carvalho (1991).....	61
Figura 28 - Perfil de alteração de rochas metamórficas em regiões serranas. Fonte: Adaptado de Machado Filho (2000).	63
Figura 29 - Mapa de elevação do município de Caraguatatuba, evidenciando as variações altimétricas e a frequência de cada uma dessas classes de elevação.	66
Figura 30 - Relação entre elevação (m) e precipitação (mm) no município de Caraguatatuba. Fonte: Nery Junior e Vanzela (2016).	67
Figura 31 - Mapa de ângulo de encosta do município de Caraguatatuba, evidenciando as variações de declividade e a frequência de cada uma dessas classes de ângulo.	70
Figura 32 - Mapa de curvatura do município de Caraguatatuba, evidenciando as variações de formato e a frequência de cada uma dessas classes de curvatura.....	72
Figura 33 - Mapa de aspecto do município de Caraguatatuba, evidenciando as variações de orientações e a frequência de cada uma dessas classes de ângulo.....	75
Figura 34 - Mapa de isoietas de precipitações do evento de 1967 para o município de Caraguatatuba. Fonte: Dias (2017).	76
Figura 35 - Mapa de isoietas de precipitações médias anuais para o período de 1977 a 2006 para o município de Caraguatatuba.	77
Figura 36 - Mapa da relação entre orientação S e isoietas de precipitações médias anuais para o período de 1977 a 2006 para o município de Caraguatatuba.	78
Figura 37 - Mapa de densidade de lineamentos estruturais do município de Caraguatatuba..	80
Figura 38 - Mapa estrutural do município de Caraguatatuba.	81
Figura 39 - Mapa de suscetibilidade do município de Caraguatatuba baseado nos parâmetros de Elevação, Aspecto, Ângulo de encosta, Curvatura, Litologia e Densidade de Lineamentos.	83
Figura 40 - Mapa de suscetibilidade do município de Caraguatatuba baseado nos parâmetros de Aspecto, Ângulo de encosta, Curvatura, Litologia e Densidade de Lineamentos.....	84
Figura 41 - Mapa de suscetibilidade do município de Caraguatatuba baseado nos parâmetros de Elevação, Aspecto, Curvatura, Litologia e Densidade de Lineamentos.	85

Figura 42 - Mapa de suscetibilidade do município de Caraguatatuba baseado nos parâmetros de Litologia, Elevação e Ângulo de encosta.....	86
Figura 43 - Destaque para a região NE do município de Caraguatatuba. A - Maior concentração de escorregamentos rasos encontrada por Cerri <i>et al.</i> (2018) em área com maior quantidade de lineamentos estruturais; B – Área NE identificada como mais suscetível no Cenário 1, assim como nos demais cenários (2, 3 e 4).....	87
Figura 44 - Diferentes métodos para a definição da suscetibilidade do município de Caraguatatuba. A: Método Booleano; B: Método média ponderada; C: Método AHP e D: Método probabilidade condicional. Fonte: Marcelino (2004).....	88
Figura 45 - Comparação de três tipos de métodos para a definição da suscetibilidade do município de Caraguatatuba. Fonte: Marcelino (2004).....	89
Figura 46 - Comparação das AAC de Taxa de Sucesso dos cenários 1, 2, 3 e 4 com inventário INV1.	90
Figura 47 - Comparação das AAC de Taxa de Predição dos cenários 1, 2, 3 e 4 com inventário INV2.	91
Figura 48 - Escorregamento ocorrido no Morro do Santo Antônio (Caraguatatuba/SP) em março de 2017, caracterizado como comprido e raso. Fonte: Repórter Online Litoral.	93
Figura 49 - Comparação entre os cenários 1, 2, 3 e 4 no Morro do Santo Antônio, área onde ocorreu um escorregamento raso em março de 2017. A - Cenário 1; B - Cenário 2; C - Cenário 3 e D - Cenário 4.....	93
Figura 50 - Definição das classes de suscetibilidade por meio das quebras da curva AAC da Taxa de Predição do Cenário 4.....	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Divisão das classes de ângulo de encosta definidas por diversos autores da literatura em várias localidades.....	24
Tabela 2 - Divisão das classes de elevação definidas por diversos autores da literatura em várias localidades.	26
Tabela 3 - Divisão das classes de curvatura definidas por diversos autores da literatura em várias localidades.....	29
Tabela 4 - Divisão das classes de aspecto definidas por diversos autores da literatura em várias localidades.	31
Tabela 5 - Relação entre os graus de intemperismo e movimentos de massa.	34
Tabela 6 - Descontinuidades estruturais que podem ocorrer em maciços rochosos.....	35
Tabela 7 - Mapas morfológicos e suas principais características.	48
Tabela 8 - Descrição para cálculo do Valor Informativo.	51

Tabela 9 - Variáveis utilizadas nos quatro cenários criados.....	52
Tabela 10 - Condicionantes analisados e suas respectivas taxas de sucesso.....	56
Tabela 11 - Litologias presentes no município de Caraguatatuba e suas respectivas características. Com destaque para as litologias mais suscetíveis, Acq (Silimanita-muscovita-quartzitos esverdeados) e Piy (Piroxênio-hornblenda-granitos, hornblendo-granitos e biotitas-granitos).....	60
Tabela 12 - Ângulo de atrito de rochas sob diferentes condições.	61
Tabela 13 - Valores de coesão e ângulo de atrito em diferentes profundidades em uma cicatriz de escorregamento na bacia do Rio Guaxinduba, Caraguatatuba.	62
Tabela 14 - Coesão e ângulo de atrito em solos residuais.	64
Tabela 15 - Classes do parâmetro elevação e seus respectivos valores informativos.	65
Tabela 16 - Classes do parâmetro ângulo de encosta e seus respectivos valores informativos.	68
Tabela 17 - Classes do parâmetro curvatura e seus respectivos valores informativos.	71
Tabela 18 - Classes do parâmetro aspecto e seus respectivos valores informativos.	73
Tabela 19 - Classes do parâmetro densidade de lineamentos estruturais e seus respectivos valores informativos.	79
Tabela 20 - Variáveis utilizadas nos quatro cenários criados com suas respectivas AAC da Taxa de Sucesso com inventário INV1.	90
Tabela 21 - Variáveis utilizadas nos quatro cenários criados com suas respectivas AAC da Taxa de predição com inventário INV2.	91

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	39
Equação 2	40
Equação 3	54

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	17
2. OBJETIVOS.....	20
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA E CONCEITUAL.....	21
3.1. Movimentos de massa: Escorregamentos Rasos.....	21
3.2. Condicionantes Morfológicos.....	23
3.2.1. Ângulo de encosta.....	23
3.2.2. Elevação.....	25
3.2.3. Curvatura.....	28
3.2.4. Aspecto.....	31
3.3. Condicionantes Geológicos.....	33
3.4. Análise da Suscetibilidade a Escorregamentos.....	36
3.5 Valor Informativo (VI).....	39
4. ÁREA DE ESTUDO.....	42
5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	47
5.1. Mapas Morfológicos.....	47
5.2. Mapa litológico/estrutural.....	48
5.3. Definição da suscetibilidade.....	49
5.4. Validação dos cenários de suscetibilidade.....	52
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
6.1. Análise de sensibilidade dos parâmetros morfológicos e geológicos para a instabilidade de encostas.....	55
6.1.1. Litologia.....	57
6.1.2. Elevação.....	65
6.1.3. Ângulo de encosta.....	68
6.1.4. Curvatura.....	71
6.1.6. Densidade de Lineamentos.....	79
6.2. Avaliação da suscetibilidade a escorregamentos rasos.....	82

6.3. Validação da suscetibilidade a escorregamentos rasos	89
7. CONSIDERAÇÕES FINAIS	98
8. REFERÊNCIAS	99
ANEXOS	107

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A Serra do Mar apresenta características geológicas e geomorfológicas que definem, individualmente ou em conjunto, a ocorrência de inúmeros de movimentos de massa, sendo os escorregamentos e as corridas de detritos aqueles que causam as maiores modificações do relevo.

No Brasil, tais tipologias estão relacionadas aos registros de desastres naturais que mais causaram prejuízos a sociedade. No município de Caraguatatuba (SP), área de estudo dessa pesquisa (**Figura 1**), houve em 1967 um evento considerado como um dos mais importantes em território nacional para o estudo de movimentos de massa. Em um período de 48h foram precipitados cerca de 600 mm de chuva, ocasionando escorregamentos generalizados na área, responsáveis por gerar corridas de detritos, que causaram uma série de danos a infraestrutura local e 120 mortes (CRUZ, 1974; DE PLOYE e CRUZ, 1979). Em 1985, ocorreu em Cubatão outro evento de grande magnitude, com precipitação de 380 mm em 48h, o episódio deflagrou 1.742 escorregamentos que culminaram em corridas de detritos e afetaram o parque industrial de Cubatão, causando severos danos (NERY e VIEIRA, 2014).

Em 2011 eventos de grande magnitude ocorreram nos municípios da Região Serrana Fluminense causando cerca de 1.000 vítimas fatais (DOURADO *et al.*, 2012), e em 2014 no sul do estado de São Paulo, no município de Itaóca no Vale do Ribeira, chuvas intensas e concentradas foram responsáveis pela ocorrência de inundações em extensas áreas, ocasionando escorregamentos generalizados e corridas de detritos, o que resultou em 25 óbitos e danos a cidade, como destruição de moradias, plantações, pontes de acesso (GRAMANI, 2015).

A ocorrência de eventos de alta magnitude em território nacional torna essencial o estudo dos condicionantes aos escorregamentos rasos. Tal estudo possibilitará a identificação de quais condições podem ser capazes de desencadear esses processos.

A instabilidade das encostas depende de uma série de fatores tais como: clima (volume e intensidade de precipitação), solos (tipologia, permeabilidade, profundidade, propriedades geotécnicas), morfologia (declividade, aspecto, curvatura, elevação), geologia (tipos litológicos, falhas, fraturas, intemperismo), proximidade de corpos d'água e rodovias. Desta forma, os fatores que afetam a ocorrência de escorregamentos rasos podem ser classificados em deflagradores, como precipitação, terremotos e ação antrópica; e os condicionantes ambientais, que incluem litologia, ângulo e formato da encosta, entre outras características inerentes a geomorfologia e geologia local (GUIDICINI e NIEBLE, 1983; VAN WESTEN *et al.*, 2008; WU e QIAO, 2009).

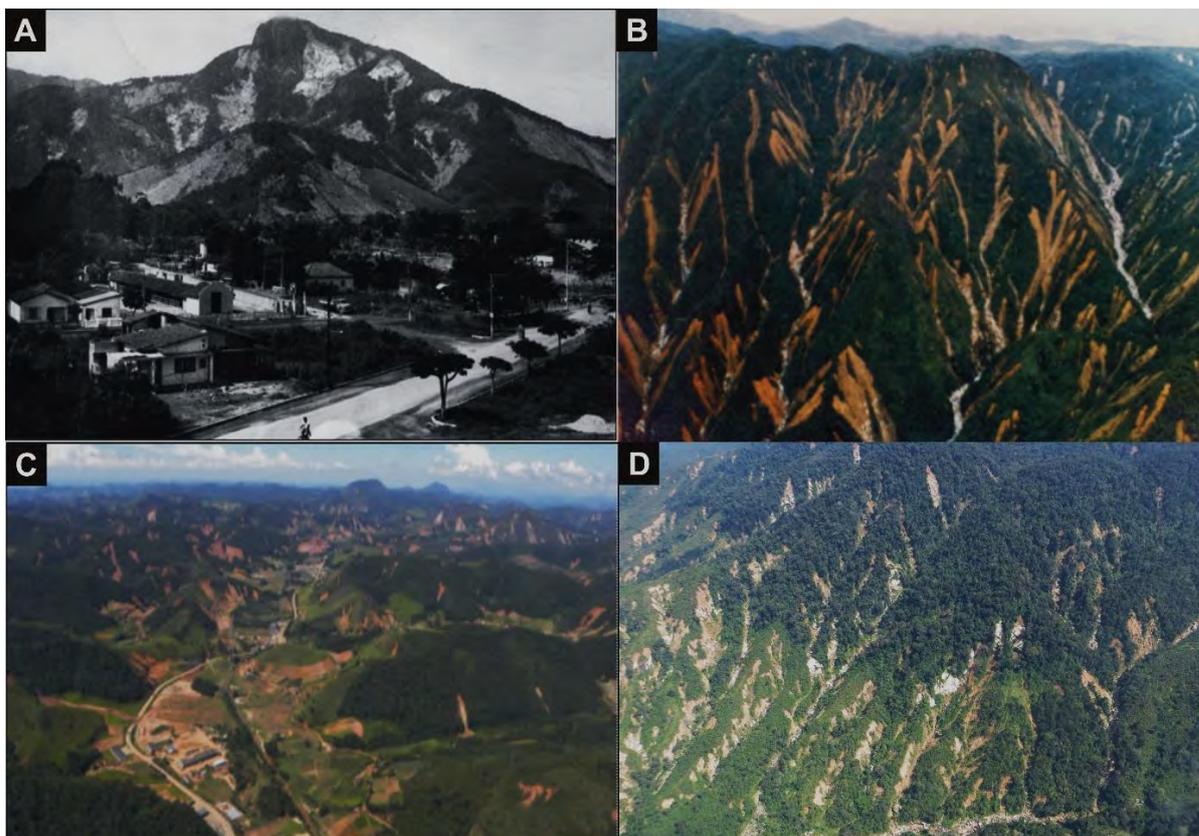


Figura 1 - Eventos de alta magnitude que ocorreram em território nacional - (A) Caraguatatuba / SP, 1967; (B) Cubatão / SP, 1985; (C) Região Serrana do Rio de Janeiro, 2011 e (D) Itaóca / SP, 2014. **Fonte:** Marcelo F. Gramani; GPMorfo e Arquivo Público.

A avaliação desses processos pode ser realizada de diferentes maneiras, que dependem da escala de trabalho e da base de dados da área. Em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica), um mapeamento ideal dos processos deve indicar a probabilidade espacial e temporal de ocorrência, tipo, magnitude, entre outros fatores intrínsecos aos escorregamentos rasos, em que as áreas sem a ocorrência dos processos sejam analisadas sob as características das áreas que sofreram o processo (VAN WESTEN, 1993; CARRARA *et al.*, 1999).

Os métodos para a avaliação da suscetibilidade variam de análises qualitativas, em que a experiência do pesquisador é a base, até análises quantitativas para a aplicação de modelos, por exemplo. Neste contexto, a modelagem estatística busca comparar a distribuição espacial dos escorregamentos com parâmetros morfológicos e geológicos, permitindo pelo método bivariado a atribuição de pesos para cada classe de cada parâmetro baseado em sua distribuição, e tendo como um dos pontos iniciais, os escorregamentos pretéritos de um evento ocorrido na área de estudo (ALEOTTI e CHOWDHURY, 1999). Apesar de internacionalmente muitos estudos adotarem a análise estatística para a investigação de movimentos de massa (ZHOU *et al.*, 2002; VAN WESTEN *et al.*, 2003; PIEDADE *et al.*, 2011; CAPITANI *et al.*, 2013;

GARIANO *et al.* 2015, ZHANG *et al.*, 2016), no Brasil a aplicação desta metodologia ainda é incipiente.

A presente pesquisa possui a seguinte estrutura básica: introdução e justificativa (I); objetivos (II); fundamentação teórico-conceitual (III), abordando os principais conceitos a respeito dos escorregamentos rasos, parâmetros morfológicos e geológicos; área de estudo (IV); procedimentos metodológicos (V), com descrição dos principais procedimentos como mapeamento e avaliação dos parâmetros morfológicos e geológicos, aplicação da estatística bivariada baseada no Valor Informativo e Validação; resultados e discussões (VI), e por fim, a seção final apresenta as conclusões (VII).

2. OBJETIVOS

O objetivo geral desta pesquisa foi modelar e identificar a suscetibilidade a escorregamentos rasos no município de Caraguatatuba/SP, tendo os seguintes objetivos específicos:

- a) Definir quais são os parâmetros mais importantes para o entendimento da ocorrência de escorregamentos rasos por meio de avaliação estatística.
- b) Avaliar a eficácia de diferentes cenários de suscetibilidade para o município de Caraguatatuba, baseado na escolha dos parâmetros utilizados para a produção de cada um deles.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICO-METODOLÓGICA E CONCEITUAL

Esta fundamentação teórica-metodológica primeiramente trata da definição conceitual dos movimentos de massa (3.1); posteriormente caracterização dos parâmetros morfológicos (3.2) e geológicos, com a explanação da litologia e estruturas (3.3); em seguida análise da suscetibilidade e uso de análises estatísticas para o estudo de movimentos de massa (escorregamentos rasos) (3.3), e por fim, Valor Informativo e validação (3.4).

3.1. Movimentos de massa: Escorregamentos Rasos

Os movimentos de massa podem ser definidos como qualquer deslocamento de material terroso ou rochoso influenciado pela gravidade. As classificações existentes de diversos pesquisadores sempre apresentam um ponto de vista sobre o processo para algum fim específico (CROZIER, 1986). Desta forma, há uma grande variedade de opções de classificação (CROZIER, 1973; VARNES, 1978; AUGUSTO FILHO, 1992; USGS, 2004), que levam em consideração a realidade local de quem a idealizou, tais como condições climáticas, geomorfológicas, geológicas etc.

Optou-se nesta pesquisa pela classificação de Augusto Filho (1992), uma vez que a mesma foi pensada para o meio tropical e subtropical úmido, tipo climático no qual a Serra do Mar se insere. O autor leva em consideração cinco agentes condicionantes, são eles: geometria, mecanismo de movimentação, natureza, estado do material mobilizado e comportamento no tempo. Isso resultou em quatro tipologias gerais de movimentos de massa, o Rastejo, Escorregamentos (rasos e circulares), Quedas e Corridas. Dentre cada tipologia há outros subgrupos de cada processo, que refinam a definição com condições e características, auxiliando no entendimento de cada movimentação.

Os escorregamentos rasos são caracterizados por serem movimentos de velocidades médias a altas com plano de ruptura bem definido, volumes de materiais transportados variados. Eles têm sua ocorrência relacionada diretamente à dinâmica das encostas, ou seja, tem como local de deflagração ambientes com certa declividade, além de outras condições que a mesma pode apresentar, tornando-a instável ou estável. Segundo a classificação de Augusto Filho (1992), esse processo pode ser dividido em três tipos, em cunha, circulares e planares.

Os escorregamentos circulares apresentam uma superfície de ruptura curva, que desloca grande quantidade de material de forma rotacional, estando vinculado geralmente a solos bem desenvolvidos e homogêneos, além de rochas muito fraturadas. Já os escorregamentos planares ou rasos (**Figura 2**) apresentam uma superfície de ruptura planar que, no geral, coincide com

as discontinuidades do material, sejam juntas, falhas, limites litológicos ou até mesmo discontinuidades relacionadas as propriedades dos solos, como densidade e permeabilidade (SELBY, 1993; FERNANDES e AMARAL, 1996). Tem também como característica ser um processo de curta duração, comprido e raso (1 - 4m), ocorrendo sempre nos setores superficiais da encosta, como o horizonte coluvionar e, geralmente o horizonte residual (WOLLE e CARVALHO, 1994). Os escorregamentos em cunha por sua vez, são menos frequentes e ocorrerem em solos e rochas com dois planos de fraqueza (AUGUSTO FILHO, 1992).

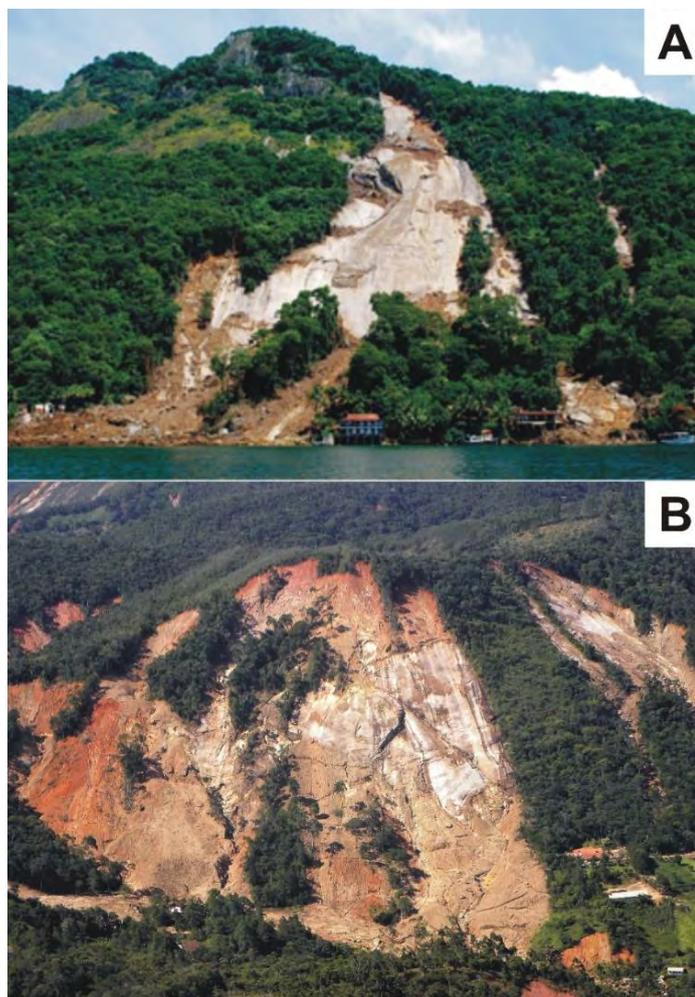


Figura 2 - Escorregamentos planares/rasos em que podemos observar o solo raso e o plano de ruptura entre este e a rocha. A: Escorregamento planar/raso na Serra do Mar em 2010; B: Escorregamento planar/raso na Região Serrana do Rio de Janeiro em 2011. **Fonte:** Nelson Fernandes; Bianca Carvalho Vieira.

3.2. Condicionantes Morfológicos

As condições do relevo são fatores que muitas vezes são determinantes para a ocorrência de escorregamentos rasos, uma vez que certas morfologias podem facilitar ou dificultar tais processos. Os condicionantes morfológicos relacionam características das encostas que influenciam na estabilidade da mesma, como a forma e a declividade, demonstrando que algumas classes ou feições podem ser mais suscetíveis, como por exemplo, áreas declivosas com material para mobilização disponível (SIDLE *et al.*, 1985).

A análise conjunta dos parâmetros morfológicos possibilita um melhor entendimento dos padrões de ocorrência dos processos. A definição das classes mais suscetíveis em cada um dos condicionantes permite uma melhor acurácia dos locais que podem gerar escorregamentos no futuro, dando origem a uma carta de suscetibilidade com maior acerto (VAN WESTEN *et al.* 2003).

Baseados nessa ideia, diversos pesquisadores buscam essa análise integrada dos condicionantes aos escorregamentos rasos, os parâmetros mais comumente utilizados são: Ângulo de encosta, Elevação, Curvatura e Aspecto. Tendo em vista que essas características das encostas são formas de controle topográfico nos movimentos de massa estes parâmetros são muito utilizados na literatura para determinar a suscetibilidade a ocorrência desses processos (GAO, 1993). Assim, as análises de parâmetros morfológicos possibilitam um melhor entendimento da dinâmica de tais eventos por meio das características que contribuem para a deflagração dos escorregamentos rasos, auxiliando na aferição de fatores condicionantes através da morfologia (SIDLE *et al.*,1985; PACHAURI e PANT, 1992; DONATI e TURRINI, 2002; VIEIRA *et al.*, 2010; VIEIRA e RAMOS, 2015).

3.2.1. Ângulo de encosta

O Ângulo da encosta identifica o ângulo de declive para um local em uma superfície. Ele é um dos fatores mais importantes para dos escorregamentos rasos, e por isso é um dos parâmetros mais utilizados nas pesquisas que buscam o entendimento da dinâmica desses processos (SIDLE *et al.*, 1985).

A partir dos 20° já é possível identificar a ocorrência e a maior suscetibilidade a escorregamentos rasos em diversas regiões, tais como China, Índia e Hong Kong no continente asiático e nas cidades de Cubatão, Caraguatatuba, Rio de Janeiro e Antonina no sudeste e sul brasileiro (**Tabela 1**). Tal fato, demonstra que o processo não está sujeito somente às altas declividades, podendo ocorrer em áreas onde há o aporte de material para ser mobilizado por

eventos morfodinâmicos, além é claro da influência de outros fatores morfológicos ou geológicos.

Tabela 1 - Divisão das classes de ângulo de encosta definidas por diversos autores da literatura em várias localidades.

Ângulo de encosta			
Divisão das classes	Classe mais suscetível	Localização / Geologia geral	Autores
<i>Nacional</i>			
0 - 18,5°/18,6 - 37°/ 37,1 - 55,5°/55,6 - 74°	37,1 - 55,5°	Rio de Janeiro - RJ/Gnaiss	Fernandes <i>et al.</i> (2001)
0 - 2,9°/3,0 - 6,8°/ 6,9 - 16,7°/16,8 - 25,2°/ 25,3 - 45°/ > 45°	25,3 - 45°	Caraguatatuba - SP / Granitóides e Migmatitos	Marcelino (2004)
< 30°/30 - 40°/40 - 50°/ > 50°	40 - 50°	Cubatão - SP / Gnaiss, Granito, Migmatito, e Micaxisto	Santos (2009)
< 30°/30 - 40°/40 - 50°/ > 50°	30 - 40°	Cubatão - SP / Gnaiss, Granito, Migmatito, e Micaxisto	Vieira <i>et al.</i> (2010)
0 - 21°/21 - 34°/34 - 44°/44 - 70°	34 - 44°	Cubatão -SP / Gnaiss, Granito, Migmatito, e Micaxisto	Nery e Vieira (2014)
< 20°/20 - 30°/30 - 40° / > 40°	30 - 40°	Caraguatatuba - SP / Granitóides e Migmatitos	Vieira e Ramos (2015)
0 - 10°/10 - 20°/ 20 - 30° / > 30°	> 30°	Caraguatatuba - SP / Granitóides e Migmatitos	Dias <i>et al.</i> (2017)
0 - 10°/10 - 20°/20 - 30°/ 0 - 40°/ > 40°	30 - 40°	Antonina - PR / Granito, Anfibolito e Quartzito	Martins <i>et al.</i> (2017)
<i>Internacional</i>			
0 - 5°/10 - 15°/15 - 20°/20 - 25°/25 - 30°/30 - 35°/35 - 40°/ 40 - 45°	> 35	Índia / Quartzito, Filito, Calcário	Pachauri e Pant (1992)
0 - 15°/15 - 25°/25 - 30°/ 30 - 35°/ > 35°	25 - 30°/30 - 35°	Hong Kong / Granito e Rochas Vulcânicas	Zhou <i>et al.</i> (2002)
0 - 5°/10 - 15°/15 - 20°/ 20 - 25°/25 - 30°/ - 35°/35 - 40°/ > 40°	30 - 35°/35 - 40°	Hong Kong / Granito e Rochas Vulcânicas	Dai e Lee (2002)
0 - 10°/10 - 20°/20 - 30°/30 - 40°/40 - 50°/50 - 60°/60 - 70°	30 - 40°/40 - 50°	China / Arenito, Dolomito, Basalto, Calcário	Lan <i>et al.</i> (2004)

A identificação de ângulos para o desenvolvimento de escorregamentos rasos não é inerente a paisagem local, visto que paisagens muito diferentes no continente Asiático, por exemplo, apresentam resultados muito semelhantes aos encontrados na Serra do Mar. Porém, com base na Tabela 1, é possível afirmar que não existe um padrão na literatura para a divisão de classes de ângulo de encosta, ficando a critério dos autores tal definição. Desta maneira, as classes mais propícias nem sempre coincidem de forma exata com os intervalos entre as classes

empregados pelos diferentes autores. No geral as classes definidas como mais frequentes ou suscetíveis aos escorregamentos rasos estão no intervalo de 30 – 50° ou muito próximas disto. Neste sentido, Lan *et al.* (2004) encontraram o intervalo entre 30° a 50° para a bacia hidrográfica Xiaojiang na China, utilizando o “*Certainty Factor model (CF)*” (**Figura 3**).

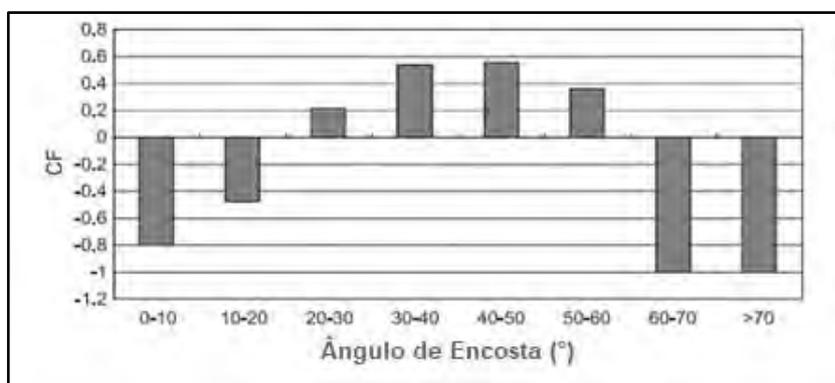


Figura 3 - CF para cada classe de ângulo de encosta definidas por Lan *et al.* (2004).

Nos estudos realizados no Brasil a mesma tendência é identificada. Fernandes *et al.* (2001) definiram os ângulos entre 37,1 e 55,5° para as bacias hidrográficas de Quitite e Papagaio na cidade do Rio de Janeiro. Já em Cubatão, na bacia hidrográfica Copebrás, Santos (2009), encontra as classes entre 30 – 40° e 40 – 50° como mais suscetíveis aos escorregamentos rasos.

3.2.2. Elevação

A elevação é o parâmetro que define a variação altimétrica da área podendo identificar padrões de relevo, como por exemplo o escarpado. Sua utilização no estudo de escorregamentos rasos é importante para identificar setores mais suscetíveis da encosta e consequente aferição de condições regionais ou setorizadas que influenciam na deflagração de tais processos, como os lineamentos estruturais, que em sua maioria tendem a se localizar em uma determinada faixa de altitude.

Estudos realizados em diferentes localidades identificam uma série de setores de elevação como mais suscetíveis a ocorrências de escorregamentos rasos, de maneira que não existe uma faixa consolidada para a ocorrência do processo neste parâmetro (**Tabela 2**). Além disso, os estudos sobre escorregamentos rasos não apresentam um padrão para a divisão dos níveis de elevação para a análise da distribuição deste processo, de maneira que cada autor setoriza de acordo com seus critérios.

Em regiões de altos níveis altimétricos há uma tendência de definir altas elevações como de maior ocorrência para os escorregamentos (**Tabela 2**), como o estudo realizado por Pachauri e Pant (1992), que buscaram entender a ocorrência de escorregamentos na Cordilheira do Himalaia na Índia, e definiram a maior ocorrência nas elevações acima dos 1.000 (**Figura 4**). Os autores deram pesos e criaram um mapeamento para a ocorrência do processo na região, por meio da frequência dos escorregamentos nas classes do parâmetro elevação, além de outros parâmetros.

Tabela 2 - Divisão das classes de elevação definidas por diversos autores da literatura em várias localidades.

Elevação			
Divisão das classes (m)	Classe mais suscetível (m)	Localização / Geologia	Autores
<i>Nacional</i>			
0 - 20 / 20 - 50 / 50 - 100 / 100 - 200 / 200 - 300/300 - 400/400 - 500 / 500 - 600/600 - 700 / 700 - 800 / 800 - 900 / 900 - 1.000 / 1.000 - 1.100 / 1.200 - 1.300 / > 1.300	200 - 300	Caraguatatuba/ Granitóides e Migmatitos	Marcelino (2004)
0 - 200 / 200 - 400 / 400 - 600 / 600 - 800 / 800 - 1.000	600 - 800	Cubatão / Gnaisse, Granito, Migmatito, e Míxaxisto	Santos (2009)
0 - 200 / 200 - 400 / 400 - 600 / 600 - 800 / 800 - 1.000	600 - 800	Cubatão / Gnaisse, Granito, Migmatito, e Míxaxisto	Vieira <i>et al.</i> (2010)
0 - 200 / 200 - 400 / 400 - 600 / 600 - 800 / > 800	200 - 400	Cubatão / Gnaisse, Granito, Migmatito, e Míxaxisto	Nery e Vieira (2014)
<i>Internacional</i>			
100 - 200 / 200 - 300 / 300 - 400 / 400 - 500 / 500 - 600 / 600 - 700 / 700 - 800 / 800 - 900 / 900 - 1.000 / > 1.000	> 1.000	Índia / Quartzito, Filito, Calcário	Pachauri e Pant (1992)
10 - 50 / 50 - 100 / 100 - 150 / 200 - 250 / 250 - 300 / 300 - 350 / 350 - 400 / 450 - 500 / 550 - 600 / 600 - 650 / 650 - 700 / > 700	250 - 300	Hong Kong / Granito e Rochas Vulcânicas	Dai e Lee (2002)
300 - 500 / 500 - 1.000 / 1.000 - 1.500 / 1.500 - 2.000 / 2.000 - 2.500 / 2.500 - 3.000 / 3.000 - 3.500 / 3.500 - 4.000 / > 4.000	1.500 - 2.000	China / Arenito, Dolomito, Basalto, Calcário	Lan <i>et al.</i> (2004)

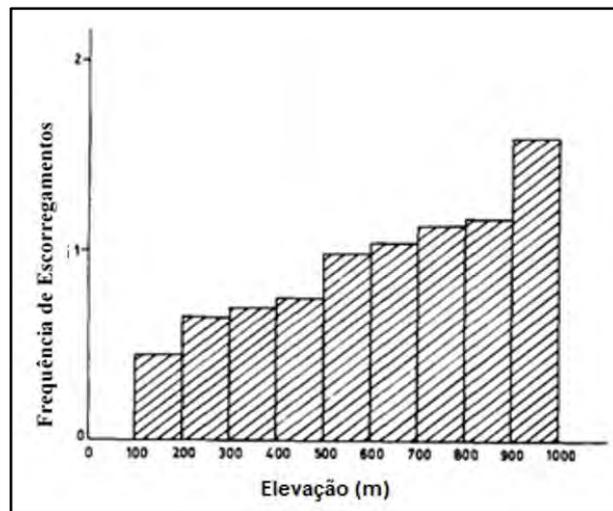


Figura 4 - Frequência dos escorregamentos para cada classe de elevação definida por Pachauri e Pant (1992).

Ainda no continente asiático, Lan *et al.* (2004) estudaram a bacia hidrográfica Xiaojiang na China, caracterizada por altos níveis altimétricos e definiram a classe de 1.500 – 2.000 m como mais propícia para a ocorrência de escorregamentos. Tal resultado foi aferido por meio do índice CF para a definição dos parâmetros e classes mais relevantes ao processo (**Figura 5**).

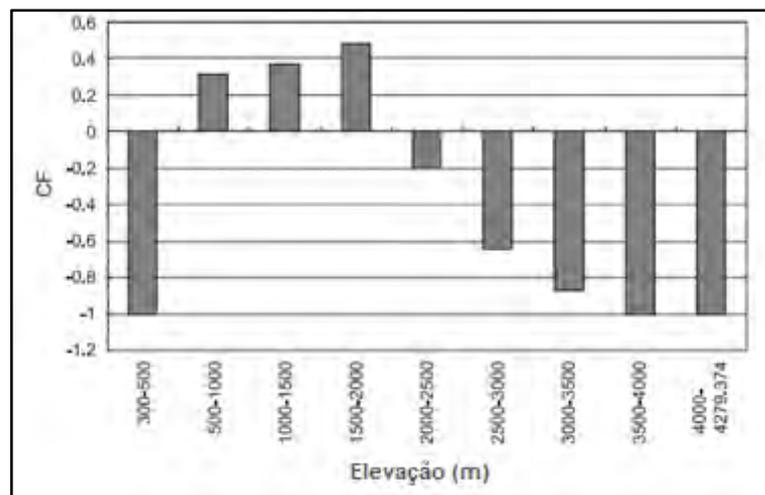


Figura 5 - CF para cada classe de elevação definida por Lan *et al.* (2004).

Na Serra do Mar, as classes identificadas com maior frequência de escorregamentos são menores comparadas aos autores anteriores. Nery e Vieira (2014), por exemplo, identificaram na bacia hidrográfica de Ultrafértil em Cubatão a classe de 200 – 400 m (**Figura 6**). Os autores por meio de uma relação entre o número de pixels das cicatrizes de escorregamentos rasos e as classes puderam definir a relevância dos mesmos para a criação de cenários de suscetibilidade.

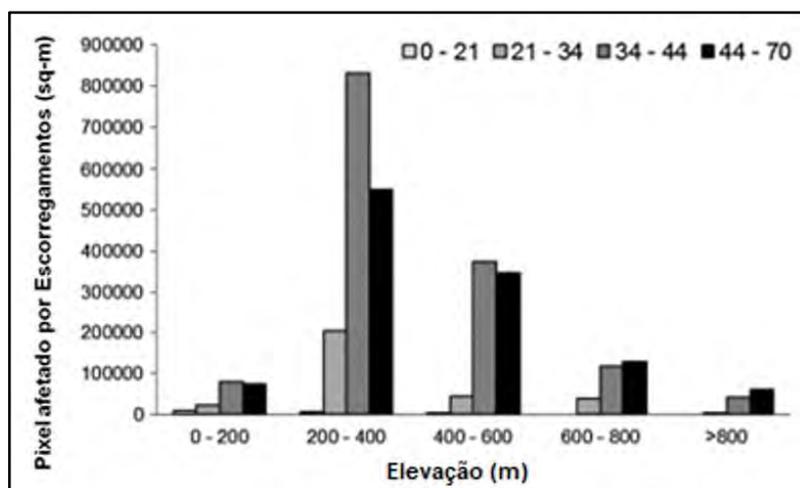


Figura 6 - Pixels afetados por escorregamentos para cada classe de elevação definida por Nery e Vieira (2014).

Como dito anteriormente, tal parâmetro não apresenta uma tendência global de classes específicas de elevações com maior ocorrência de escorregamentos rasos. Assim, há a necessidade de se ater as características regionais das áreas de estudo, de maneira que se torne possível identificar um setor que por razões climáticas, geomorfológicas ou geológicas seja mais suscetível a ocorrência de tais processos.

No caso da Serra do Mar, a setorização das cicatrizes de escorregamentos rasos pode ser resultado das condições dos maciços no estado de São Paulo. Nos trechos de alta e média encosta há uma predominância de horizontes residuais sobre rochas intensamente fraturadas, característica que auxilia a criação de zonas instáveis nas encostas (WOLLE e CARVALHO, 1994). Além disso, o fator climático representado pelo efeito orográfico também é muito presente na escarpa, visto que a medida que se eleva a altitude, a precipitação também aumenta (PELLEGATTI e GALVANI, 2010; NERY JUNIOR e VANZELA, 2016).

3.2.3. Curvatura

A curvatura é o parâmetro que identifica a forma ou a curvatura das encostas. Uma parte da superfície que pode ser côncava, convexa ou retilínea. Esse parâmetro pode ser utilizado para descrever as características físicas, auxiliando o entendimento dos processos de erosão e escoamento. A curvatura pode afetar a aceleração e desaceleração dos fluxos, além da influência na convergência e a divergência dos mesmos, uma vez que pode haver uma concentração de fluxos em áreas côncavas, ou a dispersão de fluxos em áreas convexas (SIDLE *et al.*, 1985; MONTGOMERY e DIETRICH, 1994; FERNANDES *et al.*, 2001).

Para o entendimento da curvatura é necessária uma análise conjunta dos parâmetros, uma vez que, embora a literatura reforce que as áreas côncavas possuem uma maior tendência a instabilidade por concentrarem fluxos, este fato nem sempre se confirma (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994; FERNANDES *et al.*, 2001) (**Tabela 3**).

Tabela 3 - Divisão das classes de curvatura definidas por diversos autores da literatura em várias localidades.

Curvatura			
Divisão das classes	Classe mais suscetível	Localização / Geologia geral	Autores
<i>Nacional</i>			
Convexa, Côncava, Retilínea/Planar	Retilínea	Cubatão - SP / Gnaise, Granito, Migmatito, e Micaxisto	Tatizana <i>et al.</i> (1987)
	Côncava	Rio de Janeiro - RJ/ Gnaise	Fernandes <i>et al.</i> (2001)
	Convexa	Cubatão - SP / Gnaise, Granito, Migmatito, e Micaxisto	Vieira <i>et al.</i> (2010)
	Convexa	Cubatão -SP / Gnaise, Granito, Migmatito, e Micaxisto	Nery e Vieira (2014)
	Convexa	Caraguatatuba - SP / Granitóides e Migmatitos	Vieira e Ramos (2015)
	Côncava	Caraguatatuba - SP / Granitóides e Migmatitos	Dias <i>et al.</i> (2017)
	Côncava	Antonina - PR / Granito, Anfíbolito e Quartzito	Martins <i>et al.</i> (2017)

Na cidade do Rio de Janeiro, por exemplo, Fernandes *et al.* (2001) encontraram uma frequência de ocorrência aproximada para as três curvaturas (Côncava, convexa e retilínea), porém a classe com maior potencial para a ocorrência do processo foi a côncava (**Figura 7**).

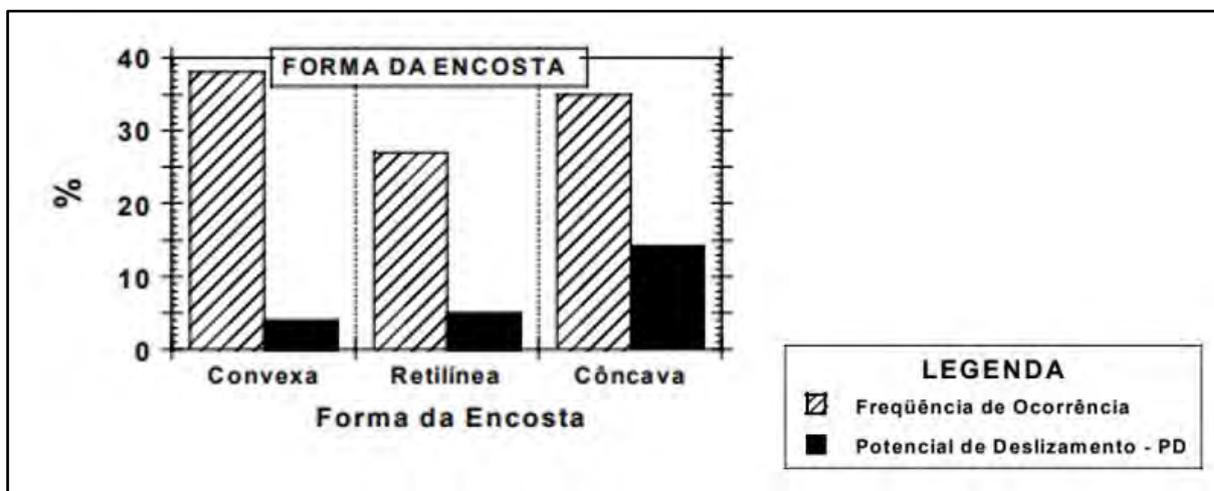


Figura 7 - PD para cada classe de curvatura encontradas por Fernandes *et al.* (2001).

O mesmo resultado foi encontrado por Dias *et al.* (2017) na Serra do Mar Paulista. Os autores buscaram entender a ocorrência dos escorregamentos rasos na bacia hidrográfica do Santo Antônio em Caraguatatuba e encontram a curvatura côncava com maior potencial ao processo (**Figura 8**).

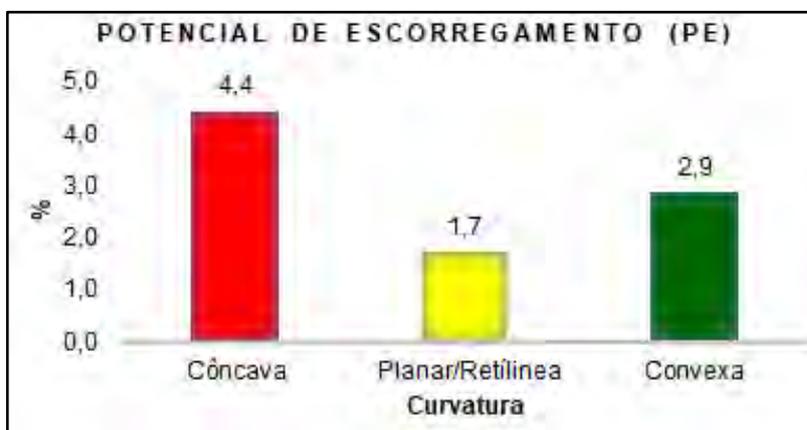


Figura 8 - PE para cada classe de curvatura encontradas por Dias *et al.* (2017).

Ainda na Serra do Mar Paulista, Nery e Vieira (2014), encontraram como curvatura mais propícia aos escorregamentos rasos a curvatura convexa. Os dados obtidos permitem identificar que os valores das curvaturas convexas e retilíneas ficaram muito próximos, enquanto que a côncava apresentou valores muito abaixo destes (**Figura 9**).

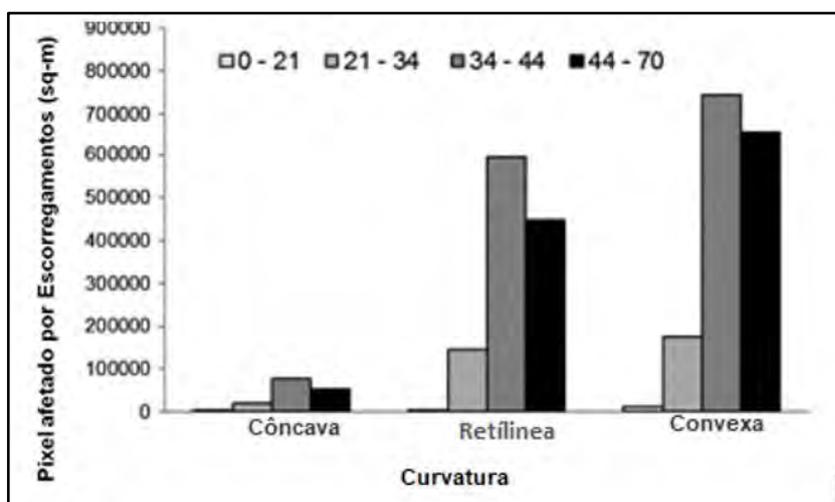


Figura 9 - PE para cada classe de curvatura encontradas por Nery e Vieira (2014).

3.2.4. Aspecto

O aspecto identifica a direção do declive e é medido no sentido horário em graus de 0 (ao norte) para 360 (novamente para o norte), chegando a um círculo completo. Áreas planas recebem um valor de -1. Este parâmetro possibilita a identificação da direção do declive perante os fatores climáticos responsáveis pelo conteúdo de umidade das encostas.

Determinadas orientações podem receber incidência solar, massas de ar e precipitações diferenciadas (OLIVEIRA *et al.*, 1995; DONATI e TURRINI, 2002; DAI e LEE, 2002) e assim, a maior ou menor umidade influenciará a formação e a tipologia da cobertura vegetal, além da estabilidade a movimentos de massa (GAO, 1993; GUIMARÃES *et al.*, 1998).

A identificação de uma orientação para a ocorrência de escorregamentos rasos varia conforme a área de estudo (**Tabela 4**), visto que tal aferição depende de uma série de variáveis que mudam conforme as condições climáticas e geomorfológicas locais.

Tabela 4 - Divisão das classes de aspecto definidas por diversos autores da literatura em várias localidades.

Aspecto			
Divisão das classes	Classe mais suscetível	Localização / Geologia geral	Autores
<i>Nacional</i>			
N, NE, NO, E, O, S, SE, SO	E, S, SE	Caraguatatuba - SP / Granitóides e Migmatitos	Marcelino (2004)
	N, NO	Cubatão - SP / Gnaiss, Granito, Migmatito, e Micaxisto	Santos (2009)
	N, NO, NE	Cubatão - SP / Gnaiss, Granito, Migmatito, e Micaxisto	Vieira <i>et al.</i> (2010)
	O	Cubatão -SP / Gnaiss, Granito, Migmatito, e Micaxisto	Nery e Vieira (2014)
	NO, NE	Caraguatatuba - SP / Granitóides e Migmatitos	Vieira e Ramos (2015)
<i>Internacional</i>			
N, NE, NO, E, O, S, SE, SO	S	Hong Kong / Granito e Rochas Vulcânicas	Dai e Lee (2002)

Em escala internacional, Dai e Lee (2002) encontraram a direção Sul (S) como mais frequente para a ocorrência de escorregamentos rasos (**Figura 10**). A área de estudo dos autores

é localizada em Hong Kong, na ilha Lantau, sob condições climáticas sub-tropicais e monçônicas, além de um terreno íngreme.

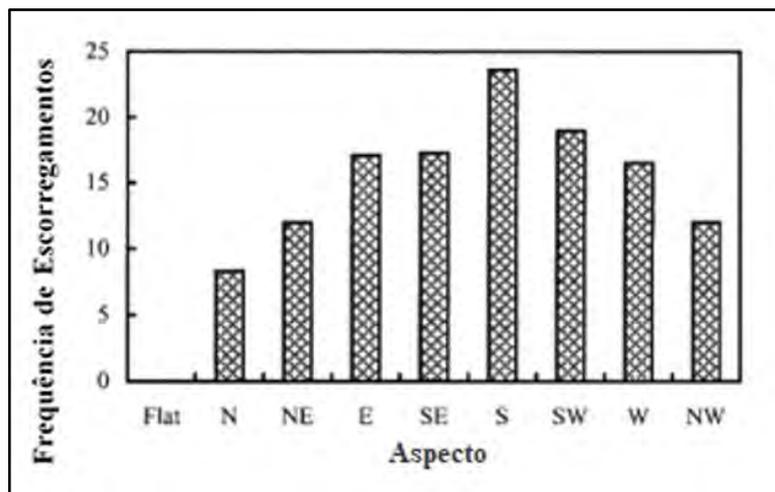


Figura 10 - Frequência para cada classe de aspecto encontradas por Dai e Lee (2002).

Em contexto de Serra do Mar, o quadrante norte na maioria das vezes é o identificado como mais suscetível aos escorregamentos rasos, tal resultado foi encontrado por Santos (2009) e Vieira *et al.* (2010) em Cubatão e por Vieira e Ramos (2015) em Caraguatatuba. No entanto, Nery e Vieira (2014), identificaram a direção Oeste (W) como mais afetada por escorregamentos rasos em Cubatão (**Figura 11**). Já Marcelino (2004) identificou as direções Sul (S), Sudeste (SE) e Leste (L) trabalhando em escala de município em Caraguatatuba (**Figura 12**).

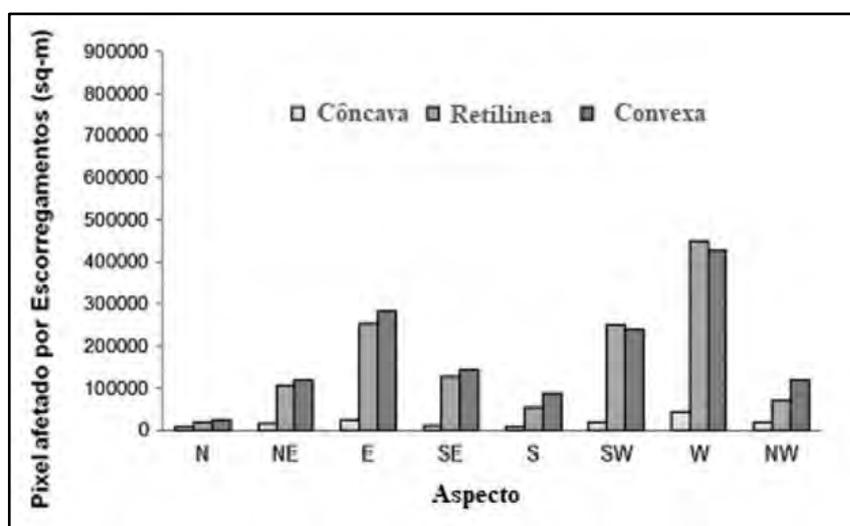


Figura 11 - Pixels afetados por escorregamentos para cada classe de aspecto encontradas por Nery e Vieira (2014).

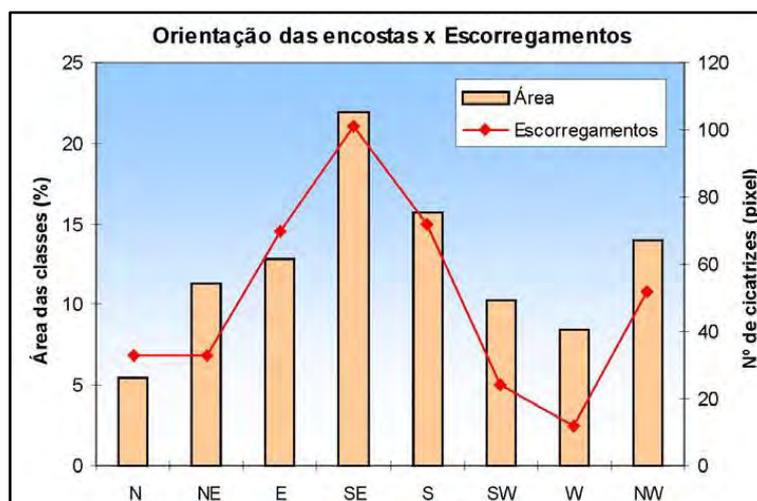


Figura 12 - Pixels afetados por escorregamentos para cada classe de aspecto encontradas por Marcelino (2004).

3.3. Condicionantes Geológicas

Os condicionantes geológicos, da mesma maneira que os morfológicos, exercem influência sob a estabilidade da encosta. A natureza da rocha e sua resistência às ações intempéricas, atuam diretamente na dinâmica entre a encosta e a rede de drenagem (SIDLE *et al.*,1985) e, conseqüentemente, geram mantos de intemperismo com determinadas características (CALCATERRA e PARISE, 2010). De maneira geral, em rochas menos intemperizadas, as juntas controlam a ocorrência dos processos, já em rochas com alto grau de intemperismo os processos são controlados pelas interações entre os elementos constituintes, tais como grãos, clastos e blocos (CALCATERRA e PARISE, 2010).

As encostas sofrem processos bioquímicos influenciados pelos elementos climáticos como temperatura, umidade, precipitação, radiação e evaporação, que alteram as rochas de acordo com suas características. A intensidade de tais processos bioquímicos em um ambiente tropical como a Serra do Mar se deve a um conjunto de fatores, como a grande quantidade de matéria orgânica de rápida decomposição, temperatura e umidade constantes e elevadas mantendo o solo permeável (CRUZ, 1974).

O embasamento rochoso e as alterações intempéricas podem criar zonas de instabilidades lito-estruturais e desencadear processos mecânicos como os movimentos de massa. Os escorregamentos, por exemplo, tendem a ocorrer em área de rochas completamente alteradas (**Tabela 5**).

Tabela 5 - Relação entre os graus de intemperismo e movimentos de massa.

Grau de intemperismo	Movimentos de massa
Saprolito (Rocha completamente alterada)	Escorregamentos rotacionais, rastejos
Granito alterado (15% de rocha não alterada restante)	Corridas de detritos, avalanches e corridas de lama
Rocha parcialmente alterada (De 15 a 85% de rocha não alterada)	Queda de blocos, deslizamentos de blocos, avalanches de detritos, queda de blocos em estruturas foliadas

Fonte: Adaptado de Calcaterra e Parise (2010).

Os perfis intemperizados muitas vezes preservam suas texturas petrográficas e as estruturas litológicas e tectônicas, estando a ocorrência de escorregamentos fortemente relacionada com estas discontinuidades preservadas (CERRI *et al.*, 2017). Tais discontinuidades são chamadas de estruturas reliquiares presente nos solos residuais, são definidas como macroestruturas do solo e mantém as características da rocha mãe, como xistosidade e bandamentos (MACHADO FILHO, 2000).

A geologia estrutural também exerce influência na ocorrência de escorregamentos. Rochas e solos apresentam uma série de discontinuidades estruturais, definidas por Hencher (1987) como divisões ou rupturas de solo ou rocha que marcam uma mudança nas características geotécnicas do material em questão. Podem, segundo o autor, serem definidas em quatro tipos: Juntas tectônicas, falhas, juntas de exfoliação e limites litológicos (**Tabela 6**). Elas influenciam diretamente a circulação de água subsuperficial, criando pontos de fraqueza no maciço e conseqüentemente nas encostas. A presença de discontinuidades afeta a resistência das rochas e altera sua dinâmica interna. São caracterizadas como condicionantes estruturais que influenciam a ocorrência de escorregamentos nos maciços rochosos (HASUI *et al.*, 1994; WOLLE e CARVALHO, 1994; CERRI *et al.*, 2016; IETTO *et al.*, 2016).

A ação do intemperismo está diretamente relacionada ao clima regional, e, ao atuar sob essas discontinuidades acaba alterando química e fisicamente as propriedades das rochas, diminuindo sua coesão, resistência e alterando a hidrologia das mesmas, visto que a rocha alterada apresenta maior porosidade e permeabilidade, tornando-a propícia a ocorrência de escorregamentos (BIERMAN e MONTGOMERY, 2014).

As alterações decorrentes de processos intempéricos tendem a criar zonas de materiais com características de permeabilidade diferenciada, formando áreas de instabilidade. As diferenças de permeabilidade criam descontinuidades mecânicas e hidráulicas, que se tornam caminhos preferenciais de alteração, com grande atuação do intemperismo, responsável por gerar superfícies de menor resistência no maciço, com ocorrência frequente de materiais muito heterogêneos e friáveis (ROCHA, 1971; FERNANDES e AMARAL, 1996; HART, 2007).

Desta maneira, os parâmetros geológicos apresentam grande potencial no desencadeamento de escorregamentos rasos, além de outros tipos de movimentos de massa, uma vez que tais características podem influenciar na criação de áreas instáveis e estáveis nas encostas, auxiliando na análise da suscetibilidade de locais para a ocorrência desses processos geomorfológicos.

Tabela 6 - Descontinuidades estruturais que podem ocorrer em maciços rochosos.

Classificação Geotécnica de Descontinuidades comuns em todos os tipos de rochas e solos

<i>Tipo de Descontinuidade</i>	<i>Características Físicas</i>	<i>Aspectos Geotécnicos</i>	<i>Comentários</i>
Juntas Tectônicas	Fraturas permanentes fruto de stress tectônico. Geralmente ocorrem em grupos ou "conjugadas". Sistemas de fraturas em conjugadas podem ser explicados por meio de campos regionais de stress.	Fraturas tectônicas são classificadas de acordo com o cisalhamento ou a tensão de sua provável fonte de origem. Fraturas de cisalhamento são geralmente menos duras que as fraturas de tensão. Elas podem ocorrer lateralmente sendo temporárias e resistentes.	Podem somente ser extrapoladas com confiança onde a origem geológica é compreendida.
Falhas	Fraturas onde ocorreram deslocamento. Em qualquer escala, de milímetros a quilômetros. Estão geralmente associadas com zonas de rochas com cisalhamento.	Geralmente baixo cisalhamento, principalmente em áreas polidas ou com ranhuras. Podem estar associadas com uma circulação de água subsuperficial ou atuar como barreiras para a circulação. Podem ser áreas com profundas zonas de intemperismo. Falhas Recentes podem ser sismicamente ativas.	Mapeáveis, especialmente onde as rochas de cada lado podem ser combinadas. Grandes falhas podem ser identificadas por lineamentos em fotos juntamente com erosões localizadas.

Juntas de Exfoliação	Áspera, geralmente bem espaçadas; paralelas com a superfície; formadas sob tensão como resultados de alívios.	Podem ocorrer sob dezenas de metros. Geralmente adversas (Paralelas as encostas). Pode haver concentração de intemperismo ao longo delas, caso contrário, boa qualidade da rocha.	Facilmente identificadas devido à individualidade e relação com a topografia.
Limites Litológicos	Limites entre diferentes tipos de rochas. Podem apresentar qualquer ângulo, formato, e complexidade de acordo com o histórico geológico.	Geralmente marcam mudanças nas propriedades geotécnicas, tais como resistência, permeabilidade e ângulo, além de formato do encaixe. Com frequência formam barreiras para a circulação subsuperficial.	Mapeáveis através de interpolação e extrapolação com base no histórico geológico.

Fonte: Adaptado de Hencher (1987).

3.4. Análise da Suscetibilidade a Escorregamentos

A análise da suscetibilidade a escorregamentos rasos busca determinar a possibilidade de ocorrência do processo levando em consideração os parâmetros condicionantes dos mesmos. Ou seja, determina o quão suscetível uma área pode ser afetada por escorregamentos no futuro, sem levar em consideração a magnitude de tal processo ou a data exata em que ele ocorrerá. Este conceito de suscetibilidade visa somente avaliação dos fatores condicionantes, não fazendo relação com os elementos expostos ou danos potenciais, sendo somente uma análise do processo em si (VAN WESTEN *et al.* 2003).

São inúmeras as possibilidades para se analisar os condicionantes e razões da ocorrência de um evento ou de um processo geomorfológico, podendo a princípio serem divididas, em qualitativas e quantitativas, dependendo do objetivo do pesquisador e da escala da área de estudo (**Figura 13**).

O método qualitativo é baseado na experiência do pesquisador, sendo o trabalho de campo muitas vezes a fonte da base de dados, podendo produzir um mapeamento geomorfológico ou sobreposição de mapas de diferentes informações, através do uso de índices e parâmetros pré-estabelecidos. Já o método quantitativo é muito utilizado em grandes áreas, onde informações geotécnicas detalhadas não estão disponíveis. Ele permite a comparação dos locais de ocorrência de escorregamentos pretéritos por meio de análises estatísticas, abordagem de engenharia geotécnica, e mesmo até redes neurais que buscam reconhecer padrões por meio computacional (ALEOTTI e CHOWDHURY, 1999).

Dentre as análises quantitativas, a estatística surge como uma forma de comparar a distribuição espacial dos processos, no caso escorregamentos, com os condicionantes que contribuem para a sua ocorrência, de maneira a hierarquizar quais são mais determinantes para o processo em estudo. Ela permite relacionar condicionantes (morfológicos, geológicos, etc.) com possíveis áreas instáveis, partindo do pressuposto de que as condições geradoras de eventos no passado serão as mesmas no futuro, com a transformação das unidades de terreno ou pixels em novos valores que representam o grau de probabilidade de ocorrência. É uma ferramenta que pode ser aplicada em áreas com ocorrência do processo ou sem, desde que a área seja potencialmente suscetível devido a presença de condições favoráveis de instabilidade (YAN, 1988; ALEOTTI e CHOWDHURY, 1999; VAN WESTEN *et al.* 2003).

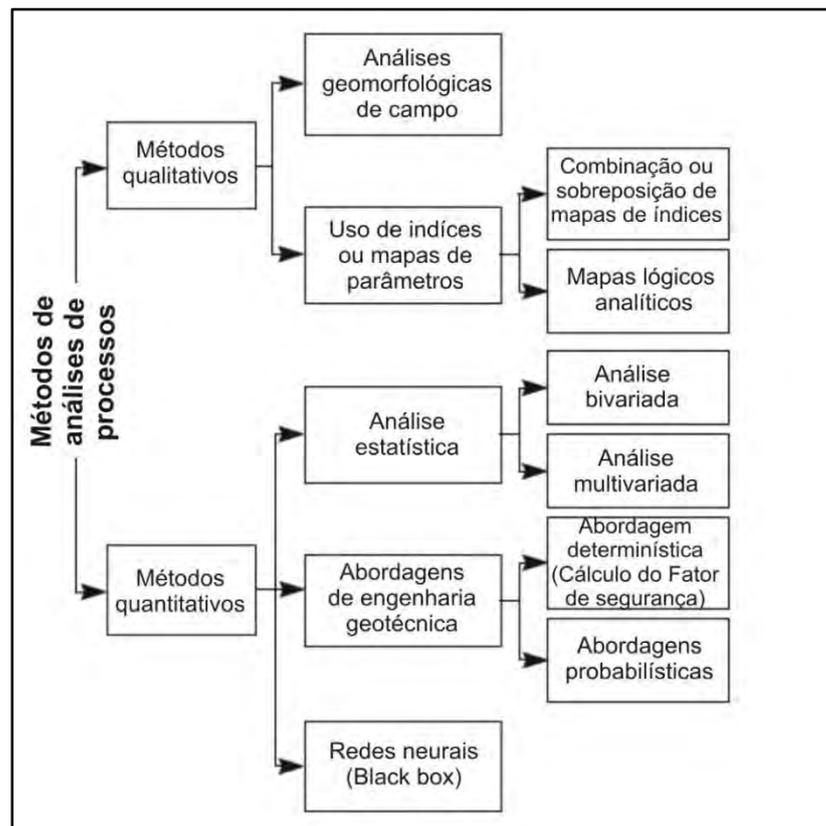


Figura 13 - Fluxograma das metodologias possíveis de análises de processos. **Fonte:** Adaptado de Aleotti e Chowdhury (1999).

A análise estatística pode ser dividida em dois tipos, bivariada e multivariada. A primeira, selecionada para este trabalho, tem como base o uso da densidade de processos em cada classe de condicionante morfológico e geológico selecionado, e a partir disso, se dá pesos para cada uma dessas classes. Para a definição desses pesos existem diferentes metodologias

estatística, tais como o método do Valor Informativo (*Information value method*)¹ proposto por Yan (1988) e Yin e Yan (1988). Já a análise multivariada baseia-se na relação de ausência e presença, com uso de variáveis dependentes e independentes aos processos, projetando e expandindo cenários a partir de uma área inicial (ALEOTTI e CHOWDHURY, 1999; VAN WESTEN *et al.* 2003; SÜZEN e DOYURAN, 2004).

A construção de uma carta de suscetibilidade a partir desse método exige uma série de procedimentos. Segundo Garcia *et al.*, 2007, primeiramente se deve selecionar os parâmetros de análise e a escala de trabalho; posteriormente definir entre o modelo quantitativo (Ex.: Uso de pixels) ou qualitativo (Ex.: Critérios de mapeamento geomorfológico com o cruzamento de informações); a forma de representação; e por fim, como será realizada a validação. Tais cartas mostram a probabilidade de ocorrência de escorregamentos, e a validação dessa probabilidade se mostra importante para não desencadear o uso de informações inconsistentes.

A validação pode ser realizada por diferentes modelos de classificação binária, como por exemplo pelas curvas ROC (*Receiver Operating Characteristic*), reconhecido por ser um modelo que estima todos os cenários possíveis entre os falsos negativos e os falsos positivos, ela foi utilizada por Bi e Bennett (2003); Pereira *et al.* (2014); Gariano *et al.* (2015), Sarkar *et al.* (2016) e Zhang *et al.* (2016). A REC (*Regression Error Characteristic*) utilizada por Bi e Bennett (2003), que é caracterizada por fazer uma relação entre o nível máximo de erro permitido e a acurácia do cenário proposto. Já a Curva de Sucesso, presente nos trabalhos de Pereira (2009) e Piedade *et al.* (2011), se baseia na validação de cada cenário de susceptibilidade, sustentado por um único fator de predisposição, a partir da divisão do inventário de escorregamentos (Grupo - Definição e Grupo - Validação).

O uso de inventários e mapas de eventos pretéritos para a validação é comum, uma vez que tais dados são eficientes para identificar a suscetibilidade de processos morfodinâmicos ou apenas uma caracterização do evento, podendo ser elaborados em diferentes escalas (>1:25.000 até <1:200.000). São necessárias imagens de alta resolução para a interpretação dos processos; fotografias da área costumam ser uma das fontes mais consultadas para este tipo de análise, sendo importante a obtenção das imagens logo após o evento, afim de manter a acurácia do mapeamento (VAN WESTEN *et al.*, 2008; PEREIRA *et al.*, 2014).

¹ O método também é reconhecido pelo termo “*The Statistical Index Method*” na literatura.

3.5 Valor Informativo (VI)

O Valor Informativo é um método utilizado para a definição de pesos de uma análise estatística bivariada (SÜZEN e DOYURAN, 2004). Esse tipo de análise estatística é geralmente utilizado na identificação de um padrão de condições morfológicas ou geológicas para a ocorrência de escorregamentos. O Valor Informativo auxilia no entendimento e identificação de áreas com diferentes graus de suscetibilidade ao processo, sendo eficaz em ambientes com grandes variações nas classes morfológicas e geológicas, possibilitando uma maior compreensão da ocorrência dos escorregamentos.

Este método possui base Bayesiana, que se sustenta na razão entre probabilidade *à posteriori*, que apresenta uma evidência empírica, e a probabilidade *à priori*, que independe da experiência e expressa a incerteza sobre o objeto de análise. Ele possibilita a ponderação de cada uma das classes dos parâmetros morfológicos e geológicos analisados, de forma objetiva e quantitativa (PIEIDADE *et al.*, 2011).

Esse índice faz uma relação entre a área afetada por escorregamentos em cada uma das classes de cada condicionante morfológico e geológico dividido pela área total da área de estudo, onde quanto maior o valor informativo gerado, maior será sua suscetibilidade (YAN, 1988; YIN e YAN, 1988), ele é definido conforme Equação 1.

$$I_i = \log \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

I_i : Valor Informativo

S_i : N° de *pixels* com escorregamentos rasos na variável X_i ;

N_i : N° de *pixels* com a variável X_i ;

S : N° total de *pixels* com escorregamentos na área de estudo total;

N : N° total de *pixels* na área total de estudo.

Como se está trabalhando em escala logarítmica, I_i não pode ser definido quando $S_i = 0$. Desta forma, quando isso ocorrer é necessário assumir o valor de I_i como igual ao I_i mais baixo encontrado para o conjunto dos parâmetros na área de estudo (PIEIDADE *et al.*, 2011).

Valores positivos de I_i indicam uma maior suscetibilidade de determinada classe ou local para a ocorrência de escorregamentos rasos, assim, quanto maior o valor, maior a

suscetibilidade (**Figura 14**). Consequentemente valores negativos de I_i indicam que determinada classe ou local não exerce muita influência na ocorrência do processo, ou seja, apresenta suscetibilidade baixa ou nula (YAN, 1988; PIEDADE *et al.*, 2011).

Esse método foi aplicado, por exemplo, em Portugal por Zêzere (1997), Pereira (2009) e Piedade *et al.* (2011); na Itália por Cascini *et al.* (2015) e na China por Zhang *et al.* (2016), as três regiões são caracterizadas por apresentaram tais variações entre os condicionantes do processo, razão pela qual foi escolhida a Serra do Mar como primeira área a ser aplicado tal método no Brasil, visto que também é uma área que apresenta tais características necessárias para a análise estatística (DIAS *et al.*, 2018).

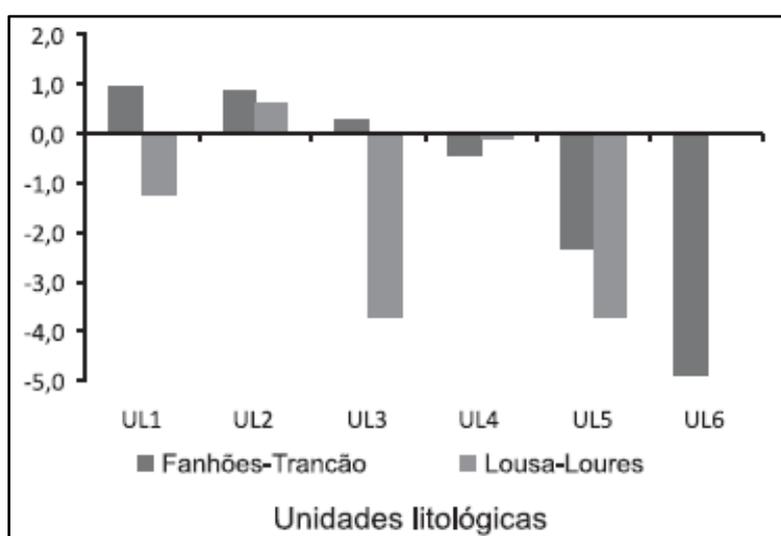


Figura 14 - Gráfico elaborado para as classes de unidades litológicas a partir da aplicação do VI, em que fica evidente o caráter negativo ou positivo de cada uma das classes. **Fonte:** Piedade *et al.* (2011).

A definição da suscetibilidade e construção de uma carta de suscetibilidade por meio desse índice (**Figura 15**), é realizada pela soma dos valores informativos obtidos por cada fator condicionante. O valor de susceptibilidade (I_j) para cada pixel j é calculado pela somatória do Valor Informativo de cada fator dado pela Equação 2.

$$I_j = \sum_{i=1}^n X_{ji} \cdot I_i \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

n : N° de variáveis;

X_{ij} é igual a 1 ou 0, dependendo se a variável X_i está ou não presente no pixel j .

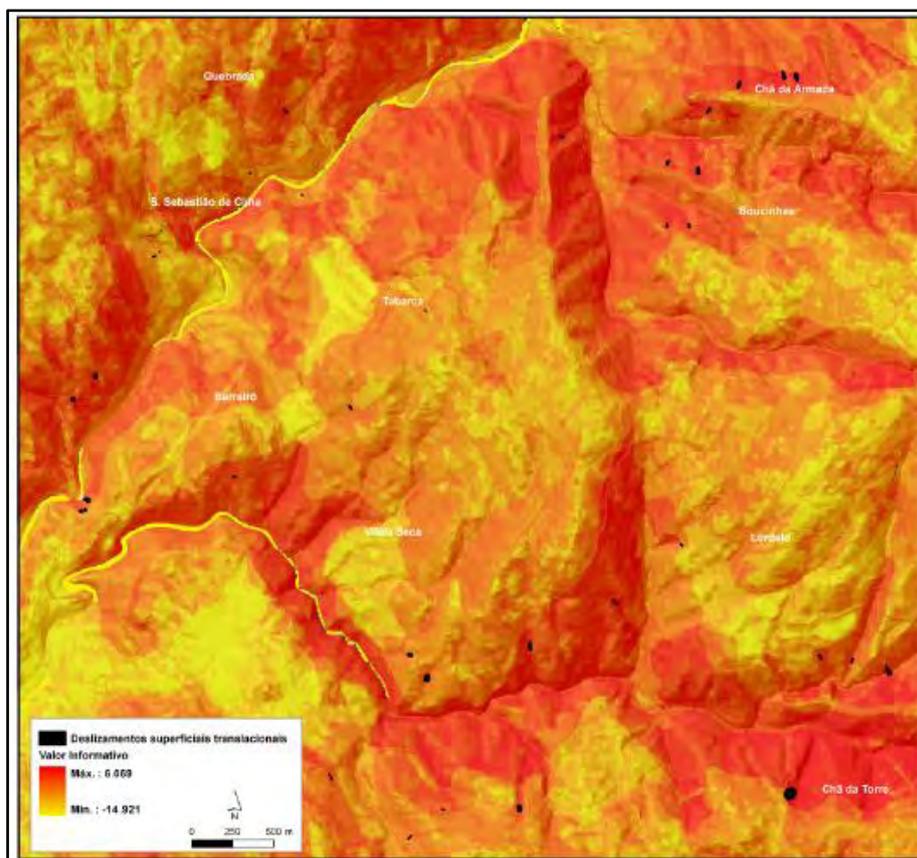


Figura 15 - Carta de suscetibilidade a escorregamentos elaborada através do Valor informativo, em que é possível observar que áreas com valores positivos (vermelho) são áreas suscetíveis e áreas com valores negativos (amarelo) são áreas não suscetíveis. **Fonte:** Pereira (2009).

4. ÁREA DE ESTUDO

O município de Caraguatatuba localiza-se no litoral norte do estado de São Paulo, região sudeste do Brasil. Ele faz divisa com outros quatro municípios, Ubatuba, São Sebastião, Natividade da Serra e Paraibuna, além de possuir uma área de 485,097 km² (**Figura 16**). A região está sob influência da Serra do Mar, conjunto de escarpas festonadas, que se caracteriza por ser em território paulista uma típica borda de Planalto, que possui topo nivelado em altitudes entre 800 e 1200 m (ALMEIDA e CARNEIRO, 1998).

A litologia das escarpas no litoral norte é caracterizada por rochas ígneas com alto grau de metamorfismo regional, cuja principal orientação é NE-SW. Há presença de granito-gnaiss e gnaisses graníticos (rochas mais resistentes), onde vales subsequentes abrem-se em rochas menos resistentes à erosão, explicando a inexistência de amplas planícies litorâneas no litoral norte, diferente do litoral sul do estado de São Paulo. (ALMEIDA, 1964; CRUZ, 1974).

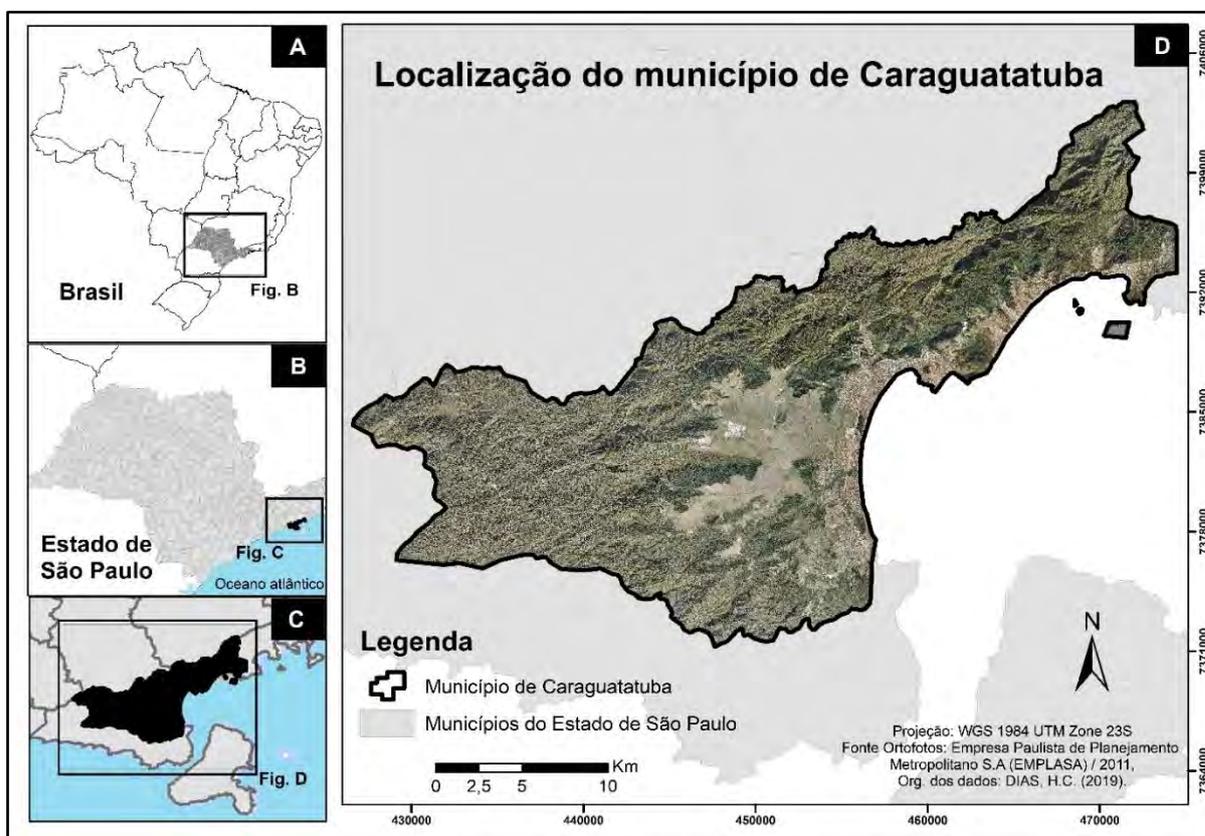


Figura 16 - Localização do município de Caraguatatuba em relação ao estado de São Paulo e ao Brasil.

Em Caraguatatuba a geologia caracteriza-se por ser diferente do resto do litoral norte, apresentando granulitos, gnaisses facoidais, gnaisses xistosos, biotita-xistos, e muscovita-xistos, predominando as rochas metamórficas e ígneas (CRUZ, 1974).

As mudanças litológicas nessa região e a diferenciação das direções estruturais condicionam, uma concentração de acidentes tectônicos que possibilitam o recuo da escarpa nesta parte do litoral norte, produzindo ampliadas baixadas/planícies. Uma situação diferencial, visto que as escarpas da Serra do Mar tendem a ser mais próximas ao mar no litoral norte, como ocorre em Ubatuba, por exemplo. Há ainda muitas falhas e fraturas, com orientação geral NE-SW, fruto de grandes perturbações tectônicas, visto que grande parte das rochas localizadas na parte alta encontram-se intensamente dobradas e falhadas (CRUZ, 1974).

Com relação a cobertura vegetal, parte do município integra o Parques Estadual Serra do Mar (PESM). A área possui mata atlântica densa, do tipo floresta ombrófila densa, caracterizada pela presença de árvores de 15 a 40 m de altura, o peso da vegetação sobre a encosta e o arranjo das raízes tendem a influenciar a ocorrência de escorregamentos nestas áreas, onde aproximadamente 63% está em estado de desenvolvimento ou em regeneração florestal por conta da ocorrência de tais processos (PORTELA, 2014). As cicatrizes dos escorregamentos de 1967 são bem evidentes na paisagem, uma vez que a vegetação que se desenvolveu nos locais é muito diferente do restante da floresta, sendo composta por *Gleichênias*, um tipo local de samambaia (**Figura 17**).

Na área de estudo ocorrem três grandes categorias de solos: Latossolos bem drenados, Podzólicos vermelho-amarelo moderadamente drenados e Litossolos pouco desenvolvidos, segundo a classificação anterior da EMBRAPA. Segundo o sistema de classificação atual, o Sistema Brasileiro de Classificação de solos (SiBCS), de 2006, tais solos correspondem respectivamente a Latossolo, Argissolo e Neossolo. Os solos da área são caracterizados por apresentarem materiais siltosos/arenosos em horizontes mais profundos, enquanto que os mais superficiais se apresentam mais argilosos (FERREIRA, 2013).

Estudos recentes na área ressaltam que em locais com presença de cicatrizes de escorregamentos há solos com uma maior porcentagem da fração areia, fator que se relaciona diretamente com a condutividade hidráulica de solos saturados (K_{sat}), com valor médio de 10^{-4} cm/s. Além disso, a área também é caracterizada por apresentar uma grande variação de coesão efetiva do solo, uma vez que algumas áreas podem apresentar valores de 11 kPa e outras áreas podem indicar zero de coesão (GOMES, 2012; VIEIRA *et al.*, 2015). Tal característica pode influenciar diretamente a estabilidade das encostas e possivelmente deflagrar movimentos de massa.

Escorregamentos são processos recorrentes na Serra do Mar, por conta dos altos índices pluviométricos e taxas de intemperismo na área, além disso as condições das escarpas litorâneas de Caraguatatuba, e até mesmo do litoral norte de uma forma geral, favorecem diretamente a

ocorrência desse tipo de processo, visto que sua ocorrência está condicionada a uma combinação de fatores. Vários autores buscam estabelecer a relação entre os fatores morfológicos, morfométricos ou pedológicos com a ocorrência de escorregamentos ou corridas de detritos em Caraguatatuba, de maneira a tentar estabelecer padrões para o processo (FERREIRA, 2013; LISTO e VIEIRA, 2015; VIEIRA e RAMOS, 2015; GOMES e VIEIRA, 2016; DIAS *et al.*, 2016a; DIAS *et al.*, 2016b; COELHO, 2016; DIAS *et al.*, 2017).

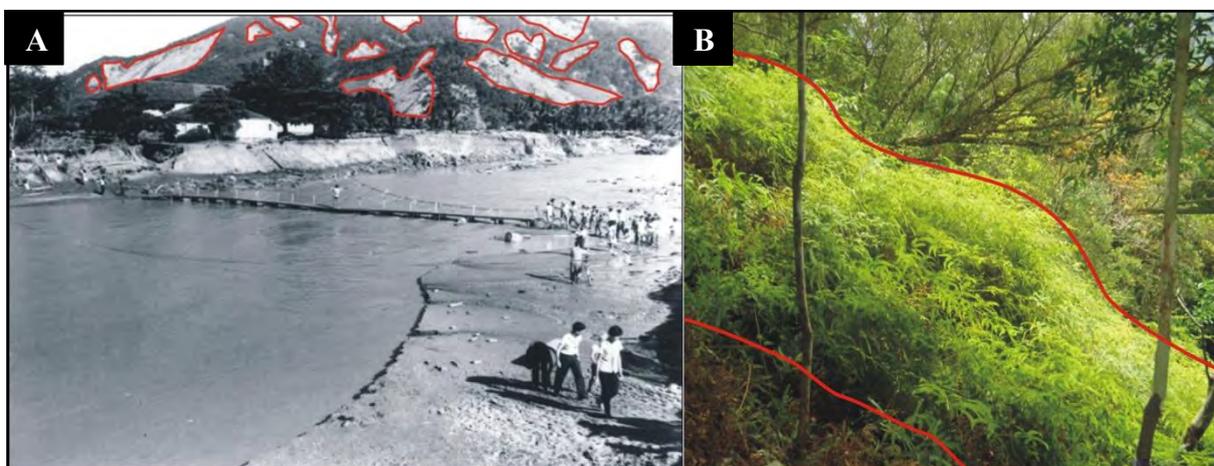


Figura 17 - Comparação das cicatrizes de escorregamentos. A – Cicatrizes de escorregamentos do Evento de 1967 em Caraguatatuba; B – Situação atual das cicatrizes de escorregamentos com a presença de samambaia gleichênia. **Fonte:** Arquivo Público de Caraguatatuba; GPMorfo.

As condições climáticas de Caraguatatuba são fruto da influência da latitude, relevo e umidade que vem do oceano. Segundo a classificação de Köppen-Geiger (1936) o clima do município é Af (Clima Tropical Chuvoso), sem estação seca, havendo apenas uma diminuição nos totais de precipitação durante as estações (SANTOS e GALVANI, 2014). A área sofre a ação de sistemas frontais intensos provindos das altas latitudes, com a ocorrência do encontro de massas polares e tropicais. Tal encontro é responsável por desencadear irregularidades climáticas, os chamados eventos extremos, ocasionando temperaturas elevadas e alta pluviosidade, principalmente no período primavera-verão (SANTOS e GALVANI, 2014).

Destaca-se que as isoietas de precipitações médias anuais da área variam entre 1.600 mm a 2.000 mm, sendo que no verão de 1966/1967, segundo dados do DAEE (Departamento de Água e Energia Elétrica) foram precipitados aproximadamente 1.500 mm, ocasionando a deflagração de um evento de alta magnitude no mês de março, considerado um dos desastres naturais de maior importância para o país.

Entre os dias 17 e 20 de março de 1967 houve níveis pluviométricos muito acima da média em um curto período na cidade, desencadeando escorregamentos generalizados que culminaram na deflagração de corridas de detritos nos canais principais das bacias hidrográficas, causando severos danos em todo perímetro de Caraguatatuba. O município registrou 260,0 mm no dia 17 e 324,8 mm no dia 18, com um total mensal de 945,6 mm (CRUZ,1974). As chuvas nos três primeiros meses do ano na cidade foram constantes, razão pela qual pode se explicar a ocorrência deste evento de alta magnitude sob tais índices pluviométricos e não em outros anos analisados por Cruz (1974).

Gramani (2001) fez uma síntese dos acontecimentos do dia 18 de março de 1967, dividindo as ocorrências em três fases: 1ª. Enchente Inicial, 2ª. Escorregamentos, 3ª. “Debris Flows” ou Corridas de Detritos, e 4ª. Enchente por bloqueio. Segundo Cruz (1974), ocorreram escorregamentos de todos os tipos e formas em Caraguatatuba (**Figuras 18 a 20**), com uma movimentação aproximada de dois milhões de toneladas de sedimentos, causando severos danos sociais e econômicos a população local.



Figura 18 - Escorregamento raso deflagrado no evento de 1967. **Fonte:** Arquivo Público de Caraguatatuba.



Figura 19 - Rodovia Tamoios atingida por escorregamento raso. **Fonte:** Arquivo Público de Caraguatatuba.



Figura 20 - Material mobilizado nas vias de circulação e ao fundo o Morro do Jaraguá com grande quantidade de escorregamentos. **Fonte:** Arquivo Público de Caraguatatuba.

5. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Neste tópico são descritos os itens metodológicos² para o objetivo proposto (**Figura 21**). Primeiramente, a partir da base de dados disponível foram feitos os mapas morfológicos (4.1) e geológicos (4.2); em seguida a aplicação da estatística bivariada e definição dos pesos pelo Valor Informativo (4.3); e por fim a validação dos cenários de suscetibilidade (4.4).

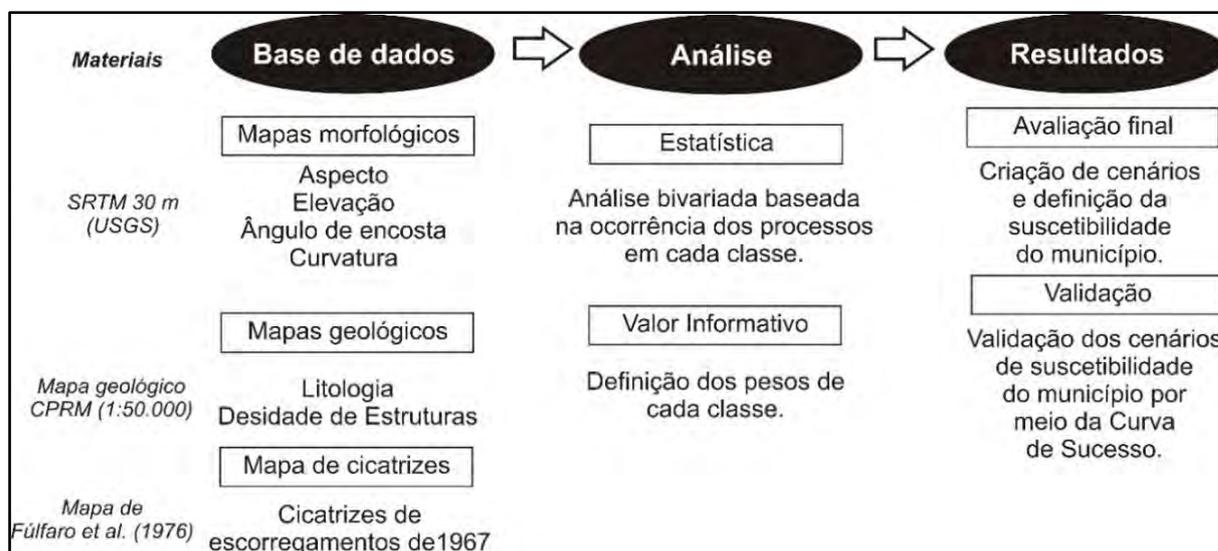


Figura 21 - Procedimentos metodológicos da dissertação, com detalhe para os materiais utilizados, base de dados, forma de análise e os resultados.

5.1. Mapas Morfológicos

Para confecção dos mapas morfológicos de Curvatura, Elevação, Ângulo de encostas e Aspecto (**Tabela 7**), foi utilizado SRTM (30 m) (*Shuttle Radar Topographic Mission*) fornecido pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*). A aquisição deste SRTM se baseia em uma missão espacial liderada pela NASA visando gerar um modelo digital de elevação global, elaborado continente por continente, sendo o primeiro a América do Norte. A missão faz uso da técnica de Interferometria, responsável por coletar medidas tridimensionais do terreno, com antenas das bandas C e X. Os dados coletados por essas bandas foram processados no JPL (*Jet Propulsion Laboratory*) e no Centro Aeroespacial da Alemanha (DLR), respectivamente. Estes, então foram usados para criar um Modelo Digital de Elevação (MDE) de 90 m de resolução (VALERIANO, 2004; BARROS *et al.*, 2005). Posteriormente também disponibilizados os de resolução de 30 m.

² Maiores detalhes dos procedimentos metodológicos estão em anexo.

Tabela 7 - Mapas morfológicos e suas principais características.

Mapas morfológicos	Características
<i>Mapa de Elevação</i>	Variações altimétricas de uma bacia hidrográfica, que podem influenciar o transporte e a deposição de sedimentos dos deslizamentos.
<i>Mapa de Curvatura</i>	Demonstra a morfologia da encosta, sendo importante para verificar a existência de formatos, como o côncavo, que tendem a influenciar a ocorrência de deslizamentos.
<i>Mapa de Ângulo de encosta</i>	Inclinação da encosta, fator importante para a ocorrência de deslizamentos.
<i>Mapa de Aspecto</i>	Demonstra quais são áreas com orientações que mais recebem radiação solar.

Para a elevação foram definidas cinco classes de altitude, a saber: 0 – 200 m, 200,1 m – 400 m, 400,1 m – 600 m, 600,1 m - 800 m e > 800 m, a partir dos trabalhos de Santos (2009); Vieira *et al.* (2010) e Nery e Vieira (2014). As classes de curvatura côncava, retilínea e convexa, foram definidas a partir da interpretação das curvas de nível e hidrografia da área, sendo definidas em valores < -0,37 (Côncavo), -0,37 a 0,37 (Retilíneo) e > 0,37 (Convexo). Para o ângulo de encosta adotaram-se seis classes, a saber: 0° - 10°, 10,1° - 15°, 15,1° - 30°, 30,1° - 45°, 45,1° - 55° e 55,1° - 70°, estabelecidos a partir de discussões e de metodologia aplicada por especialista do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo).

5.2. Mapa litológico/estrutural

Os mapas litológico e estrutural foram elaborados com base nos mapas geológicos de Chierigati *et al.* (1982) e DNPM/CPRM (1991) (Agência Nacional de Mineração e Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais) de Escala 1:50.000 (**Figura 22**).

Esses mapas foram georreferenciados e vetorizados em ambiente SIG e a partir daí foi gerado um mapa de densidade de estruturas³. A escolha de quatro classes de densidade: <1, 1-2, 2-3 e >3 por km², foi definida por meio de uma avaliação visual da quantidade de lineamentos na área, em uma tentativa de identificar a influência da densidade desse tipo de estrutura na ocorrência dos escorregamentos rasos.

³ Mapa criado através da ferramenta “Line Density” no software ArcGis 10.2

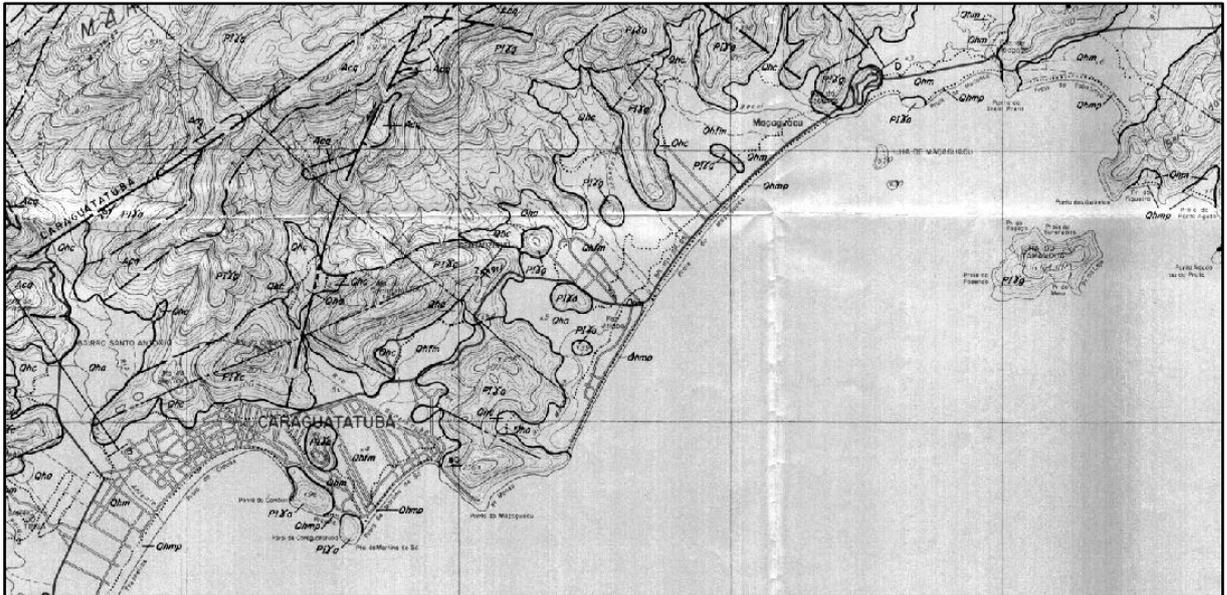


Figura 22 - Parte do mapa geológico utilizado para a vetorização e confecção dos mapas litológico e estrutural. **Fonte:** Chieregati *et al.* (1982).

5.3. Definição da suscetibilidade

Para avaliação da influência dos parâmetros geológicos e morfológicos na distribuição dos escorregamentos foi utilizado um inventário com 640 cicatrizes de escorregamentos de 1967 baseado em Fúlfaro (1976) e conferido a partir da análise de fotografias aéreas e de trabalhos de campo (**Figura 23**). As cicatrizes permitem a realização de correlações dos fatores condicionantes e os processos. Sua delimitação pode se basear em diferentes métodos sendo muitas sobre uma interpretação de imagens de satélite ou fotografias áreas (MARTINS *et al.*, 2015). O volume final e a distribuição espacial dos escorregamentos foram comparados e avaliados em conjunto com os parâmetros morfológicos e geológicos por meio do Valor Informativo.

A definição da suscetibilidade pelo método do Valor Informativo (*I_i*) proposto por Yin e Yan (1988), prevê a utilização da quantidade de pixels em cada um dos fatores de interesse. Desta forma, a base da aplicação deste método são os valores das quantidades de pixels com e sem escorregamentos para cada uma das classes (**Tabela 8**).

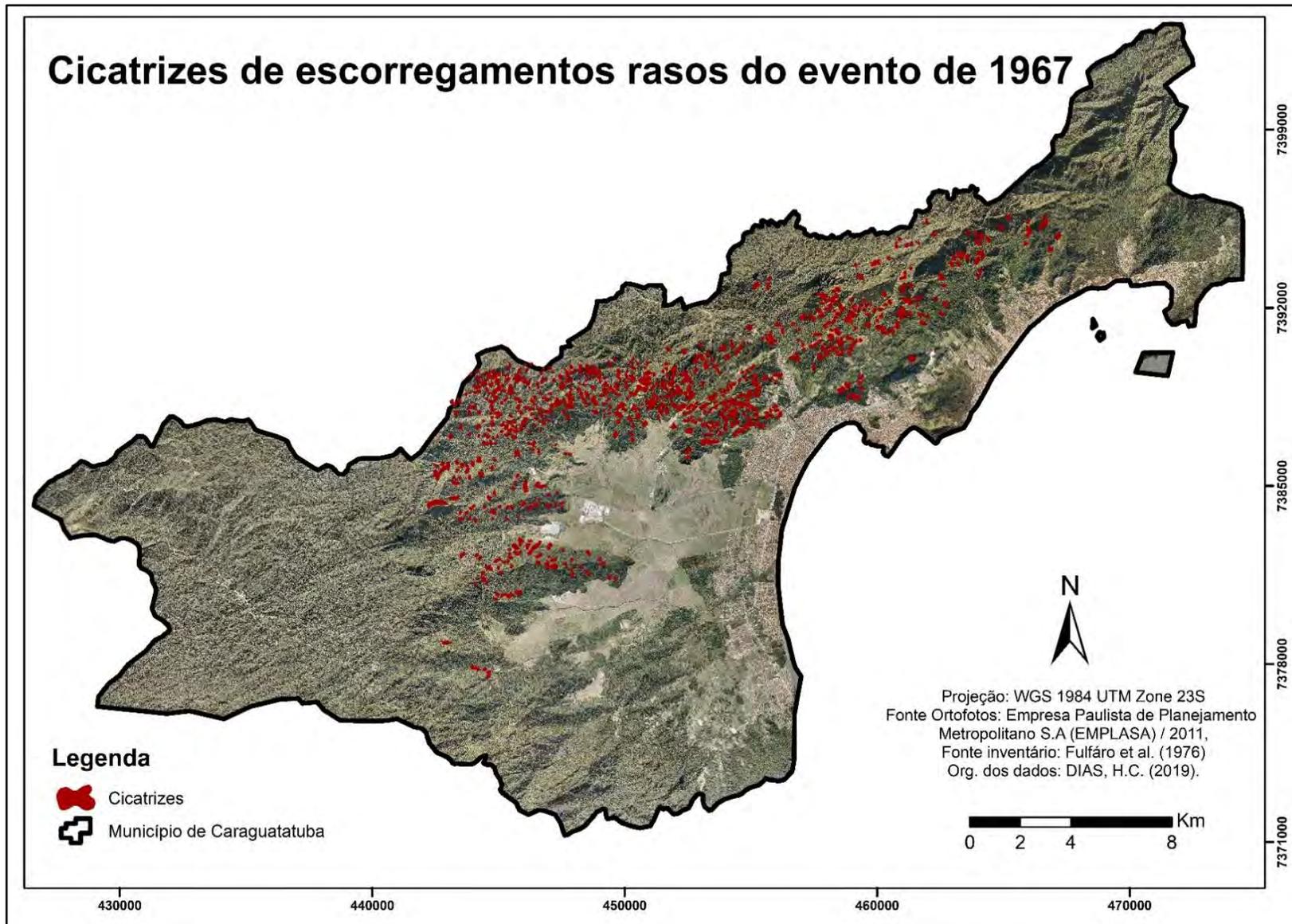


Figura 23 - Cicatrizes de escorregamentos de 1967 baseadas em Fulfaro *et al.* (1976).

Tabela 8 - Descrição para cálculo do Valor Informativo.

Valor Informativo											
Código	Classe	Count	Área (m ²)	Si	Ni	S	N	Si/Ni	S/N	L/M	VI (Ii)
<i>Exemplo</i>	15,1 - 30	239523	215570700	2681	239523	4530	597777	0,01119308	0,007578077	1,477034334	0,39
Identificação da camada	Classes de cada parâmetro utilizados	Pixels totais	Área total em metros	Nº de pixels com escorregamentos rasos em cada classe	Nº de pixels em cada classe	Nº total de pixels com escorregamentos na área de estudo total	Nº total de pixels na área total de estudo	Nº de pixels com escorregamentos rasos em cada classe dividido pelo Nº de pixels em cada classe	Nº total de pixels com escorregamentos na área de estudo total dividido pelo Nº total de pixels na área total de estudo	Divisão dos valores de Si/Ni e S/N resultando no Valor Informativo	Valor Infomartivo

Equação
$$I_i = \log \frac{S_i/N_i}{S/N}$$

Na **Tabela 8** estão todas as etapas e cálculos necessários para a definição dos valores informativos para cada classe de cada parâmetro, assim como sua suscetibilidade. Inicialmente os pixels são calculados em ambiente SIG, obtidos os valores de pixels, eles foram transferidos para o uma planilha e posicionados nos campos “Count”, “Si”, “Ni”, “S” e “N” conforme a descrição.

A partir dos resultados da **Equação 1** é possível inferir informações sobre a instabilidade da área de análise pela relação positivo/negativo dos valores (YAN, 1988), onde:

Negativo: Existe a possibilidade, mas a área é de difícil movimentação.

Positivo: Existe uma grande possibilidade, área de fácil movimentação.

Zero: Não há informações sobre escorregamentos.

No caso do exemplo colocado na Tabela 8, a classe de Ângulo de encosta entre 15,1 – 30° apresentou *Ii* de 0,39. Tal valor é positivo, alto e caracteriza essas áreas como setores da encosta de fácil movimentação. Definidos os valores de *Ii* para cada classe de cada parâmetro morfológico e geológico, foram criados quatro cenários de suscetibilidade para um melhor entendimento da influência de mais ou menos parâmetros na definição da suscetibilidade a escorregamentos rasos (**Tabela 9**).

Tabela 9 - Variáveis utilizadas nos quatro cenários criados.

Cenário	Número de variáveis	Condicionantes
1	6	Elevação + Aspecto + Ângulo de encosta + Curvatura + Litologia + Densidade de Lineamentos
2	5	Aspecto + Ângulo de encosta + Curvatura + Litologia + Densidade de Lineamentos
3	5	Elevação + Aspecto + Curvatura + Litologia + Densidade de Lineamentos
4	3	Elevação + Ângulo de encosta + Litologia

5.4. Validação dos cenários de suscetibilidade

Com intuito de entender o papel de cada fator na ocorrência dos escorregamentos rasos, realizou-se uma análise sensitiva e calculou-se as Curvas de Sucesso para cada parâmetro, tal como realizado por Zêzere *et al.* (2007); Pereira (2009) e Piedade *et al.* (2011). Para a validação foi utilizado o inventário de cicatrizes do evento de 1967 (FÚLFARO *et al.*, 1976). A partição desse inventário pode ser feita de maneira espacial, temporal ou aleatória. Neste trabalho optou-

se pela partição aleatória, que resultou em dois inventários, um para definição da suscetibilidade (INV1) e outro para validação (INV2), gerando assim uma Curva de Sucesso e de predição para cada cenário de suscetibilidade (**Figura 24**). A utilização de inventários distintos para a validação gera melhores resultados, pois uma divisão espacial ou temporal pode auxiliar em uma previsão mais acurada dos resultados e não somente uma análise da adaptação do modelo a base de dados. (REMONDO *et al.*, 2003).

A comparação entre os cenários de suscetibilidade é realizada por meio da Curvas de Sucesso conforme Piedade *et al.* (2011). Essas curvas fazem uma relação entre escorregamentos preditos e a área definida como suscetível pelo cenário, além de possibilitar a verificação da eficiência de mapas de suscetibilidades gerados por duas ou sete variáveis, por exemplo.

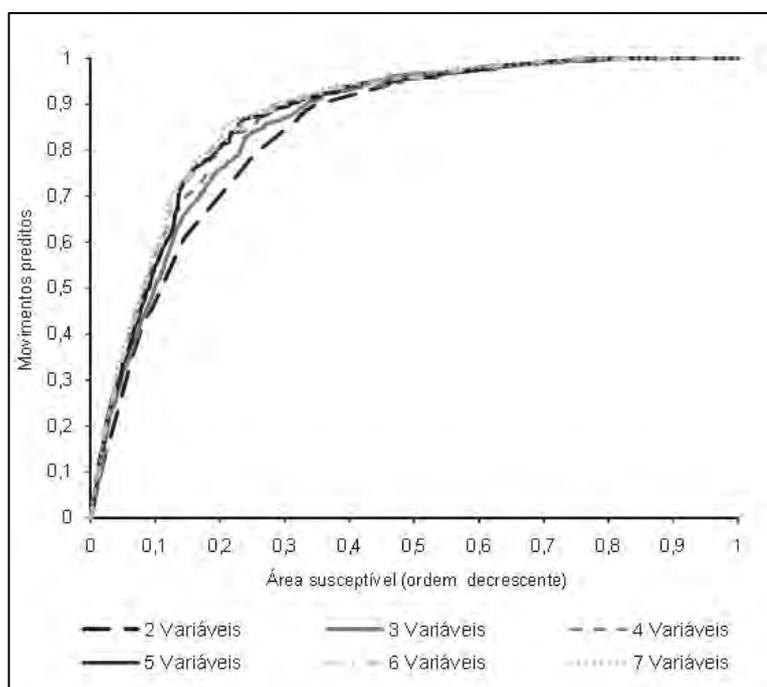


Figura 24 - Curva de sucesso que compara a eficácia do uso de duas ou mais variáveis na predição de escorregamentos. Nota-se que não há uma diferença relevante entre os cenários que utilizam cinco e sete variáveis **Fonte:** Piedade *et al.* (2011).

A Curva de Sucesso apresenta uma AAC (Área Abaixo da Curva) que é gerada a partir da **Equação 3** com base na comparação das classes de suscetibilidade e a ocorrência de escorregamentos (Inventário de validação), na qual, quanto maior a área abaixo da curva maior taxa de sucesso o modelo apresenta (REMONDO *et al.*, 2003).

$$\sum_{i=1}^n \left[(LS_i - L_i) * \frac{a_i + b_i}{2} \right]$$

Equação 3

Onde:

$(LS_i - L_i)$: Amplitude da classe.

a_i : Valor da ordenada correspondente L_i .

b_i : Valor da ordenada correspondente a LS_i .

Os valores obtidos foram ordenados hierarquicamente permitindo comparar a importância relativa de cada parâmetro morfológico e geológico.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1. Análise de sensibilidade dos parâmetros morfológicos e geológicos para a instabilidade de encostas

Ao todo foram avaliados seis parâmetros, Elevação, Ângulo de encosta, Curvatura, Aspecto, Litologia e Densidade de Lineamentos Estruturais, sendo o Valor Informativo definido para cada parâmetro baseado na presença de escorregamentos. A partir daí, foi possível o cálculo das respectivas taxas de sucesso, as quais indicaram uma diferença relevante entre os parâmetros utilizados, sendo a maior relevância do parâmetro Litologia e a menor do parâmetro Densidade de Lineamentos Estruturais (**Figura 25**). Desta forma, é possível identificar que os parâmetros apresentam taxas de sucesso distintas (**Tabela 10**). O parâmetro litologia apresentou a maior taxa de sucesso (0,793), seguido por elevação (0,706) e ângulo de encosta (0,701). Os outros três parâmetros apresentaram valores mais baixos e distantes dos três primeiros, curvatura (0,590), aspecto (0,574) e densidade de lineamentos estruturais (0,567).

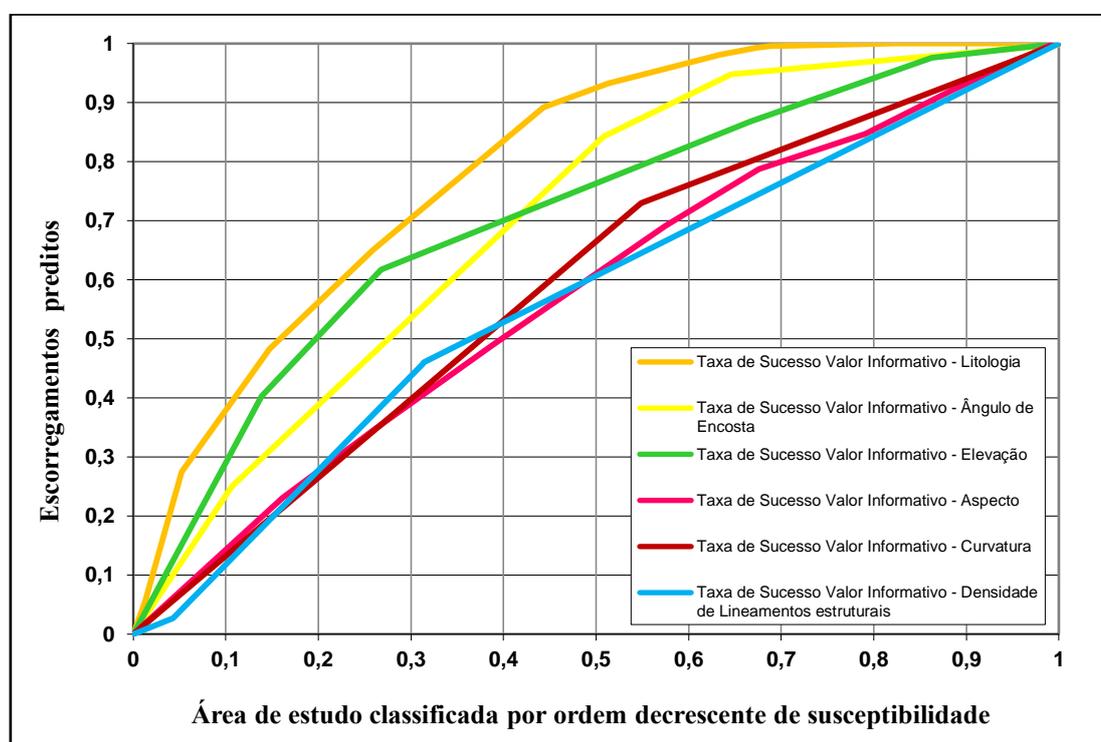


Figura 25 - Curvas das taxas de sucesso da suscetibilidade a escorregamentos rasos por condicionante. Nota-se que o parâmetro Litologia apresentou a maior Taxa de Sucesso.

Tabela 10 - Condicionantes analisados e suas respectivas taxas de sucesso.

Condicionante	AAC da Taxa de Sucesso
Litologia	0,793
Elevação	0,706
Ângulo de encosta	0,701
Curvatura	0,590
Aspecto	0,574
Densidade de Fraturas	0,567

Em Huizhou, na China, Zhang *et al.* (2016) utilizaram o método do VI para nove parâmetros de análise (Litologia, distância de falhas, elevação, ângulo de encosta, aspecto, cobertura do solo, distância de estradas, distância de corpos d'água e precipitação) e encontraram três parâmetros como os mais relevantes aos escorregamentos: Cobertura do solo, litologia e elevação, sendo estas duas últimas as mesmas identificadas no presente trabalho.

Na região norte de Portugal, Pereira (2009) ao empregar o mesmo método para oito parâmetros (Arranjo de vertentes, litologia, uso do solo, perfil transversal de vertentes, densidade de falhas, exposição, unidades geomorfológicas e declive), encontrou uso do solo e arranjo de vertentes como os parâmetros de maior relevância, e diferentemente dos resultados obtidos para Caraguatatuba e por Zhang *et al.* (2016), a litologia foi o parâmetro de menor relevância para a área.

A diferença entre os resultados pode ser explicada pelo alto nível de atividade antrópica de paisagens no norte de Portugal, uma vez que a influência das atividades humanas cria e/ou altera as coberturas e usos do solo e podem desestabilizar as encostas. Essa influência, no entanto, não ocorre na Serra do Mar, onde a suscetibilidade dos escorregamentos é diretamente relacionada aos fatores naturais (Morfologia, Litologia etc), aqueles com influência antrópica são isolados e pontuais (WOLLE e CARVALHO, 1994).

Outros autores, no entanto, destacam a importância litológica, uma vez que diferentes unidades, por vezes, geram grandes diferenças na estabilidade, tornando o embasamento rochoso muito significativo para ocorrência de escorregamentos rasos (DONATI e TURRINI, 2002; AVANZI *et al.*, 2004; ZHANG *et al.*, 2016; DIAS *et al.*, 2017)

A importância litológica para a ocorrência desse tipo de processo também é discutida por Donati e Turrini (2002) que analisaram aspectos morfológicos e geológicos na Cordilheira dos Apeninos na Itália, definindo a classe litologia como a mais significativa para a ocorrência de escorregamentos, além da proximidade de falhas e fraturas.

Em Caraguatatuba, Dias *et al.* (2017) analisaram parâmetros morfológicos e geológicos na bacia do Rio Santo Antônio e encontraram a litologia como fator de maior importância na ocorrência de escorregamentos rasos. Já Cerri *et al.* (2018) analisaram apenas fatores geológicos, tais como presença de falhas, fraturas e foliações, e concluíram que áreas com presença de tais estruturas tendem a ser mais propícias para a presença de escorregamentos no mesmo município.

Os resultados encontrados pelos autores dialogam com os encontrados nesta pesquisa, uma vez que por meio da análise sensitiva foi possível a hierarquização dos parâmetros, evidenciando a importância litológica para a geração de áreas instáveis.

Os parâmetros morfológicos tiveram menores taxas que a litologia, mas ainda assim são relevantes para o processo, em especial elevação e ângulo de encosta avaliados por diversos autores nacionais e internacionais (PACHAURI e PANT, 1992; ZHOU *et al.*, 2001; LAN *et al.*, 2004; MARCELINO, 2004; SANTOS, 2009; VIEIRA *et al.*, 2010; SILVEIRA *et al.*, 2013; NERY e VIEIRA, 2014; MARTINS *et al.*, 2017; DIAS *et al.*, 2018).

6.1.1. Litologia

A litologia foi o parâmetro identificado como mais relevante para a suscetibilidade (0,793). Os tipos litológicos presentes no município são principalmente rochas metamórficas e ígneas, como Mica-xistos, Gnaisses, Quartzitos e Granitos, que se localizam primordialmente na área escarpada (**Figura 26**). Já na planície litorânea concentram-se os sedimentos inconsolidados, tais como areias, argilas e siltes de origem fluvial, marinha ou colúvial.

Existem seis tipos com maior representatividade litológica na área, a Unidade Granito-gnaissico Pico do Papagaio (Pscpp): composta por biotita-hornblenda gnaiss facoidal, biotita gnaiss e biotita granito é a mais frequente representando 18% do município; a Unidade dos gnaisses porfiroblásticos biotita e/ou hornblenda gnaisses porfiroblásticos migmatizados (Pscgp) com aproximadamente 12%; a Associação de augen-gnaisses com biotita-granitos gnáissicos de granulação média a fina (Piya) com 11%; os Augen - gnaisses ou migmatitosoftalmíticos com associação subordinada de granitos-gnaissicos (Piyg) com 9,5%; as Rochas gnaissico-migmatíticas, gnaisses de composição granítica a granodiorítica, biotita gnaisses bandados, biotita hornblenda gnaisses migmatizados (Pscgg) com 7%; as Rochas gnaissico-migmatíticas, gnaisses de composição granítica a granodiorítica, biotita gnaisses bandados, biotita hornblenda gnaisses migmatizados (Pscgg) com 7% e as Rochas

migmatíticas de estruturas diversas (Ace) com 6%. Os demais tipos litológicos são menos frequentes, com porcentagens que variam de 0,08 a 3,92% da área.

Os sedimentos inconsolidados representam aproximadamente 24% do município, dentre eles os mais recorrentes são as Areias de deposição praial (Qhfm) com 13%, seguidas das Areias quartzosas, siltes e argilas de deposição marinha (Qhm) com aproximadamente 7%. Os demais sedimentos apresentam menores porcentagens, chegando até no máximo 1,5% da área.

Os Silimanita-muscovita-quartzitos esverdeados (Acq) são a rocha mais suscetível aos escorregamentos, seguida dos Piroxênio-hornblenda-granitos, hornblendo-granitos e biotitas-granitos (Piyg) (**Tabela 11**).

A importância do parâmetro litologia foi discutida por diferentes autores. Avanzi *et al.* (2004), na região da Toscana, Itália, concluíram que a litologia exerce uma grande influência na ocorrência de escorregamentos na área, uma vez que o processo se concentrou em dois tipos específicos de rocha, os arenitos metamorfizados e os filitos. Ainda na Itália, na Cordilheira dos Apeninos, Donati e Turrini (2002), buscaram quantificar a influência de vários parâmetros para a ocorrência de escorregamentos na região, ao todo foram seis parâmetros de análise, sendo a litologia o que apresentou maior influência.

Em escala nacional, Tatizana *et al.* (1987) destacaram a importância dos migmatitos, xistos e filitos em Cubatão. Segundo os autores, tais rochas geram solos com menor resistência ao cisalhamento, sendo, portanto, mais instáveis. Ainda em contexto de Serra do Mar, Dias *et al.* (2017) estudaram parâmetros geológicos e morfológicos na bacia do Santo Antônio em Caraguatatuba e também encontraram os Silimanita-muscovita-quartzitos esverdeados como mais suscetíveis a ocorrência de escorregamentos rasos. Também em Caraguatatuba, Cerri *et al.* (2017) ressaltaram a importância das rochas alteradas, principalmente os gnaisses, granito-gnaisses e migmatitos, uma vez que tais rochas preservam estruturas e texturas petrográficas influenciando a estabilidade das encostas.

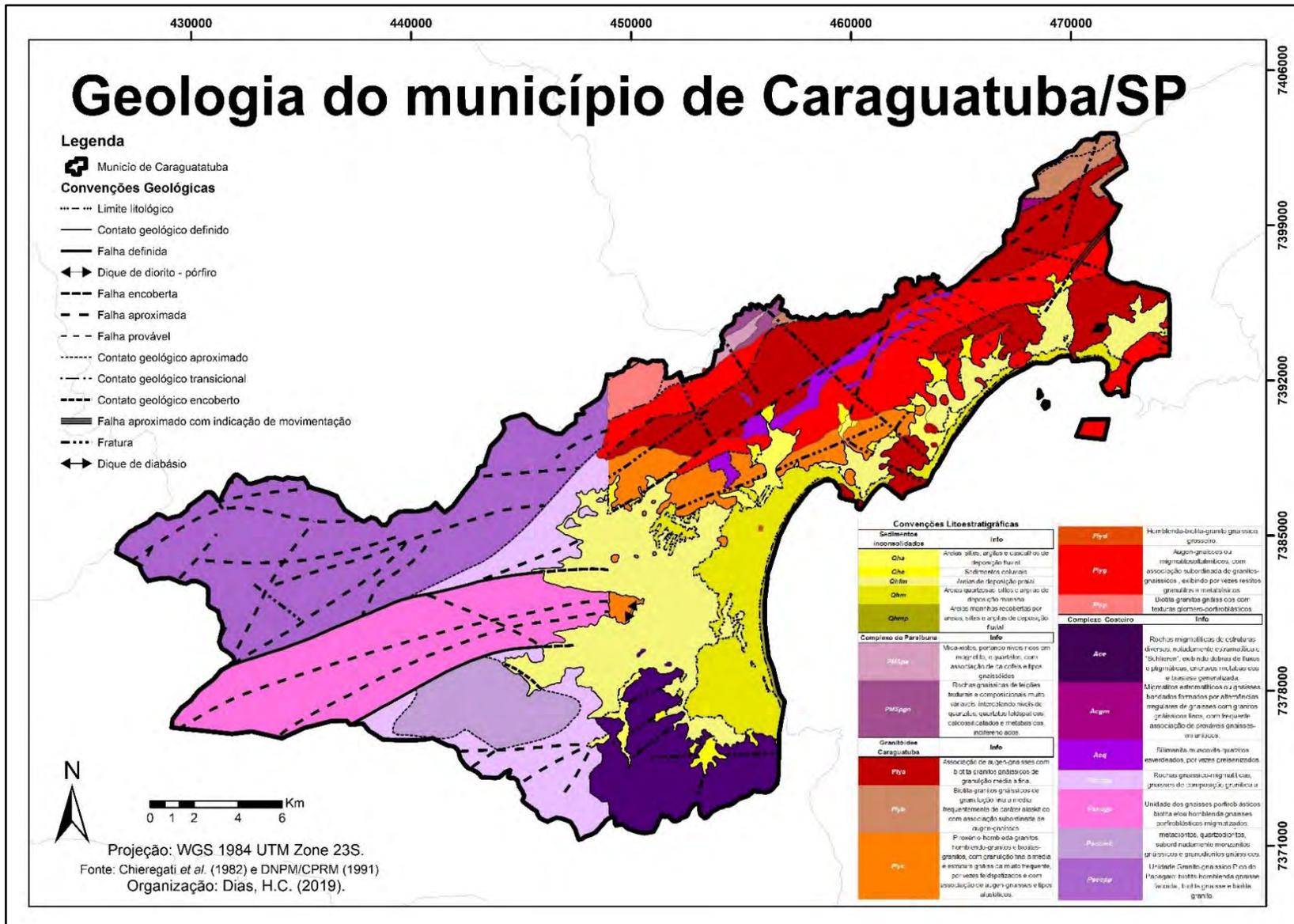


Figura 26 - Mapa geológico do município de Caraguatuba, evidenciando o tipo litológico e as estruturas presentes na área.

Tabela 11 - Litologias presentes no município de Caraguatatuba e suas respectivas características. Com destaque para as litologias mais suscetíveis, Acq (Silimanita-muscovita-quartzitos esverdeados) e Piyc (Piroxênio-hornblenda-granitos, hornblendo-granitos e biotitas-granitos).

Litologia			
<i>Classes</i>	<i>VI</i>	<i>Classes</i>	<i>VI</i>
Ace	-3,99	Pscggg	-0,15
Acgm	-3,99	PSccgp	-0,38
Acq	1,62	PSccmb	-2,02
Piya	0,44	Pscppp	0,14
Piyb	-3,99	Qha	-3,49
Piyc	1,56	Qhc	-3,98
Piyg	0,79	Qhc	-3,99
Piyp	-3,99	Qhfm	-3,84
Pmspe	-3,99	Qhm	-3,99
Pmspgn	-3,99	Qhmp	-3,99

O entendimento dos valores obtidos de VI para os litotipos requer uma análise que vai além das características da rocha em seu estado intacto. A utilização desse parâmetro se explica pelo importante papel que a litologia exerce na ocorrência de processos morfológicos que transporta os produtos de seu intemperismo.

Nos meios tropicais e subtropicais as rochas são muito alteradas em virtude das altas taxas de temperatura e precipitação, dando origem aos perfis intemperizados ou solos. Como os escorregamentos rasos geralmente atingem o horizonte coluvionar e o residual, é importante a análise dos diferentes tipos de comportamento conforme a rocha são (WOLLE e CARVALHO, 1994).

Cada tipo litológico dará origem a um solo residual com características próprias. Sabendo que os parâmetros determinantes para a resistência ao cisalhamento são ângulo de atrito interno (C') e coesão efetiva do solo (Φ), é importante analisar tais fatores sob diferentes condições, evidenciando que o ângulo da rocha são normalmente é superior ao do solo residual gerado a partir dela, sendo portanto mais instável (**Tabela 12**).

Além do ângulo de atrito, a coesão efetiva dos solos também é uma propriedade que pode influenciar a estabilidade das encostas, visto que é um fator que se relaciona com capilaridade, variando com o grau de saturação dos solos (MACHADO FILHO, 2000). A coesão dos solos coluvionares na Serra do Mar diminui conforme aumenta o grau de saturação, o aumento da saturação de 60% para 100% faz com que os solos vão de uma coesão de 20 kPa para zero (**Figura 27**) (MACHADO FILHO, 2000). Tal variação também foi identificada por Vieira *et al.* (2015) para a bacia do Rio Guaxinduba em Caraguatatuba, onde esse índice variou

de 11 kPa até zero, sendo os valores mais altos encontrados nas camadas superficiais e os menores em maiores profundidades, já o ângulo de atrito interno identificado pelas autoras variou entre 25,8° e 36,8 (Tabela 13). Conforme Tabela 12, tal oscilação indica estado residual. Essas variações podem gerar uma alteração no equilíbrio de tensões nas massas, resultando em escorregamentos (COLLINS e ZNIDARCIC, 1997).

Tabela 12 - Ângulo de atrito de rochas sob diferentes condições.

Tipo de Rocha	Ângulo de atrito (°)		
	Intacta	Junta	Residual
Andesito	45	31-35	28-30
Basalto	48-50	47	—
Gesso	—	35-41	—
Diorito	53-55	—	—
Granito	50-64	—	31-33
Grauvaca	45-50	—	—
Calcário	30-60	—	33-37
Monzonito	48-65	—	28-32
Pórfiro	—	40	30-34
Quartzito	64	44	26-34
Arenito	45-50	27-38	25-34
Xisto	26-70	—	—
Folhelho	45-64	37	27-32
Siltito	50	43	—
Ardósia	45-60	—	24-34

Fonte: Hoek (1972).

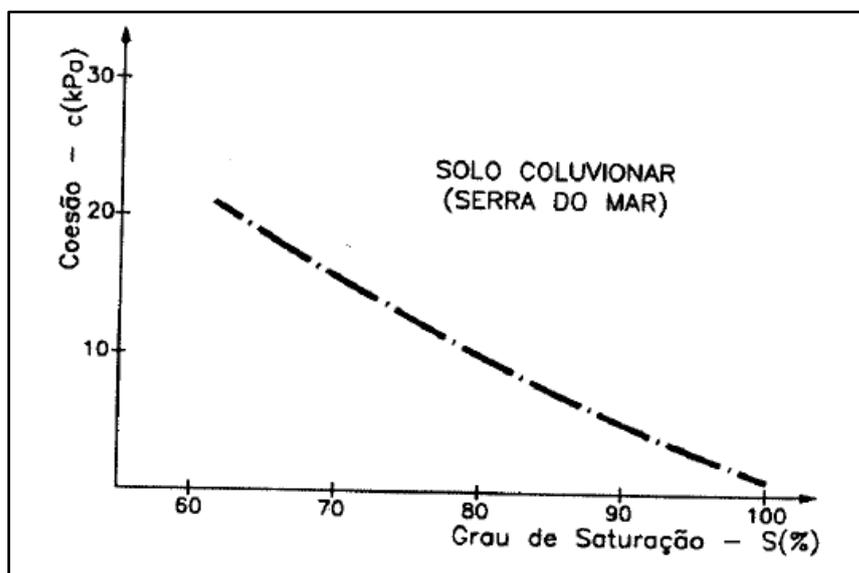


Figura 27 - Relação entre a coesão aparente e o grau de saturação dos solos coluvionares da Serra do Mar. Fonte: Carvalho (1991).

Tabela 13 - Valores de coesão e ângulo de atrito em diferentes profundidades em uma cicatriz de escorregamento na bacia do Rio Guaxinduba, Caraguatatuba.

Cicatriz (Prof.)	C' (kPa)	Φ (°)
C1 (0,60)	2,16	25,8
C1 (2)	11	36,8
C2 (0,40)	0	29,1
C2 1,75	1,2	31,9
C3 (0,45)	0	36,7
C3 (2)	0	33,5

Fonte: Vieira *et al.* (2015).

Os silimanita-muscovita-quartzitos são um tipo de rocha quartzítica micácea de origem metamórfica e muito resistentes. A composição geoquímica do quartzito é de Al_2O_3 , SiO_2 e K_2O e quando expostos as intempéries resultam em perfis de alteração de textura média, com estrutura granular e baixo teor de argila, podendo dar origem a solos do tipo cambissolos (ARAÚJO *et al.*, 2014).

Um perfil de alteração típico de rochas metamórficas é composto por sete camadas de materiais distintos, fruto da ação de agentes intempéricos (MACHADO FILHO, 2000). Ele pode ser dividido, de maneira geral, como solo coluvionar, solo residual, camada de transição solo/rocha e rocha sã (**Figura 28**). Cruz (1974) faz uma organização semelhante para os perfis de rochas ígneas e metamórficas encontradas na Serra de Caraguatatuba, identificando quatro camadas principais: manto de alteração e colúvio; zona de decomposição com alteração parcial e conservação da estrutura da rocha; zona pouco decomposta e zona com rocha sã.

O perfil esquemático é típico de rochas metamórficas em regiões serranas. Nele é possível identificar as camadas onde os processos se desenvolvem, se concentrando muitas vezes nos três primeiros horizontes (A, B e C), podendo também serem definidos como solo coluvionar e solo residual. Em tais camadas é comum a presença de estruturas reliquias, que preservam texturas petrográficas, estruturas litológicas e tectônicas, tornando-se descontinuidades que influenciam na estabilidade das encostas (CERRI *et al.*, 2017).

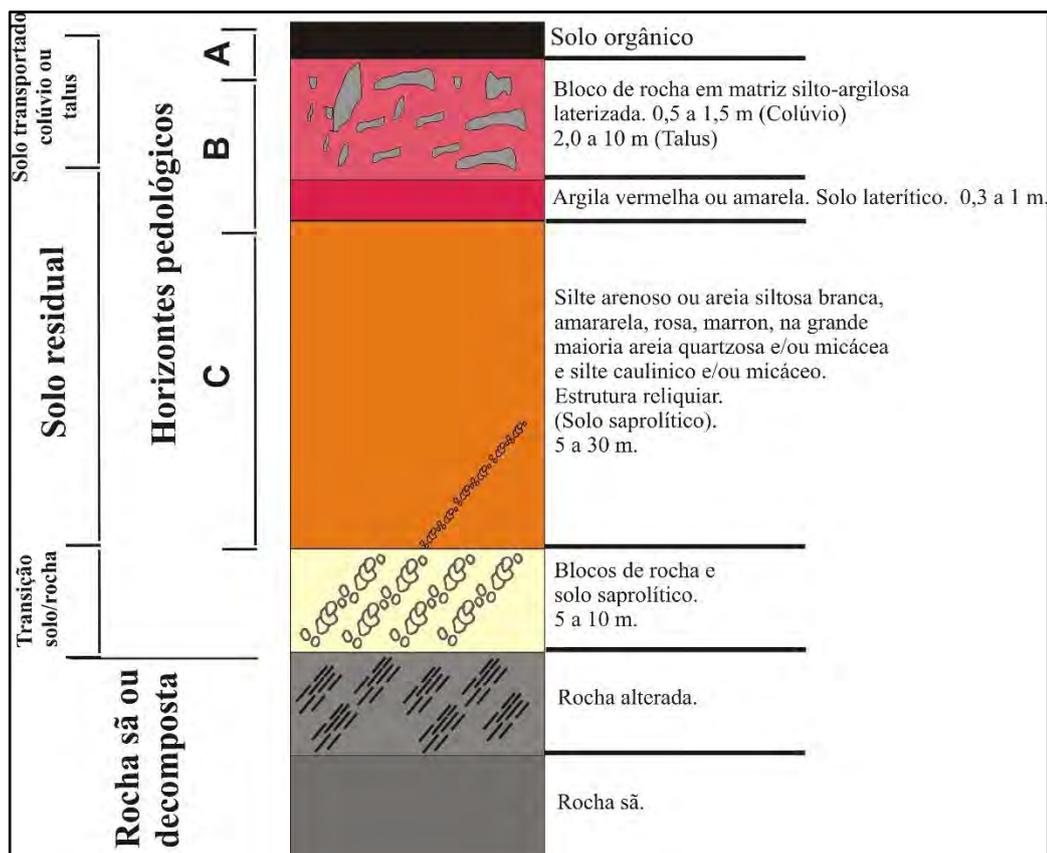


Figura 28 - Perfil de alteração de rochas metamórficas em regiões serranas. **Fonte:** Adaptado de Machado Filho (2000).

As estruturas reliquiares alteram a resistência das encostas porque mudam os valores de ângulo de atrito e coesão, levando em consideração a direção (Paralela ou perpendicular) e a macroestrutura existente (Laminada, xistosa ou bandada) (**Tabela 14**). Desta forma, os quartzitos micáceos foram os identificados como os mais suscetíveis devido a uma junção de fatores. Esta rocha apresenta uma grande variação de ângulo de atrito conforme o nível de intemperização, os solos residuais de origem quartzítica apresentam ângulo de atrito semelhante à de um solo residual de arenitos (**Tabelas 12 e 14**), ou seja, ao sofrer intemperismo o quartzito perde mais de 50% de sua resistência a movimentações.

Além disso, segundo Cruz (1974), materiais com alta quantidade de argilas têm capacidade de retenção de água no material em 45%; já materiais com maior porcentagem de areia são capazes de reter apenas 3%. Considerando que quando intemperizados os quartzitos dão origem a um material arenoso e friável, uma vez que a natureza do manto de alteração depende da composição da rocha-mãe, como a composição é essencialmente quartzo, tal característica resultará em uma permeabilidade e porosidade influenciadas pela alta quantidade de areia, fazendo com que o solo sature rapidamente.

Tabela 14 - Coesão e ângulo de atrito em solos residuais.

Solo residual	Macroestrutura	Cisalhamento direto		Condições de umidade
		Paralelo	Perpendicular	
Quartzito	Laminada	C'=20 kPa $\Phi=37^\circ$	C'=50 kPa $\Phi=44^\circ$	Úmido
Quartzito micáceo	Xistosa	C'=40 kPa $\Phi=22^\circ$	C'=45 kPa $\Phi=27^\circ$	Úmido
Gnaisse migmatizado	Bandada	C'=40 kPa $\Phi=20^\circ$	C'=52 kPa $\Phi=23^\circ$	Úmido
Gnaisse migmatizado	Bandada	C'=30 kPa $\Phi=21^\circ$	C'=49 kPa $\Phi=22^\circ$	Saturado

Fonte: Machado Filho (2000).

Já a segunda litologia mais suscetível, os Piroxênio-hornblenda-granitos, horblendo-granitos e biotitas-granitos (Piyg), são rochas de origem ígnea com composição geoquímica geral de SiO₂ e Al₂O₃ (CARVALHO, 1991). Desde o início do intemperismo as rochas graníticas desagregam-se completamente, o material formado é rico em frações grossas de quartzo e feldspato, além de minerais específicos de cada tipologia de rocha. A individualização inicial dos componentes das rochas graníticas não significa que tenham sofrido intenso intemperismo, essa individualização está relacionada muitas vezes com processos químicos ligados a textura grossa e com a quantidade de material resistente ao intemperismo (MELFI, 1967).

Assim como as rochas quartzíticas, as rochas graníticas também apresentam propriedades distintas conforme seu estado de alteração. Estudos sobre solos residuais em um tipo específico de granito, o biotita-granito, foram realizados por Heidemann *et al.* (2018). As análises identificaram que a presença de biotita traz uma natureza siltosa e lamelar para o material, conduzindo a uma baixa resistência a processos morfodinâmicos. Os solos residuais de biotita-granito apresentam C'=16 kPa e $\Phi=15^\circ$. Tais valores baixos podem explicar a razão desta classe litológica ser a segunda mais suscetível aos escorregamentos rasos em Caraguatatuba.

6.1.2. Elevação

O segundo parâmetro com maior taxa de sucesso foi elevação (0,706). O município de Caraguatatuba apresenta alta variação altimétrica de 0 a 1.318 m, abrangendo desde a planície litorânea até o planalto (**Figura 29**). A planície litorânea, maior parte da área (40%) está até 200 m de elevação, já as elevações médias de 200,1 a 400 m e de 400,1 a 600 m correspondem respectivamente a 14% e 13% da área, e entre 600,1 e 800 m e 800,1 e 1.318 correspondem a 20% e 14%, respectivamente

De acordo com os resultados da avaliação estatística (**Tabela 15**), a classe identificada com maior valor informativo foi de 200,1 a 400 m, seguida da 400,1 – 600 m. Ambas as classes correspondem a faixa de elevações intermediárias. Em contexto de Serra do Mar, Nery e Vieira (2014) encontraram, em Cubatão, a classe de 200 a 400 m como mais suscetível, e em Caraguatatuba, Marcelino (2004) também definiu a classe de 200 a 300 m. Tais resultados foram encontrados sob condições geológicas semelhantes, com presença de rochas ígneas e metamórficas.

Embora seja utilizado por diversos autores, este parâmetro muitas vezes não é considerado de grande relevância para a ocorrência de escorregamentos rasos, visto que somente o nível de elevação não informa características que incitem a instabilidade de uma encosta. A análise da elevação, no entanto, pode detectar uma faixa com um fator de maior tendência ao processo, de maneira que na elevação de maior suscetibilidade, no caso 200,1 – 400 m, possa haver determinadas características que contribuem para a ocorrência de escorregamentos.

Tabela 15 - Classes do parâmetro elevação e seus respectivos valores informativos.

Elevação	
<i>Classes</i>	<i>VI</i>
0 - 200	-0,48
201 - 400	1,11
401 - 600	0,55
601 - 800	-0,76
> 800	-1,91

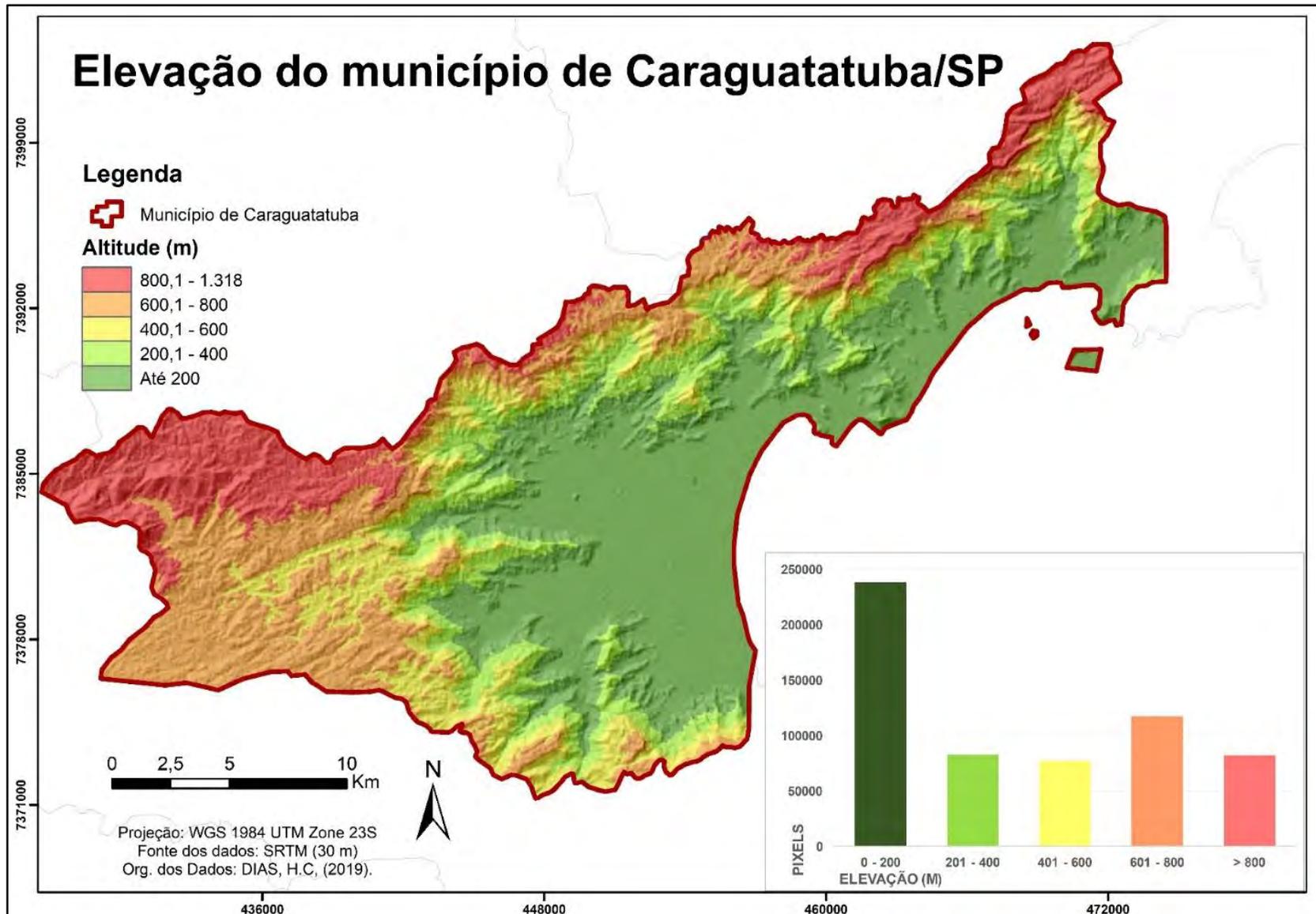


Figura 29 - Mapa de elevação do município de Caraguatatuba, evidenciando as variações altimétricas e a frequência de cada uma dessas classes de elevação.

Segundo Wolle e Carvalho (1994), a Serra do Mar paulista apresenta predominância de solos coluvionares e residuais sobre maciços intensamente fraturados nos trechos de alta e média encosta, gerando uma grande quantidade de fraturas abertas, que formam caminhos de percolação preferenciais, tornando a condutividade hidráulica desses setores superior as demais. Tais características tornam o fluxo vertical intenso, desencadeando a saturação do solo, o que faz com que essas áreas sejam naturalmente mais suscetíveis a ocorrência de escorregamentos rasos. Além disso, segundo Cruz (1974), o manto de intemperismo nesta faixa de elevação é mais espesso que nos demais níveis, além da presença de solos coluvionares.

Outro fator que pode explicar essa classe mais suscetível é o efeito orográfico presente na Serra do Mar, pois a medida que se aumenta a elevação, a precipitação também aumenta (PELLEGATTI e GALVANI, 2010; NERY JUNIOR e VANZELA, 2016). Os meses em que a elevação exerce maior influência para a ocorrência e concentração hipsométrica da precipitação em Caraguatatuba é entre outubro e maio. Tal fato foi confirmado por Nery Junior e Vanzela (2016) que afirmam que para cada 5 – 13 m de aumento na altitude média, há o acréscimo de 1 mm de precipitação (**Figura 30**).

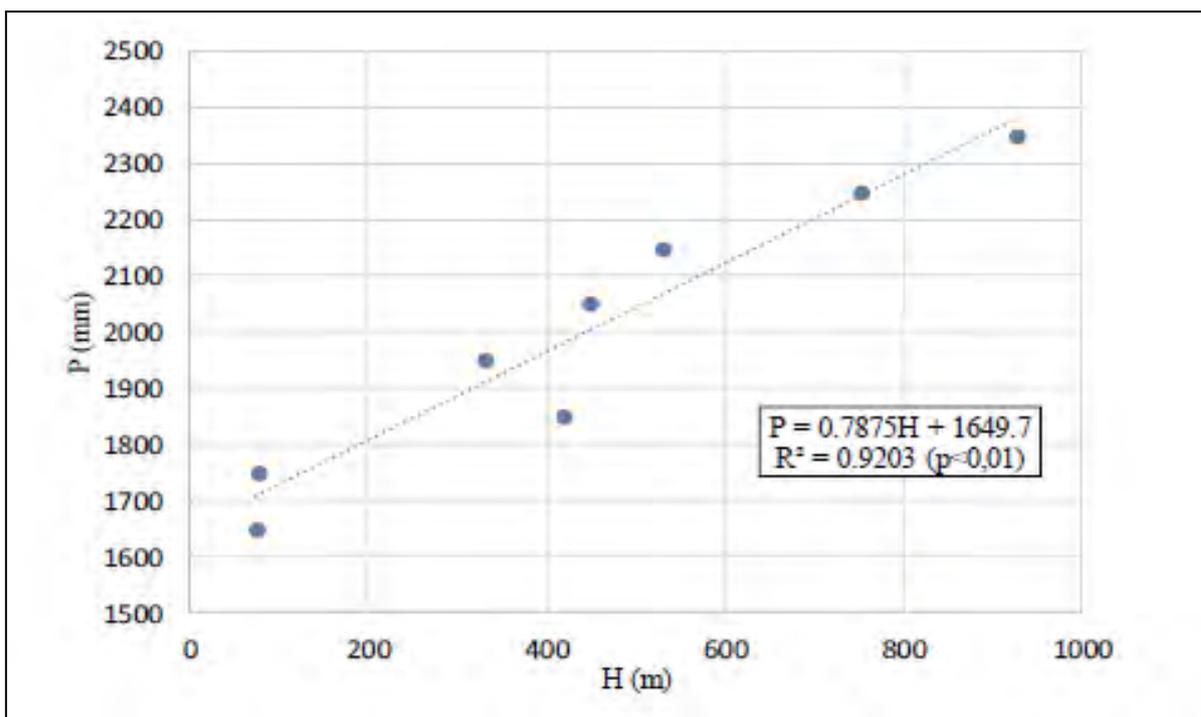


Figura 30 - Relação entre elevação (m) e precipitação (mm) no município de Caraguatatuba. **Fonte:** Nery Junior e Vanzela (2016).

6.1.3. Ângulo de encosta

O Ângulo de encosta foi o terceiro parâmetro mais suscetível a ocorrência de escorregamentos rasos (0,701). Caraguatatuba apresenta uma grande variação de ângulos de encosta, de 0° a 70° (**Figura 31**). Os ângulos mais baixos de 0 a 15° correspondem a aproximadamente 48% do município, já a faixa de 15,1 a 45° representa 50% da área, e os ângulos mais acentuados (45,1 a 70°) apresentam porcentagens inferiores a 2%.

A partir dos resultados da análise estatística, a classe com maior VI foi entre os ângulos de 30,1 a 45° (**Tabela 16**), seguida pela classe 45,1 a 55°. Desta maneira, a ocorrência de escorregamentos é mais fácil de ocorrer partir dos 30°.

Tabela 16 - Classes do parâmetro ângulo de encosta e seus respectivos valores informativos.

Ângulo de encosta	
Classes	VI
0 - 10	-1,75
10,1 - 15	-0,45
15,1 - 30	0,39
30,1 - 45	0,89
45,1 - 55	0,68
55,1 - 70	-1,76

Autores de diferentes localidades identificaram a importância dos ângulos dentre 30° e 50° para a ocorrência de escorregamentos, como Pachauri e Pant (1992) na Índia, Zhou *et al.* (2002) e Dai e Lee (2002) em Hong Kong, Lan *et al.* (2004) na China, além de cidades na Serra do Mar, como Tatizana *et al.* (1987), Santos (2009), Vieira *et al.* (2010) e Nery e Vieira (2014) em Cubatão, Marcelino (2004), Vieira e Ramos (2015) e Dias *et al.* (2017) em Caraguatatuba, e Martins *et al.* (2017) em Antonina.

Tais resultados se justificam pela ação da gravidade que se potencializa sob altos ângulos de encosta, de maneira que os solos coluvionares e residuais são facilmente movimentados em tais condições, havendo uma maior potencialidade de ocorrência do processo até 45°. Como afirmam Wolle e Carvalho (1989), a partir desse ângulo as coberturas terrosas tornam-se mais finas e a ocorrência tende a cair pela diminuição da disponibilidade de material para a movimentação, ou seja, embora a classe 55,1 – 70° seja uma classe de ângulos muito elevados, não apresenta VI de alta suscetibilidade, uma vez que sob tais declives a formação de solo é praticamente nula, não existindo assim, material para ser transportado.

Há também uma importante relação entre o ângulo da encosta e a geologia local, uma vez que as áreas de alto ângulo de encosta (26 - 45°) estão diretamente relacionadas com as regiões onde há a presença de falhas e fraturas (CERRI *et al.*; 2017).

Segundo Cruz (1974) as altas declividades influenciam de forma definitiva para a ocorrência de escorregamentos em Caraguatatuba, independentemente do tipo de vegetação no local e ação antrópica, tal característica da área foi constatada após a aplicação do método estatístico. A avaliação de diferentes condicionantes a escorregamentos rasos no município, permitiu quantificar e destacar que os maiores condicionantes para estes processos são relacionados a geomorfologia e geologia local.

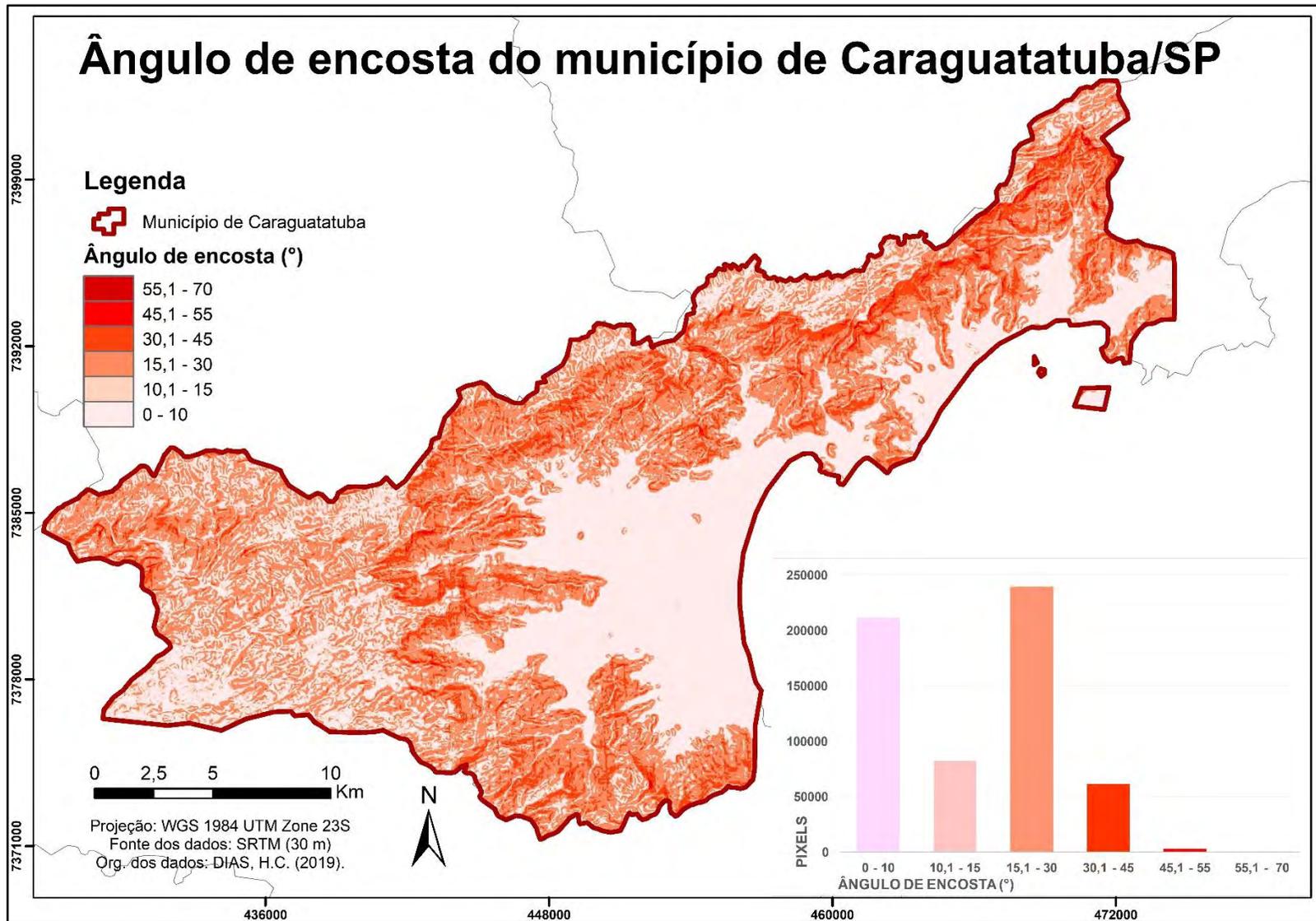


Figura 31 - Mapa de ângulo de encosta do município de Caraguatatuba, evidenciando as variações de declividade e a frequência de cada uma dessas classes de ângulo.

6.1.4. Curvatura

O parâmetro curvatura foi o quarto mais relevante (0,590), porém se distancia bastante dos três primeiros fatores, tendo, desta forma, uma influência reduzida na ocorrência de escorregamentos rasos. Em Caraguatatuba as curvaturas retilíneas correspondem a 45% do município, seguida pelas curvaturas côncavas (28%) e convexas (27%) (**Figura 32**). Há uma grande concentração das curvaturas retilíneas na planície litorânea, enquanto que as demais estão mais dispersas. Muitas vezes a morfologia retilínea também corresponde ao fundo plano dos vales e do ponto de vista estatístico apresenta valores baixos apesar de haver uma área retilínea muito elevada.

Os resultados da análise estatística indicaram as curvaturas côncavas como mais suscetíveis, seguidas, com pouca diferença, pelas curvaturas convexas (**Tabela 17**). Tal resultado é evidente na literatura, uma vez que existem diversos trabalhos que definem a curvatura côncava como mais suscetível, como Fernandes *et al.* (2001) no Rio de Janeiro, Martins *et al.* (2017) na Serra do Mar paranaense e Dias *et al.* (2017) na Serra do Mar paulista. Da mesma maneira, existem vários trabalhos que destacam a curvatura convexa como mais importante para a ocorrência de escorregamentos, como os trabalhos de Vieira *et al.* (2010), Nery e Vieira (2014) e Vieira e Ramos (2015) na Serra do Mar paulista. Desta forma, embora alguns autores clássicos, como Montgomery e Dietrich (1994), afirmem a maior suscetibilidade das curvaturas côncavas para a ocorrência de escorregamentos, essa característica nem sempre se confirma, visto que os formatos convexas também se mostram muito suscetíveis a ocorrência de escorregamentos rasos.

Tabela 17 - Classes do parâmetro curvatura e seus respectivos valores informativos.

Curvatura	
Classes	VI
Côncava	0,27
Retilínea	-0,44
Convexa	0,25

Desta maneira, os resultados da análise estatística e dos trabalhos encontrados na literatura provam que a curvatura apresenta uma influência reduzida quando comparada com outros condicionantes, como mostra sua taxa de sucesso (0,590), e a grande proximidade das taxas de suscetibilidade encontrada para as classes côncava e convexa (**Tabela 17**), sendo, portanto, um parâmetro que exerce influência no processo, porém não pode ser utilizado de maneira isolada nas análises de suscetibilidade escorregamentos.

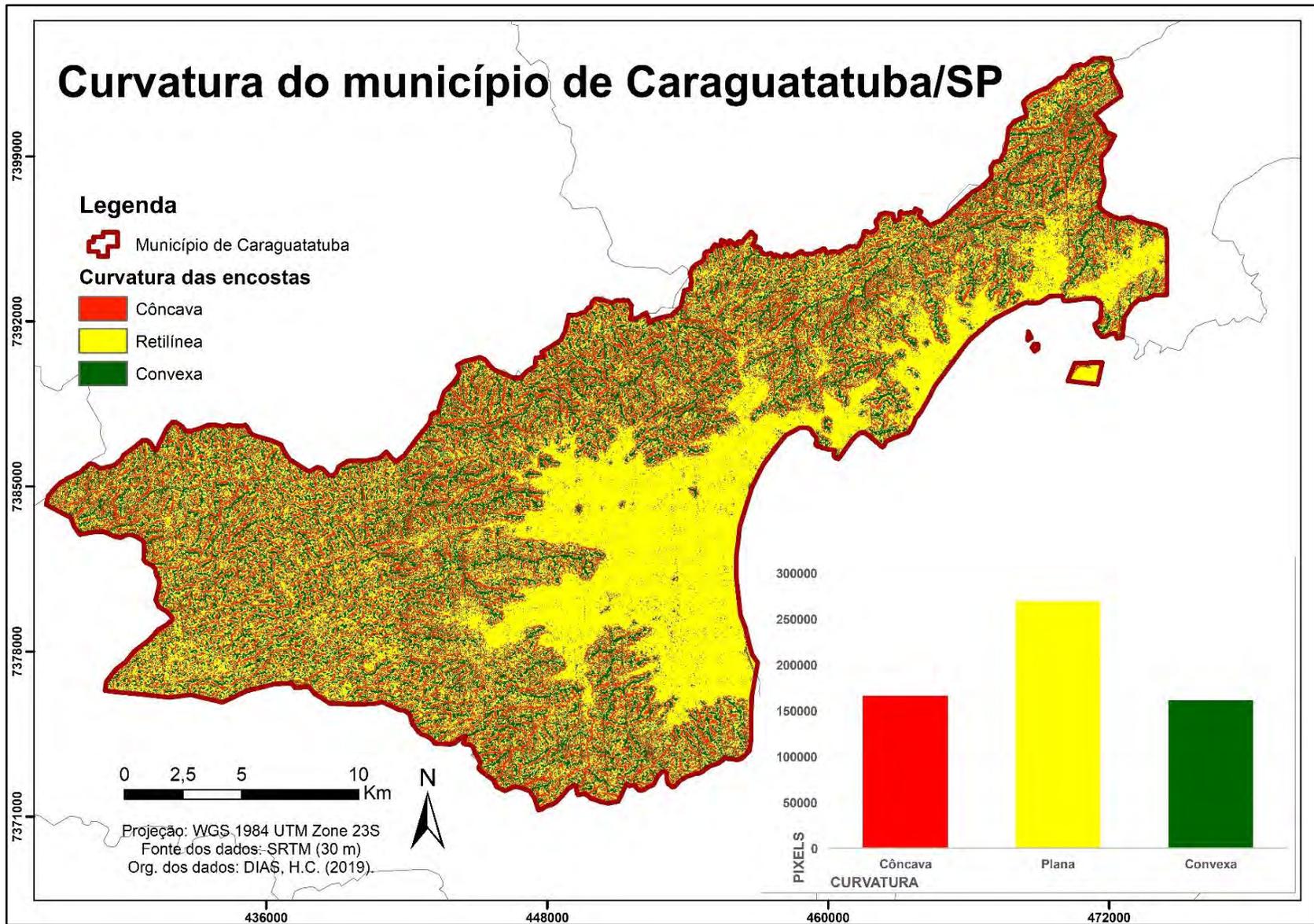


Figura 32 - Mapa de curvatura do município de Caraguatatuba, evidenciando as variações de formato e a frequência de cada uma dessas classes de curvatura.

6.1.5. Aspecto

O aspecto é o segundo parâmetro com menor relevância na definição da suscetibilidade (0,574). As orientações estão localizadas de maneira dispersa pelo município com representatividades variadas, em ordem decrescente tem-se a orientação SE com 19%, S com 16%, E com 13%, NW e N com 11%, SW e NE com 10%, W com 9% e plana com 1% (**Figura 33**).

A aplicação da avaliação estatística definiu a orientação S como a mais suscetível a ocorrência de escorregamentos rasos seguida, com grande intervalo, pela orientação SW (**Tabela 18**). Tais resultados dialogam com Marcelino (2004), que definiu as encostas voltadas para SE, S e E como mais suscetíveis e por Dias (2016) que também encontrou a orientação S como a mais suscetível.

Tabela 18 - Classes do parâmetro aspecto e seus respectivos valores informativos.

Aspecto	
Classes	VI
Plano	-0,46
N	-0,24
NE	-0,15
E	0,01
SE	-0,02
S	0,47
SW	0,09
W	-0,33
NW	-0,39

O litoral norte do estado de São Paulo sofre influência de duas massas de ar úmidas formados no Oceano Atlântico, a massa Tropical Marítima (mT) e massa Polar Atlântica (mP) (GUTJAHR *et al.*, 2000). Tal característica, em conjunto com os ventos do quadrante sul e a barreira topográfica representada pela Serra do Mar (NE/SW), impulsionam o efeito orográfico das chuvas, o que influencia no alto índice de precipitação da região, que pode chegar a uma média anual de 2.000 mm, ou até mesmo > 500 mm/48h em eventos de grande intensidade (**Figuras 34 e 35**) (SANT'ANNA NETO, 1990; GUTJAHR *et al.*, 2000; MARCELINO, 2004; PELEGATTI e GALVANI, 2010).

Não existe uma setorização dos altos índices de precipitação e as orientações S (**Figura 36**), no entanto, conforme afirmam Wolle e Carvalho (1994), o mecanismo de deflagração de escorregamentos rasos na Serra do Mar se dá pela saturação do solo, gerado por uma chuva intensa (~180 mm/24h) precedida de chuvas antecedentes. Assim, a orientação S pode

apresentar menores taxas de incidência solar, que geram uma manutenção da umidade nessas áreas, o que acaba comprometendo a estabilidade das encostas. Porém, assim como o parâmetro curvatura, o aspecto sozinho não é capaz de definir os locais mais suscetíveis, tornando importante sua análise em conjunto com outros parâmetros. Desta forma, também se confirma que o parâmetro aspecto varia conforme a geomorfologia local, o que acaba por gerar resultados de orientações preferenciais diferentes dependendo da área de estudo e das condições climáticas de cada região geográfica. Tal fato é constatado pelos trabalhos de Santos (2009) que definiu as orientações N e NO como mais suscetíveis aos escorregamentos, por Vieira *et al.* (2010) com as orientações N, NO e NE, além de Nery e Vieira (2014) que encontraram a orientação O. Assim, mesmo em um contexto de Serra do Mar, os autores definiram para Cubatão orientações distintas das encontradas em Caraguatatuba.

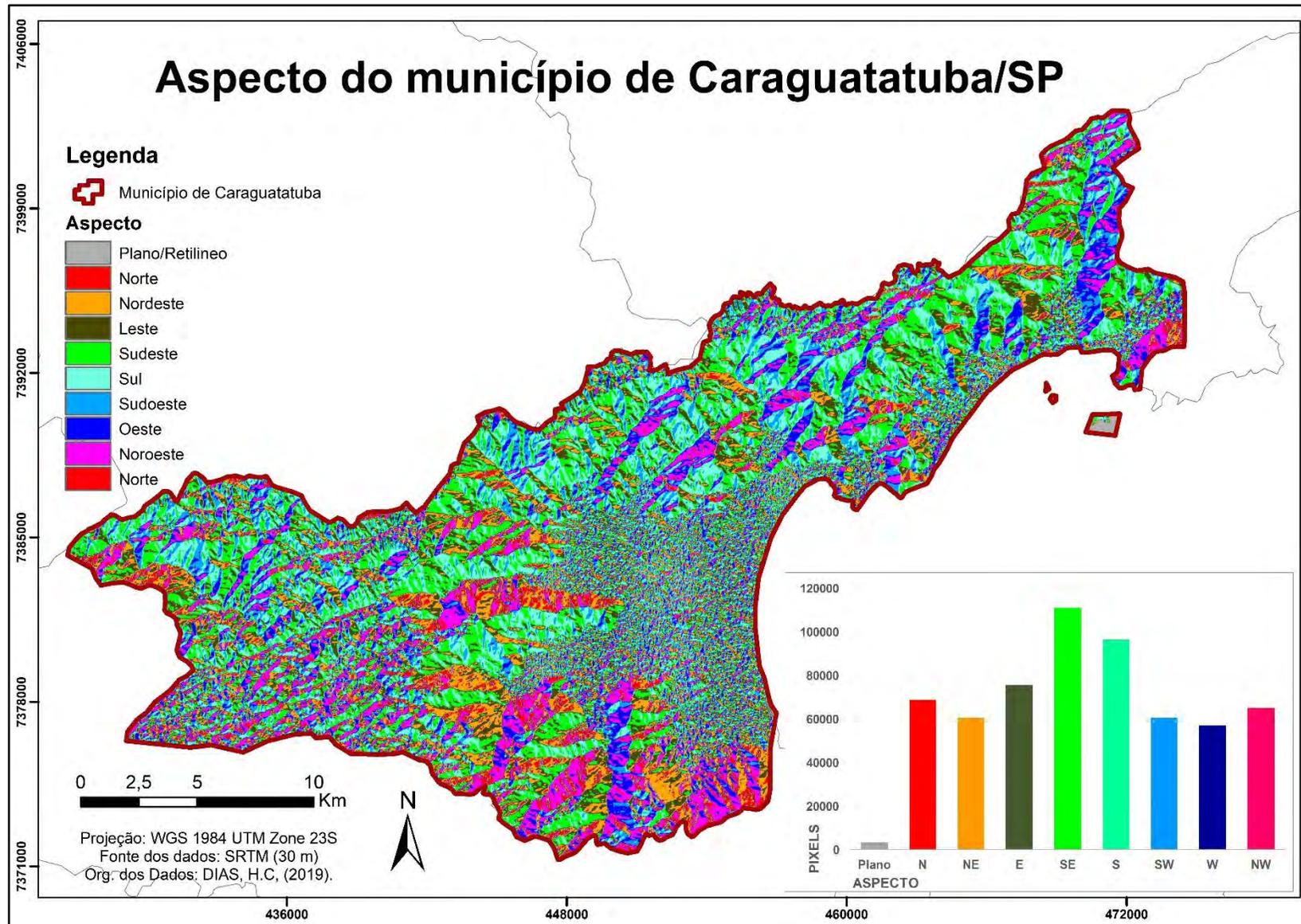


Figura 33 - Mapa de aspecto do município de Caraguatatuba, evidenciando as variações de orientações e a frequência de cada uma dessas classes de ângulo.

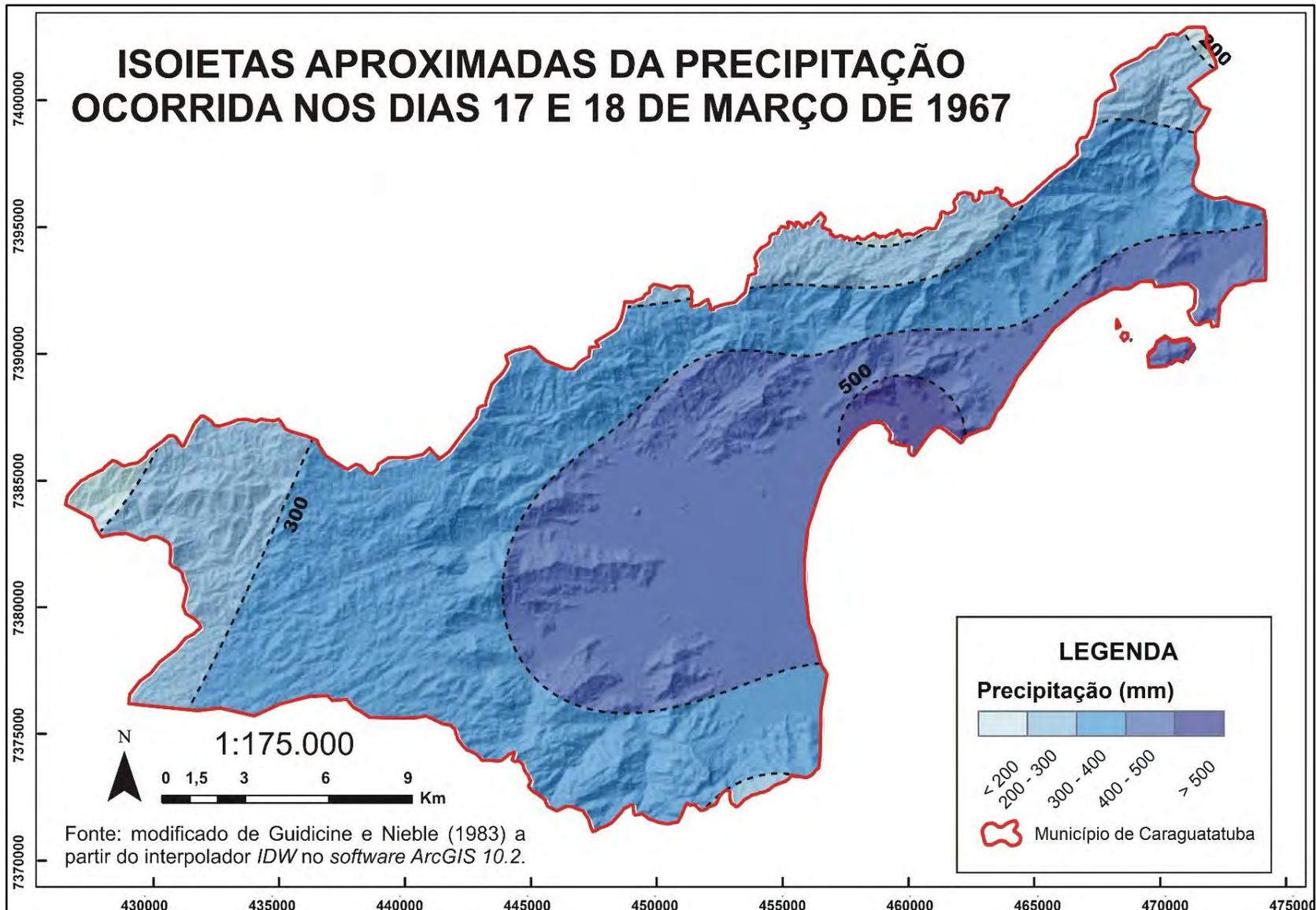


Figura 34 - Mapa de isoietas de precipitações do evento de 1967 para o município de Caraguatatuba. **Fonte:** Dias (2017).

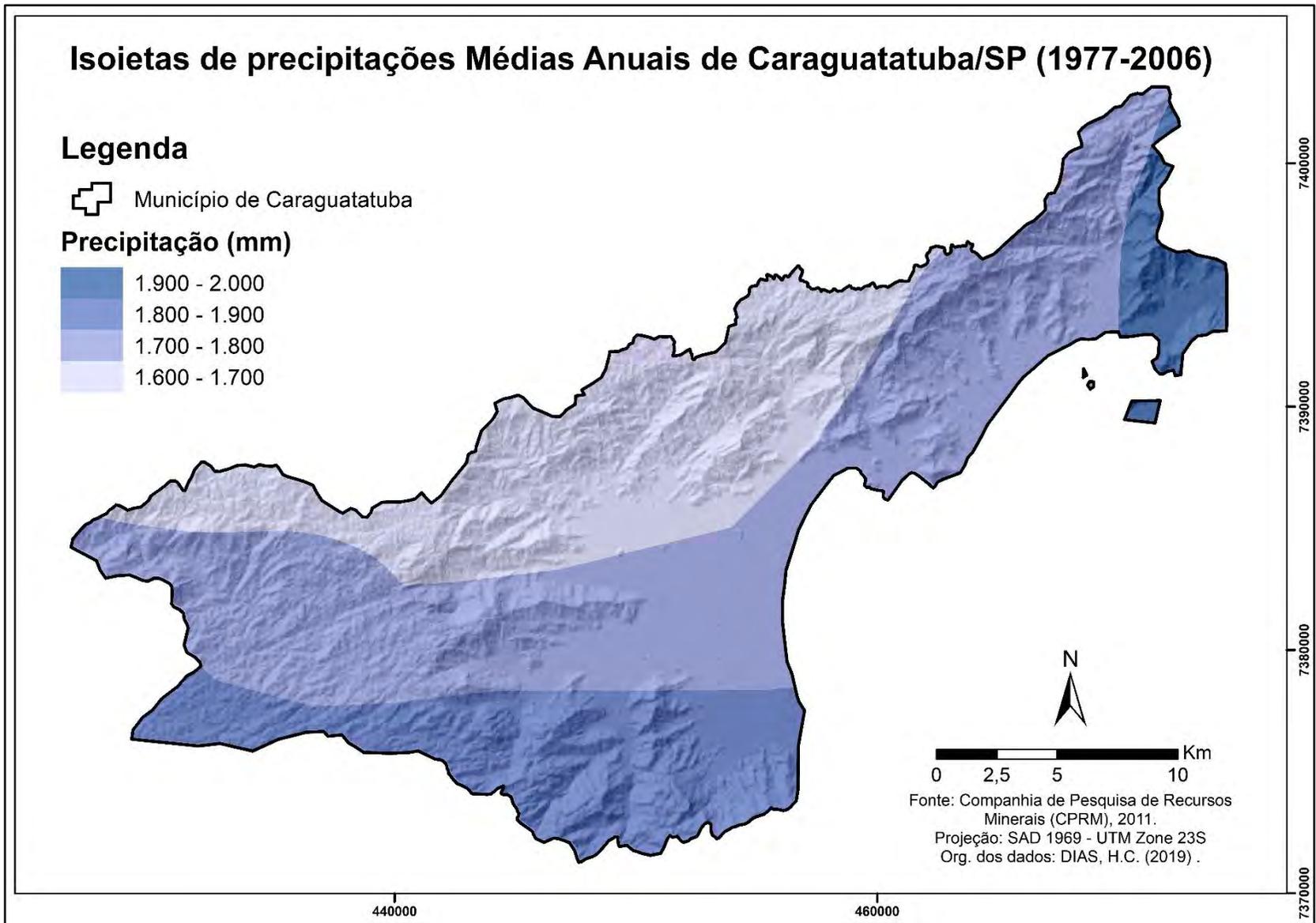


Figura 35 - Mapa de isoietas de precipitações médias anuais para o período de 1977 a 2006 para o município de Caraguatatuba.

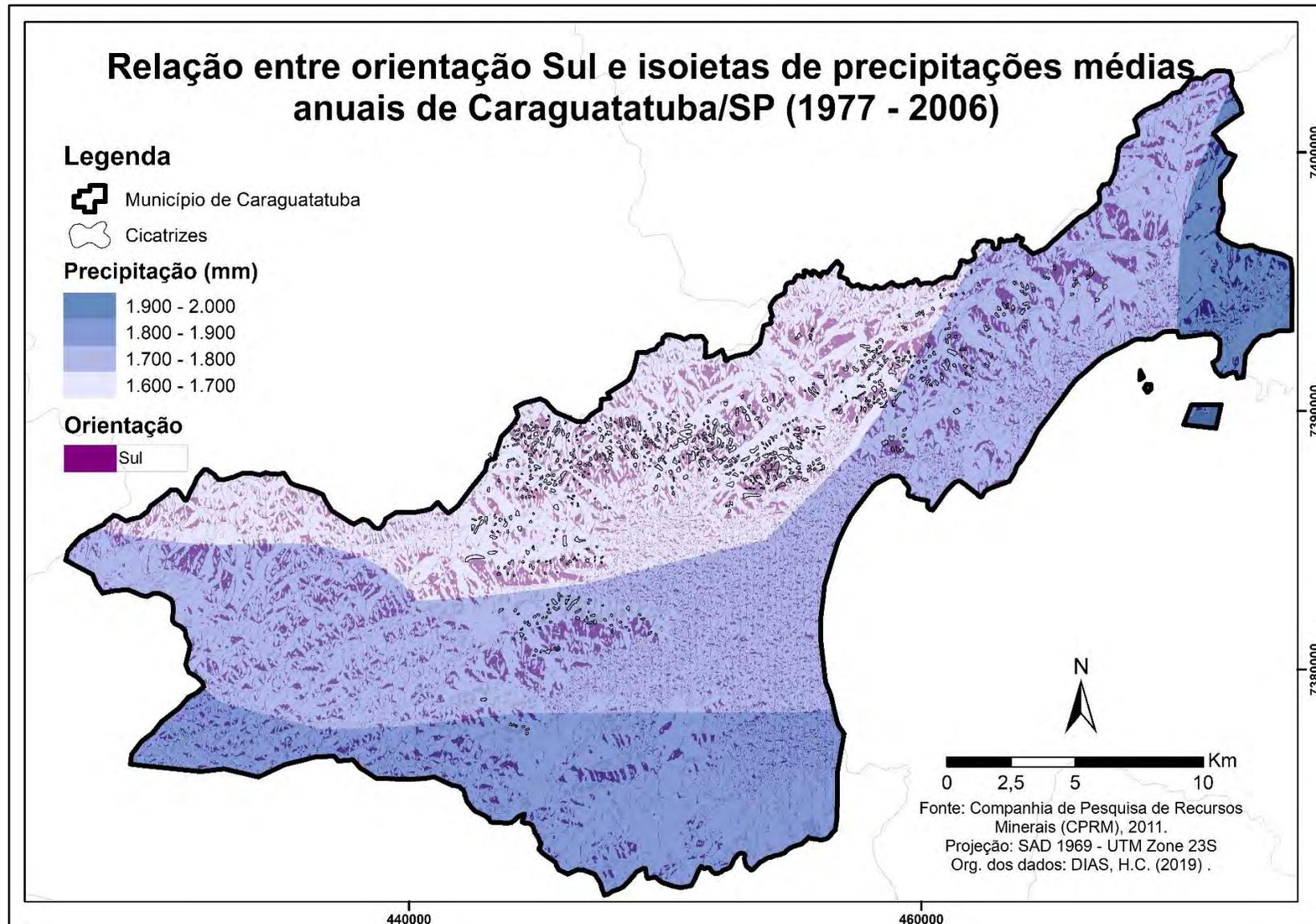


Figura 36 - Mapa da relação entre orientação S e isoietas de precipitações médias anuais para o período de 1977 a 2006 para o município de Caraguatatuba.

6.1.6. Densidade de Lineamentos

A densidade de lineamentos estruturais foi o último parâmetro na escala de relevância. Ele apresenta as áreas no município onde há uma concentração de elementos estruturais, tais como falhas e fraturas, que podem influenciar na estabilidade das encostas.

Com a análise estatística foi identificado que a classe mais suscetível é de 2-3 lineamentos estruturais por km² (**Tabela 19**), seguida das classes de 1 – 2 e > 3 (**Figura 37**). Tais resultados demonstram uma tendência de crescimento da suscetibilidade conforme se aumenta a concentração desses elementos estruturais.

Tabela 19 - Classes do parâmetro densidade de lineamentos estruturais e seus respectivos valores informativos.

Estruturas	
Classes	VI
< 1	-0,17
1 - 2	0,29
2 - 3	0,34
> 3	0,19

É possível identificar uma grande quantidade de lineamentos ao norte de Caraguatatuba, com ênfase ao sentido nordeste (**Figura 38**). A concentração de estruturas indica que nessas áreas há uma maior quantidade de aberturas, conhecidas como descontinuidades estruturais. A infiltração e circulação da água são mais intensas sob essas condições, gerando um aumento das taxas de intemperismo nesses setores, além de influenciar a velocidade da saturação dos solos, contribuindo para a instabilidade. Essas descontinuidades podem criar zonas de circulação ou barreiras, gerando alta porosidade e permeabilidade, aumentando a poro-pressão, tornando-se assim um caminho preferencial (CERRI *et al.*, 2018).

Desta maneira fica evidente que as estruturas apresentam influência na ocorrência de movimentos de massa. Em Caraguatatuba há grande ocorrência de cicatrizes de escorregamentos rasos no sentido nordeste. Tal resultado também foi encontrado por Cerri *et al.* (2018), que constaram que isso ocorre por conta da presença da falha Bertioga – Caraguatatuba.

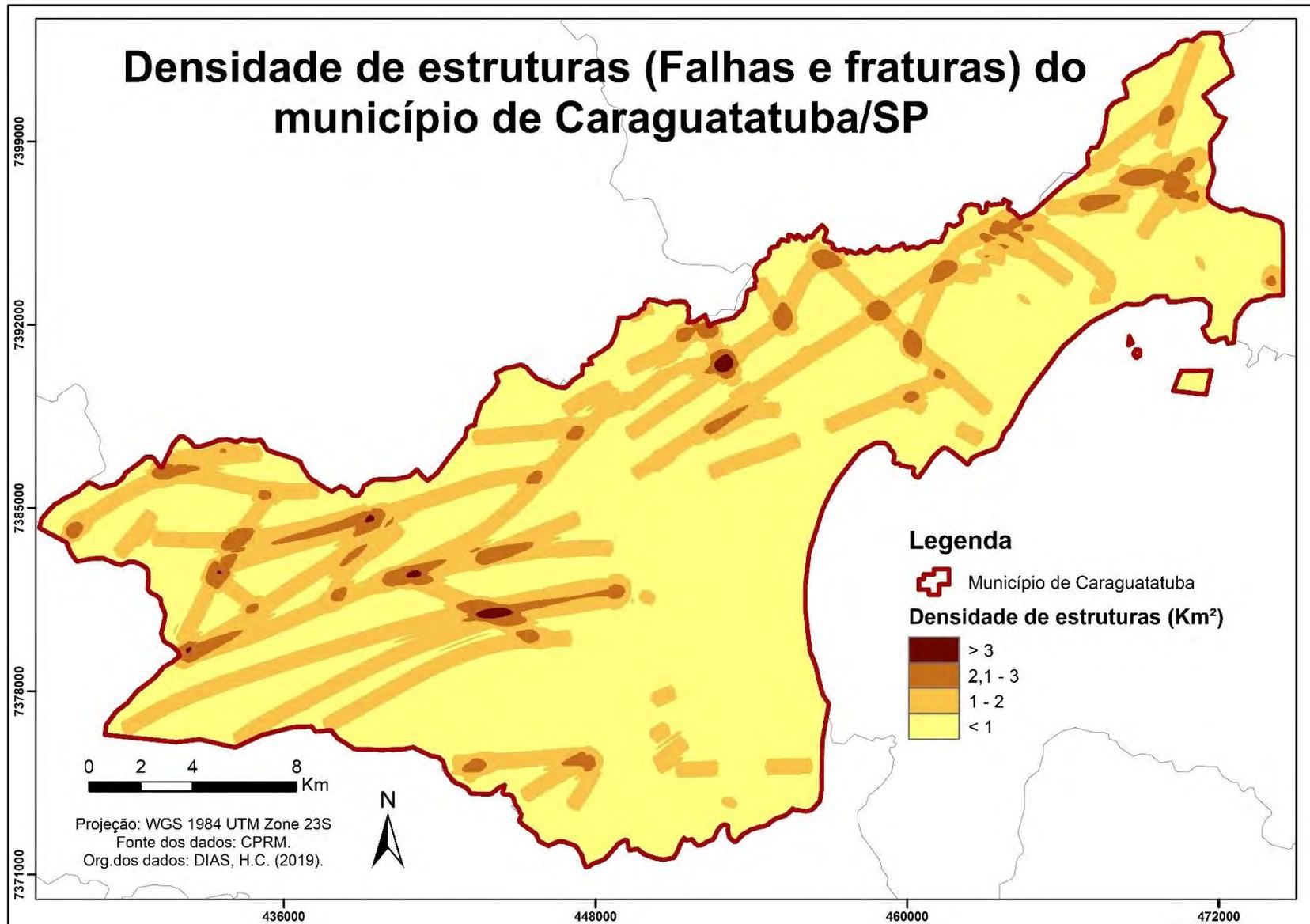


Figura 37 - Mapa de densidade de lineamentos estruturais do município de Caraguatatuba.

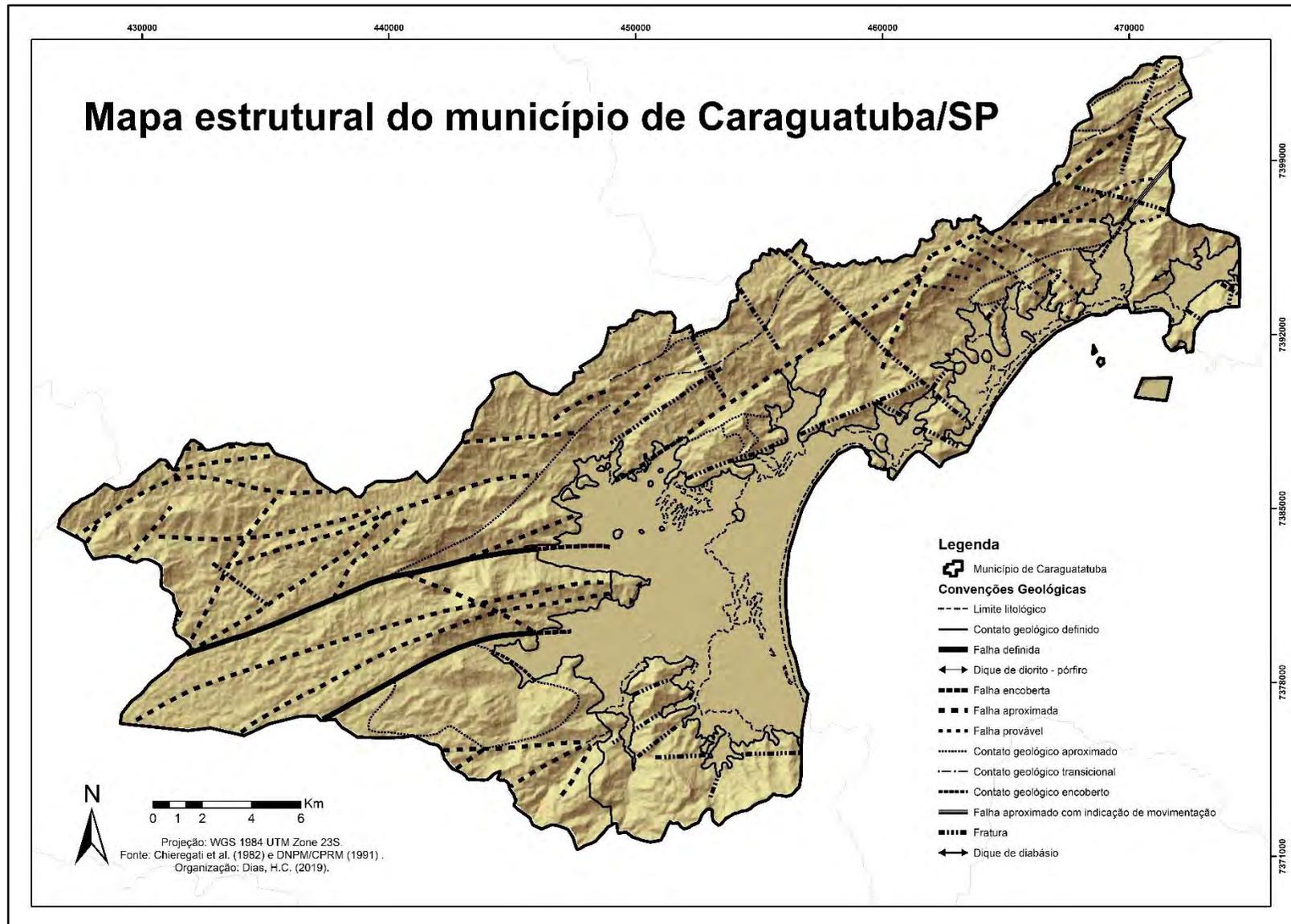


Figura 38 - Mapa estrutural do município de Caraguatuba.

6.2. Avaliação da suscetibilidade a escorregamentos rasos

O uso de diferentes parâmetros condicionantes possibilitou a criação de quatro cenários de suscetibilidade para o município de Caraguatatuba. Neles utilizou-se diferentes quantidades de parâmetros baseados nos valores de relevância que cada parâmetro apresentou perante a aplicação AAC da Taxa de Sucesso (**Tabela 9**). Optou-se por dar prioridade para o uso de parâmetros com maior taxa de sucesso, em uma tentativa de deixar a análise mais acurada. O objetivo da criação dos cenários foi a definição de áreas suscetíveis aos escorregamentos rasos de diferentes níveis a partir de parâmetros selecionados.

O primeiro cenário (**Figura 39**) fez uso de todos os parâmetros condicionantes, seis ao todo, a saber: Elevação, Aspecto, Ângulo de encosta, Curvatura, Litologia e Densidade de Lineamentos. Foram definidos 46,8342 km² de suscetibilidade muito alta, 115,8489 km² de suscetibilidade alta, 109,0638 km² de suscetibilidade média, 107,0865 km² de suscetibilidade baixa e 159,1659 km² de áreas planas com suscetibilidade nula. Baseado nesses resultados, aproximadamente **30% do município** é de alta ou muito alta suscetibilidade ao processo.

O segundo cenário (**Figura 40**), com cinco parâmetros condicionantes (Aspecto, Ângulo de encosta, Curvatura, Litologia e Densidade de Lineamentos), foi elaborado para tentar entender a relação entre elevação e ângulo de encosta, verificando se existe correlação entre os dois parâmetros e também como a ausência da elevação pode influenciar na acurácia. Desta maneira, foram identificados 53,8740 km² de suscetibilidade muito alta, 108,2448 km² de suscetibilidade alta, 88,1648 km² de suscetibilidade média, 96,9345 km² de suscetibilidade baixa e 190,7811 km² de áreas com suscetibilidade nula. Baseado nesses resultados, aproximadamente **30% do município** é de alta ou muito alta suscetibilidade ao processo.

Já o terceiro cenário (**Figura 41**) também utiliza cinco parâmetros (Elevação, Aspecto, Curvatura, Litologia e Densidade de Lineamentos) Este cenário também segue a lógica do cenário anterior, e buscou entender se existe correlação entre elevação e ângulo de encosta, e como a ausência do parâmetro ângulo de encosta influência na acurácia do mapeamento. Foram identificados 45,2610 km² de suscetibilidade muito alta, 110,8962 km² de suscetibilidade alta, 137,9943 km² de suscetibilidade média, 63,5778 km² de suscetibilidade baixa e 180,2700 km² de áreas com suscetibilidade nula. Baseado nesses resultados, **29% do município** é de alta ou muito alta suscetibilidade ao processo.

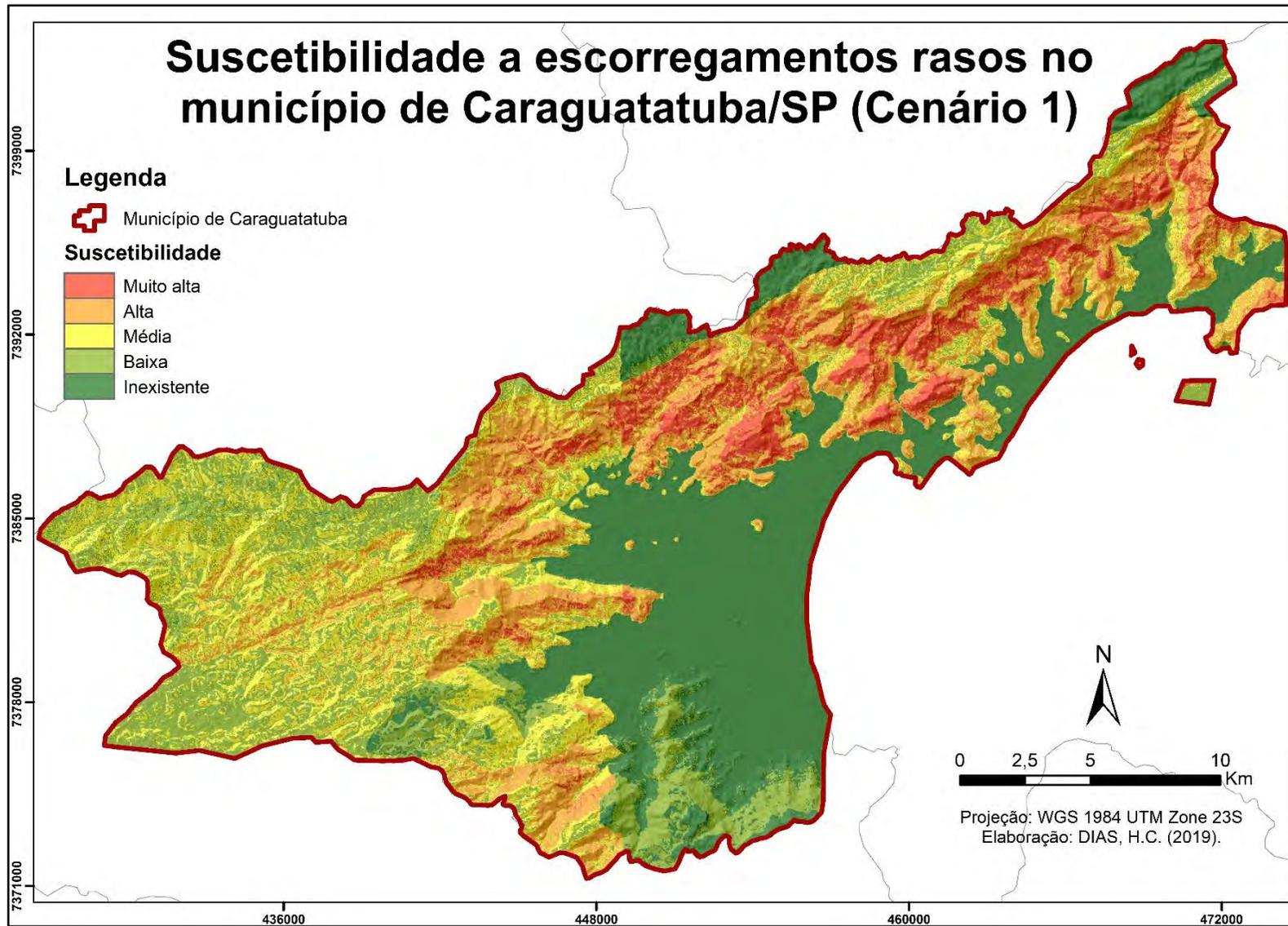


Figura 39 - Mapa de suscetibilidade do município de Caraguatatuba baseado nos parâmetros de Elevação, Aspecto, Ângulo de encosta, Curvatura, Litologia e Densidade de Lineamentos.

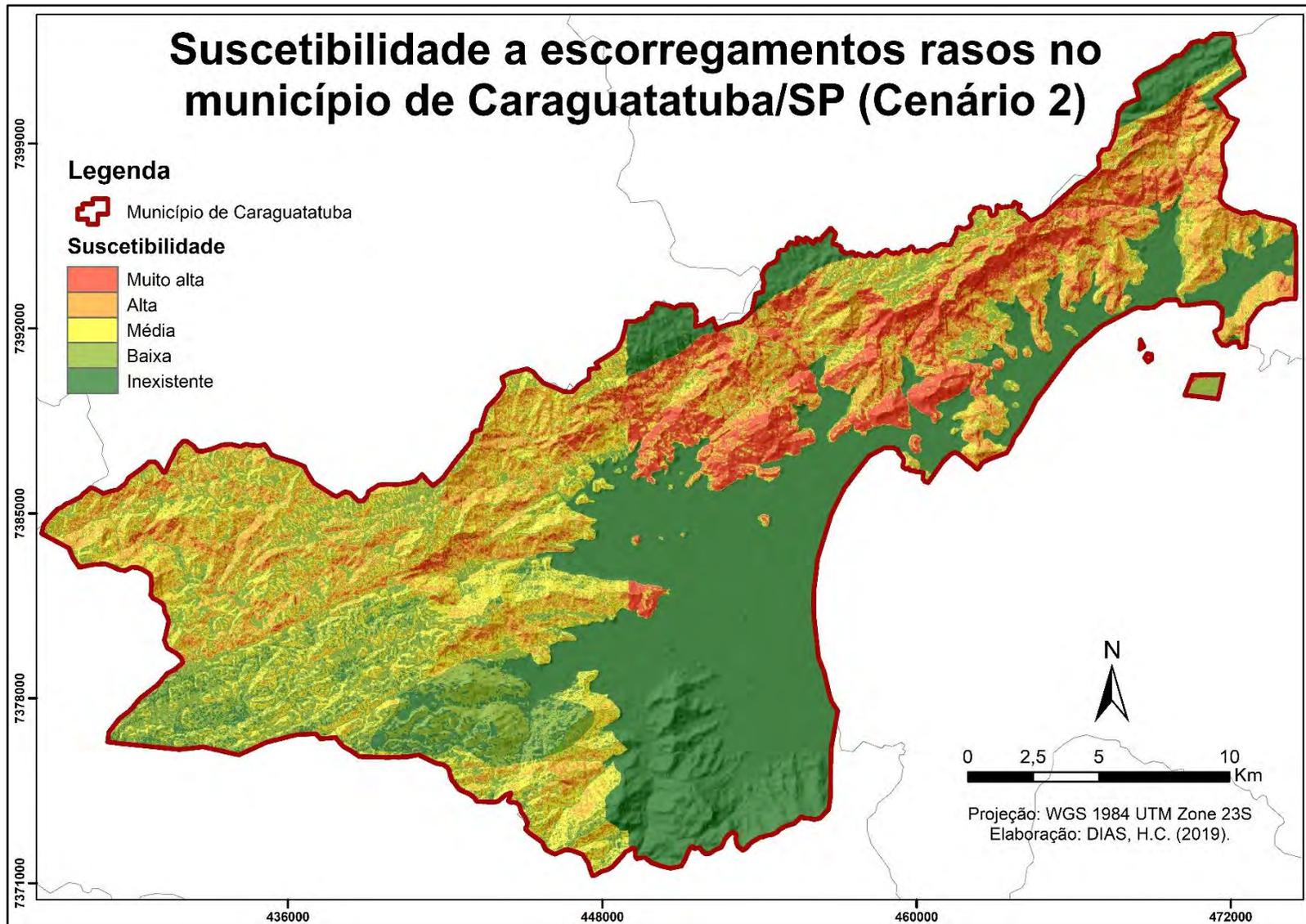


Figura 40 - Mapa de suscetibilidade do município de Caraguatatuba baseado nos parâmetros de Aspecto, Ângulo de encosta, Curvatura, Litologia e Densidade de Lineamentos.

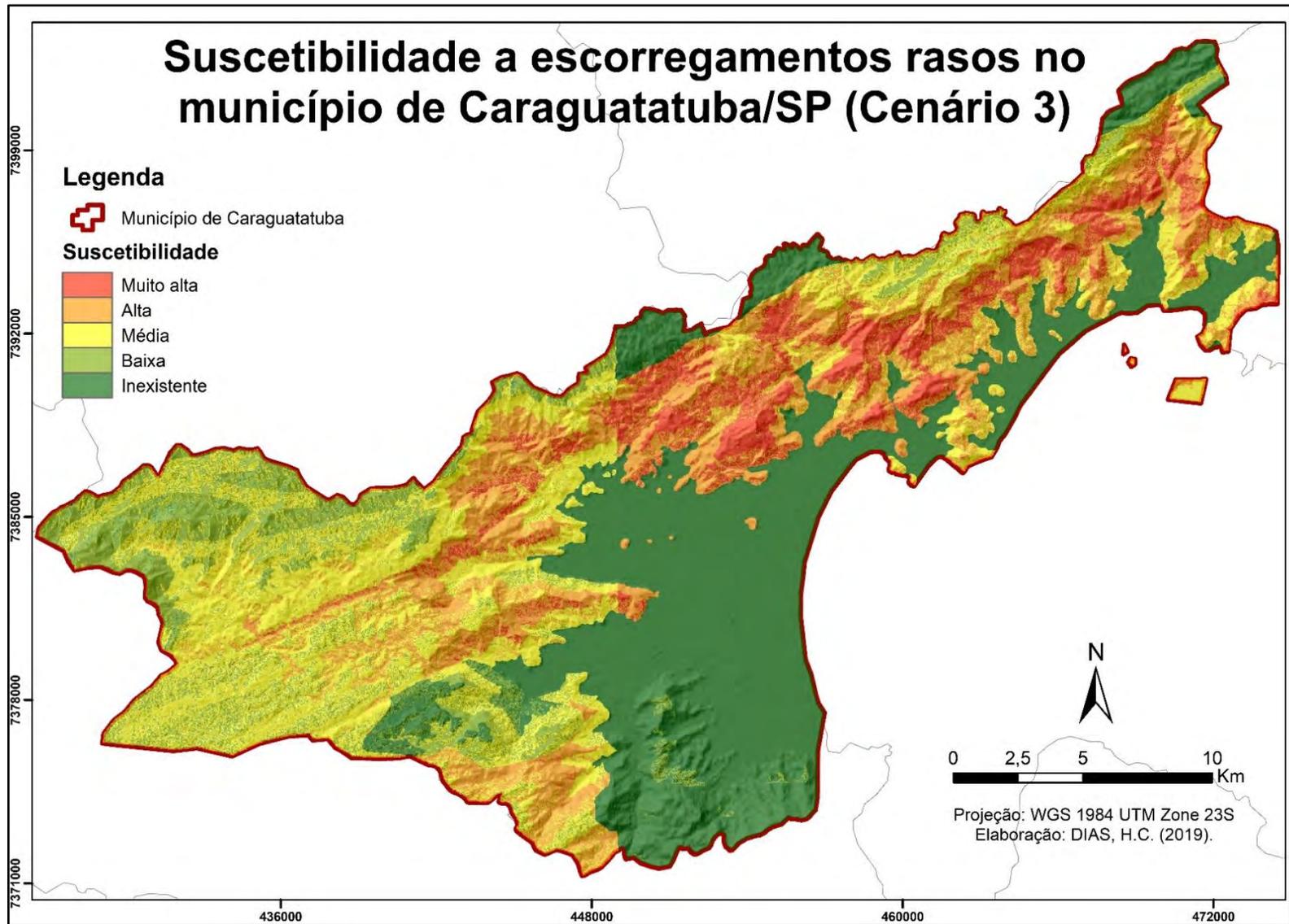


Figura 41 - Mapa de suscetibilidade do município de Caraguatatuba baseado nos parâmetros de Elevação, Aspecto, Curvatura, Litologia e Densidade de Lineamentos.

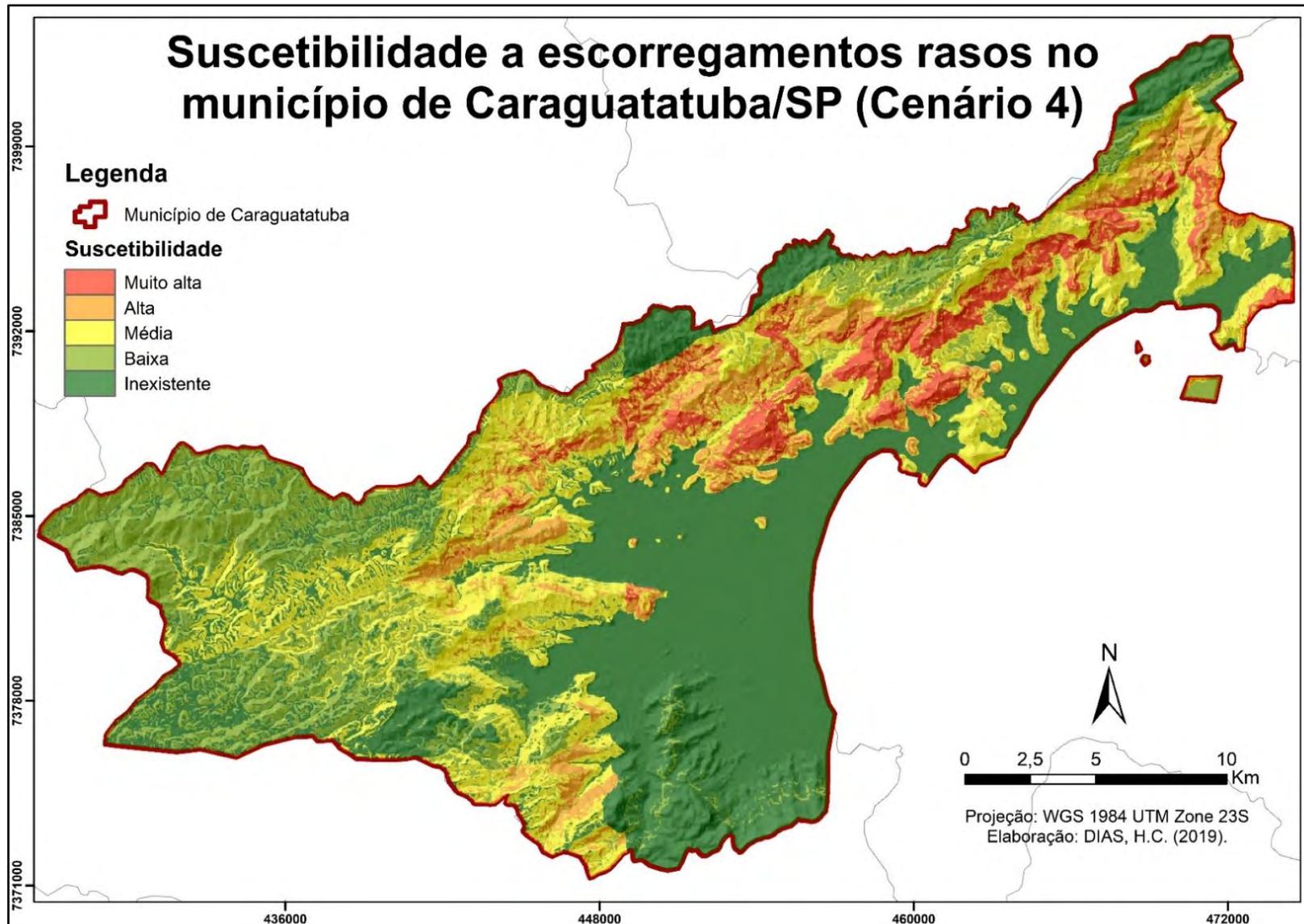


Figura 42 - Mapa de suscetibilidade do município de Caraguatatuba baseado nos parâmetros de Litologia, Elevação e Ângulo de encosta.

Por fim, o último cenário (**Figura 42**) foi elaborado utilizando apenas os três primeiros parâmetros de maior relevância, são eles: Litologia, Elevação e Ângulo de encosta. A criação deste cenário objetivou analisar as diferenças de acurácia entre um cenário criado com base em todos os parâmetros para a definição da suscetibilidade, o que no caso desta pesquisa são seis, ou apenas a utilização dos parâmetros que obtiveram maiores taxas de sucesso por meio da análise sensitiva. Assim, este cenário apresentou 39,8898 km² de suscetibilidade muito alta, 50,0301 km² de suscetibilidade alta, 119,7846 km² de suscetibilidade média, 114,5160 km² de suscetibilidade baixa e 213,7788 km² de áreas com suscetibilidade nula. Com base nesses resultados, aproximadamente **17% do município** é de alta ou muito alta suscetibilidade ao processo.

Uma análise dos quatro cenários permitiu identificar um padrão para as áreas de maior suscetibilidade, o setor nordeste. Tal resultado coincide com o encontrado por Cerri *et al.* (2018), que também definiram o setor nordeste do município como o mais suscetível aos escorregamentos rasos (**Figura 43**). No entanto, as áreas totais com alta e muita alta suscetibilidade entre os cenários sofrem variação. Os três primeiros cenários apresentaram taxas de alta e muito alta suscetibilidade semelhantes, em torno de 30% do município. Já o último cenário apresentou um valor menor, identificando apenas 17% do município com suscetibilidade alta ou muito alta.

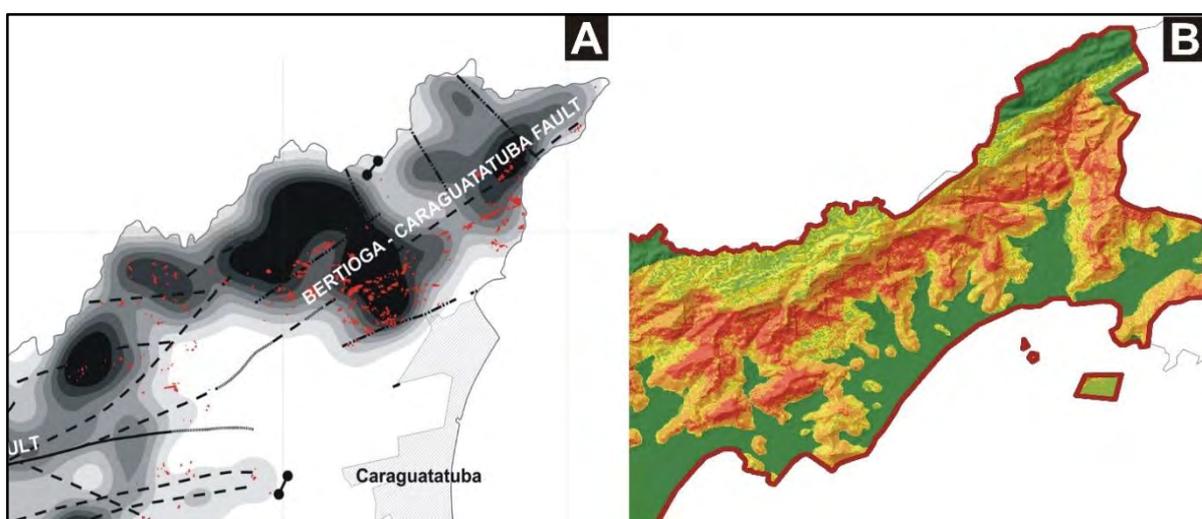


Figura 43 - Destaque para a região NE do município de Caraguatatuba. A - Maior concentração de escorregamentos rasos encontrada por Cerri *et al.* (2018) em área com maior quantidade de lineamentos estruturais; B – Área NE identificada como mais suscetível no Cenário 1, assim como nos demais cenários (2, 3 e 4).

Os valores encontrados para as áreas com suscetibilidade alta e muita alta não coincidem com mapeamentos realizados com outros métodos. Marcelino (2004) utilizou quatro métodos, são eles: Método Booleano, Método média ponderada, Método AHP e Método probabilidade condicional (**Figura 44**). O primeiro método apresentou resultados muito generalizados para a classe de maior suscetibilidade e não foi utilizado para comparação pelo autor, de maneira que apenas os outros três apresentam valores para comparação (**Figura 45**). Desta forma, as áreas definidas com alta e muita alta suscetibilidade aos escorregamentos pelo autor variaram entre 57% e 63% da área total do município.

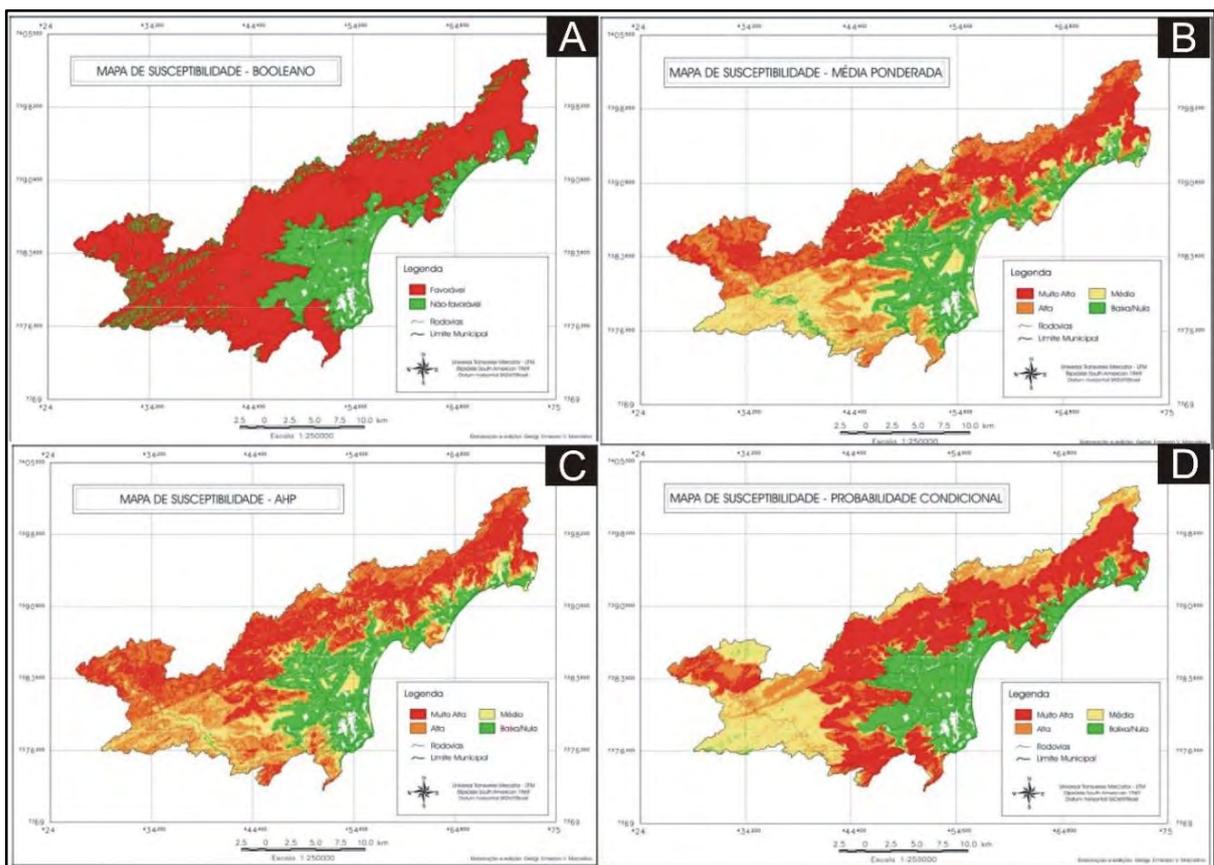


Figura 44 - Diferentes métodos para a definição da suscetibilidade do município de Caraguatatuba. A: Método Booleano; B: Método média ponderada; C: Método AHP e D: Método probabilidade condicional. **Fonte:** Marcelino (2004).

A definição de uma grande área como suscetível à processos morfodinâmicos em um mapeamento nunca gera uma boa carta de suscetibilidade, visto que mapeamentos que apresentam uma menor área demonstram maior acurácia e objetividade (GARCIA *et al.*, 2007). Assim, pode-se afirmar que tais valores estão muito acima do ideal, o que ressaltam os bons resultados gerados pelo método do Valor Informativo, em que as áreas definidas com alta e muito alta suscetibilidade variaram entre 17% e 30%. Segundo Marcelino (2004), tais

resultados elevados podem ser reflexo da falta de uma análise quantitativa da relação existente entre as cicatrizes de escorregamentos e a área das classes dos parâmetros utilizados na ponderação nos métodos de média ponderada e AHP.

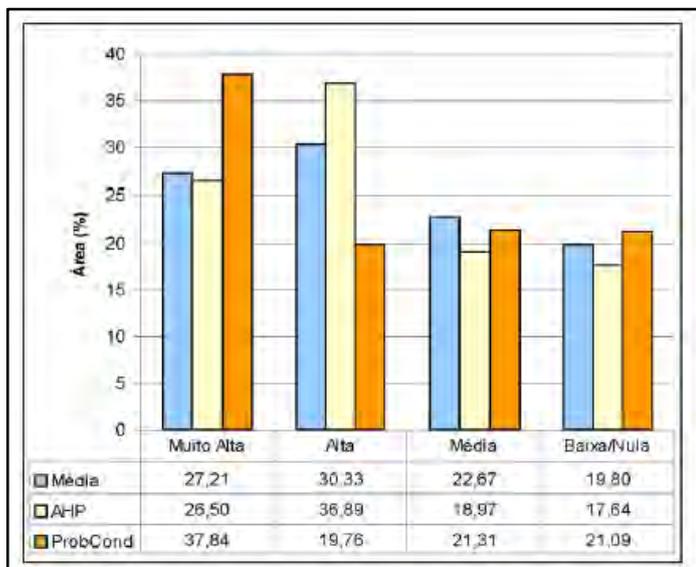


Figura 45 - Comparação de três tipos de métodos para a definição da suscetibilidade do município de Caraguatatuba. **Fonte:** Marcelino (2004).

6.3. Validação da suscetibilidade a escorregamentos rasos

A qualidade dos cenários de suscetibilidade foi avaliada pelas taxas de sucesso e predição, construídas pela relação entre a carta de suscetibilidade e os inventários INV1 e INV2, respectivamente.

A AAC da Taxa de Sucesso foi realizada com o inventário INV1 (**Figura 46**). Este inventário foi utilizado para a modelação da suscetibilidade aos escorregamentos rasos, de maneira que esta curva mede a adequação do inventário utilizando ao método do VI. Os cenários 1 (AAC = 0,837), 3 (AAC = 0,833) e 4 (AAC = 0,840) apresentaram taxas com maior proximidade, enquanto que o cenário 2 (AAC = 0,797) apresentou a menor taxa (**Tabela 20**). Embora haja uma diferença entre os cenários, as taxas apresentadas são altas, o que demonstra a adequabilidade e sucesso da modelação.

A AAC da Taxa de Predição foi feita com base no inventário INV2 (**Figura 47**). Este inventário de escorregamentos não foi utilizado para a confecção dos cenários, ou seja, com base nestas taxas tem-se uma real dimensão da qualidade e acurácia dos cenários de suscetibilidade construídos para uma previsão dos locais onde poderão ocorrer escorregamentos rasos no futuro. Os cenários 1 (AAC = 0,840), 3 (AAC = 0,837) e 4 (AAC = 0,841)

apresentaram taxas muito próximas, no entanto, o cenário 2 (AAC = 0,809) apresentou uma taxa com quase três pontos abaixo das demais (Tabela 21).

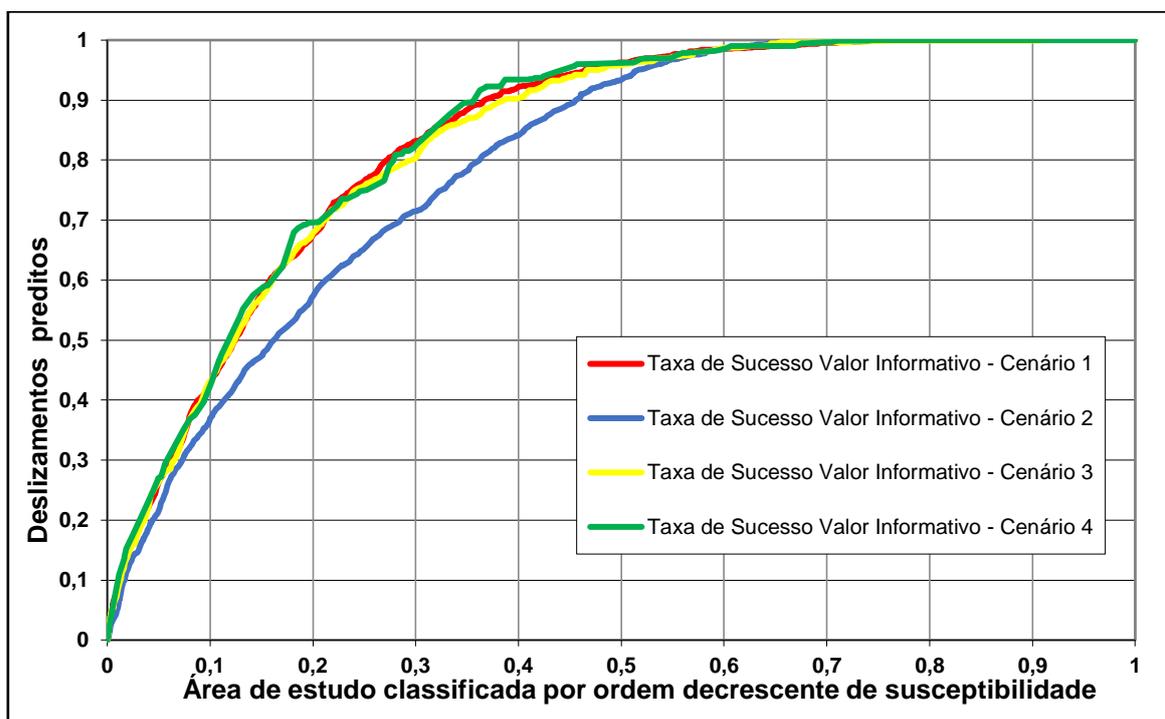


Figura 46 - Comparação das AAC de Taxa de Sucesso dos cenários 1, 2, 3 e 4 com inventário INV1.

Tabela 20 - Variáveis utilizadas nos quatro cenários criados com suas respectivas AAC da Taxa de Sucesso com inventário INV1.

Cenário	Número de variáveis	Condicionantes	AAC da Taxa de Sucesso
1	6	Elevação + Aspecto + Ângulo de encosta + Curvatura + Litologia + Densidade de Lineamentos	0,837
2	5	Aspecto + Ângulo de encosta + Curvatura + Litologia + Densidade de Lineamentos	0,797
3	5	Elevação + Aspecto + Curvatura + Litologia + Densidade de Lineamentos	0,833
4	3	Elevação + Ângulo de encosta + Litologia	0,840

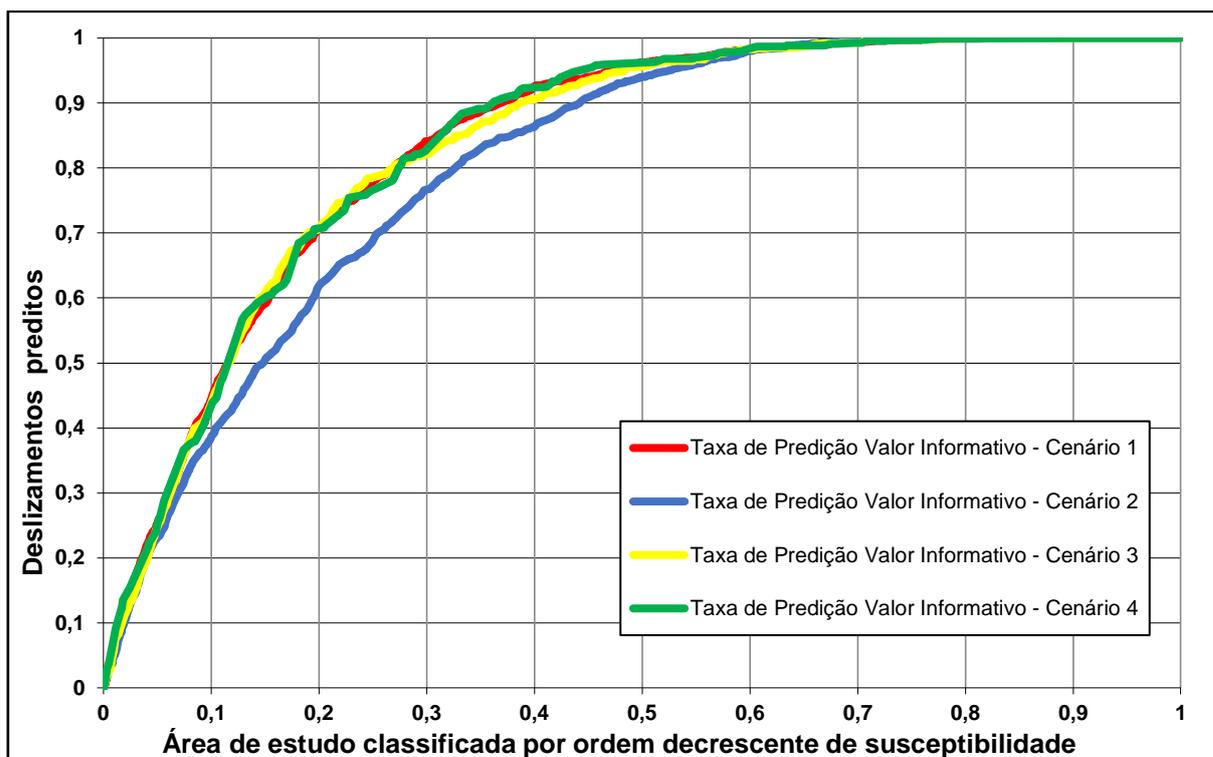


Figura 47 - Comparação das AAC de Taxa de Predição dos cenários 1, 2, 3 e 4 com inventário INV2.

Tabela 21 - Variáveis utilizadas nos quatro cenários criados com suas respectivas AAC da Taxa de predição com inventário INV2.

Cenário	Número de variáveis	Condicionantes	AAC da Taxa de Predição
1	6	Elevação + Aspecto + Ângulo de encosta + Curvatura + Litologia + Densidade de Lineamentos	0,840
2	5	Aspecto + Ângulo de encosta + Curvatura + Litologia + Densidade de Lineamentos	0,809
3	5	Elevação + Aspecto + Curvatura + Litologia + Densidade de Lineamentos	0,837
4	3	Elevação + Ângulo de encosta + Litologia	0,841

O cenário 4 foi o que apresentou maior taxa de predição. Ele foi construído a partir dos três condicionantes de maior relevância (Litologia, Ângulo de encosta e Elevação). Em seguida vem o cenário 1, que utiliza todos os parâmetros; posteriormente o cenário 3, que utiliza todos os parâmetros menos ângulo de encosta; e por fim, o cenário 2, que não utiliza o parâmetro elevação para a análise.

Tais resultados demonstraram que a utilização de uma maior quantidade de parâmetros não gera uma melhor carta de suscetibilidade, uma vez que o cenário proposto com a menor quantidade de parâmetros, três no caso deste estudo, apresentou os melhores resultados.

O sucesso dos resultados para um cenário com apenas três dos parâmetros mais relevantes também foi encontrado por Piedade *et al.* (2011) que criaram doze cenários de suscetibilidade para duas áreas de estudos, cujos valores variaram entre AAC = 0,802 até AAC = 0,878, permitindo identificar que a utilização de 2, 3, 4, 5, 6, ou 7 parâmetros não produz diferenças significativas na capacidade preditiva dos cenários. Assim, para estas áreas os autores definiram os parâmetros declive, unidade geomorfológicas e exposição de vertentes como de maior influência para aquela região.

Pereira (2009) apresentou valores um pouco abaixo dos encontrados nesta pesquisa, variando a AAC entre 0,716 até 0,764 para sete cenários de suscetibilidade criados pela autora. No entanto, a autora também afirma que o aumento de parâmetros de análise na criação dos cenários não gerou grandes alterações no nível preditivo, ressaltando que apenas três parâmetros geraram bons resultados.

A princípio se supunha uma relação entre as cotas de elevações mais propícias aos escorregamentos rasos e as áreas com maior ângulo de encosta, no entanto, os resultados obtidos no cenário com a ausência do parâmetro Elevação demonstram o contrário. Assim, destaca-se também a importância do parâmetro elevação para a definição das áreas mais suscetíveis, visto que o único cenário em que este não foi utilizado para a criação do mapa, o cenário obteve uma queda na taxa de predição.

Embora o cenário 4 tenha apresentado a maior taxa de predição, os cenários 1 e 3 apresentaram valores aproximados, gerando um comportamento semelhante para suas respectivas AAC's. Os três cenários apresentaram valores muito satisfatórios para a ocorrência de escorregamentos rasos não utilizados na modelação, onde nos 10% da área de maior suscetibilidade estão contidos 40% dos escorregamentos rasos, já nos 30% da área de maior suscetibilidade encontram-se 84% do total de escorregamentos rasos ocorridos na área. Isolando 50% da área de estudo, é possível prever 96% dos escorregamentos rasos do grupo INV2.

Uma breve análise de um escorregamento raso que ocorreu em março de 2017 (**Figura 48**), no morro do Santo Antônio, foi realizada pelo Google Earth para reforçar a eficácia e sucesso dos cenários (**Figura 49**). Pelas imagens fica claro que os quatro cenários consideraram o local de ocorrência desse escorregamento como de alta suscetibilidade, reforçando que são eficazes. A diferença entre eles reside na área total definida como suscetível, uma vez que o cenário 2 (AAC = 0,809) foi o que definiu aproximadamente todo o morro do Santo Antônio como muito suscetível. Tal comportamento não é o desejável, pois acaba por generalizar

algumas condições que poderiam ser mais bem definidas, como por exemplo considerar área de transporte e deposição como de alta suscetibilidade.



Figura 48 - Escorregamento ocorrido no Morro do Santo Antônio (Caraguatatuba/SP) em março de 2017, caracterizado como comprido e raso. **Fonte:** Repórter Online Litoral.

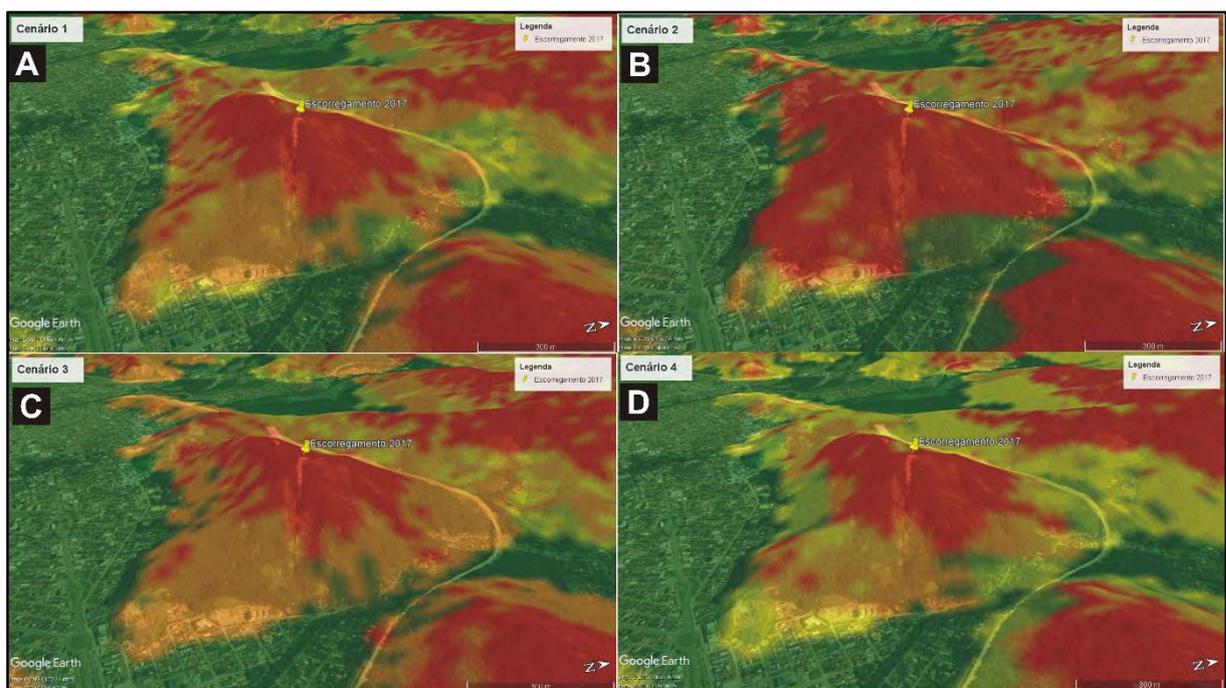


Figura 49 - Comparação entre os cenários 1, 2, 3 e 4 no Morro do Santo Antônio, área onde ocorreu um escorregamento raso em março de 2017. A - Cenário 1; B - Cenário 2; C - Cenário 3 e D - Cenário 4.

A definição das classes de suscetibilidade foi realizada com base nas respectivas quebras da AAC de Taxa de predição dos cenários. As divisões podem ser realizadas de diferentes maneiras, porém esta é a mais adequada, pois gera um mapeamento mais acurado (GARCIA *et al.*, 2007).

A definição das classes de suscetibilidade a partir da AAC da Taxa de Predição foi realizada tendo como ponto de divisão as quebras presentes na curva (**Figura 50**). Por exemplo, para o cenário 4, cenário com maior taxa de predição, a classe de suscetibilidade mais elevada (I) abrange apenas 7% da área de estudo, mas valida 38% dos escorregamentos rasos. Já as duas classes de maior suscetibilidade juntas (I e II) representam 16% da área e validam 62% dos escorregamentos rasos. Desta maneira, a divisão por meio da curva AAC gerou cinco classes de suscetibilidade para os quatro cenários propostos, para o cenário 4 (AAC = 0,841) estas classes apresentam as seguintes características:

- Classe I – Representa as áreas de maior suscetibilidade, abrangendo 7% da área total do município de Caraguatatuba e inclui 38% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região nordeste da área, abrangendo rochas graníticas, gnáissicas e quartzíticas em relevo escarpado.
- Classe II – Representa as áreas de suscetibilidade alta, abrangendo 9% da área total do município de Caraguatatuba e inclui 22% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região norte da área, abrangendo rochas graníticas, gnáissicas e quartzíticas em relevo escarpado.
- Classe III – Representa as áreas de suscetibilidade média, abrangendo 24% da área total do município de Caraguatatuba e inclui 30% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se de forma generalizada pela área de estudo, principalmente em áreas com ângulos de encosta elevados.
- Classe IV - Representa as áreas de suscetibilidade baixa, abrangendo 20% da área total do município de Caraguatatuba e inclui apenas 7% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região oeste da área de estudo.
- Classe V – Representa as áreas de suscetibilidade muito baixa/inexistente, abrangendo 40% área total do município de Caraguatatuba e inclui apenas 3%

dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região central da área de estudo.

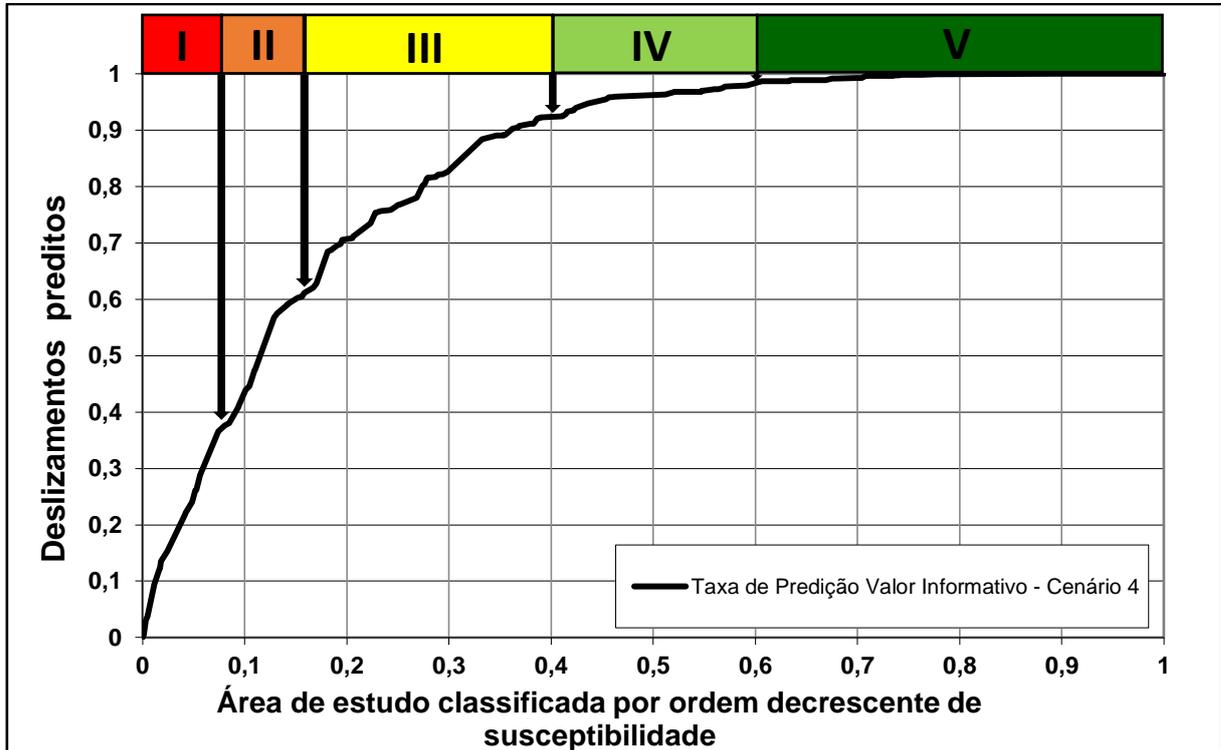


Figura 50 - Definição das classes de suscetibilidade por meio das quebras da curva AAC da Taxa de Predição do Cenário 4.

Para o cenário 1 ($AAC = 0,840$) as classes de suscetibilidade apresentam as seguintes características:

- Classe I – Representa as áreas de maior suscetibilidade, abrangendo 9% da área total do município de Caraguatatuba e inclui 41% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região nordeste da área, abrangendo rochas graníticas, gnáissicas e quartzíticas em relevo escarpado.
- Classe II – Representa as áreas de suscetibilidade alta, abrangendo 21% da área total do município de Caraguatatuba e inclui 43% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região central e nordeste da área, abrangendo rochas graníticas, gnáissicas e quartzíticas em relevo escarpado.
- Classe III – Representa as áreas de suscetibilidade média, abrangendo 22% da área total do município de Caraguatatuba e inclui 13% dos escorregamentos

rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se de forma generaliza pela área de estudo, principalmente em áreas com ângulos de encosta elevados.

- Classe IV - Representa as áreas de suscetibilidade baixa, abrangendo 18% da área total do município de Caraguatatuba e inclui apenas 2% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região oeste da área de estudo.
- Classe V – Representa as áreas de suscetibilidade muito baixa/inexistente, abrangendo 30% área total do município de Caraguatatuba e inclui apenas 1% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região central da área de estudo.

Para o cenário 3 (AAC = 0,837) as classes de suscetibilidade apresentam as seguintes características:

- Classe I – Representa as áreas de maior suscetibilidade, abrangendo 8% da área total do município de Caraguatatuba e inclui 40% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região nordeste da área, abrangendo rochas graníticas, gnáissicas e quartzíticas em relevo escarpado.
- Classe II – Representa as áreas de suscetibilidade alta, abrangendo 20% da área total do município de Caraguatatuba e inclui 41% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região central e nordeste da área, abrangendo rochas graníticas, gnáissicas e quartzíticas em relevo escarpado.
- Classe III – Representa as áreas de suscetibilidade média, abrangendo 27% da área total do município de Caraguatatuba e inclui 15% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se de forma generaliza pela área de estudo, principalmente em áreas com ângulos de encosta elevados.
- Classe IV - Representa as áreas de suscetibilidade baixa, abrangendo 12% da área total do município de Caraguatatuba e inclui apenas 3% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região oeste da área de estudo.

- Classe V – Representa as áreas de suscetibilidade muito baixa/inexistente, abrangendo 33% área total do município de Caraguatatuba e inclui apenas 1% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região central da área de estudo.

Para o cenário 2 (AAC = 0,809) as classes de suscetibilidade apresentam as seguintes características:

- Classe I – Representa as áreas de maior suscetibilidade, abrangendo 10% da área total do município de Caraguatatuba e inclui 38% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região nordeste da área, abrangendo rochas graníticas, gnáissicas e quartzíticas em relevo escarpado.
- Classe II – Representa as áreas de suscetibilidade alta, abrangendo 20% da área total do município de Caraguatatuba e inclui 40% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região central e nordeste da área, abrangendo rochas graníticas, gnáissicas e quartzíticas em relevo escarpado.
- Classe III – Representa as áreas de suscetibilidade média, abrangendo 17% da área total do município de Caraguatatuba e inclui 15% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se de forma generalizada pela área de estudo, principalmente em áreas com ângulos de encosta elevados.
- Classe IV - Representa as áreas de suscetibilidade baixa, abrangendo 18% da área total do município de Caraguatatuba e inclui apenas 5% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região oeste da área de estudo.
- Classe V – Representa as áreas de suscetibilidade muito baixa/inexistente, abrangendo 35% área total do município de Caraguatatuba e inclui apenas 2% dos escorregamentos rasos não utilizados na modelação de definição da suscetibilidade. Localiza-se principalmente na região central da área de estudo.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização dos parâmetros morfológicos e geológicos para avaliação da suscetibilidade a escorregamentos rasos por meio de uma análise estatística se mostrou eficiente, uma vez que foi possível estabelecer a influência de cada parâmetro para o processo, além da definição da classe com maior suscetibilidade. Desta forma, a ocorrência dos escorregamentos em Caraguatatuba está vinculada principalmente a locais com presença de rochas quartzíticas e graníticas, entre 200 – 600 m de elevação, com ângulos de encosta entre 30 – 55°, orientação S e proximidade de falhas e fraturas.

A análise sensitiva dos parâmetros possibilitou a ponderação dos mesmos e criação de cenários de suscetibilidade elaborados a partir de diferentes quantidades de parâmetros, são eles: Cenário 1 (6 parâmetros); Cenário 2 (5 parâmetros); Cenário 3 (5 parâmetros) e Cenário 4 (3 parâmetros).

A análise desses cenários possibilitou concluir que a utilização de muitos parâmetros não faz com que o resultado seja mais eficiente e acurado do que um cenário criado a partir de uma quantidade menor de parâmetros. Desta maneira, fica claro que a busca por mais informações sobre a área de estudo, ou seja, base de dados, nem sempre é necessária, visto que a utilização de três parâmetros condicionantes gera um mapeamento superior/semelhante a utilização de seis parâmetros. O estudo, no entanto, apresenta uma limitação no entendimento da influência do parâmetro com maior VI, a Litologia. Uma vez que só há disponível dados sobre a rocha sã, não havendo informações sobre o grau de intemperismo dessas rochas *in situ*. Sabendo que tal informação influencia diretamente a instabilidade das encostas, torna-se difícil a identificação de características físicas, mineralógicas e mecânicas dos tipos litológicos sob tais condições na área, o que acaba possibilitando apenas inferências, sendo necessário, portanto, maior aprofundamento nesses processos em trabalhos futuros.

Destaca-se a contribuição desta pesquisa aos estudos dos escorregamentos rasos, sobretudo sob a perspectiva metodológica, uma vez que permitiu uma maior compreensão do processo a partir de uma análise estatística pouco utilizada em território nacional. Desta maneira, buscou-se utilizar uma metodologia que gere mapeamentos eficazes para áreas com alta suscetibilidade, como por exemplo, os municípios da Serra do Mar.

Como sugestão para trabalhos futuros sobre o tema, tendo em vista a continuidade e aprofundamento desta pesquisa, destacam-se: i) avaliação das características morfológicas e geológicas em uma escala de maior detalhe e ii) aplicação e validação da metodologia em outras áreas serranas com grande ocorrência do processo, a fim de identificar padrões de ocorrência.

8. REFERÊNCIAS

- ALEOTTI, P. e CHOWDHURY, R. (1999). Landslide Hazard Assessment: Summary Review and New Perspectives. In: Bulletin of Engineering Geology and the Environment, v. 58, p.21-44.
- ALMEIDA, F.F.M. (1964). Os fundamentos geológicos do relevo paulista. In: Geologia do Estado de São Paulo, Bol. Inst. Geogr. Geol., São Paulo, nº41, 169-263.
- ALMEIDA, F.F.M e CARNEIRO, C.D.R. (1998) Origem e evolução da Serra do Mar. In: Revista Brasileira de Geociência, v.28 - São Paulo, p.135-150.
- ARAUJO, M.A.; PEDROSO, A.V.; AMARAL, D.C. e ZINN, Y.L. (2014). Paragênese mineral de solos desenvolvidos de diferentes litologias da região sul de Minas Gerais. In: Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.38, p.11-25.
- AUGUSTO FILHO, O. (1992). Caracterização Geológica-geotécnica voltada à estabilização de encostas: Uma proposta metodológica. In: 1ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas; Rio de Janeiro, p.721-733.
- AVANZI, G.D.; GIANNECCHINI, R. e PUCCINELLI, A. (2004). The influence of the geological and geomorphological settings on shallow landslides. Na example in a temperature climate environment: the June 19, 1996 event in northwestern Tuscany (Italy). In: Engineering Geology, v. 73, p.215-228.
- BARROS, R.S.; CRUZ, C.B.M.; REIS, R.B. E COSTA JÚNIOR, N.A. (2005). Avaliação do modelo digital de elevação do SRTM na ortorretificação de imagens Landsat 7 – Área de aplicação: Angra dos Reis – RJ. In: Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil; p. 3997-4004.
- BI, J. e BENNETT, K.P. (2003). Regression Error Characteristic Curves. In: Proceedings of the Twentieth International Conference on Machine Learning (ICML). Washington, DC. 8p.
- BIERMAN, P.R. e MONTGOMERY, D.R. (2014). Hillslope. In: Key Concepts in Geomorphology. W.H. Freeman and Company Publishers New York. 145-178.
- CALCATERRA, D. e PARISE, M. (2010). Weathering as a predisposing factor to slope movements: an introduction. In: CALCATERRA, D. e PARISE, M. (eds.) Weathering as a Predisposing Factor to Slope Movements. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, 23, p.1-4.
- CAPITANI, M., RIBOLINI, A. e FEDERICI, P.R. (2013). Influence of deep-seated gravitacional slope deformations on landslide distributions: A statistical approach. In: Geomorphology, v.201, p.127-134.
- CARVALHO, P.A.S (1991) (Coord.) Taludes de rodovias: orientação para diagnósticos e soluções de seus problemas. São Paulo, IPT, publicação nº 1843, 410p.
- CASCINI, L.; CIURLEO, M.; NOCERA, S.D. e GULLÀ, G. (2015). A new-old approach for shallow landslide analysis and susceptibility zoning in fine-grained weathered soils of Southern Italy In: Geomorphology, v.241, p.371-381.
- CARRARA, A.; GUZZETTI, F.; CARDINALI, M. e REICHENBACH, P. (1999). Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. In: Natural Hazards, v.20, p.117-135.

- CERRI, R. I.; REIS, F. A. G. V.; GABELINI, B. M.; AMARAL, A. M. C.; CORREA, C. V. S.; BRESSAN, R.; SALA, L. A.; GIORDANO, L. C. (2016). Relação entre os Condicionantes Estruturais e susceptibilidade a ocorrência de escorregamentos nos municípios de Caraguatatuba e São Sebastião (SP). In: III Congresso da Sociedade de Análise de Risco Latino Americana SRA-LA, 2016, São Paulo (SP). Anais do III Congresso da Sociedade de Análise de Risco Latino Americana SRA-LA.
- CERRI, R.I.; REIS, F.A.G.V.; GRAMANI, M.F.; GIORDANO, L.C. e ZAINI, J.E. (2017). Landslides zonation hazard: relation between geological structures and landslides occurrence in hilly tropical regions of Brazil. In: Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 89(4), p.2609-2623.
- CERRI, R.I.; REIS, F.A.G.V.; GRAMANI, M.F.; ROSOLEN, V.; LUVIZOTTO, G.L.; GIORDANO, L.C. e GABELINI, B.M. (2018). Assesment of landslide occurrences in Serra do Mar mountain range using kinematic analyses. In: Environmental Earth Sciences, v.77:375, 17p.
- CHIEREGATI, L.A.; THEODOROVICZ, A.M.; THEODOROVICZ, A.; MENEZES, R.G.; CHIODI FILHO, C. e RAMALHO, R. (1982). Projeto Folhas Natividade da Serra e Caraguatatuba: Relatório Final. São Paulo: Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Diretoria da Área de Pesquisas, Superintendência Regional de São Paulo.
- COELHO, R.D. (2016). O papel da espessura e da granulometria dos solos no desenvolvimento dos escorregamentos rasos. Trabalho de graduação individual, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 57p.
- COLLINS, B. e ZNIDARCIC, D. (1997). Triggering Mechanisms of Rainfall Induced Debris Flows In: 2ª Conferência Brasileira sobre Estabilidade de Encostas/2nd Pan-American Symposium on Landslides, Rio de Janeiro, p.277-286.
- CROZIER, M. J. (1973). Techniques for the morphometric analysis of landslips. In: Z. Geomorph., v.17, 78–101.
- CROZIER, M.J. (1986) Landslides: causes, consequences and environment. Croom Helm, 252p.
- CRUZ, O. (1974). A Serra do Mar e o Litoral na Área de Caraguatatuba - SP. Contribuição à Geomorfologia Litorânea Tropical. Tese de Doutorado. IG - Série Teses e Monografias nº11, 181p.
- DAI, F.C. e LEE, C.F. (2002). Landslide characteristics and slope instability modeling using GIS, Lantau Island, Hong Kong. In: Geomorphology, v.42, p.213-228.
- DE PLOEY, J. e CRUZ, O. (1979). Landslides in the Serra do Mar, Brazil. In: Catena, v.6, p.111-122.
- DIAS, H.C. (2016). Caracterização morfológica e geológica de bacias hidrográficas: Contribuição para os estudos de escorregamentos no município de Caraguatatuba. Trabalho de Graduação Individual, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 66p.
- DIAS, H.C.; DIAS, V.C. e VIEIRA, B.C. (2016a). Landslides and morphological characterization in the Serra do Mar, Brazil. In: AVERSA, F.; CASCINI, L.; PICARELLI, L. e SCAVIA, C. (Org.). Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice. Boca Raton: CRS Press, p.831-836.

- DIAS, H. C.; DIAS, V. C. e VIEIRA, B.C. (2017). Condicionantes morfológicos e geológicos dos escorregamentos rasos na bacia do Rio Santo Antônio, Caraguatatuba / SP. In: Revista do Departamento de Geografia – USP. Volume especial (Eixo 8), p.157-163.
- DIAS, H.C.; BATEIRA, C.V.M.; PISSATO, E.; MARTINS, T.D. e VIEIRA, B.C. (2018). Avaliação da Suscetibilidade a Escorregamentos Rasos com Base na Aplicação de Estatística Bivariada: Resultados Preliminares. In: Revista do Departamento de Geografia, v. II Workshop PPGF, p.34-42.
- DIAS, V.C. (2017). Corridas de Detritos na Serra do Mar Paulista: Parâmetros morfológicos e índice de potencial de magnitude e suscetibilidade. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 129p.
- DIAS, V.C., VIEIRA, B.C. e GRAMANI, M.F. (2016b). Parâmetros morfológicos e morfométricos da magnitude das corridas de detritos na Serra do Mar Paulista. In: Confins, v.29, p.1-18.
- DNPM/CPRM. (1991). Mapa Geológico da Folha Pico do Papagaio 1:50000. Projeto de Integração Geológica da Região Metropolitana de São Paulo.
- DONATI, L. e TURRINI, M.C. (2002). An objective method to rank the importance of the factors predisposing to landslides with the GIS methodology: application to an area of the Apennines (Valnerina; Perugia, Italy). In: Engineering Geology, v. 63, p. 277 – 289.
- DOURADO, F., ARRAES, T.C. e SILVA, M.F. (2012). O Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro – as Causas do Evento, os Mecanismos dos Movimentos de Massa e a Distribuição Espacial dos Investimentos de Reconstrução no Pós-Desastre. In: Anuário do Instituto de Geociências, UFRJ, v.35, p.43-54.
- FERNANDES, N. F. e AMARAL, C.P. (1996). Movimentos de Massa: Uma Abordagem Geológico-Geomorfológica. In: GUERRA, A. J. T. e CUNHA, S. B. (Org.). Geomorfologia e Meio ambiente. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 123- 181.
- FERNANDES, N.F.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY, D.R. e GREENBERG, H. (2001). Condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas: Avaliação de metodologias e aplicação de modelo de previsão de áreas susceptíveis. In: Revista Brasileira de Geomorfologia, v.2, nº1, p.51-71.
- FERREIRA, F. S. (2013). Análise da influência das propriedades físicas do solo na deflagração dos escorregamentos translacionais rasos na Serra do Mar (SP). Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 113p.
- FÚLFARO, V.J., PONÇANO, W.L., BISTRICHI, C.H., STEIN, D.P. (1976). Escorregamento de Caraguatatuba: expressão atual e registro na coluna sedimentar da planície costeira adjacente. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 1º, Rio de Janeiro: Anais Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, v. 2, p.341-346.
- GAO, J. (1993). Identification of topographic settings conducive to landsliding from DEM in Nelson County, Virginia, U.S.A. Earth Surface Processes and Landforms, v.18, p.579-591.
- GARCIA, R.A.C., ZÊZERE, J.L., e OLIVEIRA, S. C. (2007). A importância do processo de classificação de dados na cartografia: um exemplo na cartografia de susceptibilidade a

movimentos de vertente. In: Publicações da Associação Portuguesa de Geomorfólogos, Lisboa. Vol. V, p. 265-279.

GARIANO, S.L.; BRUNETTI, M.T.; LOVINE, G., MELILLO, M.; PERUCCACCI, S.; TERRANOVA, O.; VENNARI, C. e GUZZETTI, F. (2015). Calibration and validation of rainfall thresholds for shallow landslide forecasting in Sicily, Southern Italy. In: *Geomorphology*, v.228, p.653-665.

GRAMANI, M. F. (2001). Caracterização Geológico-Geotécnica das Corridas de Detritos (“Debris Flows”) no Brasil e comparação com alguns casos internacionais. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 375p.

GRAMANI, M.F. (2015). A corrida de massa no Córrego Guarda-Mão, município de Itaóca (SP): impacto e observações de campo. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, XV, 2015, Bento Gonçalves. Anais. São Paulo: ABGE. 10p.

GOMES, M.C.V. (2012). Análise da influência da condutividade hidráulica saturada dos solos nos escorregamentos rasos na bacia do rio Guaxinduba (SP). Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 153p.

GOMES, M.C.V. e VIEIRA, B.C. (2016). Saturated hydraulic conductivity of soils in a shallow landslide area in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. In: *Zeitschrift für Geomorphologie*, v.60/1, p. 53-65.

GUTJAHR, M. R.; TAVARES R.; PEREIRA, P. R. B. e SANTORO, J. (2000). Os estudos climáticos na compreensão dos movimentos de massa na Serra do Mar/SP. In: Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, 4., Anais. Rio de Janeiro: UFRJ, 2000.7p.

GUIDICINI, G. e NIEBLE, C. M. (1983) Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação. São Paulo: Editora Blucher, 2ª edição, 206p.

GUIMARÃES, R. F., VIEIRA, B.C., GOMES, R.A.T. e FERNANDES, N.F. (1998). Avaliação Estatística de Parâmetros Fito-Morfológicos nas Cicatrizes dos Movimentos de Massa da Bacia do Rio Quitite, Jacarepaguá (RJ) In: XL Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte/MG: 417.

HART, M. G. (2007) *Geomorphology: Pure and Applied*. London, Allen & Unwin, p. 81-107.

HASUI, Y.; MIOTO, J.A.; MORALES, N. (1994). Geologia do Pré-Cambriano. In: Solos do litoral de São Paulo. Santos: ABMS, cap.2, p.41-67.

HEIDEMANN, M.; BRESSANI, L.A.; FLORES, J.A., CONTI, M.A.G. e GRAÇA, T.M.O. (2018). Comportamento de solos residuais de Granito-Biotita associados a um movimento de massa na grande Florianópolis. In: *Revista Técnico-Científica do CREA-PR*, edição especial Junho de 2018, p.1-16.

HENCHER, S.R. (1987). The implications of joints and structures for slope stability. In: ANDERSON, M.G. e RICHARDS, K.S. (Org.). *Slope stability: Geotechnical engineering and geomorphology*. Chichester: John Wiley & Sons, p.145-186.

HOEK, E. (1972). Estimando a estabilidade de taludes escavados em minas a céu aberto. *Trab. De C.M. Nieble*. São Paulo, APGA, 58p.

- IETTO, F.; PERRI, F. e CELLA, F. (2016). Geotechnical and landslide aspects in weathered granitoid rock masses (Serre Massif, Southern Calabria, Italy). In: Catena, v.145, p.301-315.
- KÖPPEN, W. (1936). Das geographische System der Klimate. Handbuch der Klimatologie, v.1, Part C (W. Köppen & R. Geiger, eds.). Gerbrüder Bornträger, Berlin, p. C1-C44.
- LAN, H. X.; ZHOU, C. H.; WANG, L. J.; ZHANG, H. Y. and LI, R. H. (2004) Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. In: Engineering Geology, v.76, p. 109-128.
- LISTO, F.L.R. e VIEIRA, B.C. (2015). Influência de parâmetros geotécnicos e hidrológicos na previsão de áreas instáveis a escorregamentos translacionais rasos utilizando o modelo TRIGRS. In: Revista Brasileira de Geomorfologia, v.16, nº3, p. 485-498.
- MELFI, A.J. (1967). Intemperismo de Granitos e Diabásios no município de Campinas e arredores, Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 165p.
- MACHADO FILHO, J.G. (2000). Estabilidade de encostas e condicionantes geológicos, geomorfológicos e estruturais, num trecho da Serra de Cubatão. Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 172p.
- MARCELINO, E.V. (2004). Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento no município de Caragutatuba (SP) usando técnicas de sensoriamento remoto. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 230p.
- MARTINS, T.D.; OKA-FIORI, C. e VIEIRA, B.C. (2015). Mapeamento de cicatrizes de escorregamentos utilizando imagem multiespectral. In: Revista do Departamento de Geografia – USP, v. 30; p.96 – 109.
- MARTINS, T.D.; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B.C.; CORRÊA, A.C.B. e BATEIRA, C.V.M. (2017). Análise dos parâmetros morfológicos de escorregamentos rasos na Serra do Mar, Paraná. In: Caminhos da Geografia, v. 18, nº63; p. 223 – 239.
- MONTGOMERY, D.R e DIETRICH, W.E. (1994). A physically-based model for topographic control on shallow landsliding. Water Resources Research 30 (4): p. 1153-1171.
- NERY, T. D. e VIERA, B. C. (2014). Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. In: Bulletin of Engineering Geology and the Environment (Print), v. 74, p. 369-378.
- NERY JUNIOR, H. e VANZELA, L.S. (2016). Influência do relevo sobre a distribuição espacial da precipitação no município de Caragutatuba – SP. In: XII Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica, Anais, p. 2011-2024.
- OLIVEIRA, R.R.; ZAÚ, A.S.; LIMA, D.F.; VIANNA, M.C. SODRÉ, D.O. e SAMPAIO, P.D. (1995). Significado ecológico da orientação de encostas no maciço da Tijuca, Rio de Janeiro. In: Oecologia Brasiliensis, vol. 1, p. 523-541.

- PACHAURI, A. K. e PANT, M. (1992). Landslide hazard mapping based on geological attributes. In: *Engineering Geology*, v.32, p. 81-100.
- PELLEGATTI, C.H.G. e GALVANI, E. (2010). Avaliação da precipitação na Serra do Mar – SP em eventos de diferentes intensidades e duração. In: *GEOUSP – Espaço e Tempo*, v.27, p.147-158.
- PEREIRA, S. (2009). Perigosidade a movimentos de vertentes na região norte de Portugal. Tese de Doutorado, Universidade do Porto, Porto. 373p.
- PEREIRA, S.; ZÊZERE, J.L.; QUARESMA, I.D. e BATEIRA, C. (2014). Landslide incidence in the North of Portugal: Analysis of a historical landslide database based on press releases and technical reports. In: *Geomorphology*, v.214, p.514-525.
- PIEIDADE, A.; ZÊZERE, J.L.; GARCIA, R.A.C. e OLIVEIRA, S.C. (2011). Modelos de suscetibilidade translacionais na região a norte de Lisboa. In: *Finisterra*, XLVI, 91; p.9-26.
- PORTELA, V.D.A. (2014). Avaliação da vegetação como indicadora de áreas suscetíveis a escorregamentos na Serra do Mar em Caraguatatuba (SP). Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP. 122p.
- REMONDO, J.; GONZÁLEZ, A.; TERÁN, J.R.D.; CENDRERO, A.; FABBRI, A. e CHUNG, C.F. (2003). Validation of Landslide Susceptibility Maps: Examples and Applications from a Case Study in Northern Spain. In: *Natural Hazards*, 30, p.437-449.
- ROCHA, M. (1971). Os Maciços Rochosos. In: *Mecânica das Rochas*. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, p. 27-95.
- SANT'ANNA NETO, J. L. (1990). Ritmo climático e a gênese das chuvas na zona costeira paulista. Dissertação (mestrado). Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- SANTOS, D.D. e GALVANI, E. (2014). Distribuição sazonal e horária das precipitações em Caraguatatuba-SP e a ocorrência de eventos extremos nos anos de 2007 – 2011. In: *Ciência e Natura*, v. 36 n. 2 mai-ago, p.214-229.
- SANTOS, W. (2009). Influência dos fatores topográficos na distribuição dos escorregamentos translacionais rasos na Serra de Cubatão (SP). Trabalho de Graduação Individual em Geografia. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.
- SARKAR, S.; ROY, A.K. e RAHA, P. (2016). Deterministic approach for susceptibility assessment of shallow debris slide in the Darjeeling Himalayas, India. In: *Catena*, v.142, p.36-46.
- SIDLE, R. C., PEARCE, A.J. e O'LOUGHLIN, C.L. (1985). *Hillslope stability and land use*, Washington.
- SILVEIRA, C.T; FIORI, A.P., FERREIRA, A.M., GÓIS, J.R., MIO, G., SILVEIRA, R.M.P., MASSULINI, N.M.B., LEONARDI, T.M.H. (2013). Emprego de atributos topográficos no mapeamento da suscetibilidade a processos geoambientais na bacia do Rio Jacaré, Paraná. In: *Sociedade & Natureza*, v. 25 (3), p.623- 639.

SELBY, M. J. (1993) Mass Wasting of Soils. In: Hillslope Materials and Processes. Second Edition . Oxford University Press, Oxford,p. 249-355.

SÜZEN, M.L e DOYURAN, V. (2004). A comparison of the GIS based landslide susceptibility assessment methods: multivariate versus bivariate. In: Environmental Geology, v.45, p.665-679.

TATIZANA, C.; OGURA, A.T.; CERRI, L.E.S.; ROCHA, M.C.M. (1987). Modelamento numérico da análise de correlação entre chuvas e escorregamentos aplicado ás encostas da Serra do Mar no município de Cubatão. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia. São Paulo. Anais, São Paulo: ABGE, v.2, p.237-248.

US. GEOLOGICAL SURVEY (2004). Landslides types and processes. Disponível em: <https://pubs.usgs.gov/fs/2004/3072/pdf/fs2004-3072.pdf>. Acesso: Dezembro, 2017.

VALERIANO, M. M. (2004). Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72p.

VAN WESTEN, C.J. (1993) Background (Chapter 2) In: Training Package for Geographic Information Systems in Slope Instability Zonation. ITC Publication Number 15. 3-24.

VAN WESTEN, C.J.; RENGERS, N. e SOETERS, R. (2003). Use of geomorphological information in indirect landslide susceptibility assessment. In: Natural Hazards, v.30, p.399-419.

VAN WESTEN, C.J.; CATELLANOS, E. e KURIAKOSE, S.L. (2008). Spatial data for landslide susceptibility, hazard and vulnerability assessment: An overview. In: Engineering Geology, v. 120, p.112-131.

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, Washington D. C., p. 11-33.

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

VIEIRA, B.C.; FERREIRA, F.S. e GOMES, M.C.V. (2015). Propriedades Físicas e Hidrológicas dos solos e os escorregamentos rasos na Serra do Mar Paulista. In: RA'EGA, v.34, p.269-287.

VIEIRA, B. C. e GRAMANI, M. F. (2015). Serra do Mar: The Most “Tormented” Relief in Brazil. In: Landscapes and Landforms of Brazil, World Geomorphological Landscapes (Ed. Vieira, B. C.; Salgado, A. A. R. e Santos, L. J. C.). Springer, 403p.

VIEIRA, B. C. e RAMOS, H. A. A. (2015). Aplicação do Modelo Shalstab para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). In: Revista do Departamento de Geografia – USP, v.29, p.161 -164.

WOLLE, C.M. e CARVALHO, C. S. (1989). Deslizamentos em encostas na Serra do Mar - Brasil. In: Solos e Rochas, v. 12, p. 27-36.

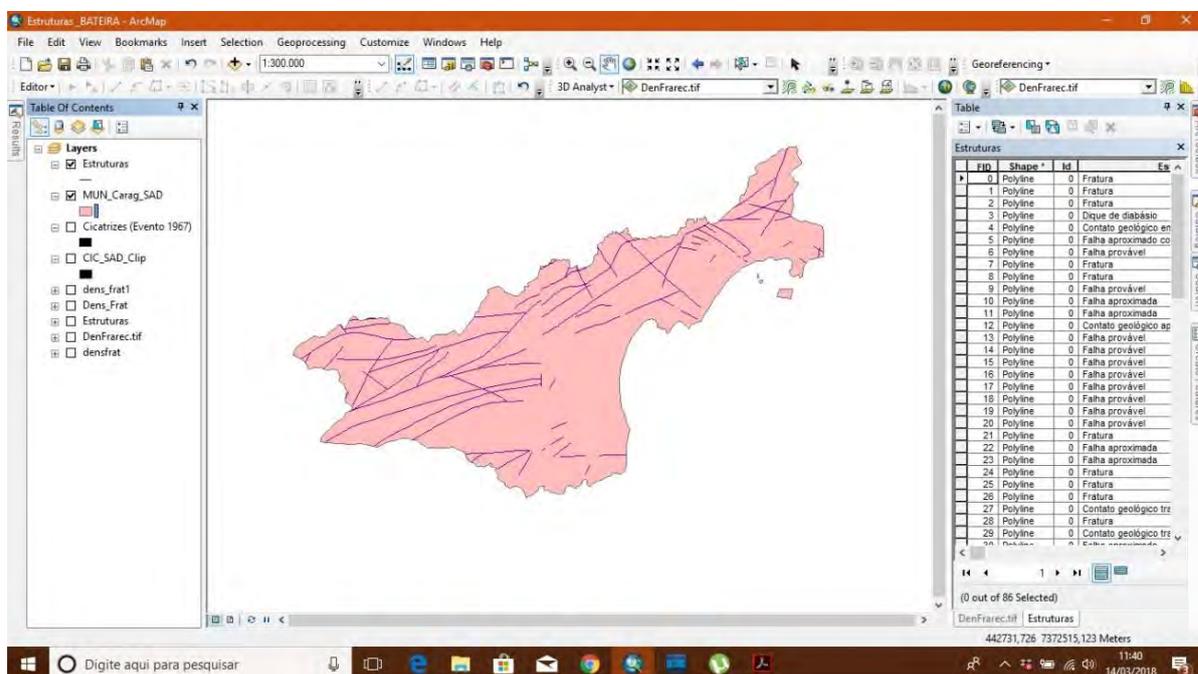
- WOLLE, C. M. e CARVALHO, C.S. (1994). Taludes Naturais. In: Solos do litoral de São Paulo. Santos: ABMS, cap.8, p.179-203.
- WU, C. e QIAO, J. (2009). Relationship between landslides and lithology in the Three Gorges Reservoir area based on GIS and information value model. *Front. For. China* 4(2): p. 165–170.
- YAN, T. Z. (1988). Recent advances of quantitative prognoses of landslide in China. In: *Landslides. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides, Lausanne, 2*, Balkema, Rotterdam: Bonnard C (ed.), p.1263-1268.
- YIN, K. L. e YAN, T. Z. (1988). Statistical prediction models for slope instability of metamorphosed rocks. In: *Landslides. Proceedings of the Fifth International Symposium on Landslides, 2*, Balkema, Rotterdam: Bonnard C (ed.), p.1269-1272.
- ZÊZERE, J. L. (1997). *Movimentos de Vertente e Perigosidade Geomorfológica na Região a Norte de Lisboa*. Lisboa: Dissertação de doutoramento em Geografia Física apresentada à Faculdade de Letras da Universidade de Lisboa.
- ZÊZERE, J., OLIVEIRA, S.; GARCIA, R. e REIS, E. (2007). Landslide risk analysis in the area North of Lisbon (Portugal): evaluation of direct and indirect costs resulting from a motorway disruption by slope movements. In: *Landslides*, v.4, p.123-136.
- ZHANG, G.; CAI, Y.; ZHENG, Z.; ZHEN, J.; LIU, Y. e HUANG, K. (2016). Integration of the Statistical Index Method and the Analytic Hierarchy Process technique for assessment of landslide susceptibility in Huizhou, China. In: *Catena*, v.142, p.233-244.
- ZHOU, C.H.; LEE, C.F.; LI, J. e XU, Z.W. (2002). On the spatial relationship between landslides and causative factors on Lantau Island, Hong Kong. In: *Geomorphology*, v.43, p.197-207.

ANEXOS

Os procedimentos aqui detalhados foram realizados no software ArcGis 10.2 para algumas etapas desta pesquisa. O objetivo é esclarecer e auxiliar a reprodução desses procedimentos com a indicação das ferramentas e materiais necessários.

1. Construção do mapa de Densidade de Lineamentos (Falhas e fraturas).

Para a construção do mapa de densidade de lineamentos é necessário ter a área de estudo definida e as estruturas delimitados (**Anexo 1**).



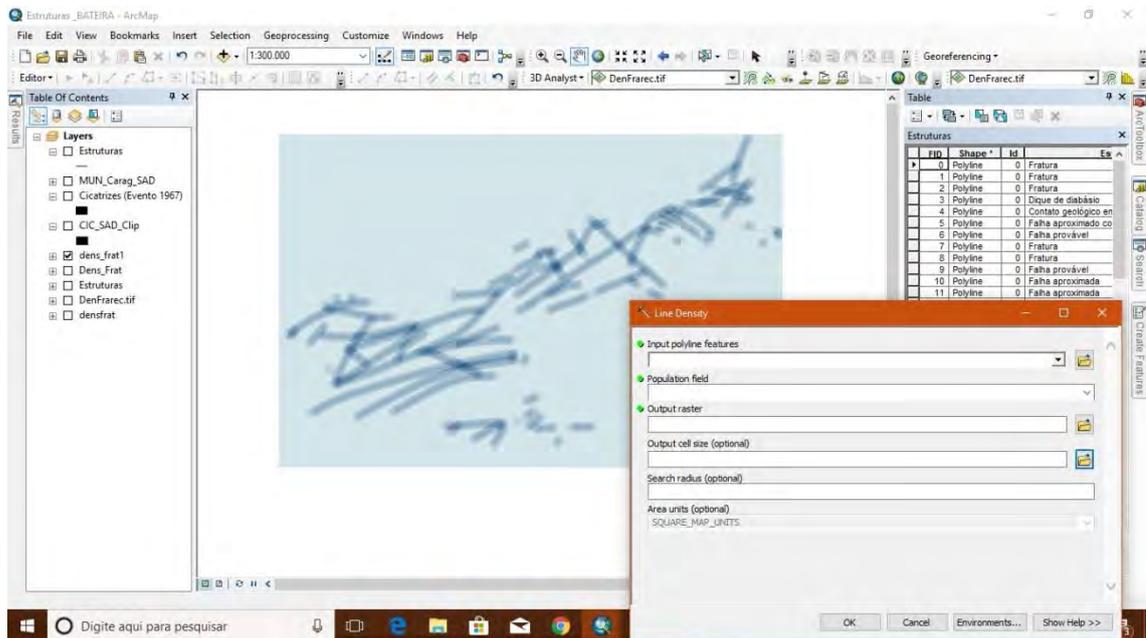
Anexo 1 - Shape das estruturas (Falha e fraturas) que se deseja ter como base para a construção do mapa de densidade no software ArcGis.

A partir disso, selecionar a função “*Line density*” e definir o shape base em “*Input polyline features*”, o tamanho do pixel em “*Output cell size*” e o raio de alcance desejado em “*Search radius*” (**Anexo 2**), assim o software dará origem a um novo arquivo.

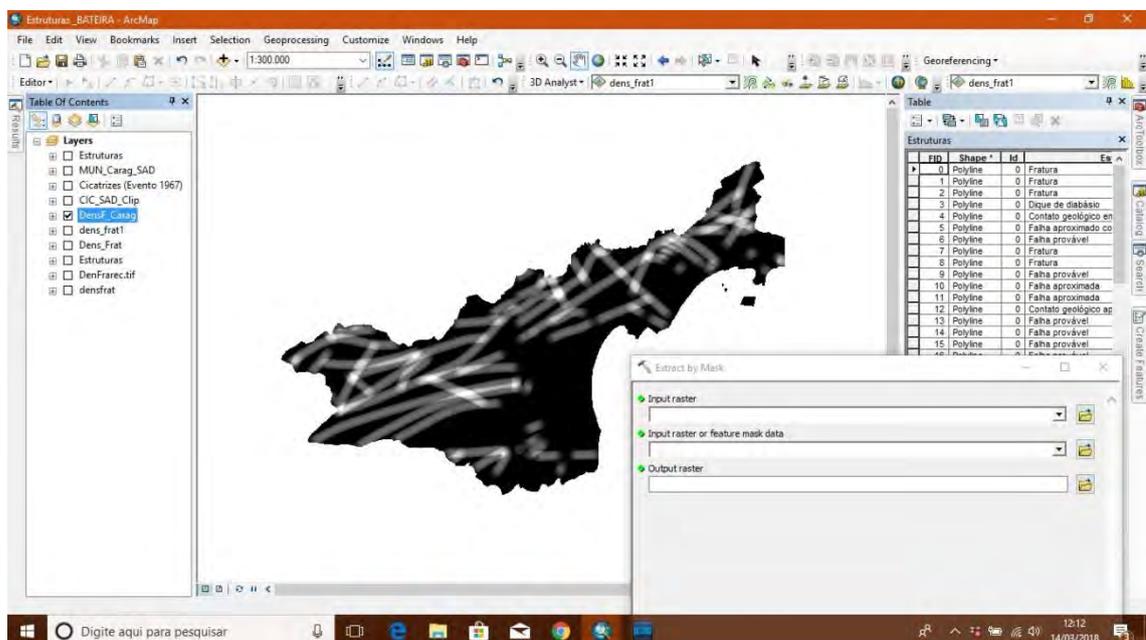
O arquivo gerado não estará definido com os contornos da área de estudo, desta maneira será necessário utilizar a função “*Extract by Mask*”, onde se colocará o arquivo recém gerado

em “*Input raster*” e o arquivo de deseja ter como base para o corte em “*Input raster or feature data*” (Anexo 3).

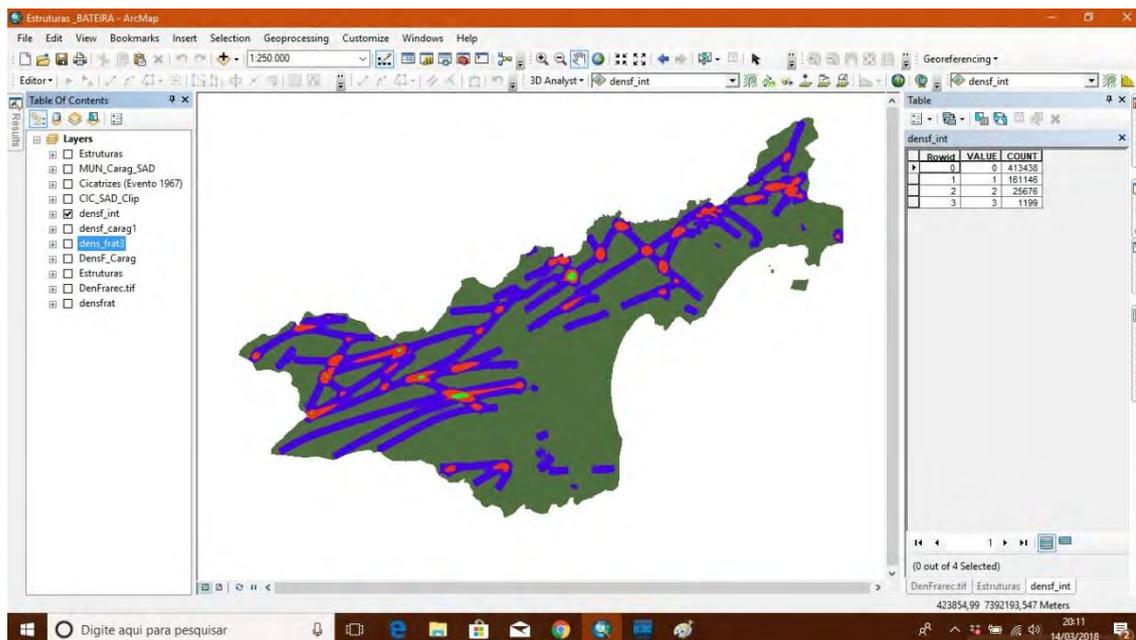
Para finalizar definem-se as classes de densidade estrutural desejadas nas configurações do arquivo, criando uma tabela de atributos com as respectivas quantidades de pixels em cada classe (Anexo 4).



Anexo 2 - Uso da ferramenta “*Line Density*”.



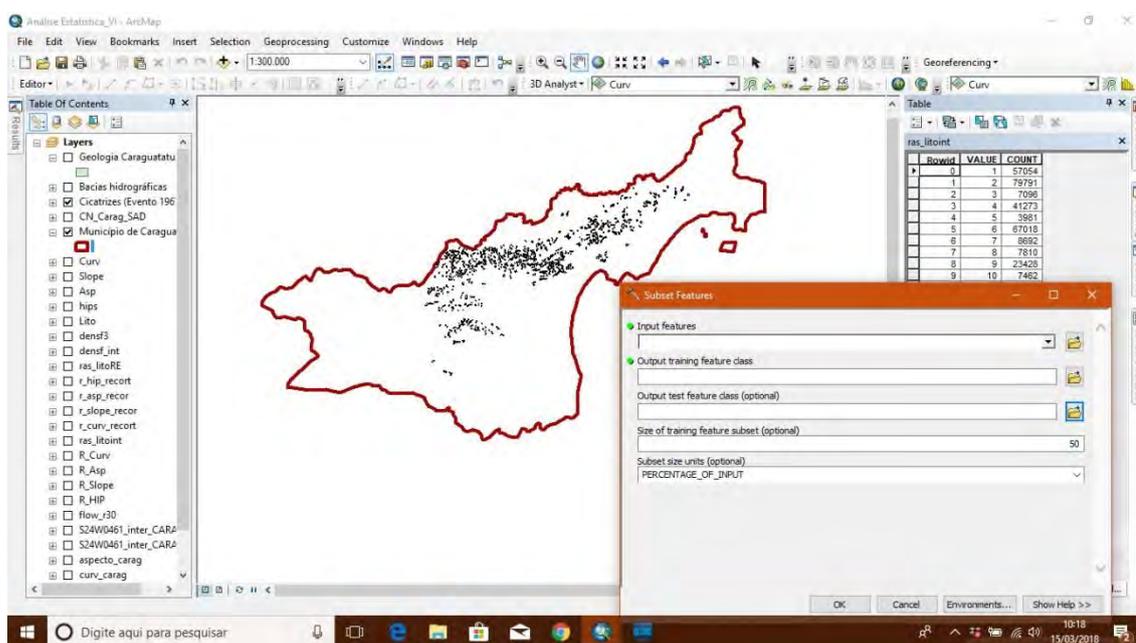
Anexo 3 - Uso da ferramenta “*Extract by Mask*” para definir os contornos da área de estudo.



Anexo 4 - Definição das classes de densidade de fraturas.

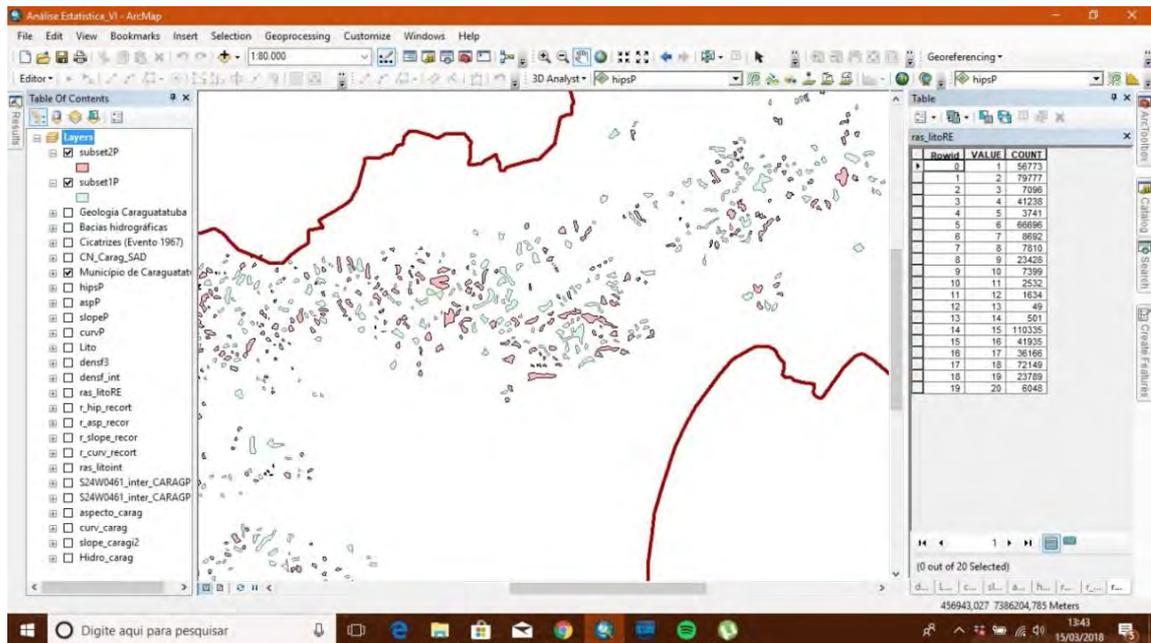
2. Partição aleatória do inventário de escorregamentos rasos.

Para realizar a divisão aleatória do inventário é necessário utilizar a ferramenta “*Subset Features*” (Anexo 5). Com ela aberta, é preciso selecionar o arquivo que deseja partilhar em “*Input features*”, a porcentagem da divisão pode ser definida em “*Size of training feature subset*”, no caso desta pesquisa optou-se por criar dois novos inventários com o mesmo tamanho, por isso foi colocado o valor “50” nesta aba.



Anexo 5 - Uso da ferramenta “*Subset Features*” para a realizar a divisão aleatória do inventário.

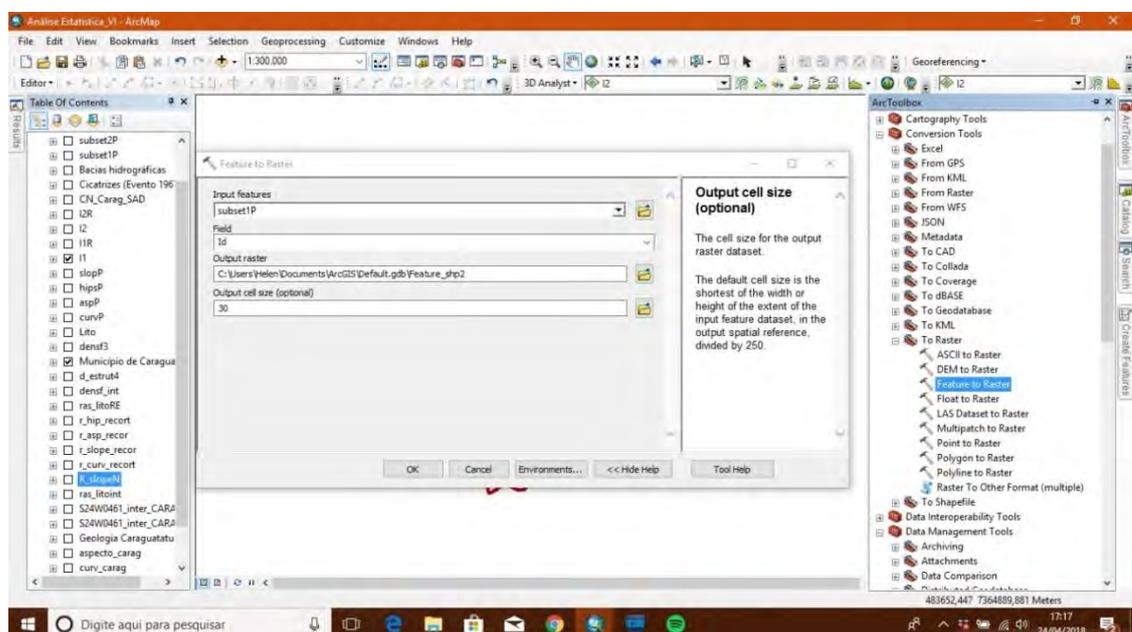
Realizados estes procedimentos, o software dará origem a dois inventários de cicatrizes de igual tamanho divididos de maneira aleatória (**Anexo 6**).



Anexo 6 - Criação de dois inventários de escorregamentos.

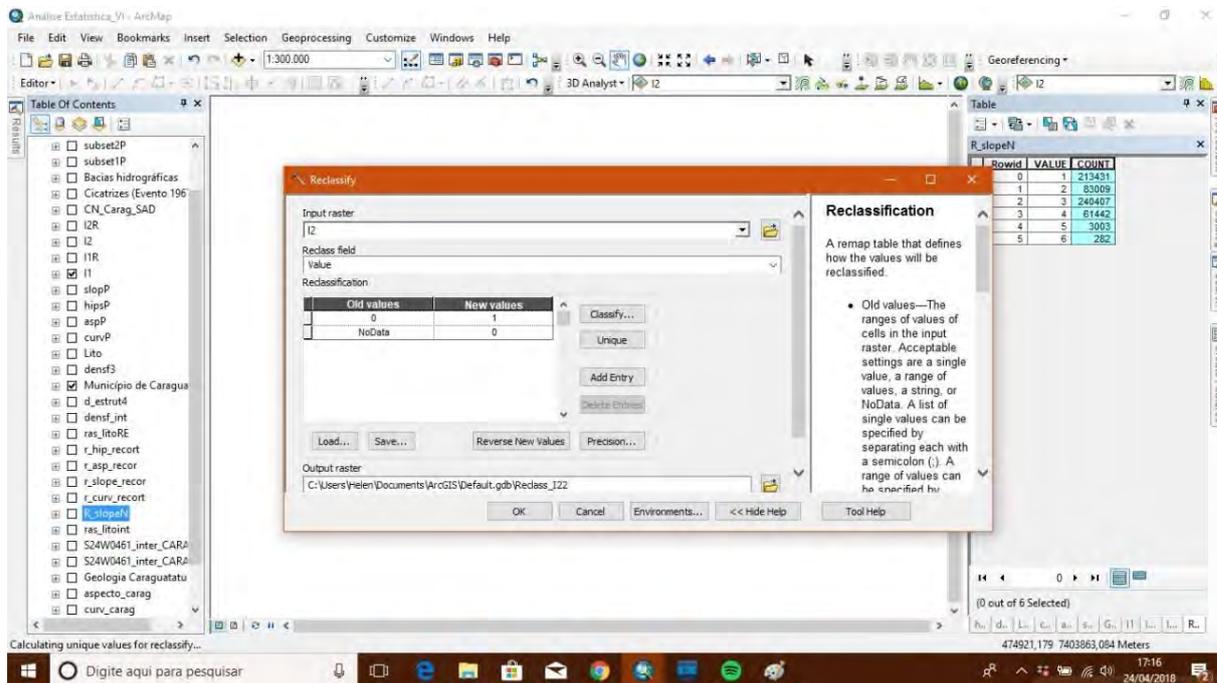
3. Transformação do inventário de escorregamentos em arquivo raster.

Para realizar as análises entre os condicionantes aos escorregamentos e o inventário de cicatrizes, é necessário que ambos estejam no mesmo formato, no caso raster. Se o inventário estiver no formato “*SHP*” será necessário utilizar a ferramenta “*Feature to Raster*” (**Anexo 7**).



Anexo 7 - Uso da ferramenta “*Feature to Raster*” para a transformação dos arquivos.

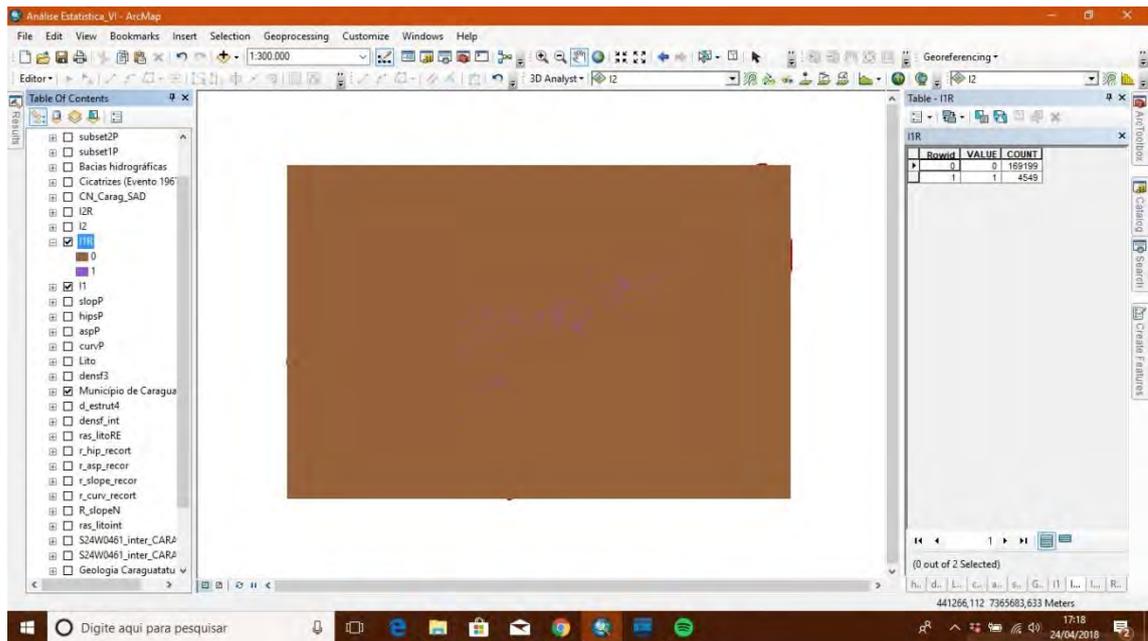
No campo “*Input features*” é preciso colocar o arquivo SHP que se deseja transformar para raster, se necessário coloco o tamanho do pixel no campo “*Output cell size*”. Gerado o raster, será preciso reclassificá-lo para que seja possível identificar as células com escorregamentos e as células sem escorregamentos (**Anexo 8**).



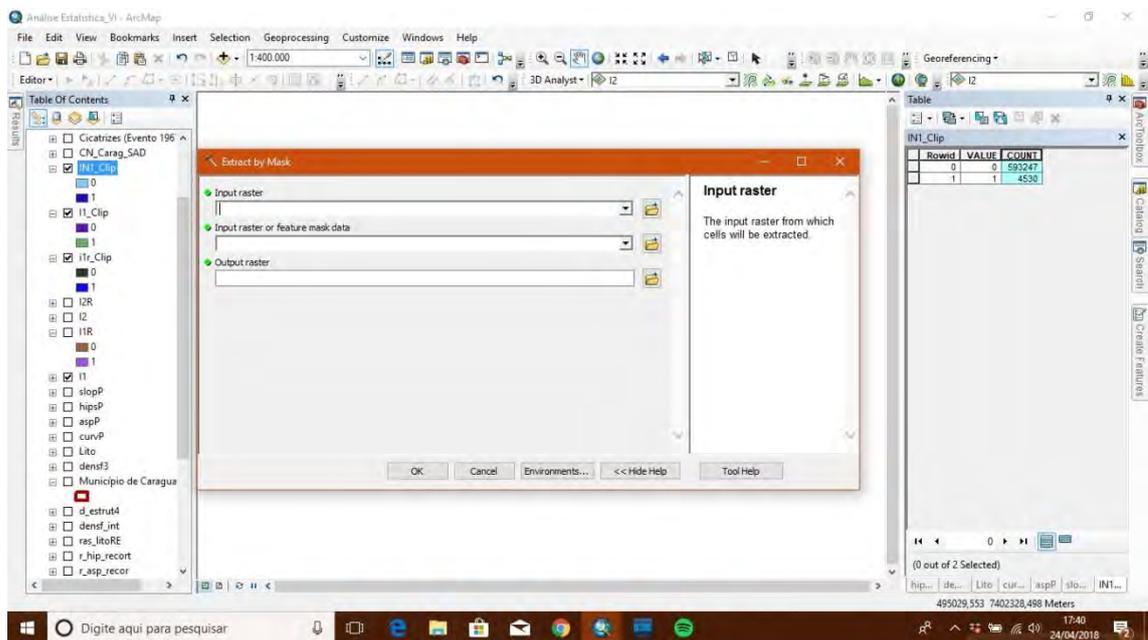
Anexo 8 - Uso da ferramenta “*Feature to Raster*” para a transformação dos arquivos.

No campo “*Input raster*” colocar o inventário e na coluna “*New values*” da tabela colocar 1 no campo 0 e 0 no campo “*NoData*”. Desta forma, os valores com escorregamentos serão identificados com “1” e os sem escorregamento serão identificados com “0” (**Anexo 9**).

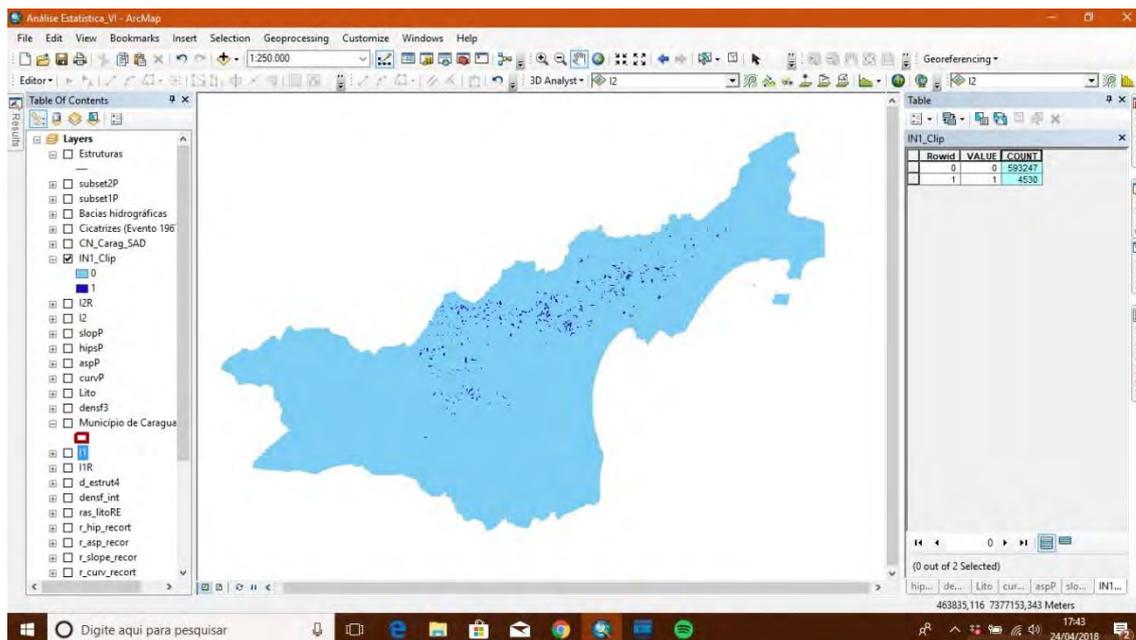
O arquivo reclassificado não estará no formato da área de estudo, desta forma é necessário utilizar a ferramenta “*Extract by Mask*”, no campo “*Input raster*” colocar o arquivo do inventário e em “*Input raster or feature mask data*” o formato que deseja cortar o inventário (**Anexo 10**). Feito isso, será gerado um novo arquivo no formato da área de estudo (**Anexo 11**).



Anexo 9 - Divisão dos pixels com e sem escorregamentos.



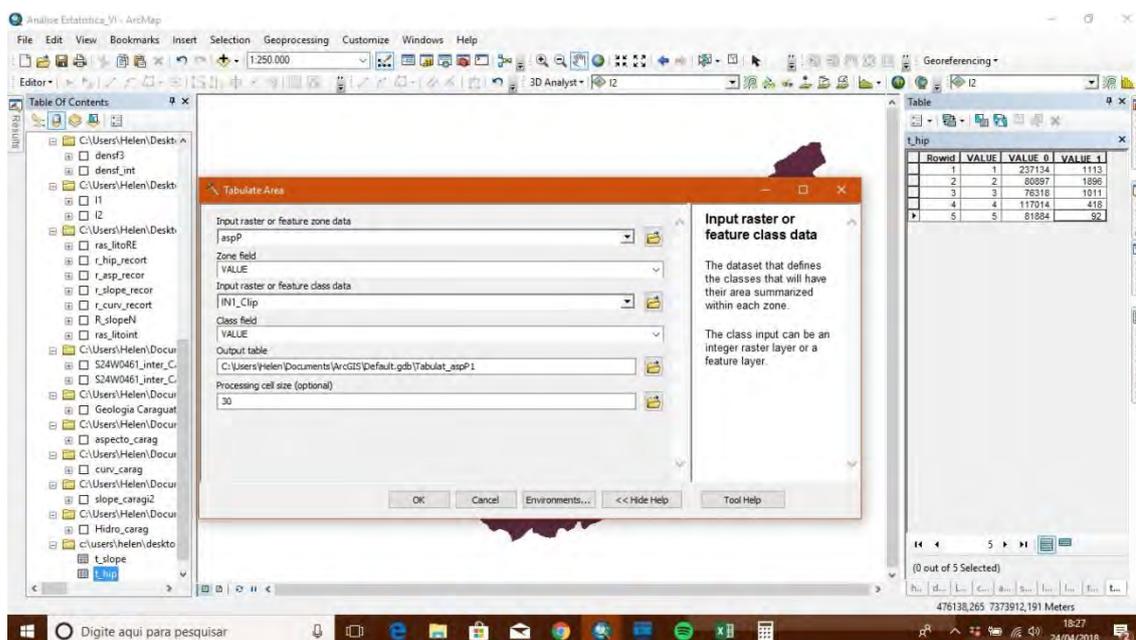
Anexo 10 - Uso da ferramenta “Extract by Mask” para definir os contornos da área de estudo.



Anexo 11 - Inventário de escoamentos no formato raster.

4. Definição da quantidade de pixels de cicatrizes em cada classe de cada condicionante.

Para definir a quantidade de pixels de escoamentos em cada parâmetro condicionante é necessário utilizar a ferramenta “*Tabulate Area*” (Anexo 12).



Anexo 12 - Uso da ferramenta “*Tabulate Area*” para definir a quantidade de pixels em cada parâmetro.

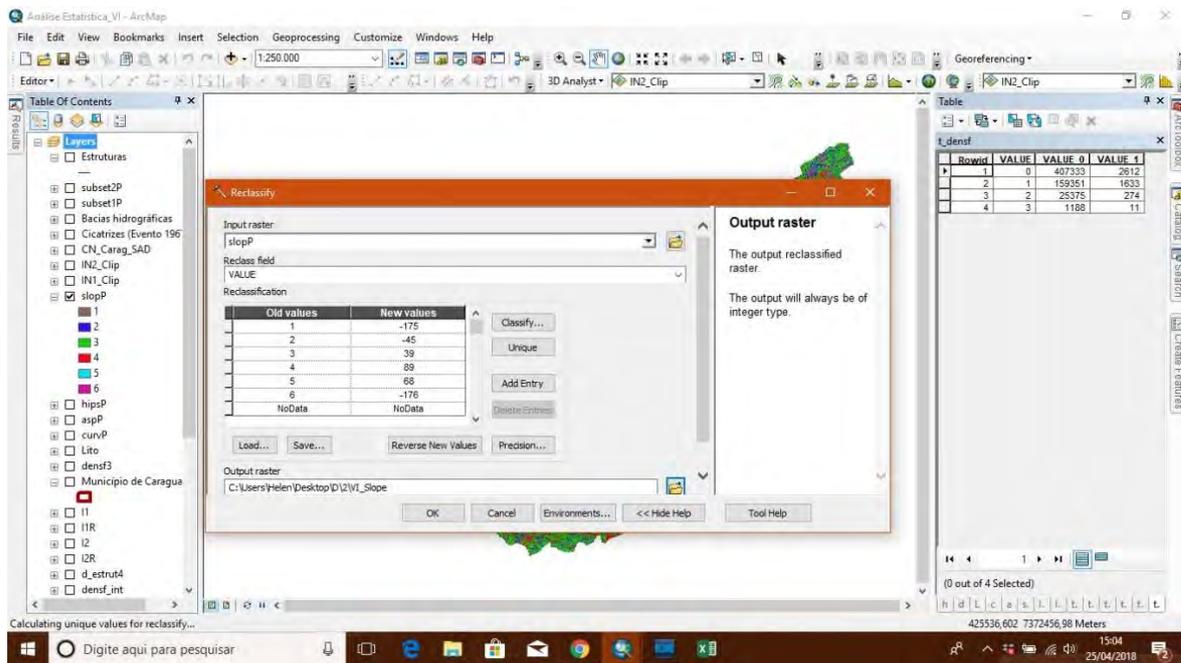
Esta ferramenta fará uma relação entre seus arquivos rasters e gerará uma tabela. Para isso, no campo “*Input raster or feature zone data*” coloque o arquivo do condicionante e em “*Input raster or features class data*” o arquivo das cicatrizes, já nos campos “*Zone field*” e “*Class field*” coloca-se o campo da tabela de origem a ser utilizado, se necessário altere o tamanho do pixel em “*Processing cell size*”. Feito isso o software dará origem a uma tabela com a relação entre os pixels. Segue exemplos no **Anexo 13**. É necessário repetir esse procedimento para todos os parâmetros que se irá utilizar.

t_hip				t_slope			
Rowid	VALUE	VALUE 0	VALUE 1	Rowid	VALUE	VALUE 0	VALUE 1
1	1	237134	1113	1	1	211091	278
2	2	80897	1896	2	2	81846	397
3	3	76318	1011	3	3	236842	2681
4	4	117014	418	4	4	60234	1129
5	5	81884	92	5	5	2952	45
				6	6	282	0

Anexo 13 - Relação entre cicatrizes e os parâmetros condicionantes. **A**: Relação dos pixels para o parâmetro Elevação; **B**: Relação dos pixels para o parâmetro Ângulo de encosta.

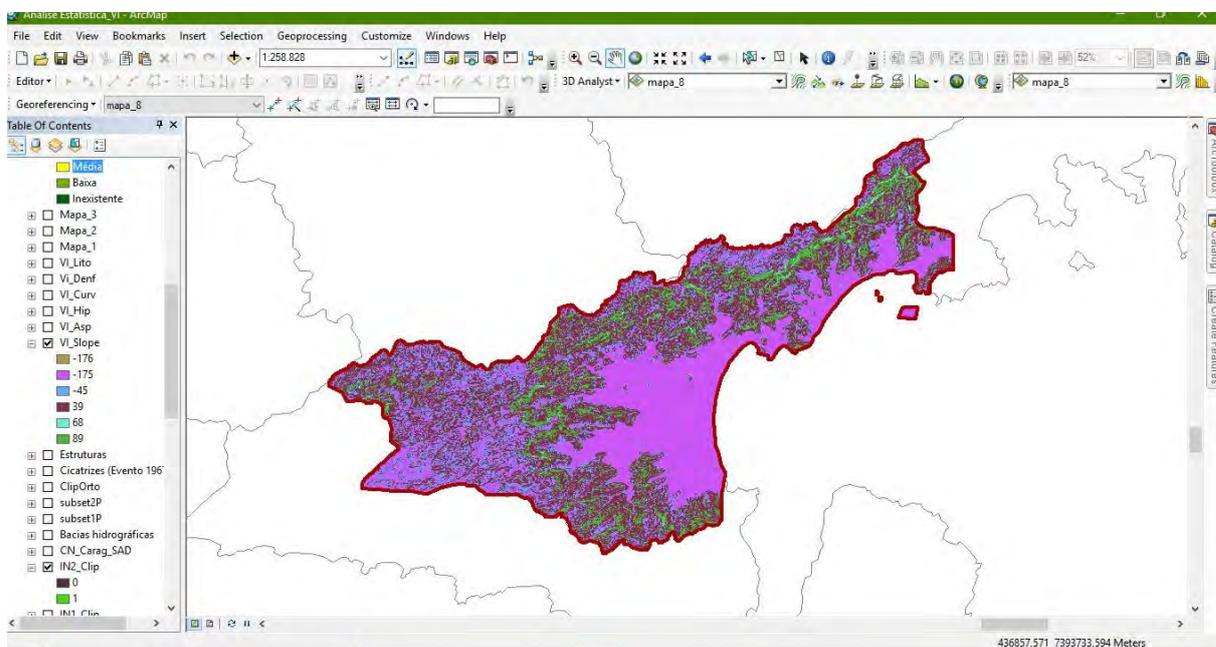
5. Reclassificação dos rasters dos parâmetros com o Valor Informativo.

Com o Valor Informativo calculado para cada classe de cada parâmetro morfológico e geológico, será necessária a classificação das classes de cada um dos parâmetros utilizados na análise. Para isso utiliza-se a ferramenta “*Reclassify*”, no campo “*Input Raster*” é necessário colocar o raster do parâmetro que se deseja reclassificar e no campo “*Reclass field*” selecionar VALUE (**Anexo 14**).



Anexo 14 - Uso da ferramenta “*Reclassify*” para reclassificar as classes com o VI em cada parâmetro.

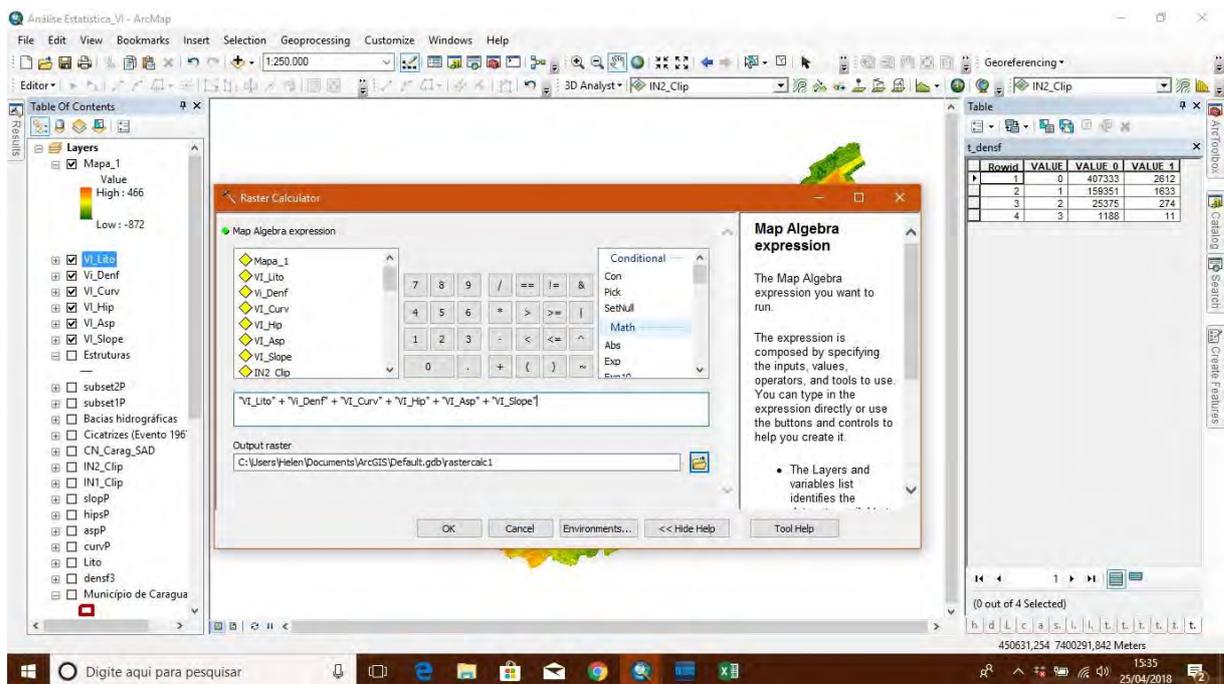
Feito isso, o próximo passo é colocar o Valor Informativo de cada classe no campo “New value” da tabela branca e o software dará origem a um novo mapa (**Anexo 15**). É necessário repetir esse procedimento para todos os parâmetros que se irá utilizar.



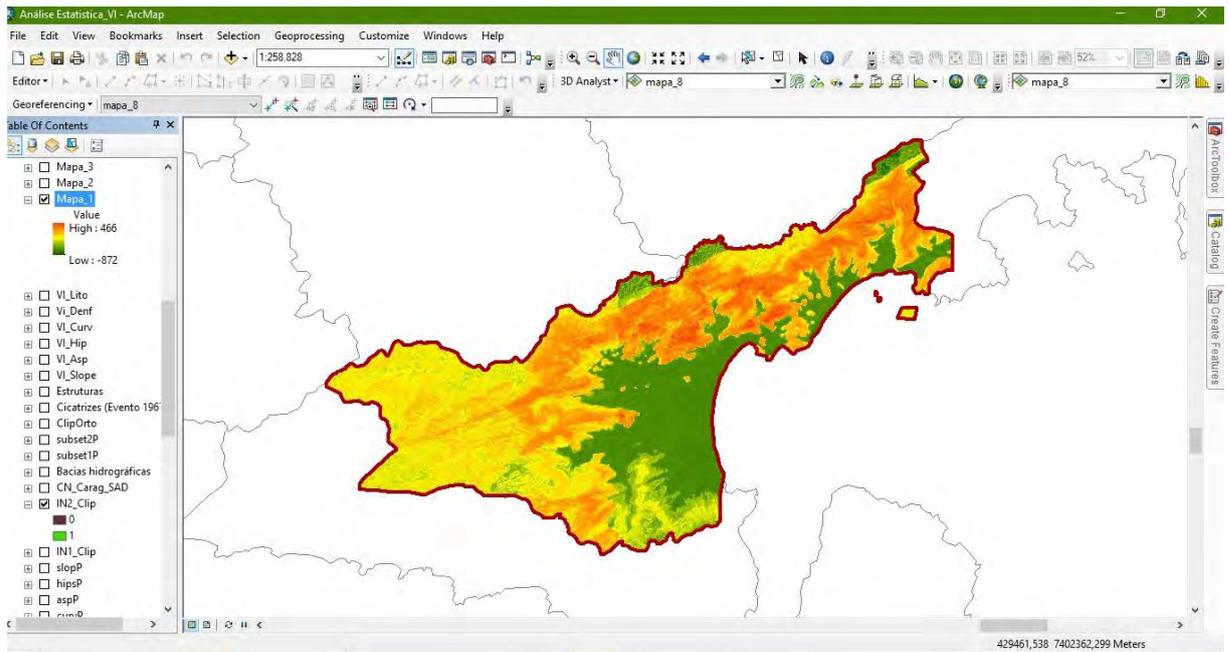
Anexo 15 - Mapa reclassificado com o Valor Informativo do parâmetro Ângulo de encosta.

6. Definição da suscetibilidade.

Para a criação da carta de suscetibilidade é necessário utilizar a ferramenta “*Tabulate area*”. Essa ferramenta irá somar todos os mapas criados pelo procedimento explicado no tópico anterior. Desta forma, é preciso somar todos os arquivos rasters dos parâmetros pela calculadora da ferramenta (Anexo 16). Feito isso o software dará origem a um mapa de suscetibilidade sem definição das classes de suscetibilidade (Ex.: Alta, baixa, etc.), sendo necessário o autor criar estas classes conforme preferir (Anexo 17).



Anexo 16 - Mapa reclassificado com o Valor Informativo do parâmetro Ângulo de encosta.



Anexo 17 - Mapa de suscetibilidade final.