

## Avaliação da Suscetibilidade a Escorregamentos Rasos com Base na Aplicação de Estatística Bivariada: Resultados Preliminares

### *Evaluation of Susceptibility to Shallow Landslides Based on the Application of Bivared Statistics: Preliminary Results*

Helen Cristina Dias<sup>1</sup>, Carlos V. M. Bateira<sup>2</sup>, Edilson Pissato<sup>3</sup>, Tiago D. Martins<sup>4</sup> e Bianca Carvalho Vieira<sup>5</sup>.

<sup>1</sup> Universidade de São Paulo, *helen.dias@usp.br*

<sup>2</sup> Riskam, CEG, Ulisboa/FLUP/UP, *carlosbateira@gmail.com*

<sup>3</sup> Universidade de São Paulo, *pissato@usp.br*

<sup>4</sup> Universidade Federal de São Paulo, *td.martins@unifesp.br*

<sup>5</sup> Universidade de São Paulo, *biancacy@usp.br*

Recebido (Received): 20/03/2018

Aceito (Accepted): 24/07/2018

**Resumo:** O objetivo deste artigo foi definir a suscetibilidade a escorregamentos rasos do município de Caraguatatuba a partir da análise estatística de parâmetros morfológicos. Para a confecção dos mapas morfológicos de curvatura, aspecto, elevação e ângulo de encosta foi utilizado o SRTM de 30 m. A partir disso, foi realizada uma análise estatística bivariada, baseada no valor informativo. Tal índice é responsável por relacionar classes morfológicas e cicatrizes de escorregamentos de eventos passados. Os resultados mostraram que determinadas classes morfológicas tendem a ser mais suscetíveis do que outras a ocorrência do processo, de maneira que se obteve uma taxa de acerto de 78% do mapa final de suscetibilidade. Desta maneira, foi possível verificar preliminarmente as classes preferenciais para ocorrência de escorregamentos na área, tornando importante a continuação dos estudos sobre o tema por meio da incorporação de outros parâmetros condicionantes de escorregamentos, como por exemplo a geologia.

**Palavras-Chave:** *Movimentos de Massa; Morfologia; Caraguatatuba; Serra do Mar.*

**Abstract:** *The aim of this paper was to define the shallow landslides susceptibility on Caraguatatuba county, based on statistical analysis of morphological parameters. The production of morphological maps of curvature, aspect, hypsometry and slope were based on SRTM 30 m. From this, it was made a bivariate statistical analysis based on informative value. Such index it is responsible to relate morphological classes and shallow landslides from past events. The results showed that certain morphological classes tend to be more susceptible to occurrence of the process. So, that a success rate of 78% of the final susceptibility map was obtained. Thus, it was possible verify preliminary preferred classes to landslide occurrence in the area, such result demonstrate the importance of future studies about landslides and incorporation of other conditioning factors, such for example geology.*

**Keywords:** *Mass movement; Morphology; Caraguatatuba; Serra do Mar*

## 1. Introdução

A Serra do Mar apresenta diferentes condições geomorfológicas que atuam na ocorrência de inúmeros processos, dentre eles tem-se os movimentos de massa, sendo os escorregamentos e as corridas de detritos os responsáveis por causar os maiores danos a sociedade, uma vez que podem resultar em eventos de alta magnitude com um grande poder de alcance. Os escorregamentos rasos, definidos por Augusto Filho (1992) como movimentos de rocha e solos poucos espessos, com um plano de ruptura bem definido, foram a tipologia selecionada para análise neste trabalho por sua grande recorrência.

Os fatores que afetam a ocorrência de escorregamentos rasos podem ser classificados em deflagradores, como precipitação, terremotos e ação antrópica; e os condicionantes, que incluem geologia, ângulo e formato da encosta, entre outras características inerentes a morfologia local; tais fatores podem ser classificados em três grupos: complexo geológico; complexo morfológico e o complexo climático-hidrológico (GUIDICINI e NIEBLE, 1983; WU e QIAO, 2009).

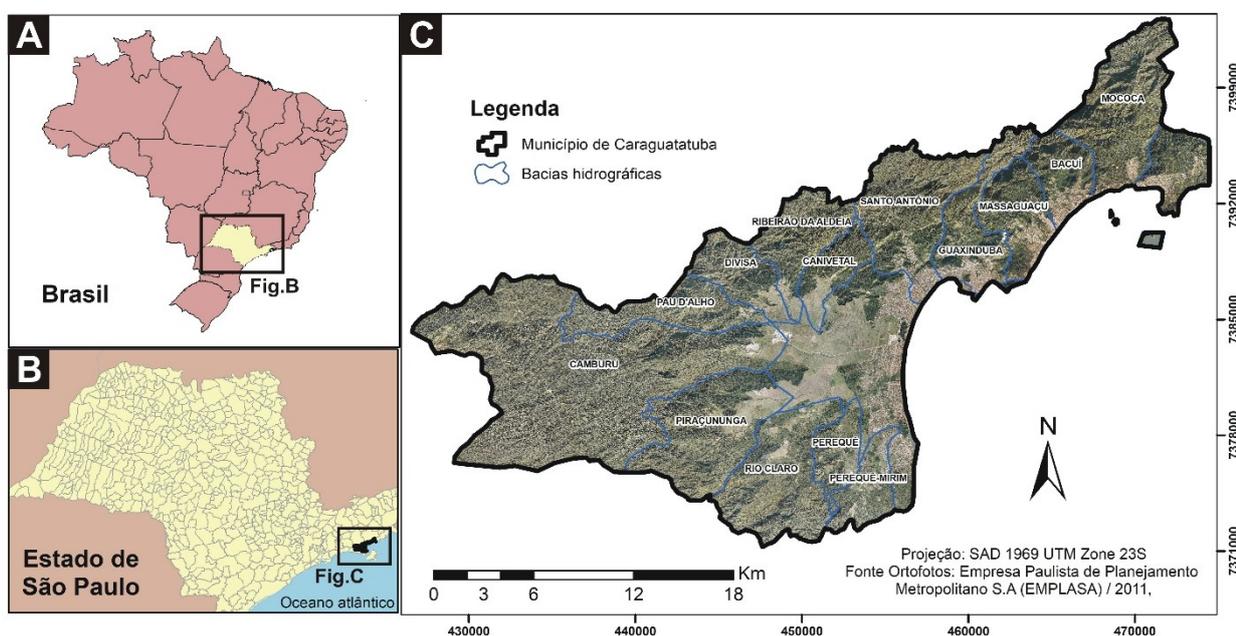
A utilização da tecnologia de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) possibilita no caso dos desastres naturais uma avaliação multidisciplinar, uma vez que os eventos são controlados por diversos fatores, internos e externos, que dependem da escala, características da área de estudo, o tipo de processo e os mecanismos de ruptura. Ela permite uma boa manipulação dos dados para a construção de modelos, cenários, simulações, além de validações dos resultados obtidos. Este tipo de análise, no entanto, exige uma boa qualidade dos dados, o que muitas vezes é difícil e caro para muitos pesquisadores (CARRARA, *et al.*; 1999; VAN WESTEN *et al.*, 2008).

Os métodos para a avaliação da suscetibilidade variam de análises qualitativas (modelos heurísticos), até análises quantitativas (modelos estocásticos). A modelagem estatística busca comparar a distribuição espacial dos escorregamentos com fatores condicionantes morfo-estruturais selecionados, 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 (ALEOTTI e CHOWDHURY, 1999).

O estudo e entendimento desses eventos são de grande interesse para a sociedade, principalmente a análise de seus condicionantes morfológicos e estruturais, de maneira a auxiliar o poder público quanto ao planejamento urbano e determinação de áreas suscetíveis a ocorrência desses processos no futuro. Assim, o objetivo geral desta pesquisa é a identificação da suscetibilidade a escorregamentos rasos a partir da avaliação estatística bivariada dos parâmetros morfológicos (Curvatura, Elevação, Ângulo de encostas e Aspecto) no município de Caraguatatuba/SP.

## 2. Área de Estudo

O município de Caraguatatuba está localizado no litoral norte do estado de São Paulo (**Figura 1**), sob influência da Serra do Mar, caracterizada por ser um conjunto de escarpas festonadas, que possui topo nivelado em altitudes entre 800 e 1200m. A litologia desta área é caracterizada por rochas ígneas com alto grau de metamorfismo regional, tais como granito-gnaiss, gnaisses graníticos, cuja principal orientação é NE-SW. (ALMEIDA, 1964; CRUZ, 1974; ALMEIDA e CARNEIRO, 1998).



**Figura 1:** Área de estudo ênfase as bacias hidrográficas que compõem o município.

A localização geográfica de Caraguatatuba favorece a presença de escorregamentos com precipitações anuais altas, entre 1.600 – 2.000 mm, (CPRM, 2011). Clima quente e úmido, altos índices pluviométricos, fortes taxas de intemperismo umidade elevada, e alteração das rochas criam condições de desenvolvimento de formações superficiais, tornando a área propensa para esses processos (WILSON, 1973; CRUZ, 1974).

Em 1967 choveu diariamente na cidade nos três primeiros meses do ano e, entre os dias 17 e 18 de março, houve níveis pluviométricos muito acima da média em um curto período de tempo, 260,0 mm no dia 17 e 324,8 mm no dia 18, responsáveis pela deflagração generalizada de escorregamentos (**Figura 2**) que culminaram em corridas de detritos nos canais principais das bacias hidrográficas, causando severos danos em toda a cidade.



**Figura 2:** Escorregamentos generalizados nos morros de Caraguatatuba. **Fonte:** Arquivo Público de Caraguatatuba.

Os acontecimentos do dia 18 de março de 1967 podem ser divididos em quatro fases: 1ª. Enchente Inicial, 2ª. Escorregamentos, 3ª. “Debris Flows” ou Corridas de Detritos, e 4ª. Enchente por bloqueio (GRAMANI, 2001). Ao final do evento se teve a movimentação aproximada de dois milhões de toneladas de sedimentos, além de severos danos sociais e econômicos a população local (**Figura 3**).

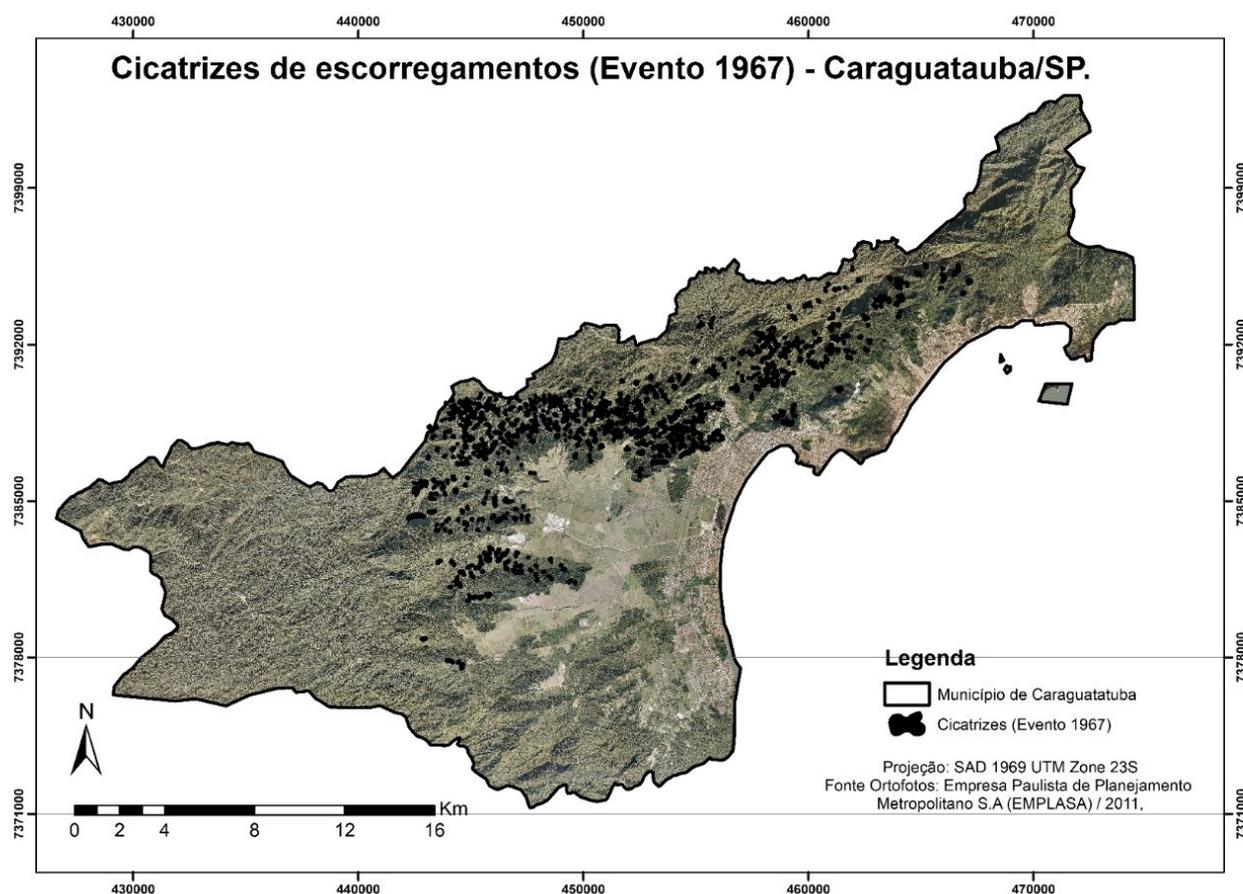


**Figura 3:** Danos causados as infraestruturas no evento de 1967 – **A:** Estrada local afetada por escorregamentos e **B:** Ponte com severos danos e coberta por material provindo dos escorregamentos e corridas de detritos. **Fonte:** Arquivo Público de Caraguatatuba.

### 3. Materiais e métodos

Para alcançar o objetivo proposto foram elaborados mapas morfológicos de Curvatura, Ângulo de encostas, Elevação e Aspecto, utilizando o SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) de 30 m fornecido pela NASA.

O inventário de cicatrizes utilizado para definição e validação da suscetibilidade do município (**Figura 4**), tem por base o mapeamento dos escorregamentos do trabalho de Fúlvaro *et al.* (1976), que identificou 640 cicatrizes do processo, estando localizadas predominantemente nas áreas serranas do município. A densidade e a distribuição espacial dos escorregamentos foram comparadas e avaliadas em conjunto com os parâmetros morfológicos através de uma avaliação estatística inicial, de modo a avaliar a adequação da base de dados com a metodologia proposta.



**Figura 4:** Cicatrizes de escorregamentos de 1967 baseadas em Fúlvaro (1976).

A análise estatística bivariada aplicada utiliza o Valor Informativo (YIN e YAN, 1988), metodologia que se baseia na densidade de escorregamentos em cada uma das classes morfológicas de cada parâmetro, onde se gera um valor informativo ( $I_i$ ) para cada classe (Equação 1) e se define a suscetibilidade ( $I_j$ ) (Equação 2).

$$I_i = \log \frac{S_i/N_i}{S/N} \quad (1)$$

Onde:

$S_i$ : 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.

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

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  $j$ .

A validação da carta de suscetibilidade foi realizada pela Área Abaixo da Curva (AAC), metodologia que apresenta uma curva de sucesso, gerada a partir da Equação 3. Ela é baseada na comparação das classes de suscetibilidade e a ocorrência de escorregamentos, onde quanto maior a área abaixo da curva maior taxa de sucesso o modelo apresenta (REMONDO *et al.*, 2003).

$$\sum_{i=1}^n \left[ (L_{S_i} - L_i) * \frac{a_i + b_i}{2} \right] \quad (3)$$

Onde:

$(L_{S_i} - L_i)$ : Amplitude da classe.

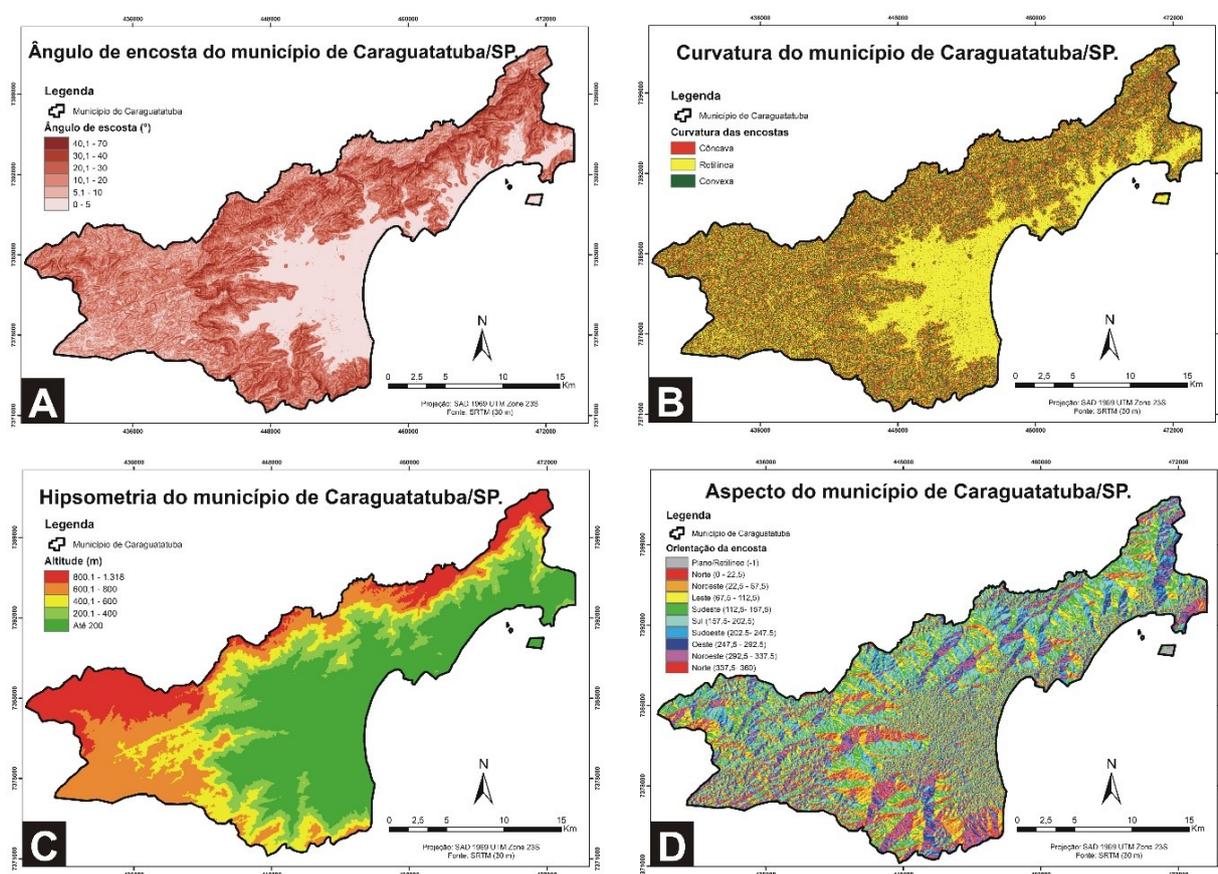
$a_i$ : Valor da ordenada correspondente  $L_i$ .

$b_i$ : Valor da ordenada correspondente a  $L_{S_i}$ .

#### 4. Resultados e Discussões

A partir da aplicação estatística nos mapas morfológicos (**Figura 5**) foi possível avaliar a compatibilidade da base de dados com a metodologia e quais são inicialmente as classes mais suscetíveis aos escorregamentos rasos, de maneira a traçar características morfológicas para a ocorrência dos mesmos.

Optou-se por uma análise inicial conjunta dos mapas morfológicos, a fim de caracterizar a área. Com base em estudos já realizados definiram-se as classes mais comuns dos fatores morfológicos quando se analisa esse tipo de processo.



**Figura 5:** Mapas morfológicos utilizados: A) Ângulo de encosta; B) Curvatura; C) Elevação e D) Aspecto.

O município de Caraguatuba caracteriza-se por elevações entre 0 e 1.318 m, com 60% de sua área em níveis acima dos 200 m, alcançando em alguns setores o planalto, totalizando 362.388 de um total de 601.574 pixels

(**Tabela 1**). As declividades são diferenciadas ao longo de sua extensão, variando de áreas planas na parte central, até 70° em locais escarpados. Grande parte do município se encontra em declividades acima de 10° (~65%), sendo desta porcentagem 11% acima dos 30°.

O ângulo da encosta influencia diretamente a ocorrência de escorregamentos rasos, uma vez que o processo tende a ocorrer em ângulos a partir dos 30°, desde que haja presença de material para ser movimentado, tal como solo, rocha ou sedimentos, (LAN *et al.*, 2004; NERY e VIIRA, 2014; VIEIRA e RAMOS, 2015; DIAS *et al.*, 2017; MARTINS *et al.*, 2017).

A área caracteriza-se por possuir encostas em todas as orientações, com predomínio da direção sudeste (SE), aproximadamente 19% do município. Com relação à curvatura, as tipologias côncavas e convexas são as mais predominantes, ocupando respectivamente 28% e 27% (55% da área), com um total de 330.408 pixels, concentradas no perímetro mais escarpado do município, enquanto que encostas retilíneas se localizam predominantemente na planície costeira com 45% da área total do município.

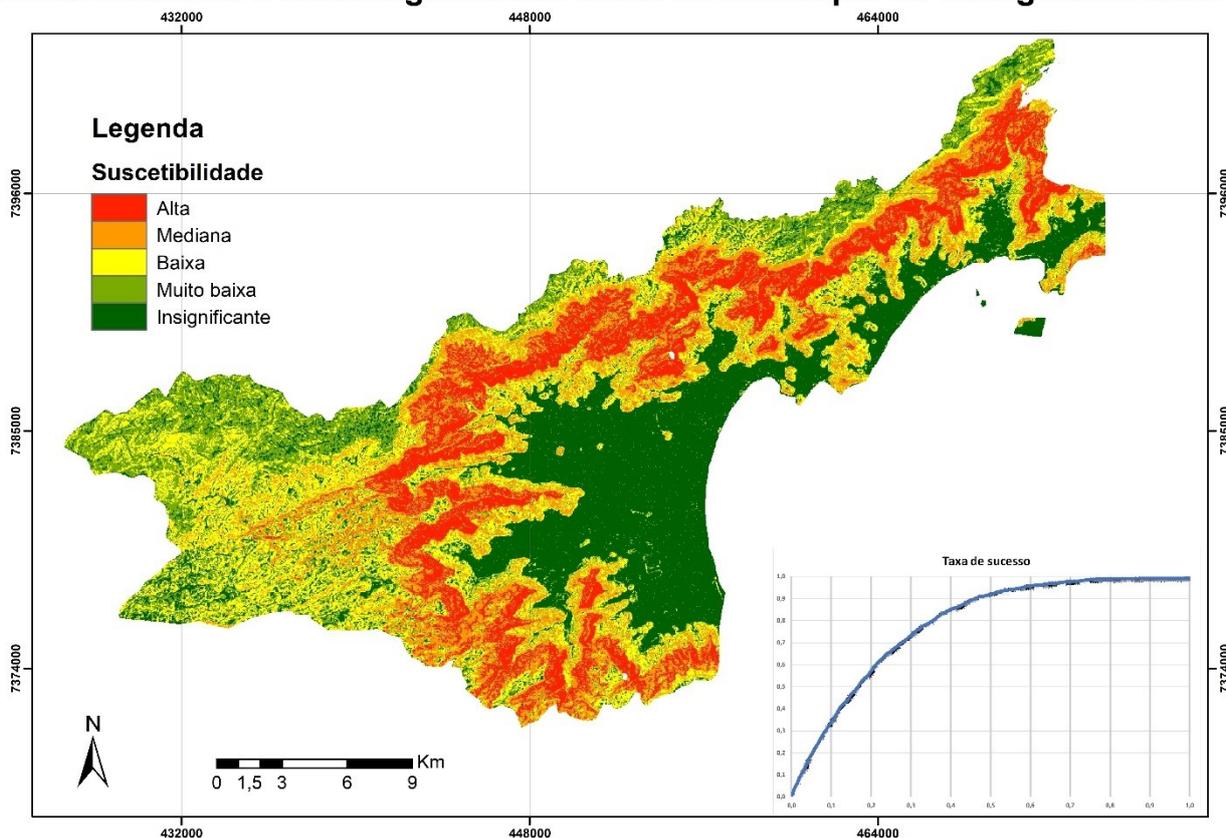
O aspecto da encosta e sua curvatura são feições que alteram o recebimento de luminosidade, umidade e circulações de fluxos, respectivamente. A curvatura influencia no deslocamento da água pela encosta, desencadeando concentração de fluxos em formatos côncavos, fator que pode facilitar a deflagração de escorregamentos rasos. Os formatos convexos favorecem a dispersão e não são menos propícios a escorregamentos (MONTGOMERY e DIETRICH, 1994; FERNANDES *et al.*, 2001; DIAS *et al.*, 2017).

**Tabela 1:** Parâmetros morfológicos e número de pixels de suas respectivas classes.

<i>Parâmetro</i>	<i>Classes</i>	<i>Pixels totais</i>	<i>Valor Informativo</i>
Elevação (m)	Até 200	239.186	-0,45
	200,1 - 400	82.904	<b>1,09</b>
	400,1 - 600	77.419	0,54
	600,1 - 800	117.971	-0,73
	800, 1 - 1.318	84.094	-1,8
Ângulo de encosta (°)	Até 5	146.694	-2,81
	5,1 - 10	66.737	-0,70
	10,1 - 20	174.808	-0,05
	20,1 - 30	148.608	0,63
	30,1 - 40	54.878	0,85
	40,1 - 70	9.849	0,75
Aspecto	Plano/Retilíneo	3.611	-0,46
	N	69.206	-0,45
	NE	61.087	-0,15
	L	76.029	0,06
	SE	111.434	0,05
	S	96.753	0,04
	SO	60.887	0,12
	O	57.048	-0,33
	NO	65.519	-0,30
Curvatura	Côncava	167.980	0,27
	Plano/Retilíneo	271.166	-0,48
	Convexa	162.428	0,28

Os valores informativos de cada classe morfológica variam entre negativos e positivos. A classe que apresentou maior índice foi identificada no parâmetro “Elevação” para o intervalo de 201 a 400 m de altitude. A carta de suscetibilidade gerada (**Figura 6**) identifica os locais escarpados como mais suscetíveis aos escorregamentos rasos. Tal resultado era esperado, uma vez que baseado em estudos pretéritos de outros autores, tais locais concentram as condições que influenciam de maneira mais significativa a ocorrência desses processos, como por exemplo, a presença de altas declividades. A validação do mapeamento foi realizada pelo AAC e apresentou uma taxa de sucesso de 78%, valor que confirma a adequabilidade da metodologia para a processo em questão.

### Suscetibilidade a escorregamentos rasos no município de Caraguatatuba/SP.



**Figura 6:** Suscetibilidade do município de Caraguatatuba baseado em parâmetros morfológicos.

## 5. Considerações finais

A aplicação da estatística bivariada nos parâmetros morfológicos possibilitou uma análise inicial dos condicionantes dos escorregamentos rasos na área de estudo, da mesma forma que permitiu comprovar a viabilidade deste tipo de metodologia quantitativa para tal processo.

Foi possível localizar preliminarmente locais mais suscetíveis aos escorregamentos rasos, de maneira que emerge a necessidade da incorporação de novos parâmetros para análise, como por exemplo, litologia e estruturas, fatores que podem explicar o motivo de encontrar a classe com o intervalo de 201 a 400 m do parâmetro “Elevação” como mais suscetível, embora na literatura tal condicionante muitas vezes não é descrito como o mais relevante para este tipo de processo. Desta forma, novas análises com novos parâmetros devem ser realizadas para um melhor entendimento do processo e seus condicionantes.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro para a realização da pesquisa, ao Programa de Pós-Graduação em Geografia Física (PPGF) da Universidade de São Paulo e aos membros do Grupo de Pesquisa de Processos Morfodinâmicos (GPMorfo). Externam, também, seus agradecimentos aos revisores da Revista do Departamento de Geografia (RDG).

**REFERÊNCIAS**

- ALEOTTI, P. e CHOWDHURY, R.. Landslide Hazard Assessment: Summary Review and New Perspectives. In: **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, v. 58, p.21-44, 1999.
- ALMEIDA, F.F.M. Os fundamentos geológicos do relevo paulista. In: **Geologia do Estado de São Paulo, Bol. Inst. Geogr. Geol.**, São Paulo, nº41, 169-263, 1964.
- ALMEIDA, F.F.M e CARNEIRO, C.D.R. Origem e evolução da Serra do Mar. In: **Revista Brasileira de Geociências**, v.28 - São Paulo, p.135-150, 1998.
- CARRARA, A.; GUZZETTI, F.; CARDINALI, M. e REICHENBACH, P. Use of GIS technology in the prediction and monitoring of landslide hazard. In: **Natural Hazards**, v.20, p.117-135, 1999.
- CRUZ, O. 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 nº 11, 181p, 1974.
- CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Atlas Pluviométrico do Brasil, 2011. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/Hidrologia/Mapas-e-Publicacoes/Atlas-Pluviometrico-do-Brasil-1351.html>>.
- DIAS, H. C.; DIAS, V. C. e VIEIRA, B.C.. 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, 2017.
- FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY E D.R.; GREENBERG, H. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Área Suscetíveis. In: **Revista Brasileira de Geomorfologia**, V.2; Nº1; p.51-71, 2001.
- FÚLFARO, V.J., PONÇANO, W.L., BISTRICHI, C.H., STEIN, D.P. 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, 1976.
- GRAMANI, M. F. 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, 2001.
- GUIDICINI, G. e NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Editora Blucher, 2ª edição, 206p, 1983.
- LAN, H. X.; ZHOU, C. H.; WANG, L. J.; ZHANG, H. Y. and LI, R. H. Landslide hazard spatial analysis and prediction using GIS in the Xiaojiang watershed, Yunnan, China. **Engineering Geology** 76, p. 109-128, 2004.
- MARTINS, T.D.; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B. C.; CORREA, A. C. B.; BATEIRA, C.V.M. Análise dos Parâmetros Morfológicos e os Escorregamentos Rasos na Serra do Mar, Paraná. **Caminhos da Geografia (UFU. Online)**, v. 18, p. 223-239, 2017.
- MONTGOMERY, D.R e DIETRICH, W.E. A physically-based model for topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research** 30 (4): p. 1153-1171, 1994.
- NERY, T. D. e VIERA, B. C. Susceptibility to shallow landslides in a drainage basin in the Serra do Mar, São Paulo, Brazil, predicted using the SINMAP mathematical model. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment** (Print), v. 74, p. 369-378, 2014.
- REMONDO, J.; GONZÁLEZ, A.; TERÁN, J.R.D.; CENDRERO, A.; FABBRI, A. e CHUNG, C.F. Validation of Landslide Susceptibility Maps: Examples and Applications from a Case Study in Northern Spain. In: **Natural Hazards**, 30, p.437-449, 2003.
- VIEIRA, B.C. e RAMOS, H. A. A. Aplicação do Modelo Shalstab para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Revista do Departamento de Geografia – USP**, v.29, p.161 -164, 2015.
- VAN WESTEN, C.J.; CATELLANOS, E. e KURIAKOSE, S.L. Spatial data for landslide susceptibility, hazard and vulnerability assessment: An overview. In: **Engineering Geology**, v. 120, p.112-131, 2008.

WILSON, L. Relationships Between Geomorphic Processes and Modern Climates as a Method in Paleoclimatology. In: DERBYSHIRE, E. (Ed.) **Climatic Geomorphology**. Macmillan: London, The Geographical Readings Series, p. 269-284, 1973.

YIN, K. L. e YAN, T. Z. 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, 1988.