

O USO DE PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS NA AVALIAÇÃO DO POTENCIAL A GERAÇÃO DE CORRIDAS DE DETRITOS NA BACIA DO RIO SANTO ÂNTONIO

The Use of Morphometric Parameters for Evaluation of the Potential to Trigger of Debris Flows Generation in Santo Antônio River Basin

Tulius Dias Nery

Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais - CEMADEN

Sala de Situação – Coordenação Geral de Operação e Modelagem - CGOM

Estrada Doutor Altino Bondesan, 500, CEP: 12.247-016, Distrito de Eugênio de Melo, São José dos Campos, SP, Brasil
tulius.nery@cemaden.gov.br

Recebido em 5 de Maio, 2016/ Aceito em 22 de Agosto, 2016

Received on May 5, 2016/ Accepted on August 22, 2016

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o papel dos parâmetros morfométricos como indicadores do potencial a geração de corridas de detritos na bacia do rio Santo Antônio, em Caraguatatuba (SP). Aplicou-se duas análises, qualitativa e quantitativa, para avaliar o papel destas variáveis no desenvolvimento destes processos. Na análise qualitativa utilizou-se da área da bacia, da amplitude da bacia, do comprimento do canal principal, da densidade de drenagem, do índice de circularidade, do índice de sinuosidade, da declividade média do canal e do Potencial de Escorregamentos. Na análise quantitativa, aplicou-se um modelo empírico que considera a área e a amplitude da bacia e o comprimento do canal associado a intensidade de precipitação (mm/h) e a concentração de sólidos (%), envolvidos na corrida de detrito. Os resultados apontam que a área, a amplitude e a declividade média do canal apresentaram-se como os fatores mais significativos na ocorrência das corridas de detritos nas sub-bacias analisadas. Em relação ao modelo adotado, observou-se que com o aumento da intensidade de precipitação houve, também o aumento do volume de sedimentos destes processos. Os resultados aqui encontrados podem servir de base para o planejamento destas bacias, minimizando impacto de eventos futuros.

Palavras-Chaves: Serra do Mar, Corridas de Detritos, Parâmetros Morfométricos, Modelo Empírico.

ABSTRACT

This study purpose to evaluate the role of morphometric parameters as potential indicators of the generation of debris flow, in the Santo Antônio river basin, in Caraguatatuba (SP). Was applied two analyzes qualitative and quantitative to evaluate the role of these variables in developing these processes. In qualitative analysis we used the basin area, the basin relief, the stream length of the main channel, the drainage density, the circularity index, the sinuosity index, the channel gradient and landsliding potential. In the quantitative analysis, we applied an empirical model that considers the area, the basin relief and stream length associated with precipitation intensity (mm/h) and the solids concentration (%), involved in the debris flows. The results indicate that the area, the basin relief and the channel gradient presented themselves as the most significant factors in the occurrence of the debris flows in the analyzed sub-basins. In relation to the adopted model, it was observed that with increasing precipitation intensity was also increased volume of sediment of these processes. The results here can serve as a basis for planning these basins, minimizing impact of future events.

Keywords: Serra do Mar, Debris Flow, Morphometric Parameters, Empirical Model.

1. INTRODUÇÃO

Corridas de detritos (*debris flows*) são processos deflagrados em ambientes montanhosos e caracterizam-se por serem processos rápidos, com velocidades médias a altas, desenvolvendo-se ao longo da rede de drenagem, apresentando extenso raio de alcance e podendo gerar grande volume de sedimentos. A composição destes processos envolve solos, rochas e matéria orgânica (GUIDICINI & NIEBLE, 1976; COSTA, 1984; AUGUSTO FILHO, 1992).

Diferentes métodos vêm sendo empregados para compreender a dinâmica das corridas de detritos em diferentes regiões do mundo, sendo motivadas, por vezes, pela dificuldade no acesso, na aquisição de informações e instrumentação e/ou visando uma rápida avaliação das áreas onde ocorrem estes processos. Entre estes métodos pode-se destacar os modelos empíricos, amplamente difundido em diferentes partes do mundo, visando avaliar o comportamento das corridas de detritos, como observado, em Araya Moya (1994), Corominas (1996), D'agostino (1996), Ricknemann (1999), Helsen *et al.* (2002), Marchi & D'agostino (2004), Hungr *et al.* (2008), Wrachien & Mambretti (2011), entre outros. No Brasil, podemos destacar os modelos empíricos propostos por Massad *et al.* (1997) e Kobiyama *et al.* (2010).

O emprego destes modelos empíricos parte do pressuposto da utilização de parâmetros e índices morfométricos e morfológicos para avaliar a distância, a vazão e a magnitude (volume de sedimentos) das corridas de detritos. A área da bacia, comprimento e declividade média do canal, amplitude, índice de circularidade são exemplos destas variáveis empregadas nesta análise (JACKSON, 1987; AUGUSTO FILHO, 1993; IPT, 2002; COE *et al.*, 2004; WILFORD *et al.*, 2004).

A disseminação dos Modelos Digitais de Terreno (MDT), acoplados a ambientes de Sistemas de Informações Geográficas (SIGs), vem contribuindo na avaliação das corridas de detritos, de forma mais prática e automática. Esta análise permite uma avaliação rápida da dinâmica da área, contribuindo na delimitação de zonas de perigo e/ou no reconhecimento da suscetibilidade de uma determinada área, bem

como o potencial de geração de corridas de detritos (D'AGOSTINO & MARCHI, 2001; MELELLI & TARAMELLI, 2004; GARTNER *et al.*, 2008 entre outros).

Neste contexto, após sucessivos eventos geodinâmicos, tais como, os escorregamentos e as corridas de detritos ocorridos nos últimos anos e, tendo como ápice os eventos deflagrados na região serrana do Rio de Janeiro, em 2011, foi instituída a Lei nº 12.608 de 10 de abril de 2012. A lei vem para estabelecer ações preventivas e mitigadoras à minimização dos desastres associados a movimentos de massa, na qual, uma destas premissas é o reconhecimento de áreas suscetíveis a desastres naturais, em escala de bacias hidrográficas.

Tendo como referência a ocorrência de um evento de movimentos de massa, de grande magnitude deflagrado em 1967, no Litoral Norte do Estado de São Paulo, o presente trabalho tem por objetivo avaliar o potencial a geração de corridas de detritos nas sub-bacias do rio Santo Antônio, em Caraguatatuba. Após meses ininterruptos de precipitação significativa sobre o município, inúmeros escorregamentos e corridas de detritos foram observados por toda a cidade.

Portanto, este trabalho visa indicar o potencial de ocorrência de corridas de detritos utilizando-se métodos qualitativo (análise de parâmetros e índices morfométricos) e quantitativo (modelo empírico) em escala de sub-bacia. Esta análise pode contribuir na identificação de áreas com diferentes níveis de magnitude contribuindo na identificação da suscetibilidade, bem como, na delimitação das áreas em risco cooperando assim no ordenamento territorial e com os diferentes sistemas de alerta e monitoramento via gestão pública e/ou privada.

2. ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do rio Santo Antônio localiza-se no município de Caraguatatuba, litoral norte do estado de São Paulo (Figura 1).

A área de interesse corresponde a 32 km² e é formada por rochas do tipo granito, gnaisses, migmatitos e micaxistos (ROSS & MOROZ, 1997). Como resposta a este substrato, apresenta relevo bastante dissecado, com amplitudes de 910 m, alta densidade de drenagem (2.8 km/km²), e com 32% das suas encostas com declividades acima de 30°.

Os solos apresentam-se de forma irregular neste relevo, variando a espessura de acordo com a sua posição topográfica, (espessos nos cumes e delgado ao longo das encostas escarpadas), composto, em sua maior parte, por materiais arenosos, areno argiloso e argilo arenoso (CRUZ, 1974; IPT, 1987). Esta

condição associada ao efeito orográfico e a variação de precipitação ao longo do ano, não apresentando uma estação seca bem definida (PELLEGATTI & GALVANI, 2010; SANTOS & GALVANI, 2012), torna esta área propícia à ocorrência dos escorregamentos e das corridas de detritos (TAVARES *et al.*, 2014).

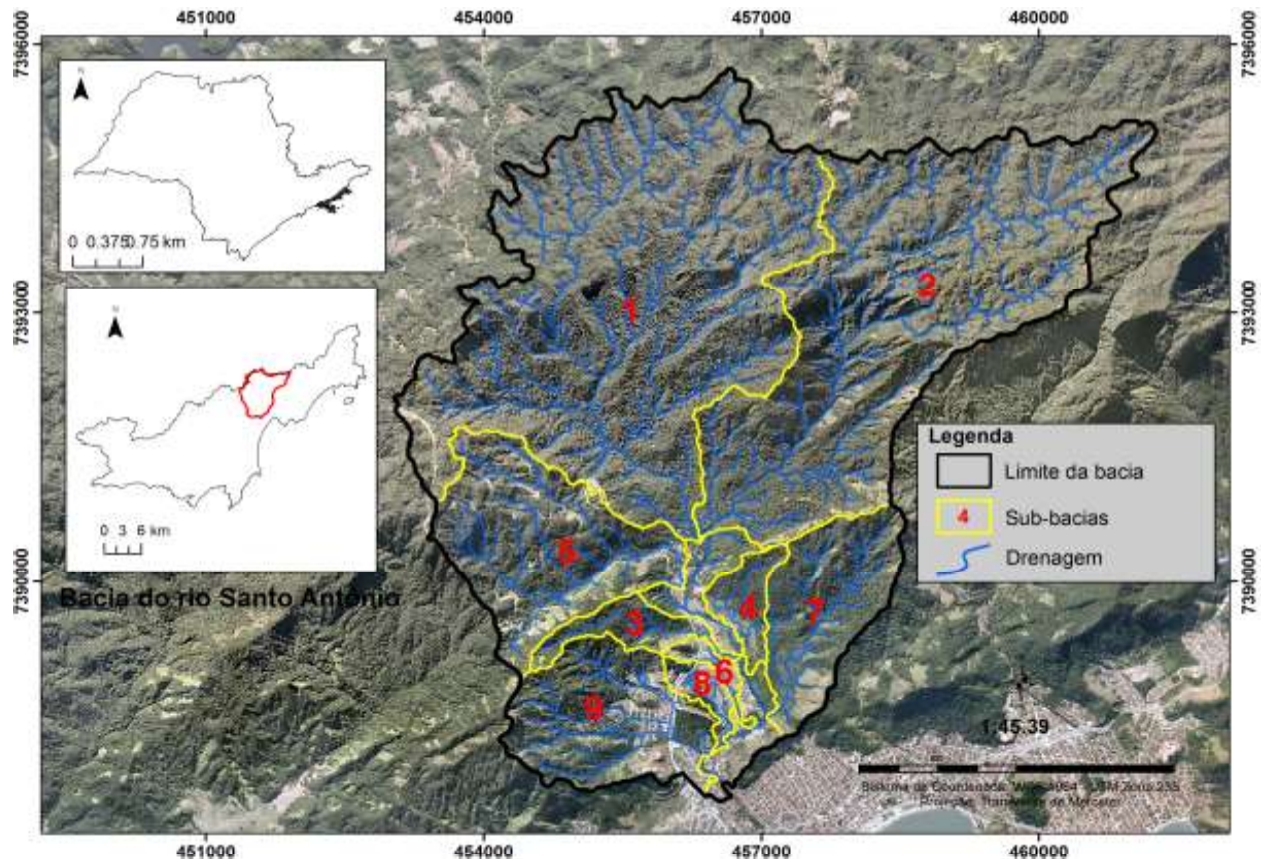


Fig. 1 - Localização da área de estudo.

A dinâmica dos movimentos de massa deflagrados em 1967 em Caraguatutuba pode ser observada na Figura 2 onde inúmeros escorregamentos foram identificados nas encostas da Serra do Mar e dos morros (Figura 2a), pelo comportamento das corridas de massa que alcançaram as regiões mais planas, recobrando estas áreas com sedimentos mais finos e troncos de árvores. Neste evento muitos imóveis foram danificados parcialmente ou totalmente (Figura 2b). Blocos de diâmetros variados misturados a galhos de árvores e tubulações de água (Figura 2c).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para a análise do potencial de geração de corridas de detritos, escolheu-se uma bacia representativa destes processos para o ano de 1967. Posteriormente, algumas etapas foram

estabelecidas, tais como, a identificação destes fenômenos, os parâmetros morfométricos e o modelo empírico que permitiu estabelecer o potencial de cada sub-bacia.

3.1 Identificação dos escorregamentos e das zonas de deposição

Neste estudo foi utilizado as fotografias aéreas do ano de 1973, cedidas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) em escala de 1:25.000 e com resolução espacial de 1,5 m². A identificação e mapeamento das zonas de arraste e de deposição foram pautadas na análise visual levando em consideração a tonalidade (cor esbranquiçada), largura do canal e a sua deposição em declividades do canal inferiores a 20°. Para esta análise utilizou-se o mapa de cicatriz elaborado por Fúlfaro *et al.* (1976).



Fig. 2 - Dinâmica dos movimentos de massa para o evento de 1967, em Caraguatatuba (SP). Fonte: Arquivo Público do Município de Caraguatatuba (SP).

A respeito do cálculo do volume de sedimentos provenientes das cicatrizes dos escorregamentos assumiu-se o valor de 0,5 m de espessura, pois segundo Augusto Filho FILHO (1993) corresponde a espessura média da ruptura destes processos na Serra do Mar. Para o cálculo do volume dos depósitos das corridas de detritos assumiu-se o valor de 2 m, como verificado por IPT (2002), Augusto Filho *et al.* (2005) e Conq *et al.* (2015).

3.2 Parâmetros morfométricos

Os parâmetros morfométricos foram obtidos por meio do Modelo Digital de Terreno disponibilizado pela Empresa Paulista de Planejamento Metropolitano (EMPLASA), em escala de 1:25.000 e resolução de 25 m²,

com base na utilização do sistema TerraHidro e do conjunto de ferramentas *Raster Surface* da extensão *3D Analyst* do ArcGis 9.3.

A partir da aquisição da rede de drenagem, foram obtidas as variáveis utilizadas na análise das corridas de detritos: a área da bacia (A) que apresenta alta correlação com a vazão e o volume de sedimentos; a amplitude da bacia, que indica a energia potencial necessária para o escoamento do material; o comprimento total dos canais (CTC) e o comprimento do canal (CCP), que corresponde ao trecho em que a corrida de detritos pode se desenvolver; a densidade de drenagem (Dd), este podendo contribuir na vazão e no potencial de inundação; o índice de circularidade (Ic), que corresponde ao tempo de concentração do escoamento dentro da bacia; o índice de

sinuosidade (I_s), que contribui na velocidade do escoamento; e a declividade média do canal (DMC), que pode contribuir com o acúmulo ou vazão dos sedimentos. A definição dessas variáveis foi pautada nos trabalhos de Jackson (1987), Augusto Filho (1993), IPT (2002), Coe *et al.* (2004), WILFORD *et al.* (2004), entre outros.

Por meio da variável declividade da encosta, foram avaliados a Concentração de Cicatrizes (CC) e o Potencial de Escorregamento (PE) (GAO, 1993). O primeiro índice (CC) é a razão do número de células, de cada classe, que contém a cicatriz e o total de células da bacia e, o segundo índice (PE), a razão do número de células, de cada classe, afetadas pelas cicatrizes e o total de células dessa mesma classe.

3.3 Modelos empíricos

O modelo adotado aqui se fundamenta no emprego de parâmetros morfométricos para avaliar a vazão de pico das corridas de detritos. O modelo escolhido para a análise foi o proposto por Araya Moya (1994) e modificado por Massad *et al.* (1997). A modificação corresponde na substituição da variável de precipitação I (24 horas) por I (1 hora) pois, segundo Massad *et al.* (1997) a intensidade de precipitação antecedente ao evento é mais significativa na ocorrência das corridas de detritos na Serra do Mar Paulista (Equação 1).

$$q_T = 1,4 * \frac{1}{(1 - c)} * 0,85 * A * I_1 * \frac{H^{0,19}}{L_{0,58}} \quad (1)$$

onde c é a concentração de sólido, por unidade do volume, A é a área da bacia (km^2), I_1 é a intensidade de precipitação horária que antecede o evento, H é a diferença altimétrica (m) e L é o comprimento total do canal (km).

O volume total de sedimentos produzidos pelas corridas de detritos é dado pelas observações realizadas por Takahashi (1991) sobre estes processos (Equação 2).

$$V_t = 500 * q_T \quad (2)$$

onde q_T é a vazão de pico da corrida de detrito.

3.4 Parametrização do modelo

Foram utilizadas as cicatrizes de escorregamentos (FÚLFARO *et al.*, 1976) e as zonas de

deposição para selecionar as sub-bacias para a aplicação do modelo empírico. Neste contexto, 8 de 9 sub-bacias atenderam aos critérios pré-determinados.

Os valores de concentração de sólidos (c) foram obtidos na literatura. Observações de campo e em laboratório apontam que a concentração de sólidos das corridas de detritos varia entre 30% a 90% (DAVIES *et al.*, 1992; COUSSOT & MEUNIER, 1996; GODT & COE, 2007; UEHARA *et al.*, 2008). Devido às similaridades fisiográficas entre as bacias, adotou-se nesta pesquisa o valor de 50% para esta variável, como proposto por Massad *et al.* (1997), pois segundo os autores esta porcentagem compreende as diferentes granulometrias dos sedimentos envolvidos na corrida de detrito, observadas na Serra do Mar Paulista.

Para a composição dos cenários foram empregados dois valores de intensidade de precipitação: 60 mm/h e 100 mm/h. A adoção destes valores decorre das observações realizadas por IPT (2002) em função da análise da série histórica de precipitação da Baixada Santista e Litoral Norte de São Paulo associada à ocorrência de eventos de corridas de detritos.

3.4 Hierarquização em função do potencial de geração das corridas de detritos

A hierarquização das sub-bacias em função do potencial de geração de corridas (magnitude ou volume total de sedimentos) pautou-se no refinamento da classificação de Jakob (2005), na qual se baseia no volume, na vazão de pico e na área de inundação destes processos e, conseqüentemente nos possíveis danos esperados.

Adotou-se aqui as 5 primeiras classes, pois somente estas dizem respeito as corridas de detritos, desconsiderando a deflagração destes processos pelo mecanismo de vulcanismo. Além disso, utilizou-se e adaptou-se somente o termo de volume para a classificação destas sub-bacias para este estudo. A classificação foi realizada por meio do método de quebras naturais (*natural breaks*), o qual se baseia em agrupamentos naturais intrínsecos aos dados, representando a hierarquização das classes do potencial de geração de corridas de detritos. Adicionalmente correlacionou-se tais resultados com as informações provenientes

da análise qualitativa dos parâmetros e índices morfométricos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo os resultados alcançados permitiram fazer uma análise do evento ocorrido em 1967, assim como, a contribuição de cada parâmetro no desenvolvimento das corridas de detritos. Além disso, classificou-se o potencial de cada sub-bacia em função do potencial de geração de corridas de detritos.

4.1 Análises das áreas fontes e zonas de deposição

A partir das informações levantadas por Fúlfaro *et al.* (1976) foram identificadas 106 cicatrizes dos escorregamentos deflagrados na bacia do rio Santo Antônio, em 1967 (Figura 3). A área destas cicatrizes variou entre 46 m² a 94.626 m², gerando volume de sedimentos entre 23 m³ a 47.313 m³. O volume total gerado por estes processos foi de aproximadamente 631.890 m³.



Fig. 3 - Trecho da fotografia aérea utilizada por Fúlfaro *et al.* (1976) para delimitação das cicatrizes do evento de 1967.

A bacia do rio Santo Antônio é composta por 9 sub-bacias, sendo que em 3 destas (sub-bacias 1, 2 e 5) foram identificadas 3 zonas de arraste e de deposição, com áreas de 46.131, 30.017 e 40.530 m², respectivamente. Adicionalmente, uma 4 zona também foi identificada, sendo caracterizada como de deposição, e localizada no baixo curso do rio São Antônio (Figura 4). Estas zonas de arraste e deposição totalizaram uma área de 6.314.463 m².

A extensão destas zonas de arraste para as sub-bacias 1, 2 e 5 variou entre 0,83 a 1,14 km. Nestas três zonas, como verificado por Cruz (1974) houve uma maior deposição de materiais mais grosseiros, e segundo a autora, tal deposição foi decorrente a presença de um pequeno alvéolo, que caracteriza o estrangulamento do canal

neste setor. Este compartimento, juntamente com a diminuição da vazão dos rios e a menor declividade média do canal podem ter contribuído para a deposição dos materiais mais grosseiros, reflexo da perda de energia, impossibilitando o deslocamento destes materiais por maiores distâncias.

Em alusão ao comportamento das corridas de detritos, Conq *et al.* (2015), verificaram que a zona de deposição deste processo no córrego do Príncipe, em Teresópolis (RJ) representou 2,73 km, ou seja, mais que 50% da extensão de todo o fluxo. Isto pode indicar que a ausência deste estrangulamento permitiria um maior deslocamento destes sedimentos mais grosseiros ao longo do canal principal, alcançando as regiões mais planas da bacia.

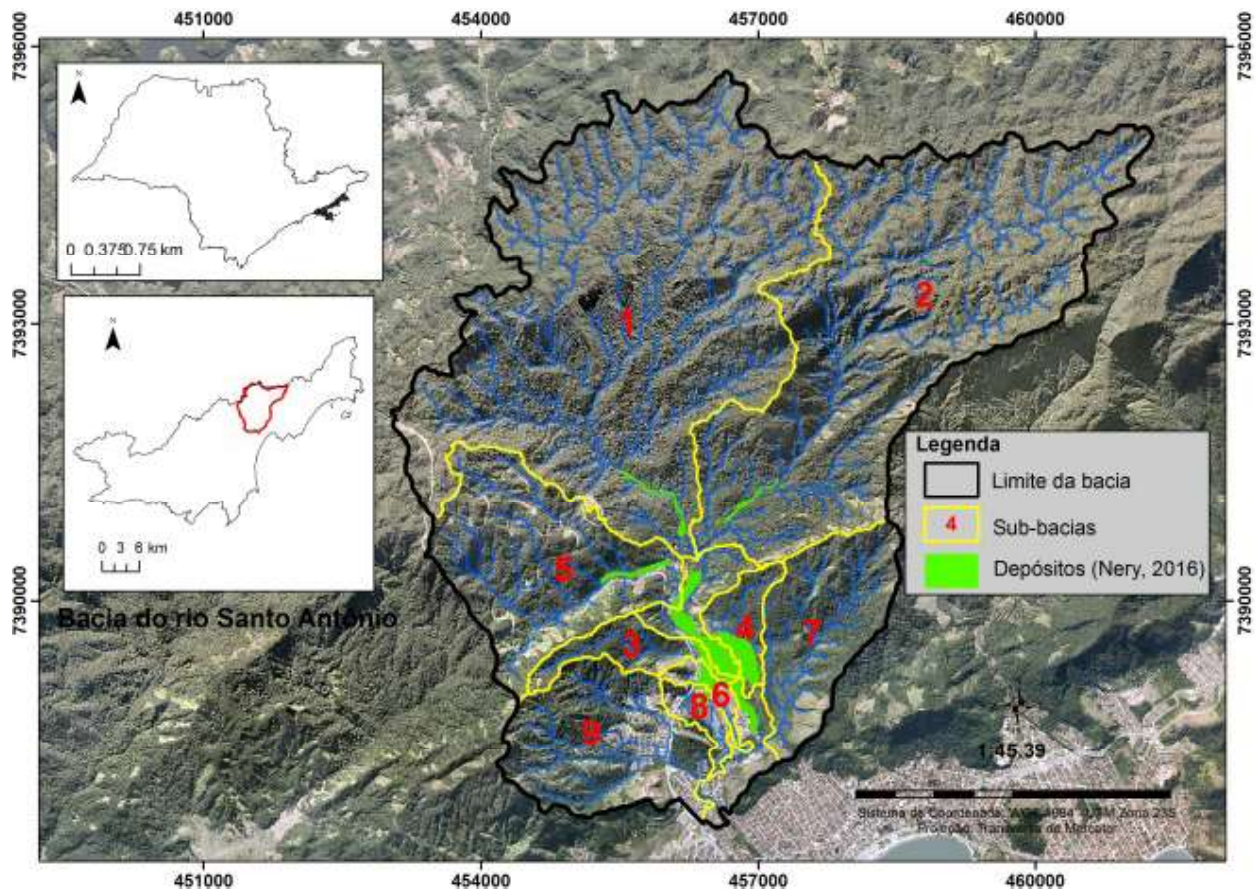


Fig. 4 - Identificação dos depósitos (cor verde), na bacia do rio Santo Antônio.

Assumindo o valor de espessura de 2 m (IPT, 2002; AUGUSTO FILHO *et al.*, 2005; CONQ *et al.*, 2015), para as zonas de arraste e de deposição mapeadas nas sub-bacias (1, 2 e 5), obteve-se um volume total de sedimentos de 233.356 m³. A deposição destes sedimentos nestas sub-bacias, em conjunto com os escorregamentos, pode servir de barragens naturais para os sedimentos provenientes das regiões a montante da bacia. Consequentemente, quando associadas a condições hidroclimatológicas extremas podem romper-se, levando a ocorrência de um novo evento de maior magnitude (impacto), como também, observado por Xu *et al.* (2012).

Analisando os resultados do volume de sedimentos dos depósitos e das cicatrizes, para as sub-bacias do rio Santo Antônio (1, 2 e 5), observou-se que os escorregamentos deflagrados nestas sub-bacias podem ter contribuído entre 26% a 86% com o volume de sedimentos das corridas de detritos. Entre os resultados encontrados, destaca-se o caso da sub-bacia 2, onde verificou-se a maior concentração de escorregamentos (43), com um volume na ordem de 228.362 m³, mas com um volume de

deposição de apenas 60.034 m³, resultando na menor contribuição para as corridas (no caso, 26%). Tal situação implica que nem todos os escorregamentos deflagrados nesta sub-bacia, para o evento de 1967, contribuíram no fornecimento de sedimentos para as corridas de detritos.

4.2 Análise qualitativa dos parâmetros e índices morfométricos e morfológico

A área das sub-bacias varia entre 0,35 km² a 13,80 km², conforme apresentado na Tabela 1. Jackson (1987) aponta que bacias ou sub-bacias favoráveis à ocorrência das corridas de detritos apresentam áreas entre 10 a 12 km². Segundo Gramani *et al.* (2005), bacias maiores que 10 km², possuem menores valores de amplitudes e de ângulo da encosta, configurando bacias com relevo mais suave e consequentemente apresentariam menores condições de instabilidade. No entanto, esta condição não fora observada nas sub-bacias 1 e 2 (Tabela 1). Das 106 cicatrizes de escorregamentos observadas, 51 inseriram-se dentro destas sub-bacias, indicando a contribuição destes

processos na ocorrência das corridas nestas áreas. Para Jakob (1996), a ocorrência destes processos em sub-bacias superiores a 10 km² decorre da mudança brusca da declividade do canal, de barramentos (naturais e artificiais), da deflagração de escorregamentos e elevação da vazão nestes canais. Portanto, uma hipótese da ocorrência destes processos nas sub-bacias 1 e 2 pode ser decorrente da deflagração dos escorregamentos e da vazão elevada do canal, este último, devido aos meses subsequentes de precipitação sobre a bacia, o que pode ter favorecido na saturação do solo e na manutenção do lençol freático em níveis elevados.

A amplitude destas sub-bacias variou entre 10 a 810 m (Tabela 1) e, segundo Jackson (1987), bacias com amplitudes superiores a 500 m apresentam-se favoráveis à ocorrência das corridas de detritos. Valores acima deste referencial foram encontrados para as sub-bacias 9 (570 m), 5 (750 m), 2 (790 m) e 1 (810 m) (Tabela 1) indicando, segundo IPT (2002), áreas com maior suscetibilidade de escoamento destes sedimentos.

Estes valores de amplitude (Tabela 1) quando associados ao comprimento e a declividade média do canal principal podem indicar uma maior probabilidade de transporte e de deposição destes sedimentos (IPT, 2002). O comprimento dos canais das 8 sub-bacias analisadas variaram entre 1,33 a 8,26 km, com declividade média do canal para estas entre 0,43° a 10,37° indicando uma maior probabilidade de acúmulo destes sedimentos nestes canais. Como observado por Morisawa (1962) e Sousa (2005), canais com altas declividades são menos extensos, apresentam maior energia hidráulica (favorecendo a erosão e o transporte), ocasionando menor descarga em relação aos canais de menor declividade. Estes últimos seriam mais longos, mais profundos e possuem maior estoque de água, configurando uma maior descarga e menor energia hidráulica (MORISAWA, 1962; SOUSA, 2005).

No entanto, o transporte e a deposição destes sedimentos pode depender dos diferentes estágios de inundação, bem como, das características destes canais, como observado por Nettleton *et al.* (2005). Isso explicaria, em parte, a ocorrência destes processos, associado

aos escorregamentos, nas sub-bacias 1, 2 e 5.

A ocorrência destes processos nestas sub-bacias, também pode ser decorrente do índice de circularidade e da densidade de drenagem. Estas sub-bacias apresentaram índices de circularidade entre 0,23 a 0,56, conforme a Tabela 2, indicando áreas com baixo e alto, ou seja, favorecendo o escoamento e contribuindo com as cheias rápidas, respectivamente (LANA *et al.*, 2001). Em associação aos altos índices de densidade de drenagem (3 a 6 km/km²) (Tabela 2), e em condições de precipitações intensas, podem favorecer o escoamento destes sedimentos de forma mais rápida. Como verificado por Yildiz (2004) e Hasegawa *et al.* (2013), esta associação possibilitaria a elevação dos níveis destes canais contribuindo assim, no deslocamento destes sedimentos. No entanto, o índice de circularidade (Tabela 2) não explicaria a ocorrência das corridas de detritos nas sub-bacias 1, 2 e 5, e a não ocorrência destes processos para as sub-bacias 7 e 9 indicando que para o evento de 1967 que esta variável não influenciou na dinâmica destes processos.

O índice de sinuosidade (Tabela 2) indica que os canais destas sub-bacias apresentam-se de forma sinuosa, visto que, seus valores são intermediários (LANA *et al.*, 2001; ALVES & CASTRO, 2003) configurando formas transicionais, regulares e irregulares. Tais valores indicam que estes canais podem escoar sedimentos de diâmetros variados, permitindo o deslocamento de materiais grosseiros por longas distâncias, sendo possível observar esta dinâmica nas regiões mais planas da bacia (vide Figura 2c).

Tabela 1: Parâmetros morfométricos das sub-bacias do rio Santo Antônio

<i>Sb</i>	<i>A</i>	<i>Amp</i>	<i>CTC</i>	<i>CCP</i>
8	0,35	10	2,13	1,33
4	0,60	310	2,74	1,49
3	0,70	380	3,34	2,73
7	2,36	340	10,26	2,96
9	2,86	570	10,51	2,61
5	3,91	750	14,98	3,66
2	10,98	790	46,22	8,22
1	13,80	810	50,05	8,26

Legenda: *Sb* = Sub-bacias; *A* = Área (km²); *Amp* = Amplitude (m); *CTC* = Comprimento total dos canais (km); *CCP* = Comprimento do canal principal (km).

Tabela 2: Índices morfométricos das sub-bacias do rio Santo Antônio

Sb	Dd	Ic	Is	DMC
8	6,14	0,33	1,50	0,43
4	4,60	0,39	1,39	8,78
3	4,80	0,23	1,26	5,66
7	4,35	0,56	1,19	6,36
9	3,68	0,54	1,29	8,08
5	3,83	0,48	1,25	10,37
2	4,21	0,34	1,25	6,04
1	3,63	0,30	1,61	5,05

Legenda: Sb = Sub-bacias; Dd = Densidade de drenagem (km/km²); Ic = Índice de circularidade (adim); Is = Índice de sinuosidade e; DMC = Declividade média do canal (°).

Observa-se que a maior parte dos escorregamentos (aproximadamente 70%) ocorreu em áreas com declividades menores que 30° (Figura 5). As zonas críticas de ocorrência dos escorregamentos, ou seja, aquelas encostas onde há presença de material predisponente a movimentação representam 32% da bacia (30° a >50°) com PE superior a 16% para este intervalo de declividade e, conseqüentemente zonas fornecedoras de sedimentos para as corridas de detritos, como verificado por Uehara *et al.* (2008) e Gramani *et al.* (2005) para a Serra do Mar paulista. Em relação ao CC, este apresentou maior concentração nas classes de declividades inferiores a 30° (51%). No entanto, estas encostas também podem contribuir para estes processos, visto que, Silveira *et al.* (2013) verificaram para a Serra do Mar paranaense, que encostas acima de 17° associadas a cotas altimétrica superiores a 400 m tendem a ser mais suscetíveis a deflagração das corridas de detritos.

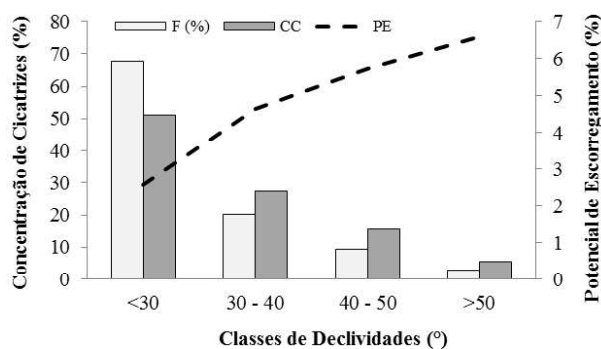


Fig. 5 - Gráfico apresentando a distribuição das classes de declividade afetadas pelos escorregamentos, em relação a Frequência (F), Concentração de Cicatrizes (CC) e Potencial de Escorregamento (PE).

4.3 Análise da vazão de pico

A Figura 6 mostra os valores de vazão e do volume total de sedimentos gerados para as 8 sub-bacias. Observou-se que com o aumento da vazão de pico houve também o aumento do volume de sedimentos gerados por estes processos. Esta condição foi verificada por Rickenmann *et al.* (2003), em que o aumento da erosão do canal tende a aumentar com o aumento do escoamento superficial e, conseqüentemente tenderia a aumentar o volume das corridas de detritos.

Em relação à vazão de pico, os valores para as sub-bacias analisadas variaram entre 65,06 m³/s a 2.067,38 m³/s para o cenário de 60 mm/h e entre 108,43 m³/s a 3.445,63 m³/s para o cenário de 100 mm/h (Figura 4). Estes valores mínimos e máximos correspondem a sub-bacias com áreas entre 0,35 km² a 13,80 km².

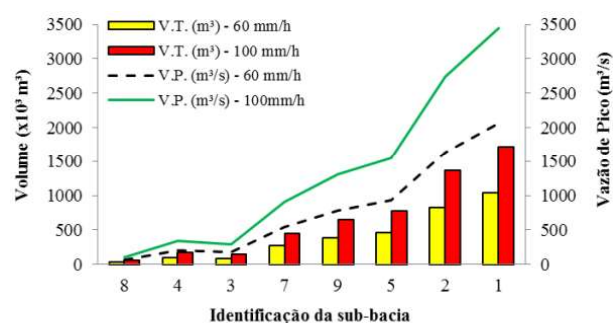


Fig. 6 - Gráfico de vazão de pico em função do volume de sedimentos. A variação destes índices em relação aos cenários propostos foi de aproximadamente 60%.

O menor valor observado, para as sub-bacias analisadas assemelha-se ao resultado obtido por Hurlimann *et al.* (2003). Para uma bacia de 1,80 km², nos Alpes suíços, os autores verificaram que a vazão da corrida de detritos foi na ordem de 70 m³/s. Este resultado mostra, de forma significativa, que bacias de dimensões menores quando associada a diferentes intensidades de precipitação podem proporcionar a elevação do canal de forma rápida permitindo o escoamento destes sedimentos e, assim podendo aumentar o impacto destes processos.

Para um determinado evento de corrida de detritos, em Cubatão (SP), Kanji *et al.* (2008) verificaram para uma precipitação de 60 mm/h, que a vazão deste processo foi de 780 m³/s. Sub-bacias com áreas similares (7 e 9) geraram vazão

entre 543 m³/s e 782 m³/s para o cenário de 60 mm/h. Estes valores de vazão indicam que estas sub-bacias são capazes de gerarem volumes de sedimentos significativos e, conseqüentemente podem causar danos expressivos, como aqueles observados em 1994 na refinaria Presidente Bernardes. Sub-bacias com áreas superiores a 10 km² geraram vazão entre 1.641 e 2.067 m³/s para o cenário de 60 mm/h e entre 2.736 e 3.455 m³/s em relação ao cenário de 100 mm/h.

Estes valores foram superiores aos resultados obtidos por Tang *et al.* (2011), para duas bacias com áreas de 16,14 e 25,75 km², nas quais estes processos geraram vazão entre 572 a 1.358 m³/s após uma precipitação de 77,3 mm/h. Os resultados indicam que o escoamento destes sedimentos nestas sub-bacia podem ter ocorrido de forma mais intensa, fato sustentado pelo alto índice de densidade de drenagem observado nestas áreas.

4.4 Análise do potencial de geração de corridas

A respeito da magnitude (volume total de sedimentos), os valores variaram entre 32.527 m³ a 1.033.689 m³ e 54.212 m³ a 1.722.815 m³ para os cenários de 60 mm/h e 100 mm/h, respectivamente (Tabela 3). O aumento na intensidade de precipitação possibilitou o acréscimo no volume total de sedimentos, como observado na Tabela 3.

Tabela 3: Vazão e volume total de sedimentos das sub-bacias analisadas

Sb	V.P. *	V.P. **	V.T.*	V.T.**
8	65	108	32.528	54.213
4	201	335	100.550	167.584
3	172	286	85.881	143.135
7	543	905	271.454	452.423
9	782	1.304	391.216	652.026
5	925	1.542	462.747	771.245
2	1.641	2.736	820.803	1.368.005
1	2.067	3.446	1.033.689	1.722.815

Legenda: Sb=Sub-bacias; V.P.=Vazão de Pico (m³/s); V.T.=Volume total de sedimentos (m³.); 60 mm/h (*); 100 mm/h (**).

IPT (2002) verificou para duas sub-bacias com áreas superiores a 10 km², Jurubatuba Mirim (10,15 km²), em Cubatão (SP), e Rio

Claro (13,77 km²), em Caraguatatuba (SP) que o volume de sedimentos gerados por estas sub-bacias para um cenário de 60 mm/h foi de 436.519 m³ e 556.889 m³. Em relação ao cenário de 100 mm/h o volume gerado foi de 727.532 m³ e 928.148 m³. Em comparação com estes resultados observou-se que o volume total de sedimentos para as sub-bacias aqui analisadas representam mais que o dobro, aproximadamente 54%, para ambos os cenários. Um ponto em comum entre os estudos é o potencial na geração de volumes de sedimentos significativos para as diferentes regiões da Serra do Mar.

Gramani *et al.* (2005) verificaram para uma bacia de aproximadamente 3 km², em São Sebastião (SP), volume de sedimentos na ordem de 159.893 m³ e 266.488 m³. Comparando com a sub-bacia 9, com área de 3 km² os valores de sedimentos gerados por esta foi entre 391.215 m³ e 652.025 m³ para ambos os cenários. A diferença entre o volume de sedimentos gerados foi de aproximadamente 41% entre ambas as bacias. Tal distinção foi devido à adoção apenas da área de deposição por estes autores, fato este não aplicado para as sub-bacias aqui analisadas.

Xu *et al.* (2012) verificaram a ocorrência de uma corrida de detritos em uma sub-bacia de 5,7 km² após precipitação de 52 mm/h, próxima a cidade de Deyang, noroeste da China. O volume total de sedimentos foi de 835.000 m³, valor este superior ao observado para a sub-bacia 5 (aproximadamente 4 km²) com 462.747 m³ e 771.245 m³ para os cenários de 60 mm/h e 100 mm/h, respectivamente. Esta quantidade de volume mobilizado, segundo os autores, foi decorrente do acúmulo destes sedimentos em todos os tributários (7) após um terremoto na área. Para estes autores esta deposição contribui para o aumento do volume da corrida de detrito.

De fato, isso corrobora a explanação de Rickenmann & Zimmermann (1993), em que a magnitude (volume de sedimentos) do evento pode estar associada à disponibilidade de material, tanto na encosta quanto no canal. A recarga (acúmulo) de sedimentos nos canais, evento após evento pode potencializar o impacto destes processos em eventos futuros.

4.4 Hieraquização das sub-bacias

O volume total de sedimentos gerados por estes processos para todas as sub-bacias

analisadas foi de 3.198.898 m³ para o cenário de 60 mm/h e de 5.331.446 m³ para de 100 mm/h.cenários (60 e 100 mm/h) (Tabela 4). Considerando apenas os locais onde foram observados os depósitos das corridas de detritos, no caso, as sub-bacias 1, 2 e 5 o volume total de sedimentos foi de 2.317.239 m³ e 3.862.005 m³ para os cenários de 60 mm/h e 100 mm/h, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4: Comparação dos resultados obtidos do modelo empírico e das zonas de arraste e deposição

Sb	V.T.*	V.T.**	A.D.	V.D.
5	462.747	771.245	40.530	81.060
2	820.803	1.368.005	30.017	60.034
1	1.033.689	1.722.815	46.131	92.262

Legenda: V.T.=Volume total (m³); A.D.=Área do depósito (m²); V.D.=Volume calculado considerando a espessura de 2 m de deposição (m³); 60 mm/h (*); 100 mm/h (**).

A partir da identificação das zonas de deposição e arraste nas sub-bacias 1, 2 e 5 correlacionou-se com os volumes de sedimentos gerados pelo modelo empírico adotado, para ambos os cenários. Em relação ao volume observado por meio da fotointerpretação e o volume obtido pelo modelo empírico encontrou-se uma variação para menos entre 17% e 34% para o cenário de 60 mm/h e entre 10% e 20% para o cenário de 100 mm/h. Xu *et al.* (2012) verificaram o volume de sedimentos de uma corrida de detritos ocorrida em 2010, no noroeste da China. O volume estimado por estes autores foi de 374.000 m³ e o volume observado na ordem de 4.500.000 m³. Esta diferença, observado e estimado, gerou um volume de sedimentos de 4.160.000 m³. Como verificado por estes autores os dados utilizados nos modelos empíricos, por exemplo, concentração de sedimentos ou precipitação, podem não ser condizente com o volume de sedimento real (observado) da corrida de detrito. Esta colocação implica que as informações inseridas no modelo adotado pode superestimar o volume de sedimentos, principalmente quando analisado com o volume dos depósitos destes processos.

Ressalta ainda, que o dado utilizado aqui fundamenta-se na fotointerpretação

destes processos, no caso, os depósitos. Portanto, devido a tomada das fotografias 6 anos após o evento, muitas das áreas onde tais processos ocorreram, arraste e deposição, podem ter sido perdidas, principalmente os sedimentos mais finos reduzindo, assim, a sua área e, conseqüentemente, o próprio volume envolvido naquele evento. A Figura 7 mostra a hierarquização do potencial de geração de corridas de detritos das 8 sub-bacias em relação aos cenários de 60 mm/h e 100 mm/h

O Quadro 1 mostra a hierarquização das sub-bacias em relação a magnitude (volume de sedimentos) em função do modelo empírico adotado. De forma geral, os eventos aqui analisados, considerando toda a sua magnitude, foram inseridos na classe 5 da classificação de Jakob (2005), apresentando como características a ocorrência destes processos em locais com abundância de áreas fontes, ocorrendo de forma rara e, passíveis de serem interpretados pela exposição dos materiais em sua trajetória, como verificado nas Figuras 2 e 4. Salienta-se que os resultados obtidos pelo modelo empírico podem ser interpretados como valores máximos de sedimentos que cada sub-bacia pode gerar em um determinado evento.

Observou-se que as sub-bacias que gerariam maiores volumes de sedimentos (classe 5 (>500.000)) (Nery, 2016), no caso, 1 e 2 para o cenário de 60 mm/h e 1, 2, 5 e 9 para o cenário de 100 mm/h apresentaram os maiores valores de amplitude, indicando locais com grande potencial de deslocamento destes sedimentos, principalmente quando associado a declividade média dos canais superiores a 5°. Além disso, outro fator que pode contribuir nesta análise é o alto índice de densidade de drenagem, o que possibilitaria um maior escoamento destes sedimentos. Devido a presença dos alvéolos entre as sub-bacias 1, 2 e 5, e como observado por CRUZ (1974), os blocos de diâmetros maiores foram bloqueados por este compartimento geomorfológico, favorecendo o escoamento de sedimentos menos grosseiros, porém não menos perigosos.

A classe 4 (100.000 m³a 500.000 m³) (Nery, 2016) é representada por sub-bacias com área de até 4 km², amplitudes variando entre 310 a 750 m, comprimento do canal entre 1,49

a 3,66 km, alta densidade de drenagem, índice de circularidade que variam de 0,39 a 0,56 e declividade média do canal entre 6° a 10°. As características fisiográficas destas unidades que compõem esta classe de potencial de sedimentos, indicam que tais sub-bacias podem acarretar danos irreparáveis quando associados a presença de ocupação próximas e ao longo dos canais destas áreas.

As classes 2 e 3 (10.000 a 100.000) (Nery, 2016) configuram sub-bacias com áreas de até 0,70 km², amplitude entre 10 m a 380 m,

comprimento do canal entre 1,33 e 2,73 km, alta densidade de drenagem, baixo índice de circularidade, o que implicaria em um maior tempo de concentração e, baixo índice de declividade média do canal. Mesmo assim, estas sub-bacias apresentam um menor potencial de geração de corridas, e estão localizadas próximas as áreas de maior ocupação da planície do rio Santo Antônio, local que foi completamente tomado pelos sedimentos provenientes dos escorregamentos e corridas de detritos no ano de 1967.

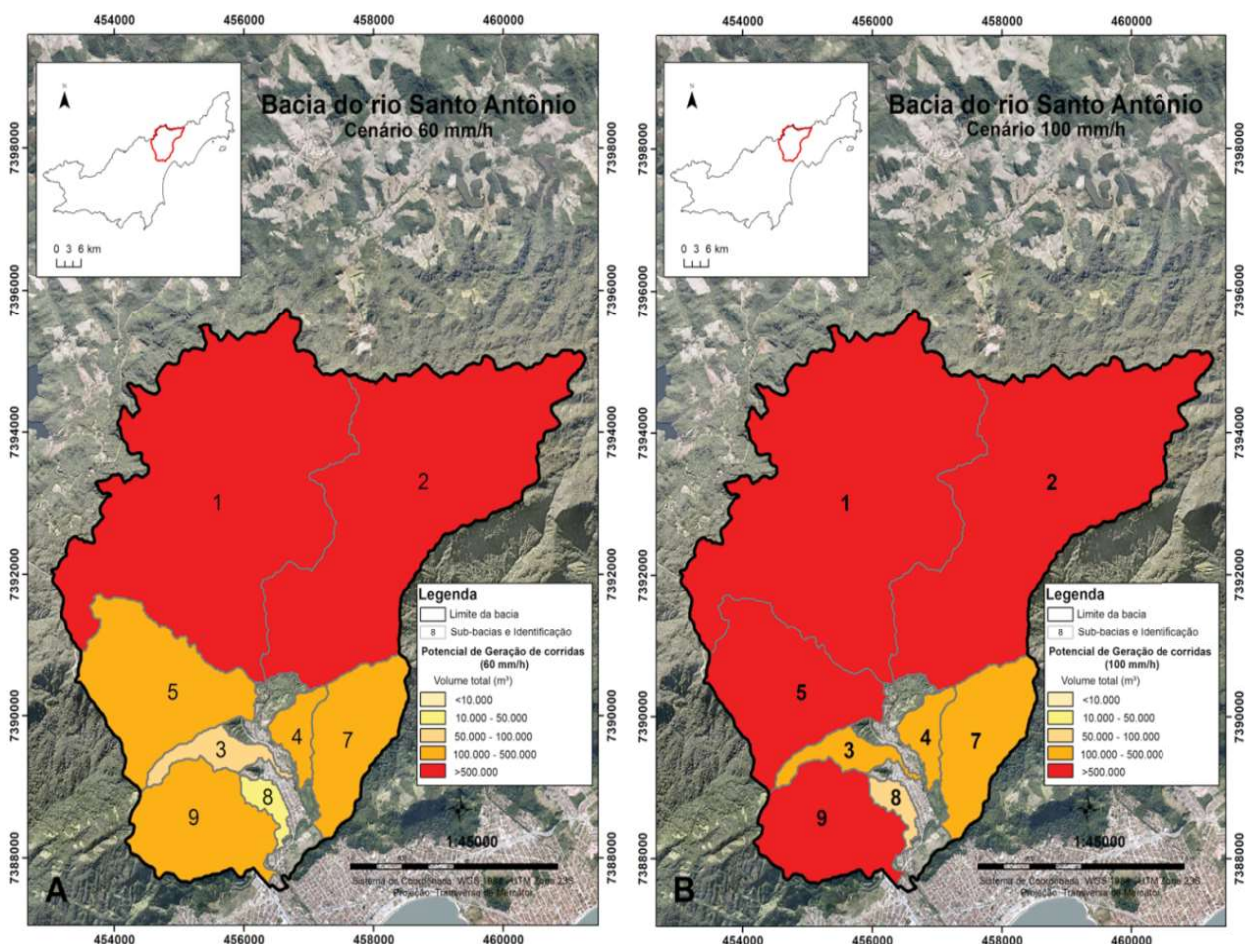


Fig. 7 - Mapa de potencial de geração de corrida de detritos em função da magnitude (volume total de sedimentos), para os cenários de 60 mm/h e 100 mm/h.

Para a bacia do Santo Antônio não foi identificada nenhuma sub-bacia que caracterizasse a classe 1. No entanto, vale salientar que a forma de divisão das sub-bacias, assim como, das próprias classes de potencial de geração de corridas podem ter excluídos involuntariamente áreas com potencial de geração para esta classe (<10.000) (Nery, 2016).

Salienta-se que os resultados obtidos

aqui foram expressos em valores máximos que cada unidade ou sub-bacia pode gerar para um determinado evento em condições similares ao observado para o ano de 1967. Este estudo serve como uma etapa para estudos futuros indicando as sub-bacias a serem analisadas, permitindo obter informações sobre a dinâmica destes processos, assim como, auxiliar na calibração dos modelos empíricos.

Quadro 1: Correlação entre as classes de potencial de geração de corridas de Jakob (2005) e Nery (2016)

Jakob (2005)			Nery (2016)	
Classe	Volume	Características	Classe	Volume
1	10^2	<ul style="list-style-type: none"> Ocorrem dentro dos canais mobilizando pouco material; devido à ocorrência de escorregamentos ou queda de blocos; Apresenta uma menor frequência devido à falta de material predisponente a remobilização; Ocorrem em bacias com áreas de até 5 km² e; Podem não apresentar evidências destes processos com o passar do tempo (erosão ou crescimento da cobertura da vegetação. Nenhuma das sub-bacias analisadas insere-se nesta classe 	1	<10.000
2	$10^2 - 10^3$			
3	$10^3 - 10^4$			
4	$10^4 - 10^5$	<ul style="list-style-type: none"> Sub-bacias ou bacias com áreas inferiores a 1 km² até 5 km²; Os processos estão relacionados a eventos hidroclimáticos intensos; Podem ter seu registro de ocorrência omitido devido à deflagração de um novo evento ou decorrente do crescimento da cobertura vegetal. Nesta classe identificou-se as sub-bacias 8 e 3 	2	10.000 – 50.000
			3	50.000 – 100.000
5	$10^5 - 10^6$	<ul style="list-style-type: none"> Os processos são observados em locais de abundância de materiais, ocorrendo de forma rara; Evidência de sua trajetória e do seu depósito pode ser facilmente reconhecida. Nesta classe foram inseridas as sub-bacias 4, 5, 7 e 9 	4	100.000 – 500.000
			5	>500.000

Fonte: elaborado por NERY (2016).

5. CONCLUSÕES

Os parâmetros e índices morfométricos e morfológico apresentaram-se como fundamentais na identificação e caracterização das sub-bacias do rio Santo Antônio, aplicado exclusivamente ao processo de corridas de detritos.

A análise qualitativa mostrou que a ocorrência das corridas de detritos para o ano de 1967 foi associada a sub-bacias com áreas de até 14 km², amplitudes superiores a 500 m e com maior índice de declividade média do canal (10°), demonstrando que estes seriam locais com maior probabilidade a ocorrência destes processos em eventos futuros. Mesmo apresentando baixo percentual de declividade acima de 30°, são estes setores da encosta que apresentam maior potencial de deflagração dos escorregamentos na Serra do Mar Paulista. Conseqüentemente, isso poderia indicar uma maior probabilidade destas áreas fornecerem sedimentos para as corridas de detritos nesta bacia.

A respeito da análise quantitativa, o modelo empírico adotado neste trabalho mostrou um aumento de aproximadamente 60% para

os dados de vazão de pico e volume total de sedimentos, em relação aos cenários propostos: 60 mm/h e 100 mm/h. Dadas as características de cada sub-bacia, observou-se que quanto maior a área, maior será o potencial de geração de corridas de detritos.

Salienta-se que condições para eventos futuros similares ao ocorrido em 1967, em Caraguatatuba, deve-se considerar a existência de material predisponente no canal e na encosta além da condição hidrometeorológica que permita a ocorrência generalizada destes processos na paisagem.

Portanto, os obtidos neste trabalho encontrados aqui permitem uma melhor avaliação quanto ao zoneamento destas sub-bacias, podendo servir como base para estudos futuros, tanto para a análise destes processos, como para o planejamento do uso e ocupação e proposição de medidas de mitigação. Acredita-se também que tais informações possam auxiliar gestores públicos e privados no monitoramento e alerta visando minimizar o dano que estes processos possam causar futuramente.

Agradecimentos

O autor agradece as contribuições de Marcelo Gramani, Márcio Andrade, Milton Kanji e Rodrigo Conceição pelas discussões ao longo da construção desta pesquisa.

Referências Bibliográficas

ALVES, J. M. P., CASTRO, P. T. A. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio do Tanque (MG) baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análise de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, v 33, 2, p. 117-124, 2003

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

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

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

AUGUSTO FILHO, O.; MAGALHÃES, F. S.; GRAMANI, M. F. Mass movements susceptibility map of a highway system using GIS technology: a case study in Brazil. In: **Geoline**, 2005, Lyon, França, p. 11

BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC; dispõe sobre o Sistema Nacional de Proteção e Defesa Civil - SINPDEC e o Conselho Nacional de Proteção e Defesa Civil - CONPDEC; autoriza a criação de sistema de informações e monitoramento de desastres; altera as Leis nos 12.340, de 1o de dezembro de 2010, 10.257, de 10 de julho de 2001, 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.239, de 4 de outubro de 1991, e 9.394, de 20 de dezembro de 1996;

e dá outras providências. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2012/Lei/L12608.htm. Acessado em: agosto de 2015, p. 12

COE, J.A.; GODT, J. W.; BAUM, R. L.; BUCKNAM, R. C.; MICHAEL, J. A. Landslide susceptibility from topography in Guatemala. In: LACERDA, W. A.; EHRlich, M.; FONTURA, S. A. B.; SAYÃO, A. S. F. (Eds). **Landslides: Evaluation and Stabilization**, London, Taylor & Francis Group, v 1, p. 69-78, 2004

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

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

COSTA, J. E. Physical geomorphology of debris flows. In COSTA, J. E., & FLEISHER, J. P., eds., **Developments and applications of geomorphology**, New York: Springer-Verlag. p. 268-317, 1984

COUSSOT, P.; MEUNIER, M. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. **Earth-Science Reviews**, v. 40, p. 209-227, 1996

CRUZ, O. **A Serra do Mar e o Litoral na área de Caraguatatuba - SP**. 1972. p. 181. Tese (Doutorado em Geografia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1974

DAVIES, T. R.; PHILLIPS, C. J.; PEARCE, A. J.; ZHANG, X. B. Debris flow behavior – an integrated overview. **Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions**. IAHS Publ., n209, p. 217-225, 1992

D'AGOSTINO, V. 1996. Analisi quantitativa e qualitative del trasporto solido torrentizio nei bacini montani del Trentino orientale. In: **Scritti dedicati a Giovanni Tournon**. **Associazione Italiana di Ingegneria Agraria** – Associazione Idotecnia Italiana, p. 111-123

D'AGOSTINO, V.; MARCHI, L. Debris flow

- magnitude in the Eastern Italian Alps: Data collection and Analysis. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 26 (9), p. 657-663, 2001
- FÚLFARO, V.; PONÇANO, W. L.; BISTRICHI, C. A.; STEIN, D. P. Escorregamentos de Caraguatatuba: expressão atual, e registro na coluna sedimentar da planície costeira adjacente. In: **Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia**, 1976. Anais... Rio de Janeiro: ABGE, 1976. v. 2, p. 341-350
- GAO, J. Identification of topography setting conducive to landsliding from DEM in Nelson Country, Virginia, U.S.A. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 18, p. 579-591, 1993
- GARTNER, J. E.; CANNON, S. H.; SANTI, P. M.; DEWOLFE, V. G. Empirical models to predict the volumes of debris flows generated by recently burned in the western U.S. **Geomorphology**, v. 96, p. 339-354, 2008
- GODT, J. W.; COE, J. A. Alpine debris flows triggered by a 28 July 1999 thunderstorm in the central Front Range, Colorado. **Geomorphology**, v. 84, p. 80-97, 2007
- GRAMANI, M. F.; OLIVITO, J. P. R.; AUGUSTO FILHO, O.; MAGALHÃES, F. S.; Análise da potencialidade de geração de corridas de massa nos trechos serranos do duto OSBAT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL, 11, Florianópolis - SC. **Anais...** Florianópolis: CBGE, 2005 (CD-ROM). p. 1 - 15
- GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação**. São Paulo: Editora da USP, 1976. p. 216.
- HASEGAWA, S.; NONOMURA, A.; NAKAI, S.; DAHAL, R. K. Drainage density as rainfall induced landslides susceptibility index in small catchment area. **International Journal Lands and Environmental**, v. 1(1), p. 27-28, 2013
- HELSEN, M. M.; KOOP, P. J. M.; STEIJN, H. V. Magnitude-frequency relationship for debris flows on the fan of the Chalance torrent, Valgaudemar (French Alps). **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 27, p. 1299-1307, 2002
- HUNGR, O.; McDOUGALL, S.; WISE, M.; CULLEN, M. Magnitude-frequency relationships of debris flows and debris avalanches in relation to slope relief. **Geomorphology**, v. 96, p. 355-365, 2008
- HURLIMANN, M.; RICKENMANN, D.; GRAF, C. Field and monitoring data of debris-flow events in the Swiss Alps. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 40, 161-175, 2003
- INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Estudos das instabilizações de encosta da Serra do Mar na região de Cubatão objetivando a caracterização do fenômeno “corrida de lama” e da prevenção dos seus efeitos**. São Paulo, 1987. Relatório 26.258, volume 1.
- INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Reconhecimento, caracterização e monitoramento de locais potencialmente sujeitos a instabilizações na Serra do Mar na área de influência dos diversos Sistemas de Captação e Abastecimento de Água e de Tratamento de Esgoto**. São Paulo, 2002. Relatório 59.123.
- JACKSON, L. E. Debris flows hazard in the Canadian Rocky Mountains. **Geological Survey of Canada**, Paper 86-11, p. 20, 1987
- JAKOB, M. **Morphometric and geotechnical controls of debris flow: frequency and magnitude in southern British Columbia**. (1996). P. 242. Tese (Doutorado em Filosofia) – Departamento de Geografia, Universidade de Columbia Britânica
- JAKOB, M. A size classification for debris flows. **Engineering Geology**, v.79, p. 151- 161, 2005
- KANJI, M. A.; CRUZ, P. T.; MASSAD, F. Debris flow affecting the Cubatão Oil Refinery, Brazil. **Landslides**, vol. 5 (1), p. 71-82, 2008
- KOBIYAMA, M.; GOERL, R. F.; CORRÊA, G. P.; MICHEL, G. P. Debris flow occurrences in Rio dos Cedros, Southern Brazil: meteorological and geomorphic aspects. **WIT Transactions on Engineering Sciences**, vol. 67, p. 77-88, 2010.
- LANA, C. E., ALVES, J. M. P., CASTRO, P. T. Análise morfométrica da bacia do rio do Tanque, MG – Brasil. **Revista Escola de Minas**, v. 54, 2, p. 1-7, 2001

- MASSAD, F., CRUZ, P. T., KANJI, M. A., ARAUJO FILHO, H. A. Comparison between estimated and measured debris flows discharges and volume of sediments. In: **2nd Panamerican Symposium on Landslide e 2º Congresso Brasileiro de Estabilidade de Encosta – COBRAE**, 1997 ABMS/ABGE, Rio de Janeiro, 1997: p. 213-222
- MARCHI, L.; D'AGOSTINO, V. Estimation of debris-flow magnitude in the Eastern Italian Alps. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 29, p. 207-220, 2004
- MELELLI, L.; TARAMELLI, A. An example of debris-flow hazard modeling using GIS. **Natural Hazard and Earth System Sciences**, v. 4, p. 374-358, 2004
- MORISAWA, M. E. Quantitative Geomorphology of some watersheds in the Appalachian Plateau. **Geological Society of American Bulletin**, v. 73, p. 1025-1046, 1962
- NETTLETON, M. I.; MARTIN, S.; HENCHER, S.; MOORE, R. (2005). Debris flow types and mechanisms. In: Winter, M. G.; Macgregor, F.; Shackman (Eds). **Press. Scottish road network Landslides study summary report**, Scottish, p. 1-19.
- PELLEGATTI, C. H. G.; GALVANI, E. Avaliação da precipitação na Serra do Mar-SP em eventos de diferentes intensidade e duração. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, São Paulo, Nº 27, pp. 147 - 158, 2010
- RICKENMANN, D.; ZIMMERMANN, M. The 1987 debris flows in Switzerland: documentation and analysis. **Geomorphology**, v.8, p. 175-189, 1993
- RICKENMANN, D. Empirical relationships for debris flows. **Natural Hazards**, v. 19, p. 47-77, 1999.
- RICKENMANN, D.; WEBER, D.; STEPANOV, B. (2003). Erosion by debris flows in field and laboratory experiments. In: Rickenmann D, Chen C (eds) **Proceedings of 3rd Int. Conf. on Debris-Flow Hazards Mitigation**. Millpress, Davos, pp 883– 894
- ROSS, J. L. S.; MOROZ, I. C. **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo**. Laboratório de Geomorfologia. São Paulo: Departamento de Geografia – FFLCH – USP/ Laboratório de Cartografia Geotécnica – Geologia Aplicada – IPT/FAPESP (Fundação do Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), 1997. (Mapas e Relatórios)
- SANTOS, D. D.; GALVANI, E. Caracterização sazonal das precipitações no município de Caraguatubá – SP, entre os anos de 1943 a 2004. **Revista GEONORTE**, Edição Especial 2, vol. 1, nº5, p. 1196-1203, 2012
- SILVEIRA, C. T.; FIORI, A. P.; FERREIRA, A. M.; GÓIS, J. R.; DE MIO, G.; SILVEIRA, R. M. P.; MASSULINI, N. E. B.; LEONARDI, T. M. H. Emprego de atributos topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacaré, Paraná. **Revista Sociedade e Natureza**, vol. 25 (3), p. 623-639, 2013
- SOUSA, C. R. G. Suscetibilidade morfométrica de bacia de drenagem ao desenvolvimento de inundações em áreas **costeiras**. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 6, 1, p. 45-61, 2005
- TAKAHASHI, T. Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster. **Journal of Natural Disaster Science**, vol. 3, nº 1, p. 57-89, 1981.
- TANG, C.; RENGERS, N.; VAN ASCH, TH. W. J.; YANG, Y. H.; WANG, G. F. Triggering conditions and depositional characteristics of a disastrous debris flow event in Zhouqu city, Gansu Province, northwestern China. **Natural Hazards and Earth system Sciences**, v. 11, p. 2903-2912, 2011
- TAVARES, R.; SANT'ANNA NETO, J. L.; TOMMASSELLI, J. T. G.; PRESSINOTTI, M. M. N.; SANTORO, J. Análise da variabilidade temporal e espacial das chuvas associada aos movimentos de massa no Litoral Norte Paulista. In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais, 1., 2004, Florianópolis. **Anais... Florianópolis: GEND/UFSC**, 2004. p. 680-696. (CD ROM)
- UEHARA, K.; HISHITANI, H.; TESUKA, Y.; MASSAD, F.; KANJI, M. A.; CRUZ, P. T.; FILHO, H. A. A. Environment effects os debris flows in Cubatão, São Paulo, Brazil. In: Symposium Brazil-Japan 2008 in Economy,

Science and Technological Innovation, 2008, São Paulo. **Anais...** São Paulo: SBPNA: Associação Brasil-Japão de Pesquisadores, 2008, p. 6 (CD-ROM)

WRACHIEN, D.; MAMBRETTI, S. Assessment of debris flow magnitude in small catchments of the lombardy alps: the Val Gola case study. **Agricultural Sciences**, v. 2, n.1, p. 9-15, 2011

WILFORD, D. J.; SAKALS, M. E.; INNES, J. L.; SIDLE, R. C.; BERGERUD, W. A. Recognition of debris flow, debris flood and

flood hazard through watershed morphometrics. **Landslides**, vol. 1, p. 61-66, 2004

XU, Q.; ZHANG, S.; LI, W. L.; VAN ASCH, T. W. J. The 13 August 2010 catastrophic debris flows after the 2008 Wenchuan earthquake, China. **Natural Hazards Earth system Science**, v. 12, p. 201-2016, 2012

YILDIZ, O. An investigation of the effect of drainage density on hydrologic response. **Turkish Journal Engineering Environment Sciences**. V. 28, p. 85-94, 2004