

O uso de parâmetros morfométricos como potencial indicador de ocorrência de fluxos de detritos no litoral norte de São Paulo

Tulius Dias Nery*

Resumo

O objetivo deste trabalho foi avaliar o papel dos parâmetros morfométricos (areal e linear) (métodos qualitativo), associado com as variáveis de precipitação e concentração de sedimentos (método quantitativo), como indicador do potencial de geração de fluxos de detritos em escala de sub-bacias na Serra do Mar, no Litoral Norte do estado de São Paulo. A aplicação de diferentes cenários de precipitação (60 e 100 mm.h-1) e de concentração de sedimentos (30% e 50%) resultou no aumento de 60% no volume de sedimento em função do acréscimo da intensidade de precipitação. Em relação a concentração de sedimentos, o aumento foi de 71%. Acredita-se que este trabalho possa auxiliar no planejamento dessas sub-bacias e servir como indicador de possíveis ações mitigadoras, minimizando os danos que possam ocorrer próximas ou nas áreas inseridas dentro dessas localidades.

Palavras-chaves: Serra do Mar; Fluxos de detritos; Modelos empíricos.

* Analista Operacional em Geociências, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – Cemaden (tulius.nery@cemaden.gov.br).

The parameters morphometric potential use as indicator of the debris flows occurrence in Costal North of São Paulo

Abstract

The objective of this study was to evaluate the role of morphometric (areal and linear) (qualitative method), associated parameters with the rainfall variables and sediment concentration (quantitative method), as a potential indicator of debris flow scale sub-basins in the Serra do Mar, on the north coast of São Paulo. The application of different scenarios of rainfall (mm/h) and solids concentration (30% and 50%) resulted in 60% increase in sediment volume as a function of intensity of precipitation increase. Concerning sediment concentration, the increase was 71%. It is believed that this work can assist in the planning of that sub-basins and serve as an indicator of possible mitigating actions, minimizing the damage that may occur on or near the areas inserted insides of such sites.

Key words: Serra do Mar; Debris flow; Empirical models.

Introdução

Os fluxos de detritos são processos de grande magnitude associados a ambientes montanhosos e são registrados em diversos lugares do mundo. Eles são considerados fenômenos devastadores devido à sua velocidade e ao seu extenso raio de alcance, bem como aos danos e às fatalidades causados por estes processos (DOWLING e SANTI, 2014).

Os fluxos de detritos estão condicionadas a ocorrência de um ou mais escorregamentos e/ou devido à inundação do canal permitindo o deslocamento de sedimentos de diâmetros variados por grandes distâncias (TAKAHASHI, 1981; RICKNMANN e ZIMMERMANN, 1993). Estudos em diferentes partes do mundo verificaram que a concentração de sedimentos ou de sólidos, ou

seja, a fração sedimentar das corridas de detritos, obtida por meio de observações realizadas nos depósitos destes processos, pode variar entre 10% a 90% (COSTA, 1984; DAVIES et al., 1992; WHIPPLE e DUNNE, 1992; RICKNMANN e ZIMMERMANN, 1993; JISHAN e TIANCHI, 2001; GODT e COE, 2007 entre outros). Esta variação granulométrica pode interferir no impacto que estes processos podem causar permitindo, por exemplo, danos parciais ou totais nas infraestruturas (GRAMANI et al., 2005).

No entanto, pesquisas a respeito desta dinâmica são restritas, direcionadas, em sua maior parte, a eventos de grande magnitude (Pellerin et al., 1997; Avelar et al., 2006; Kobiyama et al., 2010; Gramani, 2015), e/ou quando atingem e danificam infraestruturas (vias de circulação, estradas férreas, oleodutos, adutoras, etc.) (KANJI et al., 2008; GRAMANI, 2013).

Ainda, o pouco conhecimento da dinâmica destes processos pode ser decorrente da dificuldade de obtenção de dados inviabilizando a construção de um banco de dados, bem como, devido as suas características de deflagração, muitas vezes, ocorrendo em locais de difícil acesso. Consequentemente a estas implicações métodos qualitativos e quantitativos vêm sendo empregados com intuito de compreender estes fenômenos. Tais métodos levam em consideração as variáveis morfométricas da bacia, a intensidade de precipitação, os aspectos litológicos, entre outros (COROMINAS, 1996; RICKENMANN, 1999; MARCHI e D'AGOSTINO, 2004; WILFORD et al. 2004; GARTNER et al., 2008; KANJI et al. 2008), com intuito de estimar o seu raio de alcance, a sua velocidade, a sua vazão de pico e o volume gerado pelos fluxos de detritos. Em outras palavras, conforme Cannon e Gartner (2005), esta relação entre a vazão, as características da bacia de drenagem e a precipitação pode ser útil na previsão do potencial de geração dos fluxos de detritos.

No Brasil, estes processos ocorrem principalmente na faixa leste continental, mais precisamente no compartimento denominado, de forma geral, de Serra do Mar, abrangendo as regiões Sul e Sudeste. Nestas regiões, a ocorrência destes

processos está associada à intensidade e/ou acumulado de precipitação somada a disponibilidade de material, tanto em suas encostas, quanto nos canais de drenagem.

Pode-se destacar, por exemplo, a porção da Serra do Mar localizada no município de Caraguatatuba (SP), a qual vivencia um ciclo destes fenômenos. Mesmo sendo os escorregamentos os processos mais recorrentes na paisagem, são os fluxos de detritos que causam maiores impactos (perdas e danos) quando da sua ocorrência. Exemplo desta dinâmica foi observado no ano de 1967, quando após meses quase ininterruptos de precipitação, ao longo das bacias que compõem o município, foram deflagrados movimentos de massa generalizados.

No país, os fluxos de detritos vêm recebendo maior atenção nos últimos anos por técnicos e pesquisadores de diferentes áreas, após eventos significativos deflagrados em Santa Catarina (principalmente no Vale do Itajaí, em 2008), Rio de Janeiro (região serrana, em 2011), Paraná (Serra do Mar paranaense, 2011) e São Paulo, este último destacando-se os eventos mais recentes ocorridos em Cubatão (2013) e em Itaóca (2014).

Neste contexto, após sucessivos eventos geodinâmicos, tais como, os fluxos de detritos, tendo como ápice os eventos ocorridos 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 avaliar a suscetibilidade dos desastres naturais, em escala de bacias hidrográficas.

A partir deste cenário, este trabalho objetiva avaliar a influência de parâmetros morfométricos, associado com as variáveis de precipitação e concentração de sedimentos, como indicador do potencial de geração de fluxos de detritos em escala de sub-bacia na Serra do Mar, especificamente em Caraguatatuba (tendo como base o evento de 1967), no Litoral Norte do estado de São Paulo. Devido à forma de ocupação nestas bacias e sub-bacias, principalmente nas zonas de passagem e de deposição dos fluxos

de detritos, há necessidade de estudos que possam direcionar ações voltadas à minimização de desastres e contribuir no planejamento destas áreas.

Área de estudo

O município de Caraguatatuba (Figura 1) é sustentado por rochas metamórficas e ígneas, entre elas, granitos, gnaisses, migmatitos e micaxistos, apresentando relevo dissecado, com encostas íngremes (de declividade média superior a 25°), com altitudes próximas a 1000 m, alta densidade de drenagem e vales encaixados associados as falhas, fraturas e contatos litológicos (ROSS e MOROZ, 1997). O relevo é compartimentado em três setores, como verificado por Cruz (1974): planalto, escarpa e planícies litorâneas. Estes dois últimos compartimentos apresentam maior relevância na ocorrência dos movimentos de massa, entre eles, os escorregamentos e os fluxos de detritos, na Serra do Mar, pois caracterizam a zona de iniciação e de eposição destes processos.

A precipitação média anual em Caraguatatuba é de 1784 mm (SANTOS e GALVANI, 2012). De forma geral, o Litoral Norte de São Paulo possui alta variabilidade de precipitação, principalmente entre os meses de fevereiro e março, conforma Tavares et al. (2004). Segundo os autores, o município de Caraguatatuba apresenta uma menor variabilidade de precipitação, em relação aos demais municípios do Litoral Norte, devido a sua posição geográfica, mais recuada, que ameniza o efeito na relação da circulação atmosférica com a orografia, resultando nas sombras de chuva (TAVARES et al., 2004).

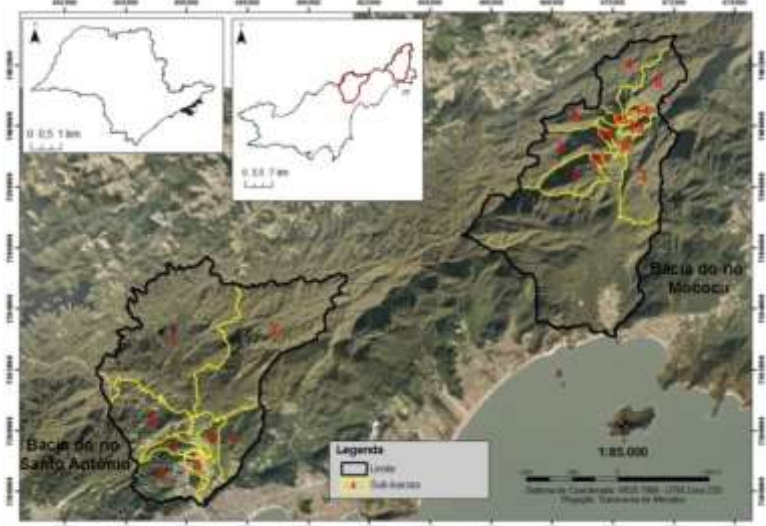


Figura 1: Localização das bacias dos rios Santo Antônio e Mococa, em Caraguatuba (SP).

Materiais e métodos

Para o estudo foram selecionadas as bacias hidrográficas dos rios Santo Antônio e Mococa, com aproximadamente 40 km² de área, localizadas na parte central e norte do município (Figura 1), devido ao comportamento diferenciado na ocorrência dos fluxos de detritos para o ano de 1967.

A partir da escolha destas bacias selecionou-se respectivamente, 8 (oito) sub-bacias do Santo Antônio e 12 (doze) sub-bacias do rio Mococa para a análise qualitativa e quantitativa quanto ao potencial de geração de corridas.

Parâmetros morfométricos

Os parâmetros morfométricos foram obtidos por meio do Modelo Digital de Terreno disponibilizado pela Empresa Paulista

NERY, T.D. O uso de parâmetros morfométricos como potencial ...

de Planejamento Metropolitano (EMPALSA; Contrato de Licença de Uso – CLU N° 049/14), em escala de 25m² e resolução de 1 m.

Por meio do sistema TerraHidro aplicou-se uma rotina para a extração da rede de drenagem e, posteriormente a aquisição das variáveis utilizadas na análise dos fluxos de detritos: a área da bacia (km²), que apresenta alta correlação com a vazão e o volume de sedimentos; a amplitude da bacia (m), que indica a energia potencial necessária para o escoamento do material; o comprimento do canal (km), que corresponde ao trecho em que o fluxo de detritos pode se desenvolver; a declividade média do canal (°), podendo indicar que quanto maior a declividade, maior será o fluxo da corrente; o índice de circularidade (adimensional), que corresponde ao tempo de concentração do escoamento dentro da bacia; e a densidade de drenagem (km/km²), este podendo contribuir na vazão e no potencial de inundação. Estas variáveis foram pautadas nos trabalhos de Augusto Filho (1993), Jackson (1987), IPT (2002), Coe et al. (2004), Wilford et al. (2004), Hajam et al. (2013) entre outros.

Modelos empíricos e Parametrização de modelos

A partir da aquisição de dados de entrada foram selecionados dois modelos empíricos de vazão de pico e volume total de sedimentos.

Para avaliar a vazão de pico dos fluxos de detritos o modelo escolhido para a análise foi o proposto por Araya Moya (1994) e modificado por Massad et al. (1997). A modificação no modelo corresponde na substituição da variável de precipitação em 24 horas (I_{24}) pela intensidade de precipitação horária (I_1), pois segundo Massad et al. (1997) a intensidade de precipitação antecedente ao evento é mais significativa na ocorrência dos fluxos de detritos na Serra do Mar, em São Paulo (Equação 1).

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

Onde c é a concentração de sedimentos, por unidade de volume (m^3), 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 do canal (km).

Para estimar o volume total de sedimentos das corridas de detritos, adotou-se o modelo de Takahashi (1991). Este modelo foi construído por meio de observações a respeito dos fluxos de detritos em diferentes regiões do mundo, e é representado pela Equação 2:

$$V_T = 500 \cdot q_T \text{ Eq. 2}$$

Onde, V_T , é o volume total de sedimentos, em m^3 ; q_T é a vazão de pico do processo (m^3/s).

Para avaliar o potencial de fluxo de detritos foram empregados diferentes valores de concentração de sedimentos e de intensidade de precipitação para a composição dos cenários. Os valores de concentração de sedimentos (c) foram obtidos na literatura por meio de observações de campo e em laboratório e varia entre 10% a 90% (COSTA, 1984; DAVIES et al., 1992; WHIPPLE e DUNNE, 1992; RICKNMANN e ZIMMERMANN, 1993; COUSSOT e MEUNIER, 1996; JISHAN e TIANCHI, 2001; GODT e COE, 2007; UEHARA et al., 2008; entre outros). Com o intuito de compreender o seu comportamento, no caso, o volume dos fluxos de detritos foram aplicados dois valores de concentração de sedimentos, de 30% e 50%, como propostos por Gramani et al. (2005) e Kanji et al. (2008). Segundo Gramani et al. (2005), a concentração de 30% representara os sedimentos grossos e que seriam responsáveis pela destruição das infraestruturas localizadas nas áreas onde ocorrem a passagem dos fluxos de detritos. Em contrapartida, o valor de 50%, proposto por Kanji et al. (2008) corresponde à toda fração sedimentar do fenômeno, não distinguindo o diâmetro destes sedimentos.

A variável climática foi obtida por meio da retroanálise feita por IPT (2002) em função da análise da série histórica de precipitação da Baixada Santista e Litoral Norte de São Paulo

NERY, T.D. O uso de parâmetros morfométricos como potencial ...

associada à ocorrência de eventos de fluxos de detritos. Neste estudo, verificou-se que as ocorrências destes processos na Serra do Mar, em São Paulo, estavam associadas a intensidades de precipitação de 60 mm.h-1 e 100 mm.h-1, correspondendo a tempos de retorno de 10 e 100 anos (IPT, 2002). Este tipo de análise também foi observado por Staley (2013) em estudos realizados na Califórnia, EUA.

O Quadro 1 apresenta as condições iniciais para a análise quantitativa para a obtenção dos valores estimados de vazão e volume total de sedimentos.

Quadro 1: Informações para a análise qualitativa e quantitativa das corridas de detritos.

Parâmetros	Forma de aquisição	Unidade
Área	SIG	km ³
Amplitude	SIG	m
Comprimento do canal	SIG	km
Ângulo da encosta	SIG	°
Densidade de drenagem	Excel	km.km-2
Índice de circularidade	Excel	adimensional
Concentração de sedimentos*	Gramani et al. (2005);	%
	Massad et al. (1997),	
Precipitação (Cenário)	IPT (2002).	mm.h-1

Ressalta-se, que o presente artigo embasou-se no evento de 1967, em Caraguatubá, em São Paulo e, portanto, somente foram avaliadas as sub-bacias que foram identificadas a ocorrência de escorregamentos e fluxo de detritos. Neste contexto, 8 de 9 sub-bacias do rio Santo Antônio e 12 de 36 sub-bacias do rio Mococa foram selecionadas para a análise qualitativa e quantitativa.

Resultados e discussões

Análise Qualitativa – Parâmetros e Índices morfométricos

Os resultados dos parâmetros morfométricos das 20 sub-bacias selecionadas podem ser observados nas Tabelas 1 e 2. Os resultados indicam, para as sub-bacias selecionadas, os parâmetros e índices morfométricos que apresentam ou não condições, de contribuir na deflagração dos fluxos de detritos nas bacias do Santo Antônio e Mococa, tomando como cenário, o evento de 1967 em Caraguatatuba (SPS).

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

Sb	Á	Amp	CRP	IC	DD	DMC
1	13,8	810	8,2	0,29	3,6	5,05
2	10,9	790	8,2	0,34	4,2	6,04
3	0,69	380	2,7	0,22	4,8	5,65
4	0,96	310	1,5	0,39	4,5	8,77
5	3,9	750	3,7	0,48	3,8	10,36
7	2,3	340	2,9	0,55	4,3	6,36
8	0,3	10	1,3	0,32	6,1	0,43
9	2,8	570	2,6	0,53	3,6	8,08

SB: Sub-bacias; A: Área (km²); Amp: Amplitude (m); CRP: Comprimento do rio principal (km); IC: Índice de circularidade (adm); DD: densidade de drenagem (km.km-2); DMC: Declividade média do canal principal (°).

A área destas sub-bacias variou entre 0,3 e 13,8 km², sendo os fluxos de detritos ocorridos nas sub-bacias 1, 2 e 5 da bacia do rio Santo Antônio e nas sub-bacias 3 e 5 do rio Mococa. Na literatura, a ocorrência desses fenômenos está condicionada a bacias inferiores a 10 km² (Mizuyama, 1982) e acima destes valores a sua ocorrência pode estar associada a outros processos, por exemplo, os escorregamentos (JAKOB, 1996). Neste sentido, a

NERY, T.D. O uso de parâmetros morfométricos como potencial ...

compreensão destes processos é mais significativa, pois a relação entre a produção e a vazão de sedimentos, em escala de sub-bacias, ocorre de forma igualitária, em detrimento aos escoamentos das grandes bacias, principalmente os sedimentos mais grosseiros (MIZUYAMA, 1982; JACKSON, 1987). Ressalta-se, que em todas estas sub-bacias foram observadas cicatrizes de escorregamentos, porém não foi observado o desenvolvimento dos fluxos de detritos.

Tabela 2: Parâmetros morfométricos das sub-bacias selecionadas do rio Mococa.

Sb	A	Amp	CRP	IC	DD	DMC
3	4,1	860	4,2	0,47	4,07	9,17
4	2,9	620	4,5	0,34	3,8	6,80
5	2,8	730	3,8	0,38	3,7	9,96
6	2,2	600	3,4	0,40	3,7	8,51
7	1,9	770	2,4	0,60	4,3	11,78
9	1,3	560	2,7	0,36	3,2	10,68
13	0,41	570	1,1	0,55	3,5	16,21
14	0,33	510	1,2	0,41	3,8	20,47
17	0,23	370	0,80	0,46	5,2	15,33
21	0,17	600	0,73	0,38	5,09	12,28
22	0,13	340	0,42	0,57	3,4	12,03
33	0,12	430	0,55	0,45	5,2	20,86

SB: Sub-bacias; A: Área (km²); Amp: Amplitude (m); CRP: Comprimento do rio principal (km); IC: Índice de circularidade (adm); DD: densidade de drenagem (km.km-2); DMC: Declividade média do canal principal (°).

Em relação à amplitude, estudos apontam que quanto maior a amplitude, maior será a energia potencial para o escoamento do material dos fluxos de detritos (IPT, 2002). Jackson (1987) aponta

que bacias favoráveis ao desenvolvimento destes processos são aquelas com valores superiores a 500 m: sub-bacias 9, 5, 2 e 1 (Santo Antônio) e as sub-bacias 14, 9, 13, 6, 21, 4, 5, 7 e 3 (Mococa). Considerando a declividade média do canal, as sub-bacias 5 (Santo Antônio) e 14, 13, 21, 7 e 9 (Mococa) apresentam maior potencial para a geração dos fluxos de detritos, pois este parâmetro influencia na capacidade de erosão e na (re) mobilização do material depositado ao longo da rede de drenagem (AUGUSTO FILHO, 1993). Contudo, outras sub-bacias, com amplitudes inferiores a 500 m mas com alto índice de declividade média do canal, também podem apresentar condições para a geração destes processos, sendo os casos das sub-bacias 33, 17 e 22 do rio Mococa.

Em contrapartida, quanto maior a declividade média do canal menor a probabilidade de deposição no leito em relação à extensão do canal, pois, segundo IPT (2002), quanto maior for o comprimento do canal, maior será o escoamento superficial e maior será a probabilidade de transporte e acúmulo de sedimentos em seu leito. Como observado na Tabela 2, os maiores valores de declividade foram associados à sub-bacias com comprimento de canal inferior a 1,2 km, indicando que nestes canais pode haver uma menor taxa de deposição e um maior escoamento dos sedimentos para os canais subsequentes.

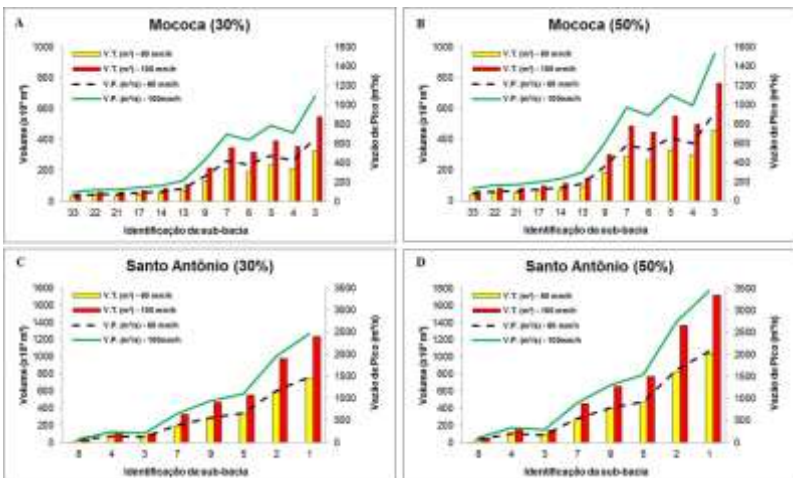
Sub-bacias com índices de circularidade próximo a 1 apresentam baixo tempo de concentração, indicando uma maior probabilidade de cheia do canal e podendo contribuir com a ocorrência das corridas de detritos, sem a necessidade da deflagração dos escorregamentos. Áreas nestas condições foram associadas às sub-bacias 7 e 9 (rio Santo Antônio) e 13, 22 e 7 (rio Mococa), porém para o evento de 1967 não foi observado a ocorrência dos fluxos de detritos nestas sub-bacias. Em contrapartida, estes processos foram observados nas sub-bacias 1, 2 e 5 (Santo Antônio) e 3 e 5 (Mococa), todas com índices entre 0,3 e 0,48, porém associadas com índices de densidade de drenagem entre 3 e 4.

Segundo Gartner et al. (2008) um alto valor de densidade de drenagem pode aumentar a magnitude do fluxo de detritos. Sobre este índice, Hajam et al. (2013) afirmaram que este parâmetro pode determinar o tempo de deslocamento do fluxo e, conseqüentemente o controle do escoamento superficial da água e dos sedimentos. De fato, isso pode explicar a ocorrência destes processos nestas sub-bacias, que somado à intensidade de precipitação, contribuiria para a elevação destes rios, permitindo escoar todos os sedimentos, provenientes das encostas e, principalmente do próprio canal.

Análise Quantitativa - Potencial de geração de sedimentos

Os resultados obtidos pelos modelos empíricos considerando os cenários de intensidade de precipitação (60 mm.h-1 e 100 mm.h-1) e de concentração de sedimentos (ϵ) (30% e 50%) resultaram em uma diferença de 60% e 71%, respectivamente (Figura 2).

Figura 2: Gráfico de vazão (V.P.) e volume de sedimentos (V.T.) em função da concentração de sedimentos.



Sub-bacias com áreas inferiores a 1 km² em relação ao cenário de 60 mm.h-1 e com concentração de sedimentos de 50% podem gerar volumes de sedimentos de até 100.550 m³. Considerando a mesma concentração de sedimentos, porém com precipitação de 100 mm.h-1, estas mesmas áreas gerariam volumes de sedimentos de até 167.583 m³. Estes volumes decrescem com a alteração da concentração de sedimentos (30%), passando a volumes de sedimentos máximos para o cenário de 60 mm.h-1 e 100 mm.h-1 de 71.821 m³ e 119.702 m³, respectivamente.

As sub-bacias entre 2 e 3 km² e concentração de sedimentos de 50%, tiveram os volumes de sedimentos variando entre 200.000 m³ e 400.000 m³ para o cenário de 60 mm.h-1 e entre 440.000 m³ e 652.000 m³ para o cenário de 100 mm.h-1. Em relação a concentração de sedimentos de 30% estes intervalos variaram entre 190.000 m³ e 280.000 m³ (cenário de 60 mm.h-1) e entre 317.000 m³ e 466.000 m³ (cenário de 100 mm.h-1).

As sub-bacias com áreas superiores a 10 km² foram somente identificadas na bacia do rio Santo Antônio. O volume de sedimentos gerados por estas sub-bacias para a concentração de sedimentos de 50% variou entre 820.803 m³ e 1.033.689 m³ (cenário de 60 mm.h-1) e 1.368.005 m³ e 1.722.815 m³ (cenário de 100 mm.h-1). Estes valores, como apontado anteriormente, representaram uma diferença de 71,4% em relação à concentração de sedimentos de 30%.

Esta diferença na concentração de sedimentos, 30% e 50%, pode indicar o comportamento dos fluxos de detritos, contribuindo, por exemplo, no seu raio de alcance e no seu poder de impacto. Como verificado por Gramani et al. (2005) uma concentração de sedimentos de 30% seria responsável por maiores danos às infraestruturas, por exemplo, os oleodutos e estações de captação de água localizados na Serra do Mar. Acredita-se que a trajetória destes materiais grosseiros seja reduzida ao longo do canal, associada também à diminuição da declividade média do canal ou até mesmo pela presença de rupturas contribuindo na acumulação destes e, escoando, assim, os sedimentos menos grosseiros. No

entanto, estes mesmos materiais podem contribuir em eventos futuros aumentando, assim, o poder de impacto destes processos. Salienta-se que este comportamento é inerente às particularidades de cada sub-bacia aqui analisada, ou seja, a disponibilidade de material proveniente dos escorregamentos e/ou disponíveis ao longo da rede de drenagem, deve ser considerada na análise.

Portanto, acredita-se que a adoção de 50% de concentração de sedimentos seja responsável por danos maiores, visto que, incorpora sedimentos de diâmetros variados e que são capazes de deslocarem-se até regiões mais planas. Exemplos desta dinâmica foram observados por Cruz (1974), Kanji et al. (2008) e Gramani (2013), os quais relataram a inundação de bairros e destruição de casas e pontes, bem como, a interrupção do Pólo Industrial e o corte no abastecimento de água a jusante das bacias na Serra do Mar, em Caraguatatuba e em Cubatão.

Conclusões

Os métodos qualitativos e quantitativos aplicados em escala de sub-bacias em relação aos fluxos de detritos permitiram identificar as áreas com maior capacidade de geração de volumes de sedimentos.

O método qualitativo apontou que sub-bacias com áreas inferiores a 3 km², amplitudes superiores a 500 m e índice de circularidade superior a 0,5 podem apresentar maiores condições na geração das corridas de detritos. Para o evento de 1967, o índice de circularidade não apresentou nenhuma relação com a deflagração destes processos, visto que, não foi identificado a presença destes processos nas sub-bacias com os maiores valores para este índice. No entanto, ressalta-se que estes parâmetros são apenas um indicativo, pois outros fatores também podem influenciar na ocorrência destes processos, inclusive nas demais sub-bacias que não apresentaram estas características.

O método quantitativo (modelo empírico) identificou que a intensidade de precipitação e a concentração de sedimentos

influenciaram de forma significativa o volume de sedimentos gerados. Em relação à intensidade de precipitação houve um aumento de 60% no volume de sedimentos entre os cenários propostos. Quando analisados em função da concentração de sedimentos verificou-se que o volume de sedimentos aumentou 71%. Ressalta-se, que a concentração de sedimentos observados na literatura diz respeito aos depósitos, ou seja, aqueles localizados ao longo do canal e aos leques aluvionares localizados nas áreas mais planas da bacia e, para uma melhor avaliação destes processos, bem como, dos modelos empíricos, observações a respeito desta variável devem levar em consideração os depósitos ao longo de toda trajetória.

Os resultados aqui encontrados podem subsidiar estudos de planejamento minimizando possíveis danos e/ou perdas de vidas, bem como, de infraestruturas localizadas dentro ou próximas das áreas onde as corridas de detritos se desenvolvem. Além disso, dados obtidos em campo podem auxiliar na calibração dos modelos empíricos, permitindo uma análise mais crítica dos resultados.

Agradecimentos

O autor agradece as contribuições de Marcelo Gramani, Milton Kanji, Claudinei T. Silveira pelas discussões ao longo da construção desta pesquisa.

Referências bibliográficas

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

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*,

NERY, T.D. O uso de parâmetros morfométricos como potencial ...

7., 1993, Poços de Caldas. Anais, Poços de Calda: ABGE, 1993, vol. 2, p. 63-72.

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

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.

CANNON, S.H., GARTNER, J.E. (2005). **Wildfire-related debris flows from a hazards perspective** In: Hungr, O., Jakob, M. (Eds.), **Debris-flow Hazards and Related Phenomenon**. Praxis PublishingLtd, Chichester, UK, p. 1-17.

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., and Fleisher, J. P., (eds.), **Developments and applications of geomorphology**, New York: Springer-Verlag. p. 268-317, 1984

NERY, T.D. O uso de parâmetros morfométricos como potencial ...

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.

DOWLING, C. A.; SANTI, P. M. Debris flows and their toll on human life: a global analysis of debris-flow fatalities from 1950 to 2011. **Natural Hazards**, v. 71, p. 203-227, 2014.

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.

NERY, T.D. O uso de parâmetros morfométricos como potencial ...

GRAMANI, M. F. A corrida de detritos (debris flow) no ribeirão Cágado, Serra do Mar, município de Cubatão, SP. In: *VI Conferência Brasileira de Encostas*, 2013. Anais...Angra dos Reis, Rio de Janeiro: COBRAE, 2013. p. 88-95.

GRAMANI, M. A corrida de massa no córrego Guarda-Mão, município de Itaoca (SP): Impacto e observações de campo. In: *Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental*, 15°, Bento Gonçalves – RS. Anais...Bento Gonçalves: CBGE, 2015 (CD-ROM), p. 1-10.

HAJAM, R. A.; HAMID, A.; BHAT, S. Application of morphometric analysis for geohydrological studies using geo-spatial technology – A case study of Vishav drainage basin. **Hydrology Current Research**, vol 4, nº3, p. 1-12, 2013.

INSTITUTO DE PESQUISA TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO. 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.

JISHAN, W.; TIANCHI, L. **Behaviour and characteristics of debris flows**. in: Tianchi, L., Chalise, S. R., and Upreti, B. N.

NERY, T.D. O uso de parâmetros morfométricos como potencial ...

(eds), **Landslide Hazard Mitigation**, ICIMOD, Kathmandu, p. 203-2014, 2001.

KANJI, M. A.; CRUZ, P. T.; MASSAD, F. Debris flow affecting the Cubatão Oil Refinery, Brazil. **Landslides**, v. 5, p. 71-82, 2008

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.

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.

MIZUYAMA, T. Analysis of sediment yield and transport data for erosion control works. Recent Developments in the Explanation and Prediction of Erosion and Sediment Yield. Proceedings Exeter Symposium, July: 82, **IAHS Publ.**, nº 137, p. 177-182, 1982.

PELLERIN, J.; DUARTE, G. M.; SCHEIBE, L. F.; MENDONÇA, M.; BUSS, M. D.; MONTEIRO, M. A. Timbé do Sul – Jacinto Machado: Avaliação preliminar da extensão da catástrofe de 23-24/12/1995. **Geosul**, v. 12 (23), p. 71-86, 1997.

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.

NERY, T.D. O uso de parâmetros morfométricos como potencial ...

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 Caraguatatuba – SP, entre os anos de 1943 a 2004. **Revista GEONORTE**, Edição Especial 2, vol. 1, nº5, p. 1196-1203, 2012.

STALEY, D. M. Staley, D.M. Emergency assessment of post-fire debris-flow hazards for the 2013 Rim Fire, Stanislaus National Forest and Yosemite National Park, California: U.S. Geological Survey Open-File Report 2013–1260, 11 p., 3 plates. Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/of/2013/1260/> Acesso em: 17/02/2016

TAKAHASHI, T. Estimation of potential debris flows and their hazardous zones: soft countermeasures for a disaster. **Journal of Natural Disaster Science**, v. 3, nº 1, p. 57-89, 1981.

TAKAHASHI, T. **Debris flow**. Rotterdam; Brookfield Published for the International Association for Hydraulic Research by A.A. Balkema: 1991, p. 164

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)

NERY, T.D. O uso de parâmetros morfométricos como potencial ...

WHIPPLE, K. X; DUNNE, T. The influence of debris-flow rheology on fan morphology, Owens Valley, California. **Geological Society of America Bulletin**, v. 104, p. 887-900, 1992.

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.

Recebido em
Aceito em