



INFLUÊNCIA DA MORFOMETRIA DA BACIA HIDROGRÁFICA NOS FLUXOS DE DETRITOS: ANÁLISE COMPARATIVA A PARTIR DE DADOS GEOMORFOMÉTRICOS E PLUVIOMÉTRICOS

Valentina Estefânia Hespanhol Valle ¹
Maria Carolina Villaça Gomes ²

RESUMO

A Região Serrana do estado do Rio de Janeiro (RSRJ) tem um longo histórico de enfrentamento dos efeitos dos movimentos de massa deflagrados por eventos pluviométricos extremos. Em janeiro de 2011, municípios como Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo registraram numerosos escorregamentos e fluxos de detritos (DF). Contudo, em bacias sob mesma precipitação foram registrados DF de diferentes magnitudes, enquanto em outras, submetidas a chuvas menos volumosas, ocorreram DF que mobilizaram expressivo volume sedimentar e com grande raio de alcance. O trabalho objetiva comparar a morfometria das bacias com/sem registro de DF associadas a diferentes volumes pluviométricos relacionados ao Megadesastre de 2011 na RSRJ. Inicialmente, foram delimitadas 22 bacias hidrográficas nos referidos municípios; posteriormente, foram geradas as isoietas do volume acumulado nos dias 11 e 12 de janeiro de 2011. As bacias foram classificadas em três grupos: (G1) bacias com registro de DF de maior magnitude dentro das isoietas críticas; (G2) bacias com registro de DF de maior magnitude fora destas; e (G3) bacias com registro de DF de maior magnitude fora das isoietas mais críticas. Os parâmetros analisados foram: Declividades médias da bacia (S_m) e do canal (S_c), Área (km^2), Área > 25° (%), curvatura, amplitude altimétrica (H_m), Relação de Relevo (R_r), Stream Power Index (SPI), Índice de Circularidade (I_c) e Índice Topográfico de Umidade (ITU). Os resultados mostram que há uma ligeira diferença entre as bacias que não foram atingidas por DF de maior magnitude e aquelas em que foram reportados processos de maior magnitude, sobretudo a H_m . Alguns parâmetros com valores mais críticos (ex. S_m , A25 e R_r) das bacias do G2 podem explicar a ocorrência de DF de maior magnitude fora das isoietas mais críticas do evento de 2011. Espera-se que a inserção da variabilidade pluviométrica na análise morfométrica de bacias hidrográficas sujeitas a fluxos de detritos contribua para a obtenção de resultados que expliquem melhor a variabilidade espaço-temporal destes processos.

INTRODUÇÃO

Os fluxos de detritos constituem-se como importantes processos morfodinâmicos de relevos montanhosos. Por assumir frequência recorrente em ambientes serranos tropicais, notadamente no Brasil, onde há densa ocupação urbana, faz-se necessário o entendimento dos fatores condicionantes para prevenção e mapeamento de risco (AVELAR et al., 2013).

¹ Graduando do Curso de Geografia da Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ; valentinaestvalle@gmail.com

² Professora Adjunta do curso de Geografia Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ; mcarolvg@gmail.com



Sua ocorrência associada a eventos generalizados de movimentos de massa, sobretudo escorregamentos rasos, explica grande parte das pesquisas já realizadas no Brasil, que buscaram identificar os fatores responsáveis por sua iniciação e propagação bem como sua distribuição espacial. Nesse sentido, se, por um lado, as pesquisas buscaram registrar as características pluviométricas do evento deflagrador, a maior parte delas investigou as características geológicas e geomorfológicas das bacias hidrográficas afetadas por fluxos em eventos de grande magnitude.

Entre estas pesquisas, destacam-se trabalhos pioneiros, desde os eventos de 1967 em dois setores da Serra do Mar, na Serra das Araras/RJ (Jones, 1973) e em Caraguatatuba/SP (De Ploey e Cruz, 1979), em 1985 em Cubatão/SP (JICA, 1991; KANJI; CRUZ; MASSAD, 2008), em Timbé do Sul/SC (FARIA et al., 2008) em 2008, no Vale do Itajaí/SC (ex. IPT, 2009), em 2011, na Região Serrana do Rio de Janeiro (ex. Coelho Netto et al., 2011), em 2022, em Petrópolis/RJ (ex. Mendes et al., 2023); e em 2024, em São Sebastião/SP (ex. Bonini et al., 2024) e Rio Grande do Sul (ex. Egas et al., 2025).

Entre esses eventos, cabe destacar que aquele ocorrido na Região Serrana do Rio de Janeiro (RSRJ) foi um marco para os estudos sobre fluxos de detritos no Brasil: (i) o elevado número de mortes associado à sua ocorrência em diferentes municípios; (ii) fluxos com enormes raios de alcance e área de espraiamento; e (iii) iniciação e propagação associada a diferentes mecanismos são algumas das motivações de um número expressivo de trabalhos que culminou com importantes contribuições científicas acerca do tema.

Apesar dos avanços significativos na compreensão da dinâmica dos fluxos em ambiente tropical úmido, no geral as pesquisas dedicaram pouca atenção a canais submetidos aos mesmos índices pluviométricos e que não foram atingidos, buscando, assim, ampliar a discussão acerca do papel dos condicionantes geológico-geomorfológicos.

Entre as razões para isso, deve-se lembrar da carência de dados pluviométricos em grande parte das áreas mais suscetíveis a esses processos. Exceção pode ser feita à RSRJ, que possui uma rede pluviométrica mais representativa de sua área de abrangência, bem como de suas características geomorfológicas. Desta forma, os trabalhos ali conduzidos permitem como que os dados pluviométricos possam ser tratados com maior nível de detalhe, sobretudo de maneira espacializada. Assim, é possível que a delimitação



da área de pesquisa leve em conta a variabilidade do evento pluviométrico e das condicionantes geomorfológicas.

O episódio ocorrido em janeiro de 2011 na RSRJ é considerado o maior desastre associado a movimentos de massa no Brasil (CEMADEN,2015). Municípios como Petrópolis, Teresópolis e Nova Friburgo foram afetados por um enorme número de escorregamentos e fluxos de detritos, resultando em prejuízos econômicos incalculáveis e a perda de mais de 900 vidas.

Pesquisas que investigaram a dinâmica dos movimentos de massa associados a este evento se concentraram sobretudo nas bacias dos rios Cuiabá, em Petrópolis, Príncipe e Vieira, ambos em Teresópolis, e Dantas, em Nova Friburgo (AVELAR et al., 2013; LIMA; FERNANDES; VARGAS JUNIOR, 2020). No entanto, sob mesmos volumes de chuva das áreas atingidas, não houve registro em parte das bacias hidrográficas, da mesma forma que se verificou a ocorrência de fluxos de detritos em bacias sob volumes substancialmente inferiores de chuva. Portanto, este trabalho tem por objetivo comparar a morfometria das bacias com/sem registro de fluxos de detritos associadas a diferentes volumes pluviométricos relacionados ao Megadesastre de 2011 na RSRJ.

METODOLOGIA

A Região Serrana do Rio de Janeiro abrange um segmento central da Serra do Mar no estado, uma das mais expressivas feições geomorfológicas do Brasil, associada a uma margem continental passiva originada durante o rifteamento do Gondwana no Cretáceo (ALMEIDA, 1967). Essa cadeia montanhosa, estendida por aproximadamente 1.500 km desde o Rio de Janeiro até Santa Catarina, é marcada por um relevo dissecado de elevada energia topográfica, com escarpas festonadas, vales encaixados, e uma rede de drenagem densa e hierarquizada, típica de ambientes tropicais úmidos (COELHO NETTO et al., 2013). As amplitudes topográficas ultrapassam 1.000 metros em menos de 5 km horizontais, resultado da interação entre a herança tectônica (ex.: reativação cenozoica de falhas pré-cambrianas) e a dissecação fluvial acelerada (RICCOMINI, 2004).

Do ponto de vista climático, a Região Serrana do Rio de Janeiro enquadra-se no domínio subtropical úmido (Cwa/Cwb na classificação de Köppen-Geiger), caracterizado por estações térmicas bem definidas e precipitação média anual entre 1.500 e 2.000 mm (Pereira, 2018). Além disso, destaca-se a importância do efeito de barreira topográfica



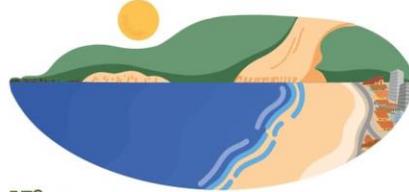
desempenhado pelas escarpas, que condiciona a ocorrência de eventos pluviométricos de alta magnitude e curta duração, com taxas horárias que podem ir além de 100 mm/h em eventos extremos (Mendonça et al., 2020).

O procedimento metodológico desta pesquisa se deu a partir de cinco etapas: (i) definição da área piloto; (ii) espacialização dos dados de chuva; (iii) delimitação de bacias hidrográficas na área pré-definida com base em critérios geomorfológicos; (iv) cálculo dos parâmetros morfométricos; e (v) análise estatística descritiva.

A delimitação espacial resultou na área territorial dos municípios de Petrópolis, Teresópolis, Nova Friburgo e São José do Vale do Rio Preto, considerando os danos provocados pelos fluxos de maior magnitude ocorridos no evento de 2011 (COELHO NETTO et al., 2013). Para analisar a distribuição espacial da precipitação, os dados pluviométricos acumulados nos dias 11 e 12 de janeiro de 2011, coletados em estações distribuídas nos municípios, foram interpolados por meio da média ponderada inversa à distância (*IDW – Inverse Distance Weighting*), atribuindo pesos aos pontos vizinhos em função de sua proximidade. A interpolação foi realizada no software *ArcGIS Pro 3.2*, gerando um mapa de isoietas com 7 classes de precipitação. Para simplificar a análise comparativa, as classes foram reagrupadas em duas categorias: Classe 1: Acumulados \leq 160 mm (valores mais baixos); Classe 2: Acumulados $>$ 249 mm (valores extremos). Essa categorização procurou homogeneizar a variabilidade espacial da chuva, buscando fornecer uma base para agrupamento das bacias hidrográficas a partir destes diferentes volumes de chuva.

Em seguida, foram definidas cinco bacias hidrográficas representativas dos eventos de maior magnitude ocorridos em 2011, sendo elas as bacias dos rios Cuiabá (Petrópolis), Príncipe (Teresópolis), Vieira (Teresópolis), Santa Rita (Teresópolis) e D'Antas (Nova Friburgo), selecionadas a partir de pesquisas que as identificaram registro de corridas de detrito de alta magnitude (ex. DRM (2011), RODRIGUES *et al.* (2011), WALDHERR *et al.*, (2011), LIMA (2013), WALDHERR & TUPINAMBÁ (2014); CONQ *et al.* (2015), LIMA *et al.* (2020)).

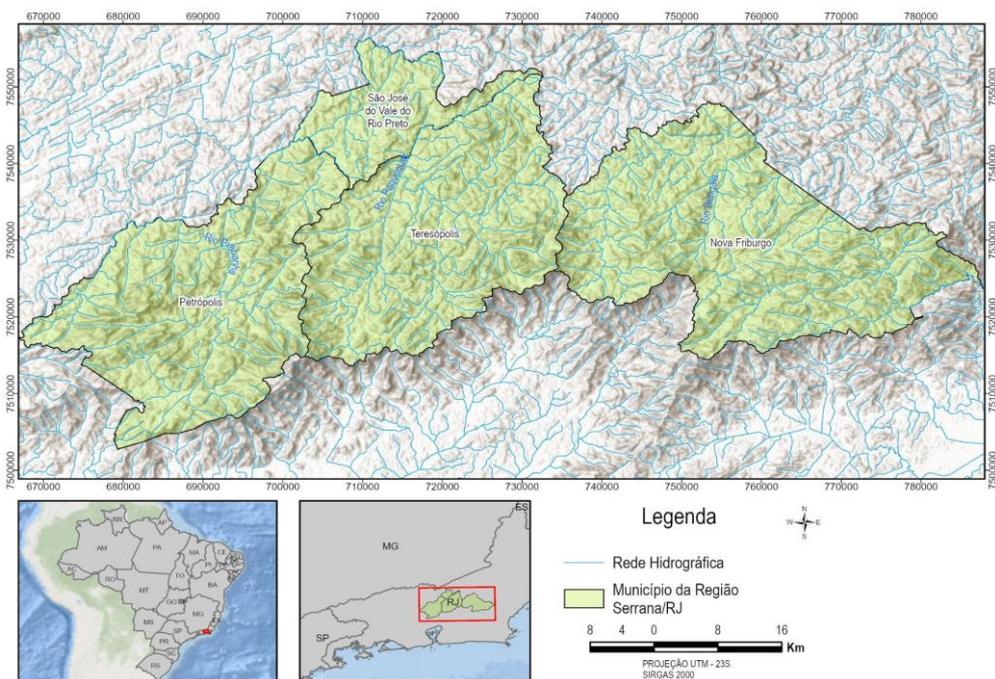
Os critérios adotados para a delimitação das bacias hidrográficas para sua caracterização morfométrica envolveram a ordem hierárquica das bacias afetadas por processos de alta magnitude, levando-se em conta o ponto inicial de espraiamento do material mais fino do depósito das corridas. Para tanto, foi utilizado o mapeamento realizado por Lima (2013) para as bacias do Príncipe, Vieira, Cuiabá e D'antas e, com o



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA

auxílio das imagens de satélites históricas do Google Earth foram identificados os pontos de depósito dos fluxos de corridas ocorrido no vale do rio Santa Rita. Para a determinação da hierarquia fluvial foi empregada a classificação com base na magnitude fluvial de Shreve (1967). Primeiramente, calculou-se a ordem hierárquica média dos pontos de espraiamento nas referidas bacias hidrográficas afetadas por fluxos. Esse valor médio foi então aplicado como critério para delimitar as bacias adjacentes, replicando a mesma magnitude hierárquica como limite superior de análise. Dessa forma, focou-se exclusivamente nos trechos onde ocorreu a iniciação e a propagação dos fluxos.

Figura 1: Localização dos Municípios selecionados da Região Serrana



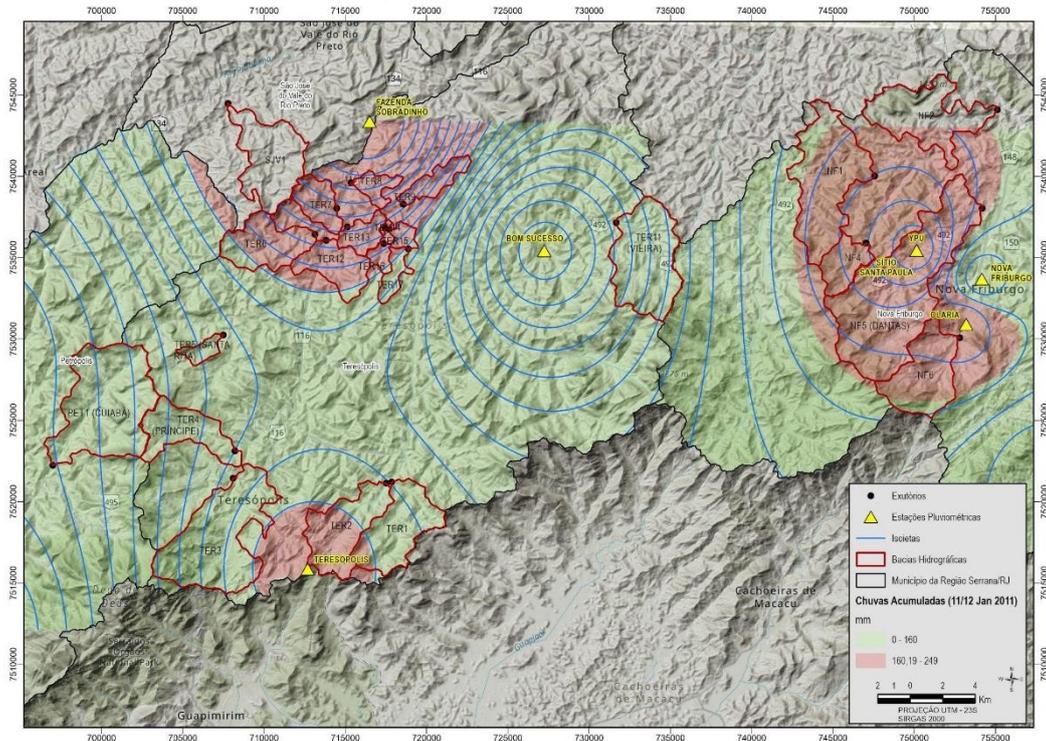
Aqui, foram considerados parâmetros morfométricos amplamente utilizados na investigação dos fluxos de detritos: Amplitude Altimétrica, Declividade Média da Bacia, Curvatura Mínima e Máxima, Área da Bacia, Área acima de 25°, Declividade Média do Canal, Índice de Circularidade, Relação de Relevo, Índice Topográfico médio (ITU), Stream Power Index médio (SPI) e Declividade Máxima da Bacia. A extração e o processamento destes parâmetros foram realizados utilizando o software ArcGIS Pro, versão 3.3 (ESRI), empregando como o Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), com resolução espacial de 30 metros. Para a extração de índices específicos relacionados à rede de drenagem, utilizou-se a base



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA

vetorial de drenagem na escala 1:25.000, disponibilizada pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Posteriormente, os resultados foram comparados a partir de análise estatística descritiva (valores médios, mínimos e máximos).

Figura 2: Delimitação das Bacias baseadas nas isoietas



RESULTADOS E DISCUSSÃO

O Grupo 1 (G1), situado nas áreas de maior precipitação, apresenta configurações morfológicas de alta criticidade: amplitude altimétrica 70% superior à média (1117 m contra 657 m), proporção expressiva de áreas com declividade $>25^\circ$ (25% vs. 20%), formato alongado (circularidade 0.38 vs. 0.48) e grande poder erosivo (SPI 0.8 vs. 0.03). Quanto à curvatura, predominam formas convexas (56%) seguidas pelas côncavas (43%), padrão que se repete nos demais grupos. Estas características, aliadas à extensão areal significativamente maior (49 km² vs. 14 km²), criam sinergia com os elevados índices pluviométricos, potencializando a mobilização e transporte de grandes volumes sedimentares. O elevado SPI em particular evidencia a capacidade dos canais em incisar o substrato e transportar carga detrítica durante eventos extremos.

Tabela 1. Parâmetros Morfométricos utilizados nesta pesquisa

Parâmetros Morfométricos			
Índice (Fonte)	Fórmula	Unidade	Descrição
Amplitude Altimétrica (Jakob, 1996; Kovanen e Slaymaker, 2008; Zhang et al., 2015)	$H_m = H_{max} - H_{min}$ (metros)	metros	Hmax: elevação máxima da bacia Hmin: elevação mínima da bacia
Magnitude Fluvial (Mf) (Shreve, 1966; 1967)	Metodologia de Shreve (1966, 1967)	Ordinal	Estabelece a classificação de determinado canal a partir da soma dos tributários.
Declividade Média da Bacia (Strahler, 1957; ANA, 2020)	-	Graus	Representa a inclinação média do terreno em toda a área da bacia.
Curvatura (Zevenbergen e Thorne, 1987)	-	Graus/ metros	Indica a taxa de mudança da inclinação da vertente.
Área (Horton, 1945)	-	Km ²	Área Planimétrica da Bacia.
Área acima de 25° (Wilford et al., 2004)	-	Porcentagem (%)	Porcentagem da área da bacia acima de 25°.
Declividade Média do Canal (Kanji e Gramani, 2001; Kovanen e Slaymaker, 2008)	-	Graus	Declividade Média do canal principal da bacia.
Índice de Circularidade (Miller, 1953; Crozier, 1986; Augusto Filho, 1993; Paretta e Paretta, 2011; Zhang et al., 2015).	$I_c = 4\pi Ab / Pb^2$	Adimensional	Avalia o grau de semelhança entre o formato da bacia e um círculo perfeito.
Relação de Relevo (Schumm, 1956; Jakob, 1996; Wilford et al., 2004; Chen e Yu, 2011; Zhang et al., 2015).	$R_r = H_m/L_n$	m/km	Quantifica a relação entre o desnível altimétrico total da bacia e seu comprimento axial.
Índice Topográfico de Umidade (Beven e Kirkby, 1979; Chen e Yu, 2011)	$TWI = \log(A \cdot \tan\beta)$	Adimensional	Estimativa da propensão das áreas da bacia à acumulação de água no solo.
Stream Power Index (Moore et al., 1991; Chen e Yu, 2011; Zhang et al., 2015)	$SPI = \log(A \cdot \tan\beta)$	Adimensional	Quantificação da energia erosiva do fluxo de água em uma bacia.

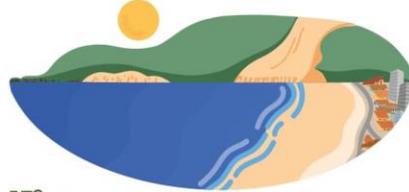
O Grupo 2 (G2) apresenta eventos de magnitude equivalente ao G1 sem a influência dos máximos pluviométricos, reforçando o papel determinante da geomorfologia. Este grupo destaca-se pela combinação de declividades médias superiores (21° na bacia e 13° no canal, contra médias de 18° e 11°), proporção de áreas íngremes ainda maior que o G1 (27% >25°), e relação de relevo excepcional (195 m/km vs. 164 m/km). A curvatura, com 56% convexa e 43% côncava, replica o padrão observado no G1. Apesar de formato menos alongado (circularidade 0.48) e SPI moderado (0.10), estes parâmetros críticos compensam a menor disponibilidade hídrica, demonstrando que bacias com gradientes acentuados e elevada energia potencial (amplitude altimétrica de 927 m) podem deflagrar processos de grande magnitude mesmo sob condições pluviométricas menos extremas. Esta evidência corrobora a ideia de que limiares morfométricos específicos atuam como gatilhos primários para instabilidade geomorfológica.



Em contrapartida, o Grupo 3 (G3) expõe a insuficiência da alta pluviosidade como fator desencadeante na ausência de condições geomorfológicas críticas. Apesar de sujeito aos maiores volumes pluviométricos, suas características morfométricas revelam-se sistematicamente abaixo dos limiares de criticidade: amplitude altimétrica 15% inferior à média (557 m), menor proporção de áreas íngremes (18% >25°), SPI residual (0.01) e relação de relevo reduzida (158 m/km vs. 164 m/km). Nota-se aqui o mesmo padrão de curvatura (55% convexa, 44% côncava). A área média inferior (12 km²) limita a área de contribuição e o volume de sedimentos mobilizáveis, enquanto declividades moderadas (bacia 17°, canal 10°) restringem a aceleração de fluxos. Ainda que o ITU médio ligeiramente acima da média (6,4 vs. 6,3) indique propensão à saturação hídrica, a combinação de menor energia potencial, gradientes suaves e poder erosivo insuficiente, reduz a capacidade de geração de eventos de maior magnitude.

Diante deste cenário, o Grupo 2 (G2) emerge como evidência decisiva para compreensão da gênese de corridas de detrito. A ocorrência de eventos de alta magnitude nessas bacias à despeito da ausência dos maiores volumes pluviométricos – como atestado no evento crítico de 2011 – demonstra que parâmetros morfométricos críticos podem suprir a limitação hídrica na deflagração de processos destrutivos, sendo condicionantes destes eventos. A combinação observada no G2 (declividades médias elevadas [21°], proporção excepcional de áreas >25° [27%], relação de relevo destacada [195 m/km] e amplitude altimétrica expressiva [927 m]) configura um sistema geomorfológico com energia potencial intrínseca suficiente para mobilizar grandes volumes sedimentares mesmo sob condições pluviométricas não extremas.

Este comportamento encontra ressonância no evento histórico de 2011, em que bacias com estas condições morfométricas registraram corridas de grande magnitude fora dos núcleos máximos de precipitação. Tal correlação corrobora o papel crucial das características morfométricas, que atuam como condicionantes primários nos processos geomorfológicos: 1) pela criação de zonas de instabilidade potencial (encostas íngremes); 2) pela geração de energia cinética adequada (gradientes acentuados); e 3) pela garantia de eficiência no transporte (alta relação de relevo). Quando tais limiares são ultrapassados – como no G2 e G1 – a morfologia torna-se fator deflagrador dominante, independentemente da posição relativa aos máximos pluviométricos.



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA

Figura 3: Valores dos parâmetros morfométricos por grupo (G1 em vermelho, G2 em verde e G3 em amarelo) e por bacia hidrográfica.





relativamente arbitrária para a análise comparativa, por outro lado, ressalta a importância da existência de dados pluviométricos para a melhor compreensão da ocorrência destes processos.

Palavras-chave: Corrida de detrito; Magnitude; Serra dos Órgãos.

REFERÊNCIAS

- COSTA, J. E.; WIECZOREK, G. F. (Ed.). Debris Flows/Avalanches: Process, Recognition, and Mitigation. Boulder: Geological Society of America, 1987. 238 p. (Reviews in Engineering Geology, v. VII).
- CRUDEN, D. M.; VARNES, D. J. Landslide types and processes. In: TURNER, A. K.; SCHUSTER, R. L. (Ed.). Landslides: Investigation and Mitigation. Washington: National Academy Press, 1996. p. 36-75. (Special Report 247).
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). Manual técnico de geomorfologia. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 2009. 182 p.
- GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. (Org.). Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos. 9. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2015. 472 p.
- INEA (2010). O Estado do Ambiente. Indicadores Ambientais do Rio de Janeiro 2010. Rio de Janeiro, 2010. p.160
- Tupinambá, M., Heilbron, M., Teixeira, W. (2012). Evolução Tectônica e Magmática da Faixa Ribeira entre o Neoproterozoico e o Paleozoico Inferior na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. Anuário do IGEO UFRJ, 35(2): 140-151.
- Avelar, A.S; Coelho Netto, A.L.; Lacerda, W.A; Becker, L. B.; Mendonça, M.B. (2011). Mechanisms of the Recent Catastrophic Landslides in the Mountainous Range of Rio de Janeiro, Brazil. In: 2nd World Landslide Forum, Roma. Landslide Sci. and Practice. Berlin: Springer-Verlag, 2011. v. 4. p. 265-270.
- AMARAL, C. (2015) Metodologias Brasileiras de Análise de Risco a diferentes tipos de Escorregamentos e sua devida consideração em projetos institucionais nacionais e internacionais. 15º CBGE, Bento Gonçalves, RS, Anais, CD, ABGE.
- WALDHERR, F. R.; TUPINAMBÁ, M.; MOTTA, M.; AMARAL, C.; FRAIFELD, F.; PAIXÃO, R. (2011). Megadesastre '11 Da Serra Fluminense: Zonas De Estrangulamento Durante Corrida De Detritos No Córrego Do Príncipe, Em Teresópolis. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 12, 2011, Nova Friburgo. Anais...Nova Friburgo: SBG, 2011.
- LIMA, I.F. (2013). O Fluxo de massa do Vieira, Teresópolis-RJ, Megadesastre de 2011: Análise das feições sedimentológicas e de sua fenomenologia. 75f. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-graduação em Análise de Bacias e Faixas Móveis, Faculdade de Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2013.
- RODRIGUES, J.C; AMARAL, C.P.; TUPINAMBÁ, M. (2011) Megadesastre '11 da Serra Fluminense: A corrida de massa do Vieira, em Teresópolis – Análise Preliminar Condicionantes Geológicas. In: Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia, 13, 2011, São Paulo. Anais...São Paulo: ABGE, 2011.