

Condicionantes geomorfológicos e da cobertura da terra na ocorrência de movimentos de massa na região serrana do Rio de Janeiro

Geomorphological and cover land conditioning factors of the mass movements in the mountainous region of Rio de Janeiro

Raquel Conceição Carvalho

Licenciada e Bacharel em Geografia – UFF, Brasil
carvalho.raquelc@gmail.com

Cristiane Nunes Francisco

Doutora em Geociências, Professora Associada - UFF, Brasil
cristianenf@id.uff.br

Carla Maciel Salgado

Doutora em Geografia, Professora Associada - UFF, Brasil
carlasalgado@id.uff.br

Resumo

Movimentos de massa são processos de evolução da paisagem condicionados por fatores geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, climáticos e da cobertura vegetal. A região Sudeste do Brasil destaca-se pela ocorrência de eventos catastróficos, pois combina a ocupação das encostas com as características fisiográficas que a deixam altamente suscetível a diferentes tipos de movimentos de massa, destacando-se os escorregamentos translacionais. Embora tenham um importante papel na evolução da paisagem, a ocorrência de movimentos de massa em áreas ocupadas por atividades antrópicas tem gerado inúmeras perdas humanas e prejuízos econômicos. Foi o que ocorreu em janeiro de 2011 na região serrana do Rio de Janeiro, atingida por fortes chuvas que desencadearam eventos de extrema magnitude, e provocaram, além de destruição e morte, marcas profundas (cicatrices) na paisagem que podem auxiliar no estudo dos processos de movimentos de massa. Este trabalho, assim, tem como objetivo analisar as relações espaciais entre a morfologia das encostas e a cobertura da terra com a ocorrência dos movimentos de massa em janeiro de 2011 na região serrana fluminense. Para tanto, foi realizado um estudo na bacia do rio Roncador, Nova Friburgo (Estado do Rio de Janeiro), com a sobreposição entre o mapeamento das cicatrizes, das variáveis morfológicas das encostas e das classes de cobertura da terra. Os resultados mostram que as cicatrizes predominaram em encostas de forma côncava e íngremes, além de cobertas por vegetação densa, corroborando com a literatura que aponta a declividade e a forma da encosta como fatores condicionantes significativos à ocorrência de movimentos de massa, em especial, dos escorregamentos translacionais.

Palavras-chave: escorregamentos translacionais, corridas de lama, sistema de informação geográfica, desastre natural.

Abstract

Mass movements are landscape evolution processes conditioned by geological, geomorphological, hydrological, climatological and land cover factors. Southeastern Brazil is distinguished by the occurrence of catastrophic landslides events, due to the association of land use and physiographic factors which cause high susceptibility to the occurrence of different types of mass movements, mainly translational slides. Although mass movements have an important role in landscape evolution, their occurrence in areas occupied by human activities has generated numerous life

human and economic losses. The mountainous region of Rio de Janeiro, in January 2011, was affected by rainstorms that caused the occurrence of extreme magnitude landslide events, which caused destruction and death as well as deep scars in the landscape, which can contribute to the study of mass movements processes. This paper aims to analyse the spatial relationships between the morphology of the slopes, the land cover and the occurrence of mass movements in January 2011 in the mountainous region of Rio de Janeiro. The study was performed in the Roncador river basin, Nova Friburgo municipality, by overlaying the spatial distribution of landslide scars with morphological variables of the slopes and land cover classes. The results show that the scars predominated on steep and concave slopes covered by dense vegetation, which corroborates the literature that indicates the slope and the curvature as a significant conditioning factor to the occurrence of mass movements, in particular, the translational slides.

Keywords: translational slides, mudflows, geographic information system, natural disaster.

1. INTRODUÇÃO

Movimento de massa é um processo geomorfológico que desloca materiais terrosos encosta abaixo sob a influência da gravidade (SUMMERFIELD, 1991), sendo condicionado por fatores geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, climáticos e da cobertura vegetal (VARNES, 1984). Entretanto, em países com clima tropical úmido, a atuação de intemperismo químico gera materiais pouco coesos e mais suscetíveis aos movimentos de massa.

Embora estes processos tenham um importante papel na evolução da paisagem ao longo do tempo geológico (MEIS e XAVIER-DA-SILVA, 1968; BIGARELLA et al., 2003; FERNANDES et al., 2004; GUZZETTI et al., 2005), a sua ocorrência em áreas ocupadas por atividades antrópicas (rurais e/ou urbanas) tem gerado inúmeras perdas humanas e prejuízos econômicos.

Neste aspecto, destaca-se a região Sudeste do Brasil, onde a combinação de fatores geológicos e geomorfológicos, associada a chuvas intensas de verão, ocasiona vários eventos de movimentos de massa de grandes proporções. Listo e Vieira (2010), por exemplo, reportaram várias ocorrências de escorregamentos translacionais no município de São Paulo (SP), em verões de diferentes anos. Fernandes et al. (2004) analisaram o episódio de fevereiro de 1996, quando houve escorregamentos em série no Maciço da Tijuca, zona Norte do município do Rio de Janeiro. Guerra et al. (2007), por outro lado, relacionaram a expansão urbana do município de Petrópolis (região Serrana do Rio de Janeiro), no século XX, com o aumento de áreas de risco a movimentos de massa.

Os referidos trabalhos ressaltam que as características fisiográficas do Sudeste brasileiro contribuem para a ocorrência de eventos geomorfológicos extremos. Especialmente na região serrana fluminense onde a topografia íngreme, composta por escarpas montanhosas fortemente fraturadas, predominantemente associada a perfis de solos pouco desenvolvidos, e à expansão urbana e econômica, fazem com que esta região seja altamente suscetível aos movimentos de

massa, colocando em risco as áreas ocupadas por atividades antrópicas. Além disso, muitos dos municípios mais atingidos apresentam áreas urbanas densamente ocupadas que se espriam nos fundos dos vales mais amplos e expandem-se em direção às encostas.

As ocorrências de movimentos de massa têm sido estudadas de várias formas, destacando-se nos últimos anos o emprego de geotecnologias, conforme ressalta Alexander (2008). Nesta perspectiva, Silveira et al. (2013) geraram um mapa de suscetibilidade a movimentos de massa, além de inundações, para a bacia do rio Jacareí (situada na Serra do Mar paranaense), realizando análise digital do relevo. Os autores extraíram atributos topográficos considerados significativos para escorregamentos e corridas de detritos, como hipsometria, declividade, curvatura e índice topográfico de umidade. Tais atributos, obtidos a partir de modelo digital do terreno, também podem ser incorporados a bases de dados buscando reproduzir os sistemas ambientais em Sistemas de Informação Geográfica (SIG). Silva et al. (2013), trabalhando na parte insular de Vitória (Espírito Santo), realizaram simulações considerando características geotécnicas e pluviométricas para identificar as áreas mais suscetíveis a escorregamentos.

Considerando o exposto, verifica-se a relevância de ampliar e aprimorar estudos sobre movimentos de massa, especialmente na região serrana fluminense, onde, em janeiro de 2011, ocorreu um grande desastre natural, atingindo principalmente os municípios de Nova Friburgo, Petrópolis e Teresópolis. Neste evento, milhares de pessoas foram afetadas por movimentos de massa e inundações associados, causando a morte de centenas de pessoas, além de grandes prejuízos socioeconômicos. Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo analisar as relações espaciais da morfologia das encostas e da cobertura da terra com as cicatrizes dos movimentos de massa, deflagrados pelos elevados índices pluviométricos ocorridos em janeiro de 2011.

Para atingir tal objetivo foi realizado um estudo na bacia do rio Roncador (Figura 1), situada a noroeste do município de Nova Friburgo (RJ), aplicando recursos de geoprocessamento. O rio Roncador é afluente do rio Grande (importante rio do município e tributário do Rio Paraíba do Sul) e possui uma bacia de 2,5 mil ha, localizada no distrito de Campo do Coelho, em Nova Friburgo, onde predominam as atividades rurais intercaladas com pequenos remanescentes de floresta do bioma Mata Atlântica nas partes mais preservadas.

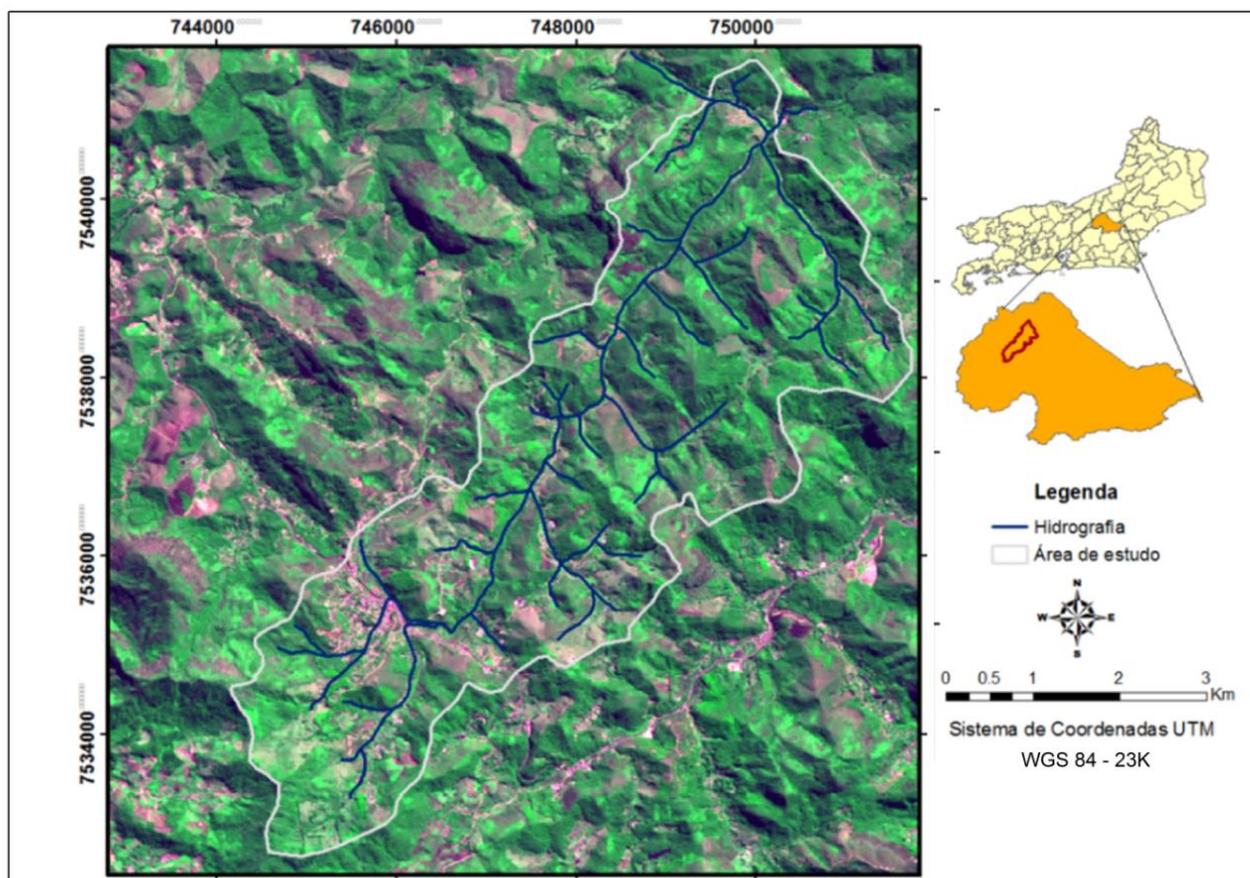


Figura 1 - Localização da bacia do rio Roncador no município de Nova Friburgo/RJ. Imagem ALOS/AVNIR-2. **Fonte:** Os autores, 2018.

1.1. Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Roncador insere-se na porção da Serra do Mar denominada como Serra dos Órgãos, compreendendo uma parte da unidade geomorfológica Planalto do Reverso da Serra dos Órgãos (DANTAS, 2001), caracterizada por um relevo predominantemente montanhoso a escarpado, com altitude média superior a 900 m e, em alguns pontos, ultrapassando 1.300 m. A unidade é composta por rochas graníticas e ortognaisses do Terreno Oriental da Faixa Ribeira, que apresentam diferentes graus de deformação dúctil e rúptil, predominando as direções NW-SE e NE-SW (TUPINAMBÁ et al., 2012).

A cobertura florestal, pertencente ao bioma Mata Atlântica, mantém-se preservada nos terrenos mais íngremes e elevados, devido à difícil acessibilidade, e representa cerca de 60% do território de Nova Friburgo (GARCIA; FRANCISCO, 2013). O sítio urbano, com apenas 3% do município, está instalado em alvéolos intramontanos, enquanto os núcleos agrícolas, característicos da bacia em estudo, concentram-se nos fundos de vales e baixas encostas de relevo menos acidentado (DANTAS, 2007).

Devido às características geológicas e geomorfológicas (declividade e amplitude do relevo altas), além da ocupação das encostas associada à expansão das atividades econômicas, a área em estudo apresenta alta vulnerabilidade a eventos erosivos e movimentos de massa (DANTAS, 2007).

O evento ocorrido em janeiro de 2011, na região serrana fluminense, é considerado como uma das maiores ocorrências de movimentos de massa generalizados do Brasil (DOURADO et al., 2012). Na área mais atingida de Nova Friburgo, correspondendo a bacia do rio Grande, com 34 mil ha, foram registradas cerca de 2,2 mil cicatrizes originárias dos movimentos de massa, somando área de 1,5 mil ha, com tamanho médio de 0,44 ha e desvio-padrão de 1,42 ha, sendo que a de maior extensão alcançou 24,5 ha, representando união de ocorrências e, assim, formando um complexo de cicatrizes (GONÇALVES et al., 2016).

Grande parte dos movimentos de massa foram escorregamentos translacionais associados à concentração pluviométrica, ou corridas de lama associadas à concentração dos fluxos em determinada porção da encosta, normalmente nas linhas de fluxo (COELHO NETTO et al., 2011; AVELAR et al., 2011, PINHO et al., 2013). Pelas imagens de satélite (GeoEye) e visitas a campo, foi possível verificar a predominância destes processos. No caso das encostas, são visíveis cicatrizes longas e rasas, expondo planos de ruptura geralmente guiados pelo substrato rochoso.

Condições climáticas extremas de precipitação acumulada em 24 h foram responsáveis pelo desencadeamento do evento de 2011. No entanto deve-se assinalar a ocorrência de grande quantidade de chuvas anteriores. O Posto Vargem Grande, situado ao sul do município em estudo, totalizou 688 mm de chuva acumulada em 63 dias antecedentes ao evento. A Figura 2 ilustra como a precipitação acumulada de dezembro/2010 e de janeiro/2011 foi muito superior à normal climatológica de Nova Friburgo.

Estudos de Moura (2013), Dourado et al. (2012) e Canedo et al. (2011) demonstraram que a precipitação se comportou de forma anômala em janeiro de 2011, com índices muito acima da média nos dias que antecederam a tragédia, iniciando o encharcamento do solo que, posteriormente, combinada com as chuvas pré-frontais de 11 de janeiro, e a formação de uma cumulus nimbus na madrugada do dia 12, desencadeou os movimentos de massa com chuvas fortíssimas localizadas nas cabeceiras dos vales. De acordo com a Canedo et al. (2011), os eventos pluviométricos ocorridos em janeiro de 2011 foram absolutamente extraordinários. Entre 0 h do dia 11 de janeiro e 7 h do dia 12 de janeiro, ou seja, em 32 horas de chuva, os índices atingiram valores entre 198 a 282 mm em quatro estações pluviométricas localizadas em Nova Friburgo, com intensidade fortíssima durante 4,5 horas na madrugada do dia 12 de janeiro, alcançando volumes superiores, na ordem de 222 a 495%, aos valores mensais registrados no mês de janeiro de 2010 nas respectivas estações (Figura 3).

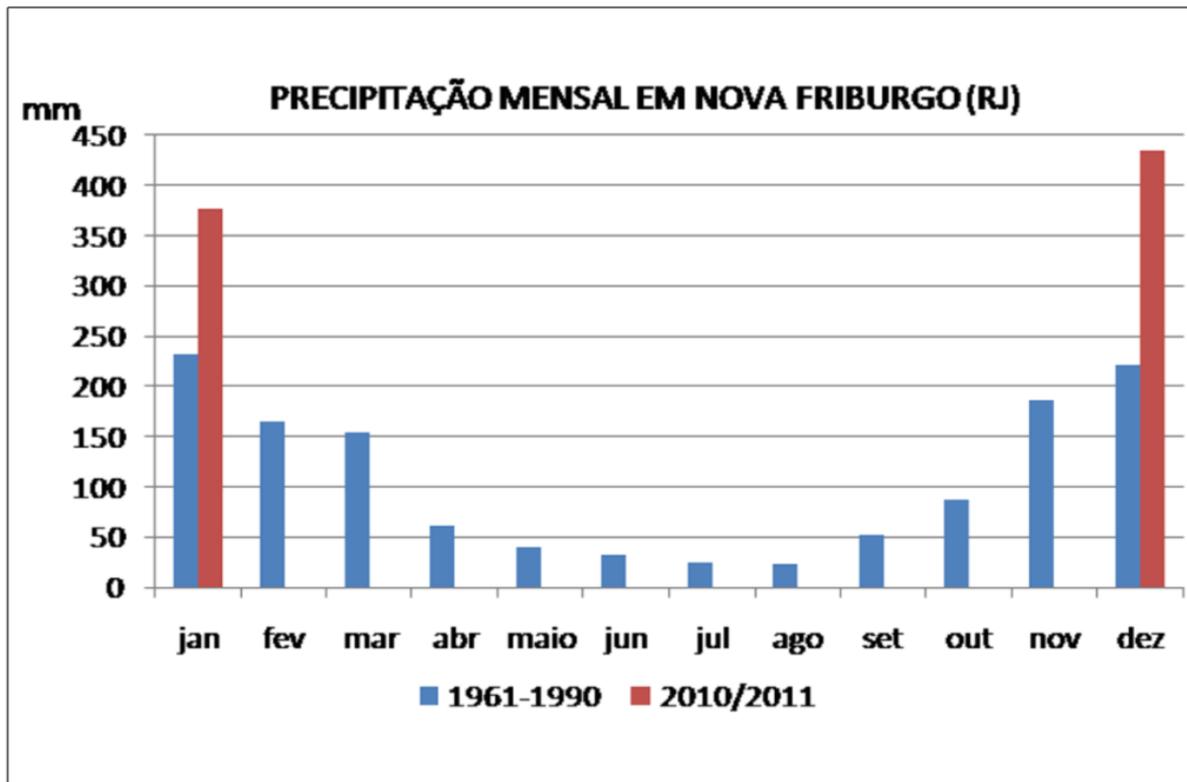


Figura 2 - Normal climatológica da precipitação mensal da estação meteorológica de Nova Friburgo e acumulados pluviométricos de janeiro/2011 e dezembro/2010 da estação de Vargem Grande, Nova Friburgo.

Fonte: Hidroweb – ANA.

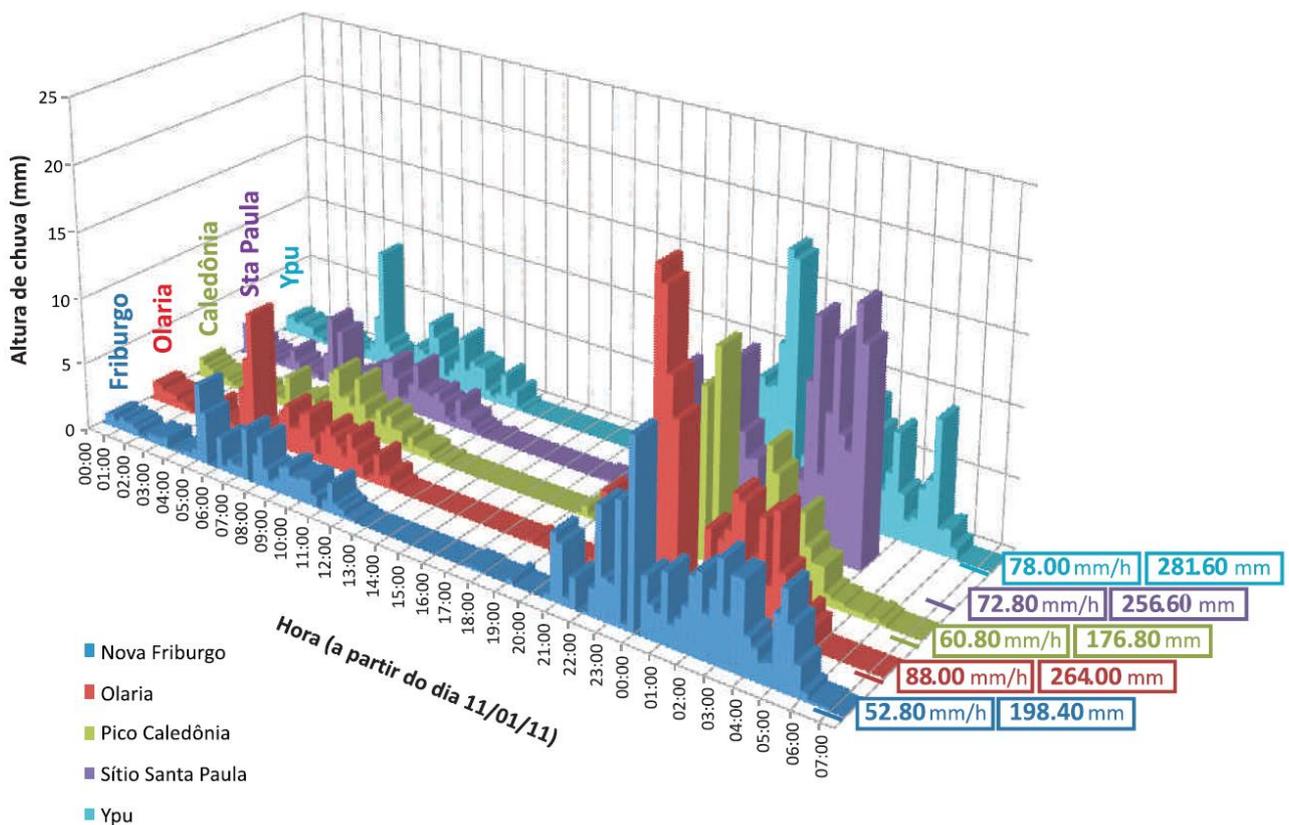


Figura 3 - Precipitação diária acumulada entre os dias 11/01 e 12/01/2012 nas estações pluviométricas de Nova Friburgo, RJ. Fonte: Canedo et al. (2012).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho estruturou-se em duas etapas principais. A primeira consistiu na preparação da base de dados, o que envolveu as seguintes atividades: delimitação da área de estudo, conferência das cicatrizes dos movimentos de massa, conferência do mapa de cobertura da terra, confecção dos mapas de declividade e curvatura das vertentes. A segunda etapa consistiu na análise espacial dos dados por meio da sobreposição entre cicatrizes dos movimentos de massa e as camadas cobertura da terra, declividade e morfologia das vertentes.

A delimitação da bacia hidrográfica do Roncador foi feita com base na interpretação das curvas de nível extraídas do Modelo Digital de Elevação (MDE) TOPODATA (VALERIANO, 2005), derivado da interpolação por krigagem dos modelos gerados pelo SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), o que resultou em resolução espacial de 30 m (VALERIANO, 2005). Como esse modelo apresentava a maior resolução espacial, bem como o melhor desempenho entre os testados em trabalho realizado na APA de Petrópolis por MICELI et al. (2011), com relevo semelhante ao da área em estudo, alcançando PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) compatível à escala 1:50.000 classe B, foi selecionado para ser utilizado neste trabalho. Conjuntamente, para delimitação da área de estudo, foram também utilizadas as imagens ALOS/AVNIR-2, fusionadas à pancromática do ALOS/PRISM, ambas obtidas em agosto de 2009. As imagens ALOS/AVNIR-2 possuem quatro bandas multiespectrais, três da faixa do visível e uma do infravermelho próximo, e resolução espacial de 10m, enquanto a pancromática apresenta resolução espacial de 2,5m.

O mapeamento das cicatrizes dos movimentos de massa, gentilmente cedido pela Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Nova Friburgo (SMMA/NF), foi confeccionado a partir da interpretação visual das imagens GeoEye, disponíveis no Google Earth geradas em 19 de janeiro de 2011, ou seja, oito dias após o evento, em conjunto com imagens GeoEye cedidas pelo INPE logo após o evento pluviométrico.

Este arquivo foi revisado utilizando as mesmas bases do Google Earth, objetivando acrescentar as cicatrizes que não haviam sido vetorizadas, ajustar aquelas cuja forma não estava de acordo com a encontrada na imagem, e editar aquelas cujo polígono incluía também a deposição do material movimentado, consistindo no corte das cicatrizes que ultrapassavam a vertente e continuavam para a área além da ruptura de declive. As cicatrizes foram identificadas pela forma alongada longitudinalmente às encostas e a presença do solo exposto, devido ao curto intervalo de tempo entre a ocorrência e a obtenção da imagem. A principal dificuldade da delimitação consistiu na união de algumas cicatrizes, gerando um complexo de ocorrências, o que impossibilitou a identificação individual.

O mapa de cobertura da terra foi confeccionado por Francisco e Almeida (2012), a partir da classificação por Análise de Imagem Baseada em Objetos Geográficos (GEOBIA - Geographic Object-Based Image Analysis), que consiste na utilização de descritores topológicos e texturais, além dos espectrais, na classificação automática dos objetos (pixels de uma imagem convertidos em segmentos) com base em uma rede semântica, simulando, assim, a interpretação humana. De acordo com as autoras, o banco de dados foi formado pelas bandas multiespectrais ALOS/AVNIR-2 fusionadas à pancromática do sensor ALOS/PRISM, originando resolução espacial de 2,5 m.

A fim de detalhar o mapeamento, foi realizada uma revisão a partir da interpretação visual das imagens disponíveis no Google Earth referentes à data antecedente à ocorrência dos movimentos de massa em janeiro de 2011. O mapa foi composto pelas seguintes classes: vegetação arbóreo-arbustiva, vegetação herbáceo-arbustiva, campo antrópico, reflorestamento, afloramento rochoso, queimadas, áreas agrícolas e área urbana.

Os mapas de morfologia das encostas foram gerados pelo MDE TOPODATA processado no ArcGIS 3D Analyst. O mapa de declividade foi classificado em intervalos iguais de 5° totalizando nove classes entre 0 e 45°. O mapa de geometria das encostas, curvatura horizontal, que corresponde à forma das vertentes na projeção horizontal, ou seja, conforme a perspectiva em planta, foi classificado em três classes de acordo com os intervalos sugeridos por Valeriano (2008), que define o intervalo entre $-0,038^{\circ}/m$ a $+0,051^{\circ}/m$ como terrenos planares (encostas com forma retilínea), enquanto os valores menores correspondem a terrenos com fluxos convergentes (encostas côncavas) e, os valores maiores, a terrenos com fluxos divergentes (encostas convexas).

Com a base de dados concluída, foi estabelecida a relação espacial entre as variáveis morfológicas e a cobertura das encostas com as cicatrizes dos movimentos de massa, a partir da operação de geoprocessamento que gera uma tabulação contendo a sobreposição entre as cicatrizes e os mapas. Com isto, foram calculadas (1) a área das cicatrizes em relação a área de estudo e (2) a razão da área das cicatrizes presentes em uma classe temática e a área da respectiva classe.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na bacia do rio Roncador, observa-se a ocorrência de 343 cicatrizes com área de 213 ha, representando 9% da área de estudo. O tamanho médio das cicatrizes é de 0,62 ha, com desvio padrão de 1,1 ha, enquanto a menor cicatriz apresenta área de $4,3e-03$ ha e a maior 9,7 ha. As cicatrizes se distribuem ao longo de toda a bacia hidrográfica, no entanto, observa-se que há uma concentração ao norte e, principalmente, na porção central desta bacia, onde há presença de complexos de cicatrizes unidas pela convergência de fluxos (Figura 4). Ao sul, onde estão as nascentes da bacia hidrográfica em estudo, as ocorrências foram rarefeitas.

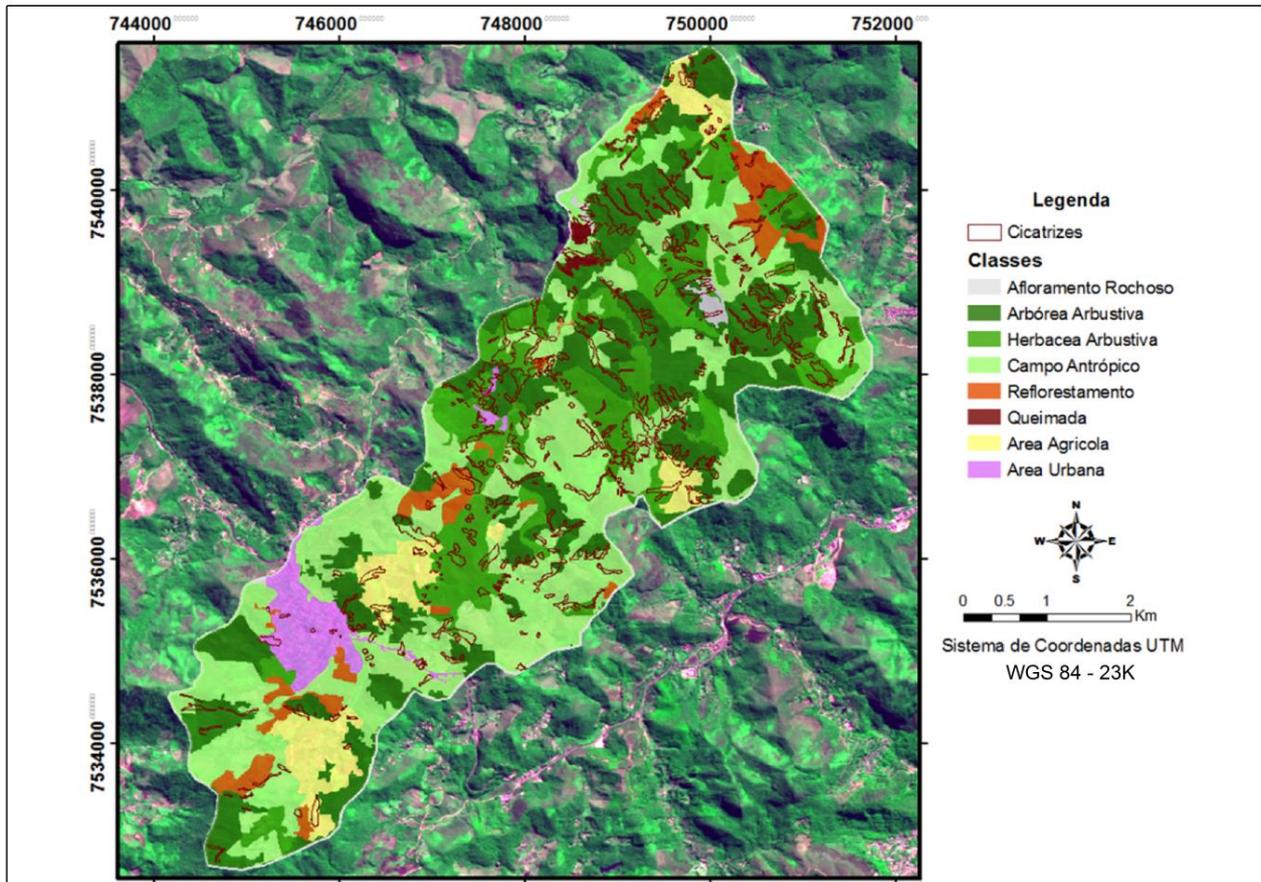


Figura 4 - Mapa da cobertura da terra na bacia do rio Roncador (Nova Friburgo/RJ). Imagem ALOS/AVNIR-2. **Fonte:** Os autores, 2018.

3.1 Cobertura da terra e cicatrizes

De acordo com o mapa de cobertura da terra (Figura 4), o campo antrópico, formado por vegetação rasteira e pela rara e esparsa presença de pequenas manchas de vegetação de porte arbórea e arbustivo, predomina na bacia estudada, representando 37% do total (Tabela 1). A vegetação arbórea-arbustiva ocupa 28% da bacia, e ocorre principalmente em encostas de declive mais acentuado de menor acessibilidade, formada predominantemente por indivíduos de porte arbóreo a arbustivo, sob diversos níveis de influência antrópica, podendo estar associada a um estágio de sucessão ecológica entre médio a avançado. A formação herbácea-arbustiva representa 18%, caracterizada pela predominância de vegetação de porte médio, podendo estar associada a um estágio de sucessão ecológica inicial. A área agrícola, correspondendo a 7% da área de estudo, é formada predominantemente por horticultura. As classes restantes, reflorestamento de eucalipto, área urbana e as queimadas, correspondem a 10 % da área de estudo.

Tabela 1 – Área das classes de cobertura da terra e das cicatrizes dos movimentos de massa da bacia do rio Roncador, Nova Friburgo/RJ.

Classes	Área da Classe		Área da Cicatriz		Área (cicatriz/classe) (B/A) %
	ha (A)	%	ha (B)	%	
Campo Antrópico	914	37	59	28	7
Arbórea Arbustiva	684	28	70	33	10
Herbácea Arbustiva	446	18	53	25	12
Reflorestamento	126	5	8	4	6
Área Urbana	90	4	3	2	4
Afloramento Rochoso	15	1	4	2	24
Área Agrícola	173	7	14	7	8
Queimada	9	0	2	1	18

Fonte: Os autores, 2018.

A sobreposição entre as cicatrizes de movimentos de massa e o mapa de cobertura da terra (Tabela 1) indica que as cicatrizes predominam na vegetação arbórea-arbustiva, correspondendo a 33% da sua área e a 10% da área da respectiva classe, enquanto na vegetação herbácea-arbustiva, a área das cicatrizes apresenta incidência de 25% e corresponde a 12% dessa classe. Embora o campo antrópico predomine na área estudada, 28% das cicatrizes estão aí localizadas e representam 7% da área da respectiva classe.

A presença das cicatrizes na área agrícola, reflorestamento e urbana apresenta valor abaixo de 8% das respectivas classes, ou seja, inferior ao apresentado pela vegetação de médio a alto porte anteriormente analisadas. Por outro lado, a área dos afloramentos rochosos e queimadas com ocorrência das cicatrizes apresenta os maiores valores, acima de 18%, apesar dessas classes cobrirem uma pequena área na bacia do Roncador (total de 1% da área de estudo). Os valores elevados da densidade de cicatrizes nos afloramentos, decorrentes de processos iniciados nos topos das encostas e que, ao deslizar ao longo da encosta, marcaram a rocha, também foram observados por Pinho et al. (2012). De acordo com Coelho Netto et al. (2011), os movimentos de massa nas porções mais elevadas do relevo podem ter sido deflagrados pelos fortes raios que incidiram na região serrana durante a tempestade de janeiro de 2011.

Em geral, a vegetação preservada está situada em áreas menos acessíveis como encostas de alta declividade na bacia em estudo. O cálculo da declividade das classes de cobertura da terra demonstrou que os afloramentos rochosos apresentam a maior média (30°) acompanhados pelas queimadas (23°). Os valores da declividade da cobertura vegetal alternam de 19° a 17°, respectivamente, variando da vegetação de maior porte (arbórea-arbustiva) a menor porte (campo antrópico). Enquanto, as classes agrícola e urbana apresentam os menores valores de declividade média, respectivamente, de 14° e 12°.

Os resultados aqui obtidos demonstram, assim, que a maior ocorrência das cicatrizes está localizada nas classes de vegetação densa, e são semelhantes aos obtidos por Pinho et al. (2012) e Coelho Netto et al. (2011), ambos trabalhos realizados na área atingida pelas chuvas de 2011 em Nova Friburgo. Segundo Bigarella (2003), os movimentos de massa em áreas de floresta estão relacionados, sobretudo, à presença de solos pouco desenvolvidos, encostas de alta declividade e eventos pluviométricos de alta intensidade e concentração espacial. Varnes (1984) corrobora o papel dúbio exercido pela cobertura vegetal na estabilidade das encostas que, dependendo da profundidade do solo, declividade e tipo de vegetação, atua reduzindo a ação dos agentes climáticos ao reter a água da chuva na serrapilheira, eliminar a água pela evapotranspiração, imobilizar grande quantidade de água do runoff e erosão, além do sistema de raízes aumentar a resistência e a coesão dos solos. Por outro lado, afirma que a carga exercida pelas árvores sobre os solos de encostas íngremes e a ação das raízes na ampliação das fraturas e promoção da infiltração deterioram as condições de estabilidade da encosta.

3.2 Declividade e cicatrizes

Em relação à declividade, verifica-se que predomina a faixa entre 10° a 25° na bacia do Roncador, representando cerca de 70% da área de estudo, correspondendo a relevo forte ondulado (Tabela 2). Os intervalos inferiores a 10°, relacionados ao relevo plano a ondulado, e superiores a 25°, referente ao relevo montanhoso, correspondem, cada um, a cerca de 15% da bacia de estudo. Esse quadro indica que o relevo na área de estudo bastante acidentado (Figura 5).

Tabela 2 - Área das classes de declividade e das cicatrizes de movimentos de massa da bacia do rio Roncador, Nova Friburgo/RJ.

Declividade (graus)	Área das classes		Área de cicatriz		Área (cicatriz/classe) (B/A) %
	ha (A)	%	ha (B)	%	
0 a 5	74	3	3	1	4
5 a 10	327	13	21	10	7
10 a 15	496	20	38	18	8
15 a 20	627	25	53	25	8
20 a 25	559	23	47	22	8
25 a 30	288	12	32	15	11
30 a 35	801	3	13	6	16
35 a 40	14	1	2	1	12
40 a 45	1	0	0	0	3

Fonte: Os autores, 2018.

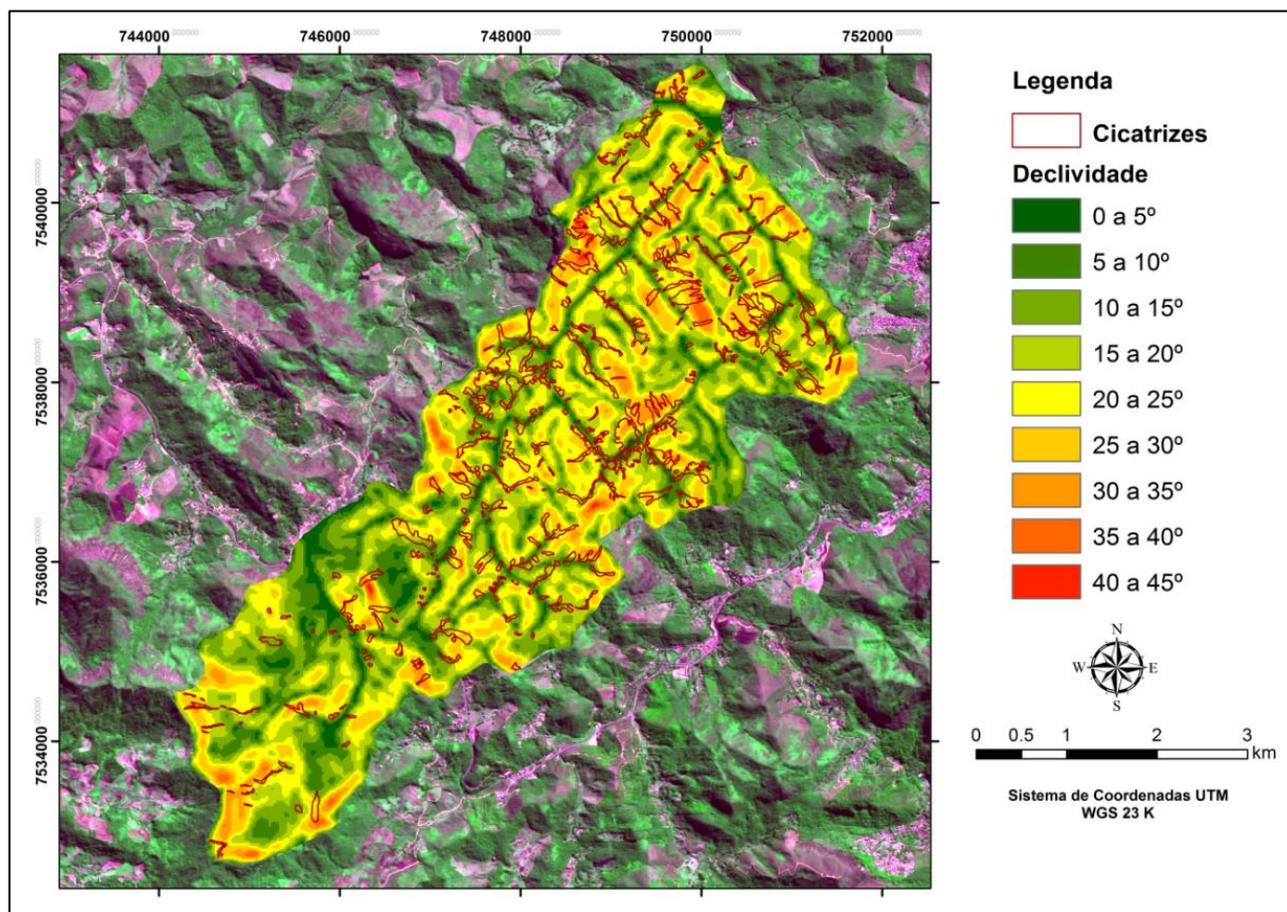


Figura 5 - Mapa de declividade da bacia do rio Roncador, Nova Friburgo/RJ. Imagem ALOS/AVNIR-2. **Fonte:** Os autores, 2018.

A média da declividade das cicatrizes é de 18° , desvio padrão de 6° , com média mínima de 3° e máxima de 33° . A sobreposição entre as cicatrizes e as classes de declividade indica aumento da área das cicatrizes com o aumento da declividade, no entanto na classe de maior declive 40° a 45° , este valor cai, possivelmente, por essa classe não apresentar área significativa na bacia em estudo. As cicatrizes se concentram nas porções de encostas que apresentam inclinações intermediárias, entre 10° a 25° , representando 65% da sua área, valor próximo ao somatório da área no respectivo intervalo que é de 68%. No entanto, na faixa entre 25° e 45° , estão concentradas 22% da área das ocorrências em 16% da área de estudo, fazendo com que a densidade de cicatrizes alcance 16% na faixa entre 35° a 40° .

Os resultados aqui encontrados demonstram que, considerando a densidade por classe temática, a maior ocorrência de cicatrizes nas classes está situada entre 25° e 40° , sendo semelhantes a vários trabalhos já realizados. Francisco (1996), com base no estudo de 67 cicatrizes de eventos ocorridos em 1966 e 1988 no Maciço da Tijuca, identificou que 50% das ocorrências concentravam-se em encostas com declividade entre 25° e 45° . Fernandes et al. (2001), ao testar modelos matemáticos também no Maciço da Tijuca, constatou que maior ocorrência de movimentos de massa era observado com aumento do gradiente de declividade da encosta, com valores extremos

entre 37° e 55°. Regmi et al. (2014), ao analisar 735 cicatrizes no Colorado, EUA, observaram que as cicatrizes predominavam entre 15° e 40°, enquanto a classe dominante na área de estudo estava entre 10° e 20°. Ayalew et al. (2004), com inventário de 791 cicatrizes em Tsugawa, Japão, observou que a densidade de 46% das cicatrizes na faixa entre 2,5° a 30°. Por fim, Avelar (2011), analisando 3,5 mil cicatrizes de movimentos de massa em trabalho realizado na região serrana fluminense, ao verificou que a maior parte dos movimentos de massa ocorre em inclinações superiores a 21°.

3.3 Forma das encostas e cicatrizes

Considerando a geometria das encostas na perspectiva em planta das curvas de nível (Figura 6), verifica-se a predominância das áreas convexas, compreendendo 44% da área da bacia (Tabela 3). Esta classe corresponde a vertentes cujos fluxos hídricos são divergentes encosta abaixo. A classe côncava está presente em 40% da área estudada e constitui uma geometria de fluxos convergentes. Somente 16% da bacia apresenta a classe retilínea, ou seja, setores onde as curvas de nível tendem a ser retas.

Ao sobrepor o mapa de geometria das encostas com o de cicatrizes, verifica-se que as vertentes côncavas abarcam 59% da área das cicatrizes de movimentos de massa, representando 13% da área desta classe. Este valor contrasta com a menor densidade encontrada na classe convexa, que possui 5% da sua área com cicatrizes, embora 25% das cicatrizes estejam aí presentes. Com valores intermediários, as encostas retilíneas contêm 9% da sua área com cicatrizes, sendo 16% delas estejam presentes na respectiva classe.

Estes resultados demonstram que a ocorrência das cicatrizes diminuem das porções côncavas do relevo para as convexas, passando pelas retilíneas. Valores similares foram constatados por Fernandes et al. (2001) em estudo sobre condicionantes geomorfológicos dos deslizamentos nas encostas do Maciço da Tijuca (RJ). O autor afirma que a forma da encosta, como inicialmente esperado, exerceu grande influência no controle da distribuição espacial dos deslizamentos, embora as porções convexas sejam as mais frequentes nas bacias estudadas, o potencial de deslizamento das porções côncavas do relevo foi cerca de três vezes maior do que ao associado às feições convexas e retilíneas. Ayalew et al. (2004), em trabalho aqui já citado, desenvolvido no Japão, verificaram que a densidade de cicatrizes é maior nas porções côncavas (37%) e convexas (34%). De acordo com Ayalew; Yamagishi (2004), o tipo de movimento de massa geralmente está relacionado com a curvatura horizontal: corridas de lama e deslizamentos rotacionais são comuns em encostas côncavas, os translacionais ocorrem principalmente nas planares, enquanto os eventos nas convexas são muito raros, no entanto atingem grande profundidade e extensão.

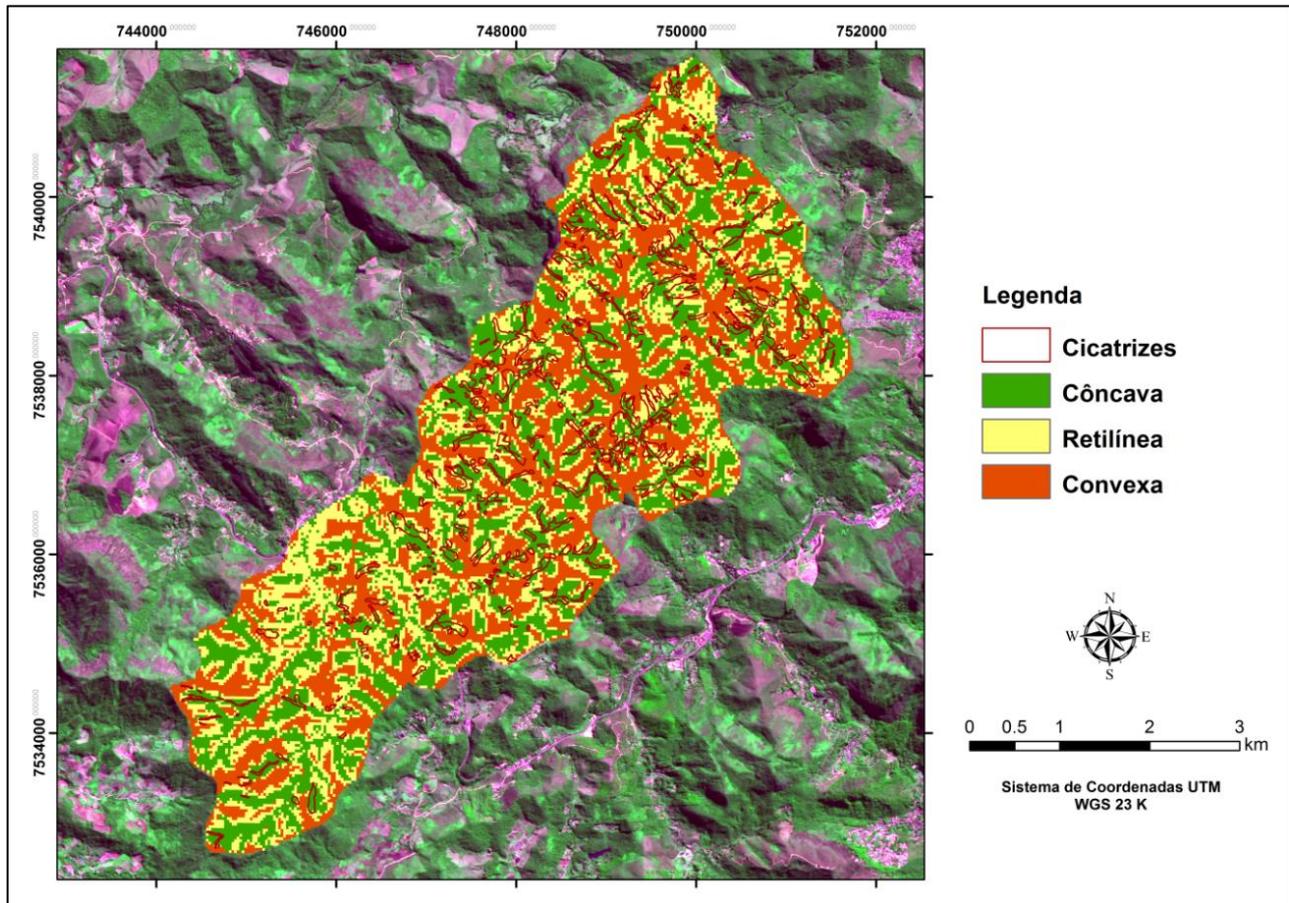


Figura 6 - Mapa da forma das encostas da bacia do rio Roncador, Nova Friburgo/RJ. Imagem ALOS/AVNIR-2. **Fonte:** Os autores, 2018.

Tabela 3 - Área da forma das encostas e das cicatrizes de movimentos de massa da bacia do rio Roncador, Nova Friburgo/RJ.

Classes	Área das Classes		Área de Cicatriz ¹		Densidade (B/A) * 100
	ha (A)	%	ha (B)	%	
Côncava (Convergente)	983	40	126	59	13
Retilínea (Planar)	393	16	34	16	9
Convexa (Divergente)	1081	44	53	25	5

Fonte: Os autores, 2018.

4. CONCLUSÃO

Na bacia hidrográfica do rio Roncador, as análises das relações espaciais entre os movimentos de massa, aspectos geomorfológicos e a cobertura da terra foram obtidas pela sobreposição entre as cicatrizes e os respectivos mapas temáticos. Como resultado, verificou-se que a maior incidência de cicatrizes ocorreu em áreas cobertas por vegetação de alto e médio porte, em classes de declividade intermediária e nas porções das encostas com forma côncava.

Neste contexto, verificou-se o aumento da densidade de cicatrizes com a elevação da declividade, alcançando seu maior valor nas classes acima de 25° (montanhoso e fortemente

montanhoso). As áreas côncavas das encostas também foram as mais afetadas pelas cicatrizes, embora a classe convexa seja a predominante na bacia estudada, o que pode estar relacionada às corridas de lama, um dos dois tipos de movimentos de massa que predominaram nos eventos de 2011.

Por sua vez, as encostas cobertas com vegetação densa, que ocupam metade da bacia em estudo, apresentam declividade mais alta entre as classes de cobertura da terra com área significativa. Por sua vez, no campo antrópico, a segunda classe de cobertura com maior área, a incidência de cicatrizes não é tão representativa quanto nas classes anteriores, no entanto a declividade média não difere significativamente entre elas. Estes valores podem indicar que, no evento ocorrido janeiro de 2011 na bacia do Roncador, a vegetação densa tenha exercido influência no desencadeamento dos movimentos de massa, ao permitir maior infiltração de água da chuva, encharcando o solo raso com descontinuidade abrupta com o substrato rochoso da região.

Por fim, entende-se que o volume de água que atingiu a região serrana do estado do Rio de Janeiro associado às condições fisiográficas da região e à expansão das atividades antrópicas para áreas vulneráveis ocasionaram enormes prejuízos econômicos e numerosas perdas de vidas, o que poderia ser minimizado caso a ocupação de áreas susceptíveis fosse restringida.

REFERÊNCIAS

ALEXANDER, D.E. A brief survey of GIS in mass-movement studies, with reflections on theory and methods. **Geomorphology**, v. 94, n. 3, p. 261-267, 2008.

AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L.; LACERDA, W. A.; BECKER, L. B.; MENDONÇA, M. B. Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of the Rio de Janeiro, Brazil. In: **WORLD LANDSLIDE FORUM**, 2, 2011, Roma: Landslide Sci. and Practice. Berlin: Springer-Verlag, 2011, v. 4, p. 265-270.

AYALEW, L; YAMAGISHI, H., UGAWA, N. Landslide susceptibility mapping using GIS-based weighted linear combination, the case in Tsugawa area of Agano River, Niigata Prefecture Japan. **Landslides**, v. 1, p. 73-81, 2004.

AYALEW, L; YAMAGISHI, H. Slope movements in the Blue Nile basin, as seen from a landscape evolution perspective. **Geomorphology**, v. 57, n. 1-2, p. 5-116, 2004.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2003. 1026 p.

CANEDO, P.; EHRLICH, M; LACERDA, W. A. **Chuvas na Região Serrana do Rio de Janeiro. Sugestões para ações de engenharia e planejamento**. Disponível em: http://www.coppe.ufrj.br/pdf_revista/relatoriochuvas.pdf. Acesso em 30 de setembro 2015.

CARVALHO FILHO, A; LUMBRERAS, J. F.; LEMOS, A. L.; SANTOS, R. D.; CALDERANO FILHO, B.; WITTERN, K. P.; SOUZA, F. S. Os Solos do Estado do Rio de Janeiro. In: CPRM-

Serviço Geológico do Brasil. **Estudo Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília: CPRM, 2001. p. 1-36.

COELHO NETTO, A.L.; SATO, A.M.; AVELAR, A.S.; VIANNA, L.G.G.; ARAÚJO, I.S.; FERREIRA, D.L.C.; LIMA, P.H.; SILVA, A.P.; SILVA, R.P. January 2011: the extreme landslide disaster in Brazil. In: WORLD LANDSLIDE FORUM, 2, 2011, Roma: Landslide Sci. and Practice. Berlin: Springer-Verlag, 2011. v. 6, p. 377-384.

DANTAS, M.E. Geomorfologia do Estado do Rio de Janeiro. In: CPRM-Serviço Geológico do Brasil. **Estudo Geoambiental do Estado do Rio de Janeiro**. Brasília: CPRM, 2001. p. 1-63.

DRM-RJ. Departamento de Recursos Minerais. **Megadesastre da Serra Jan 2011**. Disponível em: <http://www.drm.rj.gov.br/index.php/downloads/category/13-regio-serrana?download=48%3Amegadesastre-da-serra-jan-2011-pdf>. Acesso em 15 de setembro 2015.

DOURADO F.; ARRAES, T. C.; SILVA, M. F. O Megadesastre da Região Serrana do Rio de Janeiro – as Causas do Evento, os Mecanismos dos Movimentos de Massa e a Distribuição Espacial dos Investimentos de Reconstrução no Pós-Desastre. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**. Rio de Janeiro, v. 35, n. 2, p.43-54, 2012.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). In: REUNIÃO TÉCNICA DE LEVANTAMENTO DE SOLOS, 10., 1979, Rio de Janeiro: EMBRAPA-SNLCS, 1979. 83 p.

FERNANDES, N.F.; GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY, D.R.; GREENBERG, H. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. **Catena**, v. 55, p. 163-181, 2004.

FERNANDES, N. F. GUIMARÃES, R.F.; GOMES, R.A.T.; VIEIRA, B.C.; MONTGOMERY, D.R.; Greenberg, H. Condicionantes Geomorfológicas dos Deslizamentos nas Encostas - Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, p. 51-71, 2001.

FRANCISCO, C. N. Mapeamento das áreas de risco de deslizamentos e desmoronamentos do Parque Nacional da Tijuca (RJ) e entorno através de sistemas geográficos de informação. In: SEMANA ESTADUAL DE GEOPROCESSAMENTO, 1, 1996, Rio de Janeiro, FGeoRJ, p.197-209.

FRANCISCO, C.N.; ALMEIDA, C.M. Classificação de cobertura da terra de Nova Friburgo-RJ utilizando duas abordagens: mineração de dados e rede heurística 2012. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 64, n. 5, p. 645-660, 2012.

GARCIA, M.L.T.; FRANCISCO, C.N. Métricas da paisagem no estudo da vulnerabilidade da Mata Atlântica na região serrana fluminense – Nova Friburgo, RJ. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16, 2013, Foz do Iguaçu: INPE; SELPER Brasil, 2013. p.3268-3274.

GONÇALVES, U. S.; FRANCISCO, C.N. Análise espacial das variáveis geomorfométricas e movimentos de massa na região serrana fluminense. **Revista Brasileira de Cartografia**, V.68, n. 9, 1839-185, 2016.

GUERRA, A. J. T.; GONÇALVES, L. F. H.; LOPES, P. B. M. Evolução histórico-geográfica da ocupação desordenada e movimentos de massa no município de Petrópolis, nas últimas décadas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.8, n.1, p.35-43, 2007.

GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P.; CARDINALI, M.; GALLI, M.; ARDIZZONE, F. Probabilistic landslide hazard assessment at the basin scale, **Geomorphology**, n. 72, p. 272–299, 2005.

LISTO, F.L.R.; VIEIRA, B.C. Análise de condicionantes topográficos como subsídio para avaliação de áreas de risco a escorregamentos rasos. **Revista de Geografia**. Recife, v. Especial VIII SINAGEO, n. 3, p. 193-207, 2010.

MEIS, M.R.M.; XAVIER-DA SILVA, J. Considerações geomorfológicas a propósito dos movimentos de massa ocorridos no Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geografia**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 1, p. 55-73, jan/mar. 1968.

MICELI, B. S.; DIAS, F. M.; SEABRA, F. M.; SANTOS, P. R. A.; FERNANDES, M.C. Avaliação vertical de modelos digitais de elevação (MDES) em diferentes configurações topográficas para médias e pequenas escalas. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 63, n.01, p.191-201, 2011.

MOURA, J.R.S.; PEIXOTO, M.N.O.; SILVA, T.M. Geometria do relevo e estratigrafia do quaternário como base à tipologia de cabeceiras de drenagem em anfiteatro - Médio Vale do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**. v. 21, n.3, p.255-265, 1991.

PINHO, G.; FRANCISCO, C.N.; SALGADO, C. M. Análise Espacial dos movimentos de massa em Nova Friburgo/RJ: o caso do desastre natural de janeiro de 2011. **Revista Tamoios** (Online), v. 9, p. 16-28, 2013.

REGMI, N.R.; GIARDINO, J. R.; VITEK, J. D. Characteristics of landslides in western Colorado, USA. **Landslides**, v.4, n. 11, p. 589–603, 2014.

SILVA, E. L.; GOMES, R.A.T.; GUIMARÃES, R.F.; CARVALHO JÚNIOR, O.A. Emprego de modelo de susceptibilidade a escorregamentos rasos para gestão de riscos de desastres no município de Vitória-ES. **Revista Sociedade & Natureza**, n. 1, v. 25, p.119-132, 2013.

SILVEIRA, C.T.; FIORI, A.P.; FERREIRA, A.M.; GÓIS, J.R.; MIO, G.; SILVEIRA, R.M.P.; MASSULINI, N.E.B.; LEONARDI, T.M. Emprego de atributos topográficos no mapeamento da susceptibilidade a processos geoambientais na bacia do rio Jacaré, Paraná. **Revista Sociedade & Natureza**, v. 25, n. 3, p. 623-639, 2013.

SUMMERFIELD, M.A. **Global Geomorphology, an introduction to the study of landforms**. Londres: Longman Scientific & Technical, 1991.

TUPINAMBÁ, M.; GONTIJO, A.; SILVA, T.M.; DUARTE, B.P.; ALMEIDA, J.C.H.; GERALDES, M.C.; HEILBRON, M. *et al.* Geologia e recursos minerais da folha Nova Friburgo SF.23-Z-B-II, estado do Rio de Janeiro escala 1:100.000. In: SILVA, L.C. (org.). **Mapa Geológico**, escala 1:100.000 (série Geologia do Brasil). Belo Horizonte: CPRM, 2012. 136p. Disponível em http://www.cprm.gov.br/publique/media/re_l_nova_friburgo.pdf. Acesso em

VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12, 2005, Goiânia: INPE, 2005. p.1-8.

VALERIANO, M.M. **Topodata: guia para utilização de dados geomorfológicos locais**. São José dos Campos, INPE. 75 p. 2008. Disponível em <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/07.11.19.24/doc/publicacao.pdf>. Acesso em 15 de setembro 2015.

VARNES, D. J. **Landslide Hazard Zonation: A Review of Principles and Practice**, Paris: UNESCO Press, 1984.

Trabalho enviado em 13/06/2018

Trabalho aceito em 25/12/2018