

ANÁLISE MULTICRITÉRIO PARA MAPEAMENTO DA SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS DE MASSA NA BACIA DO RIO PAQUEQUER- RJ

MULTI-CRITERIA ANALYSIS FOR LANDSLIDE SUSCEPTIBILITY MAPPING IN PAQUEQUER RIVER BASIN, RJ

Evelyn de Oliveira Meirelles¹, Francisco Dourado¹, Vivian Castilho da Costa¹

¹ Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ), Rio de Janeiro, RJ, Brasil

Correspondência para: Evelyn Meirelles (evelyn.meirelles@gmail.com)

doi: 10.12957/geouerj.2018.26037

Recebido em: 15 out. 2016 | Aceito em: 19 ago. 2018



RESUMO

Os movimentos de massa são um dos mais atuantes e impactantes fenômenos relacionados aos desastres. No Brasil, são agravados por uma série de fatores como a presença de maciços montanhosos associados a condições climáticas favoráveis, tal como ocorre na Região Serrana do Estado do Rio de Janeiro. Neste sentido, o presente trabalho tem o objetivo de analisar o grau de influência dos condicionantes na ocorrência de movimentos de massa na Bacia do Rio Paquequer (Teresópolis, RJ) gerando um mapa de suscetibilidade a esses eventos a partir da análise multicritério AHP e Média Ponderada. Foram correlacionados 10 condicionantes ao mapa de inventário de movimentos de massa onde, a partir dos resultados, aplicaram-se pesos a cada um para obter o mapa de suscetibilidade. Cerca de 77% dos pontos de movimentos mapeados estão nas classes de Alta e Muito alta suscetibilidade, ocorrendo principalmente em regiões com declividades entre 8 a 100%, com intensas precipitações, localizados em áreas submetidas a influência antrópica, ou em zonas escarpadas.

Palavras-chave: Movimentos de Massa; AHP; Média Ponderada; Suscetibilidade; Desastres.

ABSTRACT

Mass movements are one of the most active and impactful phenomena related to disasters. In Brazil, the landslide are compounded by a number of factors such as the presence of massive mountain associated with certain favorable climatic conditions, as occur in the Região Serrana of Rio de Janeiro state. In this sense, the present study aims to analyze the influence of conditioning factors on landslide in the Paquequer River Basin (Teresopolis, RJ) in order to generate a Susceptibility Map of land to these events based on multi-criteria analysis AHP and Weighted Average. We correlated 10 conditioning factors to landslide inventory map where, from which, we applied a weight to each correlation to obtain the susceptibility map. About 77% of the points mapped movements are in High class and Very high susceptibility, occurring mainly in areas with slopes between 8-100%, with intense rainfall, located in areas subject to human influence, or rugged areas.

Keywords: Landslides. AHP. Weighted-average. Susceptibility. Disasters

INTRODUÇÃO

A geração de eventos climáticos extremos, possivelmente ocasionados por alterações climáticas associadas ao grande número de pessoas que vivem em áreas de risco, têm sido cada vez mais recorrentes e intensos no mundo, e afetam não apenas a esfera social, como também a ambiental e econômica (SEIXAS et al. 2014). Segundo dados do EM-DAT (2012), das milhões de pessoas

vulneráveis aos desastres, mais de 90% habitam países em desenvolvimento e estão sujeitas aos mais variados impactos que este tipo de evento pode causar, como mortes e destruição de moradias.

No Brasil, o cenário não é diferente. De acordo com o Anuário Brasileiro de Desastres Naturais (2013), em torno de 2% dos municípios brasileiros foram afetados por movimentos de massa. Do total de mortes causadas por desastres em 2012, 22% estão relacionados a movimentos de massa, sendo que estes são o maior causador de mortes quando comparado a outras tipologias de desastres.

Os movimentos de massa são processos gravitacionais de evolução do relevo condicionados pela ação da água que podem, dependendo das condições, culminar em desastres com grandes prejuízos humanos (mortes) e econômicos (perdas e danos). A presença de grandes maciços montanhosos ao longo do litoral concomitantemente a condições climáticas favoráveis faz do Brasil um local muito suscetível a ocorrências de movimentos de massa (GOMES, 2006). A associação de condicionantes naturais, tais como chuvas intensas e concentradas, bem como o uso irregular do solo, principalmente em encostas íngremes desprovidas de cobertura vegetal e ocupação desordenada em locais de alto declive, para Guerra (2003), podem agravar os processos de degradação ambiental, acelerando o processo erosivo e, conseqüentemente, elevar a suscetibilidade.

Locais como a Região Serrana, no Estado do Rio de Janeiro, são um exemplo desta associação e estão sujeitas a eventos extremos, como as ocasionadas pelo Megadesastre em 2011, no qual foi demonstrado a vulnerabilidade de boa parte dos habitantes frente às catástrofes (DOURADO; ARRAES; SILVA, 2012), além da fragilidade do poder público na gestão de riscos. Neste sentido, procurou-se no presente trabalho, investigar a influência de algumas condicionantes no aumento da suscetibilidade a movimentos de massa do tipo translacionais rasos, através de uma metodologia que visa auxiliar a prevenção dos impactos destes fenômenos. Para isso, foi criado um mapa de suscetibilidade a movimentos de massa na Bacia do Rio Paquequer-RJ, pertencente à Região Serrana, através de análise multicritério, como forma de proporcionar mais uma ferramenta de auxílio na gestão de desastres para a defesa civil e outros órgãos responsáveis.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A bacia hidrográfica do Rio Paquequer está inserida na porção oeste do município de Teresópolis (VIEIRA & CUNHA, 2008), microrregião Serrana do Estado do Rio de Janeiro, em uma área de aproximadamente 269 km². Encontra-se limitada entre as coordenadas 43°03'19" a 42°55'00" de longitude e 22°28'35" a 22°12'56" de latitude, abrangendo os distritos de Teresópolis (sede) e Vale do Paquequer (DOURADO, 2006) (Figura 1).

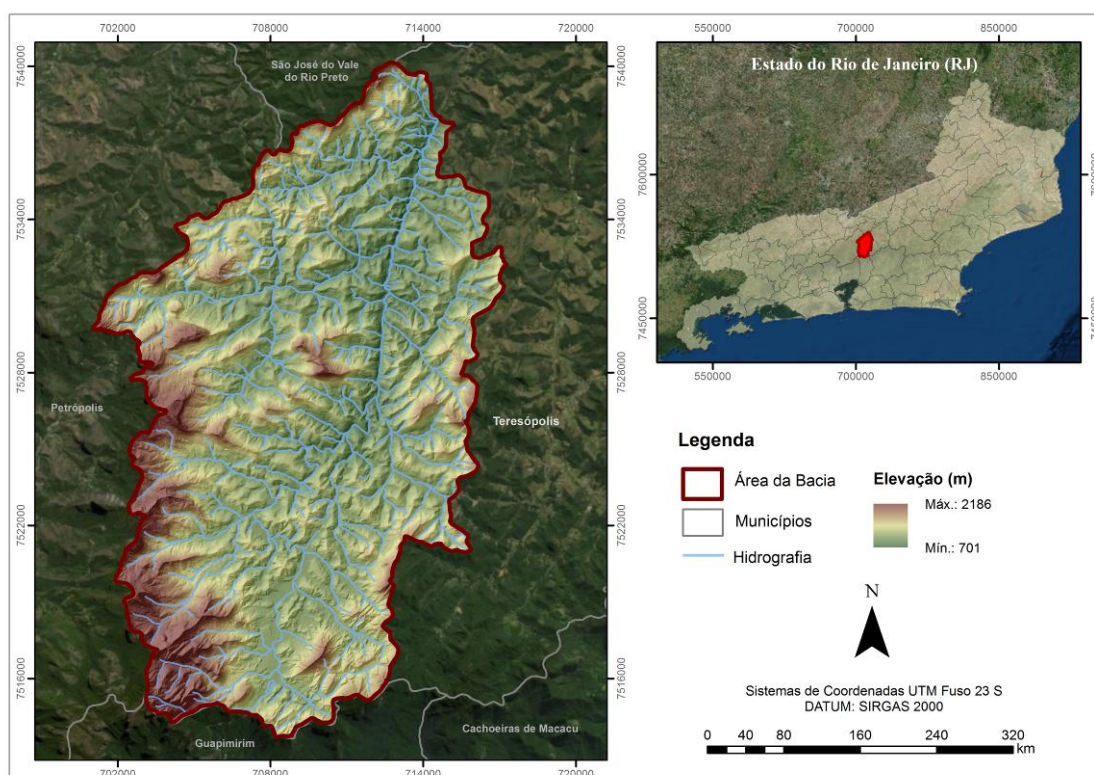


Figura 1. Localização da Área de Estudo. Fonte: Os autores

Seu relevo é predominantemente montanhoso, com variações entre 700 e 2000 metros aproximadamente, e influencia diretamente o perfil longitudinal de seu rio principal, o Paquequer. Este rio, que tem a nascente localizada no Parque Nacional da Serra dos Órgãos, possui 38 km de extensão e apresenta uma acentuada inclinação em seu início, com altitudes que oscilam entre 900 e 2.000 metros e uma leve inclinação no restante, com cerca de 900 e 750 metros (SILVEIRA & SOUZA, 2012).

O clima nesta região é mesotérmico brando úmido a super úmido, (subtropical do tipo Cwa - inverno seco e verão quente e tropical do tipo Aw - inverno seco e verão chuvoso), com temperatura média de

18° C e pluviosidade média anual na faixa de 1.500 mm a jusante da bacia, chegando a 3000 mm na cabeceira (SHUMM, 2007). Além do mais, o período de chuvoso ocorre principalmente entre os meses de outubro e abril, com maior intensidade durante a estação de verão (SILVEIRA & SOUZA, 2012).

Em termos populacionais, a localidade possui um perfil majoritariamente urbano e se concentra no distrito de Teresópolis. Por outro lado, ainda existe um contingente populacional rural relacionado à atividade olerícola no Distrito do Paquequer Pequeno. Vale ressaltar que a ocupação de seu território, em decorrência de suas características fisiográficas, deu-se inicialmente nos bairros da Várzea e do Alto e, posteriormente, migrou para regiões mais próximas dos vales encaixados, próximos a redes de pequenos afluentes do Rio Paquequer, agravando a degradação dos rios e matas ciliares do entorno (SILVEIRA & RAMOS, 2007).

No alto e médio curso dos rios Paquequer e Bengalas, predomina o relevo montanhoso, integrado à região das escarpas e reverso da Serra do Mar e caracterizado pela Suíte Serra dos Órgãos (TUPINAMBÁ et al., 2012). Além do mais, a escarpa reversa da Serra do Mar apresenta um relevo de destaque, onde a partir da linha de cumeada da Serra dos Órgãos, são projetadas vertentes íngremes e rochosas em direção à zona montanhosa do planalto, entre 1400 e 2200 metros, e linha de base variando de 800 a 1100 metros. Nesta localidade, a área montanhosa abrange uma grande extensão, atingindo o nível mínimo de 1000 metros e máximo de 1800 metros de altitude (DANTAS, 2001).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para a execução da metodologia proposta, foi necessário selecionar informações sobre o meio físico da área de trabalho e dividir o processo em etapas (Figura 2). Primeiramente, foram selecionados 10 elementos considerados possíveis condicionantes para a geração de eventos gravitacionais, disponibilizados em camadas e categorizados como planos de informação:

Declividade: A estabilidade de uma encosta está diretamente relacionada ao ângulo formado entre esse talude e um plano horizontal. Quanto maior esse ângulo, menos estável é esse terreno. Neste sentido, a declividade pode afetar diretamente na ocorrência de movimentos de massa, principalmente nas

encostas mais íngremes, onde o fator gravidade atua com maior força Casseti (2005); Bispo et al. (2009); Venancio et al. (2013); Oliveira & Simões (2014).

Orientação das Vertentes: A orientação das vertentes, de acordo com Vanacôr (2006) & Valeriano (2008) está intimamente ligada a direção dos ventos e insolação, o que condiciona maior ou menor concentração de água em suas formações. Deste modo, áreas de encostas com maior umidade tendem a ser mais instáveis e mais suscetíveis a deslizamentos.

Forma do Terreno: Segundo Valeriano (2008), em função da forma do relevo (côncavo-convexo-plano, e suas combinações) determinadas áreas podem apresentar grande concentração e acúmulo de escoamento. Assim, na medida em que ocorre o aumento do fluxo de água, potencializa-se o transporte de material dendrítico, removendo e deslocando partículas superficiais do solo para canais de drenagem a jusante, propiciando a geração de movimentos de massa.

Geologia: Bigarella et al. (2003) afirmam que as propriedades dos solos superficiais e subsuperficiais e a composição litológica subjacente influem nos processos de movimentos de massa, tanto como fator desencadeante, como sendo o próprio material envolvido, de acordo com a composição física e química dos diferentes tipos de rochas e seus respectivos mecanismos.

Morfologia do relevo: Para Cruz (1990), a morfologia do relevo pode afetar diretamente os processos de intemperismo e pedogênese como por exemplo os processos de escoamento superficial e de fluxo interno que podem propiciar os movimentos de massa.

Formações Superficiais: Para Casseti (2005), a formação superficial pode contribuir para os estudos de gestão de território, justamente por poder atuar nos processos erosivos e gravitacionais, visto que, dependendo de sua composição, (rocha x material sobrejacente), o grau de suscetibilidade irá variar.

Uso e Cobertura do Solo: A intensidade dos movimentos de massa e susceptibilidade áreas podem ser influenciadas em função do uso e tipo de cobertura do solo. A ocupação antrópica irregular, concentrada nos fundos de vale e encostas, foram um dos principais fatores agravantes para o Megadesastre (OLIVEIRA FILHO, 2012).

Pedologia: Em decorrência de suas texturas, estruturas, permeabilidades e densidades, os solos podem ser diretamente afetados por processos erosivos, onde, atuando individualmente ou em conjunto com fatores como geologia, geomorfologia e chuvas, condicionam eventos como os movimentos de massa (BIGARELLA et al., 2003).

Proximidade a drenagens: A relação de proximidade dos cursos d'água estão diretamente associados a forma da encosta, a umidade e a formação de sulcos e ravinas. Por serem geralmente no formato côncavo, acabam sendo zonas de convergência de fluxos d'água, saturação do solo e intensificação dos processos erosivos, que, conforme anteriormente mencionado, pode desencadear os movimentos de massa (PINHO; FRANCISCO; SALGADO, 2013).

Proximidade a estradas: Construções de estradas em áreas de maiores declividades, como na base do morro em solos instáveis, podem potencializar de forma significativa o risco de movimentos de massa, sobretudo pela retirada total ou parcial da sustentação do solo ao longo da elevação (MMA, 2011).

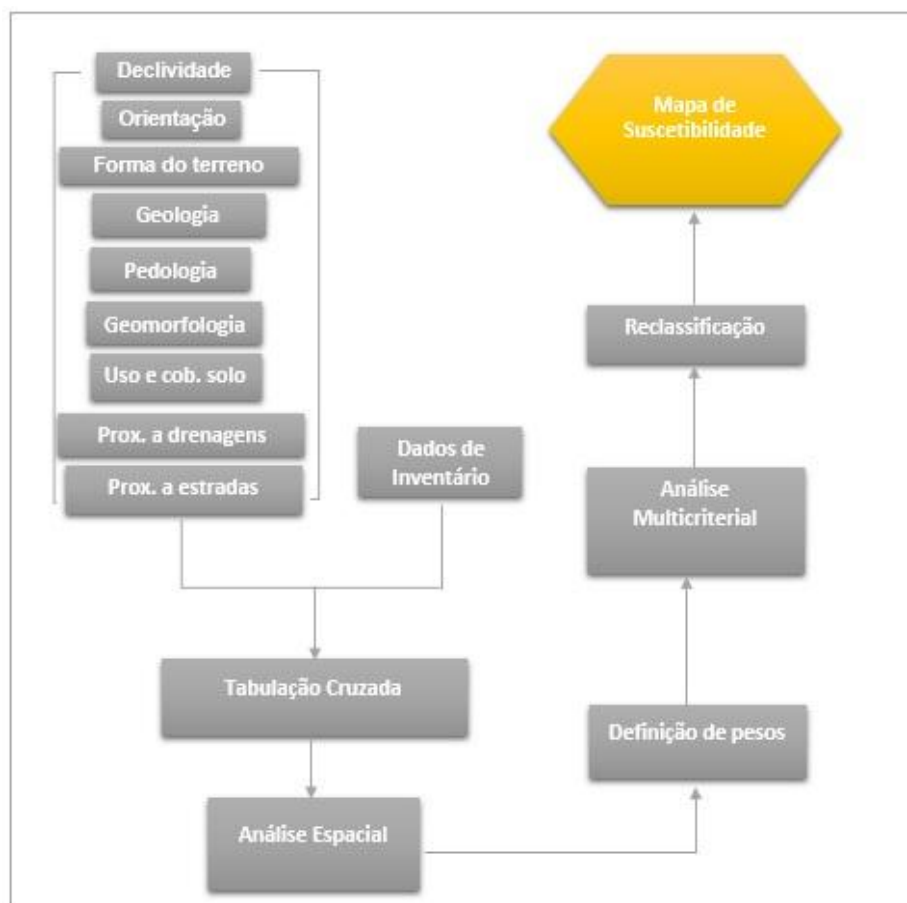


Figura 2. Fluxograma com as etapas do trabalho. Fonte: Os autores

Inicialmente, estes dados foram agrupados em um banco de dados temático em formato vetorial. Em uma segunda etapa, foram convertidos para o formato matricial com o mesmo número de linhas e colunas, mesma escala e resolução espacial e serviram de base para a análise espacial e multicritério deste trabalho (Figura 3).

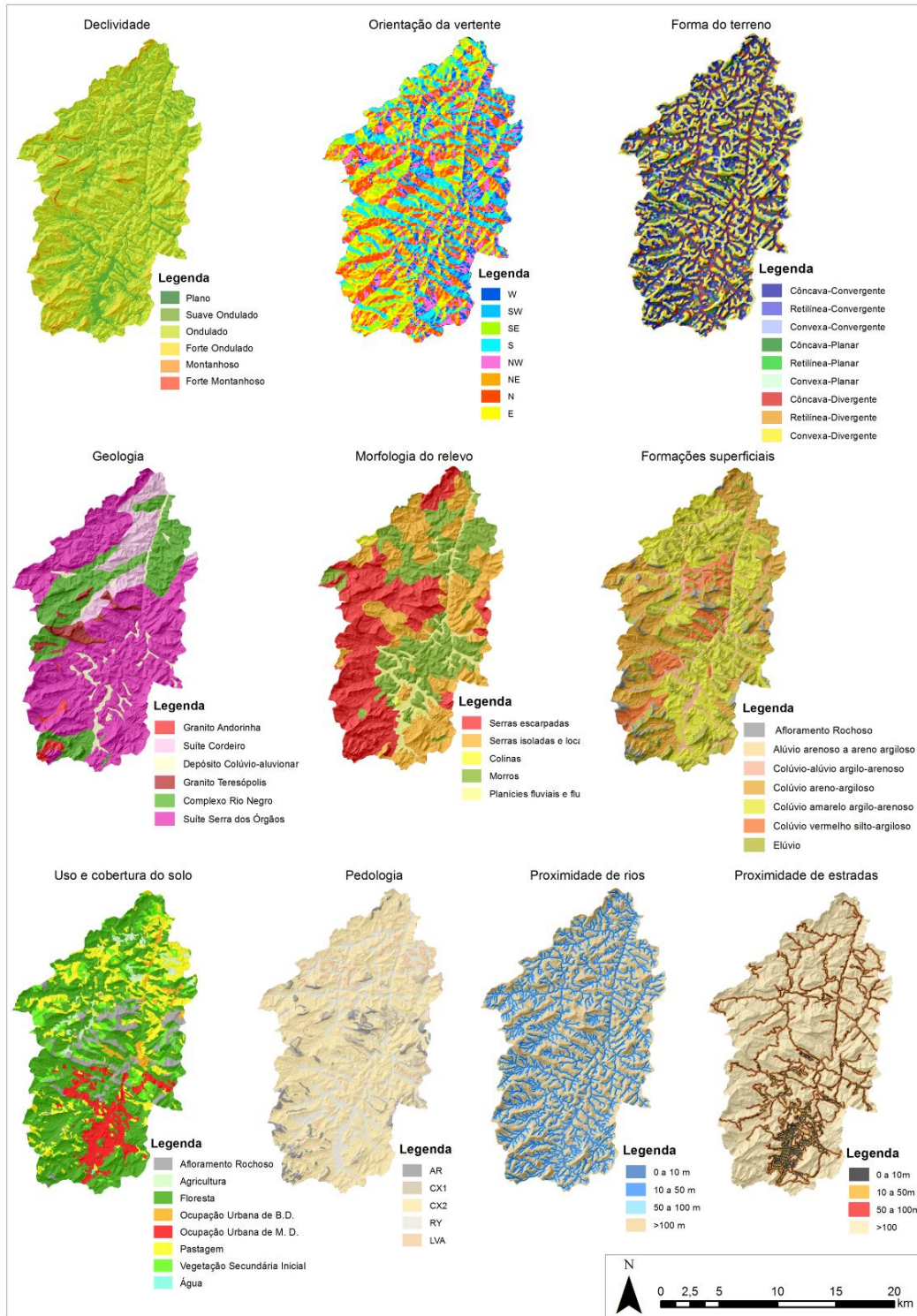


Figura 3. Prancha contendo os planos de informação selecionados. Fonte: Os autores.

Para calcular a correlação dos planos de informação e posteriormente realizar a validação dos pesos adotados para cada um, foram extraídos pontos de movimentos de massa a partir das imagens de satélite disponibilizadas pelo Google Earth (2011), que agrupados com o cadastro de movimentos fornecidos pelo DRM no ano de 2014 e com os pontos mapeados por Dourado (2006), resultaram em 914 ocorrências. Obteve-se, como produto, um mapa de inventário de movimentos de massa da área de estudo.

A próxima fase foi a realização de uma tabulação cruzada entre os 914 pontos de movimentos de massa mapeados e cada um dos planos de informação. Esta análise espacial procurou compreender a influência de cada classe das condicionantes na ocorrência destes eventos, relacionando a frequência destes (ocorrência por classe/total de movimentos) e densidade (ocorrência por classe/área da classe em km²) nas respectivas áreas selecionadas.

Análise Multicritério

A análise multicritério como ferramenta de SIG, é capaz de ordenar e apresentar informações especializadas e suas relações internas com o meio, sendo muito adequada para o emprego das geotecnologias na criação de síntese de variáveis, com o objetivo de identificar áreas prioritárias para algum fenômeno ou arranjo geográfico (MOURA, 2007). Ela pode ser baseada na aplicação de funções de pertinência de conjuntos, tais como o fuzzy, média ponderada e do método do processo analítico hierárquico - Analytical Hierarch Process (AHP), auxiliando no processo de tomada de decisão (BARIN et al., 2010).

Visando diminuir a subjetividade no processo de atribuição de pesos aos fatores selecionados como Planos de Informação do presente estudo e defini-los quantitativamente, foi escolhida a técnica AHP (Analytic Hierarchy Process), desenvolvida por Saaty (1980).

Para trabalhos científicos como o produzido por Ferreira (2012), esta técnica auxiliou no processo de ponderação de pesos ao estudar a vulnerabilidade dos recursos hídricos na bacia Guapi-Macacu/RJ. Do mesmo modo, Faria & Augusto Filho (2013), aplicaram a AHP, analisando áreas de risco a escorregamentos no Município de São Sebastião- SP, e concluíram que a técnica, além de melhorar o

grau de confiabilidade no processo de tomada de decisão, diminuiu a subjetividade do mapeamento final.

De acordo com Saaty (1980), a técnica AHP inicia-se com a decomposição do problema em níveis hierárquicos e, posteriormente, os avaliadores analisam sistematicamente as alternativas por comparação pareada em cada um dos critérios definidos (FARIA & AUGUSTO FILHO, 2013).

Baseados em uma escala onde será medido a consistência dos julgamentos, a partir da comparação dois-a-dois (Tabela 1), com valores de 1 a 9, os números ímpares serão mais comumente utilizados, e os pares, quando não houver um consenso natural entre os avaliadores (CÂMARA et al., 2001).

| IMPORTÂNCIA | DEFINIÇÃO E EXPLICAÇÃO |
|-------------|--|
| 1 | Importância igual – Os dois valores contribuem igualmente para um objetivo |
| 3 | Importância moderada – Um fator é ligeiramente mais importante do que o outro |
| 5 | Importância essencial – Um fator é claramente mais importante do que o outro |
| 7 | Importância demonstrada - Um fator é fortemente favorecido e sua maior relevância foi demonstrada na prática |
| 9 | Importância extrema - A evidência que diferencia os fatores é da maior ordem possível |
| 2,4,6,8 | Valores intermediários entre julgamentos - possibilidade de compromissos adicionais |

Tabela 1. Comparação pareada proposta por Saaty (1980). Fonte: Adaptado de CÂMARA et al., 2001.

Para a geração da técnica AHP, foram definidos pesos de acordo com os resultados obtidos na tabulação cruzada, associados aos trabalhos desenvolvidos por Marcelino (2003); Vanacôr & Rolim (2012) e Kayastha et al. (2013). Estes pesos foram aplicados aos planos de informação correspondentes, estabelecendo uma relação par a par, onde foi definido qual dos fatores é mais importante e quanto cada um deles é mais importante que cada um dos outros (VANACÔR & ROLIM, 2012).

Dessa forma, foi gerada uma matriz de comparação pareada, onde foram calculados os autovalores e autovetores da matriz (Tabela 2).

| VARIÁVEIS | Decliv. | Orient. | Uso e cobertura | Geologia | Pedologia | Form. superficiais | Morf. relevo | Forma terreno | Prox. a estradas | Prox. a drenagens |
|-------------------------|---------|---------|-----------------|----------|-----------|--------------------|--------------|---------------|------------------|-------------------|
| Declividade | 1 | 7 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 3 | 3 |
| Orientação | 1/7 | 1 | 1/5 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/3 | 1/5 | 1/3 | 1/3 |
| Uso e cobertura do solo | 1/2 | 5 | 1 | 3 | 3 | 3 | 3 | 1 | 2 | 2 |
| Geologia | 1/3 | 3 | 1/3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Pedologia | 1/3 | 3 | 1/3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Formações superficiais | 1/3 | 3 | 1/3 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Morfologia relevo | 1/3 | 3 | 1/2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1/2 | 1/2 | 1/2 |
| Forma terreno | 1/2 | 5 | 1 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1 | 2 | 2 |
| Prox. a estradas | 1/3 | 3 | 1/2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1/2 | 1 | 1 |
| Prox. a drenagens | 1/3 | 3 | 1/2 | 2 | 2 | 2 | 2 | 1/2 | 1 | 1 |

Tabela 2. Matriz de Comparação Pareada AHP. Fonte: Os autores

RESULTADOS

Após a comparação par-a-par, foi realizada operações de normalização dos pesos relativos nas matrizes, obtendo-se o vetor de prioridades ou autovetor, que fornece o peso relativo de cada indicador de suscetibilidade no resultado total da meta e corresponde de modo aproximado à média aritmética dos valores de cada um dos critérios. O resultado é apresentado na Tabela 3.

| VARIÁVEIS | MÉDIA | PESOS (%) |
|--------------------|----------|------------|
| Declividade | 0,227 | 22,7 |
| Orientação | 0,025 | 2,5 |
| Uso e Cob. do solo | 0,163 | 16,3 |
| Geologia | 0,061 | 6,1 |
| Pedologia | 0,061 | 6,1 |
| Form. Superficial | 0,061 | 6,1 |
| Morf. Relevo | 0,061 | 6,1 |
| Forma do Terreno | 0,138 | 13,8 |
| Prox. a Estradas | 0,097 | 9,7 |
| Prox. a Drenagens | 0,097 | 9,7 |
| Total | 1 | 100 |

Tabela 3. Pesos obtidos pelo método AHP. Fonte: os autores.

Porém, para ser aceito como um resultado consistente, foram verificadas a integridade e a coerência dos julgamentos por meio da análise de consistência, baseadas nas seguintes etapas:

A. Valor médio do vetor de Consistência (μ):

$$\mu = (\text{vetor consistência} / n) \quad (1)$$

Onde: vetor consistência = vetor da soma ponderada sobre o vetor de média de cada fator; n = número de fatores (Nesta análise = 10).

$$\mu = (10,211 + 10,36 + 10,177 + 10,016 + 10,016 + 10,016 + 10,016 + 10,253 + 10,113 + 10,113 / 10)$$

$$\mu = 10,129$$

B. Cálculo do Índice de Consistência (IC):

$$IC = (\mu - n) / (n - 1) \quad (2)$$

Onde: μ = Valor médio do vetor de Consistência (10,129); n = número de fatores.

$$IC = (10,129 - 10) / (10 - 1) = 0,014$$

C. Cálculo da Razão de Consistência (RC):

$$RC = IC/IR \quad (3)$$

Onde IR = Índice Randômico ou Índice de Consistência Aleatória (Tabela padrão desenvolvida por Saaty (1980) que varia de acordo com o n° de fatores envolvidos). Neste caso, 10 fatores equivalem a 1,49 (Tabela 4).

| n | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 |
|-----|---|---|------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| CA | 0 | 0 | 0,58 | 0,9 | 1,12 | 1,24 | 1,32 | 1,41 | 1,45 | 1,49 | 1,51 |

Tabela 4. Pesos obtidos pelo método AHP. Fonte: Adaptado de SAATY, 1980.

Assim: $RC = 0,014/1,49 = 0,009$.

Segundo Saaty (1980), o valor da razão de consistência (RC), é aceitável para valores menores que 0,1 ou 10 %, o que de fato foi observado no trabalho. Obteve-se um resultado satisfatório de 0,009, indicando ampla consistência no processo AHP (FERREIRA, 2012).

Acima do valor de 0,1, o resultado da análise AHP é considerado incoerente, com sérias inconsistências de julgamentos, sendo necessário, portanto, gerar um novo processo no qual será atribuído novos valores na matriz (FARIA & AUGUSTO FILHO, 2013).

Média Ponderada

Com a obtenção dos pesos, aplicou-se a técnica de Média Ponderada. Segundo Moura (2007) e Benavides Silva & Machado (2014) o uso desta técnica cria um espaço classificatório, ordinal, através de uma escala de intervalo. Da mesma forma, este método pode ser utilizado em escala nominal, contanto que as variáveis analisadas sejam hierarquizadas por meio de algum critério de valor.

Para dar início ao procedimento da Média Ponderada, foi necessário transformar todos os planos de informação em uma escala padrão de mensuração, com o objetivo de apresentá-los de forma quantitativa. Para isso, todos os dados matriciais foram reclassificados, através da ferramenta Reclassify, disponível no ArcGIS, em uma escala que varia de 1 a 5 (1: muito baixo, 2: baixo, 3: médio, 4: alto e 5: muito alto), em ordem crescente de importância e influência. Estas notas representam os valores em cada classe dos planos de informação e foram definidas a partir dos resultados obtidos com a tabulação cruzada, analisando tanto a frequência quanto a densidade dos movimentos de massa nas respectivas áreas, associados aos trabalhos de Spohr & Ross (2004); Massa & Ross (2012) e Benavides Silva & Machado (2014) (Tabela 5).

| Variáveis | Classes | Notas | Pesos (AHP) |
|-------------------------|-----------------------|-------|-------------|
| Uso e Cobertura do Solo | Água | 1 | 16,3 |
| | Veg. Sec. | 4 | |
| | Aflor. Rochoso | 5 | |
| | Agricultura | 4 | |
| | Pastagem | 5 | |
| | Ocup. Baixa Densid. | 4 | |
| | Ocup. Média Densid. | 5 | |
| Pedologia | Floresta | 4 | 6,1 |
| | Cambissolo + Neossolo | 4 | |

| | | | |
|-----------------------------|------------------------------|---|------|
| | Cambissolo + Latossolo | 5 | |
| | Neossolo Flúvico | 5 | |
| | Aflor. Rochoso | 5 | |
| | Latossolo | 3 | |
| | Colinas | 4 | |
| | Morros | 4 | |
| Morfologia do Relevo | Plan. Fluv. e Fluv. Marinhas | 5 | 6,1 |
| | Serras Escarpadas | 5 | |
| | Serras Isoladas e Locais | 4 | |
| | Andorinha | 3 | |
| | Cordeiro | 4 | |
| Litologia | Dep. Col. Aluvionares | 3 | 6,1 |
| | Suíte Serra dos Órgãos | 5 | |
| | Granito Teresópolis | 5 | |
| | Rio Negro | 4 | |
| | Plano | 4 | |
| | Suave Ondulado | 3 | |
| Declividade | Ondulado | 5 | 22,7 |
| | Fort. Ondulado | 5 | |
| | Montanhoso | 5 | |
| | Fort. Montanhoso | 5 | |
| | E | 5 | |
| | N | 5 | |
| | NE | 3 | |
| Orientação | NW | 4 | 2,5 |
| | S | 4 | |
| | SE | 4 | |
| | SW | 4 | |
| | W | 4 | |
| | Côncava-convergente | 4 | |
| | Retilínea-convergente | 3 | |
| | Convexa-convergente | 4 | |
| | Côncava-planar | 4 | |
| Forma do Terreno | Retilínea-planar | 3 | 13,8 |
| | Convexa-planar | 5 | |
| | Côncava-divergente | 5 | |
| | Retilínea-divergente | 3 | |
| | Convexa-divergente | 4 | |
| | 0 a 10 m | 5 | |
| Prox. Estradas | 10 a 50 m | 4 | 9,7 |
| | 50 a 100 m | 4 | |
| | >100 m | 3 | |
| | 0 a 10 m | 5 | |
| Prox. Drenagens | 10 a 50 m | 4 | 9,7 |
| | 50 a 100 m | 4 | |
| | >100 m | 3 | |
| | Afloramento Rochoso | 5 | |
| Form. Superficiais | Alúvio | 1 | 6,1 |
| | Colúvio-Alúvio | 4 | |

| | |
|---------------------------------|---|
| Colúvio rico em Blocos de Rocha | 4 |
| Colúvio Amarelo | 5 |
| Colúvio Vermelho | 3 |
| Elúvio | 4 |

Tabela 5. Notas e pesos atribuídos aos Planos de Informação. Fonte: Os autores

Posteriormente à atribuição das notas e pesos referentes a cada plano de informação, foi aplicada a Média Ponderada - através da ferramenta Raster Calculator, na extensão Spatial Analyst da plataforma ArcGIS para a geração do mapa final de suscetibilidade. Para isso, utilizou-se a seguinte equação:

$$MS = (p_a * f_a + f_b * v_b + p_c * f_c \dots) / n$$

Onde, MS = Mapa de Suscetibilidade; p = Peso (AHP); f = fatores (planos de informação) e n = número de fatores.

Assim:

$$MS = (16.3 * (\text{Uso e cob.}) + 6.1 * (\text{Pedo.}) + 6.1 * (\text{Lito.}) + 6.1 * (\text{Morf. Rel.}) + 6.1 * (\text{Form. Superf.}) + 22.7 * (\text{Decliv.}) + 2.5 * (\text{Orient.}) + 13.8 * (\text{Forma T.}) + 9.7 * (\text{Prox. Vias.}) + 9.7 * (\text{Prox. Dren.}) / 10$$

Com a geração do mapa de suscetibilidade, realizou-se uma reclassificação, onde o dado matricial resultante foi dividido em cinco intervalos, variando o grau desde baixa a muito alta de suscetibilidade (Figura 4).

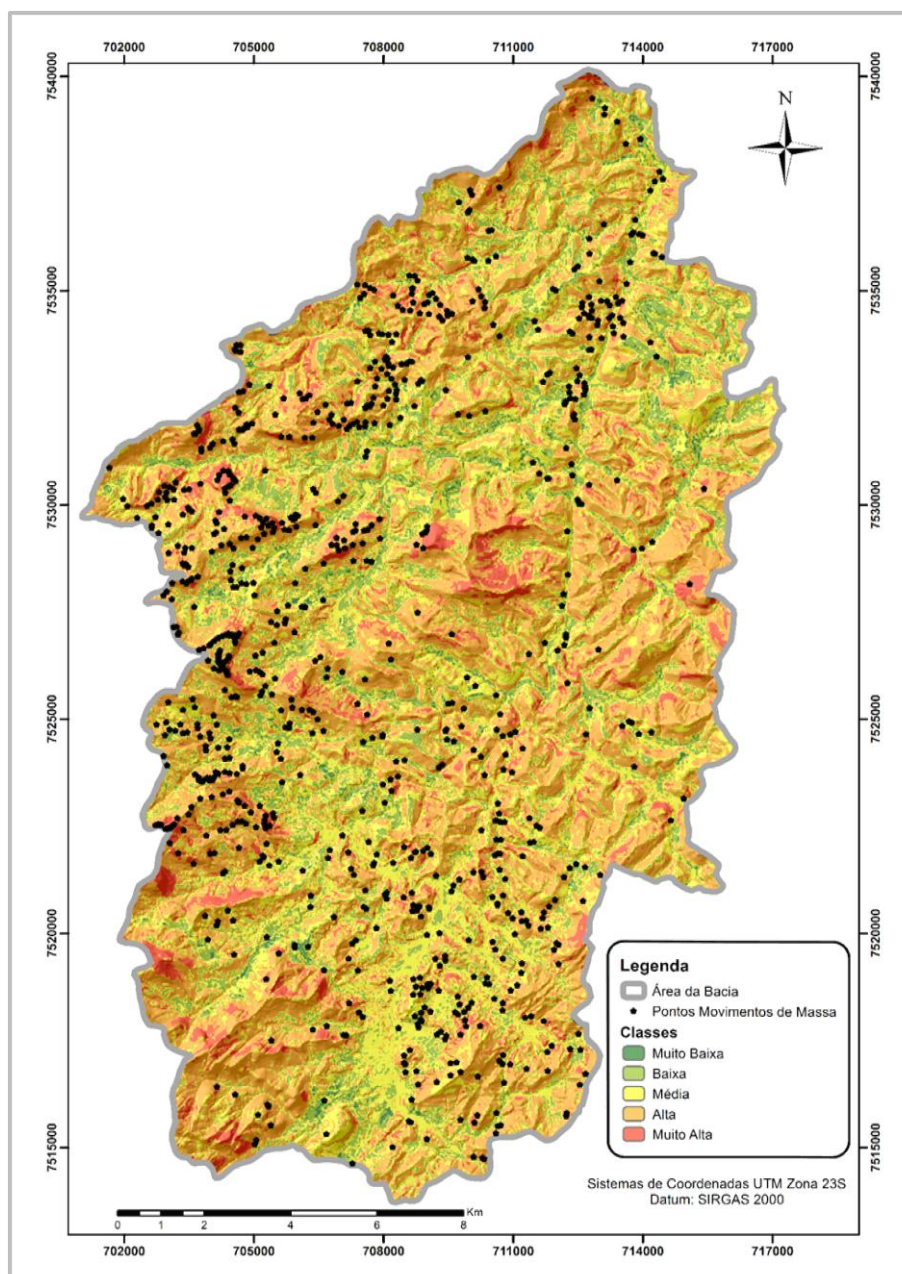


Figura 4. Mapa de Suscetibilidade a Movimentos de Massa na Bacia do Rio Paquequer. Fonte: Os autores.

Assim, foi criado um mapa de suscetibilidade a movimentos de massa, onde cada pixel representará a nota recebida considerando todos os planos de informação e o peso atribuído a cada um.

DISCUSSÕES

A correlação entre as classes de suscetibilidade e a quantidade de ocorrências de movimentos de massa no mapa final de suscetibilidade demonstrou que, a maior parte destes eventos, estão localizados na

classe Alta (59,62%), onde, contabilizando com a classe Muito Alta, somam aproximadamente 77% do total. Estes resultados estão dispostos na tabela 6:

| Intervalos | Área (km ²) | Ocorrências | % |
|--------------|-------------------------|-------------|------------|
| Muito Baixa | 0,3 | 2 | 0,21 |
| Baixa | 25,95 | 44 | 4,81 |
| Média | 64,62 | 164 | 17,94 |
| Alta | 150,25 | 545 | 59,62 |
| Muito Alta | 27,88 | 159 | 17,39 |
| Total | 269,00 | 914 | 100 |

Tabela 6. Ocorrências de movimentos de massa por intervalos de suscetibilidade na Bacia do Rio Paquequer.

Fonte: Os autores

Validação dos Resultados

Em prosseguimento à criação do mapa de suscetibilidade, foi gerada uma nova tabulação cruzada, através das ferramentas Tabulate Area, na extensão Spatial Analyst e Intersect, ambas disponíveis no ArcGIS, com o intuito de validar os resultados referentes ao mapa final de acordo com pesos e notas atribuídos a cada plano de informação aplicado no processo. Dessa forma, foi analisada a distribuição das classes entre os graus de suscetibilidade e a quantidade de ocorrências de movimentos de massa, resumidamente descritas, levando em consideração os resultados mais expressivos.

Pedologia - Foi observado que a classe referente aos cambissolos háplicos associados aos latossolos vermelho-amarelos concentra-se, majoritariamente, entre os intervalos de suscetibilidade alta e muito alta, onde a ocorrência de movimentos de massa somam mais de 400 pontos. Do mesmo modo, a classe correspondente aos cambissolos associados aos neossolos litólicos, embora com uma menor frequência de movimentos, possui cerca de 70% de sua área em alta suscetibilidade, por ter recebido uma nota maior frente a classes dos latossolos vermelho-amarelos, que se concentram mais nas áreas de média suscetibilidade e possuem baixas frequências de movimentos.

Formações Superficiais - Para o plano de informação relacionado às formações superficiais, a classe atribuída ao elúvio obteve o maior percentual de sua totalidade no grau de alta suscetibilidade,

apresentando 159 das ocorrências de movimentos registradas na classe. Em segundo lugar está o colúvio, rico em blocos de rocha, que se concentra em quase 60% na classe de alta suscetibilidade, e estão associados às quedas de blocos. Já na classe referente aos alúvios, esta se concentra nas classes entre média e baixa suscetibilidade, e não apresenta registro destes processos gravitacionais.

Morfologia do Relevo - Para as classes referentes à morfologia do relevo, destacam-se as serras isoladas e locais; as serras escarpadas e as colinas, que se concentram fortemente no intervalo de alta suscetibilidade. Esta última classe, possui uma baixa ocorrência de movimentos, justamente por ocupar uma parcela menor da bacia.

Litologia - As classes relacionadas ao granito Teresópolis e suíte Serra dos Órgãos, apresentam maiores concentrações nos intervalos entre alta e muito alta suscetibilidade, onde a última possui alta ocorrência de movimentos para ambos os intervalos. Para a unidade Granito Teresópolis, o que foi levado em consideração ao atribuir um peso relevante para a geração do mapa de suscetibilidade, foi a densidade de pontos de movimentos, ou seja, número de ocorrências por área, que apresentou o valor mais alto frente a outras classes, influenciando o resultado final.

Uso e Cobertura do Solo - Tanto a classe de Vegetação em estágio secundário quanto a classe Floresta no plano de informação de uso e cobertura do solo, apresentaram os seus maiores percentuais no intervalo de alta suscetibilidade. Estes locais haviam recebido notas relativamente altas por estarem em área geralmente de alto declive, onde a suscetibilidade pode aumentar. Por outro lado, no intervalo de muito baixa suscetibilidade, a classe água, se encontra 45,8% de sua totalidade, por não ter nenhum registro de movimentos de massa.

Declividade - Ao ser comparada as classes de declividade no presente no estudo, nota-se que a partir da classe dos Relevos ondulados, a concentração no intervalo de alta suscetibilidade é expressiva e possui a maior quantidade de ocorrências de movimentos de massa frente a outros graus de suscetibilidade. Ao gerar o mapa final, as classes com maiores declividades receberam um peso maior,

justamente por serem consideradas mais suscetíveis a estes movimentos e, distribuíram-se, principalmente nos intervalos de alta e muito alta suscetibilidade.

Orientação - Apresenta uma distribuição no geral equilibrada entre as classes sobre o intervalo de suscetibilidade, indicando que as maiores concentrações de movimentos de massa estão localizadas entre a média e alta suscetibilidade, além das quais a própria área de cada classe analisada, também em maiores percentuais nestes intervalos.

Forma do Terreno - Em relação à forma do terreno, observa-se que a classe associada a forma convexa-divergente possui um maior percentual no intervalo de alta suscetibilidade, juntamente com o número de ocorrências de movimentos de massa, correspondente a 161 pontos. Em seguida, com a maior concentração por área nos intervalos de suscetibilidade está a forma convexa-convergente, que mesmo não apresentando um número de ocorrências de movimento tão alto quanto na primeira classe analisada, possui uma densidade relevante (quantidade de ocorrências por área), o que influenciou na atribuição de um peso maior e no resultado final da tabulação cruzada.

Proximidade a Estradas - A classe associada ao intervalo maior do que 100 metros de proximidade a estradas obteve o maior percentual por área concentrado no intervalo de alta suscetibilidade, ou seja, cerca de 63% de sua totalidade, com 395 ocorrências de movimentos de massa. É importante ressaltar que esta classe corresponde a maior parte da bacia, o que pode explicar este alto percentual de ocorrência. Nos intervalos de média suscetibilidade, destacaram-se as proximidades relativas a 10 a 50 metros e 50 a 100 metros, esta última apresentando uma quantidade de movimentos de massa relevante para área, com 54 ocorrências.

Proximidade a Drenagens- Ao analisar o plano de informação de proximidade a drenagens, percebe-se que os maiores destaques entre as classes na distribuição dos graus de suscetibilidade se dá mais uma vez na classe de proximidade maior do que 100 metros que corresponde a maior classe por área da bacia, e concentra mais de 60% de sua área na alta suscetibilidade, possuindo 296 pontos de movimentos de massa. Em seguida, está a classe relacionada ao intervalo entre 50 a 100 metros, que

concentra cerca de 54% de sua área no mesmo grau de suscetibilidade, contendo 143 ocorrências. No entanto, nas demais classes, a distribuição encontra-se um pouco mais equilibrada, concentrando-se em dois intervalos; de média e alta suscetibilidade, com maiores ocorrências na classe de maior suscetibilidade.

Vale salientar que os resultados apresentaram boa coerência com os pesos e notas atribuídos aos planos de informação e suas classes, indicando que estes não representaram valores aleatórios e sim condizentes com o estudo desenvolvido.

CONCLUSÕES

A aplicação da análise multicritério através da AHP e Média Ponderada no estudo da suscetibilidade a movimentos de massa possibilitou para o presente trabalho, resultados satisfatórios. A geração de uma base cartográfica composta por inúmeros elementos envolvidos de maneira direta ou indireta na ocorrência dos processos gravitacionais, selecionados a partir de diversas bibliografias e correlacionados espacialmente, gerou como produto final, um mapa coerente de suscetibilidade.

Neste sentido, foi observado que cerca de 77% dos pontos de movimentos mapeados encontram-se entre as classes de alta e muito alta suscetibilidade, distribuídos principalmente em regiões com declividades que variam entre 8 a 100% (relevo ondulado a fortemente montanhoso), e estão sob forte influência de um regime pluviométrico intenso, como o deflagrado no Megadesastre em 2011, do qual foi gerado a maior quantidade de ocorrências mapeadas e utilizadas no trabalho.

De uma forma geral, boa parte dos pontos de movimentos de massa mapeados estão localizados em áreas que sofrem ou já sofreram influência antrópica, ou em zonas fortemente escarpadas. No caso da Bacia do Paquequer, acredita-se que a declividade em associação ao uso e ocupação do solo são os principais fatores predisponentes envolvidos na geração dos processos analisados, que combinados com os demais condicionantes, tendem a aumentar a suscetibilidade à ocorrência destes eventos.

Este fato demonstra que a utilização de ferramentas de Geoprocessamento torna-se cada vez mais importante no desenvolvimento de diferentes trabalhos voltados para áreas de risco, especialmente por facilitar e agilizar o processo de elaboração de mapas distintos, agrupando uma gama de informações e possibilitando uma análise mais detalhada dos agentes atuantes no processo. Além do mais, a disponibilidade gratuita de imagens como as provenientes do TOPODATA (SRTM) e do Google Earth, e de softwares de SIG similares ao que foi utilizado neste estudo, viabilizam a inserção de instrumentos de geotecnologia no gerenciamento de risco, principalmente pelos órgãos responsáveis, em diferentes esferas governamentais.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo suporte financeiro no desenvolvimento desta pesquisa, parte integrante de Dissertação de Mestrado.

REFERÊNCIAS

BIGARELLA, J. J. et al. Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina. v.3, Cap.8, p.1026-1098, 2003.

BISPO, P. C. et al. Avaliação da suscetibilidade aos movimentos de massa na região de São Sebastião-SP com o uso de técnicas de geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14., 2009, Natal. RN. Anais... São José dos Campos: INPE, 2009. p. 3583-3590. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.16.07.45>> Acesso em: 12 jun. 2014.

BRASIL. Ministério da Integração Nacional. Anuário Brasileiro de Desastres Naturais 2012. Brasília: Centro Nacional de Gerenciamento de Riscos e Desastres (CENAD) 2013.

CÂMARA, G. et al. Introdução à ciência da geoinformação. São José dos Campos: INPE, 2001. 344p. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/sergio/2004/04.22.07.43>> Acesso em: 12 jun. 2016.

CASSETI, V. Geomorfologia. [S.l.]: [2005]. Disponível em: <<http://www.funape.org.br/geomorfologia/>>. Acesso em: 13 jan 2015.

CRUZ, O. Contribuição geomorfológica ao estudo de escarpas da Serra do Mar. São Paulo: Revista IG, v. 8-11, n. 1, jun 1990. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-929X1990000100002&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 15 abr 2015.

DOURADO, F. Análise da suscetibilidade a escorregamentos de massas na bacia do rio Paquequer – Teresópolis – Estado do Rio de Janeiro, utilizando os modelos SINMAP e Shalstab. 99p. Dissertação (Mestrado em Geologia) - Faculdade Geologia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

_____.; 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 2012; 35(2):43-54.

FARIA, D.; AUGUSTO FILHO, O. Aplicação do Processo de Análise Hierárquica (AHP) no mapeamento de perigo de escorregamentos em áreas urbanas. Revista do Instituto Geológico, São Paulo, v. 34, n. 1, jun. 2013. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100929X2013000100002&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 12 jun 2016.

FERREIRA, C.E.G. Sistema de Suporte à decisão espacial aplicado à análise da vulnerabilidade dos recursos hídricos na bacia Guapi-Macacu / RJ. 152p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Computação) – Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2012.

GOMES, R.A.T. Modelagem de previsão de movimentos de massa a partir da combinação de modelos de escorregamentos e corridas de massa. 102p. Tese (Doutorado em Geografia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

GUERRA, A. J. T. Encostas e a questão ambiental. In: GUERRA, A. J. T. & CUNHA, S. B. (orgs). A questão ambiental – diferentes abordagens. Bertrand Brasil: Rio de Janeiro, 2003.

KAYASTHA, P. et al. (2012). Application of the Analytical Hierarchy Process (AHP) for landslide susceptibility mapping: a case study from the Tinau watershed, west Nepal. Computers & Geosciences, 98: 300-347.

MARCELINO, E. V. Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamentos no município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de sensoriamento remoto e SIG. 228 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/12.03.09.33>>. Acesso em: 13 jun 2016.

MASSA, E. M.; ROSS, J. L. S. Aplicação de um modelo de fragilidade ambiental relevo-solo na Serra da Cantareira, bacia do Córrego do Bispo, São Paulo-SP. Revista do Departamento de Geografia - USP, v. 24, p. 57–79, 2012.

MMA (Ministério do Meio Ambiente), 2011. Relatório de Inspeção - Área atingida pela tragédia das chuvas - Região Serrana do Rio de Janeiro. Levantamento realizado pela Secretaria de Biodiversidade e Florestas, fev. 2011.

MOURA, A. C. M. Reflexões Metodológicas como Subsídio para Estudos Ambientais Baseados em Análise de Multicritérios. In. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13, (SBSR), 2007, Florianópolis. Anais... São José dos Campos: INPE, 2007. p.2899-2906.

OLIVEIRA FILHO, G. R. Os Movimentos De Massa Na Região Serrana Do Estado Do Rio De Janeiro Em 2012: Diagnóstico e proposição de medidas para enfrentamento de desastres ambientais. CES Revista. Juiz De Fora, v. 26 n.1,149-164p, 2012.

PINHO, G. M.; 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. Tamoios, v. 9 (1), p. 16-27, 2013.

SAATY, T.L. The Analytic Hierarchy Process. McGraw Hill, New York, 1980.

_____. How to make a decision: The analytic hierarchy process. European Journal of Operational Research, 48: 9-26, 1990

- SCHUMM, L. Dinâmica de evolução de fragmentos de mata atlântica na bacia hidrográfica do rio Paquequer, município de Teresópolis – RJ. 100 p. Monografia (Graduação em Biologia) – Departamento de Biologia Animal e Vegetal, Instituto de Biologia Roberto Alcântara Gomes, Universidade Estadual do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.
- SILVA, V.; MACHADO, P. SIG na Análise Ambiental: Suscetibilidade Erosiva da Bacia Hidrográfica do Córrego Mutuca, Nova Lima – Minas Gerais. Revista de Geografia (Recife), América do Norte, 3111 10 2014.
- SILVEIRA, C. S.; SOUZA, K. V. Relações hidrológicas entre a pluviosidade e a vazão em uma série temporal (2007-2009) de uma bacia e drenagem de uso misto – Teresópolis, RJ, Brasil. Geociências, v. 31, n. 3, p. 395-410, 2012.
- _____.; RAMOS, J. A. S. Análise Espacial com SIG de Parâmetros Ambientais e Comportamento Hidrológico (Chuva-Vazão) de uma Bacia de drenagem Montanhosa na Serra Dos Órgãos: Bacia Do Paquequer, Município De Teresópolis, RJ. Revista Brasileira de Geomorfologia, v.8, n. 1, 2007.
- SOETERS, R.; VAN WESTEN, C.J. Slope instability recognition, analysis, and zonation. In: Landslides Investigation and Mitigation. TURNER, A.K. e SCHUSTER, R.L. Special Report 247, Transportation Research Board, National research Council, Washington D.C., p.129-177, 1996.
- SPÖRL, C.; ROSS, J. L. S. Análise comparativa da fragilidade ambiental com aplicação de três modelos. Revista GEOUSP, n. 15, p. 39–49, 2004.
- VALERIANO, M. M. TOPODATA: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p. (INPE- 15318-RPE/818). Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGPSW/33EPEBL>>. Acesso em: Out. 2014.
- VANACÔR, R. N. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao mapeamento das áreas susceptíveis a movimentos de massa na região nordeste do Estado do Rio Grande do Sul. 129 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Sensoriamento Remoto, CEPSSRM/UFRGS. Porto Alegre, 2006.
- _____.; ROLIM, S. B. A. Mapeamento da Suscetibilidade a Deslizamentos usando Técnicas de Estatística Bivariada e Sistema de Informações Geográficas na Região Nordeste Do Rio Grande Do Sul. Revista Brasileira de Geomorfologia, v. 13, n. 1, 2012.
- VENANCIO, A. S. et al. Avaliação da suscetibilidade a movimentos de massa no município de Várzea Paulista (SP) utilizando os sistemas de informação geográfica. Geociênc. (São Paulo), São Paulo, v. 32, n. 1, 2013. Disponível em: <http://ppegeo.igc.usp.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S010190822013000100006&lng=pt&nrm=iso>. Acesso em: 13 fev 2015.
- VIEIRA, V. T.; CUNHA, S. B. Mudanças na morfologia dos canais urbanos: Alto curso do rio Paquequer, Teresópolis – RJ (1997/98 – 2001). Revista Brasileira de Geomorfologia, 9(1):3-22p, 2008.