

## Avaliação da suscetibilidade aos movimentos de massa na região de São Sebastião-SP com o uso de técnicas de geoprocessamento

Polyanna da Conceição Bispo<sup>1</sup>  
Cláudia Maria de Almeida<sup>1</sup>  
Márcio de Morisson Valeriano<sup>1</sup>  
José Simeão de Medeiros<sup>1</sup>  
Edison Crepani<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE  
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil  
{polyanna, almeida, valerian, simeao, crepani}@dsr.inpe.br

**Abstract.** This work aims to evaluate spatial inference methods designed for modeling the susceptibility to mass movements in the city of São Sebastião, São Paulo. Moreover, this study also aims to determine the effect of the inclusion of geomorphometric variables, namely vertical and horizontal curvatures, in the model. We compared two methods of spatial inference: Boolean and Fuzzy Gama. These methods have been tested with five variables (geomorphology, geology, pedology, land use, and slope) and then with seven variables: the former five ones besides the vertical (kv) and horizontal curvature (kh). The Boolean model displays only two classes (favorable and not favorable) for the occurring phenomenon. Regarding the Fuzzy Gama method, the qualitative transformation of numeric values turned feasible handling the uncertainties, inherent in natural phenomena, such as the gradual transitions between classes of terrain and between classes of vegetation cover. With regard to results, the Boolean method did not allow a detailed categorization of susceptibility classes in both cases (with five and with seven variables). The Fuzzy Gama method presented greater flexibility in the identification of areas and in the generation of scenarios in both cases. This was rendered possible through the manipulation of the gama index values (0.60, 0.63, 0.65, 0.70). The addition of the vertical and horizontal curvatures into the model enabled its refinement, and hence, a better performance. The Fuzzy Gama method presented more satisfactory results.

**Palavras-chave:** methods of spatial inference, risk analysis, geographic information systems, técnicas de inferência espacial, análise de risco, sistemas de informações geográficas.

### 1. Introdução

Os movimentos de massa são processos dinâmicos que ocorrem, em geral, em vertentes. Esses eventos podem ser desencadeados pela interação entre diferentes fatores endógenos, tais como tipo de solo, de rocha ou de forma do terreno, e fatores exógenos, como variáveis climáticas, fatores antrópicos, entre outros. Os movimentos provenientes dessas interações correspondem ao desprendimento e transporte de solo e/ou material rochoso vertente abaixo devido à sua instabilidade condicionada pela gravidade, podendo ser intensificada pela ação de outros agentes, tais como a água ou vento (Chorley et al., 1984; Fernandes e Amaral, 1996).

Os movimentos rápidos, denominados genericamente de deslizamentos, estão fortemente relacionados com as atividades antrópicas e à variabilidade de causas e mecanismos (Fernandes e Amaral, 1996). Esses processos fazem parte da dinâmica natural da formação do modelado terrestre, entretanto, podem tornar-se um problema quando são intensificados pela ocupação humana. Assim, podem ser considerados como sendo de risco, ou seja, fenômenos de origem natural ou induzidos antropicamente, acarretando prejuízos aos componentes do meio biofísico e social (Zuquette et al., 1995).

Esses fenômenos podem ser classificados quanto ao tipo de movimento, velocidade, geometria de falha, morfometria da vertente, tipo de material removido e grau de alteração, entre outros (Suaréz, 1998; Millán, 1998). Com relação à morfometria das vertentes, a variável geomorfométrica declividade fornece a medida de inclinação (em graus ou percentual) do relevo

em relação ao plano do horizonte. A velocidade de deslocamento de material e, portanto, a capacidade de transporte de massas sólidas e líquidas, é diretamente proporcional à declividade. Essa variável tem grande importância nos processos geomorfológicos, condicionando cursos de água e deslocamento de colúvio (Christofolletti, 1980). As declividades acima de 30°, por exemplo, apresentam risco de deslizamentos mais freqüente. Além da declividade, a curvatura vertical e a curvatura horizontal merecem destaque. A primeira se refere ao caráter convexo/côncavo do terreno quando analisado em perfil, e a última, ao caráter divergente/convergente dos fluxos de matéria sobre o terreno quando analisado em projeção horizontal. A combinação de ambas caracteriza a forma do terreno (Schmidt et al., 2003).

Neste contexto, as tecnologias de SIG (Sistemas de Informações Geográficas) e os métodos de inferência espacial são de grande importância na identificação de áreas suscetíveis aos movimentos de massa, uma vez que permitem a integração de diferentes informações, tais como tipo de solo, tipo de rocha, topografia, entre outros, auxiliando na elaboração de prognósticos mais completos e confiáveis da área de interesse.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho é avaliar e identificar o método de inferência espacial mais adequado para a modelagem da suscetibilidade aos movimentos de massa para o município de São Sebastião, São Paulo. Aliado a isso, este estudo visa também verificar o efeito da inclusão das variáveis geomorfométricas curvatura vertical (kv) e curvatura horizontal (kh) no modelo. O foco deste trabalho será a unidade geomorfológica denominada de vertente, a qual representa a unidade elementar do modelado terrestre.

## 2. Material e métodos

### 2.1 Área de estudo

O município de São Sebastião está situado no litoral norte do estado de São Paulo, a 200 km a nordeste de São Paulo, capital (Figura 1). As suas cotas oscilam entre 2 e 1500 m. Apresenta clima úmido - tropical, com temperatura média de 20°C. O presente estudo foi realizado na área do município, sendo as ilhas excluídas do recorte adotado.

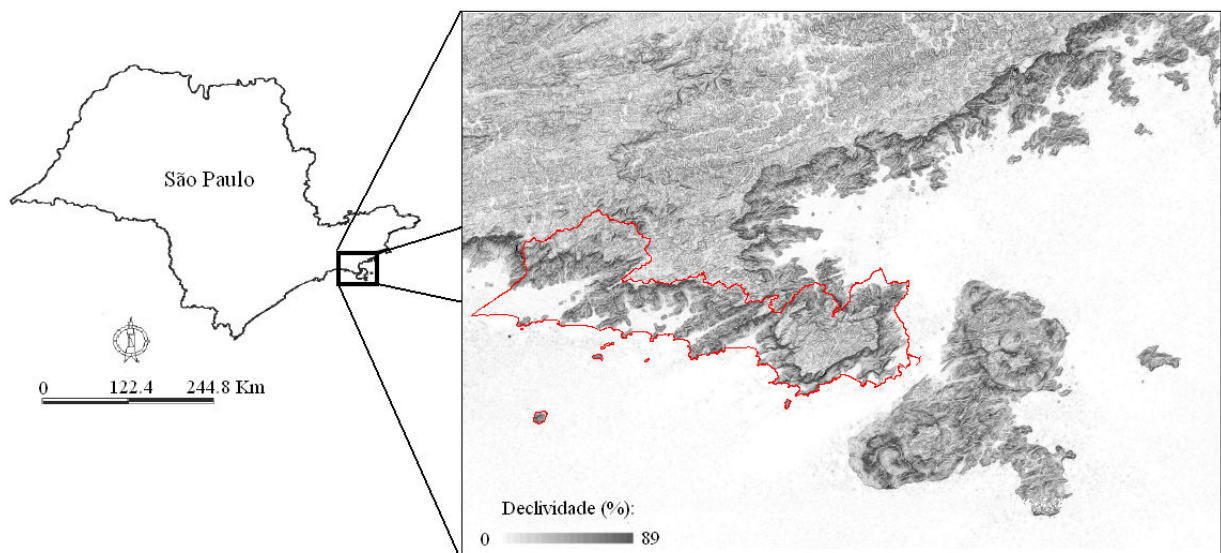


Figura 1. Localização do município de São Sebastião. Imagem declividade (TOPODATA, 2008) e o município delimitado pela linha vermelha no detalhe.

A área de São Sebastião possui uma série de características, tais como as altas declividades da encosta da Serra do Mar, a presença de rochas metamórficas (p.ex., migmatitos) e a intensidade e distribuição da precipitação durante o ano (1500 a 2500 mm/ ano) (Muñoz, 2005), as quais combinadas podem desencadear movimentos de massa do tipo escorregamento (Crepani e Simeão, 2000).

## 2.2 Procedimentos

As técnicas de inferência espacial são ferramentas que permitem a integração de dados espaciais de diversos formatos e fontes com o objetivo de modelar um determinado fenômeno. Tais técnicas são geralmente utilizadas para analisar e descrever fenômenos naturais, a partir da construção de previsões por meio de modelos prospectivos empíricos gerados em SIG (Sistemas de Informações Geográficas).

Um modelo em SIG combina um conjunto de mapas de entrada através de uma função que gera um mapa de saída (Bonham-Carter, 1994). Este processo resulta em planos de informações com diferentes representações temáticas e numéricas. No presente trabalho, foram testados dois métodos de inferência: o Booleano e o Fuzzy Gama. A inferência Booleana é a técnica mais simples utilizada na análise espacial. É realizada por meio da combinação lógica de mapas binários, com a aplicação de operadores algébricos condicionais. A técnica de inferência baseada na lógica fuzzy ou difusa consiste em uma metodologia de caracterização de classes não definindo limites rígidos (bordas) (Câmara et al., 1996). Apresenta a capacidade de capturar informações de diversas naturezas e convertê-las para um formato numérico, sendo útil na modelagem de sistemas complexos, como a natureza (Moreira da Silva, 2001). Aliado a isso, o método Fuzzy Gama permite fazer previsões quanto aos cenários mais ou menos suscetíveis a um determinado fenômeno, através da manipulação dos valores do Índice Gama ( $\gamma$ ). O operador Fuzzy Gama consiste no produto entre a soma algébrica fuzzy e o produto algébrico fuzzy. O parâmetro  $\gamma$  pode ser selecionado entre os valores de 0 a 1. Quando  $\gamma = 0$ , a combinação fuzzy é igual ao produto algébrico, e quando  $\gamma = 1$ , é igual à soma. Segundo Bonham-Carter (1994), os valores do intervalo  $0 < \gamma < 0,35$  apresentam um caráter “diminutivo” e valores do intervalo  $0,8 < \gamma < 1,0$  têm um caráter “aumentativo”. Assim, a principal diferença entre esses modelos de inferência é que o modelo Booleano apresenta apenas duas classes (favorável e não favorável), enquanto que a lógica difusa apresenta uma gradação entre as situações favoráveis ou não favoráveis do estudo em questão (Laranjeira, 2003).

Para o presente estudo, a geração de ambos os modelos contou com a utilização das variáveis geomorfologia, geologia, pedologia e uso e cobertura do solo, presentes no banco de dados geográficos fornecido pelos pesquisadores Edison Crepani e José Simeão de Medeiros (INPE). As variáveis declividade, curvatura vertical e curvatura horizontal foram obtidas a partir do TOPODATA (2008). O processamento e a geração dos modelos foram realizados no programa Spring 4.2.

O modelo prospectivo se apoiou na proposta de Soeters e Van Westen, 1996. Estes empregaram as variáveis uso do solo, geomorfologia, geologia, pedologia e declividades. Em uma segunda etapa, foram inseridas ao modelo as variáveis curvatura vertical e a curvatura horizontal.

As classes de cada uma das variáveis foram classificadas de acordo com cinco classes de suscetibilidade: Muito Alta Suscetibilidade (ma); Alta Suscetibilidade (a); Média Suscetibilidade (m); Baixa Suscetibilidade (b); e Muito Baixa Suscetibilidade (mb).

A Figura 2 ilustra o modelo OMT-G a partir do modelo conceitual do banco de dados geográficos e os procedimentos empregados neste estudo.

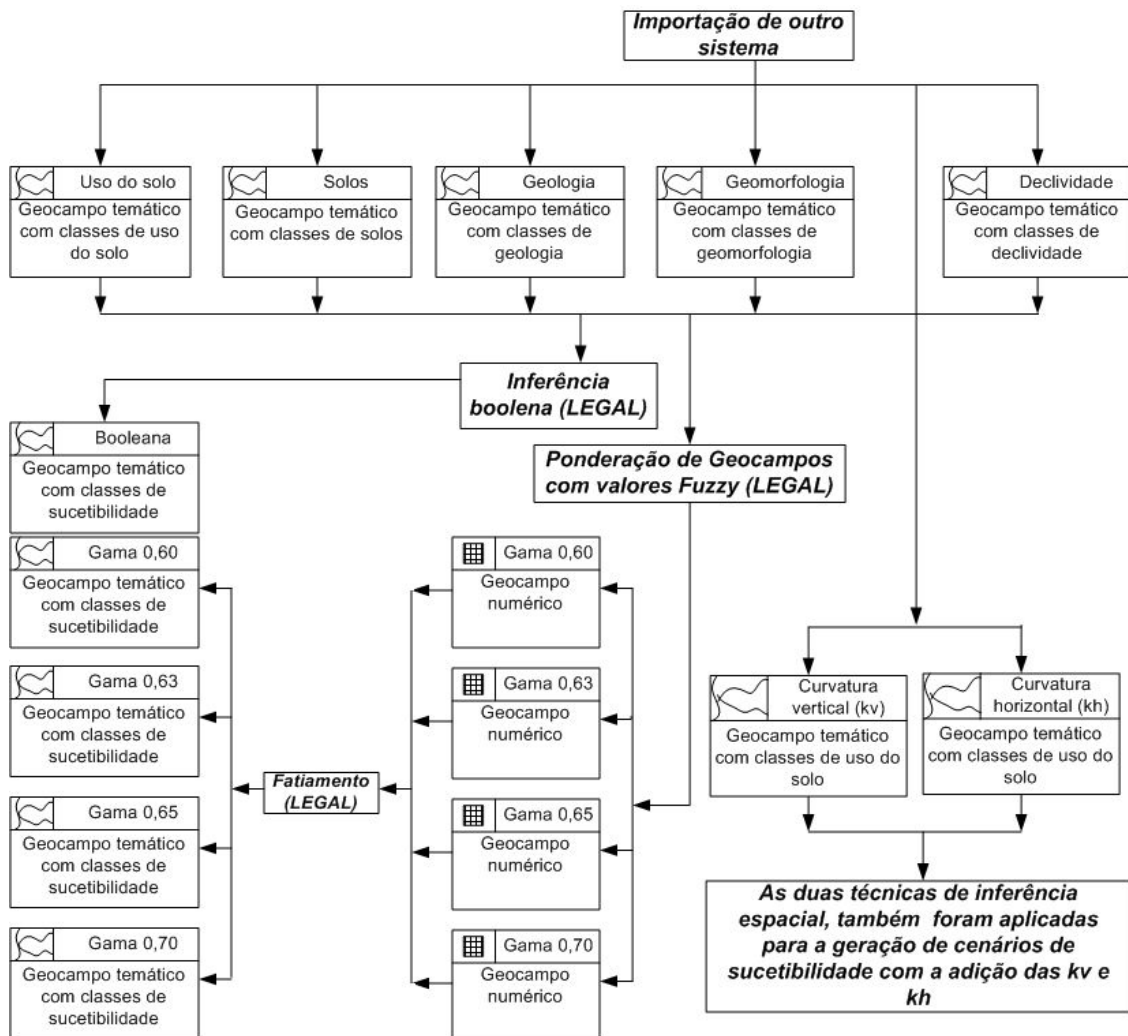


Figura 2. Modelo OMT-G apresentando as principais etapas e os modelos conceituais dos dados utilizados.

As inferências foram realizadas através da linguagem de álgebra de mapas LEGAL, disponível no programa Spring. Os métodos de inferência testados foram o Booleano e o Fuzzy. Para a inferência Booleana foram usadas as variáveis uso do solo, pedologia, geomorfologia, geologia e declividade. Posteriormente, foi repetido o mesmo procedimento, com a inclusão das variáveis curvatura vertical e curvatura horizontal.

No que se refere à modelagem e aos procedimentos, na etapa de inferência Fuzzy Gama, optou-se pela geração de quatro cenários distintos através dos seguintes valores de Índice Gama: 0,60; 0,63; 0,65 e 0,70, sendo este procedimento realizado a partir das variáveis uso do solo, pedologia, geomorfologia, geologia e declividade. Posteriormente, foi realizado o mesmo processo com a inserção das variáveis curvatura vertical e curvatura horizontal.

Desse modo, os modelos foram gerados e depois comparados entre si em função das classes de suscetibilidade.

#### 4. Resultados e Discussão

A partir dos geocampos temáticos resultantes da análise Booleana (com um menor número de variáveis), percebe-se um predomínio de áreas de muito baixa, média e de muito alta suscetibilidade. Essa inferência espacial mostrou-se bastante restritiva em relação ao Fuzzy Gama (Figura 3), o que se deve ao fato da técnica Booleana ser a mais simples, realizada a partir da combinação lógica de mapas binários. Desse modo, algumas classes foram subestimadas ou superestimadas, e outras foram quase suprimidas no cenário gerado, como no caso da classe baixa suscetibilidade.

A inferência Fuzzy Gama, por sua vez, distribuiu melhor as áreas de risco potencial em todas as classes de suscetibilidade, além de permitir a geração de diferentes cenários. Devido a essa flexibilidade da técnica, foram gerados quatro cenários (com valores de Gama: 0,60; 0,63; 0,65; 0,70). O aumento do valor de gama gerou cenários mais favoráveis à ocorrência de movimentos de massa, ou seja, houve um aumento da ocorrência das classes alta e muito alta. Por outro lado, os valores mais próximos de 0,60 apresentaram cenários menos favoráveis aos movimentos de massa e ocorrências semelhantes para todas as classes possíveis (Figura 3).

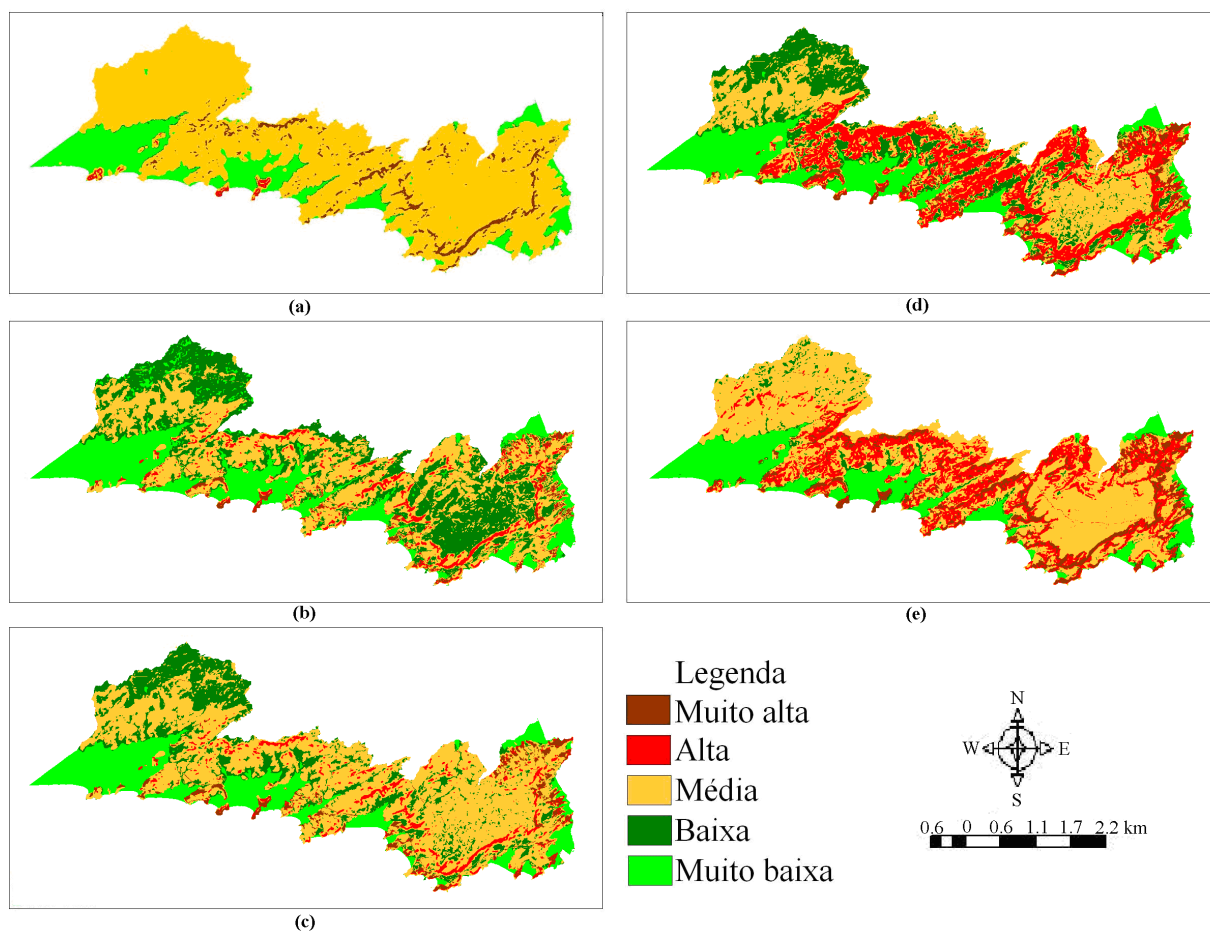


Figura 3. Geocampo temático obtido através do método Booleano (a) e cenários gerados com os valores de Índice Gama: (b) 0,60; (c) 0,63; (d) 0,65; (e) 0,70.

Com o objetivo de verificar o efeito da inclusão das variáveis geomorfológicas curvatura vertical (kv) e curvatura horizontal (kh) aos modelos, foram realizados os mesmos métodos de inferência. O novo cenário gerado pela inferência Booleana (Figura 4) com a inclusão de kv e kh foi menos satisfatório que o anterior (Figura 3). A classe média suscetibilidade foi superestimada em detrimento das demais, as quais foram subestimadas drasticamente, enquanto a classe baixa suscetibilidade foi suprimida.

A inferência Fuzzy Gama (Figura 4), por sua vez, distribuiu melhor as áreas de risco potencial em todas as classes de suscetibilidade, além de permitir a geração de diferentes cenários (com valores de Índice Gama de: 0,60; 0,63; 0,65; 0,70). A adição das variáveis kv e kh ao modelo foi satisfatória, uma vez que o refinaram, definindo melhor as formas e limites das classes, especialmente as classes de muito alta, alta e média suscetibilidade. O aumento do valor de gama gerou cenários mais favoráveis à ocorrência de movimentos de massa, enquanto os valores mais próximos de 0,60 apresentaram cenários menos favoráveis ao evento (Figura 4).

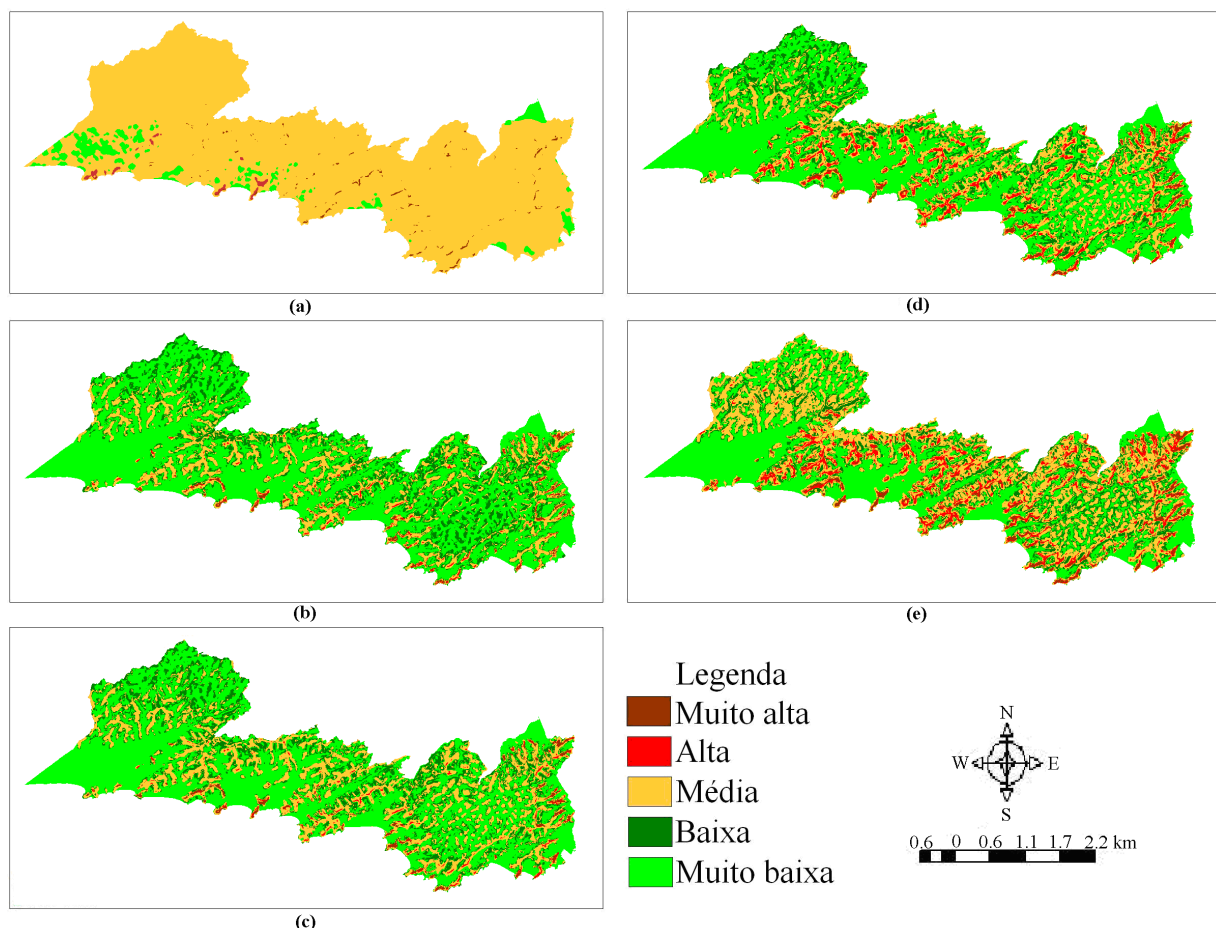


Figura 4. Geocampo temático obtido através do método Booleano (com a inclusão de kv e kh) (a) e cenários gerados (com a inclusão de kv e kh) com os valores de Índice Gama: (b) 0,60; (c) 0,63; (d) 0,65; (e) 0,70.

O refinamento propiciado pelas variáveis kv e kh permitiu que fossem visualizadas as áreas passíveis de serem atingidas pelos eventos de escorregamento (em especial, o cenário gerado com o Índice Gama de 0,70). O melhoramento do modelo através da inserção da informação kv e kh é

devido a ambas variáveis estarem relacionadas aos processos de migração e acúmulo de água, minerais e materiais orgânicos no solo através da superfície, proporcionados pela gravidade. Aliado a isso, estas duas variáveis combinadas representam uma caracterização das formas do terreno, que se associam diretamente a propriedades hidrológicas e de transporte (Schmidt et al., 2003). Na Figura 5, observa-se que logo abaixo das classes de muito alta, alta e média suscetibilidade, existem regiões cujos formatos coincidem com o cenário das áreas de risco definidas por Crepani e Simeão (2000). Assim, o cenário gerado pelo valor de Índice Gama de 0,70 é comparável ao cenário gerado por Crepani e Simeão (2000), cujo detalhe pode ser visualizado na Figura 5.

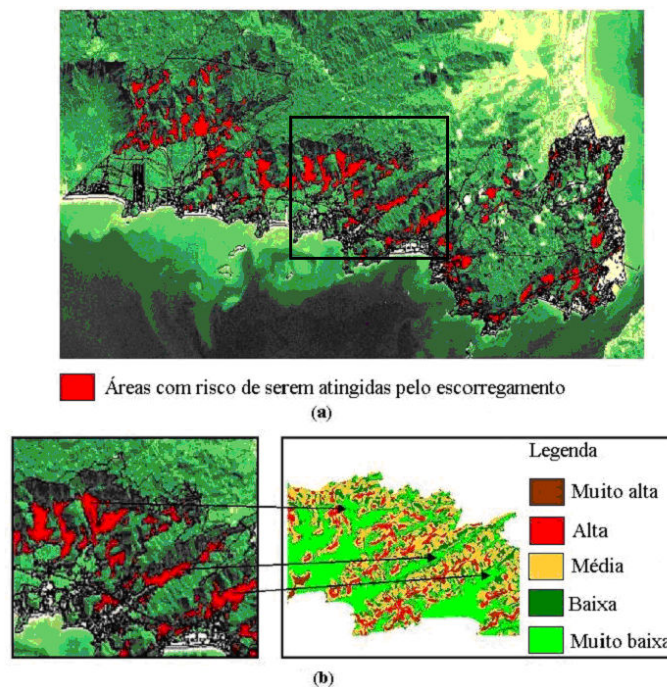


Figura 5. Áreas com risco de serem atingidas pelo escorregamento, em vermelho (Crepani e Simeão, 2000) (a); Detalhe da comparação entre o cenário de áreas de risco, gerado por Crepani e Simeão (2000) e o cenário gerado pela inferência Fuzzy com valor de Índice Gama de 0,70 com a inclusão de kv e kh (b).

## 5. Conclusões

O método Booleano foi adequado na identificação das áreas de suscetibilidade muito alta no caso de cinco variáveis, e média no caso de sete variáveis. Entretanto, a rigidez das combinações qualitativas das variáveis (ou evidências) não possibilitou uma discriminação mais detalhada das classes de suscetibilidades.

Com relação ao método Fuzzy Gama, a transformação dos valores qualitativos para valores numéricos tornou possível o tratamento das incertezas inerentes a fenômenos naturais, como por exemplo, as transições graduais entre as classes de solos ou entre as classes de cobertura vegetal. Além disto, este método tornou possível a geração de cenários mais favoráveis e menos favoráveis ao fenômeno estudado. A adição das variáveis curvatura vertical e curvatura horizontal ao modelo foram satisfatórias para o refinamento deste. A delimitação do cenário obtido pelo Fuzzy Gama (Índice Gama = 0,70) com adição de kv e kh foram comparáveis ao mapa de risco obtido por Crepani e Simeão (2000), mostrando que o uso dessas variáveis é

interessante quando se deseja mostrar limites e formas bem definidas do terreno e, em especial, quando se deseja delimitar áreas potenciais a serem atingidas pelos escorregamentos.

O presente estudo possibilitou a verificação do potencial e da flexibilidade do método Fuzzy Gama em estudos ambientais e, em especial, do seu uso com a inserção de variáveis topográficas relacionadas às formas do terreno, tais como kv e kh. O método Fuzzy Gama apresentou os resultados mais satisfatórios.

## 6. Referências bibliográficas

- Bonham-Carter, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994. 398 p.
- Câmara, G.; Casanova, M.A.; Hemerly, A.S.; Magalhães G.C.; Medeiros, C.M.B. **Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica**. São José dos Campos: INPE. Campinas: IBM Brasil/ CPqD-Telebrás/Unicamp, 1996. 193p.
- Câmara, G.; Moreira, F. R.; Barbosa, C.; Filho, R. A.; Bônish, S. Técnicas de Inferência Geográfica. In: Câmara, G.; Davis, C.; Monteiro, A. M. V. **Introdução à Ciência da Geoinformação**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/introd/index.html>> Acesso em: 1 Out 2008.
- Crepani, E.; Medeiros, J.S. de. Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao estudo da vulnerabilidade a movimentos de massa no Município de São Sebastião - SP. - In: Simpósio Latinoamericano de Percepción Remota (SELPER), 9., 2000. Misiones. **Anais...** Misiones, Argentina: SELPER – Capítulo Argentina, 2000.
- Chorley, R. J.; Schumm, S. A. y Sugden, D. E. **Geomorphology**. Ed. Methuen, 1985. 605 p.
- Christofolletti, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1980. 188p.
- Fernandes, N. F.; Amaral, C. P. Movimentos de massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. In: Guerra, A. J. T.; Cunha, S. B. **Geomorfologia e meio ambiente**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. Cap. 3, p. 123-194.
- Laranjeira, L.R. **Utilização da Lógica Difusa na caracterização de áreas favoráveis à disposição de resíduos sólidos no município de Americana (SP)**. 2003. 103 p. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2003.
- Moreira da Silva, F.R. **Uso e Avaliação de Técnicas de Integração e Análise Espacial de Dados em Pesquisa Mineral Aplicadas ao Planalto de Poços de Caldas**. 2001. 160 p. (INPE-9481-TDI/825). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2001.
- Muñoz, V. A. **Análise comparativa de técnicas de inferência espacial para identificação de unidades de suscetibilidade aos movimentos de massa na região de São Sebastião, São Paulo, Brasil**. 2005. 50 p. Especialização (XVIII Curso Internacional em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica)-Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2005.
- Millán, J.A, Lozano, J. A. **Lineamentos metodológicos para a avaliação da ameaça por fenômenos de remoção de massa** (em espanhol). 1998. 112p. Tesis (Maestria em Geotecnia) - Facultad de Ingenieria, Universidad de Colômbia, Bogotá, Colômbia, 1998.
- Schmidt, J.; Evans, I.S.; Brinkmann, J. Comparison of polynomial models for land surface curvature calculation. **International Journal of Geographical Information Science**, v.17, n.8, p. 797-814, 2003.
- Soeters R, Van Westen CJ. Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation, In: Turner, A. K. and Schuster, R. L. (Eds), **Landslides, investigation and mitigation**, Transportation Research Board, National Research Council, Special Report 247, National Academy Press, Washington DC, USA, 1996. p 129–177
- Suárez, J. D. **Landslides and slope stability in tropical zones** (in spanish). Instituto de Investigaciones sobre Erosion y Deslizamientos, Bucaramanga, Colombia, 548p. 1998.
- TOPODATA. **Banco de dados Geomorfométricos do Brasil**. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/topodata>>. Acesso em: 1.Out.2008.
- Valeriano, M. M. Modelo digital de variáveis morfológicas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia, GO. **Anais**. São José dos Campos: INPE, 2005. Artigos, p. 3595-3602. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8.
- Zuquette, L.V.; Pejón, O.; Gandolfi, N.; Paraguassu, A.B. Considerações básicas sobre a elaboração de cartas de zoneamentos de probabilidade ou possibilidade de ocorrer eventos perigosos e de riscos associados. **Geociências**, São Paulo, v. 14, n. 2, p. 9-39, 1995.