

AVALIAÇÃO DOS MÉTODOS BOOLEANO, *FUZZY* GAMA E BAYESIANO NA IDENTIFICAÇÃO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS A MOVIMENTOS DE MASSA NO MUNICÍPIO DE SÃO SEBASTIÃO/SP

Flávio Fortes Camargo ¹
Cláudia Maria de Almeida ¹
Teresa Gallotti Florenzano ¹
Edison Crepani ¹
José Simeão de Medeiros ¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{fortes, almeida}@dsr.inpe.br
{teresa, crepani}@ltd.inpe.br
simeao@dpi.inpe.br

Resumo: O mapeamento de áreas susceptíveis a movimentos de massa representa uma importante ferramenta em atividades de ordenamento territorial. A partir desta, planeja-se a ocupação urbana e a construção de obras de engenharia, tais como rodovias. Sistemas de Informações Geográficas têm sido aplicados neste tipo de mapeamento devido à sua capacidade de manipular grandes conjuntos de dados geográficos. Estes sistemas possibilitam também a aplicação de inferências espaciais sobre os dados geográficos, as quais fornecem informações úteis à tomada de decisão. Neste contexto, este trabalho apresenta o mapeamento de áreas susceptíveis a movimentos de massa em área localizada no município de São Sebastião-SP. Foram comparados três métodos de inferência espacial: inferência booleana, inferência *fuzzy* gama e inferência bayesiana. O método booleano consiste na aplicação de operadores lógicos sobre conjuntos rígidos, no caso, os planos de informação. A inferência *fuzzy* gama representa a aplicação do operador *fuzzy* gama em conjuntos *fuzzy*. Estes, ao contrário dos conjuntos booleanos, são conjuntos com limites inexatos e admitem pertinência parcial. A inferência bayesiana identifica as probabilidades de ocorrência do evento estudado em face da ocorrência prévia de um outro evento, denominado evidência. Com relação aos resultados obtidos, o método booleano não possibilitou uma discriminação detalhada das classes de susceptibilidades. Neste sentido, prevaleceu a ocorrência das classes “muito alta”, “média” e “muito baixa”. O método *fuzzy* gama apresentou maior flexibilidade na identificação das áreas e na geração de cenários. Isto foi possível a partir da manipulação dos valores do índice gama. A inferência bayesiana utilizou apenas a evidência (ou variável) declividade. Desse modo, áreas de alta susceptibilidade apresentaram correlação com áreas de alta declividade.

Palavras-Chave: Movimentos de Massa, SIG, Técnicas de Inferência Geográfica.

1. Introdução

O movimento de massa representa uma catástrofe natural que atinge áreas montanhosas. Sua ocorrência promove sérios danos materiais e humanos. De forma geral, consiste em movimento gravitacional de material rochoso e solos. Pode ser desencadeado por uma série de estímulos externos, tais como precipitação intensa, terremotos etc. Atividades humanas, como desflorestamento e obras de engenharia, são também importantes catalisadores dos movimentos de massa (Dai *et al.*, 2002).

De acordo com Dai *et al.* (2002), nos Estados Unidos da América, anualmente, ocorrem perdas econômicas estimadas entre 1 e 2 bilhões de dólares e, também, perdas humanas que oscilam em torno de 25 a 50 mortes. Fernandes e Amaral (1996) apontam que, em 1993, os movimentos de massa causaram 2.517 mortes em todo o mundo.

Assim, mapeamentos de áreas propensas a movimentos de massa (mapeamentos de áreas de risco) são fundamentais e têm sido realizados a partir de três métodos: heurísticos, determinísticos e estatísticos. O método heurístico emprega o conhecimento de especialistas na definição entre variáveis e graus de risco, que podem estar associados através de cláusulas lógicas ou formulações matemáticas. O método determinístico emprega modelos matemáticos no estabelecimento destes pesos. Com relação ao último método, estatístico, este estabelece os pesos a partir do exame das relações existentes entre os fatores responsáveis pela instabilidade e a distribuição dos eventos (Marcelino, 2003). Os três métodos empregam dados de Sensoriamento Remoto e técnicas de inferência espacial disponíveis em Sistemas de Informações Geográficas (SIG).

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar três técnicas de inferência espacial: inferência booleana, inferência *fuzzy* e inferência bayesiana no mapeamento de áreas susceptíveis a movimentos de massa de um setor do município de São Sebastião-SP.

2. Metodologia

2.1. Área de Estudo

O município de São Sebastião está localizado na porção norte do litoral paulista, em torno de 200 km a nordeste de São Paulo, capital. Neste trabalho, realizou-se um recorte espacial que abrange a porção nordeste do município (nas proximidades do canal de São Sebastião e do município de Ilha Bela), conforme ilustra a **Figura 1**.

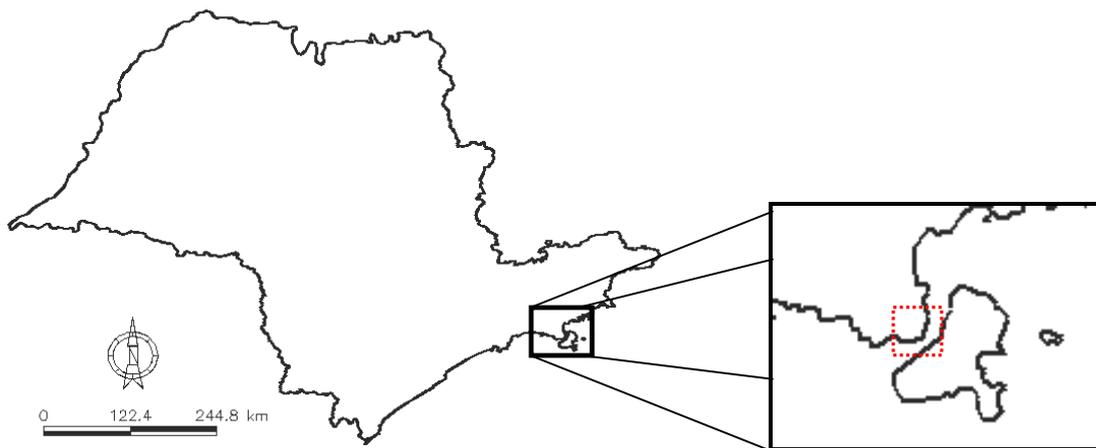


Figura 1 – Localização da área de estudo (retângulo tracejado em vermelho).

A área de estudo combina fatores que propiciam a freqüente ocorrência de fenômenos de movimento de massa. Estes fatores são, principalmente: as altas declividades da Serra do Mar, a presença de blocos de rochas individualizados pelo intemperismo, solos instáveis e a intensidade e distribuição da precipitação durante o ano, 1500 a 2500 mm (Muñoz, 2005). Cabe destacar que estes movimentos de massa representam risco geológico em função da proximidade do núcleo urbano às áreas susceptíveis a este processo.

2.2. Métodos de Inferência Espacial

Modelagem em SIG consiste no emprego de uma metodologia e de um conjunto de técnicas de inferência espacial. Estas técnicas consistem em ferramentas para integração de dados espaciais de diversos formatos e de diversas fontes. São empregadas na realização de análises e na descrição dos dados e, principalmente, na construção de cenários através de modelos prospectivos empíricos (Muñoz, 2005).

Bonham-Carter (1994) define um modelo em SIG como um processo de combinar um conjunto de mapas de entrada através de uma função que gera um mapa de saída, conforme ilustrado na Equação 1.

$$\textit{Mapa de saída} = f(\textit{2 ou mais mapas de entrada}) \quad (1)$$

Estes procedimentos geram como resultados planos de informação com diferentes representações de tipos temático ou numérico.

2.2.1. Inferência Booleana

A inferência booleana consiste na combinação lógica de mapas binários ou multinível através de operadores condicionais. Cada mapa utilizado pode ser entendido como um plano de informação. Os vários planos de informação são combinados, segundo uma seqüência lógica, para dar suporte a uma hipótese (Moreira da Silva, 2001). A álgebra booleana utiliza os operadores lógicos AND (interseção), OR (união), NOT (negação) e XOR (exclusão). Na **Figura 2**, são ilustrados os operadores booleanos.

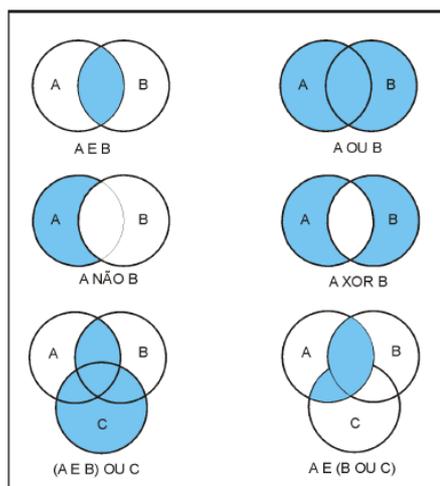


Figura 2 - Diagramas de Venn que ilustram os resultados da aplicação de operadores de lógica booleana.

Fonte: Câmara *et al.* (2007).

2.2.2. Inferência Fuzzy

Os conjuntos *fuzzy* lidam com conceitos inexatos. Estes foram introduzidos por Zadeh em 1965 (*apud* Câmara *et al.*, 2007). Resultaram da preocupação deste autor com a qualidade da informação fornecida por modelos rígidos ou tradicionais.

2.2.2.1 Lógica *Fuzzy*

Também denominada de lógica difusa, consiste em uma metodologia de caracterização de classes, as quais não têm limites rígidos (bordas) (Câmara *et al.*, 2007). Apresenta a capacidade de capturar informações de diversas naturezas e convertê-las em formato numérico. É útil na modelagem de sistemas complexos, tais como os sistemas naturais (Moreira da Silva, 2001).

2.2.2.2 Conjuntos *Fuzzy* ou Função *Fuzzy*

Conjuntos com limites inexatos são chamados de conjuntos *fuzzy*. Estes admitem pertinência parcial. Estão definidos matematicamente, de forma que \mathbf{Z} denota um espaço de objetos, e o conjunto \mathbf{A} em \mathbf{Z} representa um conjunto de pares ordenados (Burrough e McDonnell, 1998 *apud* Muñoz, 2005):

$$\mathbf{A} = (\mathbf{z}, MF_{\mathbf{A}}^F(\mathbf{z})) \text{ para todo } \mathbf{z} \in \mathbf{Z} \quad (2)$$

onde a função de pertinência (ou “membership function”) $MF_{\mathbf{A}}^F(\mathbf{z})$ representa o grau de pertinência de \mathbf{z} em \mathbf{A} . Esta função é um número compreendido no intervalo de 0 a 1, com 1 representando pertinência total ao conjunto, e 0 (zero), pertinência nula. Isto significa que os indivíduos podem, para diferentes graus, ser membros de mais de um conjunto (Burrough e McDonnell, 1998 *apud* Muñoz, 2005).

O ponto onde o valor do membro é igual a 0,5, é denominado “ponto de cruzamento”. Este deve coincidir com os contatos rígidos dos modelos booleanos (Moreira da Silva, 2001). A **Figura 3** ilustra os conjuntos *fuzzy* e booleano.

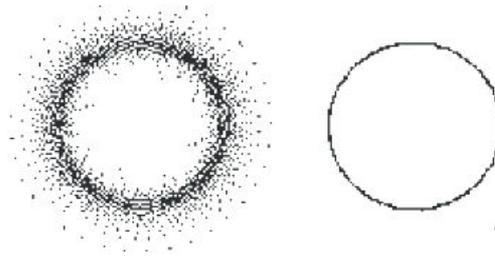


Figura 3 - Imagem de conjunto *fuzzy* (esquerda) e conjunto booleano (direita).

Fonte: Câmara *et al.* (2007).

2.2.2.3 Fuzzy Gama

O operador *fuzzy* gama consiste no produto entre a soma algébrica *fuzzy* e o produto *fuzzy* (Muñoz, 2005). A Equação 3 apresenta este operador:

$$\mu = \left(1 - \prod_{i=1}^n \mu_i (1 - \mu_i) \right)^{\gamma} \cdot \left(\prod_{i=1}^n \mu_i \right)^{1-\gamma} \quad (3)$$

onde o índice gama (γ) é um parâmetro escolhido no intervalo (0,1). Se $\gamma = 0$, a combinação *fuzzy* resulta no produto algébrico, e quando $\gamma = 1$, esta equivale à soma algébrica. Bonham-Carter (1994) aponta que os valores do intervalo $0 < \gamma > 0,35$ são de caráter “diminutivo”, desse modo, sempre menores ou iguais ao menor membro *fuzzy* de entrada; os valores do intervalo $0,8 < \gamma > 1,0$ apresentam um caráter “aumentativo”, em que o valor de saída será maior, ou igual, ao valor do maior membro *fuzzy* de entrada, e os valores do intervalo $0,35 < \gamma > 0,8$ não se enquadram nem como “aumentativo” nem como “diminutivo”. Sendo que os valores de saída, neste caso, cairão sempre entre os valores menor e maior de entrada, conforme ilustração da **Figura 4**.

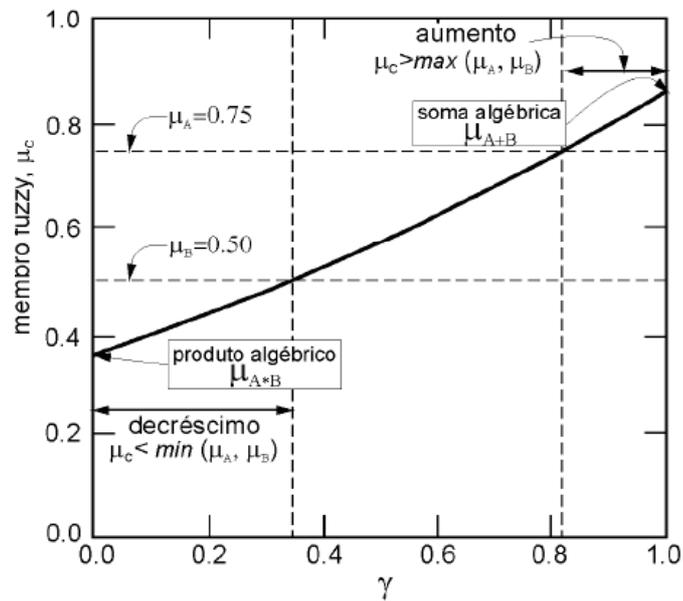


Figura 4 - Distribuição da função *fuzzy* gama para distintos valores de γ (entre 0 e 1).

Fonte: Moreira da Silva (2001).

2.2.3. Inferência Bayesiana

A abordagem bayesiana consiste no estabelecimento das probabilidades envolvidas na determinação ou identificação de um evento geográfico, dada uma condição. Os principais conceitos tratados nesta técnica de inferência são os de probabilidades *a priori* e *a posteriori* (Bonham-Carter, 1994). De modo geral, um evento qualquer apresenta uma determinada probabilidade de ocorrência, a qual é denominada de probabilidade *a priori*. No entanto, evidências que refinem estas probabilidades podem fornecer um novo valor denominado de probabilidade *a posteriori*.

De acordo com Câmara *et al.* (2007) este modelo é denominado de modelo empírico, pois, se baseia em métodos estatísticos para a determinação dos pesos dos atributos envolvidos.

A partir do conceito de probabilidade condicional, a teoria bayesiana estabelece que a probabilidade de ocorrência de um evento A condicionada por um evento B é dada pela Equação 4 (Magalhães e Lima, 2005).

$$P\{A/B\} = P\{A\} \frac{P\{B/A\}}{P\{B\}} \quad (4)$$

A partir do mesmo princípio, pode-se obter a probabilidade do evento A condicionada pela ausência do evento B. Isto é dado pela Equação 5, em que Bc representa o evento complementar a B.

$$P\{A/Bc\} = P\{A\} \frac{P\{Bc/A\}}{P\{Bc\}} \quad (5)$$

Bonham-Carter (1994) trata estas probabilidades em termos de chances (*odds*), as quais são obtidas através da razão entre a probabilidade condicional de um evento ocorrer pela probabilidade condicional da não-ocorrência (probabilidade complementar). Aplicando-se isto à Equação 4, obtém-se a seguinte relação:

$$\frac{P\{A/B\}}{P\{Ac/B\}} = \frac{P\{A\} P\{B\} P\{B/A\}}{P\{Ac\} P\{B\} P\{B/Ac\}} \quad (6)$$

Através desta relação, obtêm-se o *odds* de {A/B} (a probabilidade *a posteriori*), o *odds* de {A} (probabilidade *a priori*) e o fator (peso) da probabilidade *a posteriori* (Equação 7).

$$\frac{P\{B/A\}}{P\{B/Ac\}} \quad (7)$$

Esta razão é denominada de razão de suficiência (*sufficiency ratio, LS*). A expressão em *odds* é dada pela Equação 8.

$$O\{A/B\} = O\{A\} \frac{P\{B/A\}}{P\{B/Ac\}} \quad (8)$$

Por outro lado, considerando-se $O\{A/Bc\}$, obtém-se a razão de necessidade (*necessity ratio, LN*).

De acordo com Bonham-Carter (1994), este método empírico de estabelecimento de probabilidades a *posteriori* é denominado de pesos de evidência (*weights of evidence*). Este método aplica o logaritmo natural ou neperiano em ambos os lados da Equação 8 para a definição do peso positivo de evidência (W^+). Conforme apresenta a Equação 9:

$$\mathbf{\log it\{A/B\} = \log it\{A\} + w^+} \quad (9)$$

onde $\log it\{A/B\}$ é o logaritmo natural de $O\{A/B\}$ e $\log it\{A\}$ é o logaritmo natural de $O\{A\}$. Aplicando-se o logaritmo natural em $O\{A/Bc\}$, obtém-se o peso negativo de evidência (W^-).

2.3. Material e Procedimentos Metodológicos

Neste trabalho, utilizou-se um banco de dados geográficos construído pelos pesquisadores Edison Crepani e José Simeão de Medeiros, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) (Crepani e Medeiros, 2000). Também se utilizou uma matriz de análise combinatória para a inferência booleana (Munõz, 2005). Os aplicativos empregados foram o Spring 4.2 e o Idrisi 3.2.

O modelo prospectivo se apoiou na proposta de Soeters e Van Westen (1996) (*apud* Muñoz, 2005). Este emprega as seguintes variáveis: uso do solo, geomorfologia, geologia, pedologia e declividade. Estas variáveis são classificadas de acordo com cinco classes de susceptibilidade, a saber:

- Muito Alta Suscetibilidade (ma)
- Alta Susceptibilidade (a)
- Média Susceptibilidade (m)
- Baixa Susceptibilidade (b)
- Muito Baixa Susceptibilidade (mb)

A **Figura 5** apresenta o fluxograma dos procedimentos realizados.

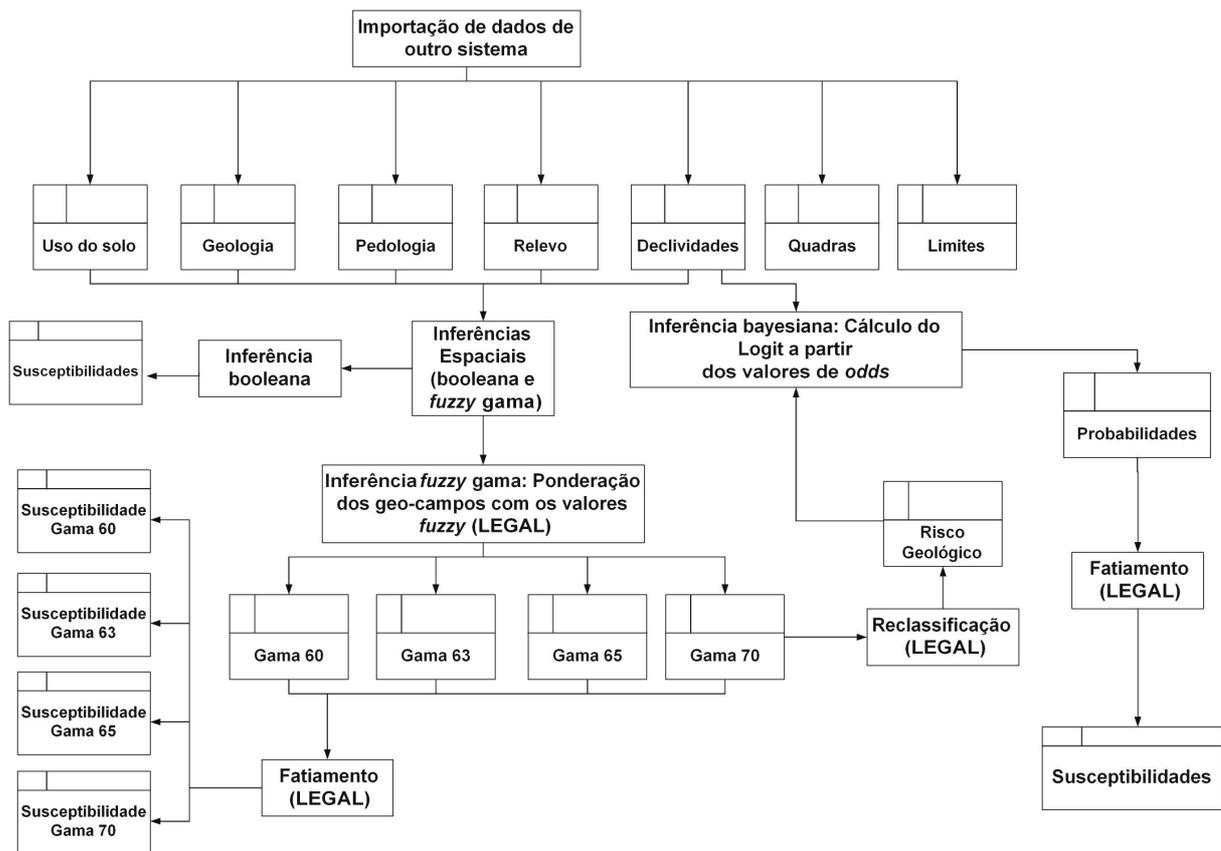


Figura 5 – Fluxograma de procedimentos realizados.

Todas as inferências foram realizadas através da linguagem de álgebra de mapas (LEGAL), disponível no aplicativo Spring 4.2.

Com relação à modelagem e aos procedimentos, na etapa de inferência *fuzzy gama*, optou-se pela geração de quatro cenários distintos através dos seguintes valores do índice gama: 0,60; 0,63; 0,65 e 0,70.

Na inferência bayesiana, foi necessária a construção de um mapa binário de verdade terrestre, o qual foi obtido através da reclassificação do geo-campo numérico fornecido pelo valor 0,70 do índice gama.

Na inferência bayesiana, também foram realizados testes de independência para as variáveis utilizadas (pedologia, uso do solo, geologia, geomorfologia e declividades). Os índices Kramer obtidos apontaram a variável declividade como a mais adequada para esta técnica de inferência. Esta variável apresentou menor correlação com as demais variáveis, e maior correlação com o dado de verdade terrestre. A partir disto, foram calculados somente os valores de W^+ . Estes representam a atratividade (ou

correlação positiva) entre valores elevados de declividade e a ocorrência de movimentos de massa.

3. Resultados e Discussões

Através dos geo-campos temáticos finais, foi possível observar que a inferência booleana foi muito restritiva em relação aos demais métodos. Houve um predomínio de áreas de muito baixa, média e de muito alta susceptibilidades, conforme ilustração da **Figura 6**.

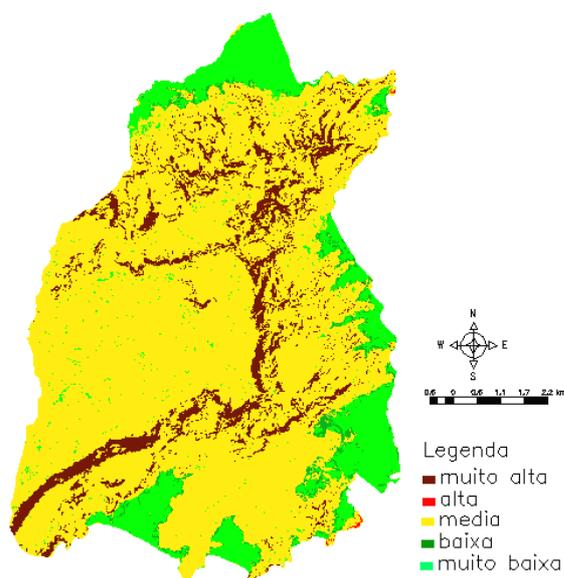


Figura 6 – Mapa temático de classes de susceptibilidade a movimentos de massa obtido através do método booleano.

Com relação à inferência *fuzzy* gama, esta promoveu maior distribuição (em relação ao método booleano) das áreas de risco potencial em todas as classes de susceptibilidade. A inferência *fuzzy* gama possibilitou assim maior flexibilidade na geração de cenários de risco potencial.

O aumento do valor do índice gama gerou cenários mais favoráveis à ocorrência de movimentos de massa, ou seja, aumentou a ocorrência das classes alta e muito alta. Por outro lado, os valores mais próximos de 0,6 apresentaram cenários menos favoráveis aos movimentos de massa para todas as classes. Isto pode ser verificado nas **Figuras 7 e 8**.

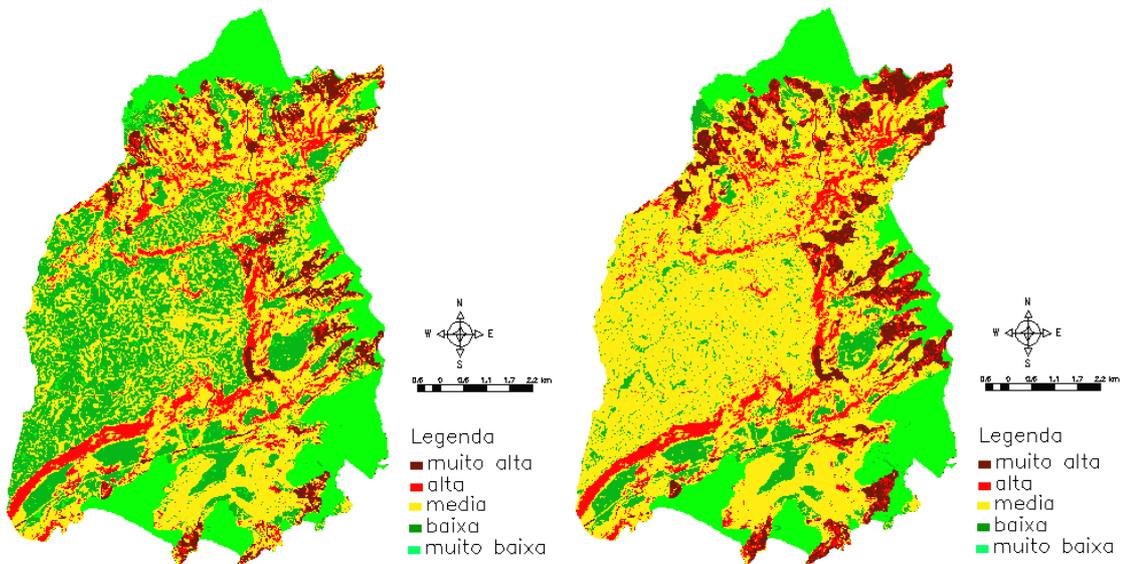


Figura 7 - Cenários de susceptibilidade a movimentos de massa gerados com os valores de índice gama 0,60 (à esquerda) e 0,63 (à direita).

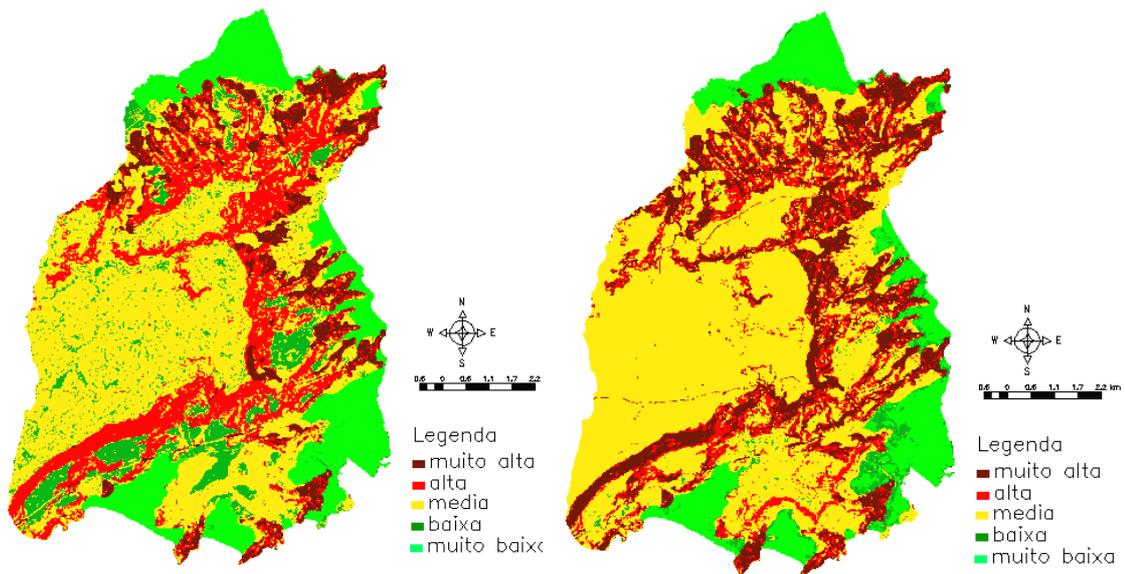


Figura 8 - Cenários de susceptibilidade a movimentos de massa gerados com os valores de índice gama 0,65 (à esquerda) e 0,70 (à direita).

A inferência bayesiana foi condicionada pela utilização da variável declividade para o cálculo da probabilidade a posteriori. Como dado de verdade terrestre, foi utilizada a Carta de Risco a Movimentos de Massa e Inundações do Município de São Sebastião (IG-SP e PMSS, 1996). Em vista dos procedimentos adotados, houve uma grande aproximação entre áreas de altas declividades e de alta/muito alta susceptibilidade, conforme ilustração da **Figura 9**.

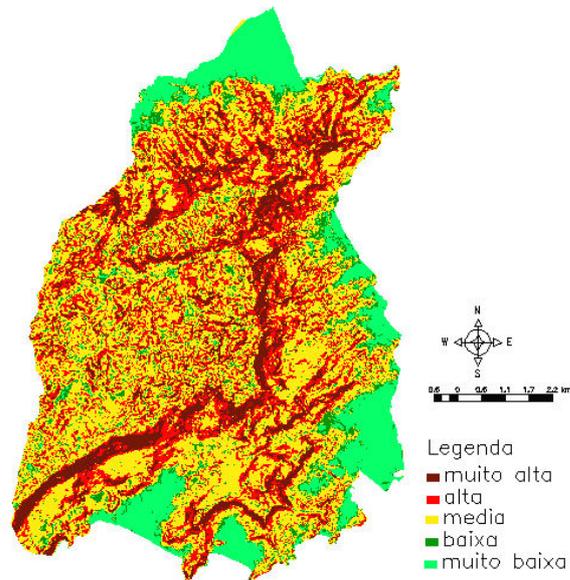


Figura 9 – Mapa temático de classes de susceptibilidade a movimentos de massa obtido através do método bayesiano.

4. Conclusões

O método booleano foi adequado na identificação das áreas de susceptibilidade muito alta, porém, a rigidez das combinações qualitativas das variáveis não possibilitou uma discriminação mais detalhada entre as demais classes de susceptibilidades.

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 as transições graduais entre as classes de solos ou entre as classes de cobertura vegetal. Além disto, conforme anteriormente exposto, este método tornou possível a geração de cenários mais favoráveis e menos favoráveis ao fenômeno estudado.

No caso da inferência bayesiana, a grande dependência espacial entre os elementos do meio físico (solos, geologia, geomorfologia, cobertura vegetal etc.) tornou inadequada a utilização de todas as variáveis. Deste modo, a utilização da declividade tornou o geo-campo temático final muito semelhante a um geo-campo temático de declividades.

De modo geral, a atividade representou um profícuo exercício metodológico, que possibilitou a verificação do potencial e da flexibilidade do método *fuzzy* gama em estudos ambientais. Este método apresentou os resultados mais satisfatórios.

5. Referências Bibliográficas

BONHAM-CARTER, G. F. **Geographic Information Systems for Geoscientists: Modelling with GIS**. Ontario: Pergamon, 1994. 1. ed. 398 p.

CÂMARA, G.; MOREIRA, F. R.; BARBOSA, C.; FILHO, R. A.; BÖNISCH, 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: 23 Jan. 2007.

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.

DAI, F. C.; LEE, C. F.; NGAI, Y.Y. Landslide risk assessment and management: an overview. **Engineering Geology**, n. 64, p. 65 – 87, 2002.

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.

Instituto Geológico do Estado de São Paulo (IG-SP); Prefeitura Municipal de São Sebastião (PMSS). **Carta de Risco a Movimentos de Massa e Inundações do Município de São Sebastião**. São Paulo: IG-SP, 1996. 77p. Anexos (15 Mapas).

MAGALHÃES, M.; LIMA, A. **Noções de Probabilidade e Estatística**. São Paulo: Edusp, 2005. 4. ed. 416 p.

MARCELINO, E. V. **Mapeamento de áreas susceptíveis a escorregamento no município de Caraguatatuba (SP) usando técnicas de Sensoriamento Remoto.** São José dos Campos. 228 p. (INPE-12146-TDI/970). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 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.** São José dos Campos. 160 p. (INPE-9481-TDI/825). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 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.** São José dos Campos. 50 p. Anexos. Especialização (XVIII Curso Internacional em Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, 2005.