

ANÁLISE DE RISCO DE ESCORREGAMENTO COM USO DE SIG

Risk analysis of sliding using GIS

Erica Varanda*

Cláudio Fernando Mahler**

Luis Carlos Dias de Oliveira***

RESUMO – Este artigo apresenta um modelo para Análise Quantitativa de Risco com a aplicação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) utilizando a teoria bayesiana, na integração temática de mapas representativos do meio físico (vegetação, geológico-geotécnico, drenagem natural e declividade). A partir desta integração é gerado um Mapa de Suscetibilidade a Escorregamentos (fenômeno físico) que, associado com dados de vulnerabilidade (danos à população) e critérios de risco, possibilita construir um Mapa Quantitativo de Risco para uma determinada área. Pode-se afirmar que o emprego de um algoritmo baseado na Estatística Bayesiana para integração temática dos mapas de estado natural conduz a resultados confiáveis na identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos. Por fim, a definição de áreas de risco é uma ferramenta valiosa no Gerenciamento de Risco de Escorregamentos e, portanto, o modelo de dados desenvolvido neste trabalho poderá subsidiar o Poder Público num melhor planejamento do uso do solo.

SYNOPSIS – This paper presents a model for the Quantitative Risk Analysis, with the application of a Geographic Information System (GIS) using the Bayes theorem. It was adopted in the thematic integration of maps of the physical environment (vegetation, geological-geotechnical, natural drainage system and slopes). Based on this integration a sliding susceptibility map is created associated with vulnerability data (temporal and construction patterns of buildings) and risk criteria. This data is also used to create a quantitative risk map for a certain area. It can be stated that the use of an algorithm based on Bayesian statistics for thematic integration of maps of the physical environment provides reliable results in identifying areas susceptible to slide accidents. Lastly, the definition of risk areas is a valuable tool in slide risk management and, therefore, the data model developed in this study will be able to provide the public authorities with information for better planning of land use.

PALAVRAS CHAVE – Risco, escorregamento, SIG, teoria bayesiana.

1 – INTRODUÇÃO

Os escorregamentos são processos geológicos/geomorfológicos de extrema importância, porque esses eventos com frequência causam muitas vítimas e/ou perdas materiais significativas. Embora sob certos aspectos representem processos naturais de evolução do relevo, podem-se constituir em provocadores de acidentes, causando prejuízos materiais e, muitas vezes, a perda de vidas

* Eng. Civil, M. Sc. COPPE/UFRJ, Rua Barão de Águas Claras, 301, CEP 25625-100, Petrópolis, RJ, Brasil, E-mail: evaranda@oi.com.br - +(55) (24) 9964-4037.

** Autor de Contato - Prof. D. Sc. – COPPE/UFRJ, Livre Docente, FSP/USP, Rua Jardim Botânico, 67 apto. 903 CEP 22470-050 Rio de Janeiro, RJ, Brasil, E-mail: mahler0503@yahoo.com – +55(21) 2562-7775 / 2290-1730 R 202.

*** Professor do CEFET-RJ, Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. Professor da UCP, Universidade Católica de Petrópolis.

humanas, além de participarem do desencadeamento de outros eventos, tais como processos erosivos. O adensamento urbano nas médias e grandes cidades e a conseqüente ocupação desordenada do solo ocorrido nas últimas décadas, é o principal fator responsável pelos eventos catastróficos em várias regiões do Brasil.

No planejamento e no ordenamento do território, uma das etapas de maior importância é o zoneamento das áreas territoriais de acordo com os diferentes níveis de suscetibilidade e de risco.

O termo suscetibilidade indica a probabilidade de ocorrer um fenômeno físico natural, independente de prejudicar ou não grupos populacionais.

O termo risco representa a probabilidade de ocorrência de algum dano a uma população (pessoas ou bens materiais) causado por um fenômeno físico que pode compreender desde fatores geológicos, geomorfológicos, climáticos, hidrológicos até antrópicos. É uma condição potencial de ocorrência de um acidente. As pessoas em uma condição de risco ficam vulneráveis a serem atingidas por um fenômeno físico fruto de um dos fatores anteriormente citados.

Assim, no zoneamento de um território, há que se levar em conta não só a suscetibilidade das zonas aos fenômenos naturais, como a existência de moradores, infra-estruturas, instalações e demais fatores na área que esteja vulnerável e possam ser atingidos.

Vários trabalhos foram elaborados, no decorrer destas últimas décadas, com o objetivo de identificar as áreas suscetíveis a movimentos de massa, devido ao grande número de acidentes geológico-geotécnicos ocorridos, causando danos à população.

Quando o estudo envolve áreas extensas, a análise preferencialmente deve ser feita com o auxílio de Sistema de Informações Geográficas (SIG). Os SIGs são ferramentas capazes de organizar bancos de dados georeferenciados, tratar grande volume de dados e diminuir a imprecisão dos trabalhos efetuados manualmente.

A caracterização do meio físico de uma área de estudo pode oferecer importantes informações para o planejamento racional do uso e conservação do solo e da água. Nesse contexto, a utilização dos SIGs permite a integração dos dados de forma mais precisa e rápida que os métodos tradicionais de análise. Além disso, os SIGs possibilitam um melhor aproveitamento de dados existentes e, a partir destes, produzem novas informações, permitindo assim um ordenamento de ações mais eficiente. Os SIGs representam, na área ambiental, especialmente nos países em desenvolvimento ou do Terceiro Mundo, uma importante ferramenta para o controle e prevenção do desperdício dos escassos recursos financeiros.

O desenvolvimento de técnicas computacionais tem permitido o processamento das informações cartográficas, com rapidez e precisão. A utilização da ferramenta em ambiente SIG permite a integração de informações provenientes de várias fontes e em diversos temas. Por isso, é de extrema importância para o planejamento do território e especificamente o Gerenciamento de Risco.

Os níveis de vulnerabilidade ao risco são estabelecidos a partir da elaboração e análise de cartas de unidades integradas (zonas) ou de cartas temáticas específicas. Em ambos os casos, o risco é um fator primordial para a avaliação da capacidade das unidades territoriais para os distintos usos.

Os mapas qualitativos de risco mostram o grau de risco, classificados como: muito alto, alto, médio, baixo, atribuído às áreas ocupadas nas encostas, com base na análise dos fatores geológicos, geomorfológicos, climáticos, hidrológicos e antrópicos. Os dados são obtidos através de levantamentos de campo e posteriormente integrados pela aplicação de modelos qualitativos e/ou quantitativos.

Já a análise probabilística possibilita a quantificação de acidentes de uma determinada região. Esta quantificação é calculada a partir de estatísticas de acidentes passados, através de inventários disponibilizados pelo Poder Público, que compreendem inclusive órgãos de Proteção ou Defesa Civil.

Os inventários registram todos os dados referentes a escorregamentos de terras em uma determinada região em um dado período de tempo. Através destas informações é possível se obter, como exemplo, a frequência de acidentes no período considerado para aquela região.

Esta probabilidade de ocorrência pode ser considerada como um componente para identificação e quantificação do risco.

Este artigo apresenta um modelo para Análise Quantitativa de Risco com a aplicação de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) utilizando a teoria bayesiana, na integração de mapas temáticos (vegetação, geológico-geotécnico, drenagem natural e declividade) que representará a suscetibilidade aos escorregamentos considerados os aspectos do meio ambiente através do Mapa de Perigo que integrado com mapas e dados representativos das características urbanas (ações antrópicas) resultará no Mapa de Risco.

2 – METODOLOGIA

A partir dos dados quantitativos registrados em inventário de escorregamentos de uma determinada área, este modelo propõe a aplicação da teoria bayesiana para Avaliação Quantitativa de Risco de escorregamentos com base numa estrutura de três níveis de mapeamento: Mapas Temáticos, Mapas de Suscetibilidade ou Perigo e Mapa de Risco.

2.1 – Mapas temáticos

Mapa Temático é a representação de informações sob uma perspectiva geográfica, transformando o Espaço-Território em elemento de análise espacial de dados. Os Mapas Temáticos reúnem as informações pertinentes a um ou mais componentes dos meios físico, biótico e antrópico por meio da variação espacial dos atributos.

A produção destes mapas através da tecnologia de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) possibilita avanço na área por vincular dados geográficos a dados alfanuméricos que são atributos normalmente representados sob a forma de tabelas, ou mesmo dados geográficos.

Os mapas temáticos propostos neste trabalho são aqueles que registram as variabilidades dos atributos que influenciam na análise de risco a escorregamentos e suas possíveis relações com os meios bióticos e antrópicos, que constituem os elementos vulneráveis ao evento perigoso, sendo, pois, aqueles que registram as variabilidades espaciais dos aspectos físicos que contribuem para a ocorrência de escorregamentos.

Vários são os métodos para elaboração dos mapas referentes aos componentes do meio físico. São informações originárias de trabalhos anteriores, de pesquisas já realizadas e fotos aéreas. A maior dificuldade do modelo é justamente a disponibilidade de dados para aplicação do método, pois estes dados deverão estar reunidos para formar um banco de dados georreferenciado.

O mapa topográfico é o documento básico e fundamental que deve estar disponível como fonte de dados. Porém, quando utilizados como mapa-base devem apresentar as características neces-

sárias para garantir a compatibilidade do mapeamento com a escala selecionada para a apresentação dos resultados. A partir deste é gerado o mapa de declividade, no qual são definidas classes de declividades que são atribuídas de acordo com objetivos diversos. Além deste, foram previstos os seguintes mapas: vegetação; drenagem natural; domínios geológico-geotécnicos; geográfico de regiões, que será necessário na atribuição da probabilidade inicial que será definida por região, extraída do inventário de escorregamentos, para a aplicação da teoria bayesiana na elaboração do Mapa de Suscetibilidade e o mapa de padrões construtivos para a elaboração do Mapa de Risco, que representa o risco à população (pessoas e bens materiais).

2.2 – Integração temática em SIG

O sistema de geoprocessamento utilizado foi o SPRING 4.3.3, desenvolvido pelo INPE¹. O SPRING está baseado em um modelo de dados orientado a objetos que combina as idéias de “campos” e “objetos geográficos”. Deste modo, deriva-se tanto a interface dirigida por menus, quanto à linguagem LEGAL (Linguagem Espaço-Geográfico baseada em Álgebra).

Esta linguagem está baseada na formulação de uma álgebra geográfica, que permite expressar operações específicas para cada tipo de dado, bem como explicitar operações matemáticas e algébricas ou análise lógica que transformam um tipo de dado em outro. Desta forma é possível a utilização da teoria da probabilidade bayesiana na integração dos mapas temáticos em ambiente SIG.

Cada mapa caracteriza-se por um tema distinto que se refere a um componente do meio físico. Cada tema é constituído de classes (atributos) que são associadas a uma probabilidade deduzida que corresponde ao julgamento por especialistas dos agentes predisponentes. Em face da ausência de dados estatísticos da relação entre os agentes predisponentes e a ocorrência de escorregamentos, são adotadas probabilidades, deduzidas por especialistas, que expressam a confiança em que cada atributo contribua mais ou menos à suscetibilidade de ocorrência de escorregamentos.

Os agentes predisponentes correspondem ao conjunto de condições geológicas, geométricas e ambientais em que os escorregamentos irão ter lugar. O modelo apresentado não inclui os agentes efetivos que são os responsáveis pelo desencadeamento dos escorregamentos (pluviosidade, erosão, variação de temperatura, etc.) e ainda, os agentes efetivos imediatos (chuvas intensas) devido a escassez de dados.

Para quantificação dos atributos em cada classe temática é adotada a probabilidade por julgamento, que é uma forma de capturar formalmente opiniões de especialistas em números e, então combinar estas opiniões em modelos. A incerteza capturada desta forma certamente tem um valor numérico que depende do domínio pessoal do especialista da incerteza e na sua experiência.

A experiência corrente sugere que, no mínimo nos estágios iniciais da dedução por especialistas, as pessoas acreditem que as descrições verbais sejam mais intuitivas do que os números. Assim, tais descrições são inseridas como componentes dentro das árvores de eventos ou falhas. Então, transformações aproximadas entre descrições verbais e aproximações por quantificação de probabilidades por julgamento podem ser fixadas para eventos componentes.

O Quadro 1 apresenta uma lista de descrições verbais com os valores respectivos adaptados dos trabalhos de Lichtenstein e Newman (1967) e Vick (1997). Estes valores foram atribuídos em cada classe temática, e expressam a confiança, por julgamento de cada situação contribuir para ocorrência do escorregamento.

¹Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Quadro 1 – Descrições verbais de probabilidades adaptadas (Varanda, 2006).

Descrição Verbal	Probabilidade Deduzida
Virtualmente impossível	0,01
Muito improvável ("very unlikely")	0,1
Completamente incerto	0,4
Incerto ("uncertain")	0,5
Provável ("likely")	0,7
Muito provável ("very likely")	0,9
Virtualmente certo	0,99

2.3 – Teoria bayesiana

O teorema de Bayes é usado na inferência estatística para atualizar estimativas da probabilidade de que diferentes hipóteses sejam verdadeiras, baseadas nas observações e no conhecimento de como essas observações se relacionam com as hipóteses. A probabilidade bayesiana, fundamentada no Teorema de Bayes, é uma decorrência da Regra do Produto e está relacionada a dois conceitos: probabilidade posterior e prévia, ou seja, com base no conhecimento prévio de uma determinada feição a probabilidade prévia pode ser atualizada por uma informação adicional decorrente da observação de fenômenos ou evidências.

Bayes sugeriu ainda que probabilidades deduzidas por julgamento, realizadas a partir de meros “pressentimentos”, poderiam ser combinadas com probabilidades obtidas por frequências relativas por meio de um teorema (Oliveira, 2004).

De acordo com Stulz e Cheeseman (1994), o Teorema de Bayes enuncia uma regra para atualizar a convicção de uma Hipótese “H” (probabilidade inicial de uma hipótese “H”, no caso, ocorrência de escorregamentos) dada uma evidência adicional “E” e a informação antecedente (contexto) I; ou seja, este teorema propõe que as probabilidades podem ser revistas quando se obtém mais informações sobre os eventos.

Portanto, para o cenário em questão pode-se considerar o contexto I como sendo o tema relativo ao meio físico em que o evento H (escorregamento) ocorre dada a presença de E (evidência). A probabilidade de encontrar escorregamento onde a evidência (E) está presente pode ser expressa em termos de probabilidade condicional.

A partir destes conceitos, a teoria de Bayes foi aplicada ao modelo tomando-se como probabilidade inicial ou prévia (H) os dados do Inventário de Acidentes e Situações de Risco de Movimentos de Massa (Escorregamentos) compilados por Oliveira (2004) cuja probabilidade foi calculada em função da frequência de escorregamentos para cada região. As evidências são os valores de probabilidades deduzidas por julgamento, associadas às classes especificadas para cada componente nos mapas representativos do meio físico (declividade, drenagem natural, vegetação e geológico-geotécnico) tomadas como informações adicionais que irão aumentar ou diminuir a probabilidade prévia. Portanto, a probabilidade inicial pode ser atualizada ao ser integrada por um fator que represente a presença ou ausência de uma informação adicional, ou seja, escorregamento.

A partir da Equação 1 apresentada a seguir tem-se a versão da Regra de Bayes para a atualização de probabilidades iniciais, considerando múltiplas informações para o contexto proposto (Varanda, 2006):

$$p(H \setminus E_1 \cap E_2 \cap E_i) = \frac{p(H) * p(E_1 \cap E_2 \cap E_i, I \setminus H)}{p(E_1 \cap E_2 \cap E_i, I \setminus H) * p(H) + p(E_1 \cap E_2 \cap E_i, I \setminus \overline{H}) * p(\overline{H})} \quad (1)$$

3 – MAPAS DE SUSCETIBILIDADE E RISCO

Para a geração dos Mapas de Suscetibilidade e Risco é utilizado o método de integração de Mapas Temáticos, onde as classes definidas em cada mapa recebem um valor quantitativo (probabilidade deduzida) que representa o grau de significância dos fatores predisponentes conforme os valores definidos no Quadro 1 exemplificado para o Mapa de Declividade no Quadro 2.

Quadro 2 – Valores de probabilidade deduzida atribuídos para o Mapa de Declividade.

Declividade	Tipologia de Movimento	Probabilidade Deduzida
Abaixo de 10°	Encosta estável	0,01
Entre 10° a 30°,	Rastejos e escorregamentos	0,1
Entre 30° e 45°	Escorregamentos	0,5
Entre 45 e 60°	Escorregamentos	0,9
Acima de 60°	Queda de fragmentos	0,7

Após a integração dos mapas em SIG tem-se os Mapas Quantitativos, ou seja, mapas com representações numéricas conforme mostrado na Figura 3.

Para uma representação qualitativa dos mapas é necessário a classificação em faixas (intervalo quantitativo) que são definidas através de critérios específicos e representam o nível de aceitabilidade de perigo e risco.

Na construção dos mapas adotaram-se faixas de perigo e risco: muito-alto, alto, médio e baixo.

3.1 – Critérios para definição de níveis de suscetibilidade e risco

Segundo Fell e Hartford (1997), existe um nível de aceitabilidade e tolerância de riscos a escorregamentos em todas as regiões que apresentam potencial (Perigo) para ocorrência deste tipo de fenômeno. Vários estudos têm sido realizados com o intuito de se estabelecer um nível de risco, realmente considerado tolerável para possibilitar o desenvolvimento de processos de gerenciamento de risco.

A curva $f \times N$ pode ser considerada como critério para definição dos limites quantitativos de risco. Este método considera a frequência anual de acidente (f) por número de vítimas fatais (N) para uma determinada região. Então, admite-se como critério os limites quantitativos de risco da curva $f \times N$.

A Figura 1 mostra um exemplo desta curva, sugerida para o Município de Petrópolis, a partir dos dados do inventário de frequência de acidentes por bairros(f), com vítimas fatais (N), entre os anos de 1943 a 1989 (Oliveira, 2004).

O gráfico da Figura 1 foi construído a partir dos dados do inventário de frequência de acidentes com vítimas fatais. Com base no critério de risco máximo aceitável para um indivíduo ($N=1$), geral-

mente fixado em 10^{-3} (Fell, 1994), acrescentou-se ao gráfico ($f \times N$), uma linha paralela, passando pelo eixo da ordenada 10^{-3} , onde estabeleceu-se um limite de risco aceitável (limite inferior), um limite de de risco intolerável (limite superior) e uma faixa ALARP.

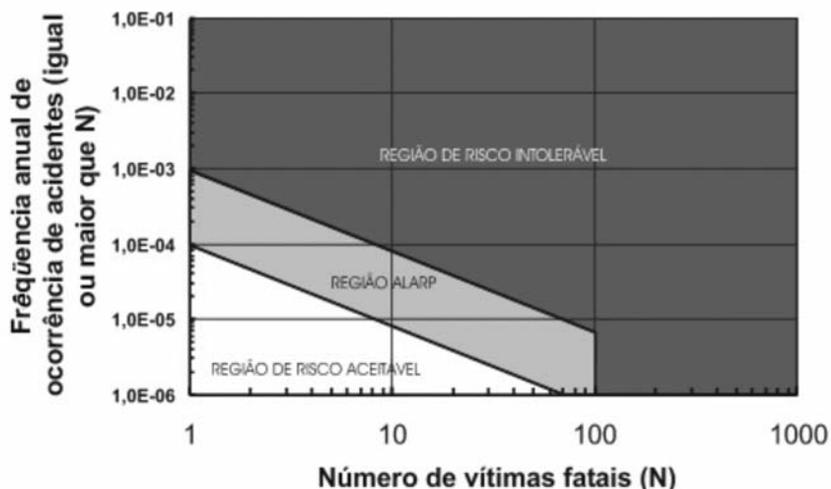


Fig. 1 – Curva $f \times N$ para mortes devidas a movimentos de massa para o Município de Petrópolis (Oliveira, 2004).

Numa situação de risco o incremento risco deve ser reduzido tanto quanto for razoavelmente possível, ou seja, deve-se aplica o seguinte princípio: o risco deve ser “tão baixo quanto for razoavelmente possível” (que vem da expressão em inglês “As Low As Reasonably Practicable”, cuja sigla é ALARP”.

Portanto, de acordo com os limites de risco estabelecidos na Figura 1 foram definidas as faixas quantitativas necessárias para o fatiamento do Mapa de Risco, conforme resumidas no Quadro 3.

Quadro 3 – Limites de risco utilizados no fatiamento do Mapa Quantitativo de Risco.

Faixas de Risco Anual		
Qualitativo		Quantitativo
BAIXO	SEM RISCO	$R < 10^{-6}$
MÉDIO	RISCO ACEITÁVEL	$10^{-4} < R < 10^{-6}$
ALTO	REGIÃO ALARP	$10^{-4} < R < 10^{-3}$
MUITO ALTO	RISCO INTOLERÁVEL	$R > 10^{-3}$

Geralmente o risco é estimado pelo produto da probabilidade pelas conseqüências, e pode ser definido como a associação da probabilidade de ocorrência de algum dano a um elemento em risco e ao potencial de ocorrência de um acidente (situação de risco) que é representado através da Equação (2):

$$R = p[\text{perigo}] * V * E, \text{ onde:} \tag{2}$$

R – Risco;

$p[\text{perigo}]$ – probabilidade de ocorrência do perigo (movimento de massa) numa situação de risco;

V – Vulnerabilidade dos elementos em risco;

E – Elementos em risco – vidas humanas, construções, instalações.

A equação (2) expressa que para análise de uma situação de risco deve-se identificar o perigo que é definido como o fenômeno natural, capaz de ocasionar um fato desagradável, como por exemplo: escorregamentos de taludes naturais ou artificiais, inundações, quedas de blocos, erosão ou solapamento de margens de rios, corridas de lama, deslizamento de aterros, entre outros.

A quantificação da possibilidade de ocorrência de perigo é expressa através da probabilidade de ocorrência do perigo, calculada através da integração de dados de frequências de ocorrências de escorregamentos e informações adicionais relativas ao meio-físico.

Para o cálculo do perigo a equação (2) foi utilizada, atribuindo-se o valor unitário para o termo “E”, considerando o cálculo do risco individual, que é representado pelo risco de fatalidade e/ou lesões para qualquer indivíduo identificável que vive em um setor de risco de movimento de massa ou segue qualquer padrão de comportamento que o pode expor a consequências de um movimento de massa. Então a equação (2) passa a ser expressa por;

$$p[\text{perigo}] = \frac{R}{V} \quad (3)$$

Ao analisar os valores de vulnerabilidade adotadas por diversos autores observa-se que os valores estão expressos normalmente, em valores na escala de 0 a 1, ou seja na casa de 10^{-1} . Assim sendo, será adotado para o cálculo das faixas de suscetibilidade o critério da Equação (4):

$$p[\text{perigo}] = \frac{R}{10^i} \quad (3)$$

Aplicando-se os valores estabelecidos para o risco no Quadro 2 na Equação 4 tem-se os valores limites para as faixas de suscetibilidade, resumidos no Quadro 4.

Quadro 4 – Limites de probabilidades utilizados no fatiamento do Mapa de Suscetibilidade.

Faixas De Suscetibilidade	
Qualitativo	Quantitativo
BAIXO	$p < 10^{-5}$
MÉDIO	$10^{-5} < p < 10^{-3}$
ALTO	$10^{-3} < p < 10^{-2}$
MUITO ALTO	$p > 10^{-2}$

3.2 – Mapa de suscetibilidade

O Mapa de Suscetibilidade de Escorregamentos foi elaborado através da integração dos Mapas Temáticos com a aplicação da teoria bayesiana. O perigo é quantificado através da combinação de fatores no espaço físico que contribuem para a elevação da probabilidade de ocorrência de escorregamentos, caracterizando uma situação de risco.

Para atualização da probabilidade inicial aplica-se um algoritmo utilizando a expressão matemática (1), onde se adota para cada ponto, representado por um “pixel” a probabilidade sugerida para cada classe.

Os campos são transformados pontualmente de modo que o efeito resultante sobre cada ponto é independente dos valores de pontos vizinhos. A Figura 2 mostra um exemplo da integração temática, com aplicação da Teoria de Bayes.

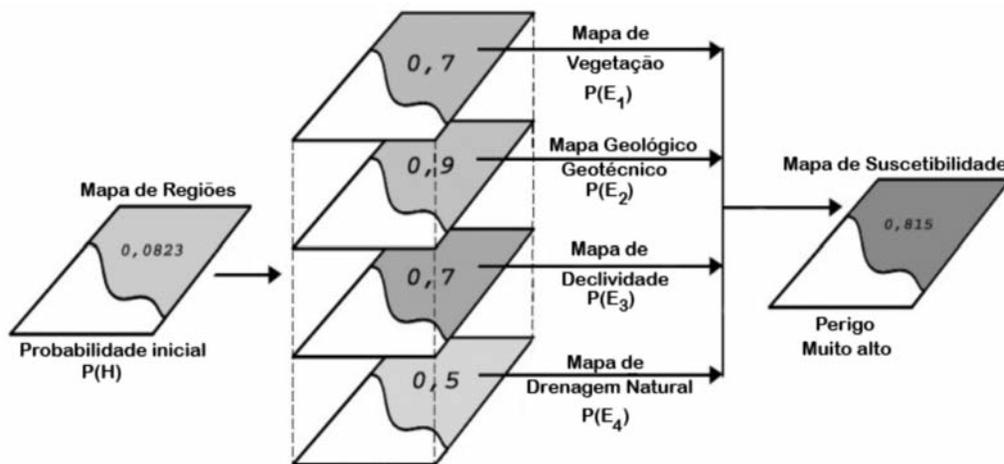


Fig. 2 – Exemplo de aplicação da teoria Bayesiana na elaboração do Mapa de Suscetibilidade (Varanda, 2006).

A partir daí obtém-se um mapa com o Modelo Numérico, onde os dados passam a ser quantitativos. Os pixels assumem valores numéricos e podem ser compostos por representações matriciais (grades retangulares), como exemplifica a Figura 3. A probabilidade atualizada será interpretada como o potencial de ocorrerem escorregamentos naquela área.

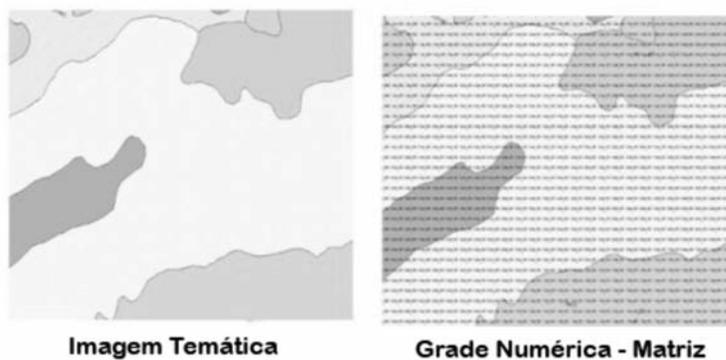


Fig. 3 – Representação da imagem temática e matriz numérica, (Varanda, 2006).

A partir do mapa de modelo numérico, aplicam-se as faixas quantitativas definidas no Quadro 4 para a geração qualitativa do Mapa de Suscetibilidade.

3.3 – Mapa quantitativo de risco

O Mapa Quantitativo de Risco é elaborado a partir do Mapa Quantitativo de Suscetibilidade integrado com Mapas Temáticos com informações referentes ao meio urbano, ou seja, as características das ações antrópicas no meio físico. Neste caso foi utilizado o Mapa de Padrões Construtivos.

O Mapa Quantitativo de Risco, de forma similar ao Mapa de Suscetibilidade é qualificado através do critério dos limites de risco utilizados no fatiamento mostrado no Quadro 3.

As situações de risco e suas conseqüências potenciais são documentadas no Mapas de Risco, apresentado na Figura 4. Neste sentido, a situação de risco de uma área em particular, da superfície de uma encosta, dependerá do uso que se fizer do solo e das condições em que se encontra.

De acordo com o Ministério das Cidades (2006), o mapeamento de risco pode ser realizado em dois níveis de detalhes distintos: o zoneamento (ou setorização) de risco e o cadastramento de risco. No zoneamento de risco são delimitados setores nos quais, em geral, encontram-se instaladas várias moradias. Desta forma, admite-se que todas as moradias do setor se encontram em um mesmo grau de risco, como exemplo risco alto. Entretanto, em meio às moradias deste setor pode haver algumas edificações que não apresentam situação de risco tão elevada. Assim pode-se considerar que, no zoneamento de risco, há uma generalização.

Portanto, o Mapa de Risco elaborado é um mapa de setorização, ou seja, há uma generalização de áreas de risco o que significa que possam existir casos em que a classificação do mapa não corresponde à situação de um terreno em particular. Nestes casos será necessário um cadastramento posterior das áreas de risco com objetivo de verificar a condição de risco do local, que é a fase do gerenciamento de risco.

4 – APLICAÇÃO PRÁTICA E ANÁLISE DE RISCO

Esta metodologia foi aplicada na elaboração do Plano Municipal de Redução de Riscos do 1º Distrito do Município de Petrópolis, em uma área aproximada de 133 km².

A partir dos resultados obtidos, 96 áreas apresentaram faixas de risco alto e muito alto no Mapa de Risco. As áreas identificadas neste modelo metodológico foram comparadas com as áreas de risco identificadas no Inventário de Acidentes e Situações de Risco (Oliveira, 2004) sendo confirmadas as mesmas condições de risco.

Na pesquisa realizada por Oliveira (2004) foi estimado um risco médio, por exemplo, para uma determinada localidade definido intuitivamente, com base nos dados do inventário e experiência do autor, como sendo área de risco. Para cada localidade foi calculado um único valor de probabilidade para quantificação do risco. A Figura 4 apresenta um exemplo das diversas situações identificadas na localidade dos Duques.

Duques é uma localidade localizada a meia encosta a jusante em um trecho da Rodovia BR-040. O terreno é caracteristicamente um talus-colúvio, possuindo muitos fragmentos de rocha em situação instável, muitos deles, oriundos do desmonte de rocha para a implantação da rodovia. Em alguns pontos a drenagem da estrada foi obstruída e desviada de forma precária; inclusive observa-se em eventos de chuvas intensas o alagamento da rodovia em alguns pontos. A área em questão confronta-se com a Reserva Biológica do Tinguá (REBIO TINGUÁ) e está inserida na APA² - Petrópolis.

A área de preservação permanente, está, parcialmente ocupada e em processo de expansão.

²Área de Proteção Ambiental

A Figura 4 apresenta a imagem da área em estudo, adquirida do inventário e as respectivas imagens com a representação do Mapa de Perigo e Risco, onde o valor quantitativo predominante do modelo numérico será utilizado na análise quantitativa do risco.

Análise de Risco - Petrópolis/RJ

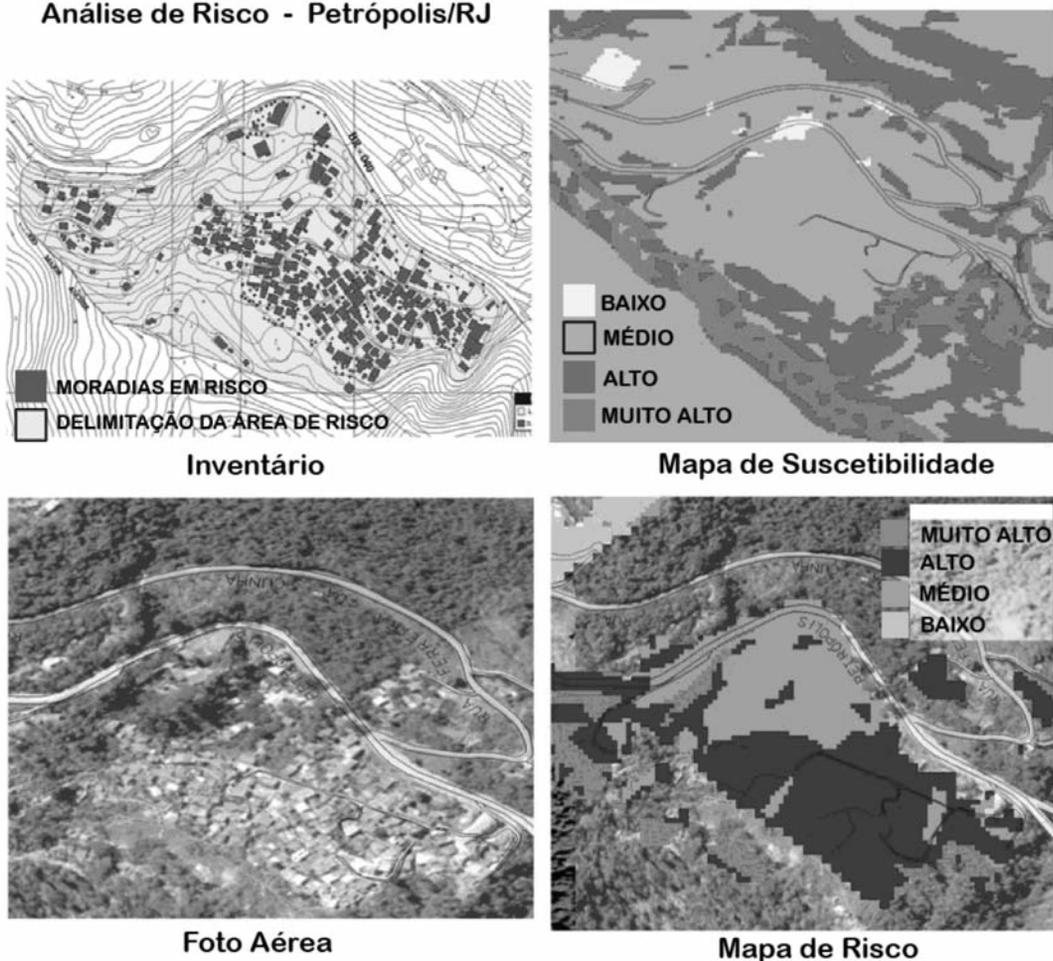


Fig. 4 – Análise comparativa da área definida no inventário e a mancha resultante no Mapa de Perigo e no Mapa Quantitativo de Risco (Varanda, 2006).

A partir dessas imagens, pode-se verificar a predominância de áreas com risco alto e muito alto, que coincide com a delimitação da área de risco anteriormente deduzida no inventário, com maior densidade demográfica.

O Quadro 5 apresenta um exemplo com o resumo dos valores numéricos das probabilidades deduzidas atribuídas a cada classe predominante, com os respectivos valores quantitativos do modelo numérico da área em estudo.

Para esta análise há uma generalização da probabilidade de suscetibilidade e risco do Mapa Quantitativo. As classes (sigla) estão associadas aos valores relativos em cada Mapa Temático, com a respectiva descrição apresentados no próprio quadro.

Quadro 5 – Análise Quantitativa de Risco do Bairro Duques (Varanda, 2006).

Mapas	Probabilidade Deduzida	Classe	Descrição
DRENAGEM	0,01-0,1	Sim	Presença de linha de drenagem natural.
GEOLÓGICO- GEOTÉCNICO	0,9	SRSR	Solo Raso Sobre Rocha.
VEGETAÇÃO	0,5	VEIR - AU	Vegetação em Estágio Inicial de Regeneração e Área Urbana.
DECLIVIDADE	0,1	entre 10° e 30°	Locais sujeitos a rastejos e escorregamentos.
PADRÃO CONSTRUTIVO	0,7	MUITO BAIXO	Construções muito precárias e deficiência nas condições de implantação.
PERIGO	1,01x10⁻⁴	Grau de Perigo Médio (predominante)	
RISCO	4,23x10⁻⁵	Grau de Risco Médio (predominante)	

A partir deste cenário é realizada uma análise de risco, cujo objetivo será a redução do grau de risco, que implica na redução do valor da probabilidade deduzidas de alguns dos atributos temáticos.

Para a redução da probabilidade será necessária a alteração do cenário que implica na modificação das características do ambiente. Portanto, os atributos que podem sofrer alterações são aqueles influenciados pela ação antrópica que são os parâmetros referentes à área urbana (infra-estrutura), padrão construtivo (moradias) e vegetação.

As ações de controle de ocupação urbana, melhorias na infra-estrutura, padrões de construção, reflorestamentos, recuperação de áreas degradadas, entre outros, estão diretamente relacionados com o gerenciamento urbano dessas áreas e portanto, à eficiência do gerenciamento implica diretamente no gerenciamento do grau de risco, ou seja, quanto melhor o gerenciamento urbano menor o grau de risco.

Vale observar que toda análise de multicritério tem sempre certa subjetividade na sua implantação, sendo a objetividade conquistada através da consulta a um crescente número de especialistas, de preferência de diferentes áreas de conhecimento, por exemplo, geólogos, engenheiros geotécnicos, geógrafos, pedólogos, etc..

O Quadro 6 mostra um exemplo da simulação de uma análise de risco, a partir da situação atual precedida de duas situações que compreendem a eficiência no gerenciamentos urbano da área em estudo, que resultará na alteração do grau de risco:

- 1) Para a situação atual, o grau de risco, MÉDIO, se mantém inalterado;
- 2) O grau de risco sofre um acréscimo de 50% da probabilidade deduzida do parâmetro área urbana em decorrência do aumento da densidade demográfica e desmatamentos.
- 3) O grau de risco sofre uma dedução de 50% da probabilidade deduzida do parâmetro área urbana e padrões construtivos, conseqüência de melhorias nas condições habitacionais e urbanas.

Os resultados demonstram que se houver desmatamento e adensamento ocupacional o Grau de Risco passa a ser MUITO ALTO. Porém, se a ocupação urbana estiver controlada, e houver melhorias habitacionais e urbanas, as condições da área serão superiores à encontrada atualmente e muito próximas da condição do Grau de Risco BAIXO.

Quadro 6 – Análise quantitativa de risco.

	Perigo	Risco	Grau de Risco	SIMULAÇÃO
1	$1,01 \times 10^{-4}$	$4,23 \times 10^{-5}$	MÉDIO	Situação atual
2	$9,05 \times 10^{-4}$	$3,80 \times 10^{-4}$	MUITO ALTO	Desmatamento e Adensamento
3	$3,02 \times 10^{-4}$	$9,06 \times 10^{-5}$	MÉDIO	Melhorias nas condições urbanas e construções

5 – CONCLUSÕES

A reunião das características e interpretações do meio-físico em um único banco de dados georeferenciado demonstrou ser uma forma viável e eficaz para a organização e manipulação de todas as informações.

O Mapa de Suscetibilidade a escorregamentos e o Mapa Quantitativo de Risco, gerados com a metodologia empregada, confirmaram a parte analisada dos resultados apresentados no Inventário de Acidentes e Situações de Risco, ou seja, conforme esperado a metodologia de desenvolvimento dos mapas conduziu a resultados compatíveis com a história de acidentes e situações de risco inventariados.

O emprego da dedução de probabilidades por especialistas, em substituição às correlações entre características do meio físico e dos escorregamentos com aplicação do Teorema de Bayes, revelou-se como boa alternativa para elaboração do Mapa Quantitativo de Risco frente a escassez de dados geotécnicos.

Pode-se afirmar que o emprego de um algoritmo baseado na Estatística Bayesiana para integração temática dos mapas de estado natural conduz a resultados confiáveis na identificação de áreas suscetíveis a escorregamentos.

A existência de registros de acidentes de escorregamentos em inventário da área em estudo possibilita a aplicação do Teorema de Bayes, ou seja, a frequência relativa dos acidentes tomados como probabilidades iniciais pode ser atualizada a partir de informações adicionais.

Por fim, a definição de áreas de risco é uma ferramenta valiosa no Gerenciamento de Risco de Escorregamentos e, portanto, o modelo de dados desenvolvido neste trabalho poderá subsidiar o Poder Público num melhor planejamento do uso do solo.

6 – AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES, CNPq, FAPERJ e DAAD pelo constante apoio, bem como a empresa THEOPRATIQUE OBRAS E SERVIÇOS DE ENGENHARIA e a Prefeitura Municipal de Petrópolis.

7 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Fell, R.; Hartford, D. (1997). *Landslide Risk Management*. Proceedings of the International Workshop on the Landslide Risk Assessment, Honolulu, Hawaii, USA, 19-21, February, pp. 51-109.

- Fell, R. (1994). *Landslide risk assessment and acceptable risk*. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 31, pp. 261-272.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Spring. (2006). Básico. www.dpi.inpe.br/spring/portugues/, set.
- Lichtenstein, S.; Newman, J. R. (1967). *Empirical scaling of common verbal phrases associated with numerical probabilities*. Psychonometric Science, 9(10): 563-564.
- Ministério das Cidades (2006). *Capacitação em Mapeamento e Gerenciamento de Risco*. Brasília, DF, Brasil, Cities Alliance.
- Ministério das Cidades (2006). *Prevenção de Riscos de Deslizamentos em Encostas-Guia para Elaboração de Políticas Municipais*. Brasília, DF, Brasil, Cities Alliance.
- Oliveira, L. C. D. (2004). *Análise Quantitativa de Risco de Movimentos de Massa com Emprego de Estatística Bayesiana*. Tese de D.Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 516 p.
- Stutz, J.; Cheeseman, P. A. (1994). *Short Exposition on Bayesian Interference and Probability*. National Aeronautic and Space Administration Ames Research Centre: Computational Science Division, Data Learning Group, www.periodicos.capes.gov.br.
- Varanda, E. (2006). *Mapeamento Quantitativo de Risco de Escorregamentos para o 1º Distrito de Petrópolis/RJ utilizando Sistema de Informações Geográfica*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 153 pp.
- Vick, S. (1997). *Dam Safety Risk Assessment: New Directions*. “Water Power and Dam Construction”, June.