

Análise temporal das áreas susceptíveis a escorregamentos rasos no Parque Nacional da Serra dos Órgãos (RJ) a partir de dados pluviométricos

Renato Fontes Guimarães¹, Roberto Arnaldo Trancoso Gomes¹, Osmar Abílio de Carvalho Júnior¹, Éder de Souza Martins², Sandro Nunes de Oliveira¹ & Nelson Ferreira Fernandes³

Resumo O modelamento matemático vem sendo cada vez mais utilizado para preconizar eventos que ocorrem na natureza. Esta ferramenta possibilita desenvolver modelos baseados em dados físicos que reproduzem a dinâmica dos fenômenos naturais, permitindo um maior controle sobre eles, e até mesmo a previsão espacial e temporal de suas ocorrências. Dentre os diversos modelos existentes, destaca-se o SHALSTAB, que já foi amplamente testado em diversas áreas de clima temperado e também em várias regiões no Brasil, principalmente, ao longo da Serra do Mar. Este modelo de previsão de ocorrência a escorregamentos rasos foi aplicado no Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO) utilizando dados de pluviosidade média mensal com intuito de se identificar na paisagem a variabilidade espacial dos locais susceptíveis a escorregamentos rasos e ao longo do ano. A metodologia é dividida nas seguintes etapas: a) Elaboração do modelo digital de terreno (MDT) e seus mapas derivados, como declividade e área de contribuição, b) Aplicação do modelo SHALSTAB considerando os diversos eventos de chuva ao longo do ano e c) Quantificação das áreas susceptíveis a escorregamentos para cada evento de chuva ocorrido. Os resultados do modelo indicaram a dinâmica dos locais que apresentam instabilidade devido a sazonalidade da intensidade de chuvas. A aplicação do modelo levando-se em conta os maiores eventos de chuva mensais poderá ser utilizada como instrumento de controle da visitação do parque porque permite identificar os meses de maior risco aos visitantes.

Palavras-chave: SHALSTAB, deslizamentos, modelagem matemática.

Abstract *Temporal analysis of areas prone to shallow landslide in Parque Nacional da Serra dos Órgãos (Rio de Janeiro) from pluviometric data.* Mathematical modeling is being increasingly used to predict events occurring in nature. That tool enables developing models based on physical data which reproduce the dynamics of natural phenomena, giving means to greater control over them, and even spatial and temporal prediction of their occurrences. Within the diverse existing models, one which stands out is the SHALSTAB, which has been widely tested in many temperate climate areas, as well as in several regions in Brazil, mainly along Serra do Mar. This model of prediction of shallow landslide occurrence was applied in Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO) by using data for average monthly pluviosity, aiming to identify, within the landscape, the spatial variability at places prone to shallow landslide throughout the year. The methodology is sectioned into the following stages: a) elaboration of the digital elevation model (DEM) and its derived maps, such as slope and contribution area, b) application of the SHALSTAB model, considering the various events of rainfall throughout the year, and c) quantification of areas prone to landslide for each rainfall event occurred. The model results indicate the dynamics of the locations which present instability due to the seasonality of rainfall intensity. The application of the model, taking into account the greatest monthly rainfall events, may be used as an instrument of control for park visitation because it allows identifying the months in which there is greater risk to visitors.

Keywords: SHALSTAB, landslides, mathematical modeling.

INTRODUÇÃO O relevo movimentado característico da Serra do Mar é proveniente de um complexo pré-cambriano de rochas dobradas em que o clima tropical úmido, é responsável pela formação de espessos mantos de alteração e depósito de vertentes. Estas formações produzem descontinuidades abruptas subsuperficiais (solo sobre rocha, solo sobre saprólito, entre outros) ao longo das encostas, que ao serem atingidas por grandes descargas hidráulicas, geram condições ideais para a detonação de

grandes deslizamentos. Muitos modelos preditivos vêm sendo desenvolvidos no intuito de prever em que porções da paisagem estes fenômenos possuem maior susceptibilidade de ocorrência. Como exemplo, destacam-se o SHALSTAB (Montgomery & Dietrich 1994), SINMAP (Pack *et al.* 1998), TRIGRS (Baum *et al.* 2002), entre outros, que são modelos matemáticos que utilizam bases físicas, ou seja, o mapa resultante é produzido a partir de equações que simulam os mecanismos que irão deflagrar

1 - Universidade de Brasília (UnB), Departamento de Geografia, Brasília (DF), Brasil.

E-mails: renatofg@unb.br, robertogomes@unb.br, osmarjr@unb.br, sandronunes@unb.br

2 - EMBRAPA Cerrados, Pedologia e Geomorfologia, Planaltina (DF), Brasil. E-mail: eder@cpac.embrapa.br

3 - Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Departamento de Geografia, Rio de Janeiro (RJ), Brasil. E-mail: nelsonff@acd.ufrj.br

este tipo de movimento de massa.

Cada modelo citado produz um mapa de susceptibilidade de uma dada área de estudo de forma heterogênea porque os escorregamentos dependem da topografia e de fatores de propriedades físico-químicas dos solos, e principalmente da quantidade e da distribuição espacial da descarga hidráulica. Vários trabalhos que utilizam esses modelos dão ênfase à análise de desempenho verificada a partir do grau de acerto entre as porções do relevo previstas como susceptíveis a ocorrência de escorregamentos com os mapeamentos de escorregamentos pretéritos.

Em particular o modelo SHALSTAB vem sendo amplamente utilizado pela comunidade científica em regiões de clima temperado desde a metade da década de 1990 (Montgomery & Dietrich 1994). Guimarães *et al.* 2003 verificaram o desempenho do modelo SHALSTAB, em clima tropical, em duas bacias no maciço da Tijuca no Rio de Janeiro a partir de várias combinações de valores de propriedades do solo como ângulo de atrito, coesão e densidade e espessura do solo comparando os resultados com as cicatrizes dos escorregamentos decorrentes as intensas chuvas ocorridas em Fevereiro de 1996. Este modelo apresentou excelente desempenho em que quase a totalidade dos escorregamentos localizaram-se nas áreas de maior susceptibilidade definida no mapa resultante. Pelo fato de que os escorregamentos possuem um forte controle topográfico, o SHALSTAB também teve seu desempenho avaliado para diferentes escalas cartográficas (Gomes *et al.* 2005). Foi verificado que o desempenho do

modelo melhora muito quando são utilizados modelos digitais de terreno de maior detalhe.

Devido ao sucesso no desempenho deste modelo muitos trabalhos vêm sendo realizados ao longo da Serra do Mar para vários objetivos distintos (Guimarães *et al.* 2003, Fernandes *et al.* 2004, Gomes *et al.* 2004, Redivo *et al.* 2004, Carvalho Júnior *et al.* 2005, Ramos *et al.* 2007). Desta forma, optamos por aplicar o modelo SHALSTAB, na área do Parque Nacional da Serra dos Órgãos, utilizando dados de pluviosidade média mensal que permitem identificar a variabilidade dos locais susceptíveis a escorregamentos rasos espacialmente e ao longo do ano. Este mapeamento pode servir como subsídio para a identificação dos locais e dos meses de maior risco para a utilização dos acessos do parque pelos visitantes.

ÁREA DE ESTUDO O Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO), criado em 30 de novembro de 1939 pelo Decreto Federal nº 1.822 está situado na região serrana do Estado do Rio de Janeiro. Sua área de 10.600 ha abrange os municípios de Petrópolis (43,0%), Guapimirim (25,9%), Magé (17,7%) e Teresópolis (13,4%) (Fig. 1). O PARNASO possui um perímetro de 71 km e altitudes que variam de 200 a 2.263 metros.

O PARNASO está localizado no bioma Mata Atlântica, apresentando formações florestais e campestre. Segundo Alonso (1977) a Floresta Perenifolia Higrófila Costeira varia de tamanho de acordo com o relevo, pluviosidade e umidade. As árvores diminuem

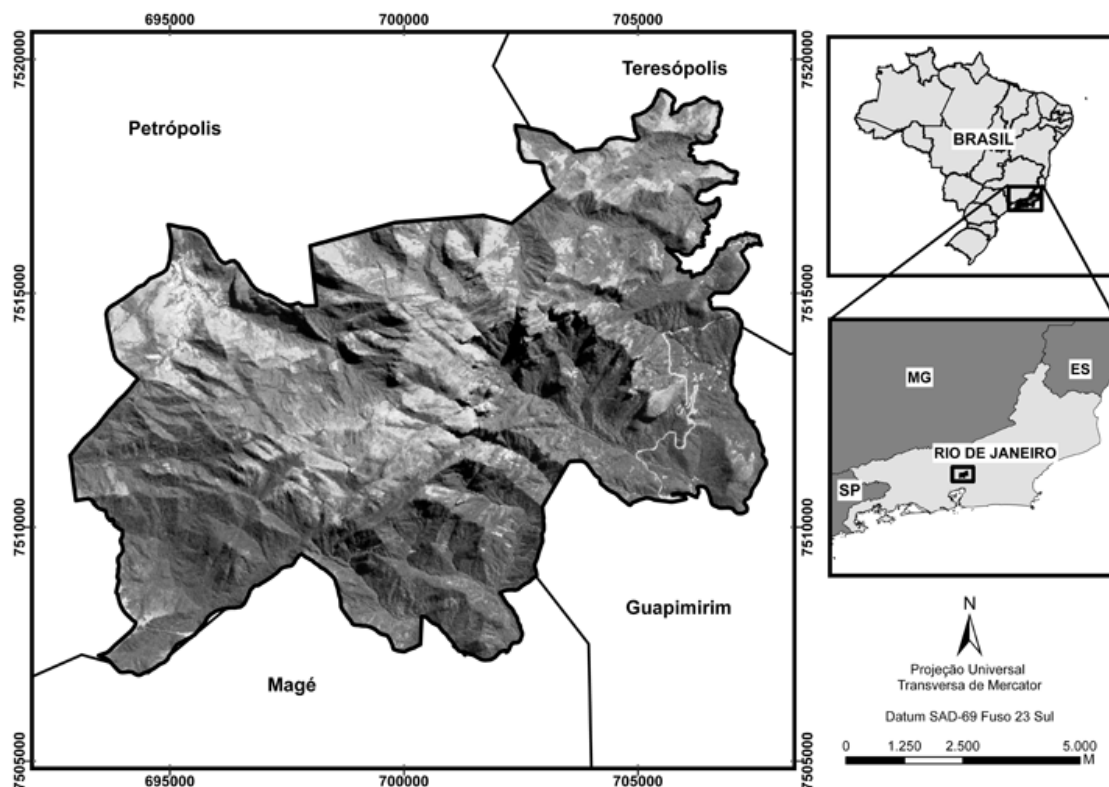


Figura 1 - Localização da área de estudo.

de tamanho de acordo com o aumento de altitude, até atingir os Campos de Altitude característico de altitudes superiores a 1900 metros se desenvolvidos em solos rasos e sobre os afloramentos rochosos (Alonso 1977, Martinelli 1989).

A geomorfologia é constituída pelo modelado de denudação em interflúvios e vertentes e engloba feições morfológicas com forte controle estrutural onde são encontradas escarpas festonadas, cristas, esporões e cornijas. As incisões das drenagens possuem de 344 a 446 metros e as declividades geralmente são superiores a 37° (Radambrasil 1983). O arcabouço litológico é constituído essencialmente por gnaisses bandados do Complexo Paraíba do Sul e por granitos pós-tectônicos da Suíte Intrusiva da Serra dos Órgãos (Radambrasil 1983).

O clima do Parque é mesotérmico brando superúmido com temperatura média anual de 18°C e índice pluviométrico médio de 2.300mm. Segundo a classificação de Köppen, o clima da área é do tipo Cwb - tropical de altitude - com uma curta estação seca (Nimer 1977).

O Parque Nacional da Serra dos Órgãos (PARNASO) é uma região susceptível a ocorrência de diferentes tipos de movimentos de massa tais como: queda de blocos, corridas de massa, escorregamentos translacionais e rotacionais. A figura 2 mostra alguns escorregamentos translacionais caracterizado pelo contato abrupto solo/rocha.

A queda de blocos é característica na vertente atlântica e pode ser observada durante a travessia Petrópolis-Teresópolis (Fig. 3). É possível encontrar também este tipo de fenômeno nas áreas escarpadas onde são realizadas atividades de escalada e rappel do parque.

Os escorregamentos rotacionais estão preferencialmente vinculados a regiões com formações de pacotes de solo bem desenvolvidos e vegetação mais densa e arbustiva. Os escorregamentos translacionais acontecem em regiões do parque, onde existe uma capa de solo pouco espessa que dá origem a vegetação específica, como por exemplo, na região do “Elevador” na travessia Petrópolis-Teresópolis (Fig. 4).

MODELO DE PREVISÃO O modelamento matemático é cada vez mais utilizado para preconizar eventos que ocorrem na natureza (Fernandes 1996). Esta ferramenta possibilita desenvolver modelos baseados em dados físicos que reproduzem a dinâmica dos fenômenos naturais, o que possibilita maior controle sobre eles, e até mesmo a previsão espacial e temporal de suas ocorrências.

A modelagem a ser utilizada se baseia no princípio de que a topografia é um dos principais fatores controladores desses fenômenos, pois tem grande influência na geração de escorregamentos, tanto através da declividade, quanto no controle da dinâmica hidrológica superficial e subsuperficial.

Desta forma, será utilizado o modelo SHALSTAB desenvolvido por Montgomery & Dietrich (1994), posteriormente automatizado para utilização nos softwares ARCINFO e ARCVIEW. Este método combina um modelo hidrológico com um de estabilidade de encosta para calcular a quantidade de chuva necessária



Figura 2 - Foto de escorregamentos translacionais na encosta do Dedo de Deus.



Figura 3 - Queda de blocos ao longo da travessia Petrópolis-Teresópolis.

para romper o estado de equilíbrio da encosta.

O modelo hidrológico desenvolvido por O'Loughlin (1986), parte do princípio de que o fluxo de água infiltra no solo até atingir uma camada de condutividade mais baixa e percorre um traçado de acordo com a topografia. Isto permite determinar o padrão espacial da saturação do solo. Desta forma, o índice de saturação na



Figura 4 - Vegetação específica da região do “Elevador” onde pode-se constatar, devido ao afloramento de blocos de rocha na porção esquerda inferior da foto, uma capa de solo pouco espessa.

paisagem (W) é definido como a razão entre a quantidade de chuva (Q) que ocorre em uma determinada área e a capacidade de saturação da camada de solo correspondente.

$$W = \frac{Q \cdot a}{b \cdot T \cdot \sin \theta} \quad (1)$$

onde a representa a área de contribuição (m^2), b é o tamanho do lado do pixel (m), θ é a declividade, T é a transmissividade do solo (m^2/dia). O parâmetro W da equação (1) representa o índice de saturação do solo, que pode ser simplificado para a equação (2) onde h é a espessura do solo saturado, e z é a espessura do solo (Montgomery & Dietrich 1994).

$$W = \frac{h}{z} \quad (2)$$

Já o modelo de estabilidade de encosta utilizado pelo SHALSTAB tem como base a teoria do talude infinito que considera o plano de escorregamento retilíneo. A combinação deste modelo com o modelo hidrológico (equação 3) permite identificar a quantidade de chuva requerida para deflagrar um escorregamento.

$$Q = \left(\frac{Tb \sin \theta}{a} \right) \left[\left[\frac{c}{\rho_w g z \cos^2 \theta \tan \phi} \right] + \frac{\rho_s}{\rho_w} \cdot \left[1 - \frac{\tan \theta}{\tan \phi} \right] \right] \quad (3)$$

onde c é a coesão do solo, ρ_w é a densidade da água, ρ_s é a densidade do solo e ϕ o ângulo de atrito.

Os mapas obtidos por este procedimento classificam a susceptibilidade da ocorrência de escorregamentos rasos na paisagem como: a) incondicionalmente instável ($\tan \theta > \tan \phi$ (são áreas que devido a declivi-

dade é difícil a acumulação de solos, sendo assim são áreas predominantemente de afloramentos rochosos); b) incondicionalmente estável ($\tan \theta \leq \tan \phi$ [$1 - \rho_w / \rho_s$]) (mesmo acontecendo grandes descargas hidráulicas não há condições da ocorrência de escorregamentos devido a baixa inclinação da encosta) e c) potencialmente instáveis que dependem da quantidade de água (Montgomery & Dietrich 1994).

MÉTODOS Os procedimentos necessários para a aplicação do modelo de previsão de áreas susceptíveis a escorregamentos rasos nas encostas (SHALSTAB) na área do Parque Nacional da Serra dos Órgãos foram: a) Elaboração do Modelo Digital de Terreno; b) Obtenção do mapa de área de contribuição e de declividade, c) Obtenção dos valores dos parâmetros de propriedade dos solos e d) Aplicação do modelo a partir dos diferentes valores de chuva.

Elaboração do modelo digital de terreno (MDT) O modelo digital de terreno é componente fundamental no modelo de predição de zonas susceptíveis à ocorrência de escorregamentos rasos, uma vez que constitui a base para a determinação da declividade (θ) e da área de contribuição (a). Sendo assim, é necessário que se produza um MDT o mais confiável possível. Desta forma, optou-se por utilizar o módulo Topogrid do software ArcInfo, o qual foi projetado para criar um modelo topográfico digital voltado para a hidrologia. Este módulo utiliza uma técnica de interpolação de interação de diferenças finitas, combinando com as vantagens intrínsecas de uma interpolação local com os métodos de interpolação global que utilizam uma superfície de continuidade (Hutchinson 1989, ESRI 1993). Este módulo permite ainda utilizar na interpolação as informações digitais de pontos cotados e corpos d'água como lagos, represas, etc, além da drenagem, que possibilita identificar com exatidão o posicionamento dos talvegues.

Guimarães (2000) comparou o modelo digital de terreno obtido por este interpolador, utilizando dados de curva de nível, com pontos cotados a partir de levantamento por GPS geodésico que não fizeram parte da interpolação. Este mesmo procedimento foi feito para Modelos Digitais de Terreno obtidos a partir de diferentes métodos de interpolação como o Kriging, inverso do quadrado da distância e kriging multi-direcional. O MDT elaborado a partir do módulo Topogrid foi o que apresentou o menor erro residual.

Obtenção do mapa de área de contribuição A área de contribuição (a) calculada para cada célula do grid, corresponde ao valor da área correspondente à bacia a montante de cada pixel específico (Moore *et al.* 1991). Vários são os métodos para determinação da área de contribuição. Existem os que calculam a área de contribuição considerando que todo o fluxo a montante é transferido para um único pixel a jusante (O'Callaghan & Mark 1984, Desmet & Govers 1996, Milde *et al.* 1999, entre outros), e os que distribuem proporcionalmente o fluxo para pixels a jusante (Quinn *et al.* 1991,

Freeman 1991, Tarboton 1997). Tarboton (1997) realizou comparações entre diversos procedimentos que determinam a área de contribuição e constatou que o método denominado multi-direcional desenvolvido por Quinn *et al.* (1991) produz melhor resultado para o cálculo da área de contribuição para as porções côncavas do relevo. Este método realiza a distribuição de fluxo de forma proporcional entre as células localizadas à jusante, de acordo com a declividade local. Como estas porções do relevo são as mais susceptíveis a ocorrência de escorregamento optou-se por utilizar esta metodologia no Parque Nacional da Serra dos Órgãos.

Obtenção dos valores dos parâmetros de propriedade dos solos Os parâmetros de propriedade dos solos são difíceis de se obter em campo. São necessários levantamentos exaustivos e de custo elevado para que se possa determiná-los espacialmente. Sendo assim, Guimarães *et al.* (2003) elaboraram uma metodologia para determinação dos parâmetros do solo de forma indireta em duas bacias localizadas na vertente oeste do Maciço da Tijuca no município do Rio de Janeiro. De posse do mapeamento das cicatrizes, oriundas dos escorregamentos, elaborado imediatamente após as intensas chuvas ocorridas em Fevereiro de 1996, eles produziram 125 modelos a partir da combinação de diferentes valores dos parâmetros de coesão, espessura do solo, ângulo de atrito e densidade do solo. O intervalo para cada parâmetro específico foi definido levando-se em conta a sua variabilidade em testes realizados *in situ* e em laboratório. Os 125 mapeamentos das áreas susceptíveis a ocorrência de escorregamentos, oriundas de

cada combinação foi comparada com o mapeamento das cicatrizes e foi produzido um ranking por ordem de desempenho de cada modelo. O melhor desempenho foi para o modelo que utilizou os seguintes valores de parâmetros de solo: $c/z = 2$, $\rho_s = 1,5 \text{ g/cm}^3$ e $\phi = 45^\circ$. Levando-se em conta que as regiões possuem características fito-morfológica similares e tendo em vista que os escorregamentos translacionais rasos são fortemente controlados pela topografia, e os de maior ocorrência na região, utilizaremos os valores mencionados anteriormente no modelo aplicado ao PARNASO.

Aplicação do modelo a partir dos diferentes valores de chuva O modelo SHALSTAB foi aplicado avaliando-se os diferentes eventos de chuva ao longo do ano de 2007. Para cada mês foi produzido um mapa de susceptibilidade a escorregamento raso de acordo com o evento de chuva mais significativo. Os dados de pluviosidade foram fornecidos pela administração do PARNASO e a quantidade diária de precipitação ao longo de 2007 é mostrada na figura 5. Para cada mês foram selecionados os eventos de chuva de maior intensidade, e utilizado este valor para ser aplicado ao modelo. Devido a falta de dados pluviométricos de uma série histórica não foi possível fazer simulações com o modelo utilizando valores de chuva máxima.

RESULTADOS A figura 6 mostra o mapa de susceptibilidade a ocorrência de escorregamentos com diferentes valores de pluviosidade. As áreas na cor preta são as consideradas incondicionalmente instáveis que correspondem, predominantemente, aos paredões rochosos,

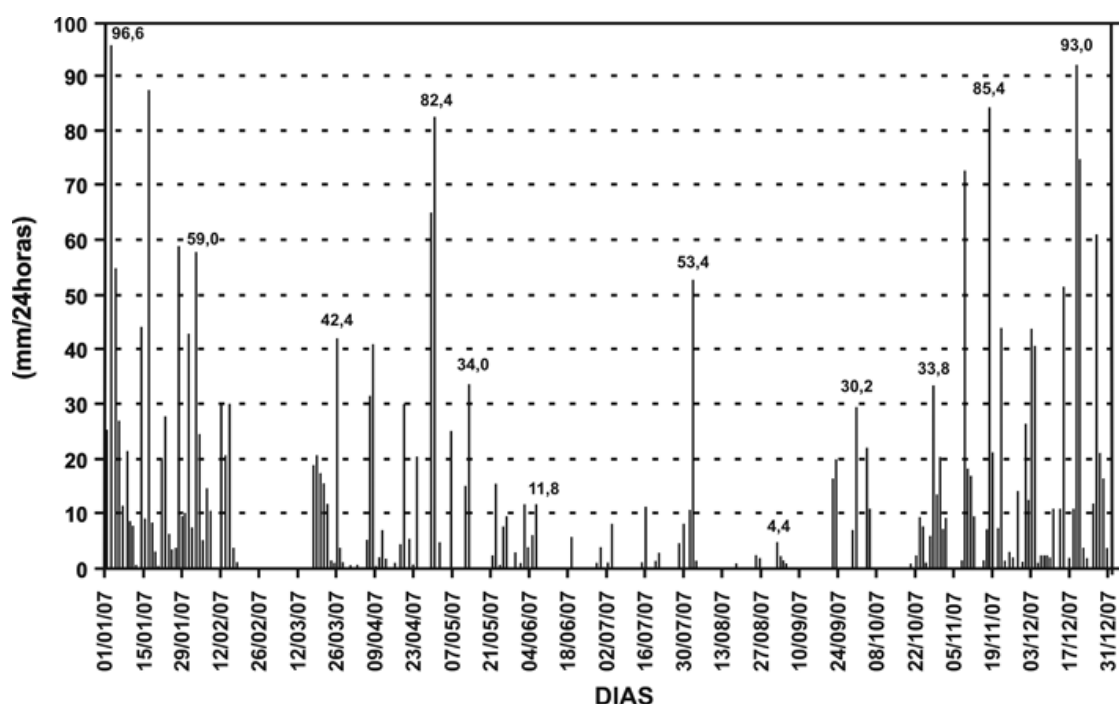


Figura 5 - Dados diários de chuva ao longo do ano de 2007.

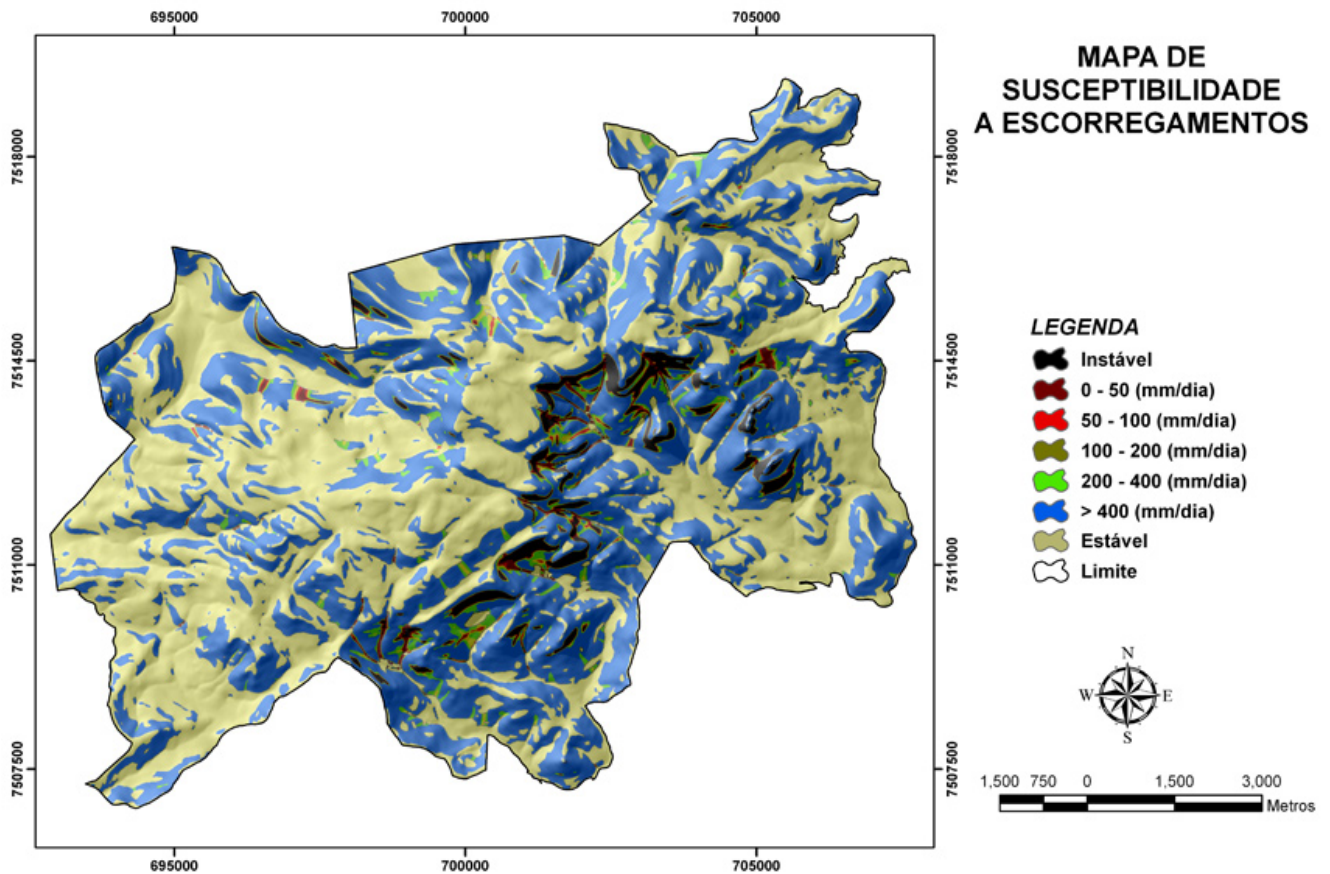


Figura 6 - Mapa de susceptibilidade a escorregamentos referente a diferentes valores de pluviosidade.

ou seja, são áreas de altas declividades em que os escorregamentos não dependem de eventos de chuva para acontecerem. As áreas em amarelo são as consideradas incondicionalmente estáveis com baixas declividades e não apresentam susceptibilidade a escorregamentos mesmo com descargas hidráulicas de grande magnitude. As outras cores representam as porções do relevo que são susceptíveis a escorregamentos de acordo com a intensidade de chuva. Também é observado que as áreas mais susceptíveis estão localizadas na porção sul/sudeste correspondente a vertente oceânica.

Levando-se em conta os principais eventos pluviométricos mensais, foram elaborados para cada mês do ano de 2007 os mapas de susceptibilidade a ocorrência de escorregamentos. Para esta análise foi retirada a classe incondicionalmente instável já que não está diretamente relacionada a eventos de chuva.

A figura 7 mostra a sazonalidade das áreas susceptíveis ao longo do ano. Nota-se que os meses de agosto e junho são os que apresentam as menores áreas de susceptibilidade, isto é, quase todo o parque é considerado estável. Janeiro e dezembro são os meses mais instáveis, com maior incidência de chuvas e as áreas susceptíveis abrangem grande parte das vertentes. A figura 8 mostra a área das zonas susceptíveis ao longo do ano. A distribuição em forma de parábola está intimamente relacionada com o período seco e chuvoso, com exceção dos meses de abril e julho que tiveram grandes

eventos de chuva isolados.

Normalmente os trabalhos que utilizam o modelo SHALSTAB elaboram o mapa de susceptibilidade à ocorrência de escorregamentos a partir de um rearranjo da equação 3, passando o parâmetro transmissividade para o lado esquerdo da equação, determinando-se a razão Q/T (Fernandes *et al.* 2004, Meisina & Scarabelli 2007 e Carrara *et al.* 2008). Desta forma, o mapa é construído identificando-se os pixels com valores que são considerados incondicionalmente estáveis, ($\tan\theta \leq \tan\phi(1-pw/ps)$), e os considerados incondicionalmente instáveis, ($\tan\theta > \tan\phi$). Valores intermediários correspondem a faixa de transição entre as duas classes anteriores.

O presente trabalho se diferencia destas abordagens porque o modelo SHALSTAB é aplicado considerando as diferentes quantidades de chuva ao longo do ano, o que permite facilmente identificar na paisagem a sazonalidade das áreas susceptíveis a ocorrência de escorregamentos translacionais rasos. Esta forma de aplicação do modelo serve como uma importante informação para que se possa minimizar os riscos de acidentes aos visitantes do PARNASO.

Em regiões em que existam dados pluviométricos de séries históricas será possível elaborar mapas de susceptibilidade mais precisos, podendo-se inclusive identificar quantidades de chuva máxima e mínima mensais o que aumentaria a confiabilidade dos resultados.

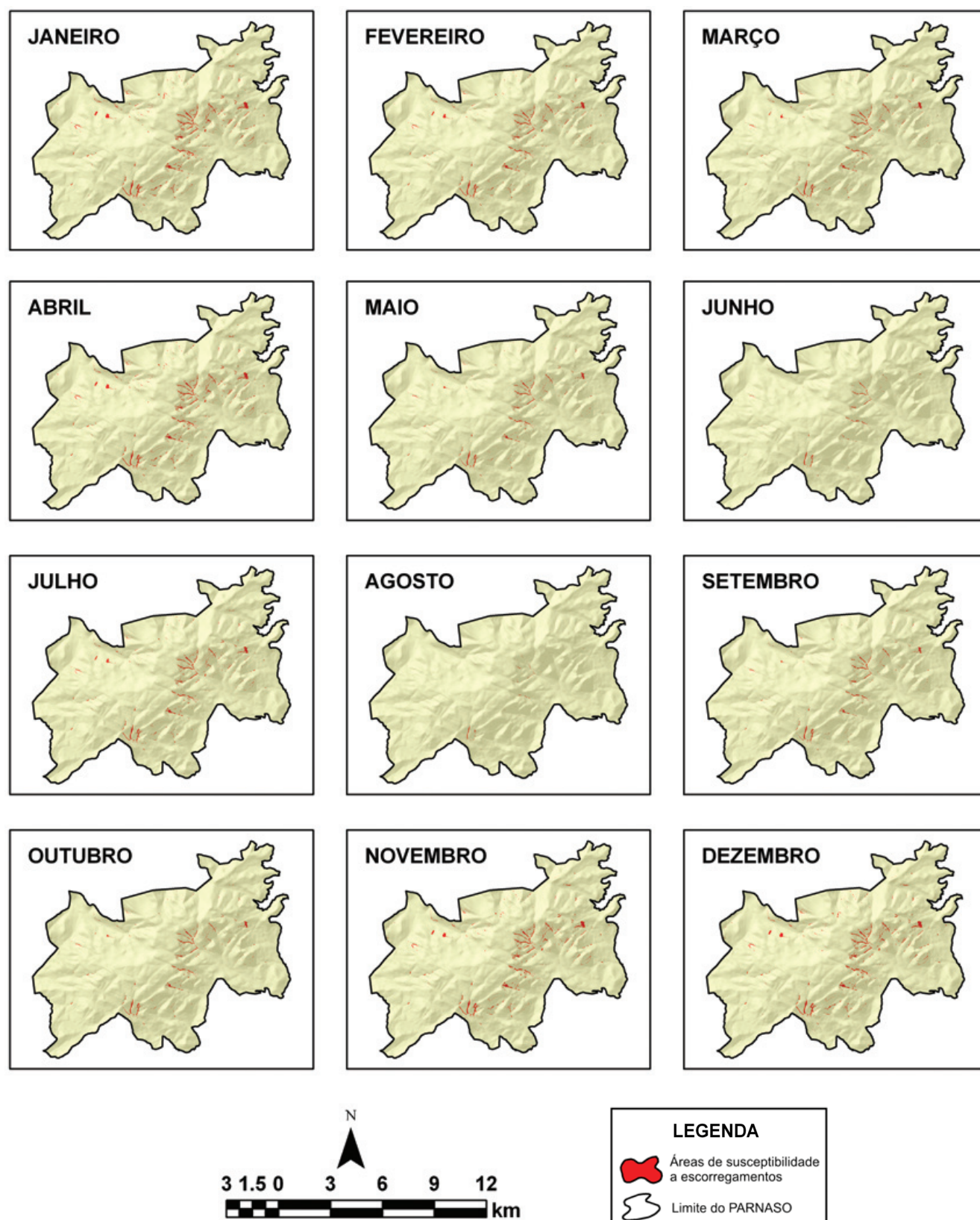


Figura 7 - Sazonalidade das áreas de susceptibilidade a escorregamentos a partir do resultado do modelo de previsão e dos totais diários mais representativos de cada mês do ano. Em vermelho são as áreas com possibilidade de escorregamento.

CONCLUSÕES Os escorregamentos translacionais rasos, de contato abrupto solo rocha, têm forte controle topográfico associado a eventos de grande descarga

hidráulica (Guimarães *et al.* 2003). Sendo assim, para a utilização de um modelo matemático de previsão é fundamental que seja feita uma análise na determinação

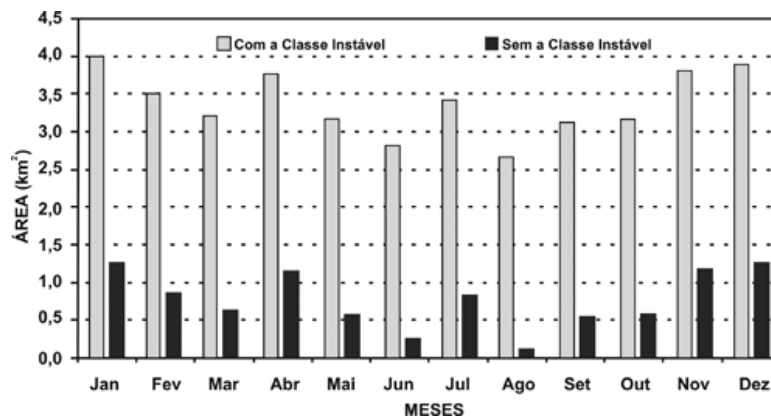


Figura 8 - Distribuição das áreas consideradas susceptíveis a escorregamentos, com a classe instável (cinza) e sem a classe instável (preto). Nota-se a distribuição na forma de parábola, típica para este tipo de fenômeno.

dos dados morfométricos, já que estes fenômenos estão relacionados as áreas côncavas do relevo, onde ocorre de forma cíclica o acúmulo e transporte do solo coluvial. Desta forma, as metodologias utilizadas para obtenção dos parâmetros morfométricos proporcionaram maior exatidão dos dados obtidos e conseqüentemente influenciaram no resultado do modelo. Além disso, o modelo de previsão utilizado já foi amplamente testado e avaliado o seu desempenho em áreas de clima e relevo similares para que seus resultados possam ser utilizados. Sendo assim, o modelo SHALSTAB é aplicado a partir de metodologias que fornecem os parâmetros topográficos mais precisos e os valores de propriedades de solo utilizados são aqueles que obtiveram melhor desempenho nas diversas simulações realizadas.

A aplicação do modelo SHALSTAB, no Parque Nacional da Serra dos Órgãos, utilizando os valores dos eventos de chuva mais significativos para cada mês, possibilitou determinar não só as zonas susceptíveis a escor-

regamentos rasos espacialmente, mas também ao longo do ano a dinâmica sazonal da ocorrência deste fenômeno.

A utilização do mapa de previsão à escorregamentos rasos atrelado a previsão de chuva, permite que a gestão do parque possa otimizar os acessos aos visitantes com máxima segurança, tanto de forma espacial, identificando áreas permanentemente de risco, quanto de forma temporal, identificando os locais que são considerados de risco somente em determinadas épocas do ano.

Agradecimentos Os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de produtividade dos autores, ao Ministério do Meio Ambiente (MMA) que financiou o trabalho de campo e a equipe do PREVFOGO do Parque Nacional da Serra dos Órgãos que forneceu todo o apoio logístico. Agradecem também aos membros do Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais (LSIE) da UnB pelas críticas e sugestões realizadas durante a elaboração do artigo.

Referências

- Alonso M.T.A. 1977. Vegetação. In: IBGE (org.) *Geografia do Brasil: Região Sudeste*. 3ª ed. Rio de Janeiro, Ed. IBGE, p.91-118.
- Baum R.L., Savage W.Z., Godt J.W. 2002. *TRIGRS – A fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis*. U.S. Geological Survey Open-File Report 02-0424, 27. Disponível em: <http://pubs.usgs.gov/of/2002/ofr-02-424/ofr-02-424-508.pdf>.
- Carrara A., Crosta G., Frattini P. 2008. Comparing models of debris-flow susceptibility in the alpine environment. *Geomorphology*, **94**:353-378.
- Carvalho Júnior O.A., Bloise G.L.F., Gomes R.A.T., Ramos V.M., Guimarães R.F. 2005. Previsão de escorregamentos em rodovias a partir do uso do modelo SHALSTAB. In: *Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada*, 9, São Paulo, *Anais*, p.3011-3024.
- Desmet P.J.J. & Govers G.A. 1996. GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. *Journal of Soil and Water Conservation*, **51**(5):427-433.
- ESRI 1993. *Understanding GIS – The ARC/INFO Method*. New York, Environmental Systems Research Institute, ESRI, 535p.
- Fernandes N.F. 1996. Modelagem matemática em geomorfologia: potencialidades e limitações. *Revista Sociedade e Natureza*, **8**(15):222-227.
- Fernandes N.F., Guimarães R.F., Gomes R.A.T., Vieira B.C., Montgomery D.R., Greenberg H. 2004. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidences and modeling. *Catena*, **55**(2):163-181.
- Freeman T. 1991. Calculating catchment area with divergent

- flow based on a regular grid. *Computers and Geosciences*, **17**:413-422.
- Gomes R.A.T., Guimarães R.F., Carvalho Júnior O.A., Fernandes N.F. 2005. Análise de um modelo de previsão de deslizamentos (SHALSTAB) em diferentes escalas cartográficas. *Revista Solos e Rocha*, **28**(1):85-97.
- Gomes R.A.T., Guimarães R.F., Carvalho Júnior O.A., Fernandes N.F. 2004. Análise da influência da escala cartográfica no resultado de um modelo de previsão de áreas críticas a deslizamentos. *Ciência e Natura*, **1**:269-286.
- Guimarães R.F. 2000. *A modelagem matemática na avaliação de áreas de risco a deslizamentos: o exemplo das bacias dos rios Quitite e Papagaio (RJ)*. Rio de Janeiro, Tese de Doutorado, Depto. de Geologia, UFRJ, 157p.
- Guimarães R.F., Montgomery D.R., Greenberg H.M., Fernandes N.F., Gomes R.A.T., Carvalho Júnior O.A. 2003. Parameterization of soil properties for a model of topographic controls on shallow landsliding: application to Rio de Janeiro. *Engineering Geology*, **69**(1-2):99-108.
- Hutchinson M.F. 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, **106**:211-232.
- Martinelli G. 1989. *Campos de Altitude*. Rio de Janeiro, Editora Index, 158p.
- Meisina C & Scarabelli S. 2007. A comparative analysis of terrain stability models for predicting shallow landslides in colluvial soils. *Geomorphology*, **87**:207-223.
- Milde L.C.E., Moraes J.M., Ferraz F.F.B., Mortatti J., Schuler A.E. 1999. Uso do hecprepro no tratamento de modelo digital de terreno em hidrologia: Estudo de caso. *Revista Geociências. São Paulo*, **18**(2):285-301.
- Montgomery D.R. & Dietrich W.E. 1994. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. *Water Resources Research*, **30**:1153-1171.
- Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. 1991. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, **5**(1):3-30.
- Nimer E. 1977. Clima. In: IBGE (org.) *Geografia do Brasil: Região Sudeste*. 3ª ed., Rio de Janeiro, Editora IBGE, p.51-89.
- O'Callaghan J.F. & Mark D.M. 1984. The extraction of drainage network from digital elevation data. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, **28**:328-344.
- O'Loughlin E.M. 1986. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research*, **22**:794-804.
- Pack R.T., Tarboton D.G., Goodwin C.N. 1998. *Terrain stability mapping with SINMAP, technical description and users guide for version 1.00*. Report Number 4114-0, Terratech Consulting Ltd., Salmon Arm, Canada, 68p.
- Quinn P., Beven K., Chevallier P., Planchon O. 1991. The Prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, **5**:59-80.
- RADAMBRASIL. Ministério das Minas e Energia. 1983. *Folhas SF. 23/24 Rio de Janeiro/Vitória*. Rio de Janeiro, Projeto RADAMBRASIL, Levantamentos de Recursos Naturais, v. 32, 780p., 6 mapas.
- Ramos V.M., Guimarães R.F., Carvalho Júnior O.A., Redivo A.L., Gomes R.A.T., Cardoso F. B.F., Fernandes N.F. 2007. Algorithm development for Incorporating soil physical properties of each different soil class in a landslide prediction model (SHALSTAB). *Solos e Rochas*, **30**:139-148.
- Redivo A.L., Ramos V.M., Guimarães R.F., Carvalho Júnior O.A., Gomes R.A.T. 2004. Determinação de áreas susceptíveis a escorregamentos na BR356 no município de Ouro Preto-MG. *Ciência e Natura*, Santa Maria, **1**:31-45.
- Tarboton D.G. 1997. A new method for the determination of flow directions and contributing areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, **33**(2):309-319.

Manuscrito ID 13089

Submetido em 16 de dezembro de 2008

Aceito em 21 de março de 2009