

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DO FATOR DE SEGURANÇA DURANTE EVENTO PLUVIOMÉTRICO EM ÁREAS DE ENCOSTAS

Téhrrie König¹; Márcio A. E. Moraes¹; Rodolfo M. Mendes¹; Hermann J. H. Kux²; Márcio R. M. Andrade¹

¹Centro Nacional de Monitoramento e Alerta de Desastres Naturais, - CEMADEN, Estrada Dr. Altino Bondensan, 500 - Eugênio de Melo, São José dos Campos - SP, 12247-016, tehrriekonig@gmail.com; márcio.moraes@cemaden.gov.br; rodolfo.mendes@cemaden.gov.br; márcio.andrade@cemaden.gov.br.

²Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Av. dos Astronautas, 1758, Jardim da Granja, São José dos Campos, SP 12227-010, hermann@dsr.inpe.br.

RESUMO

Deslizamentos de terra, desencadeados por elevados índices pluviométricos, são eventos recorrentes no Brasil. Com o crescimento populacional das áreas urbanas, cada vez mais pessoas estão ocupando áreas de encostas íngremes, ficando vulneráveis aos deslizamentos. Diante disso, a identificação, análise e monitoramento de áreas de suscetibilidade a deslizamentos, são de fundamental importância. O objetivo deste trabalho é analisar a variação do Fator de Segurança (FS) na bacia do córrego Piracuama, localizado em Campos do Jordão – SP, em um período de 48 horas, durante o qual foram constatados elevados índices pluviométricos e registro de deslizamentos. Para tanto, foi utilizado o modelo numérico TRIGRS (“Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-Stability Model”). Os parâmetros geotécnicos e hidrológicos utilizados no modelo foram obtidos da literatura, enquanto que os dados pluviométricos foram coletados de pluviômetros instalados na área. As análises mostram que a chuva intensa foi o desencadeador dos deslizamentos registrados, mas que estes ocorreram em ambiente antropicamente alterado.

Palavras-chave — Deslizamentos, Trigrs, Suscetibilidade, Desastre Natural.

ABSTRACT

Landslides triggered by heavy rainfall are common phenomena in Brazil. The population growth in urban areas forces people to live in steep slope areas, becoming vulnerable to landslides events. For this reason it is important to identify analyze and monitor the susceptible areas to these phenomena. The aim of this paper is to analyze the Safety Factor (FS) in the Piracuama basin, located in the municipality of Campos do Jordão - SP, during 48 hours, when landslides were recorded. To obtain the FS, a numerical model named TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-Stability Model) was used. The geotechnical and hydrological parameters used were obtained from the literature. The rain gauges from CEMADEN installed in the

study area, provide the rainfall data. The results showed that these landslides were triggered by heavy rainfall, and happened in areas with anthropic changes.

Key words — Landslides, TRIGRS, Susceptibility, Natural Disaster.

1. INTRODUÇÃO

Os deslizamentos de terra, geralmente desencadeados em decorrência da associação entre elevados índices pluviométricos e encostas íngremes, são eventos recorrentes no Brasil. Devido ao elevado crescimento populacional nas áreas urbanas, parte da população acaba ocupando e residindo em áreas de encostas íngremes. Durante o período chuvoso no Estado de São Paulo (dezembro a março), os elevados índices pluviométricos acabam desencadeando deslizamentos de terra, e quando estes ocorrem nas áreas ocupadas, podem causar grande destruição e levar a óbitos [1].

Desta forma, identificar as principais áreas suscetíveis a deslizamentos, monitorá-las e estudá-las é de fundamental importância, a fim de evitar fatalidades. Para tal, é comum a utilização de modelos matemáticos de base física. Esses modelos numéricos consideram a combinação de modelos de estabilidade de talude e modelos hidrológicos. Destacam-se o Shalstab: Shallow Slope Stability Model [2] (Dietrich e Montgomery, 1998), Sinmap: Stability Index Mapping [3], dSLAM: Physically-based Slope Stability Model [4], Slope/W e Seep/W [5], e TRIGRS: Transient Rainfall Infiltration and Grid-based Regional Slope-Stability Model [6]. Foram utilizados ainda dados geotécnicos (tipo de solo, coesão, ângulo de atrito interno, etc.), mapeamentos geológicos e geomorfológicos.

Este trabalho tem por objetivo analisar a variação do Fator de Segurança na bacia do córrego Piracuama, localizado em Campos do Jordão – SP, durante um período de 48 horas, no qual foram constatados elevados índices pluviométricos e registro de deslizamentos.

A área de estudo foi escolhida pelo seu histórico de deslizamentos e pela ocupação irregular e desordenada da área.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo é a bacia do córrego Piracuama, localizada no município de Campos do Jordão – SP, conforme observado na Figura 1. O município possui 51.157 habitantes [7] e extensão territorial de 290,5 km². Está localizado no planalto cristalino, com áreas com altitudes superiores a 2000 metros. As precipitações anuais variam de 1205 mm a 2800 mm, e a temperatura média é de 14,3°C [8].

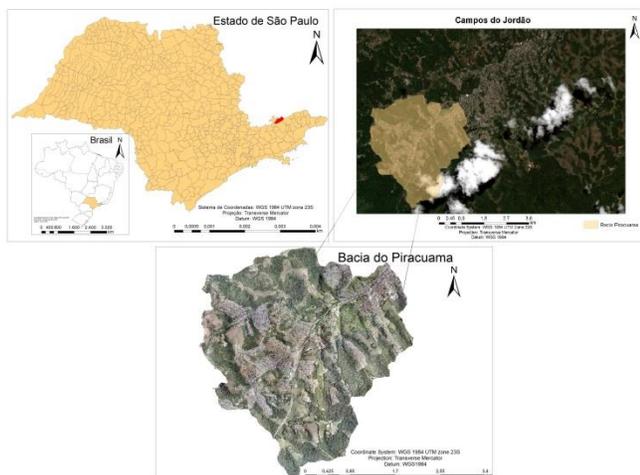


Figura 1. Localização da área de Estudo.

Escolheu-se estudar a bacia do Piracuama, pois há registro histórico de deslizamentos na área, como o ocorrido em 2000 [9] e pelos elementos observados em campo, sendo eles: ocupações irregulares em áreas de declividade acentuada, cortes verticais na encosta, acúmulo de lixo e entulho, encanamentos expostos e com vazamentos, etc. Estes fatores antrópicos modificaram a suscetibilidade das encostas, favorecendo os deslizamentos.

Para a análise do Fator de Segurança (FS), optou-se por utilizar o modelo matemático TRIGRS, uma vez que apresenta boa acurácia e variabilidade para determinar instabilidades sobre áreas íngremes [10]. O modelo TRIGRS foi projetado para simular escorregamentos rasos, com evolução temporal e distribuição espacial, induzidos por chuva em regiões montanhosas [6]. O Fator de Segurança é calculado em uma determinada profundidade em decorrência da mudança de poro-pressão da água no solo durante um evento de chuva. Escrito em Fortran, o TRIGRS calcula a infiltração de água da chuva usando soluções analíticas para a Equação de Richards (eq.1) que representam o fluxo em um meio isotrópico, homogêneo para condições de solo saturado e não saturado [11]. O modelo inclui roteamento de escoamento superficial desviando excesso de água vinda de áreas impermeáveis para aquelas mais permeáveis, seguindo a direção de fluxo superficial. Também inclui o uso de um modelo simples de talude infinito para calcular o fator de segurança célula por célula na grade. Uma aproximação

para o estres efetivo em materiais não saturados ajuda no cálculo do fator de segurança para solos não saturados. Desta forma, o fator de segurança tem sua equação final:

$$\left(\frac{\partial\theta}{\partial t}\right) = \left[\left(\frac{\partial}{\partial z}\right)\left(K_z * \theta * \left(\frac{\partial\Psi}{\partial z}\right)\right)\right] \quad (1)$$

Onde θ é o valor referente à umidade volumétrica do solo (m³/m³), t é o tempo (segundos), z é a profundidade do solo (metros), K_z é a condutividade hidráulica na direção z (m/s), e Ψ é o potencial total (kPa).

$$FS = \left(\frac{\tan\phi}{\tan\alpha}\right) + \left[\left(\frac{c - \phi(Z,t)\gamma_w \tan\phi}{\gamma_s Z \sin\alpha \cos\alpha}\right)\right] \quad (2)$$

Onde c é a coesão (kPa), ϕ é o ângulo de atrito interno (°), γ_w é a densidade da água (kN/m³), γ_s é a densidade do solo (kN/m³), Z é a profundidade da camada (m), α é o ângulo da encosta (°), e t é o tempo (s).

Os parâmetros de entrada do modelo consistem em dados hidrológicos, como a taxa de infiltração, altura inicial do lençol freático (temporário ou não), difusividade hidráulica e condutividade hidráulica do solo. E dados geotécnicos, como coesão do solo, ângulo de atrito interno e profundidade da camada analisada.

O modelo permite a delimitação de zonas da área de estudo, de modo a favorecer a distinção e a variabilidade geotécnica de cada região/porção de solo. Isso é favorável, pois permite analisar áreas heterogêneas, aplicando valores geotécnicos específicos para cada zona. Outros modelos, como por exemplo, o Shalstab, não permite esta distinção, forçando a uma generalização dos parâmetros para toda a área.

Neste trabalho, optou-se por utilizar 3 zonas de acordo com a profundidade da camada. Esta escolha foi embasada no estudo geotécnico realizado por Mendes et al. (2018) [9], que forneceu os dados de coesão, ângulo de atrito interno, peso, condutividade e difusividade hidráulicas para cada camada de solo. Os dados hidrológicos e geotécnicos utilizados neste trabalho são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Dados geotécnicos e hidrológicos utilizados.

| Profundidade | Coesão do solo (kPa) | Ângulo de atrito interno (°) | Condução Hidráulica (m s ⁻¹) | Difusiv. Hidráulica (m s ⁻¹) | Peso do solo (kNm ⁻³) |
|--------------|----------------------|------------------------------|--|--|-----------------------------------|
| 0 – 2,0m | 37 | 56 | 4,44x10 ⁻⁶ | 6,45x10 ⁻⁶ | 18,3 |
| 2,0 – 4,5m | 18 | 37 | 9,46x10 ⁻⁶ | 6,45x10 ⁻⁶ | 19,1 |
| 4,5- 5,0m | 2 | 49 | 7,93x10 ⁻⁶ | 6,45x10 ⁻⁶ | 17,9 |

Utilizou-se também um modelo digital de terreno (MDT), adquirido na base cartográfica da Prefeitura Municipal de Campos do Jordão, resultante de dados com altíssima resolução espacial, obtidos por levantamento LIDAR (“Light Detection and Ranging”). Os índices pluviométricos utilizados são embasados nas medições de

11 pluviômetros instalados pelo CEMADEN [12] na área em estudo, conforme são mostrados na Figura 2.

Para o estudo em questão, foram selecionados dados de chuva para um período de 48 horas, contados a partir da meia noite do dia 07 até a meia noite do dia 08 de Março de 2017. Com base nesses dados, fez-se uma interpolação (“krigagem”), gerando quatro mapas de chuva para a região em questão. Durante esse período, foram registradas chuvas intensas que causaram deslizamentos, registrados pela Defesa Civil de Campos do Jordão. A Figura 2 apresenta o a média chuva, calculada para os onze pluviômetros, onde se observa um pico de 30 mm ocorrendo em um intervalo de quatro horas.

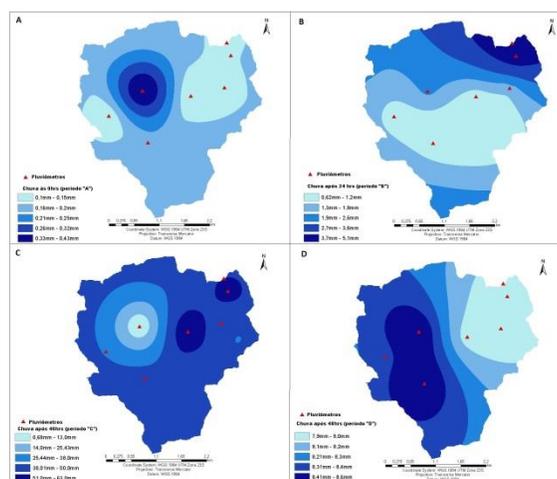


Figura 2. Índices Pluviométricos para os períodos de análises 0hrs (A), 24hrs (B), 40hrs (C) e 48hrs (D) e localização dos pluviômetros.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os mapas de chuva que alimentam o modelo foram estipulados para os intervalos de 0hrs, 24hrs, 40hrs e 48hrs. Com base nestes, o TRIGRS gerou quatro mapas correspondentes para o Fator de Segurança da área em estudo, conforme apresentado na Figura 3. Cada mapa corresponde a um determinado período, a saber: período “A” (00:00 do dia 07 de março), período “B” correspondendo às 24 horas após o período “A” (das 04:00 do dia 07 de março até 00:00 do dia 08 de março), período “C” (das 00:00 às 16:00 do dia 08 março) quando ocorreu uma chuva intensa, e o período “D”, correspondente à 48 horas após o período “A” (das 16:00 às 23:59 horas do dia 08 de março).

Com base na Figura 3, observa-se que o FS da área foi diminuindo em decorrência do aumento do índice pluviométrico. No período inicial “A”, observa-se que a área apresenta poucos pontos com FS inferiores à 0,9. Esta é a condição inicial da análise, referente ao dia 07 de março (período das 00:00 até 04:00) data na qual foram registrados baixos índices pluviométricos (0,47mm de chuva).

Na Figura 3 “B”, está representado o FS para um período de 24 horas após o início da análise. Nota-se que houve uma diminuição do FS (aumento das áreas com FS inferiores à 0,9), pois parte da água proveniente da chuva do dia 07 de março no período entre 04:00-00:00 foi infiltrando nas camadas do solo. Já na Figura 2 “C”, observa-se que mais áreas foram classificadas com baixo FS. Isso ocorreu em decorrência das chuvas intensas que atingiram a área entre as 13:00 horas e as 16:00 horas do dia 08 de março. Durante este período, foram registrados 30,30 mm de chuva e três deslizamentos de terra. E o período final de análise, correspondente às 48 horas (Figura 2 “D”), mostra uma diminuição ainda maior do FS, pois continua a chover na área, ainda que não tão intensamente (acumulado de 8,01mm de chuva).

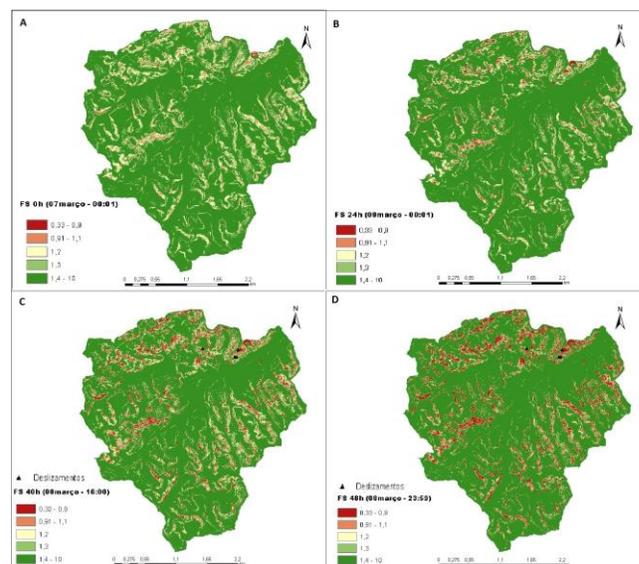


Figure 3. Variação temporal do FS: A (0hrs-07março); B (24hrs-08março); C (40hrs - 08março); D (48hrs - 08março) e identificação das cicatrizes de deslizamentos.

É importante observar que os locais onde foram registrados os deslizamentos de terra apresentaram uma diminuição do FS conforme o acumulado de chuva. Ou seja, o modelo matemático conseguiu identificar corretamente as principais áreas de instabilidade da encosta. Cabe ressaltar que os deslizamentos registrados ocorreram em áreas com ocupação humana. Esses resultados corroboram com a hipótese levantada por Mendes et al. (2018) [9] de que pode haver uma relação entre as alterações antrópicas da área, que associado ao elevado índice pluviométrico, ocasionou os deslizamentos.

4. CONCLUSÕES

O modelo matemático Trigrs apresentou resultados satisfatórios, pois ele permitiu identificar as áreas de maior instabilidade em decorrência do aumento do índice pluviométrico. Os registros de deslizamentos ocorridos no dia 08 de março de 2017 corroboram com os resultados apresentados pelo modelo.

Verificou-se ainda, através de visita a campo, que as áreas de encostas íngremes estão ocupadas, e as alterações antrópicas favorecem a instabilização das encostas urbanas, aumentando a possibilidade de deslizamentos. Associado a isso, ocorreu um evento de chuva intensa em um período de quatro horas, contabilizando um total de 30,30 mm de chuva, que aumentou a umidade dos solos e desencadeou os deslizamentos.

Diante disso, ressalta-se que o modelo Trigrs é uma ferramenta computacional capaz de identificar e monitorar áreas suscetíveis à ocorrência de deslizamentos, e pode ser utilizado para avaliar de áreas ambientalmente suscetíveis que ainda não foram ocupadas.

Ressalta-se que pode haver uma significativa contribuição das alterações antrópicas nas encostas e o desencadeamento de deslizamentos, e, portanto, recomenda-se futuramente uma análise mais detalhada da influência das ações humanas em encostas íngremes.

5. REFERÊNCIAS

- [1] TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (org.). *Desastres Naturais: conhecer para prevenir*. 1ª ed., São Paulo: Instituto Geológico, 2009.
- [2] DIETRICH, W. E.; MONTGOMERY, D. R. (1998). "SHALSTAB: a digital terrain model for mapping shallow landslide potential". NCASI (National Council of the Paper Industry for Air and Stream Improvement), Technical Report, 29 p.
- [3] PACK, R. T.; TARBOTON, D. G.; GOODWIN, C. N. (1998). "The Sinmap Approach to terrain stability mapping". In *Proceedings of the 8th Congress of the International Association of Engineering Geology*, Vancouver, BC, Canada, 1998; pp. 21-25
- [4] WU, W.; SIDLE, R. C. (1995). "A distributed slope stability model for steep forested basins". *Water Resour. Res.*, v. 31, p. 2097-2110.
- [5] GeoStudio. *GeoStudio Tutorials Includes Student Edition Lessons*, 1st ed.; Geo-Slope International Ltd.: Calgary, AB, Canada, 2005, p.485.
- [6] BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. TRIGRS: A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis. U.S. Geological Survey Open-File Report, v. 2, 35 pp, 2002.
- [7] INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. Disponível em: <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=350970>>. Acesso 13 out 2016.
- [8] MODENESI-GAUTTIERI, M. C., HIRUMA, S. T. (2004). "A Expansão Urbana no Planalto de Campos do Jordão: Diagnóstico Geomorfológico para Fins de Planejamento". *Revista do Instituto Geológico - SP*, v. 25, p. 1-28.
- [9] MENDES, R. M., ANDRADE, M. R. M., TOMASELLA, J., MORAES, M. A. E., SCOFIELD, G. B. (2018). "Understanding Shallow Landslides in Campos do Jordão municipality - Brazil: disentangling the anthropic effects from natural causes in the disaster of 2000". *Natural Hazards and Earth System Science*, v. 18, p. 15-30.
- [10] SRIVASTAVA, R.; YEH, J.T. C. (1991) Analytical solutions for one-dimensional, transient infiltration toward the water table in homogeneous and layered soils. *Water Resource Research*, v.27, n.5, p.753-762.
- [11] JELÍNEK, R.; WAGNER, P. Landslide hazard zonation by deterministic analysis (Vel'ká Causa landslide area, Slovakia). (2007). *Landslides*, v.4, n.4, p. 339-350.
- [12] CENTRO NACIONAL DE MONITORAMENTO E ALERTAS DE DESASTRES NATURAIS - CEMADEN. Disponível em: <<http://www.cemaden.gov.br/historico-da-criacao-do-cemaden/>>. Acesso 24 jan 2017.