

## A DIMENSÃO DAS CICATRIZES DE ESCORREGAMENTOS E A RESOLUÇÃO ESPACIAL DO MDE

Martins, T.D. (UNIFESP) ; Daniel, E. (USP) ; Bonini, J.E. (USP) ; Bateira, C. (RISKAM,CEG, ULISBOA/FLUP, UPORTO) ; Vieira, B.C. (USP)

### RESUMO

A elaboração de um inventário e o mapeamento de cicatrizes de movimentos de massa são etapas fundamentais para a aplicação de diferentes métodos de indicação de áreas instáveis, havendo, no entanto, questões sobre qual, ou quais métodos, devem ser empregados. O objetivo deste trabalho é realizar uma análise preliminar sobre a relação entre o tamanho da feição (cicatriz) e a dimensão da célula do Modelo Digital de Elevação (MDE) usado na modelagem de instabilidade de vertentes. Para isso foi adotado o modelo TRIGRS para calcular o Fator de Segurança em uma bacia afetada por escorregamentos rasos. Um mapa de cicatrizes foi empregado para avaliação da modelagem, considerando dois cenários: a) com todas as cicatrizes e b) com as cicatrizes maiores que 144m<sup>2</sup>. Os resultados indicam uma pequena variação positiva quando da adoção de cicatrizes com dimensão superior a abrangência da célula do MDE.

### PALAVRAS CHAVES

*TRIGRS; Resolução Espacial; Escorregamentos; MDE; Itaoca (SP)*

### ABSTRACT

The elaboration of an inventory and the mapping of mass movement scars are fundamental procedures for the application of different methods of indicating unstable areas, although there are remaining questions about which, or which methods, should be applied. This work aims to carry out a preliminary analysis of the relationship between the size of the feature (landslide scar) and the spatial resolution of a Digital Elevation Model (DEM) used in the modeling of slope instability. To do so, the TRIGRS model was adopted to calculate the Safety Factor in a basin affected by shallow landslides. A landslide scar map was used to evaluate the modeling results, considering two scenarios: a) with all scars and b) with scars larger than 144m<sup>2</sup>. The results indicate a small positive variation when adopting scars with dimensions greater than the DEM cell size.

### INTRODUÇÃO

A elaboração de um inventário e mapeamento de cicatrizes de movimentos de massa são fundamentais para a aplicação de diferentes métodos voltados a indicação de áreas potencialmente instáveis. Conforme destacaram Guzzetti et al. (2012) as principais aplicações desses mapas são o de documentar os movimentos de massa em diferentes escalas, realizar uma avaliação preliminar de risco, suscetibilidade ou perigo, investigar a distribuição e os tipos de processo em relação ao terreno e estudar a evolução da paisagem. No entanto, não está claro na literatura quais métodos devem ser empregados para estas etapas, assim como destacam Ardizzone et al. (2002) que verificaram uma divergência de até 80% entre inventários feitos por três grupos distintos de pesquisadores, para uma mesma área. Martins et al. (2015) também conferiram significativas diferenças na dimensão das cicatrizes mapeadas para uma mesma área por diferentes autores, sendo que um definiu aproximadamente 14% de área afetada, enquanto o outro indicava ser 20%. As diferenças neste caso estavam relacionadas, principalmente, entre a definição das áreas de ruptura, de passagem e de depósito do material mobilizado. Dentre os métodos que se apoiam nesse tipo de mapa estão as análises determinísticas de indicação de áreas potencialmente instáveis, em particular os modelos matemáticos em base física. De modo geral, esses modelos indicam quais unidades do terreno possuem maior ou menor instabilidade e pode-se aplicar a área da cicatriz para validar os cenários testados. Assim, verifica-se se a unidade do terreno apontada como instável pelo modelo ocorre no interior de uma área já afetada (cicatriz), assumindo que os parâmetros empregados neste teste podem ser replicados para outras áreas com fisiografia similar.

Em suma, a definição de uma cicatriz, passo inicial para a elaboração de um mapa e do inventário, pode conter imprecisões e limitações inerentes aos procedimentos metodológicos, pois estão sujeitos a uma subjetividade interpretativa (ARDIZZONE et al., 2012), além da possibilidade de não diferenciar a área da cicatriz entre as zona de ruptura, passagem/arraste e deposição do material mobilizado (MARTINS et al., 2015) ou ainda, de não ser possível identificar com mais precisão suas dimensões devido às dinâmicas de ocupação das áreas (ZAIDAN e FERNANDES, 2009). Um outro ponto a se levar em conta refere-se as implicações da resolução espacial do Modelo Digital de Elevação (MDE) na análise de suscetibilidade das vertentes (TIAN, et al., 2008; BROCK et al., 2020), uma vez que esse dado permite derivar uma série de parâmetros geomorfológicos fundamentais neste tipo de avaliação. Diante disso questionamos se o tamanho da cicatriz (área), ao ser maior ou menor que a abrangência da célula do raster promove, ou não, diferentes resultados? O objetivo deste trabalho é o de realizar uma análise preliminar sobre a relação entre o tamanho da feição (cicatriz) e suas implicações nos resultados da modelagem de instabilidade de vertente, com o mesmo MDE e um modelo de base-física na simulação de cenários de instabilidade.

## **MATERIAL E MÉTODOS**

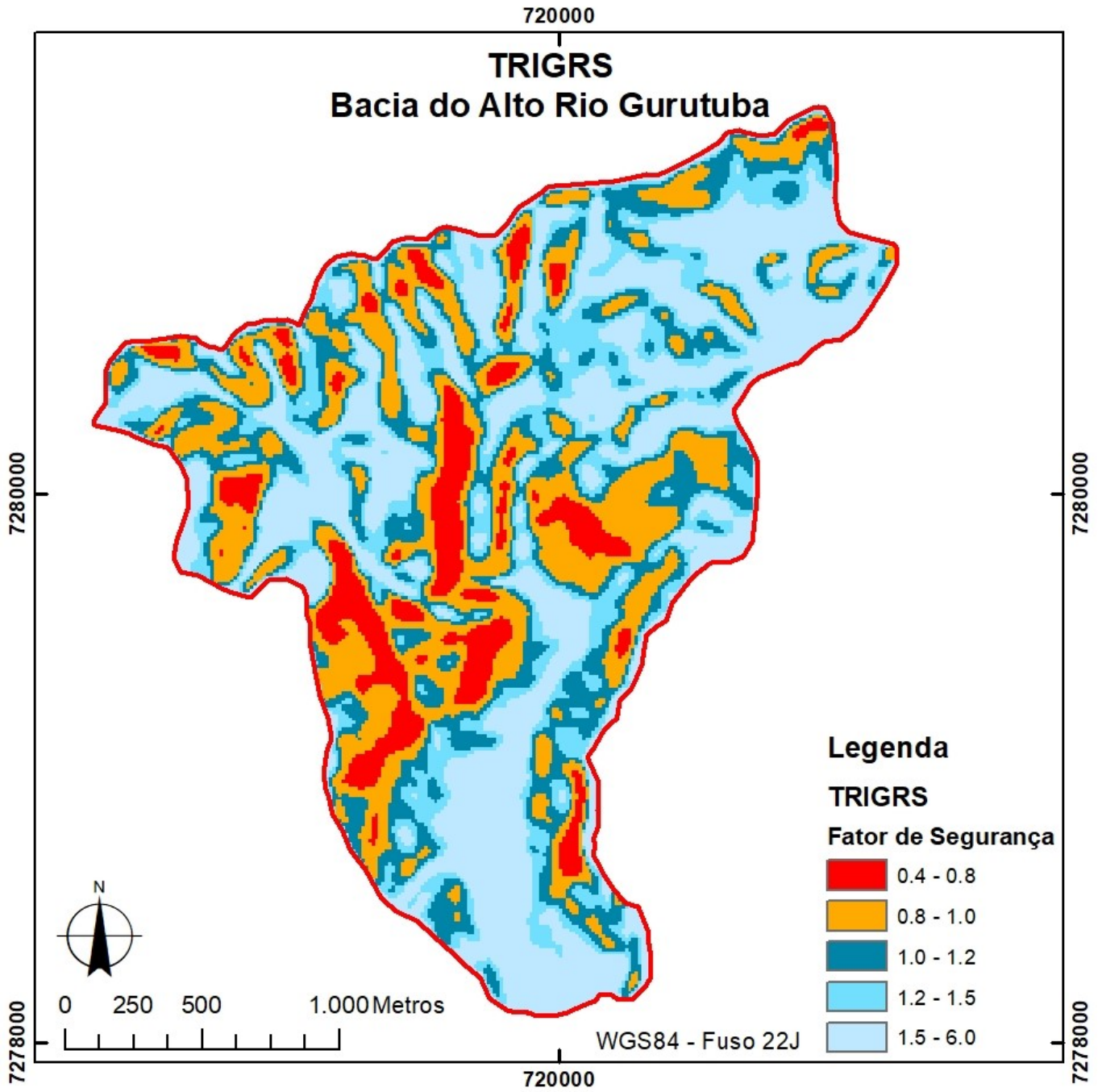
A área de estudo selecionada é a Bacia Hidrográfica do Alto Rio Gurutuba (Figura 1), com 4,56 km<sup>2</sup>, localizada no município de Itaoca (SP). Esta bacia, além de outras drenagens adjacentes, foi severamente atingida por diversos movimentos de massa em janeiro de 2014, particularmente escorregamentos rasos nas cabeceiras e fluxos de detritos e de lama (BROLLO et al., 2015). O material mobilizado (Figura 2) alcançou diversas ocupações causando a morte de 25 pessoas e danos a 412 edificações na área urbana do município (MATOS et al., 2018). O Modelo Digital de Elevação (MDE) TanDEM-DTM, com 12 metros de resolução espacial (Krieger et al., 2013), foi utilizado para a operação do TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope Stability), modelo proposto por Baum et al. (2002). O TRIGRS calcula o Fator de Segurança em distintas profundidades, considerando a variação na carga de pressão para um evento pluviométrico (BAUM et al., 2002 e BAUM et al., 2005), tendo uma bacia hidrográfica como recorte espacial. Do MDE são derivados um raster de declividade das vertentes e de direção de fluxo, ambos computados no modelo, juntamente com parâmetros físicos e hidrológicos do solo. Os parâmetros adotados nesta simulação se baseiam em Bonini et al. (2020) que analisaram a resposta entre dois modelos, um determinístico e outro estatístico para a bacia do Alto Gurutuba, a saber: densidade: 1,5g/cm<sup>3</sup>; Ângulo de atrito: 27°; Coesão: zero. O valor da condutividade hidráulica (10-6m/s) e de profundidade (z: 0,7m) se basearam em Durço (2020) que avaliou a condutividade hidráulica em um perfil de solo na mesma bacia e este mesmo valor foi considerado para a altura inicial do lençol freático (0,7m). Para a análise proposta foi adotado o inventário de cicatrizes elaborado por Carou et al. (2017), no qual foram mapeadas 336 cicatrizes com dimensões entre 50 e 300m<sup>2</sup>. Com base nestas feições foram testados dois cenários, sendo um com todas as 336 cicatrizes e outro, excluindo as cicatrizes que possuam dimensão menor do que a área de abrangência de uma célula do raster do MDE (<144 m<sup>2</sup>), totalizando 204 cicatrizes (Figura 3). Estes dois cenários foram avaliados a partir da Concentração de Cicatrizes (CC), Potencial de Escorregamentos (PE) e a curva ROC (Receiver Operating Characteristics). O primeiro (CC) possibilita identificar a distribuição das classes de instabilidade geradas pelo modelo (Fator de Segurança) tendo como limite o perímetro das cicatrizes; o Potencial de Escorregamentos (PE) pondera entre a ocorrência geral das classes de instabilidade para toda a bacia e a ocorrência de cada classe no interior das cicatrizes. Estes dois métodos foram propostos por Gao (1993). Já a curva ROC permite a validação independente de classificação, sendo o resultado uma relação entre a Sensitividade (proporção de cicatrizes corretamente classificadas pelo modelo em áreas instáveis) e a Especificidade (proporção de áreas estáveis corretamente classificadas) (FAWCETT, 2006). Neste trabalho, foi utilizada a Área Abaixo da Curva ROC (AUC) como indicativa da correlação entre os inventários de cicatrizes e as previsões do modelo. A AUC varia entre 0.0 e 1.0, sendo que quanto mais próximo de 1.0 for o valor indicado, maior é a qualidade geral do modelo.

## **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Considerando os parâmetros adotados o TRIGRS classificou aproximadamente 30% da Bacia do Alto Gurutuba com Fator de Segurança (FS) <1 e, contrariamente, quase 70% >1 (Figura 4). Esses

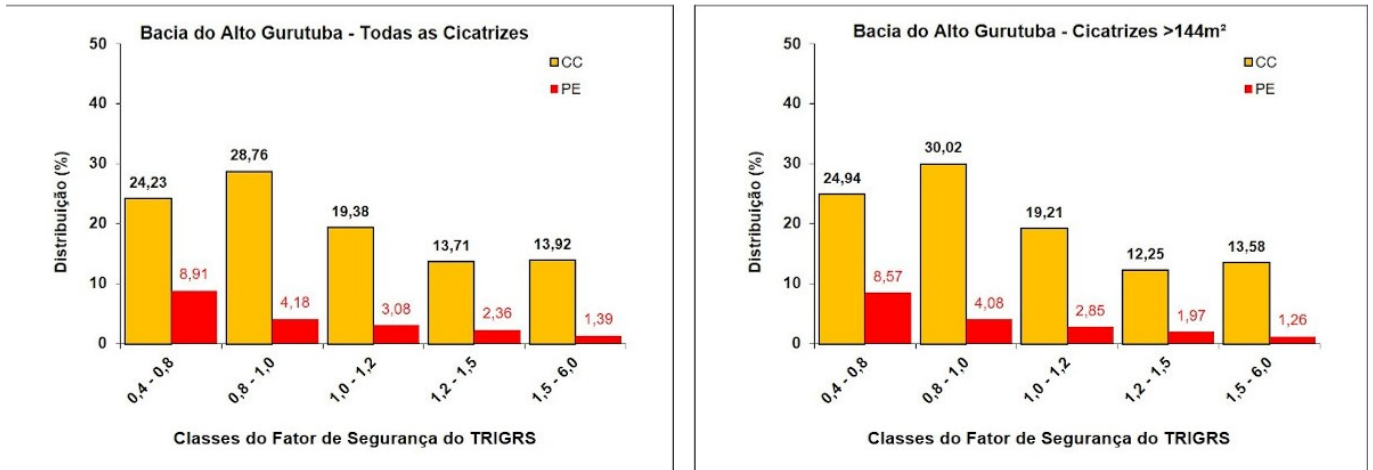
valores diferem de Bonini et al. (2020) que identificaram 54% da área da mesma bacia como instáveis a partir de um modelo determinístico. Essa comparação deve ser observada com cautela, uma vez que o modelo empregado pelo referido autor não demonstra um limite crítico para a instabilidade ( $FS < 1$ ), e sim uma variação de instabilidade, sendo que essa discussão pode ser verificada em Vieira et al. (2018). A variação do CC e do PE nos dois cenários mostraram percentuais similares em todas as classes do TRIGRS (Figura 5). A maior variação de CC aconteceu na classe de FS 0,8-1,0, que para a análise considerando todas as cicatrizes marcou mais que ~28%, enquanto o cenário com cicatrizes  $>144m^2$  foi de 30%. Contrariamente, para todas as classes com  $FS > 1$ , houve um decréscimo de ~2%, ou seja, uma diminuição de CC em classes de maior estabilidade. O PE não mostrou diferença significativa em nenhuma das classes de instabilidade, registrando valores de diferença inferiores a 0,5%. Em outras palavras as duas simulações indicaram respostas parecidas, com valores próximos de Concentração de Cicatrizes nas classes instáveis ( $FS < 1$ ), sendo 53,08% considerando todas as cicatrizes e 54,96% na simulação com cicatrizes  $>144m^2$ , o que permite considerar uma leve melhora na segunda simulação. O resultado da ROC (AUC) foi similar para os dois inventários, com valores de 0,681, considerando todas as cicatrizes e 0,691 para as cicatrizes maiores que  $144m^2$ , corroborando a melhora (Figura 6) verificada na Concentração de Cicatrizes. Diante dos valores obtidos pode-se verificar uma sutil variação entre as simulações, havendo um reduzido registro de melhora na adoção de cicatrizes maiores do que  $144m^2$ , a partir da aplicação da Concentração de Cicatrizes, do Potencial de Escorregamento e as Curvas ROC. Uma limitação verificável da abordagem em tela, está na não discriminação preliminar das cicatrizes, por exemplo, a partir de parâmetros morfométricos, no sentido de excluir as áreas que foram mapeadas como cicatrizes em zonas planas do relevo, já que o TRIGRS indica áreas de potencial ruptura e não de deposição. Nesse sentido, inventários obtidos a partir de métodos mais robustos (BONINI et al., 2022; CAPELLA et al., 2022), que pormenorizam a definição das áreas das cicatrizes a partir de vários parâmetros, podem contribuir em análises futuras da questão tratada aqui, o que deve ser aliado a testes com diferentes resoluções de MDEs.

*Figura 4*



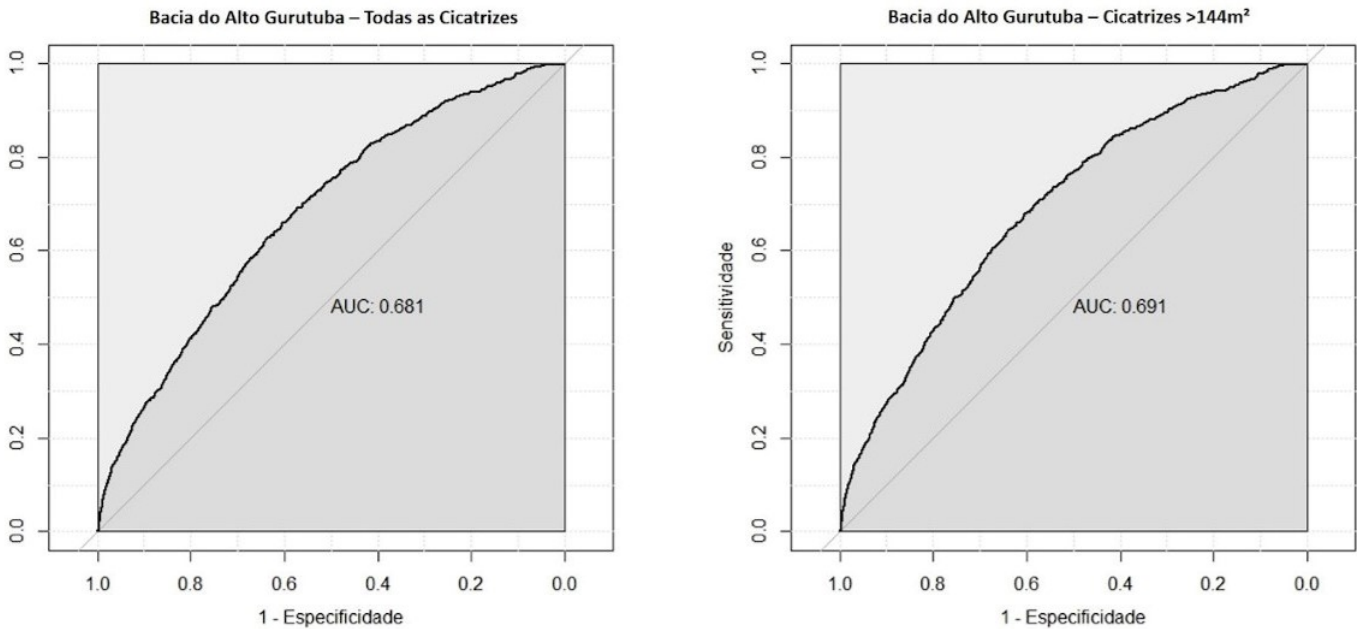
Varição do Fator de Segurança para a Bacia do Alto Gurutuba gerado pelo modelo TRIGRS.

Figura 5



Percentual de CC e PE do Fator de Segurança para a Bacia do Alto Gurutuba.

Figura 6



Curva ROC computada a partir do inventário completo de cicatrizes e para o inventário de cicatrizes maiores que 144m².

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os dados de elevação e o inventário/mapa de cicatrizes são fundamentais para a análise de instabilidade de vertentes com modelos, permitindo ou possibilitando ao pesquisador selecionar qual dado é mais adequado a ser empregado, a partir de suas características (ex.: tamanho das cicatrizes e resolução do MDE). Há na literatura um entendimento de que o mapeamento de cicatrizes carrega um certo nível de subjetividade que pode refletir na identificação da cicatriz, na definição da dimensão a ser mapeada, a partir da área de ruptura e, incluir ou não, a áreas de passagem e deposição. Isso pode implicar em uma variação nos resultados de simulação de cenários de instabilidade validados pela dimensão da cicatriz. Outra questão é a dimensão da cicatriz, frente a resolução do MDE do qual se deriva a modelagem, pois ao ser maior ou menor em área, haverá possíveis implicações nos resultados de validação, uma vez que uma cicatriz muito pequena em área pode coincidir, em sua totalidade, com uma única célula do raster. Sobre isso, a presente investigação identificou uma variação pequena ao empregar o modelo de instabilidade considerando



cicatrizes menores do que a abrangência de informação dada pelo raster de elevação. Análises futuras precisam ser realizadas para verificar esta premissa em outras áreas, considerando diferentes escalas, métodos de mapeamento das cicatrizes e resoluções de MDEs.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem à organização do evento e aos revisores científicos da sessão.

## **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICA**

ARDIZZONE, F.; CARDINALLI, M.; CARRARA, A.; GUZZETTI, F.; REICHENBACH, P. Impact of mapping errors on the reliability of landslide hazard maps. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2: 3-14. 2002. DOI.: <https://doi.org/10.5194/nhess-2-3-2002>.

BAUM, R. L.; SAVAGE, W. Z.; GODT, J. W. TRIGRS: A FORTRAN Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, USGS, Colorado, pp. 35. 2002.

BAUM, R. L.; COE, J. A.; GODT, J. W.; HARP, E. L.; REID, M. E.; SAVAGE, W. Z.; SHULZ, W. H.; BRIEN, D. L.; CHLEBORAD, A. F.; MACKENNA, J. P.; MICHEL, J. A. Regional Landslide-hazard assessment for Seattle, Washington, USA. *Landslides* 2: 266-279. 2005. DOI.: <https://doi.org/10.1007/s10346-005-0023-y>

BONINI, J. E.; BATEIRA, C. V. M.; DIAS, V. C.; MARTINS, T.D.; VIEIRA, B. C. Suscetibilidade a escorregamentos rasos a partir de parâmetros morfométricos e dos modelos SHALSTAB e do Valor Informativo. *CONFINS (PARIS)*, n46, 2020. DOI.: <https://doi.org/10.4000/confins.30323>

BONINI, J.E.; VIEIRA, B.C.; MARTINS, T.D. Semiautomatic inventory and geomorphological characterization of mass movements using high-resolution images and open-source software in the Ribeira de Iguape Valley, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*. Vol 119. 2022. DOI.: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104029>

BROCK J.; SCHRATZ, P.; PETSCHKO, H.; MUENCHOW, J.; MICU, M.; BRENNING, A. The performance of landslide susceptibility models critically depends on the quality of digital elevation models. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11:1, 1075-1092. 2020. DOI.: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2022.104029>

BROLLO, M. J.; SANTORO, J.; PENTEADO, D. R.; FERNANDES DA SILVA, P. C.; RIBEIRO, R. R. Itaóca (SP): Histórico de acidentes e desastres relacionados a perigos geológicos. 14° Simpósio de Geologia do Sudeste. Campos do Jordão - SP: 1-5. Anais...2015.

CAROU, C. B.; VIEIRA, B. C.; Martins, T. D.; GRAMANI, M. F. Inventário dos Escorregamentos da Bacia do Rio Gurutuba, Vale do Ribeira (SP). *Revista do Departamento de Geografia*, v. 1, p. 172-179, 2017. DOI.: <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.133377>

CAPELLA, C. BONINI, J.E.; VIEIRA, B.C. Mapeamento das Zonas de Transporte e de Deposição de Escorregamentos Rasos por Meio de Ferramentas Semiquantitativas. *Espaço Aberto (PPGG-UFRJ)*, V 12. N2. 2022. DOI.: <https://doi.org/10.36403/espacoaberto.2022.53623>

DURÇO, R. Caracterização das Propriedades Físicas do Solo e a Instabilidade das Encostas da Serra do Mar (Itaóca-SP). *Dissertação (Mestrado em Geografia Física)*. Universidade de São Paulo. São Paulo. 85p. 2020.

FAWCETT, T. An introduction to ROC analysis. *Pattern Recognition Letters*, v. 27, p.861-874, 2006. DOI.: <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2005.10.010>

GAO, J. Identification of topographic settings conducive to landsliding from dem in Nelson County, Virginia, U.S.A. *Earth Surface Process and Landforms*. v.18, p.579-591, 1993. DOI.:

<https://doi.org/10.1002/esp.3290180702>

GUZZETTI, F.; MONDINI, A.C.; CARDINALI, M.; FIORUCCI, F.; SANTANGELO, M.; CHANG, K.T.; Landslide inventory maps: new tools for an old problem. *Earth-Science Reviews*, 112: 42-66. 2012. DOI.: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.02.001>

KRIEGER, G., ZINK, M., BACHMANN, M., BRUTIGAM, B., SCHULZE, D., MARTONE, M., RIZZOLI, P., STEINBRECHER, U., ANTONY, J. W., ZAN, F. D., HAJNSEK, I., PAPATHANASSIOU, K., KUGLER, F., CASSOLA, M. R., YOUNIS, M., BAUMGARTNER, S., LPEZ-DEKKER, P., PRATS, P., MOREIRA, A. TanDEM-X: A radar interferometer with two formation-flying satellites. *Acta Astronautica* 89. p. 83 – 98. 2013. DOI.: <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.03.008>

MATOS, L., FERREIRA, C., BATEIRA, C., VIEIRA, B. Avaliação das Construções Danificadas por Corridas de Detritos e Inundações Bruscas no Vale do Ribeira (SP) em 2014. *Revista do Departamento de Geografia*, p. 57-67. 2018. DOI.: <https://doi.org/10.11606/rdg.v0ispe.144423>

MARTINS, T.D.; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B.C. Mapeamento de cicatrizes de escorregamentos utilizando imagem multiespectral. *Revista do Departamento de Geografia*, v.30. pp. 96-109. 2015. DOI.: <https://doi.org/10.11606/rdg.v30i0.98779>

TIAN, Y.; XIAO, C.; LIU, Y.; WU, L. LUN. Effects of raster resolution on landslide susceptibility mapping: A case study of Shenzhen. *Sci China Ser E-Tech Sci*. Vol. 51. Supp. II. P. 188-198. 2008. DOI: [10.1007/s11431-008-6009-y](https://doi.org/10.1007/s11431-008-6009-y)

VIEIRA, B.C.; FERNANDES, N.F.; AUGUSTO-FILHO, O.; MARTINS, T.D. MONTGOMERY, D.R. Assessing Shallow Landslide Hazards Using The TRIGRS And SHALSTAB Models, Serra Do Mar, Brazil. *Environmental Earth Sciences*, v. 77. P. 260. 2018. DOI.: <https://doi.org/10.1007/s12665-018-7436-0>

ZAIDAN, R.T.; FERNANDES, N.F. Zoneamento de Suscetibilidade a Escorregamentos em Encostas Aplicado à Bacia de Drenagem Urbana do Córrego do Independência – Juiz de Fora (MG). *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v.10, nº 2, p. 57-76, 2009. DOI.: <https://doi.org/10.20502/rbg.v10i2.131>