



AValiação da Suscetibilidade a Escorregamentos RASOS NA Bacia da Barra do Sahí por meio do Modelo TRIGRS

Camilla Pereira Capella ¹
Tiago Damas Martins ²

RESUMO

A avaliação da suscetibilidade a ocorrência de processos de movimentos de massa (escorregamentos rasos) tem sido amplamente discutida na literatura, por meio da aplicação de modelos matemáticos em base física. Nesse contexto, o objetivo principal desta pesquisa é avaliar a suscetibilidade da bacia da Barra do Sahí, no município de São Sebastião (SP), por meio do modelo TRIGRS. A faixa do litoral norte paulista, onde se encontra a bacia foco desse estudo, foi fortemente afetada por escorregamentos generalizados em 2023, com severas repercussões sociais e econômicas. Os procedimentos metodológicos adotados são: (a) extração dos dados morfométricos, a partir de um MDE, obtenção de dados pluviométricos e pedológicos; (b) simulação da suscetibilidade utilizando o modelo TRIGRS; (c) avaliação da suscetibilidade a escorregamentos na bacia da Barra do Sahí a partir de um inventário de cicatrizes. Como resultado, espera-se obter os cenários de instabilidade das vertentes dessa bacia, assim como avaliar a adequação dos parâmetros empregados no modelo para esta área, além de estabelecer uma base para futuras análises de vulnerabilidade, perigo e risco.

Palavras-chave: Movimentos de Massa, Suscetibilidade, Modelos Matemáticos, TRIGRS, Litoral Norte Paulista.

INTRODUÇÃO

Os movimentos de massa são fenômenos naturais que ocorrem de forma frequente no Brasil, sobretudo na Serra do Mar por conta de suas características geológico-geomorfológicas associadas aos aspectos climáticos e hidrológicos. Esses fenômenos ocorrem de forma isolada ou em eventos generalizados, podendo atingir grandes magnitudes. Dentre os tipos mais recorrentes de movimentos de massa que ocorrem nessa região, destacam-se os escorregamentos rasos e os fluxos de detritos (BONINI et al., 2020; CEPED, 2013; CRUZ, 1975; FERNANDES; AMARAL, 1996).

Os escorregamentos rasos são movimentos rápidos, direcionados encosta abaixo, com um plano de ruptura bem definido. Eles ocorrem em solos pouco espessos, com

¹ Mestranda do programa de Pós graduação em Geografia Física da Universidade de São Paulo - USP, camillacapella@usp.br ;

² Professor Adjunto III da Geografia na Universidade Federal de São Paulo – UNIFESP e do programa de Pós graduação em Geografia Física da Universidade de São Paulo - USP, td.martins@unifesp.br.

rupturas planares ao longo de discontinuidades geológicas, geomorfológicas ou pedológicas, formando cicatrizes alongadas e mobilizando materiais inconsolidados, rochas ou ambos (DAVID M. CRUDEN, 1991; GUIDICINI; NIEBLE, 1976)

Nos dias 18 e 19 de fevereiro, foi registrada uma precipitação pluvial de cerca de 680 mm no município de São Sebastião (**Figura 1**). Isso deflagrou centenas de escorregamentos rasos, além de corridas de detritos e inundações, que afetaram o abastecimento de água e energia no município, levaram ao bloqueio de estradas e resultaram na morte de 65 pessoas, além de 40 desaparecidos e 1.730 desabrigados (BONINI et al., 2025; COELHO et al., 2024; MARENCO et al., 2024)

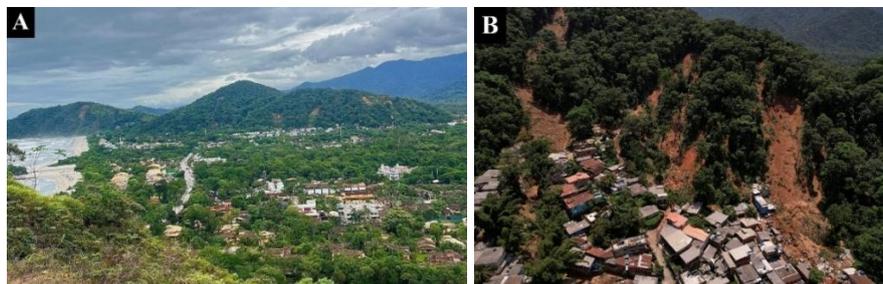


Figura 1: A) Cicatrizes de escorregamento raso em São Sebastião. Fonte: Autoria. B) Escorregamentos rasos na Vila do Sahí (em São Sebastião) em fevereiro de 2023, logo após as chuvas intensas. Fonte: Perobelli (2023).

Uma das áreas mais afetadas nesse foi a Bacia da Barra do Sahí (**Figura 2**), que além de ter concentrado algumas dezenas de cicatrizes de escorregamentos, também foi amplamente afetada por esse evento. Por esse motivo, essa área foi objeto de estudo desta pesquisa.

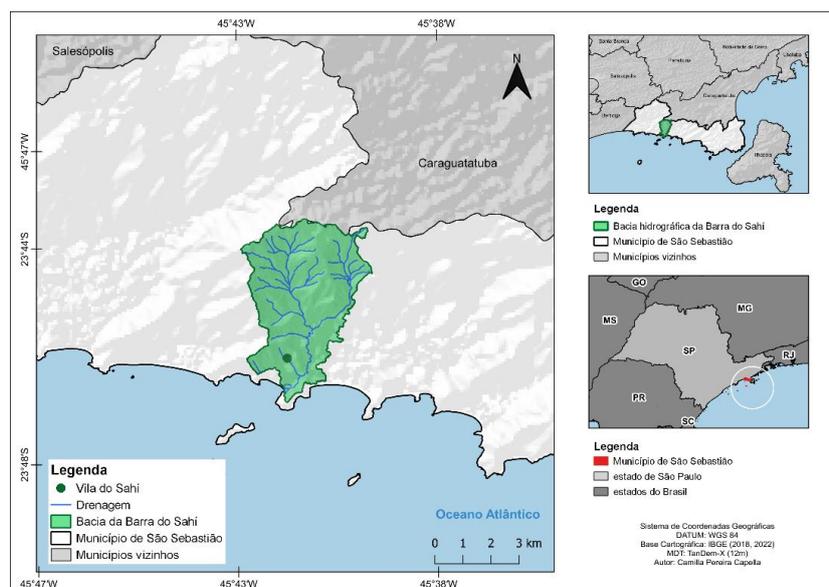


Figura 2: Bacia da Barra do Sahí no município de São Sebastião. Fonte: Autoria.



Os escorregamentos vêm sendo amplamente estudados na Serra do Mar por conta dos impactos sociais e econômicos que podem causar, sobretudo quando afetam centros urbanos, onde os danos materiais e sociais são mais expressivos (ALEOTTI; CHOWDHURY, 1999; FERNANDES et al., 2001).

Por conta dos prejuízos associados a esses fenômenos, diversos trabalhos foram elaborados, sobretudo, buscando compreender a suscetibilidade natural, a vulnerabilidade, o perigo e os cenários de risco que os escorregamentos oferecem a determinada área. Assim, muitos avanços foram feitos, porém algumas lacunas ainda existem, como por exemplo na utilização de métodos que avaliam a suscetibilidade atrelados ao montante pluviométrico crítico capaz de deflagrar os processos. Por esse motivo, o objetivo deste trabalho foi avaliar a suscetibilidade da bacia da Barra do Sahí, no município de São Sebastião (SP), utilizando um modelo de base física e considerando o registro um pluviométrico associado ao evento.

REFERENCIAL TEÓRICO

O conceito de suscetibilidade, refere-se à propensão de uma área em gerar escorregamentos. Além disso, também pode aferir outros significados, como nos termos matemáticos nos quais a suscetibilidade é a probabilidade de ocorrência espacial de rupturas conhecidas, sob determinadas condições geoambientais (GUZZETTI et al., 2006). Uma forma comum de se estudar a suscetibilidade é por meio de sua avaliação, que parte do pressuposto que os escorregamentos no futuro ocorrerão nos mesmos lugares onde ocorreram no passado, uma vez que os agentes condicionantes que condicionaram os escorregamentos do passado, serão os mesmos que causarão os escorregamentos do futuro (GUZZETTI et al., 2006).

MATERIAIS E MÉTODOS

A análise foi realizada a partir de uma sequência metodológica que consistiu no pré-processamento do Modelo Digital de Elevação (MDE), na definição dos parâmetros do solo e pluviométricos, para a operação do modelo em base física, capaz de indicar áreas mais suscetíveis a ocorrência de escorregamentos rasos e na validação do cenário te4stado, a partir da correlação com um inventário de cicatrizes.



Dentre os modelos matemáticos com base física, existe o TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability), modelo desenvolvido por Baum et. al (2002, 2008) que estima a estabilidade de encostas por meio de parâmetros que levam em consideração as diferentes profundidades do solo e o efeito da pressão de poros da água subterrânea durante um episódio de chuva. O modelo matemático do TRIGRS é baseado na equação do fator de segurança (FS) acoplada a um modelo hidrológico transitório, desenvolvido por Iverson (2000), que simula a infiltração de água no solo (em condições saturadas ou não saturadas), a difusão da pressão abaixo do lençol freático e o escoamento superficial.

$$FS'(Z, t) = -\frac{\gamma_w}{\gamma_s} \frac{\tan \phi}{\sin \alpha \cos \alpha} \frac{I_z}{K_z}$$

Onde “Z” é coordenada vertical ($Z = x \sin \alpha + z \cos \alpha$) usada para calcular a carga de elevação; “t” é o tempo de início da chuva (s); “ γ_w ” é a densidade da água [kN/m^3]; “ γ_s ” é a densidade do solo [kN/m^3]; “ ϕ ” é o ângulo de atrito interno ($^\circ$); “ I_z ” é a taxa de intensidade de infiltração [m/s] e “ K_z ” é a condutividade hidráulica saturada vertical do solo [m/s].

Partindo disso, metodologia foi dividida em três etapas. A primeira envolveu a extração de dados do modelo digital de elevação, além do levantamento de informações necessárias para alimentar alguns parâmetros do modelo de suscetibilidade. Na segunda etapa, a suscetibilidade foi gerada por meio do modelo TRIGRS (Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability). Por fim, na terceira fase, os resultados obtidos foram avaliados com base em um inventário pré-existente de cicatrizes.

A primeira etapa foi elaborada a partir do modelo digital de elevação TanDEM-X (KRIEGER et al., 2013) no qual foram extraídos dados de declividade, a direção de fluxo. Em seguida, foram extraídos dados pluviométricos referentes ao evento que ocorreu em 2023 a partir de Marengo et al. (2024), em que os autores destacaram que a chuva começou de forma moderada no dia 18, e foi intensificada a meia noite e seguiu forte até as 7h da manhã do dia 19, totalizando 15 horas de chuva. Para representar a precipitação ao longo do evento no modelo TRIGRS, o total acumulado foi dividido em 3 intervalos de 5 em 5 horas, onde atribuiu-se ao primeiro um total de chuva de 100mm, ao segundo 150mm e

ao terceiro, 289mm. Em seguida, esses volumes foram convertidos para intensidades de precipitação ao serem divididos pelo tempo correspondente em segundos.

Em seguida, foram obtidos dados pluviométricos referentes ao evento que ocorreu em 2023 a partir de Marengo et al. (2024). em que os autores destacaram que a chuva começou de forma moderada no dia 18, e foi intensificada a meia noite e seguiu forte até as 7h da manhã do dia 19, totalizando 15 horas de chuva. Para representar a precipitação ao longo do evento no modelo TRIGRS, o total acumulado foi dividido em 3 intervalos de 5 em 5 horas, onde atribuiu-se ao primeiro um total de chuva de 100mm, ao segundo 150mm e ao terceiro, 289mm. Em seguida, esses volumes foram convertidos para intensidades de precipitação ao serem divididos pelo tempo correspondente em segundos. Na sequência foram extraídos dados de condutividade hidráulica, coesão, densidade e espessura máxima do solo do trabalho de Listo, Gomes e Vieira (2018). (**Figura 3**)

Parâmetro	Símbolo TRIGRS	Valor usado	Fonte dos valores
Coesão do solo	cc	0	Gomes, 2015
Densidade do solo	cuws	14715	Gomes, 2016
Espessura máx. do solo	czmax	2	Gomes, 2016
Ângulo de atrito interno	cphi	34	Padrão do TRIGRS
Taxa de infiltração inicial	crizero	1.0e-9	Com base em Marengo et al. 2024
Difusividade hidráulica	cdif	5.0e-4	Padrão do TRIGRS
Condutividade hidr. saturada	cks	1.0e-3	Gomes, 2016
Altura inicial do lençol freático	cri(1)	5.5e-6	Com base em Marengo et al. 2024
Peso específico da água	uww	9800	Padrão do TRIGRS

Figura 3: Parâmetros do TRIGRS com os valores utilizados e suas respectivas fontes. Adaptado de: Listo, Gomes e Vieira (2018).

Com os parâmetros definidos o TRIGRS foi executado e o resultado do cenário de instabilidade foi verificado frente ao inventário de cicatrizes elaborado por de Bonini et al (2025) no qual os autores operaram métodos de classificação semiautomáticos, como a OBIA e Random Forest, sobre imagens multiespectrais do Planet Scope, obtidas antes e após o evento, além de correções manuais. Isso permitiu obter valores de concentração de cicatrizes, tanto para a declividade, isoladamente, como dos valores obtidos do TRIGRS, revelando as classes de ocorrência dessas informações no interior das cicatrizes.

RESULTADOS E DISCUSSÃO



A análise integrada dos mapas de declividade e suscetibilidade indicou que as áreas com maior instabilidade ($FS < 1$) coincidem com setores de maior declive, especialmente no noroeste e nordeste da bacia, enquanto as áreas planas apresentaram os maiores valores de FS, refletindo menor suscetibilidade. Apesar disso, as cicatrizes reais se concentraram majoritariamente na porção inferior e esquerda da bacia, sugerindo influência de outros fatores locais além da declividade, como a presença de material coluvionar ou acúmulo de umidade.

A distribuição das cicatrizes reais segundo a declividade revela que a maior parte ocorre entre 20° e 35° , com poucos outliers acima de 50° , comportamento semelhante ao observado por Capella (2022) em Itaóca (SP), e por Martins (2017) em Antonina (PR), que também identificaram concentrações de cicatrizes em encostas de declive moderado. No que se refere ao mapa de suscetibilidade (Figura 5), os valores do fator de segurança foram classificados em cinco classes, conforme o intervalo: $FS < 0,5$ (muito instável), $0,5 \leq FS < 1,0$ (instável), $1,0 \leq FS < 1,3$ (estabilidade marginal), $1,3 \leq FS < 2,0$ (estável) e $FS \geq 2,0$ (muito estável). A simulação indicou que 73 % da área modelada apresenta $FS < 1,0$, evidenciando alta suscetibilidade sob o cenário de chuva extrema (639 mm em 15 h).

Esse valor é semelhante ao obtido por Listo et al. (2018), que simularam o evento de 1967 em Caraguatatuba (600 mm em 2 dias) e encontraram 71 % de área instável, embora com menor intensidade de precipitação. A Concentração de Cicatrizes (CC) do presente estudo foi de ~54,9 %, inferior à de ~67 % obtida por Listo, o que pode estar relacionado à maior intensidade do evento, limitações na representação dos processos de deposição e à resolução espacial do modelo. A presença de outliers de FS muito baixos pode indicar áreas de deposição de material transportado, e não necessariamente locais de início da instabilidade.

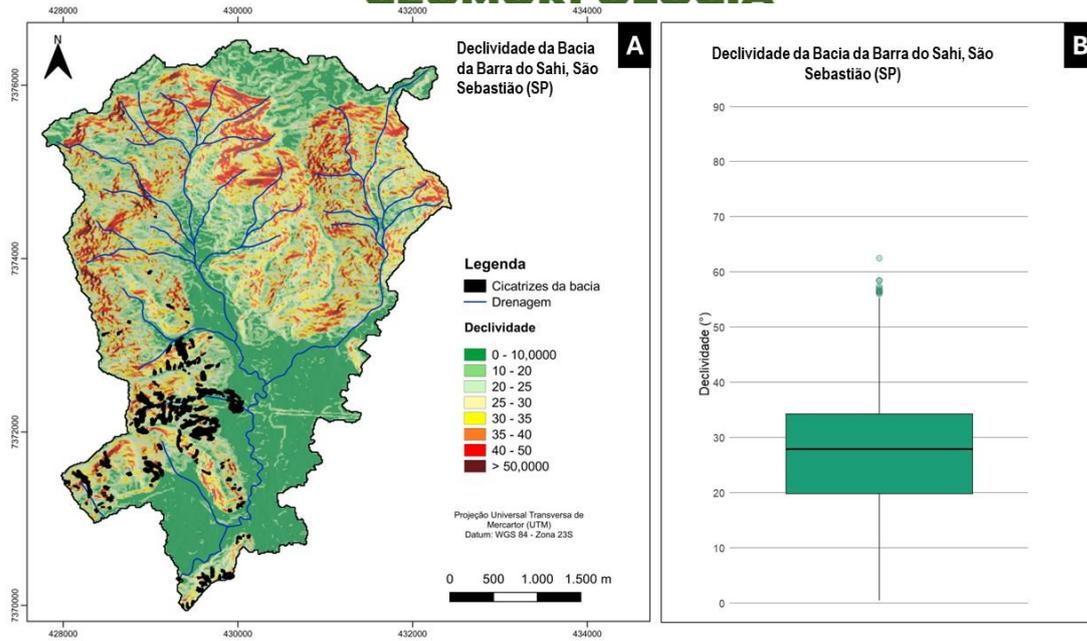


Figura 4: Análise da declividade por meio do mapa (figura A) e do gráfico em boxplot (figura 2). Fonte: Autoral.

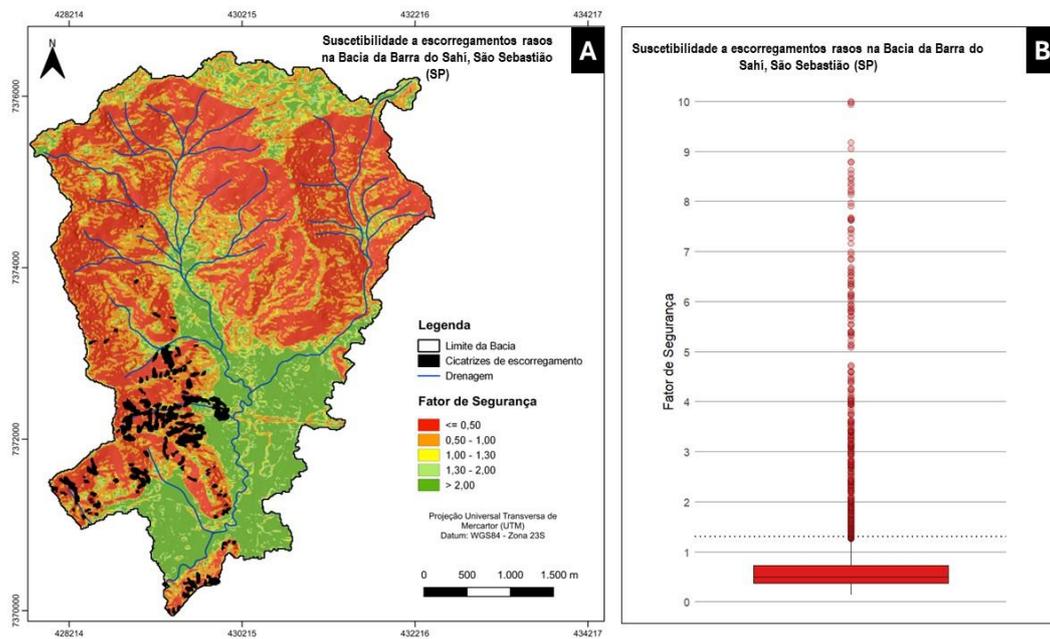


Figura 5: Análise da suscetibilidade por meio do Fator de segurança, através do mapa (A) e do gráfico em boxplot (B).

CONSIDERAÇÕES FINAIS



Diante dos eventos de escorregamentos que ocorrem de forma frequente na Serra do Mar, sobretudo após o evento ocorrido em fevereiro de 2023 no município de São Sebastião, testar a implicação de parâmetros físicos do terreno, combinados a variação pluviométrica, na avaliação da instabilidade das vertentes poderá contribuir no desenvolvimento de ações preventivas, frente às mudanças climáticas.

O modelo TRIGRS, se mostrou satisfatório para avaliações nesse sentido, visto que seu desempenho poderá contribuir no mapeamento preditivo de áreas não afetadas, mas com características fisiográficas similares, uma vez que possui diversas variáveis, podendo assim, ser útil para estudos de suscetibilidade em um contexto de mudanças climáticas, que torna chuvas extremas mais comuns. Isso pode ser efetivo, para que a suscetibilidade seja constantemente avaliada levando em consideração o regime de chuvas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à CAPES pela concessão de bolsa (Processo 88887.002691/2024-00) e à DLR (German Aerospace Center) pelo fornecimento dos dados TanDEM-X (Processo DEM_GEOL4384) e ao CNPq (Processo 409314/2023-4).

REFERÊNCIAS

ALEOTTI, P.; CHOWDHURY, R. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, [S. l.], v. 58, n. 1, p. 21–44, 1999. DOI: 10.1007/s100640050066.

BAUM, Rex L.; SAVAGE, William Z.; GODT, Jonathan W. TRIGRS; a Fortran program for transient rainfall infiltration and grid-based regional slope-stability analysis. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.3133/ofr02424.

BAUM, Rex L.; SAVAGE, William Z.; GODT, Jonathan W. TRIGRS - A Fortran Program for Transient Rainfall Infiltration and Grid-Based Regional Slope-Stability Analysis, Version 2.0. [s.l.: s.n.]. DOI: 10.3133/ofr20081159.

BONINI, José Eduardo; BATEIRA, Carlos Valdir de Meneses; DIAS, Vivian Cristina; MARTINS, Tiago Damas; VIEIRA, Bianca Carvalho. Suscetibilidade a escorregamentos rasos a partir de parâmetros morfométricos e dos modelos SHALSTAB e do Valor Informativo. *Confins*, [S. l.], n. 46, 2020. DOI: 10.4000/confins.30323. Disponível em: <http://journals.openedition.org/confins/30323>.



BONINI, José Eduardo; MARTINS, Tiago Damas; SUGIYAMA, Marina Tamaki de Oliveira; VIEIRA, Bianca Carvalho. Landslide inventory of the 2023 Serra do Mar disaster (Brazil). *Discover Geoscience*, [S. l.], v. 3, n. 1, p. 40, 2025. DOI: 10.1007/s44288-025-00153-2.

CAPELLA, Camilla Pereira; BONINI, José Eduardo; VIEIRA, Bianca Carvalho. Mapeamento das Zonas de Transporte e de Deposição de Escorregamentos Rasos por Meio de Ferramentas Semiquantitativas. *Espaço Aberto*, [S. l.], v. 12, n. 2, p. 247–264, 2022. DOI: 10.36403/espacoaberto.2022.53623.

CEPED. Atlas brasileiro de desastres naturais 1991 a 2012. Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, [S. l.], 2013.

COELHO, Rebeca Durço; VIANA, Camila Duelis; DIAS, Vivian Cristina; GROHMANN, Carlos Henrique. Landslides of the 2023 summer event of São Sebastião, southeastern Brazil: spatial dataset. *Brazilian Journal of Geology*, [S. l.], v. 54, n. 2, 2024. DOI: 10.1590/2317-4889202420240006.

CRUZ, Olga. A serra do mar e o litoral na área de Caraguatatuba - SP: contribuição à geomorfologia litorânea tropical - 2. *Revista Brasileira de Geografia PP - Rio de Janeiro*, [S. l.], v. 37, n. 3, p. 73–138, 1975.

DAVID M. CRUDEN. A Simple Definition of a Landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, [S. l.], v. 43, n. 1, p. 27–29, 1991.

FERNANDES, Nelson Ferreira; AMARAL, Cláudio. Movimentos de Massa: uma abordagem geológica-geomorfológica. *Em: Geomorfologia e Meio Ambiente*. 12. ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1996. p. 123–194.

FERNANDES, Nelson Ferreira; GUIMARÃES, Renato Fontes; GOMES, Roberto Arnaldo Trancoso; VIEIRA, Bianca Carvalho; MONTGOMERY, David R.; GREENBERG, Harvey. Condicionantes Geomorfológicas dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [S. l.], v. 2, n. 1, 2001. DOI: 10.20502/rbg.v2i1.8.

GUIDICINI, Guido; NIEBLE, Carlos M. Estabilidade de taludes naturais e de escavação. [s.l.] : Editora Blucher, 1976.



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE
GEOMORFOLOGIA

GUZZETTI, Fausto; REICHENBACH, Paola; ARDIZZONE, Francesca; CARDINALI, Mauro; GALLI, Mirco. Estimating the quality of landslide susceptibility models. *Geomorphology*, [S. l.], v. 81, n. 1–2, p. 166–184, 2006. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.04.007.

IVERSON, Richard M. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, [S. l.], v. 36, n. 7, p. 1897–1910, 2000. DOI: 10.1029/2000WR900090.

KRIEGER, Gerhard et al. TanDEM-X: A radar interferometer with two formation-flying satellites. *Acta Astronautica*, [S. l.], v. 89, p. 83–98, 2013. DOI: 10.1016/j.actaastro.2013.03.008.

LISTO, Fabrizio de Luiz Rosito; GOMES, Maria Carolina Villaça; VIEIRA, Bianca Carvalho. Avaliação da variação do fator de segurança com o modelo TRIGRS. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, [S. l.], v. 19, n. 1, 2018. DOI: 10.20502/rbg.v19i1.1256.

MARENGO, Jose A. et al. Heavy rains and hydrogeological disasters on February 18th–19th, 2023, in the city of São Sebastião, São Paulo, Brazil: from meteorological causes to early warnings. *Natural Hazards*, [S. l.], v. 120, n. 8, p. 7997–8024, 2024. DOI: 10.1007/s11069-024-06558-5.

MARTINS, Tiago D.; OKA-FIORI, Chisato; VIEIRA, Bianca Carvalho; BATEIRA, Carlos V. M.; MONTGOMERY, David R. Avaliação de MDT na Modelagem de Instabilidade de Vertentes. *Raega - O Espaço Geográfico em Análise*, [S. l.], v. 41, p. 07, 2017. DOI: 10.5380/raega.v41i0.47607.

