

SIMULAÇÃO DA TRAJETÓRIA DE MOVIMENTOS DE MASSA NO MUNICÍPIO DE SÃO SEBASTIÃO (SP)

Sofia Bonfago Cavichioli¹

José Eduardo Bonini²

Marina Tamaki de Oliveira Sugiyama³

Tiago Damas Martins⁴

Bianca Carvalho Vieira⁵

RESUMO

A Serra do Mar apresenta elevada suscetibilidade a escorregamentos rasos devido às suas características geológicas, geomorfológicas e climáticas. O município de São Sebastião, situado no litoral norte do estado de São Paulo, foi palco de eventos catastróficos em fevereiro de 2023, que resultaram em graves impactos socioambientais. Diante desse cenário, este estudo teve como objetivo simular a trajetória dos escorregamentos na Bacia do Rio Camburi. Com base no inventário das cicatrizes, os parâmetros do modelo GPP foram calibrados em duas etapas por meio de um experimento fatorial, avaliando o desempenho com a métrica AAC-ROC. Na primeira etapa, foram testadas 102 combinações no módulo de trajetória (Random Walks), com os melhores resultados obtidos para o limiar de inclinação (35°), expoente de divergência (1) e fator de persistência (1,5), resultando em AAC-ROC de 0.854. Na segunda etapa, foram avaliadas 42 combinações no módulo de runout (PCM), com valores ótimos de coeficiente de fricção (0.2) e razão massa-arrasto (180), obtendo AAC-ROC de 0,720. Por fim, o modelo calibrado foi aplicado à totalidade da área da Bacia do Rio Camburi, permitindo a análise espacial da propagação dos escorregamentos.

Palavras-chave: Serra do Mar; Escorregamentos; Gravitational Process Path (GPP); runout.

INTRODUÇÃO

A Serra do Mar, um extenso sistema orogênico marcado por escarpas situado ao longo da costa sudeste brasileira, apresenta elevada suscetibilidade à ocorrência de movimentos de massa, com destaque para os escorregamentos rasos, especialmente durante eventos pluviométricos intensos (Vieira; Gramani, 2015). Isso decorre de um conjunto de fatores geológicos, geomorfológicos e climáticos, que favorecem a deflagração desses processos (Fernandes; Amaral, 1996; Mendes; Marinho; Valério Filho, 2015). Um exemplo recente da magnitude desses eventos ocorreu em fevereiro de 2023, no município de São Sebastião (SP) (Figura 1), onde acumulados extremos de precipitação desencadearam escorregamentos com consequências catastróficas, resultando em dezenas de mortes, centenas de desabrigados e

¹ Graduando do Curso de Geografia da Universidade de São Paulo - USP, sofiabcavichioli@usp.br;

² Mestranda do Curso de Geografia da Universidade de São Paulo - USP, marinatamaki@usp.br;

³ Doutorando do Curso de Geografia da Universidade de São Paulo - USP, jose.bonini@usp.br;

⁴ Professor Adjunto da Universidade Federal de São Paulo - UNIFESP, td.martins@unifesp.br;

⁵ Professora Titular do Departamento de Geografia da Universidade de São Paulo – USP biancav@usp.br.

significativos danos à infraestrutura (CEMANDEN, 2023; Prefeitura de São Sebastião, 2023a).



Figura 1 – A) Cicatrizes dos escorregamentos em Juquehy, B) Impactos dos escorregamentos na Rodovia Rio-Santos C) Danos causados pelos escorregamentos em áreas vulneráveis **Fonte:** (A) Fernando Marron/AFP (B)Tiago Queiroz/Estadão Conteúdo (C)Defesa Civil/SP.

Diante da recorrência desses processos e da premente necessidade de aprimorar estratégias de gestão de risco, cresce o interesse pelo uso de modelos de base física capazes de simular o comportamento desses processos. No entanto, a maior parte das aplicações no litoral norte de São Paulo ainda se concentra na modelagem da suscetibilidade (Fernandes *et al.*, 2004; Vieira; Ramos, 2015; Martins *et al.*, 2016; Bonini *et al.*, 2020) ou seja, na identificação das áreas com maior potencial de ruptura. Por outro lado, são escassos os estudos voltados à quantificação do perigo, que envolvem a simulação da trajetória dos escorregamentos.

A análise de perigo busca estimar a probabilidade espacial e temporal da ocorrência, trajetória e magnitude dos movimentos de massa. No contexto brasileiro, a probabilidade temporal está geralmente associada a precipitações intensas e duradouras, com significativos valores acumulados (Guidicini; Iwasa, 1977; Wolle; Hachich, 1989). A trajetória pode ser estimada a partir de inventários de eventos anteriores, modelos geométricos, análises de campo e simulações baseadas em modelos estocásticos ou de base física (Corominas *et al.*, 2013; Martins *et al.*, 2022).

Entre os modelos disponíveis, destaca-se o Gravitational Process Path (GPP), que permite estimar a propagação de escorregamentos com base em parâmetros físicos

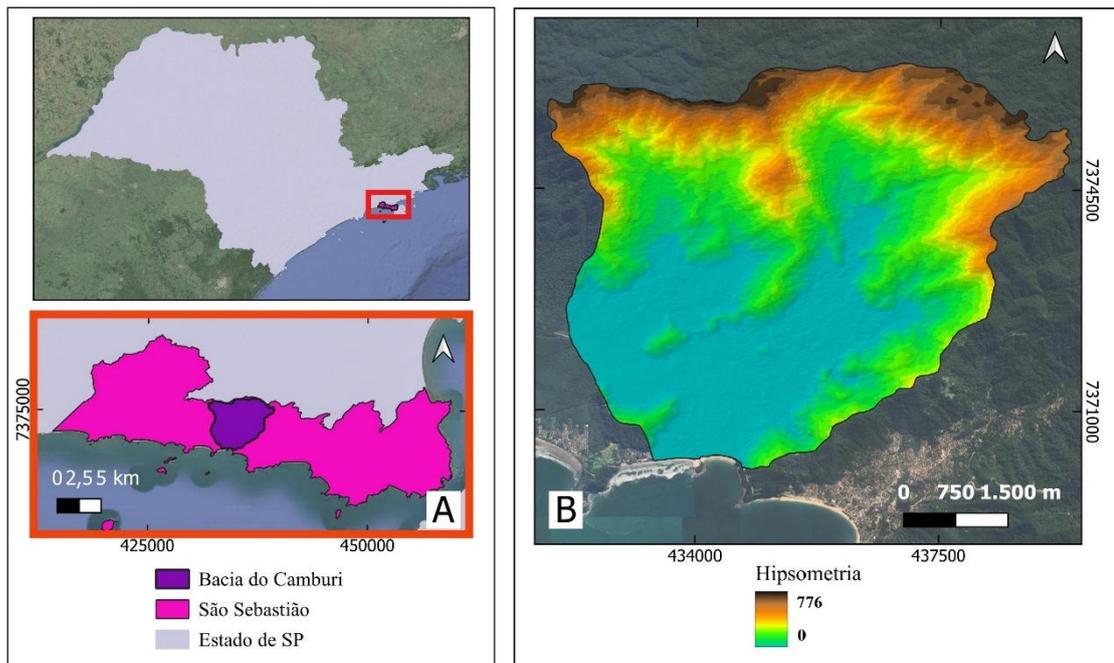
simplificados (Wichmann, 2017). Estudos como os de Goetz et al. (2021) e Klade (2022) realizaram a calibração do modelo para as condições geomorfológicas específicas de suas áreas de estudo. Diante desse cenário, esta pesquisa teve como objetivo simular a trajetória dos escorregamentos na Bacia do Rio Camburi, no município de São Sebastião (SP).

ÁREA DE ESTUDO

Localizado no litoral norte do estado de São Paulo, a 200 km a nordeste da capital paulista, o município de São Sebastião se concentra em uma estreita faixa de terra entre a Serra do Mar e o Oceano Atlântico. Esta área detém uma série de características físico-naturais que, combinadas, podem desencadear movimentos de massa (Crepani; Medeiros, 2000). A urbanização acelerada e desordenada, intensificada a partir da década de 1970 com o impulso ao turismo e à valorização imobiliária, levou parte significativa da população a ocupar áreas de risco, especialmente encostas e taludes com alta declividade. Em fevereiro de 2023, a bacia hidrográfica do Rio Camburi (37Km²) (Figura 2) foi intensamente afetada pelo evento pluviométrico que ocorreu na madrugada do dia 19. No local foram registradas 51 cicatrizes nas encostas próximas às áreas de ocupação (Bonini *et al.*, 2025).

Segundo a classificação do IBGE (2023), a litologia da bacia é composta majoritariamente pelo Complexo Costeiro, constituído de rochas cristalinas como granito, gnaisses e migmatitos do Neoproterozóico Criogeniano e pelas Coberturas Detríticas Lateríticas Neo-Plesitocênicas. A área possui três compartimentos geomorfológicos: o Planalto de Paraitinga, localizado numa estreita faixa a nordeste da bacia; a Serra do Mar e a Planície Litorânea que predominam no relevo. A pedologia do local é composta por Cambissolos háplicos, em sua maioria classificados como alumínicos de textura média.

Segundo o IBGE (2002), a região apresenta clima Tropical do Brasil Central, subsequente. Conforme Monteiro (1973) a combinação entre latitude elevada, relevo acidentado e a proximidade com a Serra do Mar faz com que o trecho entre as praias de Boracéia e Maresias, onde está situada a bacia do Camburi, apresente os maiores índices pluviométricos do estado de São Paulo, com totais anuais que variam entre 1.500 mm e 2.500 mm.



SRC: WGS 84/ UTM zona 23S

Figura 2 – (a) Localização da Bacia do Camburi; (b) Hipsometria.

METODOLOGIA

O estudo consistiu na aplicação do modelo Gravitational Process Path (GPP), que simula trajetórias e áreas de *runout* de processos gravitacionais com base em modelos digitais de elevação (Wichamann, 2017). Sua estrutura é composta por dois módulos principais: o *Random Walk*, responsável por definir a trajetória do fluxo, e o *PCM*, um modelo de fricção de dois parâmetros, utilizado para estimar o alcance final do movimento (Perla; Cheng; Mcclung, 1980).

A calibração dos parâmetros foi realizada em uma área teste, utilizando dados topográficos e inventário das cicatrizes do evento de 2023 (Bonini *et al.*, 2025). As áreas de liberação foram delimitadas a partir de buffers de 50 m sobre as cicatrizes, recortados para isolar as porções de início dos processos. A otimização do módulo de trajetória foi realizada em duas etapas (Goetz *et al.*, 2021), por meio de script em R, com análise fatorial completa.

A primeira etapa consistiu na calibração do método *Random Walk*, que incluiu o limiar de inclinação, o expoente de divergência e o fator de persistência, com base em Wichmann (2017) e Klade (2022). Na segunda etapa, foram ajustados os parâmetros do modelo de fricção (PCM), coeficiente de atrito e razão massa-arrasto com foco na minimização do erro relativo na estimativa da distância de *runout*. A validação foi feita por meio da comparação com o raster binário de cicatrizes, usando a área sob a curva ROC

(AAC-ROC) como métrica de desempenho (Zweig; Campbell, 1993). Após a calibração, o modelo foi aplicado a toda a bacia, utilizando como áreas de iniciação o mapa binário de suscetibilidade derivado do SHALSTAB (Shallow Landsliding Stability Model) (Montgomery; Dietrich, 1994), associadas às células com limiar crítico de precipitação igual ou inferior a 50mm/dia.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na otimização do GPP foram geradas 102 combinações para o método *Random Walk*. A primeira otimização gerou 90 combinações e revelou maior sensibilidade às variações do limiar do ângulo e do expoente de divergência. Os melhores valores de AAC-ROC foram obtidos com o limiar do ângulo de 35° (AAC-ROC = 0.604) e 40° (AAC-ROC = 0.628)(Figura 3a). Na segunda etapa de otimização o limiar do ângulo foi variado apenas para os melhores resultados (35° a 40°), o expoente de divergência em 1.0 e 2.0 e o fator de persistência, que demonstrou pouca influência, foi fixado em 1.5 (Figura 3b). Os resultados deste procedimento permitiram identificar valores ótimos de 35° para o limiar de ângulo e 1.0 para o expoente de divergência (AAC-ROC = 0.854). Para a otimização do módulo PCM, foram geradas 42 combinações de parâmetros. Os resultados mostraram que o PCM possui maior sensibilidade ao coeficiente de fricção que à razão massa/arrasto (Figura 3c). O melhor resultado foi obtido com coeficiente de fricção igual a 0.20 e razão massa/arrasto igual a 180 (AAC-ROC = 0.720) (Tabela 1).

Módulo do GPP	Parâmetro	Valor otimizado
Trajetórias potenciais	Limiar de ângulo de inclinação	35
	Expoente de divergência	1
	Fator de persistência	1.5
Modelo de fricção PCM	Coefficiente de fricção	0.2
	Razão massa/arrasto	180

Tabela 1 – Parâmetros ótimos utilizados no GPP.

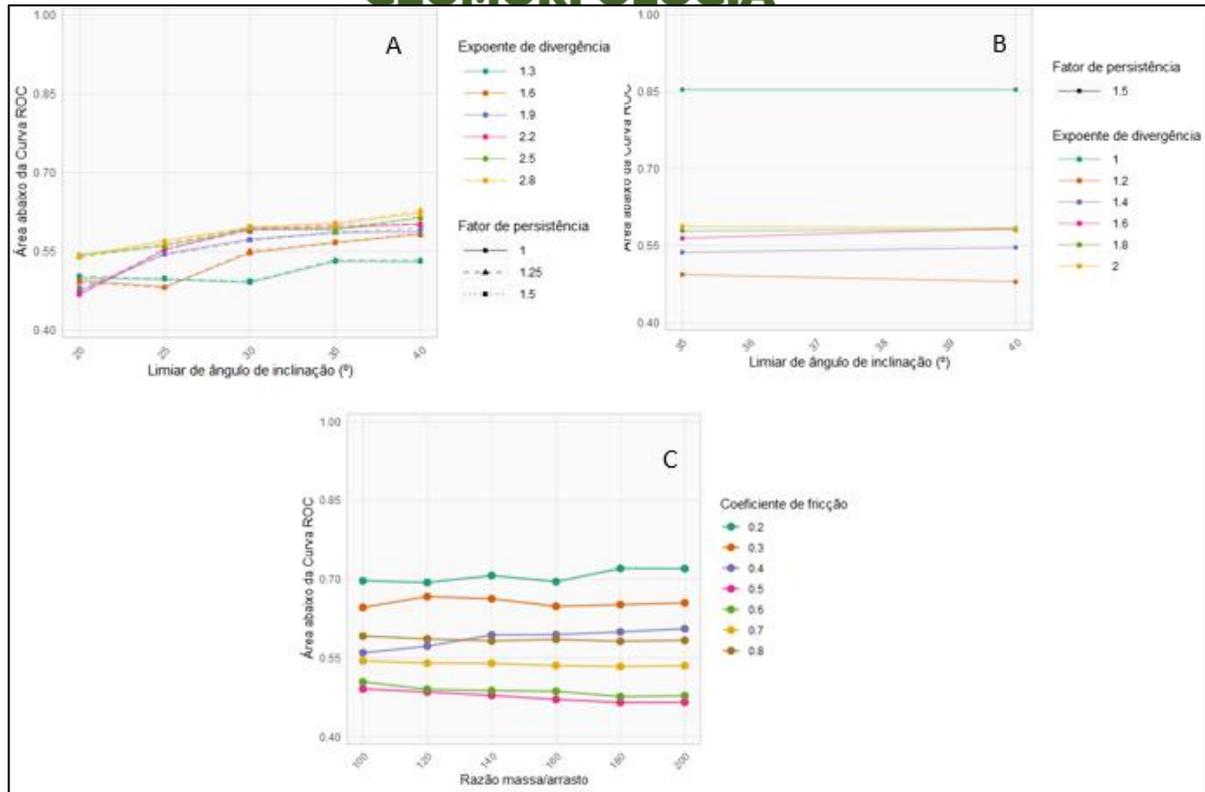


Figura 3 - Variação da AAC-ROC em relação aos parâmetros

O fator de persistência influencia o quão diretamente a trajetória simulada segue a direção anterior, simulando a inércia do material em movimento. Portanto, diante de sua pouca variação nas simulações realizadas, entende-se que as trajetórias analisadas tendem a seguir um fluxo contínuo e com poucas mudanças abruptas de direção, já que percorrem as encostas íngremes da Serra do Mar. O ângulo de inclinação é responsável pela definição do percurso do fluxo, permitindo ou não, maiores áreas de espalhamento lateral. Portanto, os melhores valores de AAC para maiores ângulos de inclinação demonstram que o fluxo não tende a seguir necessariamente a célula com menor declive, espalhando-se lateralmente com certa frequência e, por consequência, aumentando a área afetada pelo alcance do material mobilizado no processo. Diante desses resultados o expoente de divergência, que controla a probabilidade do material se espalhar lateralmente, especialmente em áreas de menor inclinação, obteve um valor ótimo mais baixo, equilibrando o alto valor do ângulo e inclinação (Wichmann, 2017).

O coeficiente de atrito, principal responsável pelo comportamento do processo na área de *runout*, determina o ponto de parada do material e o início da sua deposição. O parâmetro varia espacialmente com base nas características da superfície, possuindo valores mais altos para coberturas de solo mais densas. O valor ótimo encontrado foi de 0.2, aproximando-se

mais do valor sugerido por Wichmann (2017) para lavouras, o que é coerente com as cicatrizes mapeadas, já que boa parte delas situa-se nas áreas cobertas pelo mosaico de uso que, segundo o Mapbiomas, incluem áreas de agropecuária de difícil distinção. Essa cobertura descontínua, aliada aos cambissolos pouco desenvolvidos e à forte declividade, facilita o escoamento superficial e contribui para maior alcance da trajetória. Já a razão massa-arrasto influencia, principalmente, a velocidade em partes mais íngremes do percurso. Entretanto, essa razão tem pouca influência no cálculo do *runout*, o que pode ser atribuído ao problema de unicidade desse parâmetro (Perla et al, 1980).

A análise da frequência de trajetórias simuladas revelou que aproximadamente 84% da bacia apresenta células atravessadas por menos de 50% das trajetórias potenciais, enquanto menos de 1% da área é afetada por mais de 80% das simulações, concentrando-se principalmente em zonas de iniciação em encostas médias e altas, bem como nos fundos de vale, onde há tendência de deposição do material (Figura 4). Além disso, o perigo ocorre, principalmente, no compartimento geomorfológico da Serra do Mar, devido ao relevo íngreme. As velocidades máximas ao longo das trajetórias variaram de 0 a 32 m/s. Os maiores valores, indicativos de maior potencial destrutivo, foram registrados em setores de alta encosta, devido à maior atuação da força gravitacional, que acelera o material logo após a ruptura, ao passo que as menores velocidades, próximas da paralisação, ocorreram nas áreas de deposição.

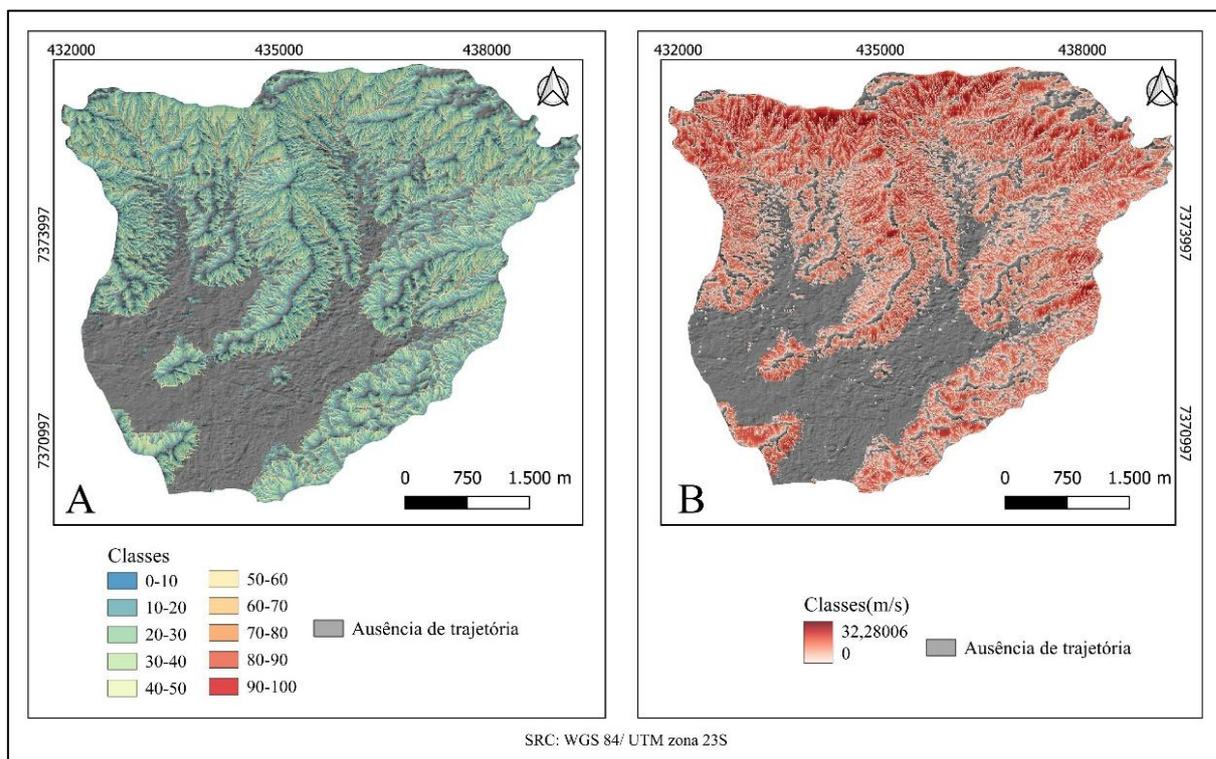


Figura 4- (a) Frequência das trajetórias classificada; **(b)** Velocidade máxima

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O modelo utilizado para previsão do perigo foi considerado satisfatório. Entretanto, é importante ressaltar que ele possuiu limitações significativas devido à ausência de dados hidrológicos e geotécnicos espacialmente distribuídos o que pode implicar em limitações de sua eficiência. Ademais, a pesquisa evidenciou a viabilidade da calibração de modelos por meio de procedimentos estatísticos, destacando sua praticidade na definição de parâmetros ótimos para modelos ainda pouco utilizados.

A distribuição das trajetórias da bacia acompanha as áreas de iniciação dos processos e revela que a distribuição dos escorregamentos tende a não percorrer o mesmo local em mais de 50% das simulações, ocorrendo a concentração da passagem do material nos fundos de vale. A planície, onde se concentram os elementos expostos, tem baixa distribuição do perigo, entretanto, mesmo com pouca área de atingimento prevista, os escorregamentos podem gerar impactos relevantes na área.

A baixa distribuição das frequências das trajetórias na planície litorânea também pode ser atribuída ao fato de a calibração do modelo ter sido realizada para previsão da trajetória de escorregamentos rasos, pois, em eventos extremos, é comum a ocorrência de processos em cadeia, ou seja, deslizamentos seguidos de fluxo de detritos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro concedido para o desenvolvimento desta pesquisa, por meio dos processos nº2024/01662-1 e 2021/04621-6.

REFERÊNCIAS

BONINI, J. E.; BATEIRA, C. V. de 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**, v. 46, 2020.

BONINI, J. E.; TIAGO, .; MARTINS, D.; TAMAKI DE OLIVEIRA SUGIYAMA, M.; VIEIRA, B. C. Landslide inventory of the 2023 Serra do Mar disaster (Brazil). **Discover Geoscience** 2025 3:1, v. 3, n. 1, p. 1–17, 22 abr. 2025. Disponível em: <<https://link.springer.com/article/10.1007/s44288-025-00153-2>>. Acesso em: 28 abr. 2025.

CEMADEN. **Estações Pluviométricas**. Disponível em: <http://resources.cemaden.gov.br/graficos/interativo/grafico_CEMADEN.php?menu=periodo&idpcd=3481&uf=SP>. Acesso em: 7 jan. 2024.

CNN BRASIL. **Chuva provoca novos pontos de deslizamentos em São Sebastião (SP), diz prefeito.** Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/chuva-provoca-novos-pontos-de-deslizamentos-em-sao-sebastiao-sp-diz-prefeito/>>. Acesso em: 7 jan. 2024.

COROMINAS, J.; VAN WESTEN, C.; FRATTINI, P.; CASCINI, L.; MALET, J.-P.; FOTOPOULOU, S.; CATANI, F.; VAN DEN ECKHAUT, M.; MAVROULI, O.; AGLIARDI, F.; PITILAKIS, K.; WINTER, M. G.; PASTOR, M.; FERLISI, S.; TOFANI, V.; HERVÁS, J.; SMITH, J. T. Recommendations for the quantitative analysis of landslide risk. **Bulletin of Engineering Geology and the Environment**, 24 nov. 2013.

CREPANI, E.; MEDEIROS, J. S. de. Sensoriamento remoto e geoprocessamento aplicados ao estudo da vulnerabilidade a movimentos de massa no município de São Sebastião (SP). Em: Simpósio Latinoamericano de Percepción Remota (SELPER), 2000, [...]. 2000.

FERNANDES, N. F.; AMARAL, C. P. do. Movimentos de Massa: uma abordagem geológico-geomorfológica. Em: GUERRA, A. J. T.; CUNHA, S. B. DA. **Geomorfologia e Meio Ambiente**. [s.l.] Bertrand Brasil, 1996. p. 123–194.

FERNANDES, N. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; VIEIRA, B. C.; MONTGOMERY, D. R.; GREENBERG, H. Topographic controls of landslides in Rio de Janeiro: field evidence and modeling. **CATENA**, v. 55, n. 2, p. 163–181, jan. 2004.

GOETZ, J.; KOHRS, R.; PARRA HORMAZÁBAL, E.; BUSTOS MORALES, M.; ARANEDA RIQUELME, M. B.; HENRÍQUEZ, C.; BRENNING, A. Optimizing and validating the Gravitational Process Path model for regional debris-flow runout modelling. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 21, n. 8, p. 2543–2562, 25 ago. 2021.

GUIDICINI, G.; IWASA, O. Y. Tentative correlation between rainfall and landslides in a humid tropical environment. **Bulletin of the International Association of Engineering Geology**, v. 16, n. 1, p. 13–20, 1977.

IBGE. **Censo de 2022**. 2022. IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: https://censo2022.ibge.gov.br/panorama/?utm_source=ibge&utm_medium=home&utm_campaign=portal. Acessado em: 13 jan. 2024.

IBGE. **Mapa geológico do Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html?=&t=downloads>. Acessado em: 19 jan. 2024.

IBGE. **Mapa pedológico do Brasil**. 2023. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/informacoes-ambientais/pedologia/10871-pedologia.html?=&t=downloads>. Acessado em: 19 jan. 2024.

KLADÉ, M. **Reichweitenmodellierung von flachgründigen Hangrutschungen mit dem Gravitational Process Path Model in ausgewählten Gemeinden des Steirischen Beckens**. 2022. Universität Graz, 2022.

MARTINS, T. D.; GOMES, M. C. V.; BONINI, J. E.; VIEIRA, B. C. Análises de Suscetibilidade, Perigo e Risco. Em: CABRAL, V. C.; REIS, F. A. G. V.; GRAMANI, M. F.; KUHN, C. E. S.; SILVA, O. L. E. **Corridas de Detritos no Brasil**. [s.l.: s.n.].p. 63–69.

MARTINS, T.; OKA-FIORI, C.; VIEIRA, B.; MONTGOMERY, D. Assessment of Lidar-derived DTMs for landslide susceptibility mapping: Application in the Brazilian subtropical forest. Em: **Landslides and Engineered Slopes. Experience, Theory and Practice**. [s.l.] CRC Press, 2016. p. 1389–1392.

- MENDES, R. M.; MARINHO, F. A. M.; VALERIO FILHO, M. Capacidade de retenção de água em solos da Serra do Mar, SP. **Revista do Instituto Geológico**, v. 36, n. 1, p. 21–34, 1 jun. 2015.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. A physically based model for the topographic control on shallow landsliding. **Water Resources Research**, v. 30, n. 4, p. 1153–1171, 9 abr. 1994.
- PERLA, R. ; CHENG, T. T.; MCCLUNG, D. M. A two-parameter model of snow-avalanche motion. **J. Glaciol.**, v. 26, p. 197–207, 1980.
- PREFEITURA DE SÃO SEBASTIÃO. **Defesa Civil de São Sebastião** . Disponível em: <<https://www.saosebastiao.sp.gov.br/emergencia/>>. Acesso em: 6 jan. 2024a.
- PREFEITURA DE SÃO SEBASTIÃO. **Boletim: Buscas prosseguem em São Sebastião (26.02.2023, às 17h45)**. Disponível em: <<https://www.saosebastiao.sp.gov.br/emergencia/noticia.asp?id=N2622023182434>>. Acesso em: 6 jan. 2024b.
- REDAÇÃO RBA. **Número de mortos após chuvas e deslizamentos no litoral norte de São Paulo sobe para 54** . Disponível em: <<https://www.redebrasilatual.com.br/cidadania/numero-de-mortos-apos-chuvas-e-deslizamentos-no-litoral-norte-de-sp-sobe-para-54/>>. Acesso em: 7 jan. 2024.
- VIEIRA, B. C.; GRAMANI, M. F. Serra do Mar: The Most “Tormented” Relief in Brazil. Em: VIEIRA, B. C.; SALGADO, A. A. R.; SANTOS, L. J. C. **Landscapes and Landforms of Brazil**. [s.l.] Dordrecht: Springer, 2015. p. 285–297.
- VIEIRA, B. C.; RAMOS, H. Aplicação do modelo Shalstab para mapeamento da suscetibilidade a escorregamentos rasos em Caraguatatuba, Serra do Mar (SP). **Geography Department University of Sao Paulo**, v. 29, p. 161, 17 jun. 2015.
- WICHMANN, V. The Gravitational Process Path (GPP) model (v1.0) – a GIS-based simulation framework for gravitational processes. **Geoscientific Model Development**, v. 10, n. 9, p. 3309–3327, 8 set. 2017.
- WOLLE, C. M.; HACHICH, W. Rain-induced landslides in southeastern Brazil. Em: *International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1989, Rio de Janeiro* . [...]. Rio de Janeiro : Proceedings, 1989. p. 1639–1642.
- ZWEIG, M. H.; CAMPBELL, G. Receiver-operating characteristic (ROC) plots: a fundamental evaluation tool in clinical medicine. **Clinical Chemistry**, v. 39, n. 4, 1993.