

EVENTOS EXTREMOS DE MOVIMENTOS DE MASSA: REFLEXÕES A PARTIR DE INVENTÁRIOS E MODELAGEM EMPÍRICA

Extreme landslide events: insights from inventories and empirical modeling

Rodrigo Augusto Stabile

Doutor em Geografia Física, Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais – CEMADEN, Brasil.

rodrigo.stabile@cemaden.gov.br

Resumo

Os eventos extremos de movimentos de massa representam momentos de ruptura no equilíbrio dinâmico das encostas, com alto potencial destrutivo e capacidade de reconfigurar a paisagem. Este artigo discute a natureza desses eventos no Brasil, articulando conceitos geomorfológicos com a análise de casos recentes. Argumenta-se que a relação entre o impulso pluviométrico e a resposta geomorfológica é intrinsecamente não linear. Evidências de eventos de alta magnitude, como os ocorridos no Planalto do Paraitinga (SP/2010) e no Rio Grande do Sul (2024), indicam a existência de limiares pluviométricos funcionais que, quando ultrapassados, desencadeiam uma mudança de regime nos processos deflagradores. Acima desses limiares, observa-se um aumento abrupto na severidade dos movimentos de massa, uma alteração na distribuição de tamanhos das cicatrizes e uma menor influência dos fatores topográficos locais, sugerindo a atuação de mecanismos hidrológicos mais profundos. Conclui-se que os modelos empíricos de previsão baseados em eventos recorrentes de baixa magnitude são insuficientes para prever a severidade desses eventos extremos, sendo necessárias abordagens que capturem essas transições não lineares e os complexos controles hidrogeomorfológicos associados.

Palavras-chave: Movimentos de Massa, Eventos Extremos, Limiares de Chuva, Geomorfologia, Previsão de Desastres.

Abstract

Extreme landslide events represent moments of rupture in the dynamic equilibrium of slopes, with high destructive potential and the capacity to reshape the landscape. This article discusses the nature of these events in Brazil, articulating geomorphological concepts with the analysis of recent cases. It is argued that the relationship between rainfall impulse and geomorphological response is intrinsically non-linear. Evidence from high-magnitude events, such as those in Planalto do Paraitinga (SP/2010) and Rio Grande do Sul (2024), indicates the existence of functional rainfall thresholds which, when exceeded, trigger a shift in the triggering processes. Beyond these thresholds, there is an abrupt increase in landslide severity, a change in the size distribution of scars, and a reduced influence of local topographic factors, suggesting the activation of deeper hydrological mechanisms. It is concluded that empirical prediction models based on recurrent low-magnitude events are insufficient to forecast the severity of these extreme

events, requiring approaches that capture these non-linear transitions and the associated complex hydro-geomorphological controls.

Keywords: Landslides, Extreme Events, Rainfall Thresholds, Geomorphology, Disaster Prediction.

1. INTRODUÇÃO

Movimentos de massa são processos naturais fundamentais relacionados com a evolução das vertentes em diversas condições climáticas. Contudo, eventos de elevada magnitude ou grau de perturbação podem representar momentos de ruptura no equilíbrio dinâmico das encostas, mobilizando grandes volumes de material, alterando a morfologia local e, em muitos casos, reconfigurando transitoriamente padrões geomorfológicos e hidrológicos estabelecidos (Hack & Goodlett, 1960; Brunsden & Thornes, 1979; De Ploey & Cruz, 1979; Selby, 1983; Harvey, 2001).

Desastres relacionados a estes processos naturais têm sido registrados com frequência crescente nas últimas décadas (Tomazzolli *et al.*, 2009; AVELAR *et al.*, 2013; EGAS *et al.*, 2025). Seus impactos vão desde a perda de vidas humanas e prejuízos econômicos até danos significativos ao patrimônio histórico, cultural e ambiental. Esse aumento na ocorrência e registro desses desastres está associado a múltiplos fatores, entre os quais podemos citar: a expansão urbana em áreas de encosta, frequentemente marcada por desigualdades sociais e ausência de planejamento (ex. Bastos Moroz & Thieken, 2024); as mudanças climáticas, que contribuem para a intensificação e maior frequência de eventos meteorológicos extremos (ex. Barbosa *et al.*, 2025); e o avanço das tecnologias de sensoriamento remoto, comunicação e sistemas de dados, que ampliaram a capacidade de detecção e catalogação dos eventos (ex. Bernardes *et al.*, 2019; Dias & Grohmann, 2024).

No Brasil, a compreensão dos fatores que controlam a deflagração e a severidade dos eventos extremos de movimentos de massa tem avançado com o desenvolvimento de inventários e sua aplicação na validação de modelos físicos de estabilidade hidrologicamente calibrados, que permitem compreender como diferentes condições de água no solo influenciam a estabilidade das encostas (Vieira *et al.*, 2018; Marotti *et al.*, 2023; Calpa *et al.*, 2026). Paralelamente, esses inventários têm subsidiado o desenvolvimento de modelos empíricos (*data-driven*) de previsão, que se baseiam na análise de padrões observados de chuva relacionados a ocorrência dos eventos de movimentos de massa. Entre estas iniciativas, destacam-se as abordagens baseadas em

limiares de chuva (Guidicini & Iwasa, 1977; Caine, 1980; Guzzetti *et al.*, 2007; GUZZETTI *et al.*, 2008; Segoni *et al.*, 2014; Stabile *et al.*, 2022; Mondini *et al.*, 2023; Stabile *et al.*, 2025a), que identificam condições pluviométricas críticas à deflagração dos movimentos de massa e constituem instrumentos essenciais para sistemas de alerta antecipado e gestão de risco.

Entretanto, em razão da natureza dessas análises, a maioria dos estudos foca em eventos recorrentes e de baixa magnitude relativa — justamente os mais frequentemente observados e documentados. Como consequência, os eventos extremos de movimentos de massa, de baixa frequência e alta magnitude, permanecem menos compreendidos, embora sejam aqueles com maior potencial destrutivo e capacidade de promover alterações morfológicas significativas em curtos intervalos de tempo.

Derivado da apresentação realizada na Mesa Redonda “Geomorfologia, ambiente e eventos extremos” durante o XV Simpósio Nacional de Geomorfologia (Natal/RN, 2025), este artigo, discute o conceito de eventos extremos de movimentos de massa, articulando bases conceituais de geomorfologia com exemplos de eventos recentes no Brasil. A partir de inventários e análises de chuva deflagradora, propõe-se uma reflexão sobre a natureza não linear da resposta geomorfológica e sobre as implicações dessa dinâmica para a previsão de eventos extremos.

2. EVENTOS GEOMORFOLÓGICOS

Em Geomorfologia, os eventos podem ser definidos como um conjunto de processos geomorfológicos (ex. movimentos de massa) deflagrados por um único impulso, como um episódio de chuva intensa (Crozier & Glade, 1999). Assim, um evento geomorfológico deve ser espacialmente delimitável e temporalmente discreto, de modo que sua resposta é expressa pelas alterações morfológicas ocorridas dentro dos limites espaciais e temporais da análise.

Portanto, a definição de um evento geomorfológico depende da escala temporal e espacial da observação. Por exemplo, em análises de movimentos de massa baseadas em imagens de satélite ou fotografias aéreas, o evento é delimitado pelo intervalo entre duas aquisições (antes e depois do evento) (ex. Coelho *et al.*, 2024; Stabile *et al.*, 2024; Egas *et al.*, 2025; Sugiyama *et al.*, 2025). Dessa forma, deslizamentos que ocorrem em momentos distintos durante a mesma tempestade (ex. Coelho Netto *et al.*, 2013) são geralmente considerados parte de um único evento geomorfológico, refletindo a resposta integrada da paisagem a um mesmo impulso meteorológico (Figura 1).

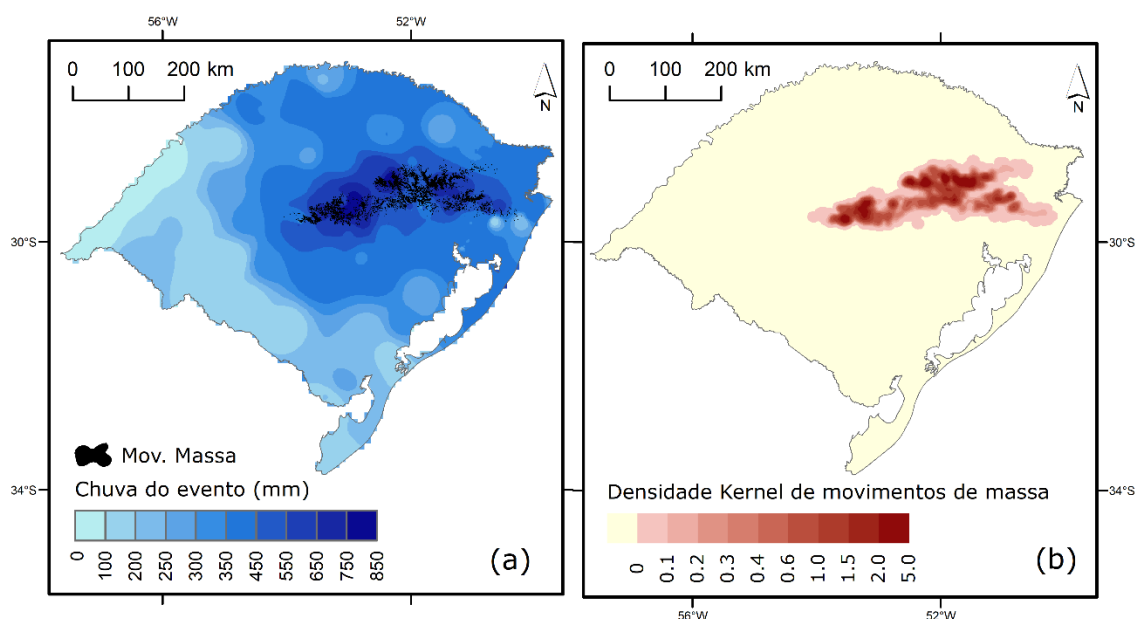


Figura 1 – Evento de movimentos de massa deflagrados entre final de abril e início de maio de 2024 no Rio Grande do Sul. As mais de 15.000 cicatrizes foram deflagradas por um evento de chuva extremo (a) e formaram dois núcleos principais de alta severidade (b).

Fonte: Egas *et al.* (2025).

Dentro dessa perspectiva, o recorte espacial do evento geralmente coincide com a extensão do sistema meteorológico deflagrador (ex, Coelho *et al.*; 2024; Stabile *et al.*, 2024; Egas *et al.*, 2025). Contudo, em abordagens geomorfológicas voltadas ao estudo da resposta integrada da paisagem, a bacia hidrográfica tende a ser a unidade espacial mais adequada para a definição do evento, pois reflete o comportamento conjunto dos processos dentro de um mesmo sistema morfodinâmico (ex. Listo & Nery, 2022; Araújo *et al.*, 2024).

Para Brunnsden & Thornes (1979), um evento geomorfológico pode ser considerado extremo quando apresenta elevada intensidade e é capaz de causar perturbações significativas, interrompendo temporariamente o funcionamento normal do sistema, mas sem alterar permanentemente seu estado de equilíbrio ou o domínio dos processos. Essas perturbações podem se dar em diversas escalas temporais e espaciais, conforme demonstrou Coelho Netto (1999). Dessa forma, os eventos geomorfológicos extremos são eventos formativos, caracterizados por baixa frequência e alta magnitude, capazes de gerar modificações relevantes na paisagem.

No caso dos movimentos de massa, os eventos extremos distinguem-se por sua alta intensidade – entendida como a relação entre a magnitude e duração do evento (Colângelo, 2005) – e, simultaneamente, por sua elevada magnitude, uma vez que são capazes de gerar uma grande quantidade de processos de movimentos de massa (ex.

centenas a milhares de deslizamentos), que resultam em uma grande área afetada ou um elevado volume de material mobilizado (ex. Egas *et al.*, 2025). Além disso, costumam apresentar núcleos de alta severidade ou grau de perturbação (Crozier & Glade, 1999), um conceito que expressa o impacto geomorfológico do evento e pode ser mensurado, por exemplo, pela densidade de deslizamentos, pela frequência espacial ou pela proporção de área afetada dentro da unidade de análise (Colângelo & Cruz, 2000; Colângelo, 2005; Crozier, 2017; Stabile *et al.*; 2025b).

3. CHUVA CRÍTICA PARA DEFLAGRAÇÃO DE MOVIMENTOS DE MASSA

Assim como os processos, os eventos – entendidos como um conjunto de processos geomorfológicos deflagrados por um mesmo impulso – ocorrem quando determinados limiares (Wolman & Miller, 1960; Schumm, 1979) são ultrapassados. Esses limiares podem ser extrínsecos, ou seja, relacionados a impulsos externos ao sistema morfodinâmico, como uma chuva intensa; ou intrínsecos, associados a transformações internas do próprio sistema geomorfológico, como o acúmulo progressivo de material instável ou a evolução do perfil da encosta decorrente do intemperismo e da pedogênese (Schumm, 1979), como exemplificado por Furian *et al.* (1999) no reverso da Serra do Mar.

Reconhecer estes limiares é essencial para compreender a resposta morfodinâmica da paisagem e antecipar desastres. No caso de eventos de movimentos de massa no Brasil, constituídos principalmente por rupturas primárias (isto é, não por reativação de processos já existentes) e por movimentos rápidos (como escorregamentos translacionais ou fluxos de detritos), um dos grandes desafios é reconhecer as condições críticas de chuva capazes de deflagrar estes fenômenos.

Globalmente, abordagens empíricas baseadas em limiares de chuva permanecem como as mais utilizadas para identificar condições pluviométricas críticas capazes de deflagrar movimentos de massa (Tatizana *et al.*, 1987; Aleotti, 2004; Guzzetti *et al.*, 2007; Baum & Godt, 2010; Stabile *et al.*, 2022; Stabile *et al.*, 2025a). Esses limiares relacionam variáveis de chuva como intensidade média da chuva, duração, precipitação acumulada ou variáveis mais complexas e ajustadas conforme o contexto hidrológico, para identificar condições críticas que podem deflagrar movimentos de massa. Portanto, a construção de limiares empíricos envolve o conhecimento do momento da deflagração do escorregamento (ou ao menos do evento de chuva deflagrador), o registro da chuva do evento deflagrador e a disponibilidade de uma quantidade expressiva de registros para a construção das curvas limiares (Glade *et al.*, 2000; Guzzetti *et al.*, 2007).

Consequentemente, os limiares empíricos são frequentemente calculados a partir de inventários compostos principalmente por eventos de baixa magnitude e alta frequência relativa. Logo, são compostos principalmente por eventos de deslizamentos individuais em encostas alteradas antropicamente, como taludes de corte e aterro em áreas urbanas e rodovias. Embora úteis para prever deslizamentos que podem oferecer riscos em escala local, eles indicam limiares mínimos de deflagração e são, portanto, insuficientes para prever eventos extremos.

No caso dos eventos extremos de movimentos de massa, sua baixa frequência limita os registros necessários para a construção das curvas. Na maioria dos locais sujeitos a desastres causados por movimentos de massa, eventos com deslizamentos generalizados nas encostas, associados à mensuração da chuva, ocorreram no máximo uma vez no registro histórico. Compreender as chuvas críticas de eventos extremos, portanto, requer o desenvolvimento de novas estratégias empíricas e conceituais.

4. EVENTOS EXTREMOS DE MOVIMENTOS DE MASSA

Em consequência, o conhecimento a respeito da chuva deflagradora desses eventos extremos, especialmente sobre a sua relação com a severidade dos movimentos de massa — expressa, por exemplo, pela proporção de área afetada ou pelo volume mobilizado —, permanece limitado, apesar de ser fundamental para aprimorar a previsão dos impactos associados a esses eventos, particularmente em sistemas de alerta de movimentos de massa.

Os denominados eventos extremos ou de alta magnitude, deflagradores de deslizamentos generalizados (com alta severidade) e fluxos de detritos, são comuns no Brasil (Sternberg, 1949; Meis & Silva, 1968; Cruz, 1972; De Ploey & Cruz, 1979; Vieira & Fernandes, 2004; Tomazzolli *et al.*, 2009; Avelar *et al.*, 2013; Dourado & Fernandes, 2013; Silveira *et al.*, 2014; Lima *et al.*, 2020; Dias *et al.*, 2023; Andrade *et al.*, 2024; Stabile *et al.*, 2024; Egas *et al.*, 2025). Entre 2000 e 2016 ocorreram pelo menos 75 eventos de deslizamentos generalizados no Brasil, muitos deles com fluxos de detritos (Stabile, 2023) (Figura 2). Esses eventos estão vinculados a chuvas excepcionais, frequentemente superiores aos valores críticos identificados pelos limiares empíricos tradicionais (Tabela 1).

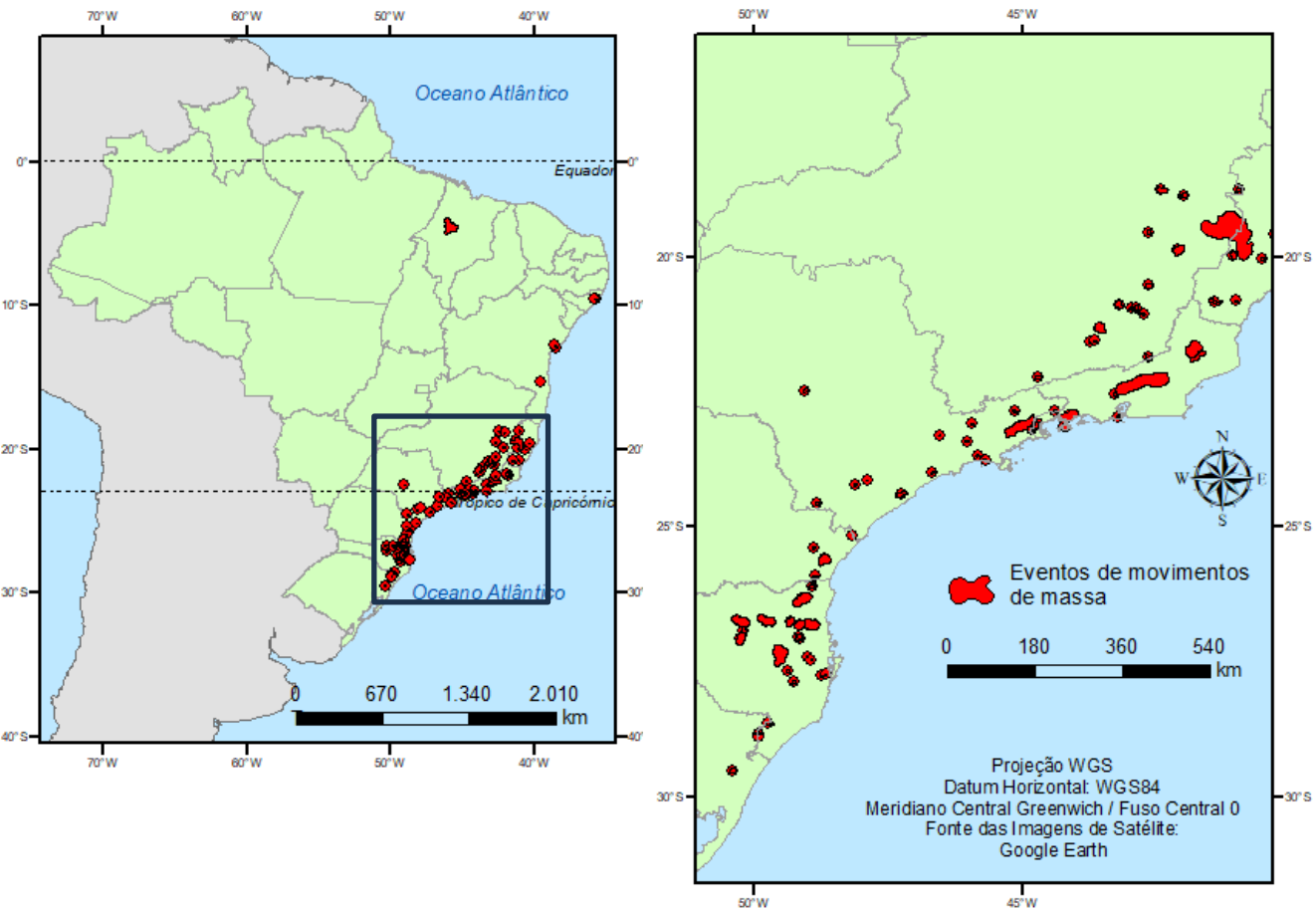


Figura 2 - Eventos extremos recentes (entre 2000 e 2016) de movimentos de massa no Brasil.
Fonte: Stabile (2023).

Tabela 1: Estimativa de precipitação de alguns dos principais eventos de movimentos de massa no Brasil.

Evento	Chuva (mensurada ou estimada)	Fonte
Serra do Mar em Caraguatatuba/SP (1967)	420 mm em 24 horas	Cruz (1972)
Serra do Mar em Cubatão/SP (1985)	400mm em 96 horas	Tatizana <i>et al.</i> (1987)
Maciço da Tijuca no Rio de Janeiro/RJ (1996)	250mm em 48 horas	Vieira e Fernandes (2004)
Vale do Itajaí/SC (2008)	400mm em 48 horas	Tomazzoli <i>et al.</i> (2009)
Angra dos Reis/RJ (2009/2010)	417mm em 72 horas	Dourado e Fernandes (2013)
Região Serrana/RJ (2011)	200mm em 10 horas	Coelho Netto <i>et al.</i> (2013)
Serra da Prata em Morretes/PR (2011)	321mm em 24 horas	Silveira <i>et al.</i> (2014)
Itaoca/SP (2014)	575mm em 72 horas	Instituto Geológico (2015)
São Sebastião/SP (2023)	628mm em ~12 horas	Andrade <i>et al.</i> (2024)
Rio Grande do Sul (2024)	850mm em ~12 dias	Egas <i>et al.</i> (2025)

Trabalhos que buscaram comparar variáveis de chuva de diferentes eventos com a severidade dos movimentos de massa (Gallart, 1995; Reid *et al.*, 1998; Chen *et al.*, 2012; Marc *et al.*, 2018) propuseram funções logarítmicas ou potenciais que relacionam a severidade à quantidade total de chuva. Mais recentemente, essa linha de investigação passou a incorporar também os padrões intraevento, isto é, a variação temporal e espacial das variáveis de chuva e da severidade dos movimentos de massa dentro de um mesmo evento. Essas abordagens empíricas têm se mostrado promissoras para compreender a dinâmica dos eventos de alta magnitude (Chang *et al.*, 2008; Crozier, 2017; Marc *et al.*, 2019; Mtibaa & Tsunetaka, 2023), embora ainda sejam limitadas pela disponibilidade de dados pluviométricos e inventários de deslizamentos com alta resolução temporal e espacial.

Análises recentes de eventos brasileiros (Stabile, 2023; Egas *et al.*, 2025; Stabile *et al.*, 2025b; Stabile *et al.* 2025c) ajudam a ilustrar a relação entre o impulso pluviométrico e a resposta geomorfológica associada e parecem indicar uma complexidade maior na resposta dos movimentos de massa a chuva do que as funções estabelecidas em pesquisas anteriores. No Planalto do Paraitinga (SP, 2010) (Stabile & Colângelo, 2017; Stabile, 2023; Stabile *et al.*, 2025b) e nas escarpas e cânions da Serra Gaúcha (RS, 2024) (Egas *et al.*, 2025; Stabile *et al.*, 2025c), por exemplo, as chuvas excepcionais produziram deslizamentos e fluxos de detritos de grande magnitude, mas com diferentes núcleos de severidade.

As análises quantitativas desses eventos permitem observar que a severidade dos movimentos de massa responde de forma não linear ao aumento da chuva acumulada. No caso do Planalto do Paraitinga (2010), por exemplo, verificou-se que apesar de existir um limiar mínimo de cerca de 80mm em ~48h, a severidade dos deslizamentos — expressa pela densidade ou proporção da área afetada — aumentou abruptamente quando o total de precipitação ultrapassou cerca de 140 mm. Esse comportamento sugere a existência de um limiar pluviométrico funcional, acima do qual há uma reorganização dos mecanismos deflagradores e dos controles geomorfológicos atuantes (Stabile *et al.*, 2025b).

A distribuição dos tamanhos das cicatrizes também evidenciou essa transição (Stabile & Colângelo, 2024). Para chuvas moderadas, com predominância de cicatrizes menores, a resposta do sistema foi controlada principalmente por fatores topográficos — como declividade e área de contribuição — que influenciaram a localização e a frequência dos deslizamentos menores. À medida que o impulso pluviométrico aumentou, esses

controles passaram a ter menor importância relativa, e os grandes deslizamentos passaram a ocorrer inclusive em encostas menos inclinadas e com áreas de contribuição reduzidas, inclusive deflagrando pequenos fluxos de detritos nos vales a jusante, sugerindo a atuação de mecanismos de instabilidade mais profundos e coalescentes (Stabile *et al.*, 2025b).

No evento do Rio Grande do Sul (2024), também há indícios dessa mudança de regime. Com mais de 15.000 deslizamentos e fluxos de detritos, o episódio possivelmente representou o maior evento de movimentos de massa já registrado no Brasil em magnitude (EGAS *et al.*, 2025). Numa análise espacial da relação entre chuva e movimentos de massa, foi observado que as rupturas iniciaram quando a chuva acumulada ultrapassou 200 mm em cerca de 12 dias (com 2 dias de precipitação mais intensa), mas um limiar secundário, identificado entre 400 e 450 mm, mostrou um crescimento abrupto na frequência espacial e na severidade (Egas *et al.*, 2025).

Esta transição, foi evidenciada também pela geometria das cicatrizes, saindo da predominância de movimentos de massa pequenos e arredondados nas zonas com até 400mm de chuva para movimentos de massa maiores, avalanches e grandes fluxos de detritos nos núcleos mais intensos de precipitação (Stabile *et al.*, 2025c) (Figura 3). Mesmo que ainda com resultados preliminares, essas morfologias de cicatrizes apresentaram fatores controladores diferentes, sugerindo uma mudança nas condições deflagradoras entre cada delas (Stabile *et al.*, 2025c).

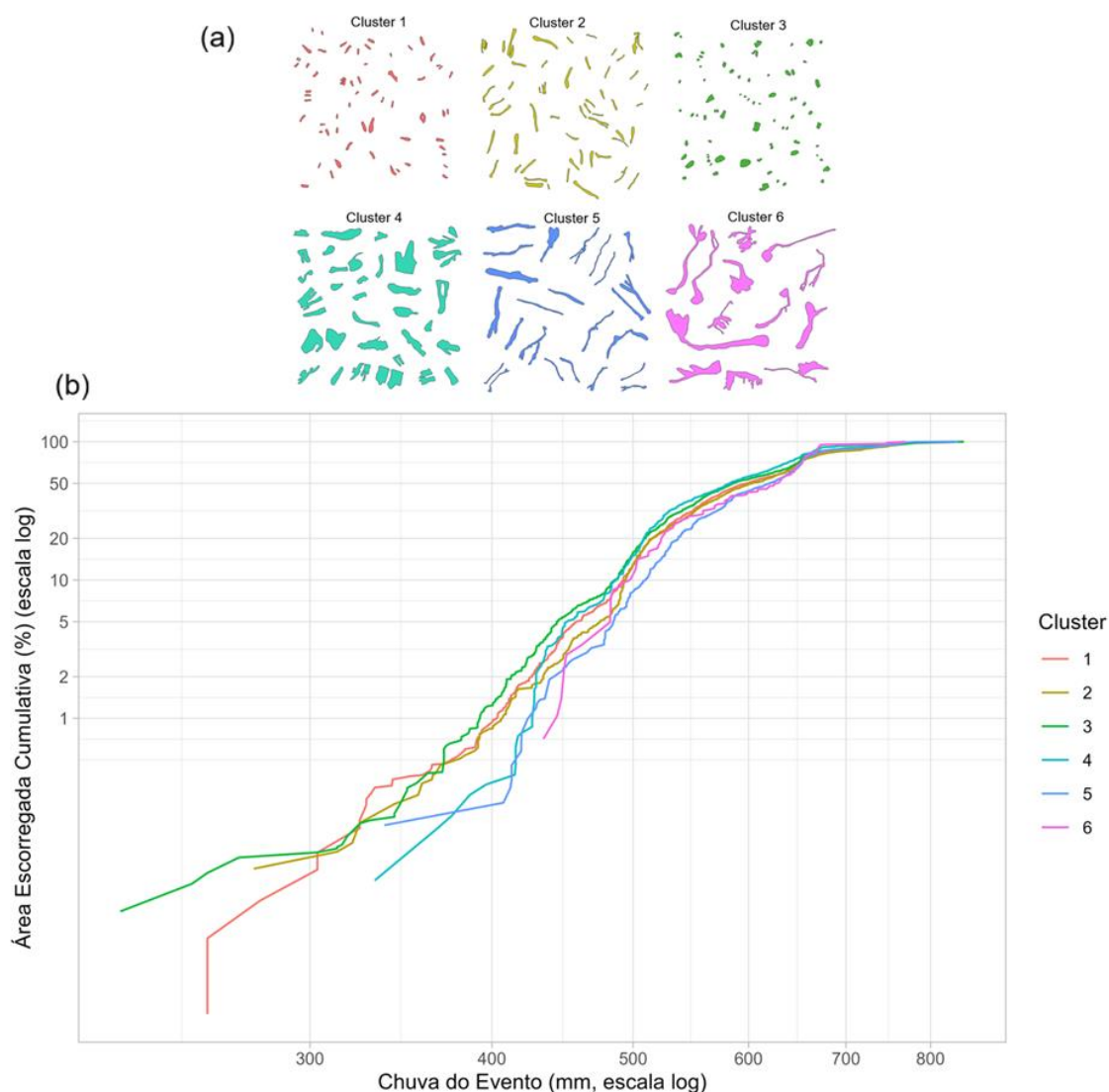


Figura 3 – Tipos morfológicos (clusters) das cicatrizes de movimentos de massa do evento de 2024 no Rio Grande do Sul (a) e área escorregada cumulativa em relação à chuva por morfologia (b).

Fonte: Stabile *et al.* (2025c).

Esses resultados indicam que as diferentes zonas de severidade de movimentos de massa, refletem não apenas o volume de chuva, mas também uma mudança nos fatores condicionantes e, possivelmente, nos mecanismos deflagradores à medida que o sistema ultrapassa sucessivos limiares de energia (Stabile *et al.*, 2025b). Compreender o que controla essas transições é um dos principais desafios para o avanço da previsão de eventos extremos. Entre as hipóteses mais prováveis estão diferentes mecanismos e condições hidrológicas de deflagração, que incluem variações no regime de infiltração, na drenagem subsuperficial e na dinâmica de saturação do solo. A identificação e a quantificação desses mecanismos podem representar um passo decisivo para compreender por que pequenas variações no impulso pluviométrico podem gerar

respostas geomorfológicas desproporcionalmente intensas, especialmente durante eventos extremos.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os eventos extremos de movimentos de massa no Brasil exercem papel formativo na paisagem e desafiam os modelos tradicionais de previsão e análise baseados em eventos recorrentes de menor magnitude. A relação entre o impulso pluviométrico e a resposta geomorfológica mostra-se não linear, indicando que, acima de determinados limiares, há uma reorganização dos mecanismos deflagradores e dos fatores condicionantes que controlam a estabilidade das encostas.

Do ponto de vista aplicado, esses resultados apontam para limitações importantes nas abordagens empíricas convencionais, especialmente aquelas baseadas em limiares mínimos de chuva. Se a resposta geomorfológica a eventos extremos não segue funções simples nem padrões lineares, prever a severidade e a extensão espacial desses eventos torna-se um desafio consideravelmente maior. Essas constatações reforçam a necessidade de abordagens específicas para eventos extremos, incorporando inventários de alta resolução, classificação e análise geomorfológica dos movimentos de massa, elaboração de modelos fisicamente embasados ou modelos empíricos considerando a diversidade de condições hidrológicas capazes de deflagrar movimentos de massa.

Sob o ponto de vista conceitual, os resultados sugerem a existência de mudanças de regime processual associadas ao aumento da magnitude da chuva. A paisagem parece responder de modo distinto a diferentes intensidades pluviométricas, com transições marcadas por limiares críticos que modificam não apenas a frequência, mas também a severidade e os mecanismos hidrológicos de deflagração dos movimentos de massa.

Essas transições remetem ao conceito de limiares geomorfológicos extrínsecos (SCHUMM, 1979), segundo o qual pequenos incrementos em uma força externa — como a chuva — podem gerar respostas abruptas e desproporcionais após certo ponto crítico. Assim, nem todos os limiares indicam apenas o início dos movimentos de massa: alguns assinalam mudanças súbitas na severidade e no domínio dos processos, configurando pontos de inflexão na resposta geomorfológica. Essa perspectiva amplia a compreensão dos eventos extremos como fenômenos que não apenas perturbam o sistema, mas também revelam sua estrutura de controle, oferecendo uma via conceitual para investigar

a resiliência e a reorganização dos sistemas morfodinâmicos após eventos de alta energia.

Entre os principais desafios para pesquisas futuras, destacam-se: a) Aprofundar a comparação entre as tipologias dos movimentos de massa, seus fatores condicionantes e mecanismos de deflagração em diferentes zonas de severidade dentro de um mesmo evento; b) Caracterizar com maior detalhe a chuva de eventos extremos, incorporando variáveis além da precipitação total, como picos de intensidade, duração efetiva, condição antecedente e frequência de pulsos; c) Investigar a resposta da paisagem após eventos extremos, avaliando se e como os gatilhos e se alteram após o distúrbio; d) Compreender a recorrência e os ambientes deflagradores de eventos extremos pretéritos, por meio de estudos morfocronoestratigráficos e reconstruções paleoambientais.

REFERÊNCIAS

ALEOTTI, P. A warning system for rainfall-induced shallow failures. **Engineering Geology**, v. 73, n. 3–4, p. 247–265, 2004.

ANDRADE, M. R. M.; STABILE, R. A.; EGAS, H. M.; MENDES, T. S. G.; METODIEV, D.; CAMARINHA, P. I. M. Spatial analysis of mass movements observed in the disaster of the Northern Coast of São Paulo State, Brazil (2023). In: PAN-AMERICAN CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING, 17.; LATIN-AMERICAN REGIONAL CONFERENCE OF THE INTERNATIONAL ASSOCIATION FOR ENGINEERING GEOLOGY AND THE ENVIRONMENT (IAEG), 2., 2024, La Serena. **Proceedings...** La Serena, 2024.

ARAÚJO, J. P. de C.; LOPES, C. B. M.; NERY, T. D.; EGAS, H. M.; ANDRADE, M. R. M.; STABILE, R. A.; PAULA, D. S. de; MENDES, T. S. G.; BUARQUE, D. C. Avaliação da conectividade hidrossedimentológica na bacia do rio Taquari-Antas (RS): impacto dos movimentos de massa nas inundações de abril/maio de 2024. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 20.; ENCONTRO LUSO-AFRO-AMERICANO DE GEOGRAFIA FÍSICA E AMBIENTE, 4., 2024, João Pessoa. **Anais...** João Pessoa, 2024.

AVELAR, A. S.; COELHO NETTO, A. L.; LACERDA, W. A.; BECKER, L. B.; MENDONÇA, M. B. Mechanisms of the recent catastrophic landslides in the mountainous range of Rio de Janeiro, Brazil. In: MARGOTTINI, C.; CANUTI, P.; SASSA, K. (Ed.). **Landslide Science and Practice**. Springer, 2013. p. 265–270.

BARBOSA, M. L. F.; VEIGA, R. Q.; QUEVEDO, R. P.; DUTRA, D. J.; PESSÔA, A. C. M.; MEDEIROS, T. P.; BURTON, C.; LIU, Y.; ARMOND, N. B.; ABREU, R. C. de; LI, S.; LOTT, F. C.; BORTOLOZO, C. A.; SPARROW, S.; ANDERSON, L. O. Attributing a deadly landslide disaster in Southeastern Brazil to human-induced climate change. **Weather and Climate Extremes**, v. 50, 100811, 2025.

BAUM, R. L.; GODT, J. W. Early warning of rainfall-induced shallow landslides and debris flows in the USA. **Landslides**, v. 7, p. 259-272, 2010.

BERNARDES, T.; REANI, R.; CONCEIÇÃO, R.; LUIZ, R.; LOURENÇO, C.; CARNEIRO, R.; MEDEIROS, M.; SILVA, G. Flood and landslide events database for the municipalities monitored by Brazilian Center for Monitoring and Early Warnings of Natural Disasters - Cemaden. In: EUROPEAN GEOPHYSICAL UNION - GENERAL ASSEMBLY, 2019, Viena. **Geophysical Research Abstracts**, v. 21. p. 1824-1824, 2019.

BRUNSDEN, D.; THORNES, J. B. Landscape Sensitivity and Change. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 4, n. 4, p. 463–484, 1979.

CAINE, N. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. **Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography**, v. 62, n. 1/2, p. 23-27, 1980.

CALPA, D. S.; FERNÁNDEZ, F.; VARGAS, E. A., Jr.; GOMES, G. J. C.; VELLOSO, R. Q.; MIQUELETTI, M.; FUTAI, M. M. Multi-failure numerical analysis of rainfall-triggered landslides at the basin scale. **Computers and Geotechnics**, v. 189, 107622, 2026.

CHANG, K. T.; CHIANG, S. H.; LEI, F. Analysing the relationship between typhoon-triggered landslides and critical rainfall conditions. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 33, n. 4, p. 1261–1271, 2008.

CHEN, Y. C.; CHANG, K. T.; CHIU, Y. J.; LAU, S. M.; LEE, H. Y. Quantifying rainfall controls on catchment-scale landslide erosion in Taiwan. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 37, n. 13, p. 1467–1479, 2012.

COELHO, R. D.; VIANA, C. D.; DIAS, V. C.; GROHMANN, C. H. Landslides of the 2023 summer event of São Sebastião, southeastern Brazil: Spatial dataset. **Brazilian Journal of Geology**, v. 54, n. 2, 2024.

COELHO-NETTO, A. L. Catastrophic landscape evolution in a humid tropic region (SE-Brazil): Inheritances from tectonic, climatic and land use induced changes. **Geografia Física e Dinâmica Quaternaria**, v. 3, p. 21-48, 1999.

COELHO NETTO, A. L.; SATO, A. M.; AVELAR, A. S.; VIANNA, L. G. G.; ARAÚJO, I. S.; FERREIRA, D. L. C.; LIMA, P. H.; SILVA, A. P. A.; SILVA, R. P. January 2011: The extreme landslide disaster in Brazil. In: MARGOTTINI, C.; CANUTI, P.; SASSA, K. (Ed.). **Landslide science and practice: Volume 6. Risk assessment, management and mitigation**. Springer-Verlag, 2013. p. 377–384.

COLÂNGELO, A. C. Sobre os modelos de magnitude-frequência e de estabilidade de vertentes. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 16, p. 1–15, 2005.

COLÂNGELO, A. C.; CRUZ, O. Índice de magnitude-frequência espacial de movimentos de massa num tropical úmido. **GEOUSP Espaço e Tempo: Revista da pós-graduação em Geografia**, n. 8, p. 17-27, 2000.

CROZIER, M. J. A proposed cell model for multiple-occurrence regional landslide events: Implications for landslide susceptibility mapping. **Geomorphology**, v. 295, p. 480–488, 2017.

CROZIER, M. J.; GLADE, T. Frequency and magnitude of landsliding: Fundamental research issues. **Zeitschrift für Geomorphologie, Supplementband**, v. 115, p. 141–155, 1999.

CRUZ, O. **Serra do mar e o litoral na área de Caraguatatuba SP**: contribuição a geomorfologia tropical. 1972. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1972.

DE PLOEY, J.; CRUZ, O. Landslides in the Serra do Mar, Brazil. **CATENA**, v. 6, n. 2, p. 111-122, 1979.

DIAS, H. C.; GROHMANN, C. H. Standards for shallow landslide identification in Brazil: Spatial trends and inventory mapping. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 135, 104805, 2024.

DIAS, V. C.; DIAS, H. C.; GROHMANN, C. H. Rainfall-induced debris flows and shallow landslides in Ribeira Valley, Brazil: Main characteristics and inventory mapping. **E3S Web of Conferences**, v. 415, 05003, 2023.

DOURADO, F.; FERNANDES, N. F. Os escorregamentos da Enseada do Bananal e do Morro da Carioca em Angra dos Reis na baía de Ilha Grande-RJ. In: RODRIGUES, M. A C.; PEREIRA, S. D.; BERGAMASCHI, S. **Interações Homem-Meio Nas Zonas Costeiras – Brasil/Portugal**. Rio de Janeiro: UERJ, 2013. p. 139-146.

EGAS, H. M.; STABILE, R. A.; ANDRADE, M. R. M.; MICHEL, G. P.; ARAÚJO, J. P. C.; MICHEL, R. D. L.; MENDES, T. S. G.; NERY, T. D.; PAULA, D. S.; RECKZIEGEL, E. W. Comprehensive inventory and initial assessment of landslides triggered by autumn 2024 rainfall in Rio Grande do Sul, Brazil. **Landslides**, v. 22, p. 579–589, 2025.

FURIAN, S.; BARBIÉRO, L.; BOULET, R. Organisation of the soil mantle in tropical southeastern Brazil (Serra do Mar) in relation to landslides processes. **CATENA**, v. 38, n. 1, p. 65-83, 1999.

GALLART, F. The relative geomorphic work effected by four processes in rainstorms: A conceptual approach to magnitude and frequency. **CATENA**, v. 25, n. 1, p. 353-364, 1995.

GLADE, T.; CROZIER, M.; SMITH, P. Applying probability determination to refine landslide-triggering rainfall thresholds using an empirical “antecedent daily rainfall model”. **Pure and Applied Geophysics**, v. 157, p. 1059-1079, 2000.

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, p. 13–20, 1977.

GUZZETTI, F.; PERUCCACCI, S.; ROSSI, M.; STARK, C. P. Rainfall thresholds for the initiation of landslides in central and southern Europe. **Meteorology and Atmospheric Physics**, v. 98, p. 239-267, 2007.

GUZZETTI, F.; PERUCCACCI, S.; ROSSI, M.; STARK, C. P. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: an update. **Landslides**, v. 5, p. 3-17, 2008.

HACK, J. T.; GOODLETT, J. C. Geomorphology and forest ecology of a mountain region in the central Appalachians. **Geological Survey Professional Paper**, n. 347, 77 p., 1960.

HARVEY, A. M. Coupling between hillslopes and channels in upland fluvial systems: Implications for landscape sensitivity, illustrated from the Howgill Fells, northwest England. **CATENA**, v. 42, n. 2-4, p. 225-250, 2001.

INSTITUTO GEOLÓGICO. Mapeamento de riscos associados a escorregamentos, inundações e corridas de massa – Relatório Técnico / município de Itaoca, SP. **Boletim do Instituto Geológico**, n. 64, p. 34, 2015.

LIMA, I. F.; FERNANDES, N. F.; VARGAS JUNIOR, E. do A. Análise morfométrica em bacias afetadas por fluxos de detritos na Região Serrana do Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 2, 2020.

LISTO, F. de L. R.; NERY, T. D. Corridas de massa e escorregamentos translacionais na Serra do Mar Paulista: Índices morfométricos e modelo TRIGRS. **Derbyana**, v. 43, e757, 2022.

MARC, O.; GOSSET, M.; SAITO, H.; UCHIDA, T.; MALET, J. P. Spatial patterns of storm-induced landslides and their relation to rainfall anomaly maps. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 20, p. 11167–11177, 2019.

MARC, O.; STUMPF, A.; MALET, J. P.; GOSSET, M.; UCHIDA, T.; CHIANG, S. H. Initial insights from a global database of rainfall-induced landslide inventories: The weak influence of slope and strong influence of total storm rainfall. **Earth Surface Dynamics**, v. 6, p. 903–922, 2018.

MAROTTI, J. C.; GOMES, G. J. C.; VELLOSO, R. Q.; VARGAS JÚNIOR, E. A.; NUNES, R. S.; FERNANDES, N. F. Exploring extreme rainfall-triggered landslides using 3D unsaturated flow, antecedent moisture and spatially distributed soil depth. **Catena**, v. 229, 107241, 2023.

MEIS, M. R. M.; SILVA, J. X. Considerações geomorfológicas a propósito dos movimentos de massa ocorridos no Rio de Janeiro. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 30, n. 1, p. 55–73, 1968.

MONDINI, A. C.; GUZZETTI, F.; MELILLO, M. Deep learning forecast of rainfall-induced shallow landslides. **Nature Communications**, v. 14, p. 2466, 2023.

MTIBAA, S.; TSUNETAKA, H. Revealing the relation between spatial patterns of rainfall return levels and landslide density. **Earth Surface Dynamics**, v. 11, p. 461–474, 2023.

MOROZ, C. B.; THIEKEN, A. H. Urban growth and spatial segregation increase disaster risk: Lessons learned from the 2023 disaster on the North Coast of São Paulo, Brazil. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 24, n. 9, p. 3299–3314, 2024.

REID, L. M. Calculation of average landslide frequency using climatic records. **Water Resources Research**, v. 34, n. 4, p. 869–877, 1998.

SCHUMM, S. A. Geomorphic Thresholds: The Concept and Its Applications. **Transactions of the Institute of British Geographers**, v. 4, n. 4, p. 485–515, 1979.

SEGONI, S.; ROSI, A.; ROSSI, G.; CATANI, F.; CASAGLI, N. Analysing the relationship between rainfalls and landslides to define a mosaic of triggering thresholds for regional-scale warning systems. **Natural Hazards and Earth System Sciences**, v. 14, p. 2637–2648, 2014.

SELBY, M. J. **Hillslope materials and processes**. Oxford: Oxford University Press, 1983. 480p.

SILVEIRA, C. T.; OKA-FIORI, C.; SANTOS, L. J. C.; FIORI, A. P.; SILVEIRA, R. M. M. Mapeamento preliminar da suscetibilidade natural a movimentos de massa da Serra do Mar Paranaense apoiado na análise digital do relevo. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 15, n. 1, p. 3-22, 2014.

STABILE, R. A. **Geomorfodinâmica da interação vertente-canal em eventos de alta magnitude**: considerações acerca dos movimentos de massa no Planalto do Paraitinga (SP). 2023. 299 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

STABILE, R. A.; COLÂNGELO, A. C. Environmental controls on landslide size distribution in the Paraitinga River basin, SE Brazil. **Landslides**, v. 21, n. 1, p. 371–378, 2024.

STABILE, R. A.; COLÂNGELO, A. C. Estudo pluviométrico dos escorregamentos deflagrados no verão de 2009/2010 no Planalto do Paraitinga (SP). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA FÍSICA APLICADA, 17., 2017, Campinas. **Anais...** Campinas, 2017.

STABILE, R. A.; EGAS, H. M.; ARAÚJO, J. P. C.; MENDES, T. S. G.; MICHEL, G. P.; NERY, T. D.; RECKZIEGEL, E. W.; ANDRADE, M. R. M. O que os padrões geométricos dos movimentos de massa podem revelar? Evidências do evento de 2024 no Rio Grande do Sul. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 15., 2025, Natal. **Anais...** Natal, 2025.

STABILE, R. A.; FERNANDES, N. F.; RODRIGUES, C.; COLANGELO, A. C. **How extreme events challenge landslide susceptibility**: Reassessing geomorphic response to high-magnitude rainfall. 2025. Disponível em: <https://ssrn.com>. Acesso em: 10 out. 2025.

STABILE, R. A.; LUIZ, R. A. F.; FERREIRA, A. M.; EGAS, H. M.; ANDRADE, M. R. M. Potencialidades dos limiares de chuva intensidade-duração na previsão de deslizamentos em Jaraguá do Sul (SC). **Derbyana**, v. 43, e772, 2022.

STABILE, R. A.; CAMARINHA, P. I. M.; NERY, T. D.; METODIEV, D.; ANDRADE, M. R. M.; CANAVESI, V.; RECKZIEGEL, E. W.; EGAS, H. M.; COELHO, J. O. M. Índices de precipitação efetiva como indicadores da hidrologia dos deslizamentos: exemplos em Santa Catarina utilizando técnicas de regressão logística. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE GEOMORFOLOGIA, 15., 2025, Natal. **Anais...** Natal, 2025.

STABILE, R. A.; YOUSSEF, P. de P.; KÖRTING, T. S.; LANA, J. C.; NAMIKAWA, L. M.; NERY, T. D.; OLIVEIRA, A. C. de; PACHECO, T. Desastre em São Sebastião-SP: Mapeamento dos processos de movimentos de massa deflagrados em fevereiro de 2023. In: ENCONTRO NACIONAL DE DESASTRES DA ABRHidro, 4., 2024, Curitiba. **Anais...** Curitiba: ABRHidro, 2024.

STERNBERG, H. R. Enchentes e movimentos coletivos do solo no Vale do Paraíba em dezembro de 1948: Influência da exploração destrutiva das terras. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 11, n. 2, p. 223–262, 1949.

SUGIYAMA, M. T. d. O.; BONINI, J. E.; MARTINS, T. D.; VILLAÇA GOMES, M. C.; PEREIRA, S.; VIEIRA, B. C. Statistically-based regional landslide susceptibility assessment in the UNESCO global geopark Caminhos dos Cânions do Sul (Brazil). **Natural Hazards**, v. 121, p. 17439–17469, 2025.

TATIZANA, C.; OGURA, A. T.; CERRI, L. E. S.; ROCHA, M. C. Modelamento numérico de análise de correlação entre chuvas e escorregamentos aplicado às encostas da Serra do Mar, município de Cubatão. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 5., 1987, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABGE, 1987. v. 2, p. 237-248.

TOMAZZOLI, E. R.; FLORES, J. A. A.; BAUZYS, F. Movimentos de massa ocorridos no evento de novembro de 2008, no entorno do Morro do Baú, Vale do Itajaí (SC): caracterização geológico-geomorfológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, 5., 2009, São Paulo. **Anais...** São Paulo, 2009.

VIEIRA, B. C.; FERNANDES, N. F. Landslides in Rio de Janeiro: the role played by variations in soil hydraulic conductivity. **Hydrological Processes**, v. 18, n. 4, p. 791-805, 2004.

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, 260, 2018.

WOLMAN, M. G.; MILLER, J. P. Magnitude and frequency of forces in geomorphic processes. **The Journal of Geology**, v. 68, n. 1, 1960.