Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science
http://periodicos.unievangelica.edu.br/fronteiras/
ISSN 2238-8869

Uma Análise Teórica Sistemática Sobre os Impactos dos Movimentos de Massa em Malhas Viárias

Morvana Machado[1], Eléia Righi[2], Clódis de Oliveira Andrades Filho[3], Guilherme Garcia de Oliveira[4]

[1] Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. ORCID: 0009-0007-9703-2672. Email: morvana.machado@gmail.com
[2] Pós-Doutora no Programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto. Professora adjunta da Universidade Estadual do Rio Grande do Sul. ORCID: 0000-0002-2766-8719. Email: eleia-righi@uergs.edu.br
[3] Doutor em Geociências. Professor Adjunto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. ORCID: 0000-0002-8050-6719. Email: clodisfilho@gmail.com
[4] Doutor em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Professor Adjunto da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. ORCID: 0000-0003-4197-5704. Email: g.g.oliveira10@gmail.com

RESUMO
Os movimentos de massa representam uma ameaça à infraestrutura viária, com consequências para a mobilidade, a conectividade territorial e as atividades econômicas. Assim, este estudo teve como objetivo sistematizar o conhecimento sobre os impactos desses processos nas malhas viárias, considerando seus condicionantes, as consequências socioeconômicas e as estratégias de prevenção e mitigação. A pesquisa adotou uma abordagem qualitativa, fundamentada em revisão bibliográfica e busca de publicações revisadas por pares no Portal de Periódicos CAPES, utilizando os termos "landslides AND roads", no período de 1965 a 13 de fevereiro de 2025. A busca identificou 4.652 documentos, dos quais foram examinados os 30 primeiros registros, selecionando-se 20 artigos relacionados ao tema para discussão. A análise indicou que os impactos decorrem da interação entre características geológicas e geomorfológicas, precipitação e intervenções humanas, como cortes de encostas e alterações na drenagem. As consequências abrangem danos à infraestrutura, isolamento de comunidades, dificuldades de acesso a serviços essenciais e prejuízos ao transporte de insumos e produtos agrícolas. Os estudos também destacaram a contribuição do sensoriamento remoto, do geoprocessamento e da modelagem de suscetibilidade para identificar setores críticos e subsidiar intervenções. Conclui-se que a gestão dos riscos deve integrar a avaliação das encostas à vulnerabilidade e à conectividade das redes de transporte, orientando ações de manutenção preventiva, monitoramento e recuperação. A síntese oferece fundamentos para pesquisas aplicadas ao contexto brasileiro, especialmente às áreas afetadas pelos eventos de 2024 no Rio Grande do Sul.
Palavras-chave: movimentos de massa; infraestrutura viária; conectividade territorial; gestão de riscos.

ABSTRACT
Landslides pose a threat to road infrastructure, with consequences for mobility, territorial connectivity, and economic activities. Thus, this study aimed to systematize knowledge regarding the impacts of these processes on road networks, considering their conditioning factors, socioeconomic consequences, and prevention and mitigation strategies. The research adopted a qualitative approach based on a literature review and a search for peer-reviewed publications on the CAPES Journal Portal, using the terms "landslides AND roads" for the period from 1965 to February 13, 2025. The search identified 4,652 documents; the first 30 records were examined, and 20 articles relevant to the topic were selected for discussion. The analysis indicated that impacts stem from the interaction between geological and geomorphological characteristics, precipitation, and human interventions, such as slope cutting and drainage alterations. Consequences include infrastructure damage, community isolation, difficulties in accessing essential services, and disruptions to the transport of agricultural inputs and products. The studies also highlighted the contribution of remote sensing, geoprocessing, and susceptibility modeling in identifying critical areas and informing interventions. It is concluded that risk management must integrate slope assessment with the vulnerability and connectivity of transport networks, guiding preventive maintenance, monitoring, and recovery actions. This synthesis provides a foundation for research applied to the Brazilian context, particularly regarding areas affected by the 2024 events in Rio Grande do Sul.
Keywords: landslides; road infrastructure; territorial connectivity; risk management.

Submissão: 20/06/2025 Aceite: 03/09/2026 Publicação: 14/11/2026

v.15, n.3, 2026 • p. 70-86. • DOI http://dx.doi.org/10.21664/2238-8869.2026v15i3.8164

© 2021 by the authors. Esta revista oferece acesso livre imediato ao seu conteúdo, seguindo o princípio de que disponibilizar gratuitamente o conhecimento científico ao público proporciona maior democratização mundial do conhecimento. Este manuscrito é distribuído nos termos da licença Creative Commons – Atribuição - NãoComercial 4.0 Internacional (https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode), que permite reproduzir e compartilhar o material licenciado, no todo ou em parte, somente para fim não comercial; e produzir, reproduzir, e compartilhar material adaptado somente para fim não comercial.

Introdução

Redes rodoviárias desempenham um papel vital na manutenção de uma sociedade, e muitos eventos adversos podem afetar o fornecimento de transportes ao longo dessas redes, especialmente desastres naturais como inundações, movimentos de massa e terremotos (Bíl *et al.*, 2015). Os deslizamentos de terra, em particular, podem ser imensamente destrutivos e restringir a livre circulação de pessoas e bens quando afetam direta ou indiretamente as malhas rodoviárias (Winter *et al.*, 2013; Bíl *et al.*, 2015; Meneses *et al.*, 2019).

O sistema viário é um componente crítico da infraestrutura de transporte, desempenhando um papel fundamental na conectividade entre regiões, no escoamento de produção e no acesso a serviços essenciais (Vasconcellos, 2014). No entanto, sua vulnerabilidade a desastres naturais, como movimentos de massa, pode resultar em interrupções significativas, afetando não apenas a mobilidade, mas também a economia e a qualidade de vida das populações atingidas.

No caso do Rio Grande do Sul, a malha viária foi severamente impactada pelos movimentos de massa decorrentes das chuvas intensas de maio de 2024. Rodovias federais, estaduais e municipais sofreram danos como deslizamentos, erosão e bloqueios, comprometendo a circulação de pessoas e mercadorias. A análise do sistema viário no contexto de desastres naturais envolve a identificação de rotas críticas, a avaliação da resiliência da infraestrutura e o planejamento de alternativas para garantir a continuidade dos fluxos de transporte (Rodrigue *et al.*, 2020).

A vulnerabilidade associada aos movimentos de massa são fenômenos naturais que ocorrem devido à combinação de fatores como declividade acentuada, tipo de solo, cobertura vegetal e eventos climáticos extremos, como chuvas intensas (Highland; Bobrowsky, 2008). Esses eventos podem causar danos significativos à infraestrutura, especialmente à malha viária, que muitas vezes é construída em áreas de risco devido à necessidade de conectar regiões com relevo declivoso.

A vulnerabilidade da malha viária a movimentos de massa está relacionada a fatores como a localização das estradas, a qualidade da construção e a manutenção da infraestrutura. No caso do Rio Grande do Sul, a Encosta Sul do Planalto Meridional é uma região particularmente suscetível a esses fenômenos, devido ao seu relevo acidentado e à alta pluviosidade. A perda de conectividade viária em decorrência de deslizamentos e erosão pode isolar comunidades, dificultar o acesso a serviços de emergência e impactar atividades econômicas, como a agricultura e o turismo (Fell *et al.*, 2008).

A importância da malha viária no contexto de desastres naturais vai além da mobilidade, pois ela é essencial para a logística de resposta a emergências, o transporte de insumos médicos e a reconstrução pós-desastre. Portanto, a análise da vulnerabilidade da infraestrutura viária a movimentos de massa é crucial para o planejamento de ações de mitigação e para a construção de estradas mais resilientes, capazes de suportar eventos extremos (Petley, 2012).

Além dos fatores geomorfológicos e climáticos, a vulnerabilidade da malha viária a movimentos de massa também está associada a aspectos antrópicos, como o planejamento inadequado da infraestrutura e a ocupação desordenada do solo (Winter *et al.*, 2018). A construção de rodovias sem estudos geotécnicos detalhados pode levar à implantação de vias em locais instáveis, onde processos erosivos e deslizamentos são mais frequentes.

Neste sentido, a ausência de sistemas eficientes de drenagem pluvial favorece o acúmulo de água nos taludes, reduzindo sua estabilidade e aumentando o risco de rupturas (Liu *et al.*, 2021). Assim, a interação entre fatores naturais e antrópicos desempenha um papel determinante na suscetibilidade das estradas a desastres naturais.

Eventos de movimentos de massa afetando redes viárias não são exclusivos do Rio Grande do Sul. Em 2011, por exemplo, a região serrana do Rio de Janeiro sofreu um dos maiores desastres naturais do Brasil, com deslizamentos que soterraram estradas, isolando municípios inteiros e dificultando a chegada de equipes de resgate (Coelho Netto *et al.*, 2013).

Situações semelhantes ocorreram em países como Japão e Colômbia, onde chuvas extremas desencadearam deslizamentos de terra que comprometeram rodovias estratégicas e causaram elevados prejuízos econômicos (Sidle; Ziegler, 2012). Esses exemplos evidenciam a importância de incorporar a análise de risco geotécnico no planejamento e manutenção de infraestruturas rodoviárias em regiões suscetíveis a movimentos de massa.

Para reduzir os impactos dos movimentos de massa sobre a malha viária, diversas estratégias podem ser adotadas, incluindo o uso de técnicas de bioengenharia para estabilização de encostas, a implementação de barreiras dinâmicas para contenção de detritos e o reforço estrutural de taludes em áreas críticas (Aleotti; Chowdhury, 1999).

Assim como, sistemas de monitoramento e alerta precoces baseados em sensores geotécnicos e meteorológicos podem auxiliar na identificação de instabilidades antes que deslizamentos ocorram, permitindo

ações preventivas e a interdição de vias em tempo hábil (Guzzetti *et al.*, 2020). O investimento em infraestrutura resiliente e no planejamento territorial baseado em estudos geotécnicos detalhados é essencial para garantir a segurança e a funcionalidade das rodovias, especialmente em regiões expostas a riscos naturais.

Neste sentido, o objetivo geral desse trabalho foi elaborar uma base teórica sistemática sobre os impactos dos movimentos de massa em malhas viárias, que é ainda pouco explorada no contexto brasileiro.

Metodologia

A análise de estudos/trabalhos que já foram feitos e publicados, permite a identificação de lacunas de conhecimento, a formulação de hipóteses, objetivos e o estabelecimento de bases teóricas e metodológicas para novas pesquisas. Além disso, permite o levantamento e apreciação crítica do conhecimento já produzido sobre o tema em questão (Gall; Gall; Borg, 2013).

Assim, primeiramente foi organizada uma análise teórica, através de material bibliográfico como livros, artigos, teses, dissertações e materiais disponíveis na internet sobre o objeto do estudo, em formato de pesquisa qualitativa. Conforme Oliveira (2007, p. 37), "a pesquisa qualitativa é um processo de reflexão e análise da realidade através da utilização de métodos e técnicas para compreensão detalhada do objeto de estudo em seu contexto histórico e/ou segundo sua estruturação".

Em um segundo momento, foi utilizado o método bibliográfico de organização e busca, trazendo o apanhado de publicações sobre o tema *LANDSLIDES AND ROADS* (sem aspas) da série histórica da rede CAFe do portal Periódicos CAPES (Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) de 1965 (pois, o assunto toma maior importância acadêmica a partir deste ano) a 2025 (até 13/02/2025) – e somente periódicos revisados por pares. O login foi configurado com os dados dos autores vinculados à Rede da UFRGS.

Assim, o assunto ficou limitado a 4.652 documentos encontrados. Dentre os 30 primeiros artigos com maior impacto da base analisada, somente 20 deles se relacionaram com o tema deste estudo, que foram discutidos no último item do próximo capítulo.

Resultados e Discussões

Os deslizamentos de terra estão entre os desastres naturais mais devastadores em diversas regiões do mundo (Habumugisha *et al.*, 2022). A ocorrência desses eventos está associada a múltiplos fatores, incluindo chuvas intensas, terremotos, atividade vulcânica, elevação do terreno, declividade, cobertura vegetal, propriedades do solo e ações antrópicas, como a construção de estradas, edifícios e práticas agrícolas (Nahayo *et al.*, 2019).

Já no contexto histórico dos deslizamentos e seus impactos sociais, os movimentos de massa são fenômenos que acompanham a humanidade há séculos, com registros históricos que remontam a civilizações antigas. Na Europa, por exemplo, deslizamentos no século XIX causaram destruição em vilarejos alpinos, enquanto na Ásia, eventos como o desastre de Kedarnath na Índia resultaram em milhares de mortes e perdas econômicas significativas (Petley, 2012).

No Brasil, desastres como o de Serra das Araras (RJ) em 1967 e o de Morro do Bumba (RJ) em 2010 marcaram a história do país, evidenciando a vulnerabilidade de áreas urbanas e rurais a esses fenômenos (Carvalho *et al.*, 2019). O megaevento de 2024 na Encosta Sul do Planalto Meridional insere-se nesse contexto, destacando-se como um dos maiores desastres climáticos já registrados na região, com impactos que ecoam os de eventos anteriores, mas em uma escala ampliada devido às mudanças climáticas e à crescente ocupação humana em áreas de risco.

Gariano e Guzzetti (2016), destacam que é essencial analisar os diferentes fatores que influenciam a estabilidade das encostas e causam deslizamentos de terra, tais como volumes extremos de precipitação, derretimento de neve, variações de temperatura, tremores de terra e ações humanas. De forma semelhante, Casagli e Tofani (2025), ressaltam que os estudos sobre movimentos de massa são fundamentais para o desenvolvimento sustentável, pois auxiliam na avaliação de riscos, na redução de desastres e na proteção de comunidades, infraestruturas e ecossistemas.

Esses processos podem gerar impactos severos, resultando em perdas humanas, danos materiais significativos e prejuízos bilionários para recuperação das áreas afetadas (Stanley; Kirschbaum, 2017). Dada a complexidade e o potencial destrutivo dos deslizamentos de terra, é essencial uma compreensão abrangente dos fatores desencadeadores e a aplicação de métodos eficazes para sua prevenção e mitigação (Fang *et al.*, 2023).

Zhang *et al.*, (2024), enfatizam que a análise e quantificação do processo de deformação de deslizamentos são essenciais para permitir o alerta precoce desses eventos. Já, Li *et al.*, (2024), propõem o uso de uma

plataforma em nuvem para monitoramento em tempo real, permitindo a rápida detecção de padrões de deslocamento e uma previsão mais precisa de possíveis rupturas.

Além disso, diversos estudos demonstram que a intensidade e o padrão dos eventos de precipitação exercem influência direta na magnitude e frequência dos deslizamentos de massa (Smith *et al.*, 2023; Emberson *et al.*, 2022; Marc *et al.*, 2018). Segundo Marc *et al.*, (2018), ainda há um conhecimento limitado sobre a relação entre tempestades intensas e a quantidade de deslizamentos de terra esperados em determinadas paisagens, devido à escassez de inventários detalhados sobre eventos induzidos por precipitação extrema.

A distribuição geográfica dos deslizamentos de terra também revela padrões distintos. Em um estudo global, Petley (2012), destaca que esses eventos causam um número de vítimas significativamente maior do que outros desastres naturais, com a maioria das perdas humanas concentradas na Ásia, especialmente ao longo do Arco do Himalaia e na China. Essa concentração de desastres está diretamente relacionada às características geológicas e climáticas da região, bem como à densidade populacional em áreas de risco.

Nos últimos anos, o uso de tecnologias de sensoriamento remoto tem aprimorado o mapeamento e a detecção de deslizamentos de terra. Novellino *et al.*, (2024) analisaram mais de 700.000 deslizamentos em 52 países, utilizando imagens de satélite para identificar padrões de fluxos e rupturas em diferentes paisagens. O estudo destaca que, a partir de 2014, o número de pesquisas na área aumentou significativamente devido à disponibilidade de dados dos satélites Sentinel-1 e Sentinel-2, permitindo análises mais precisas e abrangentes.

No Brasil, e especialmente no Estado do Rio Grande do Sul, eventos climáticos extremos têm intensificado a frequência de deslizamentos de terra, inundações e enxurradas, tanto em áreas urbanas quanto rurais (Figura 1). Nesse contexto, diversos métodos foram desenvolvidos para mapear áreas suscetíveis a esses processos, incluindo o uso de redes neurais artificiais (RNA) e algoritmos de aprendizado de máquina, como o random forest (Quevedo *et al.*, 2019). O estudo de Quevedo *et al.* (2019) considerou atributos como elevação, declividade, fator LS (*Slope Length and Steepness Factor*) e profundidade do vale como elementos determinantes para a previsão de movimentos de massa no estado.



Figura 1: Movimento de massa no município de Santa Tereza – RS.Fonte: Autores (2025).

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) alerta que as mudanças climáticas têm intensificado os eventos extremos em todo o mundo nos últimos 50 anos, aumentando a frequência e severidade de desastres naturais (Silva *et al.*, 2022). Entre esses eventos, destacam-se as inundações e deslizamentos em áreas urbanas e rurais brasileiras, resultando em prejuízos socioeconômicos significativos.

Em maio de 2024, o Estado do Rio Grande do Sul decretou estado de calamidade pública devido às chuvas intensas iniciadas em abril. De acordo com a classificação oficial da Defesa Civil, os impactos foram considerados de Nível III, caracterizados por danos e prejuízos elevados (Defesa Civil, 2007). O evento climático inclui chuvas extremas, alagamentos, granizo, inundações, enxurradas, deslizamentos e ventos de alta intensidade. Segundo Marengo *et al.* (2024), essas inundações sem precedentes afetaram mais de 90% dos municípios do estado (478 dos 497 municípios gaúchos), resultando em 183 óbitos confirmados, 27 desaparecidos e mais de 2,3 milhões de pessoas afetadas (Defesa Civil, 2024).

O fenômeno El Niño Oscilação Sul (ENSO) foi apontado como um fator determinante para a variabilidade das chuvas registradas no período. Durante o evento, os rios Taquari, Caí, dos Sinos e das Antas atingiram níveis recordes, superando marcas históricas de monitoramento e inundando diversas cidades (Marengo *et al*., 2024). Collischonn *et al.* (2024), ressaltam que as chuvas de maio de 2024 superaram amplamente os eventos de precipitação extrema observados no Brasil entre 1961 e 2022, tanto em volume quanto em extensão territorial.

Conforme o Decreto 57.626, de 21 de maio de 2024, 78 municípios foram oficialmente declarados em estado de calamidade pública e 340 municípios em situação de emergência (Rio Grande do Sul, 2024). Além dos impactos urbanos, as chuvas intensas inundaram vastas áreas agrícolas, comprometendo plantações e pastagens. Esse cenário afetou diretamente a produção agropecuária, resultando em perdas econômicas significativas e impactando toda a cadeia de suprimentos (Bateleur, 2024).

A intensificação dos desastres naturais nas últimas décadas tem sido amplamente associada às mudanças climáticas, que afetam os padrões de precipitação e aumentam a frequência de eventos meteorológicos extremos (IPCC, 2021). Em diversas partes do mundo, observam-se tendências de aumento da intensidade e da variabilidade das chuvas, o que agrava a instabilidade das encostas e contribui para o desencadeamento de deslizamentos de terra (Sudmeier-Rieux e*t al*., 2021). No Brasil, estudos apontam que o aumento da temperatura global e as alterações no regime de chuvas têm elevado a incidência de movimentos de massa, especialmente em regiões montanhosas e áreas de relevo acidentado (Almeida *et al.,* 2020).

Além dos fatores climáticos, as características geológicas desempenham um papel crucial na suscetibilidade das áreas a deslizamentos. Solos argilosos, altamente suscetíveis à saturação hídrica, e formações geológicas com fraturas e falhamentos estruturais aumentam a probabilidade de instabilidade das encostas (Fernandes; Amaral, 2019). No caso do Rio Grande do Sul, a presença de rochas sedimentares e vulcânicas na Encosta Sul do Planalto Meridional favorece a erosão e a ocorrência de deslizamentos em períodos de precipitação intensa (Rossi; Oliveira, 2022). Assim, a interação entre fatores geológicos e climáticos deve ser considerada na avaliação da vulnerabilidade a esses eventos.

Diante da crescente incidência de deslizamentos de terra e de seus impactos sociais e econômicos, torna-se fundamental a adoção de estratégias de monitoramento e mitigação de riscos. O uso de tecnologias de sensoriamento remoto e modelagem preditiva tem se mostrado uma ferramenta essencial na identificação de áreas suscetíveis e na implementação de sistemas de alerta precoce (Gomez; Gutierrez, 2023).

Além disso, a integração de políticas públicas voltadas para a gestão territorial e a adaptação das infraestruturas a cenários climáticos extremos é crucial para reduzir os impactos desses eventos (Reyes; Soares, 2021). Dessa forma, a análise dos deslizamentos de terra deve considerar tanto os processos naturais quanto às intervenções humanas no ambiente, visando ao desenvolvimento de estratégias eficazes para minimizar os danos.

Risco, vulnerabilidade e perigo

Em relação aos conceitos que são utilizados sobre risco, vulnerabilidade e perigo, muitos autores já se debruçaram em organizar de forma clara e objetiva. O trabalho de Riffel, Guasselli e Bressani (2016), ressalta que apesar de não existir um consenso em relação aos conceitos utilizados pelos diversos órgãos de pesquisa e de defesa civil, é possível entender o que significa cada um deles (Quadro 1).

Quadro 1: Conceitos organizados no estudo de Riffel, Guasselli e Bressani (2016).

Termo	***Conceito:***
Suscetibilidade	Suscetibilidade é a propensão do terreno à ocorrência de fenômeno e/ou processo físico
Vulnerabilidade	Vulnerabilidade é a capacidade da sociedade de enfrentar e/ ou suportar um evento catastrófico
Perigo	Perigo é uma situação potencial para provocar danos
Ameaça	Ameaça é uma situação potencial para provocar danos
Risco	Risco é a probabilidade de ocorrência de evento danoso a partir da relação entre Suscetibilidade e Perigo. Risco é caracterizado pela interação entre ameaça e vulnerabilidade.

Fonte: Riffel, Guasselli e Bressani (2016).

O Brasil hoje utiliza de sua malha rodoviária para escoar a produção agropecuária e industrial. As rodovias municipais, estaduais e federais não apenas conectam cidades, mas também viabilizam o transporte de mercadorias e o acesso a serviços essenciais. Segundo Bil *et al.* (2015), interrupções nessas vias isolam comunidades, afetando diretamente setores como saúde e educação.

Essa vulnerabilidade estrutural da malha rodoviária manifesta-se de forma particularmente crítica em contextos geomorfológicos específicos. A construção de infraestruturas viárias em encostas íngremes, por exemplo, além de representar um desafio de engenharia, altera significativamente a dinâmica hidrológica local, aumentando a suscetibilidade a processos de movimentos de massa (Winter *et al.*, 2013). Tais intervenções, quando não acompanhadas de adequadas medidas de mitigação, acabam por potencializar os riscos sistêmicos já existentes na infraestrutura de transporte.

A malha viária também se reflete no impacto econômico causado pelos deslizamentos. Um exemplo claro foi na região administrativa da EMATER/RS-Ascar de Caxias do Sul, a safra de caqui sofreu grandes perdas devido aos bloqueios nas rodovias. Produtores não conseguiram escoar a produção, o que não apenas gerou prejuízos financeiros, mas também impactou o abastecimento do mercado consumidor (Agrolink, 2024, EMATER, 2024). Esse episódio demonstra como a fragilidade estrutural do sistema viário produz efeitos em cascata, comprometendo simultaneamente: (i) a integridade física das vias, (ii) a viabilidade econômica de cadeias produtivas, e (iii) o acesso da população a bens essenciais.

No contexto geotécnico, perigo refere-se à potencialidade de ocorrência de deslizamentos, independentemente de sua interação com sistemas humanos (Fell *et al.*, 2008). Essa probabilidade é intrínseca a fatores naturais como geologia, geomorfologia e padrões climáticos. O Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais (CEMADEN) emitiu previsões de risco geológico para o período de 4 a 6 de maio de 2024, indicando alta probabilidade de deslizamentos nas mesorregiões Centro Ocidental Rio-Grandense, Centro Oriental Rio-Grandense, Metropolitana de Porto Alegre, Nordeste e Noroeste Rio-Grandense. Esses deslizamentos afetaram tanto encostas urbanizadas quanto naturais, além de causarem quedas de barreiras em estradas e rodovias (CEMADEN, 2024).

Embora os deslizamentos tenham impacto significativo a malha rodoviária do Planalto Meridional, é importante notar que esses eventos também ocorreram em áreas naturais e urbanizadas, independentemente da interação direta com sistemas humanos (CEMADEN, 2024). As encostas naturais, devido à saturação do solo pelas chuvas intensas, foram suscetíveis a movimentos de massa, resultando em deslizamentos que comprometeram infraestruturas viárias na região. Durante o megaevento de maio de 2024, por exemplo, as equipes de resgate iniciaram a buscas por 34 pessoas que ficaram presas em um deslizamento na rodovia em um trecho que liga Veranópolis a Bento Gonçalves (G1, 2024). Esse tipo de situação reforça a necessidade de um planejamento mais robusto para reduzir os impactos dos desastres naturais na mobilidade e no acesso a serviços essenciais.

O risco incorpora a dimensão antrópica, representando a conjunção entre: (i) a probabilidade de ocorrência do evento perigoso e (ii) a magnitude de suas consequências sobre a infraestrutura e populações. No âmbito rodoviário, traduz-se na exposição da malha viária a danos e interrupções (UNISDR, 2017).

Os deslizamentos de terra em rodovias são influenciados por diversos fatores naturais e antrópicos. No aspecto geológico, rodovias construídas sobre solos residuais tropicais, como os saprolitos, ou em encostas com litologias fraturadas, apresentam maior suscetibilidade a movimentos de massa (Winter *et al.*, 2013). Essas condições tornam o solo menos coeso e mais propenso a instabilização, principalmente quando submetido a eventos climáticos extremos. Além disso, padrões de precipitação intensa, como aqueles associados às Zonas de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS), atuam como gatilhos para deslizamentos, saturando o solo e reduzindo sua capacidade de suporte.

Os fatores antrópicos também desempenham um papel crucial na exposição e vulnerabilidade das rodovias a deslizamentos. Cortes inadequados em encostas durante a construção viária podem aumentar a razão altura/inclinação de taludes, tornando-os estruturalmente mais instáveis (DNIT, 2020). Esse tipo de intervenção, quando realizada sem um planejamento geotécnico adequado, eleva significativamente o risco de colapsos. Além disso, a ausência de medidas de mitigação, como a instalação de cortinas atirantadas e sistemas de drenagem profunda, potencializa os impactos dos deslizamentos, pois não há estruturas que auxiliem na contenção do solo ou no escoamento adequado das águas pluviais (Nery; Reis, 2014).

Para minimizar os riscos associados a esses fatores, é essencial adotar soluções técnicas eficientes e sustentáveis. Estudos geotécnicos prévios, a utilização de materiais apropriados na construção de rodovias e a implantação de medidas de drenagem eficazes são fundamentais para reduzir a ocorrência de deslizamentos.

Além disso, monitoramento constante e políticas públicas voltadas para a prevenção de desastres naturais são indispensáveis para garantir a segurança da infraestrutura rodoviária e das populações que dela dependem.

A matriz de risco para rodovias, avalia se o risco pode ser estratificado em três níveis, conforme adaptado de Hungr *et al.* (2014). Rodovias de baixo risco são aquelas localizadas em planícies com solos estáveis e drenagem adequada, onde a probabilidade de ocorrência de deslizamentos é reduzida. No nível de médio risco, encontram-se vias em áreas de transição que apresentam histórico de pequenos deslizamentos, sendo necessárias intervenções preventivas para evitar danos estruturais. Por fim, o alto risco está associado a corredores viários em encostas íngremes, frequentemente afetados por processos de instabilização devido à ocupação desordenada e eventos recorrentes de deslizamentos, demandando medidas rigorosas de contenção e monitoramento constante.

Dessa forma, a compreensão dos conceitos de risco, vulnerabilidade e perigo é fundamental para a formulação de estratégias de prevenção e resposta a desastres naturais. As rodovias são infraestruturas essenciais para a economia e a mobilidade da população, e sua proteção deve ser uma prioridade para minimizar impactos e garantir a segurança das regiões suscetíveis a movimentos de massa.

Sensoriamento remoto e geoprocessamento

O sensoriamento remoto é uma tecnologia que permite a aquisição de informações sobre a superfície terrestre sem a necessidade de contato físico direto, utilizando sensores instalados em plataformas aéreas (como drones e aviões) ou orbitais (satélites). Essa técnica tem sido amplamente utilizada em estudos ambientais, geológicos e de infraestrutura, devido à sua capacidade de fornecer dados em diferentes escalas espaciais, temporais e espectrais, cobrindo grandes áreas de forma rápida e eficiente (Jensen, 2009; Novo, 2010).

No contexto de desastres naturais, como os movimentos de massa ocorridos no Rio Grande do Sul em maio de 2024, o sensoriamento remoto desempenhou um papel crucial no monitoramento, mapeamento e análise dos impactos. Imagens de satélites ópticos (como Landsat, Sentinel-2 e CBERS) e de radar (como Sentinel-1) permitem identificar alterações na superfície terrestre, como deslizamentos, inundações e danos à infraestrutura viária, mesmo em áreas de difícil acesso (Zhou *et al.*, 2018).

A integração de dados de sensoriamento remoto com sistemas de informações geográficas (SIG) possibilita a geração de mapas temáticos, a modelagem de suscetibilidade a movimentos de massa e a avaliação de danos à malha viária. Técnicas como a classificação de imagens, análise de séries temporais e detecção de mudanças são frequentemente empregadas para monitorar a dinâmica ambiental e identificar áreas críticas após eventos extremos (Lu *et al.*, 2016).

No caso específico do mega desastre no Rio Grande do Sul, o sensoriamento remoto foi utilizado para mapear a extensão dos movimentos de massa, avaliar os danos às estradas e rodovias, e monitorar a recuperação das áreas afetadas. A combinação de dados multitemporais e multiespectrais permitiu uma análise abrangente dos impactos, fornecendo subsídios para o planejamento de ações de mitigação e para uma reconstrução na infraestrutura viária.

O geoprocessamento é um conjunto de técnicas e ferramentas computacionais utilizadas para coletar, armazenar, processar e analisar dados georreferenciados, permitindo a geração de informações espaciais para tomada de decisão (Câmara; Davis, 2001). Essas técnicas são fundamentais para o estudo de fenômenos ambientais e socioeconômicos, como os movimentos de massa, pois permitem a integração de dados de diversas fontes (sensoriamento remoto, mapas temáticos, bancos de dados) em um sistema de informações geográficas (SIG).

No contexto do mega desastre ocorrido no Rio Grande do Sul em 2024, o geoprocessamento foi essencial para mapear a extensão dos danos à malha viária, identificar áreas críticas e planejar ações de recuperação (Figura 2). Ferramentas como análise espacial, modelagem digital de terreno (MDT) e sobreposição de camadas temáticas permitiram avaliar a interação entre fatores naturais (como declividade, tipo de solo e cobertura vegetal) e a infraestrutura viária, fornecendo subsídios para a compreensão dos impactos dos movimentos de massa (Burrough *et al.,* 2015).



Figura 2: Movimento de massa atingindo estrada e residência na área rural, no megaevento do ano de 2024. Fonte: Imagem cedida pelo IGEO – UFRGS (2024).

Nos últimos anos, os avanços tecnológicos no campo do sensoriamento remoto têm possibilitado uma melhoria significativa na detecção e monitoramento de desastres naturais. A crescente disponibilidade de satélites de alta resolução, aliada ao uso de sensores a bordo de drones, permite uma análise mais detalhada e em tempo real dos impactos ambientais e infraestruturais causados por eventos extremos (Tucker *et al.,* 2018). O uso de imagens multiespectrais e hiperespectrais tem sido fundamental para a caracterização de áreas afetadas por deslizamentos, permitindo a diferenciação entre superfícies expostas, vegetação e solo instável (Li *et al*., 2020).

Casos internacionais demonstram a relevância do sensoriamento remoto na resposta a desastres. No Japão, por exemplo, após o terremoto e tsunami de 2011, imagens de satélite foram amplamente utilizadas para mapear as áreas afetadas e auxiliar no planejamento da reconstrução (Gamba; Marchese, 2019). Da mesma forma, após o terremoto de 2015 no Nepal, tecnologias de detecção remota foram empregadas para identificar deslizamentos induzidos pelo sismo e para monitorar a recuperação das áreas impactadas (Kargel *et al*., 2016). Esses exemplos reforçam o potencial do sensoriamento remoto como ferramenta essencial para a gestão de riscos e a resposta rápida a desastres.

Além do monitoramento dos impactos de eventos passados, o geoprocessamento desempenha um papel crucial na modelagem preditiva de áreas suscetíveis a deslizamentos de terra e na criação de sistemas de alerta precoce. Modelos baseados em análise espacial e aprendizado de máquina têm sido desenvolvidos para estimar a probabilidade de ocorrência de movimentos de massa, integrando variáveis como declividade, precipitação, tipo de solo e uso da terra (Paulo *et al*., 2022). No exemplo do Rio Grande do Sul, a aplicação de sistemas de informações geográficas para identificar áreas de risco e simular cenários futuros pode contribuir para a formulação de políticas públicas mais eficazes na redução da vulnerabilidade da infraestrutura viária e na mitigação de danos causados por eventos extremos.

Estudos de caso

Dentre os 30 primeiros artigos com maior impacto da base analisada, somente 20 deles se relacionaram com o tema deste estudo, que serão discutidos a seguir.

Assim, Berlin e Anand (2014), trazem uma tecnologia emergente para um Sistemas de Transporte Inteligentes, propondo um Protocolo de Roteamento de Riscos, para disseminar informações sobre riscos fixos em estradas, como bloqueios de estradas, queda de árvores, pedras na estrada, acúmulo de neve, deslizamentos de terra, trabalhos de manutenção e outros obstáculos para os veículos que se aproximam de um local perigoso. Os autores ressaltam a importância do desenvolvimento de protocolos e metodologias para disseminar a segurança e os perigos das estradas usando a comunicação veículo a veículo.

Meneses, Pereira e Reis (2019), analisaram a influência de dados de uso e cobertura do solo com diferentes propriedades na zona de suscetibilidade a deslizamentos da rede rodoviária em uma bacia hidrográfica de Portugal. O estudo permitiu a identificação dos locais com maior probabilidade espacial de ocorrência de deslizamentos que afetam diretamente as estradas.

Sharma *et al.* (1991), se preocuparam em relatar que o tratamento extensivo de controle de sedimentos é necessário para melhorar a segurança e a eficiência dos muitos projetos hidrelétricos, e as principais fontes de sedimentos são erosão de ravinas, erosão de margens de riachos, deslizamentos de terra, construção de estradas e erosão de geleiras.

Postance *et al.* (2017), organizaram um estudo sobre riscos de deslizamentos na rede rodoviária da Escócia. Os resultados indicaram que pelo menos 152 segmentos de estradas são suscetíveis a deslizamentos, o que pode causar perdas econômicas indiretas superiores a £35 mil (Libra Esterlina) para cada dia de fechamento. Além disso, estimativas anteriores para eventos históricos de deslizamentos podem ter subestimado significativas perdas socioeconômicas.

Mapas de suscetibilidade a deslizamentos de terra são amplamente utilizados para diferentes propósitos, como redução dos efeitos dos movimentos de massa, tomada de decisão e planejamento, assim Eker e Aydin (2014), verificaram que deslizamentos de terra relacionados a estradas são comuns em áreas florestais na Turquia, porque as estradas estão localizadas em regiões montanhosas com declives acentuados, neste sentido, além de seu impacto nas florestas, deslizamentos de terra podem causar danos aos leitos das estradas, o que requer manutenção imediata.

Haigh e Rawat (2011), estudaram os deslizamentos de terra e inundações que atingiram o distrito himalaio de Almora (Uttarakhand), durante o fim da monção de 2010. O fenômeno afetou milhares de quilômetros de estradas e seus danos somaram mais de US$ 125 milhões. Portanto, a altura do corte da estrada, a incisão do canal que minou o corte da estrada e, especialmente, a inclinação da encosta na encosta se mostraram significativas.

Deslizamentos de terra e queda de rochas são os riscos naturais mais comuns e perigosos para infraestrutura de tráfego linear em regiões montanhosas, conforme aponta, Laimer (2017). O autor traz um inventário de movimentos de massa que afetaram a rede das Ferrovias Federais Austríacas entre 2005 e 2015, e a análise dos 106 eventos da série histórica mostrou que os induzidos antropogenicamente (71,7%) superam os induzidos naturalmente (28,3%). As atividades humanas no contexto da construção de infraestrutura de transporte constituem mais da metade de todas as causas de deslizamentos de terra (Laimer, 2017).

Yu *et al.* (2022), aplicaram uma metodologia de *Machine Learning* em uma área que receberia a construção de uma estrada/rodovia em Wanzhou, China. A abordagem baseada em dados foi aplicada para derivar mapas regionais de suscetibilidade a deslizamentos. Portanto, o mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos pode fornecer informações valiosas para governos locais na prevenção e mitigação de deslizamentos.

Um trabalho organizado no Nepal, verificou que mais de 40% dos deslizamentos de terra recentemente desencadeados cruzaram uma estrada e 84% deles estão localizados a uma distância de 40 metros dela. As estradas estão, portanto, influenciando a estabilidade da encosta por meio do corte e concentrando água da superfície, alterando assim os padrões hidrológicos, que estão desestabilizando as partes superiores (Vuillez *et al.* 2018).

O artigo de Liu *et al.* (2022), apresenta uma análise probabilística do risco de deslizamento de terra encontrado em uma rodovia regional, sendo que o risco é considerado uma função de dados geográficos e da vulnerabilidade das estradas. Os resultados mostraram que a probabilidade da estrada regional atingir um estado de dano específico varia com o intervalo de tempo, escala de deslizamento de terra e localização espacial.

Deslizamentos causam danos severos à malha viária da zona atingida, tanto em termos de custos diretos (destruição parcial ou completa de uma estrada ou bloqueios) quanto indiretos (restrição de tráfego ou interdição de uma determinada área), conforme enfatiza Bordoni *et al.* (2018). Neste sentido, Bordoni *et al.* (2018), realizaram um estudo em uma bacia hidrográfica do nordeste de Oltrepò Pavese (norte da Itália), onde vários deslizamentos de terra superficiais afetaram estradas nos últimos anos. Os resultados demonstram a capacidade da metodologia desenvolvida na avaliação de estradas suscetíveis, trazendo aos gestores de infraestrutura informações sobre a criticidade das diferentes características das estradas, permitindo assim que a atenção e os orçamentos econômicos sejam transferidos para os ativos mais críticos, onde medidas de mitigação estruturais e não estruturais poderiam ser implementadas.

Já, Bozhinova-Haapanen (2016), relata que a Bulgária é um país com relevo de várias elevações e com uma pré-condição para o surgimento de deslizamentos de terra de diferentes tipos.

Portanto, a expansão dos sistemas de estradas em Serras e Montanhas em países em desenvolvimento aumentou significativamente o risco de deslizamentos de terra e sedimentação, e criou vulnerabilidades para

moradores e recursos aquáticos (Sidle; Ghestem.; Stokes, 2014). É necessária uma abordagem mais sustentável para o desenvolvimento de estradas com base em uma análise da suscetibilidade a deslizamentos de terra e como os limites para mecanismos de gatilho seriam modificados pela localização da estrada e diferentes técnicas de construção (Sidle; Ghestem.; Stokes, 2014).

Zhou *et al.* (2024), investigaram o risco de redes rodoviárias sob a influência de deslizamentos de terra em seis condados adjacentes à província de Sichuan e à província de Yunnan, ambos na China, considerando a suscetibilidade a deslizamentos de terra e a vulnerabilidade das estradas. O comprimento total da estrada analisada foi de 4.631,63 km. Chuvas fortes na área de estudo concentram-se em junho, julho e agosto, com até 100 mm / dia. Em centros de tempestades, a reativação de deslizamentos de terra é frequentemente desencadeada. Portanto, a distribuição das áreas de alto, médio e baixo risco representou 14,23%, 3,08% e 82,69% da área total do estudo.

No Marrocos, deslizamentos de terra representam desafios recorrentes para projetos rodoviários devido a fatores como litologia, clima, estruturas de fenda e altas altitudes. Portanto, desenvolver mapas de suscetibilidade para deslizamentos de terra é crucial para antecipar e tomar as medidas adequadas (Youssef *et al.*, 2023). Como a Rodovia Nacional Número 9, particularmente na região de Tizi N'tichka no Alto Atlas, enfrenta problemas significativos de deslizamentos de terra, os autores Youssef *et al.* (2023), organizaram um mapa de suscetibilidade, permitindo medidas proativas para mitigar os impactos de deslizamentos de terra na infraestrutura rodoviária.

Jalooli *et al.* (2014), ressaltam que os deslizamentos de terra são um desastre geológico sério que tem impacto severo na segurança rodoviária, eficiência do fluxo de tráfego e preservação ambiental. Portanto, os autores projetaram uma técnica de detecção de deslizamento de terra baseada em (i) detecção de movimento e (ii) métodos de movimento cruzado. Eles são aplicados em uma fase de detecção, a fim de identificar o grau de influência do deslizamento de terra na capacidade da estrada, considerando as dimensões dos veículos.

O artigo de Pecoraro *et al.* (2023), apresenta um procedimento para avaliar, em escala municipal, o nível de risco (ou atenção necessária) de trechos de estradas expostos à atividade de deslizamentos de terra lentos existentes ou potenciais. O procedimento analisado pelos autores, pode ser aplicado para dar suporte a estudos de redes rodoviárias em grandes áreas visando à priorização de medidas de mitigação de risco e à identificação de seções rodoviárias que requerem investigação adicional.

Taylor (2012), analisou um modelo de regressão logística que foi organizado para avaliar a possibilidade de deslizamento de terra com nove fatores e 359 amostras, assim, quanto maior a perda esperada, maior é a quilometragem da estrada exposta a deslizamentos de terra.

Metodologias baseadas em imagens de alta resolução adquiridas de veículos aéreos não tripulados (VANTs), foram utilizadas para analisar um deslizamento de terra que afetou algumas estradas e acessos a uma rodovia na Espanha (Cardenal *et al.*, 2019). Neste sentido, equipamentos leves são bem adequados para atualizações e monitoramento de deslizamentos de terra e, portanto, para previsão ou análise de perigos e riscos (Cardenal *et al.*, 2019).

Chau *et al.* (2004), estabeleceram um mapa de zoneamento de risco para a Ilha de Hong Kong é estabelecido usando dados históricos, e em relação a frequência-volume para a Ilha de Hong Kong, foi estimado que o período de retorno de um deslizamento de terra de 26.000 m^3 é de cerca de 3,12 anos. As áreas de ocupação e estradas em Hong Kong possuem o maior risco. Portanto, torna-se necessário o uso de tecnologia GIS para incorporar várias camadas com dados geológicos, geomorfológicos, populacionais, climáticos e de precipitação para gerar mapeamento de risco.

Após todos esses exemplos, é possível concluir que os riscos geológicos ao longo das rodovias representam uma preocupação prevalente no campo da engenharia, sendo uma ameaça que impacta a segurança de várias pessoas (Liu *et al.*, 2022). Assim, as rodovias, como infraestruturas lineares, inevitavelmente atravessam várias unidades geomorfológicas, encontrando uma ampla gama de condições geológicas e topográficas complexas, ao mesmo tempo em que permanecem vulneráveis a diversos desastres naturais (Liu *et al.*, 2022).

Considerações Finais

A revisão da literatura permitiu sistematizar os principais fatores associados aos movimentos de massa e compreender suas repercussões sobre as malhas viárias, articulando aspectos físicos, socioeconômicos e de gestão territorial. Os estudos analisados indicam que a ocorrência e os impactos desses processos envolvem a interação entre condições geológicas e geomorfológicas, precipitação, uso e cobertura da terra e intervenções humanas. Assim, a compreensão da vulnerabilidade das vias exige uma abordagem integrada, que considere as características das encostas, as condições de implantação da infraestrutura e sua importância para a organização dos fluxos regionais.

Um aspecto recorrente na literatura examinada é o duplo papel das estradas na dinâmica dos movimentos de massa: ao mesmo tempo que estão expostas a esses processos, sua construção e manutenção podem modificar a estabilidade das encostas. Cortes de taludes, remoção da cobertura vegetal e alterações nos caminhos de escoamento da água podem favorecer instabilidades quando não acompanhados de soluções adequadas às condições locais. Entretanto, a influência desses fatores varia conforme o contexto ambiental e as características das intervenções, o que reforça a necessidade de avaliações específicas e impede a adoção de explicações baseadas exclusivamente na declividade ou na intensidade das chuvas.

Os impactos identificados ultrapassam a destruição física das vias e os custos imediatos de desobstrução e reconstrução. A interrupção de segmentos rodoviários pode comprometer a circulação de pessoas e mercadorias, dificultar o acesso a serviços de saúde e às ações de emergência, ampliar os tempos de deslocamento e isolar comunidades. Nas áreas rurais, essas interrupções também prejudicam o recebimento de insumos e o escoamento da produção, com consequências para produtores, agroindústrias e mercados consumidores. Dessa forma, a dimensão dos prejuízos depende tanto da magnitude do processo quanto da função desempenhada pelo trecho atingido e da disponibilidade de alternativas de circulação.

Essa constatação evidencia a importância de analisar a infraestrutura como uma rede interdependente. Um bloqueio espacialmente localizado pode produzir consequências em áreas distantes da ocorrência, sobretudo quando afeta corredores estratégicos ou localidades atendidas por poucas conexões. Portanto, a priorização de intervenções deve combinar a suscetibilidade das encostas, a exposição e a vulnerabilidade das vias e sua relevância para a conectividade territorial. A consideração conjunta desses elementos oferece uma base mais consistente para direcionar recursos, identificar trechos críticos e planejar respostas capazes de reduzir os efeitos das interrupções.

A literatura analisada também destaca a contribuição do sensoriamento remoto, do geoprocessamento e dos modelos de suscetibilidade para o reconhecimento de áreas potencialmente instáveis e o acompanhamento de alterações na superfície. Essas ferramentas permitem integrar informações sobre relevo, cobertura da terra, precipitação e localização das ocorrências, apoiando o planejamento e a gestão da infraestrutura. Sua aplicação, contudo, deve ser acompanhada da avaliação da qualidade e da resolução dos dados, da validação dos resultados e, conforme a finalidade do estudo, de investigações de campo. Desse modo, os produtos cartográficos e os modelos podem subsidiar decisões sem substituir a análise geotécnica necessária às intervenções locais.

No contexto brasileiro, e particularmente no Rio Grande do Sul, os eventos de 2024 reforçam a relevância de incorporar a gestão de riscos ao planejamento, à manutenção e à reconstrução das malhas viárias. As evidências discutidas sustentam a necessidade de articular medidas estruturais, como adequação da drenagem e estabilização de taludes, com ações de monitoramento, manutenção preventiva, comunicação de riscos e planejamento de rotas alternativas. A escolha dessas medidas deve considerar as condições de cada trecho e a proteção das populações que dependem da infraestrutura, buscando reduzir a possibilidade de novas interrupções e favorecer o restabelecimento dos serviços essenciais.

Como limitação, este trabalho apresenta uma síntese qualitativa delimitada pela estratégia de busca e pelo conjunto de publicações selecionadas, não constituindo um levantamento exaustivo da produção científica sobre o tema. Além disso, a diversidade de escalas, métodos e contextos dos estudos examinados restringe comparações diretas e a transferência de seus resultados para outras regiões. As conclusões, portanto, oferecem fundamentos para a interpretação dos impactos e para a formulação de novas investigações, mas não permitem quantificar o risco de segmentos específicos nem estabelecer relações causais para as ocorrências registradas no Rio Grande do Sul.

Como continuidade, recomenda-se desenvolver pesquisas que integrem inventários georreferenciados de movimentos de massa, características das encostas, condições de conservação das vias e indicadores de conectividade. Também são relevantes estudos sobre a duração dos bloqueios, os custos de deslocamento por rotas alternativas e os prejuízos associados à interrupção de atividades produtivas e serviços. A principal contribuição desta revisão é reunir elementos para aproximar a análise dos processos geomorfológicos da compreensão de suas consequências territoriais. Essa integração pode fortalecer decisões de prevenção e recuperação, orientando a construção de redes de transporte mais seguras e capazes de manter ou restabelecer suas funções diante de eventos adversos.

Agradecimentos

Agradecemos à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS) pela concessão de apoio financeiro aos projetos de pesquisa vinculados aos Termos de Outorga nº 24/2551-0002124-8 e nº 25/2551-0002522-2, contemplados nos Editais FAPERGS 06/2024 e 05/2025.

Referências

Agrolink RS. 2024. *Perdas safra de caqui ameaçam produtores*. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/noticias/perdas-safra-de-caqui-ameacam-produtores_491358.html. Acesso em: 28 mar. 2025.

Aleotti, P.; Chowdhury, R. 1999. Landslide hazard assessment: summary review and new perspectives. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, v. 58, p. 21-44.

Almeida, A. C.; Medeiros, T. M.; Ferreira, M. C. 2020. Impactos das mudanças climáticas sobre deslizamentos de terra no Brasil. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, p. 2045-2062.

Bateleur.2024. *Macro Impactos Econômicos das Enchentes no Rio Grande do Sul.* Disponível em: https://www.bateleur.com.br/public/files/uUbjnQk1CkeLm7wypXBu5Qj8SvrN9ilsHlXbPz6m.pdf. Acesso em: 07 jul. 2024.

Berlin, M. A.; Anand, S. 2014. Direction based Hazard Routing Protocol (DHRP) for disseminating road hazard information using road side infrastructures in VANETs. *Springer Plus*. 3, 173. https://doi.org/10.1186/2193-1801-3-173

Bíl, M. *et al.* 2015. Evaluating road network damage caused by natural disasters in the Czech Republic between 1997 and 2010. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 80, 90–103. https://doi.org/10.1016/j.tra.2015.07.006

Bordoni, M.; *et al.* 2018. Estimation of the susceptibility of a road network to shallow landslides with the integration of the sediment connectivity, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 18, 1735–1758. https://doi.org/10.5194/nhess-18-1735-2018

Bozhinova-Haapanen, A. 2016. Stabilizing the Landslide on Road E87 Burgas – Malko Tarnovo, Bulgaria. *Procedia Engineering*. 143, Pages 650-657. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.092

Burrough, P. A.; Mcdonnell, R. A.; Lloyd, C. D. 2015. *Principles of geographical information systems*. 3. ed. Oxford: Oxford University Press.

Câmara, G.; Davis, C. (Org.). 2001. *Geoprocessamento para Projetos Ambientais*. São José dos Campos: INPE. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/. Acesso em: 05 fev. 2025

Cardenal, J.; *et al.* 2019. Measurement of Road Surface Deformation Using Images Captured from UAVs. *Remote Sens*. 11, 1507. https://doi.org/10.3390/rs11121507

Carvalho, R. C.; *et al.* 2019. Geomorphological and cover land conditioning factors of the mass movementsin the mountainous region of Rio de Janeiro. *Caderno de Geografia*, v.29, n.56. https://doi.org/10.5752/P.2318-2962.2019v29n56p27

Casagli, N.; Tofani, V. 2025. Landslide science for sustainable development. *Landslides*. https://doi.org/10.1007/s10346-025-02459-1

Chau, K. T.; *et al.* 2004. Landslide hazard analysis for Hong Kong using landslide inventory and GIS. *Computers & Geosciences*. 30, 4. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2003.08.013

Cemaden/MCTI. 2025. Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais. *Risco Hidrológico*. Disponível em: https://www.gov.br/cemaden/pt-br/assuntos/riscos-geo-hidrologicos/04-05-e-06-05-2024-previsao-de-riscos-geo-hidrologicos?utm_source=chatgpt.com. Acesso em: 29 mar 2025.

Coelho Netto, A. L.; Lins-De-Barros, F. M.; Macedo, E. S. 2013. Processos geo-hidrológicos e desastres naturais: lições da tragédia na Serra Fluminense, Sudeste do Brasil, em janeiro de 2011. *Revista Brasileira de Geomorfologia,* v. 14, p. 3-20.

Collischonn, W.; *et al.* 2024. Unprecedented April-May 2024 rainfall in South Brazil sets new record. *Brazilian Journal of Water Resources***,** Technical Note. Porto Alegre, v. 29, e50. https://doi.org/10.1590/2318-0331.292420240088

Defesa Civil - Ministério Da Integração Nacional Secretaria Nacional De Defesa Civil. 2007. *Manual para a decretação de situação de emergência ou de estado de calamidade pública*. Volume I. Brasília. Disponível em: https://www.defesacivil.rs.gov.br/upload/arquivos/201511/04145516-02-manual-para-decretacao-de-situacao-de-emergencia-ou-de-estado-de-calamidade-publica-volume-1.pdf. Acesso em: 07 jul. 2024.

Defesa Civil – Casa Militar. 2024. *Enchentes:* Defesa Civil atualiza balanço das enchentes no RS – 20/8. Disponível em: https://www.estado.rs.gov.br/defesa-civil-atualiza-balanco-das-enchentes-no-rs-20-8. Acesso em: 23 jan. 2025.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. 2020. *Normas para estabilização de taludes rodoviários*. Brasília: DNIT. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/especificacao-de-servico-es/dnit_074_2006_es.pdf. Acesso em: 28 mar 2025.

Eker, R.; Aydin, A. Assessment of forest road conditions in terms of landslide susceptibility: a case study in Yığılca Forest Directorate (Turkey). **Turkish Journal of Agriculture and Forestry,** Vol. 38: No. 2, Article 14. 2014.

Emater. *Relatório de perdas agrícolas – Maio/2024*. Disponível em: https://www.emater.tche.br/. Acesso em: 4 abril 2025.

Emberson, R.; *et al.* 2022. Insights from the topographic characteristics of a large global catalog of rainfall-induced landslide event inventories. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.,* 22, pp. 1129-1149. https://doi.org/10.5194/nhess-22-1129-2022

Fang, K.; *et al.* 2023. Centrifuge modelling of landslides and landslide hazard mitigation: A review. *Geoscience Frontiers*. Volume 14, Issue 1, January, 101493. https://doi.org/10.1016/j.gsf.2022.101493

Fell, R.; *et al.* 2008. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, v. 102, n. 3-4, p. 85-98.

Fernandes, N. F.; Amaral, C. P. 2019. Geologia e processos de instabilidade em encostas tropicais. *Revista de Geociências Aplicadas*, v. 7, p. 35-49.

G1. 2024. *Chuvas interditam 48 trechos em estradas federais do RS, diz ministro; reconstrução já começou.* Disponível em: https://g1.globo.com/rs/rio-grande-do-sul/noticia/2024/05/03/chuvas-interditam-48-trechos-em-estradas-federais-do-rs-diz-ministro-reconstrucao-ja-comecou.ghtml. Acesso em: 13 fev. 2025.

Gall, M. D.; Gall, J. P.; Borg, W. R. 2013. *Applying educational research:* How to read, do and use research to solve problems of practice. 7th edition. Pearson.

Gamba, P.; Marchese, F. 2019. Remote sensing for disaster management: applications and perspectives. *Proceedings of the IEEE*, v. 107, p. 1494-1515.

Gariano, S. L.; Guzzetti, F. 2016. Landslides in a changing climate. *Earth-Science Reviews.* Volume 162, November, Pages 227-252. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.08.011

Gomez, R.; Gutierrez, M. 2023. Remote sensing for landslide hazard assessment: advances and future perspectives. *Landslides*, v. 20, p. 1-15

Guzzetti, F.; Rossi, M.; Peruccacci, S. 2020. Rainfall thresholds for landslide occurrence: a systematic review. *Environmental Research Letters*, v. 15, p. 1-15.

Habumugisha, J. M.; *et al.* Dewan, A. 2022. Landslide Susceptibility Mapping with Deep Learning Algorithms. *Sustainability*. 14, 1734. https://doi.org/10.3390/su14031734

Haigh, M.; Rawat, J. S. 2011. Landslide causes: Human impacts on a Himalayan landslide swarm. *Belgeo* [En ligne], 3-4. https://doi.org/10.4000/belgeo.6311

Highland, L. M.; Bobrowsky, P. 2008. *The landslide handbook* – A guide to understanding landslides. U.S. Geological Survey (USGS). Reston, Virginia, (Circular 1325). Disponível em: https://pubs.usgs.gov/circ/1325/pdf/C1325_508.pdf. Acesso em: 03 fev. 2025.

Hungr, O.; Leroueil, S.; Picarelli, L. 2024.The Varnes classification of landslide types, an update**.** *Landslides*, 11(2), 167-194. https://doi.org/10.1007/s10346-013-0436-y

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2021. *Climate Change 2021:* The Physical Science Basis. Geneva: IPCC.

Jalooli A.; *et al.* 2014. Retracted: Public Alerts Landslide Natural Disaster Using Vehicular Communications. *International Journal of Distributed Sensor Networks.* 10(6). https://doi.org/10.1155/2014/969864

Jensen, J. R. 2009. *Sensoriamento Remoto do Ambiente:* Uma perspectiva em Recursos Terrestres. São José Dos Campos: Parentese.

Kargel, J. S. *et al.* 2016. Geospatial analysis of the 2015 Nepal earthquake-induced landslides. *Geomorphology,* v. 278, p. 239-252.

Laimer, H. J. 2017. Anthropogenically induced landslides – A challenge for railway infrastructure in mountainous regions. *Engineering Geology.* 222, 18 May, Pages 92-101. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2017.03.015

Li, B.; *et al.* 2024. Early warning of landslides based on statistical analysis of landslide motion characteristics and AI Earth Cloud InSAR processing system: a case study of the Zhenxiong landslide in Yunnan Province, China. *Landslides.* https://doi.org/10.1007/s10346-024-02350-5

Li, P.; Shi, Y.; Zhang, H. 2020. Hyperspectral remote sensing for landslide detection and risk assessment: a review. *Remote Sensing*, v. 12, p. 1638.

Liu, J.; Hu, P.; Guo, C. 2021. Effects of rainfall infiltration on landslide stability: a numerical analysis based on field monitoring. *Landslides*, v. 18, p. 2953-2967.

Liu, Q.; *et al.* 2022. Total probabilistic measure for the potential risk of regional roads exposed to landslides. *Reliability Engineering & System Safety*. 228, December, 108822. https://doi.org/10.1016/j.ress.2022.108822

Liu, Y.; Zhao, L.; Bao, A.; L. I., J.; Yan, X. 2022. Chinese High Resolution Satellite Data and GIS-Based Assessment of Landslide Susceptibility along Highway G30 in Guozigou Valley Using Logistic Regression and MaxEnt Model. *Remote Sens.* 14, 3620. https://doi.org/10.3390/rs14153620

Lu, D.; *et al.* 2016. Techniques and Methods in Urban Remote Sensing. *Remote Sensing*, 8(4), 358, p.5.

Marc, O.; *et al.* 2018. Initial insights from a global database of rainfall-induced landslide inventories: the weak influence of slope and strong influence of total storm rainfall. *Earth Surf. Dyn.*, 6, pp. 903-922. https://doi.org/10.5194/esurf-6-903-2018

Marengo, J. A.; *et al.* 2024. O maior desastre climático do Brasil: chuvas e inundações no estado do Rio Grande do Sul em abril-maio 2024. *Mudanças climáticas, Estudos Avançados / Scielo.* 38 (112). https://doi.org/10.1590/s0103-4014.202438112.012

Meneses, B. M.; Pereira, S.; Reis, E. 2019. Effects of different land use and land cover data on the landslide susceptibility zonation of road networks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 19, 471–487. https://doi.org/10.5194/nhess-19-471-2019

Nahayo, L.; *et al.* 2019. Landslides Hazard Mapping in Rwanda Using Bivariate Statistical Index Method. *Environ. Eng. Sci.* 36, 892–902. https://doi.org/10.1089/ees.2018.0493

Nery, J. T.; Reis, R. V. 2014. Desastres naturais na região Sudeste brasileira, associados a eventos climáticos extremos. *Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais*. Ourinhos: Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Câmpus Experimental de Ourinhos. Disponível em: http://observatoriogeograficoamericalatina.org.mx/egal14/Procesosambientales/Climatologia/21.pdf. Acesso em: 29 mar 2025.

Novellino, A.; *et al.* 2024. Mapping landslides from space: A review. *Landslides*, 21, 1041–1052. https://doi.org/10.1007/s10346-024-02215-x

Novo, E. M. L. M. 2010. *Sensoriamento Remoto: Princípios e Aplicações*. 4ª edição, ISBN: 9788521205401.

Oliveira, M. M. 2007. *Como fazer pesquisa qualitativa*. Rio de Janeiro: Vozes.

Paulo, R. F.; Silva, D. F.; Meneses, P. R. 2022. Landslide susceptibility mapping using machine learning models and GIS techniques: an approach applied to southern Brazil. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, v. 22, p. 1211-1230.

Pecoraro, G.; *et al.* 2023. Combining Statistical, Displacement and Damage Analyses to Study Slow-Moving Landslides Interacting with Roads: Two Case Studies in Southern Italy. *Appl. Sci.* 13, 3368. https://doi.org/10.3390/app13053368

Petley, D. 2012. Global patterns of loss of life from landslides. *Geology*. 40 (10): 927–930. doi: https://doi.org/10.1130/G33217.1

Postance, B.; *et al.* 2017. Extending natural hazard impacts: an assessment of landslide disruptions on a national road transportation network. *Environ. Res. Lett.* 12, 014010. https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5555

Quevedo, R. P.; *et al.* 2019. Modelagem de áreas suscetíveis a movimentos de massa: avaliação comparativa de técnicas de amostragem, aprendizado de máquina e modelos digitais de elevação. São Paulo, UNESP, *Geociências*, v. 38, n. 3, p. 781 - 795. https://doi.org/10.5016/geociencias.v38i3.14019

Reyes, J. C.; Soares, P. S. 2021. Public policies and risk management for landslide mitigation: lessons from Brazil. *Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 55, p. 102030.

Riffel, E. S.; Guasselli, L. A.; Bressani, L. A. 2016. Desastres associados a movimentos de massa: uma revisão de literatura. *Boletim Goiano de Geografia*, Goiânia, v. 36, n. 2, p. 301. DOI: 10.5216/bgg.v36i2.42796.

Rio Grande do Sul. 2024. *Decreto nº 57.626, de 21 de maio de 2024*. Disponível em: https://www.diariooficial.rs.gov.br/materia?id=1000161. Acesso em: 07 out. 2024.

Rodrigue, J.-P.; Comtois, C.; Slack, B. 2020. *The geography of transport systems.* 5. ed. New York: Routledge.

Rossi, G.; Oliveira, P. R. 2022. Geological factors influencing landslide occurrences in southern Brazil. *Geosciences Journal*, v. 26, p. 132-148.

Sharma, P. D.; *et al.* 1991. Water and Sediment Yields into the Sutlej River from the High Himalaya. *Mountain Research and Development*, vol. 11, no. 2, pp. 87–100. JSTOR. https://doi.org/10.2307/3673569

Sidle, R. C.; Ziegler, A. D. 2012. The dilemma of mountain roads. *Nature Geoscience*, v. 5, n. 7, p. 437–438, DOI: 10.1038/ngeo1512.

Sidle, R. C.; Ghestem, M.; Stokes, A. 2014. Epic landslide erosion from mountain roads in Yunnan, China – challenges for sustainable development, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.,* 14, 3093–3104, https://doi.org/10.5194/nhess-14-3093-2014

Silva, L. J. de S.; *et al.* 2022. Identificação e hierarquização de risco a inundações em áreas de bacias hidrográficas. *Revista Geociências* - UNG-Ser, 21(2), 21–36. https://doi.org/10.33947/1981-741X-v21n2-5018

Sudmeier-Rieux, K.; Jayawardena, N.; Lee, L. 2021. Landslides and climate change adaptation: bridging science, policy, and practice. *Natural Hazards and Earth System Sciences,* v. 21, p. 1923-1940.

Smith, H. G; *et al.* 2023. The influence of spatial patterns in rainfall on shallow landslides. *Geomorphology.* Volume 437, 15 September, 108795. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108795

Stanley, T.; Kirschbaum, D. B. 2017. A heuristic approach to global landslide susceptibility mapping. *Nat. Hazards. 87*, 145–164. https://doi.org/10.1007/s11069-017-2757-y

Taylor, M. A. P. 2012. Network vulnerability in large-scale transport networks. *Transportation Research Part A: Policy and Practice.* 46, 5, 743-745. https://doi.org/10.1016/j.tra.2012.02.001

Tucker, C. J.; Pinzon, J. E.; Brown, M. E. 2018. Global remote sensing for environmental monitoring. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 43, p. 175-204.

Unisdr. United Nations Office For Disaster Risk Reduction. 2017. *Terminologia sobre Redução de Risco de Desastres.* Genebra: UNISDR. Disponível em: https://www.undrr.org/terminology. Acesso em: 29 mar 2025.

Vasconcellos, E. A. 2014. *Mobilidade urbana e transporte público.* 1. ed. São Paulo: Manole.

Vuillez, C.; *et al.* 2018. Land use changes, landslides and roads in the Phewa Watershed, Western Nepal from 1979 to 2016. *Applied Geography*, Volume 94. https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.03.003.

Winter, M. G.; *et al.* 2013. Landslide hazard and risk assessment on the Scottish road network. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering,* 166:6, 522-539. https://doi.org/10.1680/geng.12.00063

Winter, M. G.; Shepherd, M.; Macgregor, F. 2018. An overview of landslides and debris flows impacting the road network in Scotland. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology***,** v. 51, p. 31-47.

Youssef, B.; *et al.* 2023. The contribution of the frequency ratio model and the prediction rate for the analysis of landslide risk in the Tizi N'tichka area on the national road (RN9) linking Marrakech and Ouarzazate. *CATENA.* 232, 107464. https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.107464

Yu, L.; Zhou, C.; Wang, Y.; Cao, Y.; Peres, D. J. 2022. Coupling Data- and Knowledge-Driven Methods for Landslide Susceptibility Mapping in Human-Modified Environments: A Case Study from Wanzhou County, Three Gorges Reservoir Area, China. *Remote Sens.* 14, 774. https://doi.org/10.3390/rs14030774

Zhang, J.; *et al.* 2024. Deformation stage division and early warning of landslides based on the statistical characteristics of landslide kinematic features. *Landslides,* 21, 717–735. https://doi.org/10.1007/s10346-023-02192-7

Zhou, G.; *et al.* 2018. Remote Sensing of Landslides: A Review. *Remote Sensing.* School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, No. 126, Yanta Road, Xi'an 710054. 10(2), 279. https://doi.org/10.3390/rs10020279

Zhou, M.; *et al.* 2024. Risk analysis of road networks under the influence of landslides by considering landslide susceptibility and road vulnerability: A case study. *Natural Hazards Research.* 4, 3, 387-400. https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.09.013