

ARTIGO ORIGINAL

SENSORIAMENTO REMOTO APLICADO A MOVIMENTOS DE MASSA: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA



Peter Américo Peny Machado

<http://lattes.cnpq.br/7102451308078257> – <https://orcid.org/0000-0002-2154-1098>
peteramerico@hotmail.com

Corpo de Bombeiros Militar do Rio Grande do Norte

Carlos Eduardo Guillarducci Fonseca

<http://lattes.cnpq.br/5323402112963731> – <https://orcid.org/0000-0002-7547-0176>
carlosguillarducci@gmail.com

Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais

RESUMO

Este estudo investiga a aplicabilidade de técnicas de sensoriamento remoto para o mapeamento de deslizamentos de terra. Com o objetivo de aprimorar a produção de mapas de risco geológico, a pesquisa analisa as técnicas mais utilizadas atualmente, incluindo fotogrametria, radar de abertura sintética interferométrica (InSAR) e LiDAR (light detection and ranging). A metodologia adotada consistiu em uma revisão sistemática da literatura, seguindo o protocolo PRISMA, focando em estudos dos últimos cinco anos que utilizam tecnologias disponíveis no Brasil. Foram selecionados 30 artigos que atendiam aos critérios de inclusão, excluindo-se aqueles que demandam alto desempenho computacional, uso de inteligência artificial (IA) ou métodos geofísicos não focados em deslizamentos de terra. Os resultados indicaram que as três técnicas de sensoriamento remoto estudadas no trabalho apresentam diferenças significativas em termos de método de aquisição, processamento de dados e custo-benefício. A análise geográfica dos estudos incluídos revelou uma concentração maior de pesquisas no continente asiático, especialmente na China, seguida pela Europa e Estados Unidos. Este artigo contribui para a gestão e redução do risco de desastres, oferecendo uma base para a escolha de técnicas de sensoriamento remoto mais eficazes para o mapeamento de áreas de risco de deslizamentos de terra.

Palavras-chave: sensoriamento remoto; deslizamento de terra; mapeamento de área de risco geológico.



ARTIGO ORIGINAL

**REMOTE SENSING APPLIED TO MASS MOVEMENTS:
A SYSTEMATIC REVIEW**

ABSTRACT

This study examines the application of Remote Sensing techniques for landslide mapping. Aiming to improve geological risk mapping, it evaluates commonly used techniques, including photogrammetry, interferometric synthetic aperture radar (InSAR), and LiDAR (light detection and ranging). The methodology involved a systematic literature review following the PRISMA protocol, focusing on studies from the past five years utilizing technologies available in Brazil. Thirty articles meeting the inclusion criteria were selected, excluding those requiring high computational performance, artificial intelligence, or geophysical methods not focused on landslides. The findings showed significant differences among the three remote sensing techniques in data acquisition, processing, and cost-effectiveness. Geographic analysis of the studies showed a higher concentration in Asia, particularly China, followed by Europe and the USA. This research contributes to disaster risk management and reduction by providing a basis for choosing effective remote sensing techniques for mapping landslide-prone areas.

Keywords: remote sensing; landslide; geological risk area mapping.

Recebido em: 5/5/2024.
Aprovado em: 25/8/2025.
Publicado em: 5/11/2025.



Este é um artigo publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Attribution, que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições, desde que o trabalho original seja corretamente citado.

1 INTRODUÇÃO

A Conferência Mundial da ONU sobre a redução do risco de desastres, em Sendai, 2015, reconheceu que desastres relacionados a deslizamentos de terra ameaçam assentamentos em locais vulneráveis devido à instabilidade do solo e rocha. Além disso, a expansão urbana e as infraestruturas como estradas e ferrovias aumentam a exposição, tornando essencial uma abordagem multidisciplinar abrangendo a vulnerabilidade social, institucional e física. Nesse sentido, a vulnerabilidade a desastres pode ser compreendida e reduzida por meio de esforços educacionais, avanços científicos, apoio político e investimentos em todos os países (Sassa; Mikos; Yin, 2017).

No Brasil, a redução de desastres ganhou destaque a partir da Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (Brasil, 2012). Essa política estabeleceu um conjunto de ações destinadas a reduzir riscos de desastres e gerenciar emergências, incluindo prevenção, preparação, resposta e recuperação. Na etapa de prevenção, a atividade de mapeamento das áreas de risco, reconhecida pela literatura como técnicas de sensoriamento remoto, emerge como um instrumento de gestão e planejamento destinado a reduzir as vulnerabilidades das populações e a evitar a ocorrência de desastres (Coutinho *et al.*, 2015).

De igual maneira, nos estados são desenvolvidas ações alinhadas à política nacional, por meio das organizações burocráticas, sobretudo as de mapeamento de áreas de risco. Em Minas Gerais, essas ações são desenvolvidas muitas vezes pelos próprios municípios ou organizações federais, cabendo às burocracias estaduais a coordenação e assessoramento das atividades de proteção e defesa civil. Nesse sentido, o Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais (CBMMG) busca estimular a elaboração de mapas de risco com as tecnologias disponíveis nos municípios.

Internamente, o Comando do CBMMG forneceu diretrizes para o desenvolvimento das ações de proteção e defesa civil, através do Plano de Comando, em sua 5ª edição (Minas Gerais, 2023). O documento tem como escopo principal alinhar o planejamento estratégico da corporação, almejando expandir o atendimento com qualidade a um maior número de pessoas e municípios. Dentre as iniciativas previstas está o serviço de consultoria técnica para elaboração de mapeamento de áreas de risco (Minas Gerais, 2023).

Embora existam diferentes técnicas de sensoriamento remoto amplamente verificadas pela literatura (Barbarella *et al.*, 2018; Dai *et al.*, 2023; Görüm, 2019; Xu *et al.*, 2021b), uma análise comparativa sobre quais técnicas podem ser melhor empregadas ao território mineiro não foi encontrada. Portanto, o objetivo geral do estudo foi analisar quais técnicas de sensoriamento remoto podem contribuir para subsidiar a produção de mapas de risco geológico em Minas Gerais. Os objetivos específicos foram:

- compreender as técnicas de sensoriamento remoto, seus conceitos e métodos de emprego;
- enumerar os principais métodos de sensoriamento remoto utilizados atualmente para a produção de mapas de deslizamento de terra;
- discutir sobre a implementação das técnicas de sensoriamento remoto para a gestão do risco de desastres, por meio da elaboração de mapas de susceptibilidade a movimentos de massa no estado.

O presente estudo justifica-se pela busca constante por desenvolvimento na produção de mapas de áreas de risco, o que é essencial para a entrega de um melhor serviço de proteção e defesa civil no país, sobretudo em Minas Gerais devido ao seu aspecto geomorfológico (Rodrigues; Augustin; Nazar, 2023). Ademais, a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil (PNPDEC) define como atribuição da União, dos estados, do Distrito Federal e dos municípios a adoção de medidas necessárias à redução dos riscos de desastres (Brasil, 2012). Desse modo, o estudo de técnicas atuais de sensoriamento remoto pode contribuir para a gestão e redução do risco de desastres.

O artigo foi organizado em quatro seções além desta introdução. A seguir, são apresentados fundamentos das técnicas de sensoriamento remoto e, em sequência, estão os métodos da revisão sistemática, resultados e discussão e as considerações finais.

2 TÉCNICAS DE SENSORIAMENTO REMOTO

Técnicas de sensoriamento remoto utilizam ferramentas que não necessitam de contato humano com o alvo e podem ser baseadas em satélites, aeronaves ou em solo. Por exemplo, sensoriamento remoto via satélite é amplamente empregado no monitoramento de deslizamentos, com seu uso crescendo desde os anos 2000, devido aos contínuos avanços tecnológicos, como o desenvolvimento de algoritmos para melhoria da qualidade dos dados de monitoramento, e ao lançamento de satélites com frequência de aquisição e resolução espacial cada vez maiores (Casagli *et al.*, 2023).

Desde o surgimento das técnicas de sensoriamento remoto, a capacidade de mapear rapidamente deslizamentos em áreas extensas, de coletar informações que fornecem insights mecanicistas e cinemáticos e de reunir grandes volumes de dados para emitir alertas precoces aumentou consideravelmente (Casagli *et al.*, 2023).

No que tange a técnicas de sensoriamento remoto para o subsídio de mapas de áreas de risco, atualmente existem algumas tecnologias capazes de produzir modelos digitais de elevação (do inglês, *digital elevation models* – DEMs) de alta resolução, como fotogrametria, radar de abertura sintética interferométrica (do inglês, *interferometric synthetic aperture radar* – InSAR) ou detecção e alcance por luz (do inglês, *light detection and ranging* – LiDAR). Esses DEMs são essenciais no fornecimento de dados de elevação, que por sua vez podem ser de grande valia para o desenvolvimento de mapas de áreas de risco de deslizamento (Muhadi *et al.*, 2020).

Os DEMs fornecem informações sobre a elevação do terreno em uma estrutura de grade. Eles utilizam valores de coordenadas x, y e z, que representam longitude, latitude e elevação, respectivamente. Geralmente eles são criados através da extração de características do terreno a partir de um modelo digital de superfície. Existem várias fontes para gerar DEMs, incluindo levantamentos de campo, digitalização de mapas topográficos impressos ou técnicas de sensoriamento remoto. As fontes de DEMs variam em termos de custo, podendo ser gratuitas ou de alto valor, dependendo de sua precisão (Muhadi *et al.*, 2020).

A fotogrametria é uma tecnologia que permite obter informações confiáveis sobre objetos e ambientes em três dimensões a partir de imagens ópticas. Na prática, possibilita medições 3D precisas de características geométricas, como posição,

orientação, forma e tamanho, utilizando fotografias. Entre os avanços mais recentes nas áreas de fotogrametria e visão computacional, destacam-se a fotogrametria oblíqua aérea, a estrutura a partir do movimento e o estéreo de múltiplas vistas (Wu, 2021).

Além disso, o mapeamento 3D integrado tem impulsionado o desenvolvimento da fotogrametria como uma solução automatizada para mapeamento e modelagem em 3D com maior qualidade, mesmo em casos desafiadores, como em áreas urbanas para a produção, inclusive, de mapas de áreas de risco (Wu, 2021).

A técnica conhecida como InSAR utiliza um sensor de micro-ondas para enviar sinais à superfície terrestre e registra o sinal disperso proveniente da superfície. É um sistema de radar ativo que permite obter imagens em uma ampla área, inclusive durante à noite ou em situações de cobertura de nuvens. O InSAR em órbita, como o da missão Missão Topográfica de Radar Embarcado (do Inglês, *Shuttle Radar Topography Mission* – SRTM), é o DEMs global mais comumente empregado, uma vez que é de acesso aberto com resolução e precisão aceitáveis (Muhadi *et al.*, 2020).

Em contrapartida, os sistemas de InSAR aéreos possuem maior flexibilidade no momento de serem implantados e oferecem maior resolução espacial. Além disso, aplicar essa técnica em áreas com vegetação densa é um desafio, pois o radar não consegue penetrar na vegetação para alcançar a superfície do solo (Muhadi *et al.*, 2020).

Para além do que pode ser feito por fotogrametria ou InSAR, tem-se a construção de DEMs por meio do LiDAR, o qual faz uso de pulsos rápidos de partículas de energia luminosa. Esse sistema de levantamento coleta uma enorme quantidade de dados tridimensionais de pontos onde fótons são refletidos por objetos opacos, como edifícios, árvores, arbustos e a superfície do solo. Ele é composto por um emissor de laser, um receptor, um GPS, incluindo estações base no solo dentro da área de levantamento, e um sistema de navegação inercial que registra a orientação precisa do emissor (Muhadi *et al.*, 2020).

O laser emite até 150.000 pulsos de luz por segundo. Os tempos de retorno das reflexões da energia luminosa na superfície são medidos e essa característica permite comparar o que está presente na superfície, como árvores ou edifícios, com a verdadeira superfície da terra nua (Muhadi *et al.*, 2020).

Existem dois tipos de aquisição de dados por LiDAR, a saber, aéreo e terrestre. No sistema aéreo, o sensor é montado em plataformas como aeronaves, tripuladas ou não, enquanto, no terrestre, o sensor coleta os dados diretamente do solo. A geração de dados a partir de DEMs obtidos por esta tecnologia possui diversas vantagens em relação às outras fontes ditas anteriormente. Nela os dados podem ser coletados tanto durante o dia quanto à noite e em condições de nuvens (Muhadi *et al.*, 2020).

Ademais, o LiDAR tem uma capacidade superior em penetrar a superfície do solo em áreas urbanas e com vegetação, de forma mais confiável do que fotogrametria ou InSAR. Devido a tais motivos, o LiDAR se tornou uma solução recente para problemas relacionados a movimentos de massa. A capacidade de fornecer resultados de alta resolução e precisão de centímetros diversificou sua utilização em uma ampla variedade de aplicações nos estudos relacionados à proteção e defesa civil (Muhadi *et al.*, 2020).

O foco da aplicação das técnicas de sensoriamento remoto do presente estudo se apresenta na identificação de deslizamento de terra, podendo ser definido como o movimento de massa de rocha, detritos ou solo em direção descendente. Também pode ser definido como uma ampla variedade de fenômenos geotécnicos influenciados pela gravidade. O deslizamento acontece quando existe qualquer movimento de solo ou rocha para fora ou em direção descendente sob a influência direta da gravidade, quando a força motriz excede a força de resistência de um declive. A massa de detrito deslocada pode variar em volume, desde pequenas quantidades até encostas inteiras de montanhas, e em velocidade, e esse deslocamento pode ser causado por diferentes agentes (Wubalem, 2022).

No Brasil, a elaboração de mapas de áreas de risco também é uma atribuição dos municípios (Brasil, 2012). O mapeamento de área de risco pode ser produzido de diversas formas, a depender, principalmente, da disponibilidade orçamentária. Para municípios pequenos, um mapeamento básico pode contar apenas com uma “mancha falada”, criado a partir de informações advindas da população sobre desastres anteriores, como locais atingidos no passado por inundações ou movimentos de massa (UFSC, 2011).

Por outro lado, municípios que dispõem de maior investimento para a gestão do risco de desastres podem elaborar estudos mais complexos, empregando

sensoriamento remoto e contratando pessoal especializado para obter produtos mais precisos e informativos para uma melhor tomada de decisão a respeito de metodologias de prevenção de desastres. De forma geral, os mapas de risco são produzidos para informar sobre um tipo de risco específico, por exemplo, um risco geológico (UFSC, 2011).

Como bem descrito anteriormente, há diferentes técnicas de sensoriamento remoto que podem contribuir na redução dos riscos e, para isso, a próxima seção apresentará os métodos da revisão sistemática operacionalizada sobre o assunto.

3 MÉTODO

Este artigo científico foi desenvolvido como um estudo descritivo, utilizando uma abordagem qualitativa, fundamentado em pesquisa bibliográfica.

Para efetuar o objetivo proposto, foi realizada uma revisão sistemática da literatura, que é uma revisão de uma pergunta formulada de forma clara, a qual aplica métodos sistemáticos e explícitos para identificar, selecionar e avaliar criticamente pesquisas relevantes, e coletar e analisar dados desses estudos que são incluídos na revisão. Para isso, adotou-se o protocolo PRISMA, cujo objetivo é melhorar o relato de revisões sistemáticas, fornecendo um procedimento padronizado internacionalmente para guiar a escrita desse tipo de trabalho (Moher *et al.*, 2009).

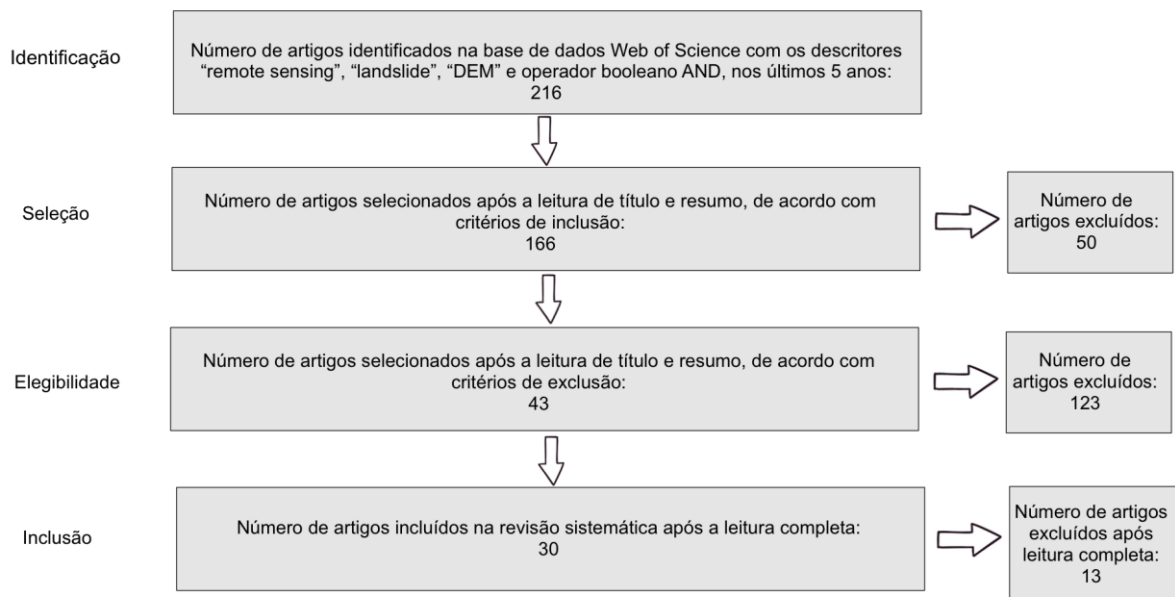
A busca dos artigos foi promovida na base de dados Web of Science, entre os meses de dezembro de 2023 e janeiro de 2024, fazendo uso dos descritores “*Remote Sensing*”, “*Landslide*”, “*DEM*”, com o operador booleano “*AND*”. O critério de inclusão temporal foi definido para artigos confeccionados nos últimos cinco anos, de forma a obter estudos com as metodologias mais atualizadas. Como resultado, foram encontrados 216 artigos.

Após a leitura dos títulos e resumos desses artigos, adotaram os seguintes critérios de inclusão para selecionar os que seriam lidos por completo: apresentar tecnologias disponíveis no Brasil; técnicas atuais de sensoriamento remoto; uso apenas de conhecimentos básicos de geologia; estar escrito no idioma inglês. Já os critérios de exclusão foram: apresentar técnicas de IA ou outras que também necessitem de alto desempenho computacional para modelagem de dados; métodos

geofísicos além dos já utilizados no sensoriamento remoto; não ter como foco o mapeamento de deslizamentos de terra.

Depois de aplicar os critérios de inclusão, restaram 166 artigos. Em seguida, dispendo dos critérios de exclusão, foram selecionados 43 artigos para realizar a leitura por completo. Por fim, 30 artigos satisfizeram todos os critérios de inclusão/exclusão e, portanto, foram incluídos na revisão sistemática. A Figura 1 apresenta as fases dessa revisão de acordo com o protocolo PRISMA.

Figura 1 – Fases da revisão sistemática conforme o protocolo PRISMA



Fonte: elaboração própria (2024).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

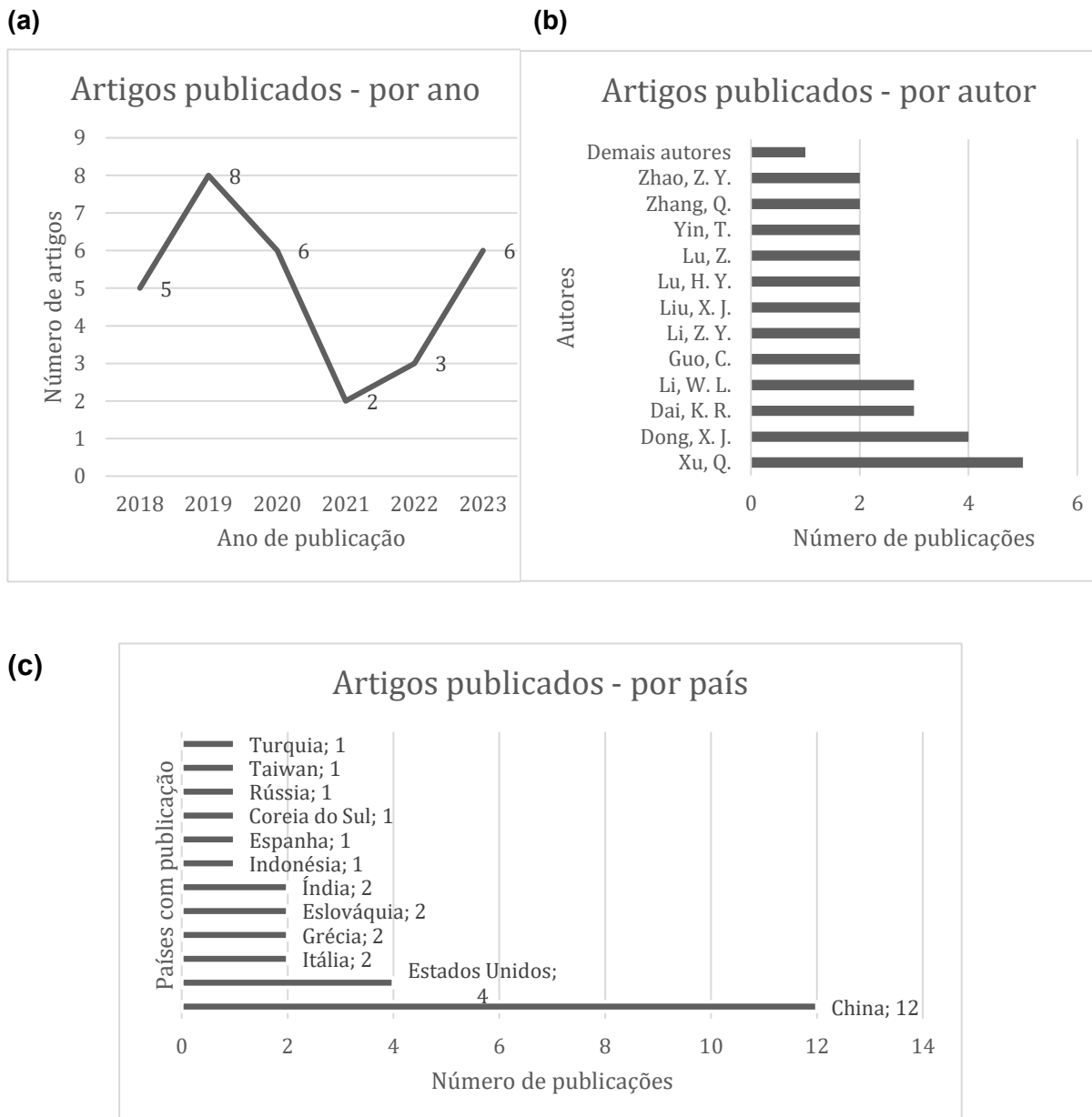
Após busca extensiva em base de dados, leitura de títulos e resumos de 216 artigos e, por fim, leitura completa de 30 artigos selecionados, foram encontradas 3 técnicas robustas e atuais de sensoriamento remoto empregadas para a identificação de deslizamentos de terra em diversos países, a saber, fotogrametria, LiDAR e InSAR. Essas técnicas diferem principalmente quanto ao método de aquisição, ao processamento de dados e ao custo-benefício, ou seja, quanto à qualidade dos resultados em relação ao custo de operacionalização da técnica.

Verificando os artigos incluídos na revisão sistemática, observou-se que, de 2018 a 2023, não houve uma tendência bem definida com relação a produção acadêmica nesse campo de estudo, sendo o ano com menor produção científica o de 2021 (dois artigos) e o ano com maior produção científica o de 2019 (oito artigos), conforme a Figura 2 (a). Uma provável causa para a redução de publicações entre 2021 e 2022 (três artigos publicados) seria a pandemia global de covid-19, devido ao mandatório isolamento social, impossibilitando muitos trabalhos de campo.

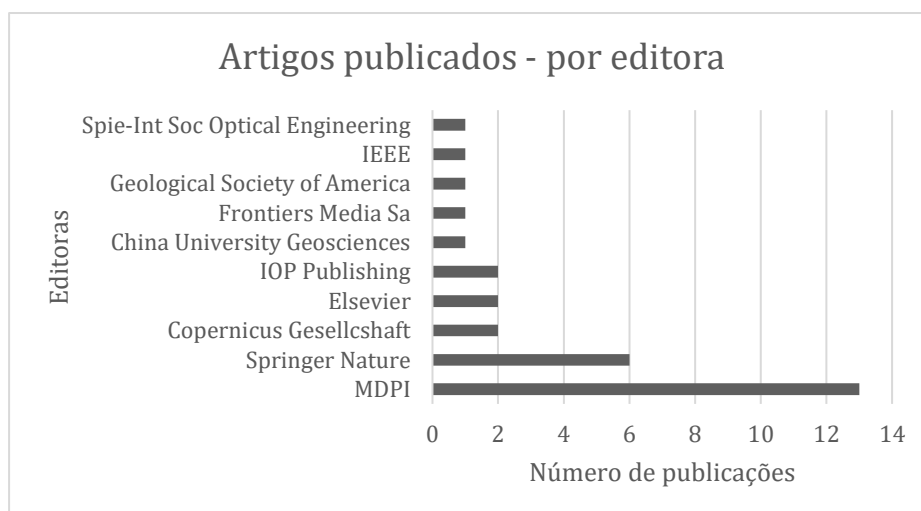
Constatou-se ainda que um percentual alto dos artigos excluídos da revisão, 38,8% (84 artigos), tratam da aplicação de inteligência artificial na identificação automática de deslizamentos de terra, o que demonstra que a comunidade científica investe demasiado esforço nessa tecnologia e cada vez menos na identificação de deslizamentos por métodos convencionais, ou seja, métodos não automatizados. Tal observação condiz com o exposto por Mohan *et al.* (2021) em sua revisão de literatura sobre a detecção automática de deslizamentos de terra por *Machine Learning* e *Deep Learning*.

Ao analisar as publicações por autores na Figura 2 (b), nota-se que Xu, Q., Dong X. J e Dai, K. R., todos da Chengdu University of Technology, na China, estão entre os principais autores da área, com cinco, quatro e três artigos escritos, respectivamente. Além disso, seus artigos se mostram muito relevantes, uma vez que, em sua maioria, são citados por dezenas de outros pesquisadores em suas publicações. Xu, Q., autor mais proeminente na área, publicou artigos em todas as técnicas investigadas no presente trabalho.

Figura 2 – (a) Gráfico representando a quantidade de publicações obtidas por ano, nos últimos cinco anos; (b) Gráfico representando a quantidade de publicações por autor; (c) Gráfico representando a quantidade de publicações obtidas por país; (d) Gráfico representando a quantidade de publicações por editora



(d)



Fonte: elaboração própria (2024).

Observando os artigos com relação a localização geográfica, percebe-se que o continente asiático possui a maior quantidade de artigos incluídos (19), seguido pela Europa (7), com técnicas que se adequam ao universo desta pesquisa, conforme a Figura 2 (c). A China é o país com maior quantidade de publicações (12), seguida pelos Estados Unidos (4). A grande quantidade de produções advindas da China tem sua principal explicação no fato de que esse país tem condições geomorfológicas muito propícias a deslizamentos de terra, com 69% de seu território composto por montanhas e platôs (Wu *et al.*, 2016).

O fato de a China possuir um território montanhoso implica diretamente na existência abundante de encostas e taludes. Tal situação corrobora com o acontecimento de deslizamentos de terra e oferece um potencial de perdas e danos por todo o país. Sendo assim, o Estado chinês investe fortemente em desenvolvimento e pesquisa relacionados a movimentos de massa, com o objetivo de aumentar sua resiliência a desastres dessa natureza.

Por sua vez, muitos municípios de Minas Gerais possuem grande ocorrência de encostas e taludes, em alguns casos com habitações em tais áreas possivelmente de risco. Dessa forma, assim como a China, investir no aumento da resiliência a desastres geológicos por meio do mapeamento extensivo de susceptibilidade de deslizamentos de terra e do desenvolvimento de pesquisas científicas nesse âmbito se mostra essencial para uma boa gestão do risco de desastres, parte do ciclo de proteção e defesa civil estabelecido pela PNPDEC.

Levando-se em conta as publicações por editora, observar a Figura 2 (d), nota-se que a MDPI possui o maior número de publicações, 13 artigos, seguida da editora Springer Nature, com 6 artigos publicados. Uma provável causa para isso pode ser o fato de tal editora possuir acesso aberto a suas revistas, além da revista Remote Sensing, na qual as publicações aqui estudadas se encontram, possuir fator de impacto cinco, considerado relativamente alto. As demais editoras contam com apenas um ou dois artigos publicados.

As principais técnicas de sensoriamento remoto consolidadas na comunidade científica, que são LiDAR, fotogrametria e InSAR, variam tanto em modo de aquisição como em processamento de dados. A Tabela 1 fornece a quantificação com relação aos métodos de aquisição utilizados nos artigos desta revisão sistemática para cada uma das técnicas de sensoriamento remoto. Com relação a técnica InSAR, Sentinel, ALOS PALSAR, SRTM, LANDSAT, TANDEM e ASTER são missões de satélites de obtenção de dados de Radar encontradas nas publicações deste estudo que possuem cobertura no território brasileiro.

Tabela 1 – Quantidade de publicações que empregaram cada técnica de sensoriamento remoto, bem como método de aquisição

Técnica	Modo de aquisição	Número de artigos
LiDAR		15
	Terrestre	5
	Aéreo	11
Fotogrametria		14
	Satélite ótico	5
	UAV (Drone)	10
InSAR		18
	Sentinel 1/2	15
	ALOS PALSAR	6
	SRTM	6
	LANDSAT 8/9	1
	TANDEM	3
	ASTER	1

Fonte: elaboração própria (2024).

O quadro resumo contido no Apêndice A desta revisão contém título, autor, técnicas aplicadas, país de origem do artigo e breve resumo das 30 publicações selecionadas no presente estudo. Além das técnicas, são associados tanto os modos de aquisição dos dados, como os seus métodos de processamento, sempre que citadas no corpo do texto das publicações.

Com relação aos métodos de obtenção de dados, vale destacar aqui, no caso da fotogrametria, além da aquisição de dados via aeronave, as missões de satélites óticos PlanetScope (An *et al.*, 2023; Dong *et al.*, 2022) e GeoEye (Barbarella *et al.*, 2018), que são produtos pagos, porém de alta resolução. Quanto aos métodos de processamento de dados, foram empregados os seguintes, de acordo com a técnica de sensoriamento remoto usada:

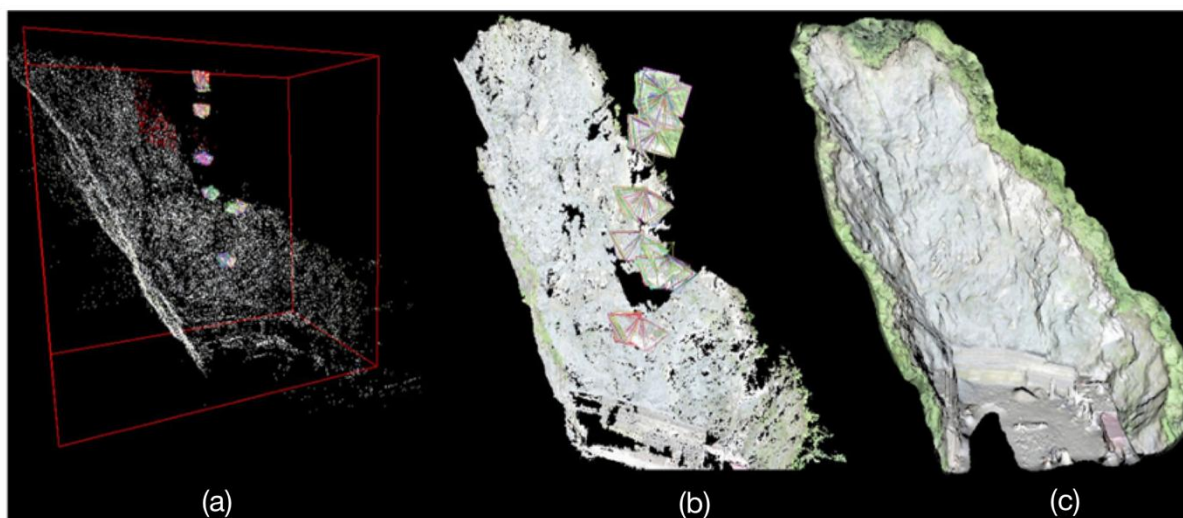
- LiDAR: *Sky View Factor* – SVF (Guo *et al.*, 2021), *Hillshade* (Guo *et al.*, 2021);
- InSAR: *Persistent Scatter Interferometry* – PSI (Crosetto *et al.*, 2018), *Differential InSAR* (Liu *et al.*, 2019), *Multitemporal InSAR* (MT-InSAR) (Ramirez; Lee; Kwon, 2020);
- Fotogrametria: *Structure from Motion* – SfM (Carey *et al.*, 2019; Chudý *et al.*, 2019; Gupta; Shukla, 2018; Kovanič *et al.*, 2020).

Dentre as publicações examinadas, várias foram as metodologias aplicadas pelos autores para a obtenção de mapas que auxiliassem na identificação de deslizamentos de terra. Alguns trabalhos utilizam apenas uma técnica de sensoriamento remoto, enquanto outros mesclam técnicas em busca de determinar um fluxo de trabalho ideal para identificar deslizamentos da forma mais precisa possível. Ao analisar as publicações quanto aos resultados, percebe-se que alguns artigos se destacam com mapas de alta qualidade para a identificação de movimentos de massa.

Com a técnica de fotogrametria obtida por veículo aéreo não tripulado (em inglês, Unmanned Aerial Vehicle – UAV), Gupta e Shukla (2018) e Kotsi *et al.* (2023) obtiveram resultados relevantes para a identificação de movimentos de massa, fazendo uso da técnica de processamento *Structure from Motion* (SfM). Kotsi *et al.* (2023) realizaram um estudo na Grécia com aquisição de dados por UAV, em que investigaram mapas obtidos pré e pós-desastre para quantificar as mudanças topográficas ocorridas após o deslizamento. Seus resultados foram significativos, tendo em vista o custo-benefício da técnica.

Já Gupta e Shukla (2018) analisaram a ocorrência de dois deslizamentos de terra na Índia, mapeando e reconstruindo em 3D esses locais. Seus mapas possuem precisão de centímetros a partir da combinação do UAV e de uma Estação Total com custo relativamente baixo. A Figura 3 apresenta um dos resultados obtidos por Gupta e Shukla (2018) com a aquisição de imagens por UAV.

Figura 3 – Reconstrução de deslizamento de terra através de fotogrametria por UAV: (a) Nuvem de pontos esparsos; (b) Nuvem de pontos condensados e (c) Superfície 3D reconstruída após processamento de dados por SfM



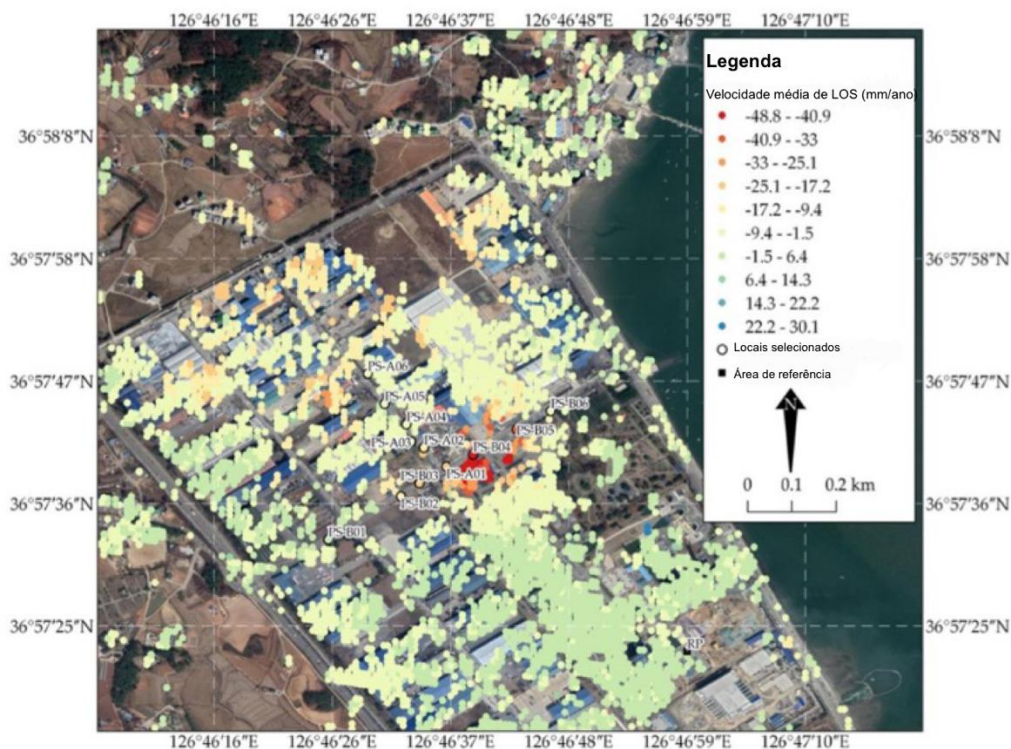
Fonte: adaptada de Gupta e Shukla (2018).

Crosetto *et al.* (2018) e Ramirez, Lee e Kwon (2020) aplicaram a técnica InSAR, em ambiente urbano, através de missões distintas do satélite Radar para mapear movimentos de massa e foram muito bem-sucedidos em suas propostas de trabalho. Com as missões de satélites TerraSAR/TANDEM, Crosetto *et al.* (2018) examinaram movimentos de massa na cidade de El Papiol – Espanha, e pela metodologia de processamento de *dados* PSI apresentaram bons resultados com relação a velocidade de deslocamento dos movimentos lentos de massa que aconteceram ao longo dos anos em El Papiol.

Por sua vez, Ramirez, Lee e Kwon (2020) usaram imagens do satélite Sentinel 1, em locais diversos da Coreia do Sul a fim de estudar movimentos de massa em áreas urbanas. Para tal, foi empregada a metodologia de processamento MT-InSAR, técnica desenvolvida para minimizar o problema de correlação dos dados.

A Figura 4 apresenta os movimentos de massa na província de Chungcheong – Coreia do Sul, para o período de 1009 dias. Na figura, valores positivos (em azul) e negativos (em vermelho), representam movimentos em direção ao satélite (elevação do solo) e na direção oposta ao satélite (subsidiência do solo), respectivamente.

Figura 4 – Mapa de velocidade média de linha de visada (do inglês, *line-of-sight*) na província de Chungcheong – Coreia do Sul, representando alterações na topografia ao longo de 1009 dias



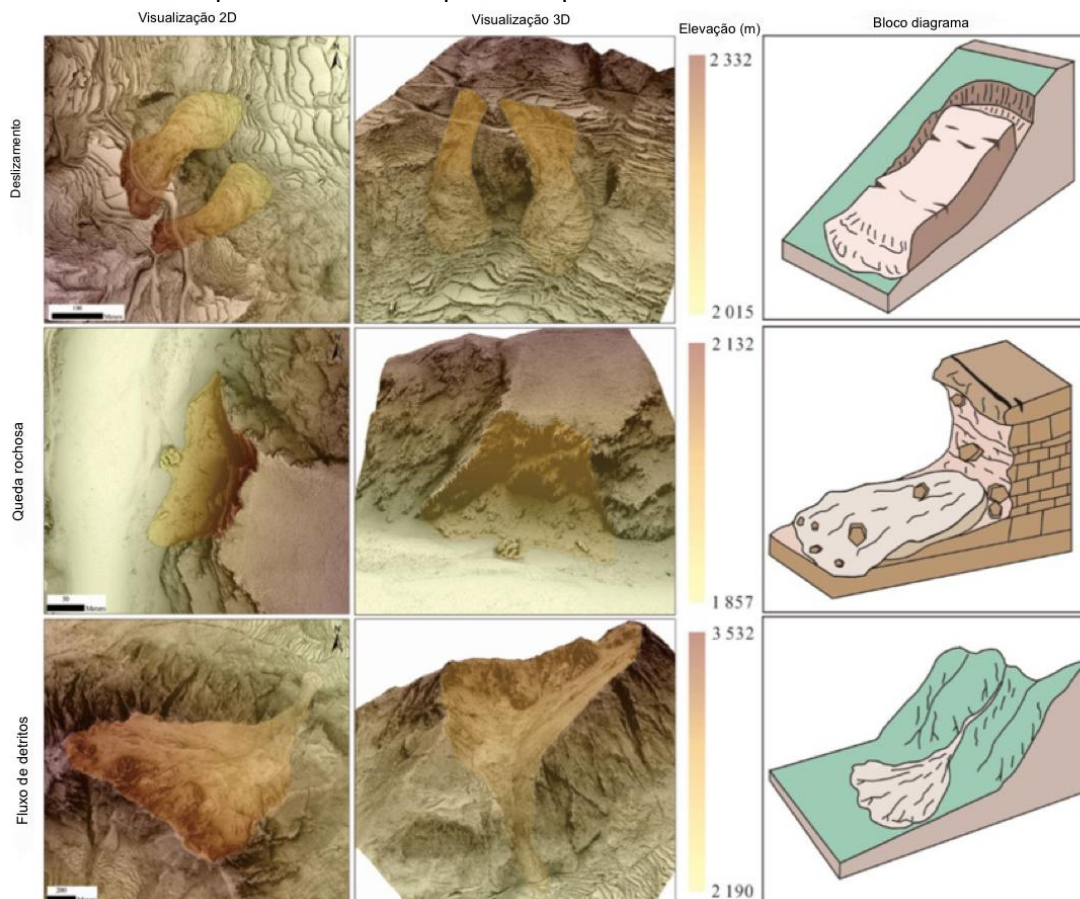
Fonte: adaptada de Ramirez; Lee e Kwon (2020).

Levando em consideração a técnica LiDAR, os resultados dos artigos aqui estudados demonstraram grande precisão na identificação de deslizamentos de terra, tanto pela alta resolução das imagens, como pela possibilidade de desconsiderar a vegetação nos mapas obtidos após o processamento dos dados. Guo *et al.* (2021) obtiveram bons resultados ao mapear deslizamentos de terra em região montanhosa no sudeste da China com o LiDAR, técnica de processamento SVF.

A Figura 5 apresenta imagens de LiDAR à esquerda, em que se encontram tipos diversos de movimentos de massa e blocos-diagrama à direita, com a representação em desenho desses tipos de deslizamentos, a fim de exemplificar a

forma pela qual é feita a identificação visual de movimentos de massa pelos dados de LiDAR.

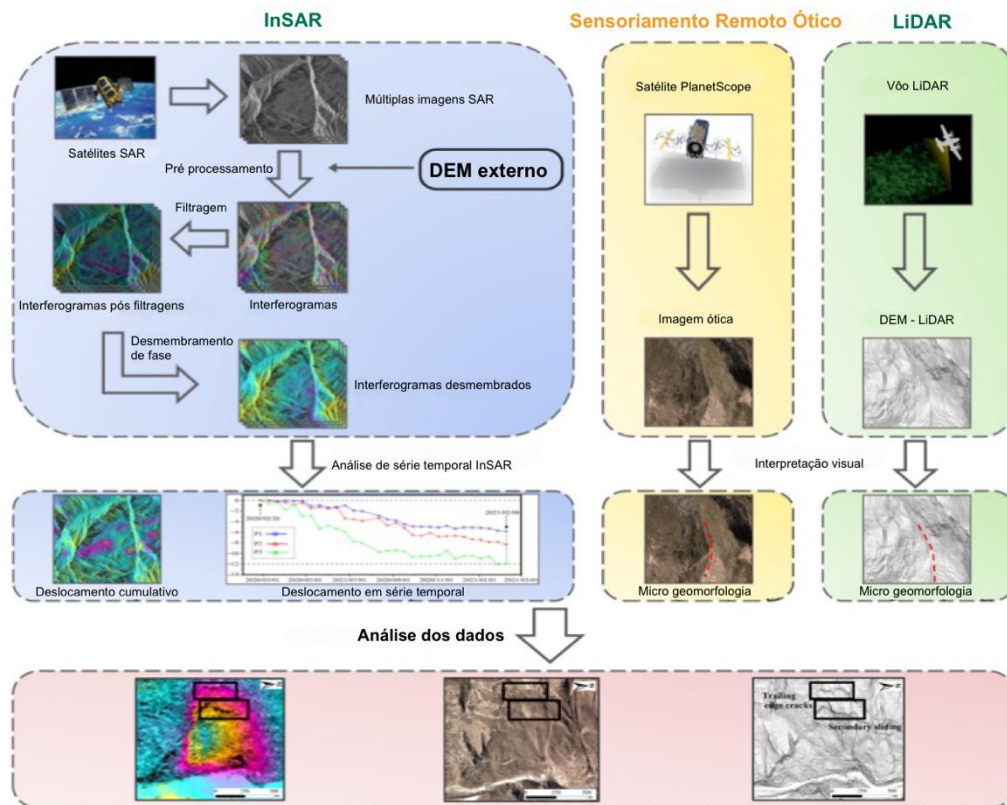
Figura 5 – Exemplos bidimensionais e tridimensionais de imagens de LiDAR e blocos-diagrama representando os respectivos tipos de deslizamentos de terra



Fonte: adaptada de Guo *et al.* (2021).

Alguns autores, como Dai *et al.* (2023) e Dong *et al.* (2022), aplicaram técnicas distintas de sensoriamento remoto em conjunto, a fim de obter os resultados da forma mais precisa possível, visto que cada uma das técnicas tem vantagens e desvantagens, e em conjunto proporcionam um resultado mais efetivo. Dong *et al.* (2022) demonstraram, conforme a Figura 6, a metodologia de aquisição e processamento de dados para a obtenção dos resultados para a identificação de movimentos de massa.

Figura 6 – Fluxograma de aquisição e processamento de dados em abordagem com múltiplas técnicas de sensoriamento remoto



Fonte: adaptada de Dong *et al.* (2022).

Com relação às vantagens e desvantagens de cada técnica, é sabido que a fotogrametria possui as seguintes vantagens: grande cobertura, baixo custo, identificação de deslizamentos baseada em microgeomorfologia, análise espacial e temporal. As desvantagens são: mapas afetados pela vegetação, presença antrópica e maus resultados em tempo nublado.

Já com relação ao InSAR, as vantagens são: aquisição de dados em qualquer horário e condição climática, baixo custo, ampla cobertura, alta precisão (a depender da missão de satélite), capacidade de monitoramento de pequenos deslocamentos de terra, identificação de deslizamentos através da quantidade de deslocamento do solo.

Como desvantagens do InSAR, têm-se: não é possível identificar deslizamentos sem sinais de movimento do solo, não abarca a análise de microdeslizamentos. Com relação ao LiDAR, as vantagens são: remoção da vegetação na etapa de processamento, obtenção de DEMs com excelente representação da realidade do terreno. As desvantagens do LiDAR são: alto custo de

aquisição de dados, dificuldade de trabalho em larga escala (Dai *et al.*, 2023; Dong *et al.*, 2022).

Durante a fase de busca na base de publicações foram encontrados muitos trabalhos que abordam a identificação automática de movimentos de massa com IA, como *Machine Learning* e *Deep Learning*. Esse resultado representa uma tendência mundial na comunidade científica, uma vez que a automação bem-sucedida do mapeamento de deslizamentos de terra representaria um ganho significativo para o aumento da resiliência a desastres em todo o mundo. Contudo, artigos que envolviam IA foram removidos desta revisão por causa de fatores limitantes, como a necessidade de mão de obra especializada tanto em geologia como em computação e o alto custo de armazenamento em nuvem, que dificultam a implementação inicial dessa metodologia nos municípios e no CBMMG.

Com base nos resultados obtidos, fica evidente que tanto fotogrametria, como InSAR e LiDAR são técnicas amplamente utilizadas para a identificação de movimentos de massa e consequente produção de mapas de área de risco geológico. Pelo InSAR, é habitual analisar deslizamentos de terra acompanhando a movimentação do solo durante um dado período.

Com o LiDAR é possível examinar deslizamentos ocorridos no passado, ao retirar a vegetação no processamento dos dados, e mapear deslizamentos recentes. Já com a fotogrametria, indica-se a análise de deslizamentos recentes e, em última instância, os passados.

Como foi descrito, cada uma dessas técnicas possui vantagens e desvantagens, seja no âmbito do custo de aquisição dos dados, do grau de dificuldade de aquisição, seja da resolução das imagens e da confiabilidade da representação geomorfológica das imagens.

Ao fazer uma análise dos quesitos citados acima, no âmbito do custo de aquisição dos dados, fotogrametria e InSAR possuem os menores custos, visto que os dados de fotogrametria podem ser obtidos por UAVs já disponíveis no CBMMG ou comprados de missões de satélites óticos como PlanetScope e GeoEye, enquanto os dados de InSAR podem ser obtidos de forma paga ou até gratuita. Quanto ao grau de dificuldade de aquisição, InSAR obtém o melhor desempenho, uma vez que tais dados são obtidos apenas por solicitação, sem a necessidade de levantamento em campo.

No quesito resolução das imagens, LiDAR obtém os melhores resultados, dada a precisão dos instrumentos da técnica, seguido de fotogrametria e InSAR. Por fim, a técnica que possui a melhor confiabilidade de representação geomorfológica nas imagens, é a LiDAR, uma vez que pelo seu processamento de dados é possível eliminar a influência da vegetação nas imagens obtidas, além de não depender de condições climáticas.

Tendo em vista o custo-benefício, dentre as três técnicas de sensoriamento remoto aqui estudadas, sugere-se a implementação inicial, no CBMMG, de fotogrametria, visto que a corporação já dispõe de drones, o que reduz os custos de implementação, e InSAR, pela facilidade de aquisição dos dados, uma vez que a conjugação delas propicia imagens complementares para a criação de mapas de susceptibilidade de deslizamento de terra de forma remota, sem a necessidade de levantamento em campo. Assim, de posse desse mapa de susceptibilidade e tendo um mapeamento das vulnerabilidades da mesma área, é possível construir um mapa de área de risco geológico com boa precisão e de forma ágil.

Atualmente, o CBMMG não possui equipe especializada destinada à produção de mapas de áreas de risco e, embora o Plano de Comando determine que tais mapas sejam desenvolvidos, na prática, essa ainda é uma área incipiente na corporação.

Para materializar a implementação dos métodos aqui discutidos, sugere-se a criação de uma equipe dedicada ao estudo da implantação de InSAR e fotogrametria, seguida da dedicação desses militares a produção de mapas de suscetibilidade de movimentos de massa em áreas já conhecidas como sensíveis a esse tipo de risco. Uma vez produzidos esses mapas, eles poderão ser entregues às COMPDECS dos respectivos municípios ou à Coordenadoria Estadual de Defesa Civil de Minas Gerais, para a produção dos mapas de áreas de risco.

Cabe ressaltar que, embora o enfoque deste trabalho tenha sido direcionado ao uso de técnicas de sensoriamento remoto na gestão do risco de desastres, mais especificamente para subsidiar a produção de mapas de áreas de risco geológico, essas mesmas técnicas também podem auxiliar o CBMMG na etapa de resposta a desastres. Imagens como as apresentadas nos resultados oferecem uma perspectiva privilegiada do ponto de vista da geomorfologia do local sinistrado, favorecendo o sucesso das buscas de vítimas soterradas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente pesquisa buscou responder quais técnicas de sensoriamento remoto podem contribuir para subsidiar a produção de mapas de risco geológico em Minas Gerais. Para isso, foram analisados os artigos publicados entre 2018 e 2023, operacionalizando uma revisão sistemática da literatura, empregando-se o protocolo PRISMA.

Os resultados revelaram que fotogrametria, InSAR e LiDAR propiciam modelos digitais de elevação satisfatórios para a produção de mapas de susceptibilidade de deslizamentos de terra. Ainda, para uma melhor análise dos mapas, as três ferramentas são comumente utilizadas em conjunto, visto que as informações obtidas por elas se complementam. Diante disso, a implantação inicial de fotogrametria por UAV e InSAR é sugerida, reflexo do custo-benefício de ambas.

A reduzida quantidade de publicações entre 2021 e 2022, provavelmente em razão do período crítico da pandemia da covid-19 e a exclusão dos artigos com abordagens da inteligência artificial são apontadas como limitações da pesquisa.

Este trabalho traz conhecimento técnico e científico a respeito da aplicação de dispositivos atuais de sensoriamento remoto para a produção de mapas de susceptibilidade de deslizamentos de terra. Esse conteúdo é de suma importância para a gestão do risco de desastres, etapa crucial do ciclo de proteção e defesa civil. Recomenda-se a implementação desses recursos no CBMMG e em Minas Gerais.

Como sugestão para trabalhos futuros, ressalta-se a investigação dessas técnicas, com aplicação na fase de resposta a desastres, também presente no ciclo de proteção e defesa civil. Outra proposta é avaliar pesquisas que envolvam o uso de inteligência artificial. Sugere-se, ainda, o estudo de cada uma das ferramentas, a saber, fotogrametria, InSAR e LiDAR, de forma individualizada, com o intuito de investigar a aplicação detalhada delas no CBMMG.

REFERÊNCIAS

- AN, B. *et al.* A multi-source remote sensing satellite view of the February 22nd Xinjing landslide in the mining area of Alxa left Banner, China. **Landslides**, v. 20, n. 11, p. 2517–2523, 1 nov. 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-023-02150-3>. Acesso em: 22 fev. 2024.
- BABEL, B. J. *et al.* Evaluation of uncrewed aircraft systems' LiDAR data quality. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 8, n. 12, 27 nov. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2220-9964/8/12/532>. Acesso em: 18 fev. 2024.
- BARBARELLA, M. *et al.* Use of DEMs derived from TLS and HRSI data for landslide feature recognition. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 7, n. 4, 1 abr. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2220-9964/7/4/160>. Acesso em: 24 jan. 2024.
- BRASIL. **Lei nº 12.608, de 10 de abril de 2012**. Institui a Política Nacional de Proteção e Defesa Civil - PNPDEC. Diário Oficial da União, Brasília, DF; 10 de abril de 2012; 191º da Independência e 124º da República. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=LEI&numero=12608&ano=2012&ato=cf8ETRU1kMVpWT18a>. Acesso em: 10 jan. 2024.
- CAREY, J. A. *et al.* Analysis of Landslide Kinematics Using Multi-Temporal Unmanned Aerial Vehicle Imagery, La Honda, California. **Environmental & Engineering Geoscience**. 2019; 25 (4): 301–317. Disponível em: <https://doi.org/10.2113/EEG-2228>. Acesso em: 30 fev. 2024.
- CASAGLI, N. *et al.* Landslide detection, monitoring and prediction with remote-sensing techniques. **Nature Reviews Earth and Environment**, v. 4, n. 1, p. 51–64, 1 jan. 2023. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s43017-022-00373-x>. Acesso em: 15 fev. 2024.
- CHUDÝ, F. *et al.* Identification of micro-scale landforms of landslides using precise digital elevation models. **Geosciences (Switzerland)**, v. 9, n. 3, 1 mar. 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3263/9/3/117>. Acesso em: 11 fev. 2024.
- COUTINHO, M. P. *et al.* Instrumentos de planejamento e preparo dos municípios brasileiros à Política de Proteção e Defesa Civil. **Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 7, n. 3, p. 383–396, 2015. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/urbe/a/bG4wp9kjcjPLmk6GLNXzQ6b/>. Acesso em: 20 fev. 2024.
- CROSETTO, M. *et al.* Monitoring soil creep landsliding in an urban area using persistent scatterer interferometry (El Papiol, Catalonia, Spain). **Landslides**, v. 15, n. 7, p. 1317–1329, 1 jul. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-018-0965-5>. Acesso em: 22 fev. 2024.

DAI, K. *et al.* Identification and evaluation of the high mountain upper slope potential landslide based on multi-source remote sensing: the Aniangzhai landslide case study. **Landslides**, v. 20, n. 7, p. 1405–1417, 1 jul. 2023. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-023-02044-4>. Acesso em: 1 fev. 2024.

DAI, K. *et al.* Post-disaster assessment of 2017 catastrophic Xinmo landslide (China) by spaceborne SAR interferometry. **Landslides**, v. 16, n. 6, p. 1189–1199, 1 jun. 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-019-01152-4>. Acesso em: 1 fev. 2024.

DONG, X. *et al.* Identifying Potential Landslides on Giant Niexia Slope (China) Based on Integrated Multi-Remote Sensing Technologies. **Remote Sensing**. MDPI, 1 dez. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/24/6328>. Acesso em: 3 fev. 2024.

DU, Q. *et al.* Route Plans for UAV Aerial Surveys according to Different DEMs in Complex Mountainous Surroundings: A Case Study in the Zheduoshan Mountains, China. **Remote Sensing**, v. 14, n. 20, 1 out. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/20/5215>. Acesso em: 21 jan. 2024.

FULLIN, N. *et al.* Quantitative Characterization of Coastal Cliff Retreat and Landslide Processes at Portonovo–Trave Cliffs (Conero, Ancona, Italy) Using Multi-Source Remote Sensing Data. **Remote Sensing**, v. 15, n. 17, 1 set. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/17/4120>. Acesso em: 27 jan. 2024.

GÖRÜM, T. Landslide recognition and mapping in a mixed forest environment from airborne LiDAR data. **Engineering Geology**, v. 258, 14 ago. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0013795219303539>. Acesso em: 12 fev. 2024.

GUO, C. *et al.* Geohazard Recognition and Inventory Mapping Using Airborne LiDAR Data in Complex Mountainous Areas. **Journal of Earth Science**, v. 32, n. 5, p. 1079–1091, 1 out. 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12583-021-1467-2>. Acesso em: 23 dez. 2023.

GUPTA, S. K.; SHUKLA, D. P. Application of drone for landslide mapping, dimension estimation and its 3D reconstruction. **Journal of the Indian Society of Remote Sensing**, v. 46, n. 6, p. 903–914, 1 jun. 2018. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12524-017-0727-1>. Acesso em: 17 jan. 2024.

HU, X. *et al.* Internal kinematics of the Slumgullion landslide (USA) from high-resolution UAVSAR InSAR data. **Remote Sensing of Environment**, v. 251, 15 dez. 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0034425720304272>. Acesso em: 2 fev. 2024.

HUNG, C. L. J. *et al.* **Multi-temporal high-resolution landslide monitoring based on uas photogrammetry and UAS lidar geoinformation.** International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives. International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, 20 ago. 2019. Disponível em: <https://scispace.com/pdf/multi-temporal-high-resolution-landslide-monitoring-based-on-3qpbul0bgx.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2023.

JOHAN EDEN, T.; ALIMUDDIN, I.; AZIKIN, B. **Modeling vulnerability density of landslide using IFSAR DEM in Manuju and Bungaya District Gowa Regency, South Sulawesi.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Institute of Physics Publishing, 3 jul. 2020. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/500/1/012048>. Acesso em: 11 dez. 2023.

KAKAVAS, M.; KYRIOU, A.; NIKOLAKOPOULOS, K. G. **Assessment of freely available DSMs for landslide-rockfall studies.** SPIE-Intl Soc Optical Eng, 17 set. 2020. Disponível em: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/11534/115340R/Assessment-of-freely-available-DSMs-for-landslide-rockfall-studies/10.1117/12.2573604.short>. Acesso em: 26 dez. 2023.

KOTSI, E. *et al.* Using UAS-Aided Photogrammetry to Monitor and Quantify the Geomorphic Effects of Extreme Weather Events in Tectonically Active Mass Waste-Prone Areas: The Case of Mediane Ianos. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 13, n. 2, 1 jan. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/13/2/812>. Acesso em: 4 fev. 2024.

KOVANIČ, L. *et al.* Analysis of the suitability of high-resolution dem obtained using ALS and UAS (SfM) for the identification of changes and monitoring the development of selected geohazards in the alpine environment—A case study in high tatra, Slovakia. **Remote Sensing**, v. 12, n. 23, p. 1–25, 1 dez. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/23/3901>. Acesso em: 11 fev. 2024.

LIU, G. *et al.* **Landslide movement monitoring with ALOS-2 SAR data.** IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Institute of Physics Publishing, 4 mar. 2019. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/227/6/062015>. Acesso em: 16 jan. 2024.

LIU, M. *et al.* InSAR-based method for deformation monitoring of landslide source area in Baihetan reservoir, China. **Frontiers in Earth Science**, v. 11, 2023. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/earth-science/articles/10.3389/feart.2023.1253272/full>. Acesso em: 29 jan. 2024.

LIU, X. *et al.* Multi-temporal loess landslide inventory mapping with C-, X- and L-band SAR Datasets-A case study of Heifangtai loess landslides, China. **Remote Sensing**, v. 10, n. 11, 1 nov. 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/10/11/1756>. Acesso em: 27 jan. 2024.

MINAS GERAIS. **Plano de Comando**. 5. Ed. Belo Horizonte: Corpo de Bombeiros Militar de Minas Gerais, 2023. Disponível em:

[https://www.bombeiros.mg.gov.br/storage/files/13/PLANO%20DE%20COMANDO%205%C2%AA%20EDI%C3%87%C3%83O%20-%202023-2024%20\(vers%C3%A3o%20Web\).pdf](https://www.bombeiros.mg.gov.br/storage/files/13/PLANO%20DE%20COMANDO%205%C2%AA%20EDI%C3%87%C3%83O%20-%202023-2024%20(vers%C3%A3o%20Web).pdf). Acesso em: 13 fev. 2024.

MOHAN, A. *et al.* Review on remote sensing methods for landslide detection using machine and deep learning. **Transactions on Emerging Telecommunications Technologies**, v. 32, n. 7, 1 jul. 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ett.3998>. Acesso em: 20 fev. 2024.

MOHER, D. *et al.* **Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses: The PRISMA Statement**. PLoS Med. 2009 Jul 21;6(7):e1000097. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19621072/>. Acesso em: 13 dez. 2023.

MUHADI, N. A. *et al.* The Use of LiDAR-Derived DEM in Flood Applications: A Review. **Remote Sensing**. MDPI AG, 1 jul. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/14/2308>. Acesso em: 23 dez. 2023.

RAMIREZ, R.; LEE, S. R.; KWON, T. H. Long-term remote monitoring of ground deformation using sentinel-1 interferometric synthetic aperture radar (INSAR): Applications and insights into geotechnical engineering practices. **Applied Sciences (Switzerland)**, v. 10, n. 21, p. 1–20, 1 nov. 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2076-3417/10/21/7447>. Acesso em: 7 jan. 2024.

RODRIGUES, S. C.; AUGUSTIN, C. H. R. R.; NAZAR, T. I. S. M. Mapeamento Geomorfológico do Estado de Minas Gerais: uma proposta com base na morfologia. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 24, n. 1, 1 jan. 2023. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/2233>. Acesso em: 15 jan. 2024.

SASSA, K.; MIKOS, M.; YIN, Y. **Advancing Culture of Living with Landslides**. [s.l.] Springer International Publishing, 2017. v. 1. Disponível em: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-59469-9>. Acesso em: 7 fev. 2024.

TIWARI, A. *et al.* **Multi-sensor geodetic approach for landslide detection and monitoring**. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Copernicus GmbH, 15 nov. 2018. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/329007663_MULTI-SENSOR_GEODETTIC_APPROACH_FOR_LANDSLIDE_DETECTION_AND_MONITORING. Acesso em: 20 fev. 2024.

UFSC. Universidade Federal de Santa Catarina. Centro Universitário de Estudos e Pesquisas sobre Desastres. **Capacitação Básica em Defesa Civil**. 2. ed. Brasília: CEPED UFSC, 2011. Disponível em: <https://www.ceped.ufsc.br/wp-content/uploads/2012/01/Capacita%C3%A7%C3%A3o-B%C3%A1sica-em-Defesa-Civil-livro-texto.pdf>. Acesso em: 8 jan. 2024.

WU, B. **Photogrammetry for 3D Mapping in Urban Areas**. Urban Book Series. [s.l.] Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021. p. 401–413.

Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-8983-6_23.
Acesso em: 19 jan. 2024.

WU, Y. *et al.* **Landslide and Debris Flow Disasters in China**. SHI, P. (Ed.). Beijin: Springer Nature, 2016. p. 73–101. Disponível em:
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-662-50270-9_3. Acesso em: 1 fev. 2024.

WUBALEM, A. Landslide Inventory, Susceptibility, Hazard and Risk Mapping. **Landslides**. [s.l.] IntechOpen, 2022. Disponível em:
<https://www.intechopen.com/chapters/79383>. Acesso em: 3 fev. 2024.

XU, Q. *et al.* Mapping and characterizing displacements of landslides with InSAR and airborne LiDAR technologies: A case study of Danba county, southwest China. **Remote Sensing**, v. 13, n. 21, 1 nov. 2021a. Disponível em:
<https://www.mdpi.com/2072-4292/13/21/4234>. Acesso em: 28 jan. 2024.

XU, Y. *et al.* Landslide monitoring and runout hazard assessment by integrating multi-source remote sensing and numerical models: an application to the Gold Basin landslide complex, northern Washington. **Landslides**, v. 18, n. 3, p. 1131–1141, 1 mar. 2021b. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10346-020-01533-0>. Acesso em: 6 jan. 2024.

YI, Y. *et al.* Landslide Detection Using Time-Series InSAR Method along the Kangding-Batang Section of Shanghai-Nyalam Road. **Remote Sensing**, v. 15, n. 5, 1 mar. 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/15/5/1452>. Acesso em: 24 jan. 2024.

ZAKHAROV, A.; ZAKHAROVA, L. The Bureya Landslide Recent Evolution According to Spaceborne SAR Interferometry Data. **Remote Sensing**, v. 14, n. 20, 1 out. 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/20/5218>. Acesso em: 2 fev. 2024.

ZHAO, C. *et al.* **Insar Application to Baige Landslide Event, China, from Fast Rescue to Catchment Investigation**. [s.l.]. 1 jul 2019. Disponível em:
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8899168>. Acesso em: 28 dez. 2023.

APÊNDICE A

Quadro resumo: síntese com as principais informações dos artigos selecionados

Continua

Nº	Título do artigo	Técnicas utilizadas	País	Resumo
1	<i>A multi-source remote sensing satellite view of the February 22nd Xinjing landslide in the mining area of Alxa left Banner, China (An et al., 2023)</i>	Fotogrametria (satélite ótico – PlanetScope); Satélite Radar (InSAR/Sentinel 1)	China	Utiliza dados de InSAR e imagens óticas do PlanetScope para determinar a causa de um deslizamento de terra em uma área de mina.
2	<i>Evaluation of uncrewed aircraft systems' LiDAR data quality (Babbel et al., 2019)</i>	LiDAR – aéreo (por Unmanned Aerial Vehicle (UAV) e aeronave tripulada) e terrestre, GNSS e Estação total	Estados Unidos	Avalia a precisão de dados LiDAR obtidos por UAV, em região de deslizamento, comparando seus resultados com os de LiDAR terrestre, LiDAR em aeronave tripulada, medições de GNSS e estação total, apontando bons resultados para o LiDAR obtido por UAV.
3	<i>Use of DEMs derived from TLS and HRSI data for landslide feature recognition (Barbarella et al., 2018)</i>	LiDAR – terrestre, Fotogrametria por satélite ótico (High Resolution Satellite Imagery (HRSI)): GeoEye-1)	Itália	Analisa as dificuldades na utilização de dois métodos de imageamento para mapeamento de deslizamentos de terra, a saber LiDAR terrestre e fotogrametria de alta resolução por imagem de satélite ótico. Ainda, compara as duas técnicas e descreve aquisição e processamento dos dados.
4	<i>Analysis of landslide kinematics using multi-temporal unmanned aerial vehicle imagery, La Honda, California (Carey et al., 2019)</i>	Fotogrametria (UAV – Técnica Structure From Motion – SfM), LiDAR	Estados Unidos	Detalha a aquisição e o processamento de imagens (DEMs) obtidas por drone, com a técnica SfV e compara com imagens de LiDAR, concluindo que para regiões com pouca vegetação é uma técnica com bons resultados.
5	<i>Identification of micro-scale landforms of landslides using precise digital elevation models (Chudý et al., 2019)</i>	LiDAR, Fotogrametria (UAV) – técnica Structure From Motion (SfM)	Eslováquia	Apresenta mapeamento de deslizamentos através de LiDAR, UAV (fotogrametria) e por câmeras convencionais (fotogrametria), sugerindo a implantação de técnicas de baixo custo e alto benefício.
6	<i>Monitoring soil creep landsliding in an urban area using persistent scatterer interferometry (El Papiol, Catalonia, Spain) (Crosetto et al., 2018)</i>	InSAR – TerraSAR X, técnica PSI	Espanha	Utiliza imagens de InSAR, através da técnica Persistent Scatter Interferometry (PSI) para mapear deslizamentos lentos em área urbana.

Quadro resumo: síntese com principais informações dos artigos selecionados

Continuação

Nº	Título do artigo	Técnicas utilizadas	País	Resumo
7	<i>Identification and evaluation of the high mountain upper slope potential landslide based on multi-source remote sensing: the Aniangzhai landslide case study (Dai et al., 2023)</i>	Fotogrametria (UAV), InSAR (Sentinel 1, SRTM), LiDAR – terrestre	China	Combina técnicas de fotogrametria, InSAR e LiDAR para mapear regiões susceptíveis a deslizamentos em região montanhosa, demonstrando vantagens e desvantagens.
8	<i>Post-disaster assessment of 2017 catastrophic Xinmo landslide (China) by spaceborne SAR interferometry (Dai et al., 2019)</i>	InSAR (Sentinel 1 – banda C, TanDEM, X-band), Fotogrametria (UAV)	China	Descreve a delimitação de um deslizamento de terra através de InSAR e fotogrametria por UAV, com imagens de antes e depois do evento.
9	<i>Identifying potential landslides on giant Niexia slope (China) based on integrated multi-remote sensing technologies (Dong et al., 2022)</i>	Fotogrametria (PlanetScope), InSAR (Sentinel 1, SRTM), LiDAR	China	Compila fotogrametria, InSAR e LiDAR para identificar possíveis deslizamentos de terra, trazendo comparações entre as três técnicas.
10	<i>Route Plans for UAV aerial surveys according to different DEMs in complex mountainous surroundings: A case study in the Zheduoshan mountains, China (Du et al., 2022)</i>	Fotogrametria (UAV), InSAR (Sentinel 1, ALOS Palsar)	China	Descreve metodologia para traçar planos de rotas para drones (utilizados na construção de DEMs), baseado em DEMs advindos de InSAR.
11	<i>Quantitative characterization of coastal cliff retreat and landslide processes at Portonovo–Trave cliffs (Conero, Ancona, Italy) using multi-Source remote sensing data (Fullin et al., 2023)</i>	Fotogrametria (ortofotografia, UAV), LiDAR – aéreo	Itália	Utiliza dados de fotogrametria e LiDAR para identificar deslizamentos de terra em escarpas na costa da Itália.
12	<i>Landslide recognition and mapping in a mixed forest environment from airborne LiDAR data (Görüm, 2019)</i>	LiDAR – aéreo	Turquia	Demonstra poder de processamento da técnica LiDAR para omitir cobertura vegetal para a identificação de deslizamentos.
13	<i>Geohazard recognition and inventory mapping using airborne LiDAR data in complex mountainous areas (Guo et al., 2021)</i>	LiDAR	China	Utiliza LiDAR com a técnica Sky View Factor (SVF) para a identificação de deslizamentos de terra, bem como comparação de SVF com Hillshade em diferentes angulações.

Quadro resumo: síntese com principais informações dos artigos selecionados

Continuação

Nº	Título do artigo	Técnicas utilizadas	País	Resumo
14	<i>Application of drone for landslide mapping, dimension estimation and its 3D reconstruction (Gupta; Shukla, 2018)</i>	Fotogrametria (UAV – técnica SfM)	Índia	Estuda a identificação de deslizamentos de terra através de imagens obtidas por drone com estação total, descrevendo bem a técnica Structure from Motion e produzindo imagens em 3D.
15	<i>Internal kinematics of the Slumgullion landslide (USA) from high-resolution UAVSAR InSAR data (Hu et al., 2020)</i>	InSAR (Sentinel 2, SRTM), LiDAR – aéreo	Estados Unidos	Estuda o desenvolvimento (posição e velocidade) de um deslizamento lento nos EUA através de InSAR (Sentinel 2) e confirma com LiDAR.
16	<i>Multi-temporal high-resolution landslide monitoring based on UAS photogrammetry and UAS LiDAR geoinformation (Hung et al., 2019)</i>	LiDAR aéreo, fotogrametria por UAV	Taiwan	Apresenta mapeamento de deslizamento de terra através de LiDAR e fotogrametria por UAV.
17	<i>Modeling vulnerability density of landslide using IFSAR DEM in Manuju and Bungaya District Gowa Regency, South Sulawesi (Johan Eden; Alimuddin; Azikin, 2020)</i>	InSAR (Sentinel 2)	Indonésia	Utiliza dados extraídos de InSAR em conjunto de outras informações para construção de mapa de susceptibilidade de deslizamento.
18	<i>Assessment of freely available DSMs for landslide-rockfalls studies (Kakavas; Kyriou; Nikolakopoulos, 2020)</i>	InSAR (SRTM, Alos, Tandem, Aster)	Grécia	Compara imagens de InSAR obtidas por diferentes satélites para discorrer sobre a precisão dos dados. Através do estudo foi constatado que as imagens do satélite ALOS são os mais precisos entre os distribuídos gratuitamente.
19	<i>Using UAS-aided photogrammetry to monitor and quantify the geomorphic effects of extreme weather events in tectonically active mass waste-prone areas: the case of Mediane lands (Kotsi et al., 2023)</i>	Fotogrametria (UAV com GNSS)	Grécia	Utiliza UAV com GNSS para a construção de DEM para identificação de deslizamentos de terra.
20	<i>InSAR-based method for deformation monitoring of landslide source area in Baihetan reservoir, China (Liu et al., 2023)</i>	InSAR (Sentinel 1, Landsat 8/9)	China	Utiliza dados de InSAR para analisar região montanhosa propensa a deslizamentos de terra, focando no processamento de dados para suprimir erro relacionado a vegetação.

Quadro resumo: síntese com principais informações dos artigos selecionados

Continuação

Nº	Título do artigo	Técnicas utilizadas	País	Resumo
21	<i>Analysis of the suitability of high-resolution DEM obtained using ALS and UAS (SfM) for the identification of changes and monitoring the development of selected geohazards in the alpine environment—A case study in high Tatras, Slovakia (Kovanič et al., 2020)</i>	Fotogrametria (UAV – SfM), LiDAR – terrestre e aéreo	Eslováquia	Apresenta uma comparação entre os dados obtidos por LiDAR terrestre, LiDAR aéreo e fotogrametria (UAV – SfM), apontando que o melhor custo-benefício seria a fotogrametria por drone.
22	<i>Landslide movement monitoring with ALOS-2 SAR data (Liu et al., 2019)</i>	InSAR diferencial (ALOS PALSAR 2)	China	Utiliza a técnica de InSAR diferencial para identificar regiões de deslizamentos; traz uma explicação básica sobre o InSAR diferencial, apresentando mapas com informações relevantes.
23	<i>Multi-Temporal Loess landslide inventory mapping with C-, X- and L-band SAR datasets—A case study of Heifangtai Loess landslides, China (Liu et al., 2018)</i>	InSAR (ALOS – bandas X e L; Sentinel 1; TerraSAR – banda C)	China	Estuda a identificação de deslizamentos de terra a partir de fontes diversas de imagens de radar e discute sobre aquisição e processamento dos dados.
24	<i>Long-term remote monitoring of ground deformation using Sentinel-1 Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR): applications and insights into geotechnical engineering practices (Ramirez; Lee; Kwon, 2020)</i>	InSAR (Sentinel 1) – MT-InSAR	Coreia do Sul	Estuda o processamento de imagens InSAR através da técnica MT-InSAR, demonstrando resultados em ambientes urbanos e de florestas. Também fala vantagens e limitações do InSAR.
25	<i>Multi-sensor geodetic approach for landslide detection and monitoring (Tiwari et al., 2018)</i>	LiDAR terrestre, GNSS, Estação Total	Índia	Apresenta a coleta de dados em três épocas distintas por LiDAR terrestre, GNSS e Estação Total para a observação de deslizamento de terra.
26	<i>The Bureya landslide evolution according to spaceborne SAR Interferometry data (Zakharov; Zakharova, 2022)</i>	InSAR (Sentinel 1, ALOS Palsar, SRTM)	Rússia	Descreve a evolução de um deslizamento de terra, bem como traz uma boa base teórica sobre InSAR.

Quadro resumo: síntese com principais informações dos artigos selecionados

Conclusão

Nº	Título do artigo	Técnicas utilizadas	País	Resumo
27	<i>Landslide monitoring and runout hazard assessment by integrating multi-source remote sensing and numerical models: an application to the Gold Basin landslide complex, northern Washington (Xu et al., 2021b)</i>	LiDAR – aéreo, InSAR (Sentinel 1, ALOS Palsar, TerraSAR-TANDEM)	Estados Unidos	Analisa um deslizamento de terra em particular através de InSAR e LiDAR, além de apresentar um simulação de fluxo de detritos com modelagem D-Claw.
28	<i>Mapping and characterizing displacements of landslides with InSAR and airborne LiDAR technologies: a case study of Danba county, southwest China (Xu et al., 2021a)</i>	InSAR (Sentinel 1), LiDAR – Aéreo	China	Combina InSAR e LiDAR para a identificação de deslizamentos, propondo metodologia de trabalho conjunta e descreve bem técnicas de InSAR.
29	<i>Landslide detection using Time-Series InSAR method along the Kangding-Batang section of Shanghai-Nyalam road (Yi et al., 2023)</i>	InSAR (Sentinel 1, SRTM), fotogrametria (satélite ótico)	China	Faz uso de imagens de InSAR para identificar regiões propensas a deslizamentos, sugerindo posterior conferência em campo devido a imprecisão do método.
30	<i>InSAR application to Baige landslide event, China, from fast rescue to catchment investigation (Zhao et al., 2019)</i>	InSAR (Sentinel 1)	China	Apresenta análise de um deslizamento de terra através de imagens de InSAR, pelo radar Sentinel 1.

Fonte: elaboração própria (2024).