

Monitoramento de Alterações em Taludes por Meio da Análise Multitemporal de Nuvem de Pontos

Felipe Rodrigues de Oliveira

Graduando em Engenharia Civil, FECFAU, UNICAMP, Campinas, Brasil, F240214@dac.unicamp.br

Henrique Cândido de Oliveira

Professor Associado, FECFAU, UNICAMP, Campinas, Brasil, hcandido@unicamp.br

Paulo José Rocha de Albuquerque

Professor Titular, FECFAU, UNICAMP, Campinas, Brasil, pjra@unicamp.br

RESUMO: Os deslizamentos de terra constituem uma das principais ameaças naturais em regiões urbanas com relevo acidentado, causando perdas humanas, danos à infraestrutura e impactos ambientais. A dificuldade de acesso a áreas de risco e a limitação de recursos tornam os métodos tradicionais de monitoramento, baseados em inspeções de campo, muitas vezes inviáveis. Neste contexto, este artigo apresenta uma metodologia de análise multitemporal de nuvens de pontos *LiDAR*, voltada à detecção de alterações altimétricas em taludes urbanos. Adicionalmente, propõe-se um modelo radial adaptativo capaz de ampliar a cobertura direcional da análise. A metodologia foi implementada em Python, utilizando dados públicos de *LiDAR*, com filtragem para extração do terreno, interpolação de perfis altimétricos e visualização interativa. Os resultados mostraram coerência com padrões esperados de deslocamento, permitindo identificar áreas críticas por meio de variações altimétricas. A abordagem se mostrou eficaz mesmo em ambientes com vegetação, embora apresente limitações em regiões densamente cobertas. Com isso, destaca-se o potencial da metodologia como ferramenta de apoio à prevenção de desastres, especialmente em contextos urbanos. Estudos como este contribuem para democratizar o acesso a tecnologias de monitoramento remoto e fortalecer políticas públicas voltadas às regiões de risco geotécnico.

PALAVRAS-CHAVE: Sensoriamento Remoto, *LiDAR* aerotransportado, Modelos Digitais de Terreno (MDT), Mapa de Risco.

ABSTRACT: Landslides are among the main natural hazards in urban areas with steep terrain, causing human losses, infrastructure damage, and environmental impacts. The difficulty of accessing risk areas and the lack of resources often make traditional monitoring methods, based on field inspections, unfeasible. In this context, this paper presents a methodology based on multitemporal analysis of *LiDAR* point clouds for detecting slope changes in urban environments. Additionally, it proposes an adaptive radial model to enhance the directional coverage of the analysis. The methodology was implemented in Python using publicly available *LiDAR* datasets, and included terrain filtering, interpolation of altimetric profiles, and interactive visualization. The results were consistent with expected displacement patterns, allowing the identification of critical areas through elevation changes. The approach proved to be effective even in vegetated environments, although some limitations were observed in densely forested regions. This study reinforces the potential of the proposed methodology as a practical tool for landslide risk monitoring, especially in urban settings. By promoting accessible and remote monitoring techniques, it contributes to the democratization of geospatial technologies and the strengthening of public policies for geotechnical risk management.

KEYWORDS: Remote Sensing, Airborne *LiDAR*, Digital Terrain Models (DTM), Risk Map.

1 INTRODUÇÃO

Os deslizamentos de terra representam uma das principais ameaças geológicas às populações que vivem em áreas de relevo acidentado, principalmente em países tropicais e em desenvolvimento, como o



Brasil. Estima-se que milhões de pessoas estejam expostas a riscos associados aos deslizamentos, com desastres recorrentes que comprometem não apenas a infraestrutura urbana, mas também resultam em perdas humanas. A situação é agravada à medida que a expansão urbana desordenada força parte da população a ocupar zonas de risco, muitas vezes sem planejamento ou contenções adequadas, como discutido por Mora *et al.* (2018).

Diversos episódios de deslizamentos graves ilustram o impacto desse tipo de fenômeno, tão recorrente no Brasil, como os eventos ocorridos na região serrana do Rio de Janeiro em 2011 e, mais recentemente, em cidades como Petrópolis, São Sebastião e Franco da Rocha, que registraram centenas de mortes e uma grande área de destruição. A gestão de risco em encostas urbanas exige ações preventivas, como a produção de mapas de risco geológico-geotécnico, usualmente elaborados por meio de inspeções em campo promovidas por órgãos como o Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), o Serviço Geológico do Brasil (SGB) e as Defesas Cíveis municipais. Contudo, esses levantamentos demandam mão de obra especializada, tempo e recursos financeiros consideráveis, o que os torna, muitas vezes, inviáveis por diversos fatores (Santos, 2020).

Neste cenário, tecnologias de sensoriamento remoto se tornam alternativas promissoras para o monitoramento de taludes. Em particular, os Sistemas de Varredura a LASER Aerotransportados, como o *LiDAR* aerotransportado (*ALS*), e o *LiDAR* embarcado em drones (*UAV LiDAR*), têm sido cada vez mais utilizados para a aquisição de nuvens de pontos tridimensionais de alta densidade e precisão. A partir dessas nuvens, é possível gerar Modelos Digitais de Terreno (MDTs) e realizar análises detalhadas, como mudanças altimétricas ao longo do tempo (Hung *et al.*, 2019; Ventura *et al.*, 2011).

A análise multitemporal dessas nuvens de pontos permite identificar padrões de instabilidade em encostas por meio da comparação entre diferentes épocas de aquisição, como discutido na literatura (Barbarella e Lugli, 2015; Burns *et al.*, 2010; Dewitte *et al.*, 2008). Isso viabiliza a detecção precoce de movimentos de massa, contribuindo para a elaboração de produtos como mapas de risco. Um exemplo importante do uso dessa abordagem em território nacional é o projeto Geosampa¹, que disponibiliza abertamente dados geoespaciais, incluindo nuvens de pontos *LiDAR* da cidade de São Paulo, fomentando pesquisas aplicadas ao monitoramento geotécnico urbano.

Todavia, nos estudos mencionados, ainda é perceptível a necessidade de métodos acessíveis e replicáveis que permitam aplicar a análise multitemporal de nuvens de pontos em contextos urbanos brasileiros, especialmente com base em plataformas de dados abertos e de baixo custo computacional.

Com isso, o objetivo deste trabalho é avaliar a eficácia da análise multitemporal de nuvens de pontos *LiDAR* para o monitoramento remoto de alterações morfológicas em taludes urbanos, buscando identificar áreas de risco com base em modificações no relevo ao longo do tempo. O método proposto visa complementar as inspeções de campo, oferecendo subsídios para torná-las mais assertivas, podendo ser utilizado por prefeituras e pesquisadores na prevenção de deslizamentos e na proteção de áreas vulneráveis.

2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 Tipos de deslizamentos e elementos que favorecem sua ocorrência

Os deslizamentos de terra consistem no movimento descendente de massas de solo, rocha ou material orgânico, impulsionadas pela gravidade ao longo de uma encosta inclinada. Segundo Highland e Bobrowsky (2008), esses fenômenos englobam diferentes tipos de movimentos de massa, classificados de acordo com o tipo de material envolvido e a natureza do movimento, como escorregamentos, quedas e escoamentos. Dentro dos escorregamentos, os tipos rotacional e translacional são os mais comuns, sendo especialmente relevantes em áreas urbanas de encosta sujeitas à ocupação desordenada e alterações antrópicas no relevo.

Os escorregamentos rotacionais ocorrem sobre superfícies de ruptura curvas, com movimentos rotatórios de massa instável, típicos de solos homogêneos e taludes de aterro. Os escorregamentos translacionais se desenvolvem sobre superfícies mais planas, frequentemente associadas a descontinuidades

¹ O Geosampa é o portal de mapeamento oficial da Prefeitura de São Paulo, com dados geoespaciais gratuitos, como ortofotos e dados *LiDAR*. Disponível em: <https://geosampa.prefeitura.sp.gov.br>. Acesso em: 06/07/2025.

geológicas como estratificações ou interfaces solo-rocha. Ambos os tipos podem ser acelerados por fatores como chuvas intensas, saturação do solo e remoção da base do talude, além da influência de atividades humanas como cortes e aterros mal planejados e ausência de drenagem. A Figura 1 mostra esquemas representativos dos principais tipos de movimentos de massa.

Os fatores condicionantes da instabilidade de encostas incluem declividade acentuada, presença de solos altamente intemperizados, descontinuidades estruturais, e principalmente regimes pluviométricos intensos, que aumentam o peso do solo e reduzem sua resistência ao cisalhamento (Dewitte *et al.*, 2008; Highland e Bobrowsky, 2008). Além disso, a ocupação antrópica exerce papel crítico nesse contexto, ao modificar o relevo natural, removendo a vegetação nativa e alterando padrões de drenagem, elementos críticos para a estabilidade das encostas.

Diante da magnitude dos impactos, com perdas humanas, degradação ambiental e danos à infraestrutura, o mapeamento e o monitoramento de áreas de risco torna-se altamente relevante para a prevenção de desastres. Nesse sentido, a associação entre caracterização geomorfológica e métodos quantitativos de mudanças no relevo, como os baseados em dados *LiDAR* e MDTs, tem se mostrado uma ferramenta eficiente e promissora na avaliação da estabilidade de taludes urbanos (Barbarella e Lugli, 2015; Jaboyedoff *et al.*, 2012).

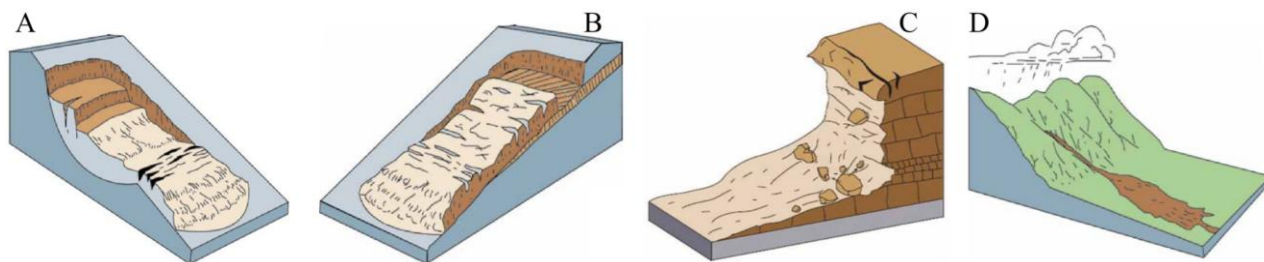


Figura 1 – Esquemas ilustrativos dos principais tipos de movimentos de massa. (A) Escorregamento rotacional; (B) escorregamento translacional; (C) queda; (D) escoamento.

Fonte: Modificado de Highland e Bobrowsky (2008).

2.2 Sistema de varredura a laser (*LiDAR*) e a geração de nuvens de pontos

A tecnologia *LiDAR* (*Light Detection and Ranging*) consiste em um sistema ativo de sensoriamento remoto que emite pulsos de laser e registra o tempo de retorno da energia refletida pelos alvos. Esse princípio permite calcular com alta precisão a distância entre o sensor e a superfície, possibilitando a obtenção de nuvens de pontos tridimensionais que representam a topografia do terreno, da vegetação ou construções urbanas (Santos, 2020).

O sistema pode ser embarcado em diferentes plataformas: aerotransportado (*ALS*), terrestre (*TLS*) ou em veículos não tripulados (*UAV LiDAR*). No contexto da análise de deslizamentos, destaca-se o *LiDAR* aerotransportado por sua capacidade de cobrir grandes áreas com alta resolução, sendo especialmente eficiente em ambientes florestados, pois consegue observar estruturas abaixo da copa das árvores, atingindo o solo, e gerando um MDT acurado (Burns *et al.*, 2010).

O produto mais comum gerado a partir dos dados *LiDAR* é a nuvem de pontos, composta por milhões de coordenadas tridimensionais georreferenciadas. A partir desse dado, é possível gerar Modelos Digitais de Superfície (MDS), Modelos Digitais de Terreno (MDT) e realizar análises, tais como a extração de curvas de nível e cálculos de declividade e orientação. Entre as possíveis aplicações, destaca-se a análise multitemporal de variações altimétricas, relevante para o monitoramento de processos de instabilidade. A Figura 2 mostra exemplos dessas visualizações, destacando uma perspectiva tridimensional (A) e uma visualização ortogonal com classificação temática (B).

A abordagem multitemporal envolve a comparação entre nuvens de pontos adquiridas em diferentes datas, possibilitando a detecção e quantificação de mudanças topográficas associadas a deslizamentos ou interferências antrópicas. Essa técnica, frequentemente implementada por meio de Modelos de Diferença (*DoD – DEM of Difference*), tem sido amplamente empregada no monitoramento e análise de encostas (Hung *et al.*, 2019).

Recentemente, o avanço de plataformas públicas de dados abertos tem ampliado o acesso a essas ferramentas. O projeto Geosampa, por exemplo, disponibiliza gratuitamente nuvens de pontos de alta

densidade para a cidade de São Paulo em diferentes épocas, promovendo a democratização do uso de LiDAR e incentivando o desenvolvimento de soluções aplicadas à prevenção de desastres geotécnicos em áreas urbanas.

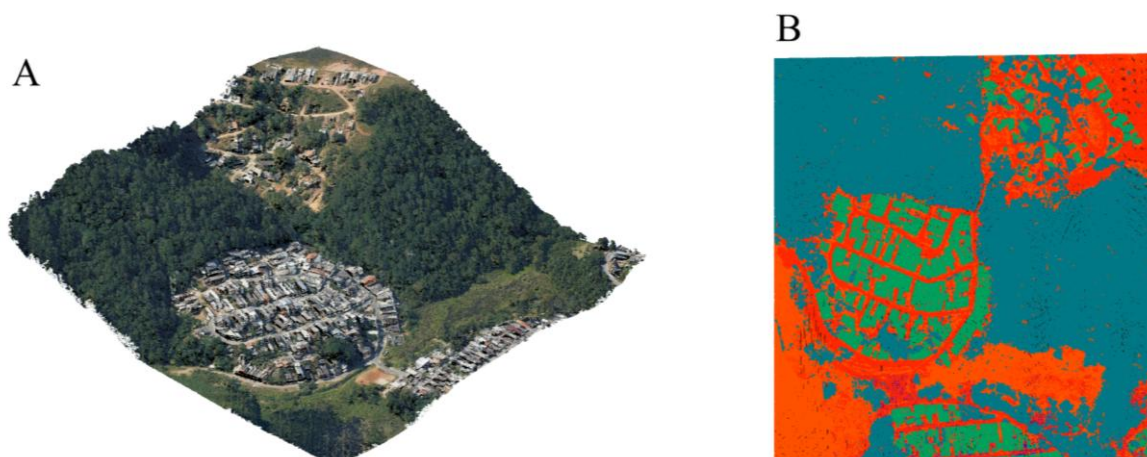


Figura 2 – Exemplos de visualizações da nuvem de pontos *LiDAR*. (A) Perspectiva tridimensional RGB; (B) Visualização ortogonal com classificação por cores (solo, vegetação e edificações).

3 METODOLOGIA

A abordagem implementada neste trabalho visa à identificação de variações topográficas em taludes por meio da análise multitemporal de nuvens de pontos *LiDAR*. O processo envolve uma série de etapas, desde o pré-processamento dos dados até a geração de produtos georreferenciados, como gráficos comparativos e mapas interativos. O desenvolvimento foi conduzido em linguagem Python, com suporte a bibliotecas e integração com o conjunto de ferramentas *LAStools*, disponível em Isenburg (s.d.).

O processo inicia-se com dois conjuntos de dados *LiDAR* multitemporais, representados por Modelos Digitais de Superfície (MDS), que passam por um pré-processamento para geração dos respectivos Modelos Digitais de Terreno (MDTs). A partir desses modelos, identifica-se o ponto de menor cota, utilizado como referência para a construção dos perfis altimétricos. Esses perfis são interpolados para ambos os períodos, permitindo a comparação altimétrica entre as épocas. A análise é repetida em múltiplas direções por meio de um modelo radial adaptativo. Por fim, os resultados são convertidos em produtos gráficos e mapas georreferenciados. As principais etapas da metodologia estão mostradas no fluxograma (Figura 3) e são detalhadas nas subseções de 3.1 a 3.5.

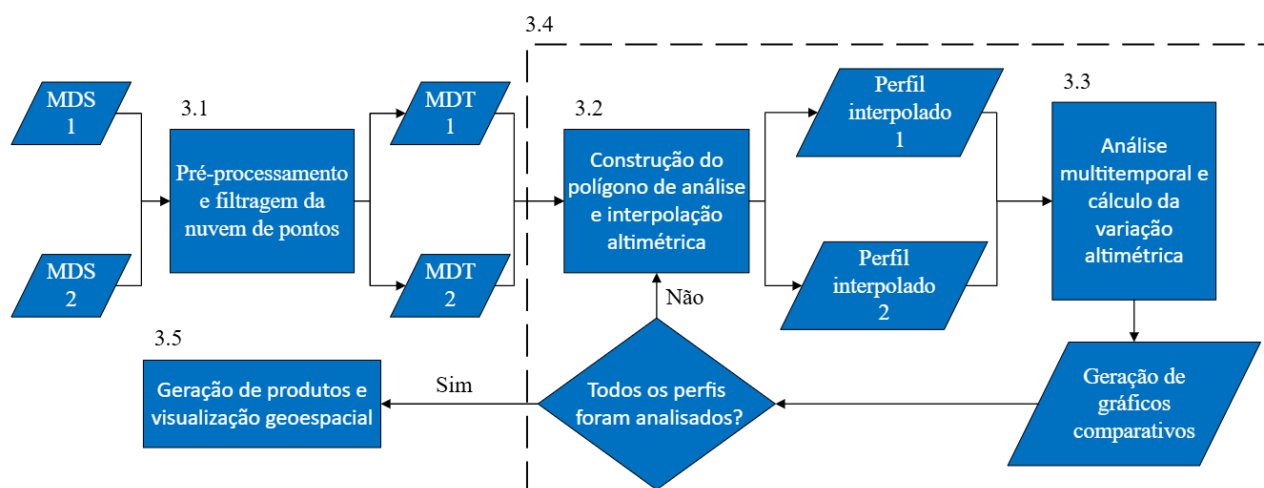


Figura 3 – Fluxograma da análise multitemporal de nuvens de pontos *LiDAR*.



3.1 Pré-processamento e filtragem da nuvem de pontos

Inicialmente, os dados *LiDAR* compactados no formato .laz são descompactados para .las e processados com ferramentas do conjunto LAStools. Em seguida, aplica-se um filtro de classificação com o objetivo de extrair exclusivamente os pontos classificados como terreno, eliminando vegetações, edificações e demais interferências. A partir da nuvem de pontos filtrada, são gerados os MDTs correspondentes aos dois períodos a serem analisados.

3.2 Construção do polígono de análise e interpolação altimétrica

Com base nos MDTs, identifica-se o ponto de menor cota altimétrica, adotado como origem do polígono de análise por fornecer um referencial geométrico que tende a alinhar os perfis no sentido mais representativo dos deslocamentos gravitacionais, como é comum em escorregamentos. A partir dos parâmetros de entrada, como direção (azimute) e largura, define-se a geometria do polígono, que é utilizada para recortar a área de interesse em ambas nuvens de pontos. Sobre esse recorte, são traçados perfis ao longo de seu eixo longitudinal, nos quais se aplica a interpolação altimétrica, permitindo reconstruir a superfície do terreno para cada período analisado.

3.3 Análise multitemporal e cálculo da variação altimétrica

Com os valores de cota interpolados para os dois períodos, realiza-se a análise comparativa ponto a ponto, resultando em um conjunto de valores diferenciais que representam a variação altimétrica entre as épocas. Para suavizar oscilações locais e realçar padrões relevantes, aplica-se um filtro baseado em gradientes, definidos como a média da variação altimétrica entre pontos consecutivos ao longo do perfil, equivalente a uma média móvel. Essa abordagem ajuda a eliminar ruídos indesejáveis, como interferências da vegetação, e destaca alterações mais consistentes e representativas do terreno.

3.4 Variação direcional e método radial adaptativo

Com o objetivo de ampliar a cobertura direcional da análise e mitigar efeitos de alinhamento entre os perfis, o procedimento descrito é repetido para múltiplos azimutes, realizando uma varredura radial da área ao redor do ponto de referência. Para compensar a variação na densidade de pontos, mais elevada nas regiões centrais e decrescente quanto mais distantes do centro, adotou-se um método radial adaptativo. Nesse modelo, a área analisada é segmentada em regiões côncricas, permitindo ajustar os parâmetros de varredura em função da distância, otimizando a distribuição espacial e garantindo maior uniformidade nos dados analisados.

3.5 Geração de produtos e visualização geoespacial

Adicionalmente aos produtos espaciais, são gerados dois tipos de gráficos auxiliares: o primeiro apresenta o perfil altimétrico comparativo entre os dois períodos; o segundo exibe a variação do gradiente ao longo dos perfis analisados.

Os resultados da análise são convertidos em arquivos vetoriais no formato KML, possibilitando sua visualização georreferenciada em *software* como o Google Earth. Cada ponto analisado é representado com coloração que expressa a intensidade da variação altimétrica entre os períodos avaliados. A escala adotada atribui cores distintas às regiões onde a cota aumentou, diminuiu ou permaneceu praticamente a mesma, facilitando a identificação de zonas com maior alteração topográfica. Mapas complementares também são gerados para destacar exclusivamente os setores cujos gradientes médios excedem um limiar crítico pré-definido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste item, são apresentados os principais resultados obtidos com a aplicação da metodologia proposta. A Figura 4 ilustra as etapas do fluxo de trabalho, desde o pré-processamento até a geração dos produtos finais. Além disso, a Figura 4C apresenta a sobreposição de perfis altimétricos em diferentes épocas, evidenciando deslocamentos no perfil analisado, enquanto a Figura 4D destaca os gradientes altimétricos calculados para o mesmo perfil.

Por sua vez, a Figura 4F é exibido o produto final da análise, no qual os pontos processados são convertidos em arquivos KML e exibidos com coloração proporcional à variação altimétrica. O gradiente cromático adotado utiliza o vermelho para representar a redução de cota, o verde para indicar estabilidade ou variação mínima e o azul para identificar elevações do terreno. Essa codificação permitiu uma interpretação intuitiva dos resultados, além de destacar de forma clara as regiões com maior alteração. Os mapas interativos mostraram-se úteis não apenas para a análise técnica, mas também para a comunicação dos riscos a equipes de campo.

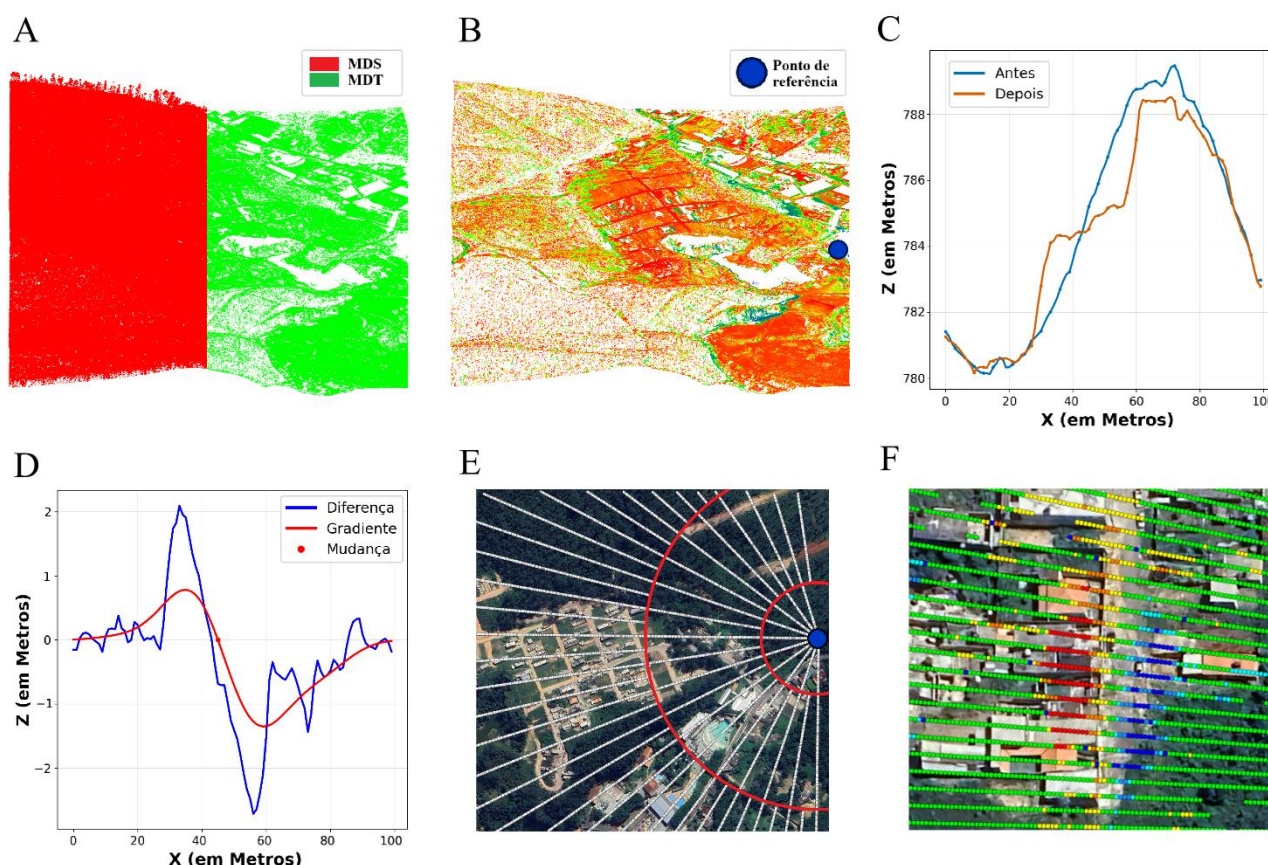


Figura 4 – Etapas do fluxo de trabalho. (A) Filtragem do Modelo Digital de Superfície (MDS) para obtenção do Modelo Digital de Terreno (MDT); (B) Definição automática do ponto de referência a partir da menor cota altimétrica; (C) Extração dos perfis e interpolação para ambos os períodos; (D) Cálculo da variação altimétrica com aplicação de gradientes; (E) Varredura radial com a aplicação do método radial adaptativo; (F) Geração dos produtos finais com codificação cromática da variação.

A coerência dos resultados obtidos com padrões descritos em outros estudos, como de Barbarella e Lugli (2015); e Ventura *et al.*, (2011) reforça a aplicabilidade da abordagem. Conforme discutido por Jaboyedoff *et al.*, (2012), a geometria da aquisição tem papel fundamental na acurácia da detecção de deslocamentos, especialmente em orientações perpendiculares entre o perfil e a direção do movimento, condição que também se manifestou como uma das limitações do presente estudo.



Apesar da robustez da metodologia, algumas limitações foram observadas durante a execução. A primeira refere-se à qualidade do MDT em áreas com cobertura vegetal densa, onde o filtro aplicado à nuvem de pontos pode não eliminar integralmente interferências, resultando em ondulações residuais nos perfis. Essa imprecisão impacta diretamente a fidelidade dos valores altimétricos extraídos. Soma-se a isso a ocorrência de perfis em direções menos favoráveis à identificação de deslocamentos, como as perpendiculares ao sentido do escorregamento, o que limita a representatividade dos dados em certos setores e, em alguns casos, inviabiliza a análise dos perfis críticos.

A aplicação do modelo radial adaptativo contribuiu para amenizar esses efeitos ao distribuir os perfis em múltiplas direções e permitindo ajustes conforme a densidade de pontos e distância ao centro. Ainda assim, o desempenho da metodologia é sensível à escolha do ponto de origem, fator que exige atenção nas análises.

Os resultados obtidos com a aplicação do método de análise multitemporal de nuvem de pontos demonstram eficácia no monitoramento de taludes urbanos. A comparação entre os MDTs gerados a partir de dados *LiDAR* de diferentes épocas permitiu identificar variações altimétricas significativas em áreas com alterações antrópicas e histórico de instabilidade, evidenciando deslocamentos superficiais compatíveis com os padrões esperados. A integração entre programação, processamento espacial automatizado e visualização interativa mostrou-se uma alternativa viável para apoiar diagnósticos preliminares e orientar inspeções de campo com maior precisão.

5 CONCLUSÕES

Este artigo propôs um método computacional para comparar nuvens de pontos *LiDAR* obtidas em diferentes épocas, com foco na detecção de variações topográficas em áreas urbanas suscetíveis a deslizamentos. A metodologia desenvolvida baseou-se na análise multitemporal de dados *LiDAR*, estruturada em um processo automatizado que abrange a filtragem das nuvens de pontos, a extração dos perfis altimétricos e a visualização geoespacial.

A partir dos resultados obtidos, é possível concluir que:

- o método demonstrou eficácia na detecção de deslocamentos verticais, mesmo em trechos com variações sutis de relevo;
- a representação espacial em arquivos KML, com coloração proporcional à variação altimétrica, mostrou-se eficiente para evidenciar zonas críticas;
- o modelo radial adaptativo contribuiu para ampliar a abrangência direcional da análise;
- os gráficos altimétricos e de gradiente auxiliaram na interpretação quantitativa dos dados; e
- constatou-se perda de precisão em áreas com vegetação densa e em perfis com orientação desfavorável, o que reforça a necessidade de utilizar a ferramenta com atenção às suas limitações.

Como perspectivas para estudos futuros, recomenda-se o aprimoramento dos filtros de classificação do terreno em áreas vegetadas, bem como a incorporação de parâmetros complementares à análise altimétrica, como dados geológicos e geotécnicos. Além disso, a aplicação da metodologia em diferentes contextos geográficos, associada a análises preliminares que antecedam as atividades de campo, pode ampliar seu potencial de uso na gestão de riscos em encostas urbanas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Barbarella, M; Fiani, M; Lugli, A. Landslide monitoring using multitemporal terrestrial laser scanning for ground displacement analysis. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, v. 6, n. 5–7, p. 398–418, 4 jul. 2015.

Burns, W. J.; Coe, J. A.; Kaya, B. S.; Ma, L. Analysis of elevation changes detected from multi-temporal *LiDAR* surveys in forested landslide terrain in western Oregon. *Environmental & Engineering Geoscience*, v. 16, n. 4, p. 315–341, 1 nov. 2010.



Dewitte, O; Jasselette, J.-C; Cornet, Y; Van Den Eeckhaut, M; Collignon, A; Poesen, J; Demoulin, A. Tracking landslide displacements by multi-temporal DTMs: A combined aerial stereophotogrammetric and LIDAR approach in western Belgium. *Engineering Geology*, v. 99, n. 1, p. 11–22, 9 jun. 2008.

Highland, L. M.; Bobrowsky, P. O Manual de Deslizamento – Um Guia para a Compreensão de Deslizamentos. 2008.

Hung, C.-L. J; Tseng, C.-W; Huang, M.-J; Tseng, C.-M; Chang, K.-J. multi-temporal high-resolution landslide monitoring based on uas photogrammetry and uas lidar geoinformation. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XLII-3/W8, p. 157–160, 21 ago. 2019.

Isenburg, M. *LASTTOOLS: Software for rapid LiDAR processing*. Disponível em: <<https://rapidlasso.de/product-overview/>>. Acesso em 06 jul. 2025.

Jaboyedoff, M; Oppikofer, T; Abellán, A; Derron, M.-H; Loye, A; Metzger, R; Pedrazzini, A. Use of LIDAR in landslide investigations: a review. *Natural Hazards*, v. 61, n. 1, p. 5–28, 1 mar. 2012.

Mora, O. E; Lenzano, M. G; Toth, C. K; Grejner-Brzezinska, D. A; Fayne, J. V. Landslide Change Detection Based on Multi-Temporal Airborne LiDAR-Derived DEMs. *Geosciences*, v. 8, n. 1, p. 23, jan. 2018.

Santos, L. F. *Utilização de dados 3D de alta resolução para detecção de mudanças em movimentos de massa em Perus, São Paulo (SP)*. Mestrado em Recursos Minerais e Meio Ambiente—São Paulo: Universidade de São Paulo, 28 abr. 2020.

Ventura, G; Vilardo, G; Terranova, C; Bellucci Sessa, E. Tracking and evolution of complex active landslides by multi-temporal airborne LiDAR data: The Montaguto landslide (Southern Italy). *Remote Sensing of Environment*, v. 115, n. 12, p. 3237–3248, 15 dez. 2011.