

VERIFICAÇÃO DE FEIÇÕES INDICATIVAS DE ESCORREGAMENTO UTILIZANDO DRONES

Universidade Presbiteriana Mackenzie

Coordenadoria de Fomento à Pesquisa - Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-
Graduação

Saymon Felipe Santos Cardim¹
Apoio: *PIBIC Mackenzie*

Alberto Alonso Lazaro²

Escola de Engenharia¹

Escola de Engenharia²

<saymon.cardim@mackenzista.com.br>
<alberto.alonso@mackenzie.com.br>

RESUMO

Os escorregamentos em áreas urbanas representam um grave risco no Brasil, e seu mapeamento por métodos tradicionais possui limitações de custo, segurança e detalhe. Este trabalho objetivou validar o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) como uma ferramenta de alta precisão para a identificação de feições indicativas de instabilidade de encostas. Para isso, realizou-se um levantamento aerofotogramétrico com VANT em três áreas de estudo no município de Francisco Morato (SP), caracterizadas pela interação entre ocupação urbana e relevo acidentado. As imagens foram processadas na plataforma de nuvem WebODM (WebODM Drone Software) para gerar produtos de alta resolução, como ortofotos e um Modelo Digital do Terreno (MDT), posteriormente analisados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (QGIS). A metodologia permitiu a identificação inequívoca de feições precursoras de risco. Na primeira área de estudo, foram observadas ocupações precárias na crista de taludes e o uso de lonas plásticas como medida emergencial, um claro indicador de instabilidade reconhecida. Na segunda área, um talude de corte artificial apresentou intensos processos erosivos, como ravinas e sulcos. A análise quantitativa, realizada por meio da extração de perfis topográficos a partir do MDT, corroborou a análise visual, medindo a elevada declividade da encosta com ângulos superiores a 45 graus. Os resultados demonstram que a metodologia com VANTs é uma ferramenta robusta e eficaz para a investigação geotécnica, integrando análises qualitativas e quantitativas de forma segura e eficiente, e contribuindo significativamente para a prevenção de desastres.

Palavras-chave: VANT; Escorregamentos; Aerofotogrametria.

ABSTRACT

Landslides in urban areas represent a serious risk in Brazil, and their mapping through traditional methods has limitations regarding cost, safety, and detail. This study aimed to validate the use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) as a high-precision tool for identifying features indicative of slope instability. For this purpose, an aerial photogrammetric survey was conducted with a UAV in three study areas within the municipality of Francisco Morato (SP), characterized by the interaction between urban occupation and steep terrain. The images were processed on the WebODM (WebODM Drone Software) cloud platform to generate high-resolution products, such as orthophotos and a Digital Terrain Model (DTM), which were subsequently analyzed in a Geographic Information System (GIS) environment (QGIS). The

methodology allowed for the unequivocal identification of risk-precursory features. In the first study area, precarious occupations on slope crests and the use of plastic tarps as an emergency measure—a clear indicator of recognized instability—were observed. In the second area, an artificial cut slope showed intense erosional processes, such as gullies and rills. The quantitative analysis, performed by extracting topographic profiles from the DTM, corroborated the visual analysis by measuring the slope's high steepness with angles exceeding 45 degrees. The results demonstrate that the UAV-based methodology is a robust and effective tool for geotechnical investigation, integrating qualitative and quantitative analyses in a safe and efficient manner, and contributing significantly to disaster prevention.

Keywords: UAV; Landslides; Photogrammetry.

1. INTRODUÇÃO

Os desastres naturais representam um desafio crescente e alarmante na sociedade contemporânea, com graves consequências para as comunidades locais. No Brasil, os deslizamentos de terra em áreas ocupadas de forma vulnerável se destacam entre os desastres, devido ao significativo número de perdas humanas e aos extensos danos materiais que acarretam.

A expansão urbana desordenada, especialmente em grandes centros como a Região Metropolitana de São Paulo, é um fator determinante nesse cenário. A ocupação de áreas geologicamente instáveis, como encostas de alta declividade, muitas vezes ocorre em decorrência de processos de segregação socioespacial e de falta de planejamento urbano adequado. Nesse sentido, Bedin e Lázaro (2024, p. 3) destacam que:

Na região metropolitana de São Paulo, a presença de construções sem planejamento e qualidade, fruto das desigualdades sociais e econômicas, impulsionou a ocupação de zonas propícias a acidentes naturais, como enchentes e escorregamentos de massa.

O município de Francisco Morato, inserido neste contexto metropolitano, é um exemplo emblemático dessa problemática, sendo reconhecido por registrar um número considerável de ocorrências de escorregamentos e inundações. Tal realidade evidencia a necessidade urgente de desenvolver e aplicar métodos eficientes para a análise e prevenção de riscos, justificando a busca por novas tecnologias que possam aprimorar o diagnóstico e a mitigação desses fenômenos.

Para responder à demanda por análises de risco, as metodologias de mapeamento geotécnico tradicionalmente se baseiam em levantamentos de campo, que são essenciais para a identificação de evidências de instabilidade. Técnicas como a abertura de poços de inspeção, trincheiras e a execução de sondagens são fundamentais para o conhecimento do subsolo (AUGUSTO FILHO et al., 2012). Contudo, esses métodos convencionais, apesar de consolidados, apresentam limitações significativas.

Uma das principais limitações é o fato de serem investigações pontuais. Enquanto uma sondagem fornece informações precisas para um ponto específico, ela não representa a variabilidade espacial do terreno entre os pontos de investigação (BACCARO, 2017). Além disso, o mapeamento de risco, quando dependente exclusivamente de equipes em campo, é uma atividade que demanda consideráveis recursos financeiros e de tempo (JUNGLÉS;

SCHADECK, s.d.). Em áreas de risco acentuado, o acesso pode ser perigoso para os técnicos, e a complexidade do relevo pode dificultar a obtenção de uma visão integrada da área.

Considerando tais desafios, é indicado a busca de aprimoramento dessas metodologias, integrando novas tecnologias para superar as limitações dos métodos puramente convencionais. A evolução para o mapeamento digital, utilizando Sistemas de Informações Geográficas (SIG), sensoriamento remoto e modelos numéricos, visa justamente melhorar a precisão e a qualidade da informação espacial (SAMBORSKI; STAFFA; DEBIASI, 2014). Nesse contexto, o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) surge como uma ferramenta promissora, capaz de gerar dados de altíssima resolução de forma rápida e segura, oferecendo uma nova perspectiva para análise detalhada das feições que indicam perigo em encostas.

A utilização de drones como ferramenta inovadora para levantamentos se apresenta como um potencial transformador na área de avaliação de riscos de escorregamento e estabilidade de taludes (SANTOS; et al., 2019). A capacidade dos drones de sobrevoar áreas de difícil acesso e capturar imagens de alta resolução oferece uma análise inédita quanto à obtenção de dados geoespaciais detalhados e precisos.

Este projeto propõe explorar a visão de levantamentos utilizando drones como uma abordagem pioneira e eficaz para a identificação de feições indicativas de escorregamento. Por meio da análise de imagens aéreas e da aplicação de técnicas de processamento digital, pretendemos mapear e caracterizar os diferentes tipos de feições geomorfológicas associadas à instabilidade de taludes.

Adotar uma abordagem inovadora e tecnologicamente avançada é sinônimo de superação quanto às limitações das técnicas convencionais de levantamento, visto as diversas possibilidades e viabilidades apresentadas por elas, que muitas vezes são restritas pela inacessibilidade do terreno ou pela falta de detalhamento espacial. Não temos apenas o objetivo de ampliar o conhecimento sobre as características e padrões de distribuição das feições indicativas de escorregamento, mas também de contribuir para o desenvolvimento de metodologias mais eficientes e econômicas para a gestão de riscos geológicos.

As viabilidades oferecidas pelo uso de drones também se destacam no aspecto da segurança. Ao substituir métodos tradicionais que exigem a presença física de equipes em terrenos instáveis ou de difícil alcance, os drones reduzem significativamente o risco de acidentes e incidentes relacionados ao trabalho em ambientes perigosos (OLIVEIRA; et al., 2024). Além disso, a capacidade dos drones de sobrevoar áreas remotas e inacessíveis permite a realização de inspeções detalhadas sem expor os trabalhadores a situações de perigo. Essa

abordagem não apenas protege a vida e a integridade física dos profissionais envolvidos, mas também otimiza os recursos e aumenta a eficiência das operações de avaliação de riscos geotécnicos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

A seguir estão relacionados e descritos os trabalhos e obras que serão objeto da pesquisa.

O manual Ocupação de Encostas (CUNHA, 1991), publicado pelo IPT, com nº 1831, em 1991, aborda assuntos como: instabilidade de encostas decorrente da ação do homem, medidas para o gerenciamento da ocupação de encostas e tipos de obras utilizadas na estabilização de encostas.

Em 1998, a ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia publicou o livro Geologia de Engenharia (OLIVEIRA; BRITO, 1998), um livro didático, com o objetivo de tornar mais acessível a todos que trabalham com o meio físico, os conceitos abrangidos pela Geologia de Engenharia, destacando-se para o presente estudo: o Capítulo 15 Estabilidade de Taludes e o Capítulo 18 – Riscos Geológicos.

Em 2006, o Ministério das Cidades publicou um guia para implantação de políticas públicas municipais, de prevenção de riscos de escorregamentos de encostas denominado Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas - Guia para elaboração de políticas municipais (CARVALHO; GALVÃO, 2006), esse guia apresenta definições de áreas de risco, de ocupações nessas áreas, com o objetivo de fortalecer a gestão urbana de áreas sujeitas a fatores de risco de escorregamentos.

Em 2007, o Ministério das Cidades, em conjunto com o IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas, publicou um manual denominado Mapeamento de Riscos em Encostas e Margens de Rios (CARVALHO; MACEDO; OGURA, 2007) que consiste em sua definição: “Material de Treinamento de Equipes Municipais para o Mapeamento de Riscos de Deslizamentos de Encostas e Solapamentos de Margens aos técnicos dos municípios brasileiros sujeitos a riscos, a fim de identificar e hierarquizar suas áreas de riscos a partir de uma linguagem comum e unificada”, com esclarecimento de conceitos como: áreas de risco, mapeamento de áreas de risco, sistema de informações geográficas, como ferramenta na gestão municipal e plano preventivo de Defesa Civil.

Em 2009, o Instituto Geológico publica o livro “Desastres naturais: conhecer para prevenir” (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009), em que são abordados diversos aspectos que balizam as ações de prevenção de desastres naturais, como sua conceituação e

classificação, os principais fenômenos geoambientais relacionados aos desastres naturais, os conceitos básicos de perigo e risco, e as ações de gerenciamento de desastres naturais adotadas em âmbito municipal, estadual e nacional.

Em 2016, a professora Denise M. S. Gerscovich descreve, em seu livro “Estabilidade de Taludes” (GERSCOVICH, 2016), os diferentes tipos de taludes, movimentos de massa, mecanismos de ruptura e as possíveis causas dos escorregamentos, as solicitações envolvidas e os parâmetros geomecânicos dos materiais.

Em 2018, a ABGE – Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental publicou o livro Geologia de Engenharia e Ambiental (OLIVEIRA; MONTICELLI, 2018) que amplia e atualiza a publicação de 1998 (OLIVEIRA; BRITO, 1998), destacando-se para a presente pesquisa: o Capítulo 17 do Volume 3 – Estabilização de Taludes e o Capítulo 37 do Volume 3 – Gestão de Riscos Geológicos.

Em 2024, professores da Escola de Engenharia, da Universidade Presbiteriana Mackenzie, liderados pelo Professor Sérgio Vicente Denser Pamboukian, publicaram na Revista Concilium o artigo “Drone como ferramenta para investigação geotécnica”, com a descrição da utilização de drones para levantamentos topográficos. (PAMBOUKIAN, et al., 2024).

Em 2024 Alexandre de Tarso Silva Bedin e Alberto Alonso Lázaro publicaram na Revista Concilium o artigo “Mapeamento de risco geológico em área do município de Francisco Morato”, onde temos a descrição da metodologia de mapeamento de riscos de escorregamentos e um estudo de caso em Francisco Morato (BEDIN; LÁZARO, 2024).

3. Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada em quatro etapas principais:

- Caracterização da área de estudo;
- Aquisição de dados com VANT e pontos de controle;
- Processamento fotogramétrico em plataforma de nuvem;
- Análise espacial dos produtos gerados em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG).

3.1. Caracterização da Área de Estudo

O presente estudo foi desenvolvido no contexto do município de Francisco Morato, localizado na Região Metropolitana de São Paulo. A região é reconhecida por sua complexidade geológica e geomorfológica, sendo um exemplo emblemático dos desafios associados à

ocupação urbana em áreas de relevo acidentado. O município apresenta uma marcante diversidade em seu relevo, com altitudes que variam de 734 a 1047 metros e uma paisagem caracterizada pela presença de morros altos e baixos, serras e escarpas. Essa topografia, somada a uma geologia diversificada que inclui desde rochas metamórficas a solos sedimentares, cria um ambiente naturalmente suscetível a processos de instabilização de encostas (IPT-CPRM, 2015).

Para a aplicação e validação da metodologia de levantamento com VANTs, foram selecionados dois locais específicos que exemplificam os cenários de risco encontrados no município:

- Área “Vassouras”: Caracteriza-se por uma ocupação urbana densa e de padrão informal com edificações construídas diretamente sobre a crista e a base de taludes íngremes e vegetados. Este local foi escolhido por representar o risco associado à interação direta entre moradias precárias e encostas potencialmente instáveis.

- Área “Avenida Paulo Brossard (Creche)”: Consiste em um extenso talude de corte artificial, resultante da obra de terraplanagem para a implantação de uma edificação de uso institucional. Este local foi selecionado para analisar a capacidade do método em identificar processos erosivos ativos e feições de instabilidade em encostas modificadas pela ação humana.

Ambas as áreas foram escolhidas por representarem contextos críticos onde a identificação detalhada e precisa de feições de risco é fundamental para a prevenção de desastres.

3.2. Aquisição de Dados com VANT e Pontos de Controle

Os dados primários utilizados consistiram em um conjunto de imagens aéreas obtidas por um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT), comumente chamado como Drone é um arquivo de texto contendo as coordenadas de Pontos de Controle (em inglês, Ground Control Points – GCPs) levantados em campo com receptor GNSS (Sistema Global de Navegação por Satélite).

O arquivo de GCPs foi formatado seguindo as exigências da plataforma de processamento, contendo, na primeira linha, a definição do Sistema de Referência de Coordenadas (SRC) no padrão exigido. As linhas subsequentes continham, para cada ponto, quatro informações: o identificador do ponto, a coordenada UTM Leste (X), a coordenada UTM Norte (Y) e a altitude elipsoidal (Z), utilizando o ponto como separador decimal.

3.3. Processamento Fotogramétrico

O processamento das imagens foi realizado na plataforma de nuvem *WebODM Lightning (Drone Mapping Software)*, um sistema online que permite a geração de mapas, modelos de elevação e modelos 3D a partir de imagens aéreas. O fluxo de trabalho seguiu duas fases principais.

A primeira fase consistiu na amarração dos pontos de controle, realizada na ferramenta online “*Ground Control Interface*”. Neste processo, o arquivo com as coordenadas dos GCPs foi carregado, juntamente com todas as imagens do VANT. Cada GCP foi então identificado manualmente em todas as imagens em que aparecia, associando as coordenadas de pixel da imagem às suas respectivas coordenadas UTM (X, Y, Z) obtidas por GNSS. Ao final desta etapa, foi exportado um novo arquivo de controle, contendo a relação precisa entre as coordenadas de solo e as coordenadas de imagem para cada ponto.

Na segunda fase, as imagens e o arquivo de controle gerado foram submetidos à plataforma principal da WebODM para o processamento automatizado. Dentre as opções de processamento, foi selecionada a configuração “DSM + DTM”, para garantir a geração tanto do Modelo Digital de Superfície (MDS) quanto do Modelo Digital de Terreno (MDT). Para assegurar máxima qualidade e detalhamento dos produtos, optou-se por não redimensionar as imagens.

Após a conclusão do processamento, foi realizado o download de um arquivo compactado contendo os produtos, organizados em subpastas, incluindo a ortofoto georreferenciada, os modelos digitais de elevação e o relatório de qualidade do processamento.

3.4. Análise dos Produtos Gerados

A análise dos dados e a elaboração dos mapas finais foram realizadas no software de código aberto QGIS, conforme sugerido pela própria documentação da plataforma de processamento. A ortofoto e o MDT foram os principais produtos utilizados. A partir do MDT, foram gerados mapas derivados, como o mapa de declividade, e foram extraídos perfis topográficos (cortes) para análise quantitativa do relevo. A ortofoto, por sua vez, foi utilizada para a fotointerpretação e identificação visual de feições indicativas de instabilidade, como trincas, cicatrizes de deslizamentos, processos erosivos e anomalias na drenagem superficial.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O processamento das imagens aéreas obtidas com o VANT resultou na geração de uma ortofoto de alta resolução de toda a área de estudo, conforme apresentado na Figura 1. Este produto cartográfico serve como base para análise, oferecendo uma visão sinóptica e detalhada da morfologia do terreno, do padrão de ocupação urbana e do uso do solo.

Na ortofoto, é possível observar a complexa interface entre as áreas urbanizadas e as encostas com vegetação. Foram destacadas duas áreas de interesse principal para a análise de risco, indicadas pelos retângulos vermelhos. Estes locais, que apresentam indícios de instabilidade e intervenções emergenciais, foram investigados em maior detalhe, como será apresentado nas seções subsequentes, a fim de validar a eficácia da metodologia de VANT's na identificação de feições precursoras de escorregamentos.



Figura 1: Ortofoto da Área de Estudo em Vassouras.

Fonte: Pamboukian e Prates (2023a)

A Figura 2 apresenta uma visão aproximada do primeiro ponto de interesse destacado na ortofoto geral. A imagem, com seu alto nível de detalhe, permite uma análise aprofundada das condições de ocupação e dos indicativos de instabilidade na crista do talude. A principal característica observada é a presença de moradias com construção precária, localizadas imediatamente adjacentes à borda de uma encosta íngreme e densamente vegetada.

A análise da imagem revela as seguintes feições indicativas de risco:

- Solo Exposto e Sinais de Erosão: Imediatamente atrás das construções, é possível identificar diversas áreas de solo exposto, sem proteção vegetal. Uma mancha escura de solo mobilizado

(Figura 1, centro) sugere o início de processos erosivos ou um pequeno escorregamento superficial recente, indicando que a encosta está ativa e em desequilíbrio.

- Ausência de drenagem adequada: A imagem evidencia a falta de sistemas de drenagem superficial para coletar e conduzir a água proveniente da rua e dos telhados das moradias. Essa ausência implica que a água escoar livremente sobre o terreno, infiltrando-se diretamente na crista do talude, o que aumenta a pressão da água nos poros do solo e reduz a sua resistência, sendo um dos principais fatores deflagradores de deslizamentos. (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009).

Essas feições com clareza graças à resolução da imagem obtida pelo VANT, caracterizam um cenário de risco geológico elevado, onde fatores de perigo (encosta íngreme, solo erodido, saturação por água) se combinam com a vulnerabilidade social (moradias precárias).



Figura 2: Aproximação 1 – Vassouras

Fonte: Recorte obtido a partir de Pamboukian e Prates (2023a)

A Figura 3 dá destaque ao segundo ponto de interesse, revelando uma feição antrópica de grande importância para análise de risco: a cobertura da uma seção da encosta com uma lona plástica azul. Essa imagem ilustra uma intervenção emergencial em uma área de instabilidade já reconhecida, seja pelos moradores ou por órgãos da Defesa Civil.

A análise permite extrair as seguintes conclusões:

- **Indicador de Risco Iminente ou Passado:** A utilização de lonas é uma medida de mitigação primária e emergencial que tem como principal objetivo a impermeabilização superficial do talude. A sua função é impedir a infiltração direta da água da chuva no solo, que é o principal agente deflagrador de escorregamentos em áreas tropicais, por elevar a poropressão e reduzir a resistência do material (TOMINAGA; SANTORO; AMARAL, 2009). Portanto,

a presença da lona é um forte indício de que o local já apresentou sinais de instabilidade, como trincas ou pequenos movimentos, ou que é considerado de altíssima suscetibilidade a escorregamentos.

- **Alta Vulnerabilidade:** As moradias estão localizadas imediatamente ao pé (base) do talude que está parcialmente coberto pela lona. Esta posição caracteriza uma situação de alta vulnerabilidade uma vez que, em caso de falha da encosta, estas edificações estariam diretamente na trajetória do material deslizado.

A capacidade de identificar e mapear com precisão a localização e a extensão dessas intervenções emergenciais é uma das grandes vantagens do uso do drone. A imagem não apenas confirma o perigo em um ponto específico, mas também permite avaliar o contexto e a vulnerabilidade das estruturas no entorno, fornecendo dados cruciais para uma gestão de risco mais eficaz.

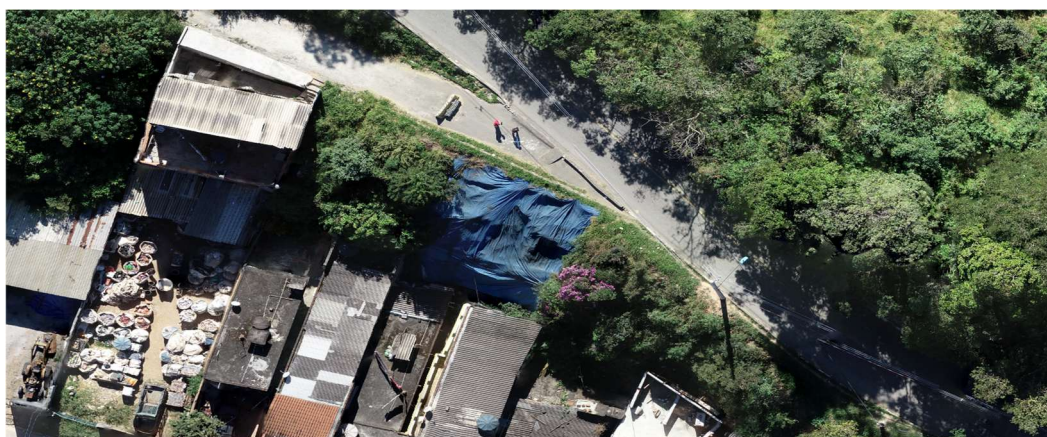


Figura 3: Aproximação 2 – Vassouras

Fonte: Recorte obtido a partir de Pamboukian e Prates (2023a)

A Figura 4 apresenta a segunda área selecionada para o estudo de caso, consistindo em um grande talude de corte localizado junto a uma edificação de uso institucional. A imagem, obtida a partir da ortofoto geral, oferece uma visão ampla da obra de terraplanagem realizada para a implantação do edifício e da sua relação com a encosta e o entorno urbanizado.

O destaque em vermelho indica o trecho do talude que apresentou os mais claros sinais de processos de instabilidade, como erosões visíveis. Esta seção foi, portanto, selecionada para uma análise detalhada em escala de maior aproximação, bem como para a extração de um perfil topográfico quantitativo, que serão apresentados a seguir para demonstrar a capacidade da metodologia em diagnosticar e quantificar as feições de risco.



Figura 4: Ortofoto – Avenida Paulo Brossard (Creche)

Fonte: Pamboukian e Prates (2023b)

A Figura 5 oferece um registro detalhado da seção do talude destacada anteriormente, permitindo uma análise minuciosa de sua condição superficial. A imagem revela um intenso e ativo processo erosivo atuando sobre a face do talude de corte, que se encontra sem qualquer tipo de proteção ou revestimento. A altíssima resolução da ortofoto foi crucial para o diagnóstico preciso das seguintes feições:

- **Solo Exposto:** A porção superior do talude encontra-se completamente desprovida de vegetação, expondo o solo residual de coloração avermelhada diretamente à ação das intempéries, principalmente da água da chuva;
- **Ravinas e sulcos de erosão:** A feição mais proeminente é a presença de múltiplas ravinas (e sulcos de erosão) bem definidas e orientadas verticalmente. Estes canais são esculpidos pelo escoamento concentrado de água superficial e representam uma perda contínua de material, indicando que o talude está em um processo de degradação ativo;
- **Cicatrizes de Pequenas Rupturas:** Associadas às ravinas, é possível observar pequenas concavidade e paredes verticalizadas, que podem ser interpretadas como cicatrizes de pequenas rupturas ou desprendimentos de material. Essas feições sugerem que a erosão não é apenas superficial, mas que já ocorrem pequenas falhas localizadas na face do talude.

Do ponto de vista geotécnico, essas feições são alarmantes. As ravinas funcionam como caminhos preferenciais para a infiltração de água, acelerando a saturação do solo em profundidade durante eventos de chuva. Essa saturação eleva a poropressão e diminui a resistência do solo, podendo deflagrar escorregamentos de maior porte que coloquem em risco a edificação localizada no topo da encosta. A identificação inequívoca destas feições de

instabilidade, em nível de detalhe, valida o VANT como uma ferramenta poderosa para a investigação geotécnica preliminar.



Figura 5: Aproximação - Avenida Paulo Brossard (Creche)

Fonte: Recorte obtido a partir de Pamboukian e Prates (2023b)

Para complementar a análise qualitativa das feições erosivas e quantificar a morfometria do talude, foi extraído um perfil topográfico transversal a partir do Modelo Digital do Terreno (MDT).

A Figura 6 apresenta a localização da linha do perfil sobre a ortofoto (seção superior) e o gráfico de elevação resultante (seção inferior). A análise do gráfico fornece dados preciosos sobre a geometria da encosta:

- **Desnível Vertical:** O perfil revela um desnível vertical (diferença de altura) entre a base do talude, junto à via inferior, e o topo, na plataforma da edificação.
- **Elevada Declividade:** Este desnível é vencido em uma distância horizontal equivalente, que resulta em uma rampa de altíssima declividade, com um ângulo médio superior a 45 graus, o que, do ponto de vista geotécnico, é uma condição de alta suscetibilidade a processos de instabilização.

Tais informações supracitadas corroboram e reforçam a evidência visual apresentada na imagem. A combinação do processo erosivo ativo (observado na imagem anterior) com uma geometria tão acentuada (medida no perfil) caracteriza um cenário de risco geológico muito alto. A capacidade de extrair perfis topográficos precisos diretamente dos dados do VANT demonstra a eficácia do método, não apenas para identificação das feições, mas também para a quantificação de parâmetros morfométricos essenciais à análise de estabilidade de taludes.

Com relação a estabilidade, a geometria apresentada é extremamente desfavorável. Uma inclinação tão acentuada é insustentável para a maioria dos solos sem a presença de um

substrato rochoso muito competente ou de estruturas de contenção. Essa configuração pode indicar a presença de um corte vertical antigo que está sofrendo processos de falha por tombamento (*toppling*) ou um forte processo de solapamento na base que causa o desmoronamento dos blocos superiores. A capacidade de gerar um Modelo Digital do Terreno que captura com precisão essas rupturas abruptas no relevo é essencial para a identificação de pontos críticos de instabilidade que demandam uma investigação de campo detalhada e urgente.

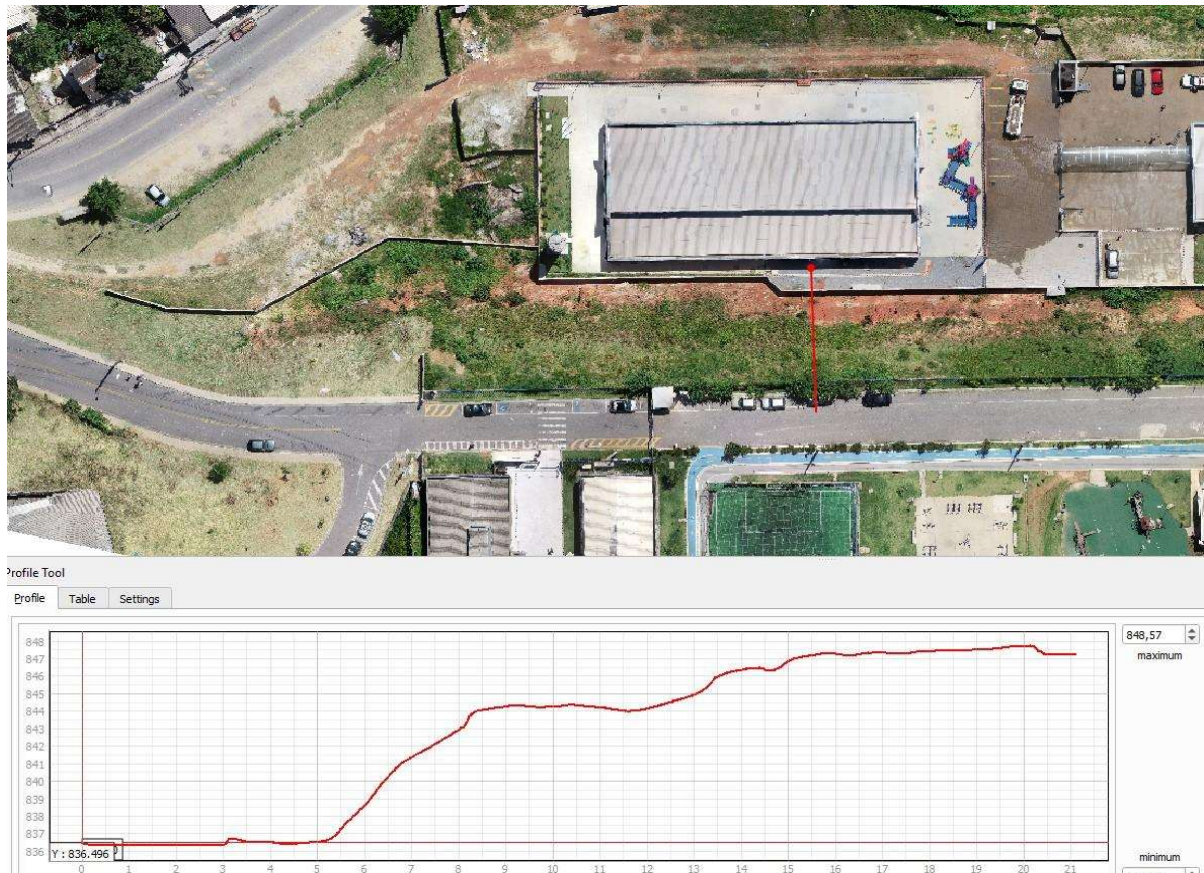


Figura 6: Aproximação e Corte de Elevação – Avenida Paulo Brossard (Creche)

Fonte: Recorte e gráfico obtidos a partir de Pamboukian e Prates (2023b)

Para indicar a versatilidade dos dados gerados pelo levantamento com VANT, a Figura 7 apresenta o levantamento planialtimétrico realizado no Bairro do Rosário, em Francisco Morato (Pamboukian; Prates, 2023c).

A análise da imagem permite destacar os seguintes pontos:

- **Representação Detalhada do relevo:** As curvas de nível, que são linhas que unem pontos de mesma altitude, permitem uma visualização clara e intuitiva da morfologia da área. No mapa, é possível observar que as curvas estão muito próximas umas das outras nas regiões periféricas (indicadas em tons de vermelho e laranja no relevo sombreado), caracterizando encostas de alta

declividade. Em contrapartida, nas áreas centrais (em tons de verde e azul), as curvas são mais espaçadas, indicando um terreno mais plano, correspondente a um fundo de vale.

- **Identificação de Áreas Críticas:** Esta representação é uma ferramenta poderosa para a análise de risco. A simples inspeção visual do mapa de curvas de nível permite a setorização preliminar da área, identificando rapidamente as encostas mais íngremes, que são, naturalmente mais suscetíveis a processos de escorregamento, e os fundos de vale, que são as áreas mais propensas a inundações, como descrito por Bedin e Lázaro (2024) para esta mesma localidade.

A capacidade de gerar um mapa de curvas de nível com alta precisão e detalhe em um curto espaço de tempo, a partir do MDT obtido pelo VANT, reforça a superioridade da metodologia. Um produto equivalente, se gerado por métodos de topografia convencional, demandaria mais ações.

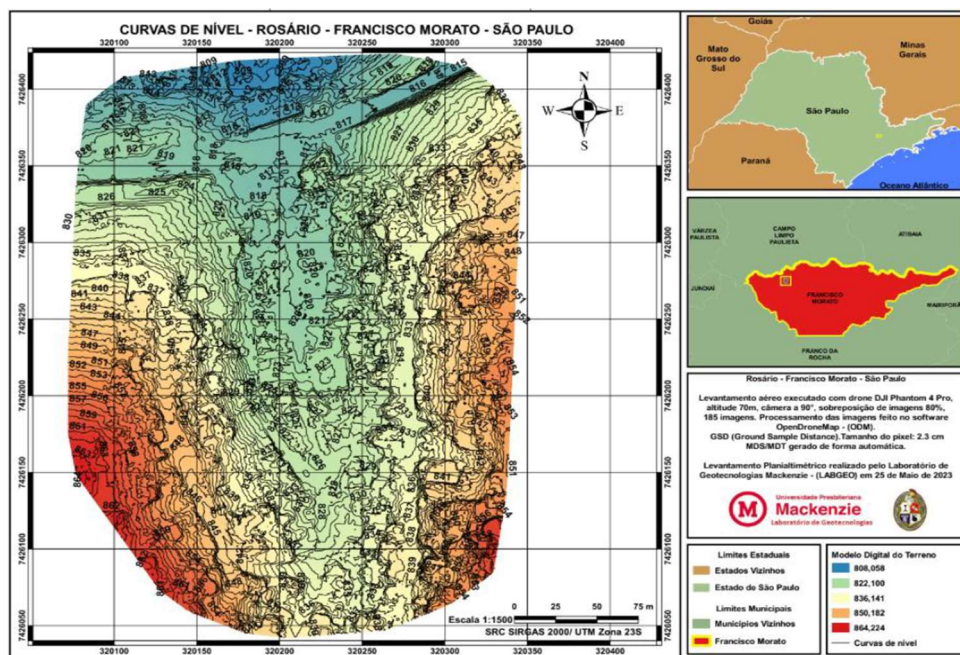


Figura 7: Levantamento aéreo planialtimétrico no Bairro do Rosário em Francisco Morato.

Fonte: Pamboukian e Prates (2023c).

Com base nas curvas de nível no do bairro Rosário e na ortofoto do local (PAMBOUKIAN; PRATES, 2023c), Bedin e Lázaro (2024), com o objetivo de verificar as declividades do terreno no local, realizaram cortes dois cortes (A-B e C-D) (Figura 8) e suas respectivas seções (Figura 9 e Figura 10), com suas respectivas declividades. Demonstrando a

eficácia dos levantamentos aéreos para identificação de setores de risco de escorregamentos e inundações.

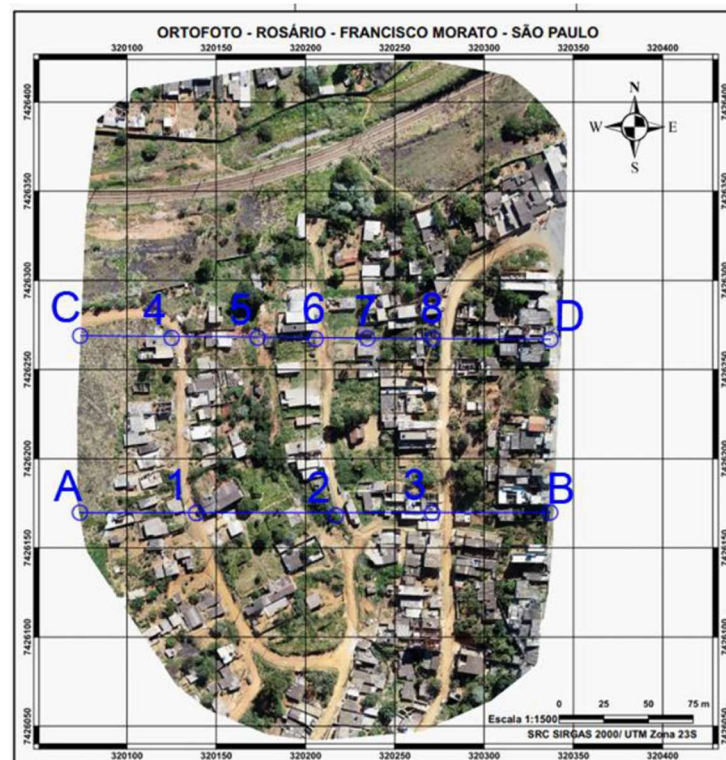


Figura 8: Ortofoto do Bairro do Rosário em Francisco Morato, com as seções A-B e C-D.

Fonte: Bedin e Lázaro, a partir de Pamboukian e Prates (2023c).

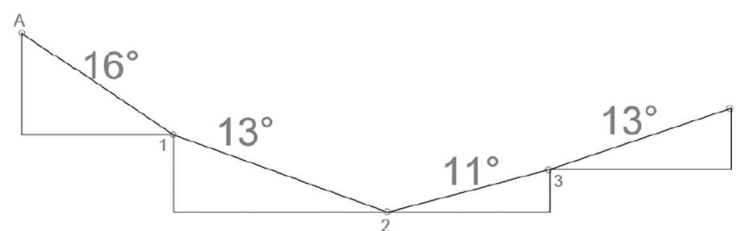


Figura 9: Seção A – B

Fonte: Bedin e Lázaro (2024), a partir da Figura 8.

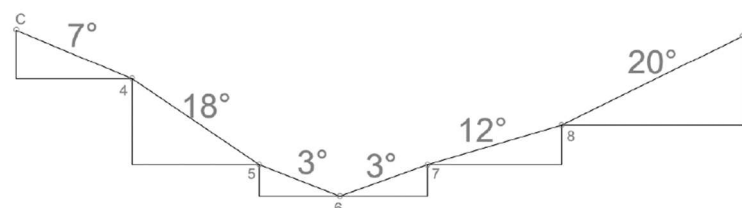


Figura 10: Seção C – D

Fonte: Bedin e Lázaro (2024), a partir da Figura 8.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho se propôs a validar a utilização de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) como uma ferramenta de alta precisão para a identificação de feições indicativas de escorregamento, buscando superar as limitações de escala, custo e segurança inerentes aos métodos de mapeamento tradicionais. Através da análise de diferentes estudos de caso, os objetivos da pesquisa foram plenamente alcançados.

A metodologia empregada, baseada no levantamento aerofotogramétrico com VANT e no processamento em nuvem, demonstrou ser altamente eficaz na geração de produtos cartográficos de altíssima resolução, como ortofoto com GSD centimétrico e Modelos Digitais de Terreno (MDT) detalhados. A análise desses produtos permitiu a identificação inequívoca de um conjunto variado de feições de instabilidade que seriam de difícil percepção em levantamentos convencionais.

Nos resultados, destacam-se a identificação de feições antrópicas, como a presença de lonas plásticas emergenciais que indicam a percepção de risco iminente pela comunidade ou por órgãos públicos, e feições erosivas ativas, como ravinas e sulcos, em taludes de corte desprotegidos. A principal contribuição desta pesquisa reside na demonstração da capacidade de integrar a análise visual qualitativa, realizada na ortofoto, com a extração de dados quantitativos precisos do MDT. A elaboração de perfis topográficos, por exemplo, permitiu quantificar a elevada declividade de encostas (com ângulos superiores a 45°), corroborando as evidências visuais de instabilidade e caracterizando numericamente o grau de perigo.

Concluiu-se, portanto, que os VANTs não são apenas uma ferramenta para a visualização, mas um equipamento robusto para a investigação geotécnica, que otimiza os recursos, aumenta a segurança das equipes de campo e eleva a qualidade e o detalhe da análise de risco. Para trabalhos futuros, sugere-se a aplicação desta metodologia para o monitoramento multitemporal de áreas de risco, realizando voos periódicos para analisar a evolução das feições e a eficácia de medidas de contenção, consolidando ainda mais o uso de drones como um instrumento indispensável para a prevenção de desastres e o planejamento urbano em áreas de risco.

6. REFERÊNCIAS

- AUGUSTO FILHO, O. et al. **Metodologia de mapeamento de risco a escorregamentos aplicada a municípios do Estado de São Paulo**. Geotecnia, Lisboa, n. 124, p. 65-89, 2012.
- BACCARO, C. A. D. **Investigações Geológico-Geotécnicas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2017.
- BEDIN, A. de T. S.; LÁZARO, A. A. **Mapping of geological risk in an area in the municipality of Francisco Morato - SP: Mapeamento de risco geológico em área no município de Francisco Morato - SP**. Concilium, 24(5), 201–216. São Leopoldo (2024). Disponível em: <https://doi.org/10.53660/CLM-3051-24E26> . Acesso em: 15/04/2024.
- CARVALHO, Celso Santos; GALVÃO, Thiago (organizadores). **Prevenção de riscos de deslizamentos em encostas: guia para elaboração de políticas municipais**. Ministério das Cidades. Brasília, 2006.
- CARVALHO, Celso Santos; MACEDO, Eduardo Soares; OGURA, Agostinho Tadashi (organizadores). **Mapeamento de Riscos em Encostas e Margens dos Rios**. Ministério da Cidades - Instituto de Pesquisas tecnológicas – IPT. Brasília, 2007.
- CUNHA, Márcio Angelieri (coordenador). **Ocupação de Encostas**. Instituto de Pesquisas Tecnológicas – Publicação IPT n. 1831. São Paulo, 1991.
- GERSCOVICH, Denise M. S. Estabilidade de taludes. Oficina de Textos. São Paulo, 2016.
- IPT – CPRM. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações – Município de Francisco Morato – SP – Escala 1:25.000**. IPT – Instituto de Pesquisas tecnológicas / CPRM – Serviço Geológico do Brasil. Brasília: revisão 03, 2015.
- JUNGLÉS, A. E.; SCHADECK, R. **Desafios do mapeamento de áreas de risco**. Caderno Especial CEPED, Florianópolis, [s.d.].
- OLIVEIRA, Antônio Manoel dos Santos; BRITO, Sérgio Nertan Alves de (Editores). **Geologia de engenharia**. ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental. São Paulo, 1998.
- OLIVEIRA, Antônio Manoel dos Santos; MONTICELI, João Jerônimo (Editores). **Geologia de engenharia e ambiental**. ABGE - Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental, 3 volumes. São Paulo, 2018.
- OLIVEIRA, Gracioso R.; Fernandes de Souza Lima, M.; Regina Rocha Guimaraes, C.; Aparecida Pereira De Oliveira, R. **A revolução dos drones na construção civil: potencializando a segurança em inspeções de obra**. Revista Multidisciplinar do Nordeste Mineiro, [S. l.], v. 3, n. 3, 2024. DOI: 10.61164/rnm.v3i3.2204. Disponível em: <https://revista.unipacto.com.br/index.php/multidisciplinar/article/view/2204>. Acesso em: 29 abr. 2024.

PAMBOUKIAN, S. V. D.; CONCILIO, R.; DINIS, H.; LÁZARO, A. A.; DURO, M. A. S.; SILVA, E. R. da. **Drone as a tool for geotechnical investigation: Drone como ferramenta para investigação geotécnica.** Concilium, 24(1), 271–285. São Leopoldo, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.53660/CLM-2707-24A20> . Acesso em: 15/04/2024.

PAMBOUKIAN, Sergio Vicente Denser; PRATES, Renato Gluber Candido. **Mapeamento de área de risco na cidade de Francisco Morato. Jardim Vassouras. Geração de Mapas (Ortofoto, Modelo Digital de Superfície, Modelo Digital de Terreno, Curvas de nível e outros). Mapeamento realizado com drone e GNSS.** São Paulo: Escola de Engenharia - Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2023(a).

PAMBOUKIAN, Sergio Vicente Denser; PRATES, Renato Gluber Candido. **Mapeamento de área de risco na cidade de Francisco Morato. Av. Senador Paulo Brossard - Creche. Geração de Mapas (Ortofoto, Modelo Digital de Superfície, Modelo Digital de Terreno, Curvas de nível e outros). Mapeamento realizado com drone e GNSS.** São Paulo: Escola de Engenharia - Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2023(b).

PAMBOUKIAN, Sergio Vicente Denser; PRATES, Renato Gluber Candido. **Mapeamento de área de risco na cidade de Francisco Morato. Jardim N. S. Rosário. Geração de Mapas (Ortofoto, Modelo Digital de Superfície, Modelo Digital de Terreno, Curvas de nível e outros). Mapeamento realizado com drone e GNSS.** São Paulo: Escola de Engenharia - Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2023(c).

SAMBORSKI, T.; STAFFA, E. C.; DEBIASI, H. **Mapeamento de solos: do tradicional ao digital.** Documentos 316, Embrapa Florestas, 2014.

SANTOS ET AL. (2019). **Aplicação de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) na Inspeção de Taludes Rodoviários.** Estudo de Caso na BR-135, Minas Gerais, .2019.

TOMINAGA, Lídia Keiko; SANTORO, Jair; AMARAL, Rosangela (Organizadores). **Desastres Naturais – Conhecer e Prevenir.** Instituto Geológico. São Paulo, 2009.