



Aerofotogrametria com VANT aplicada ao cadastro de edificações de área de risco a deslizamentos em encostas urbanas na zona norte do Recife, Pernambuco, Brasil

Cristiana Coutinho Duarte¹ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-5219-3903>

Betânia Queiroz da Silva² - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-7406-765X>

Bruno Diego de Moraes³ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9949-8472>

Roberto Quental Coutinho⁴ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-0471-3908>

Guilherme Francisco⁵ - Orcid: <https://orcid.org/0000-0002-9950-0974>

¹ Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil *

² Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil **

³ Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil ***

⁴ Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil ****

⁵ Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil *****

Artigo recebido em 31/10/2024 e aceito em 04/11/2024

RESUMO

Este estudo investiga a aplicação de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) para o cadastro e avaliação de risco de edificações em encostas urbanas propensas a deslizamentos no bairro de Dois Unidos, Zona Norte do Recife, Pernambuco, Brasil. A região enfrenta desafios significativos devido à ocupação irregular e à fragmentação territorial, aumentando sua vulnerabilidade a desastres. Utilizando aerofotogrametria com VANT, a pesquisa realizou o levantamento cadastral na área, identificando 513 edificações. Sendo integrado os dados a uma análise de suscetibilidade a deslizamentos baseada em métodos estatísticos, que utilizou fatores como declividade, curvatura, aspecto, SPI, TWI e HAND a partir do MDT do Projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D, 2016). A integração desses dados de suscetibilidade com a localização das edificações permitiu uma análise mais precisa do risco geológico envolvido, essencial para a implementação de medidas preventivas e mitigatórias eficazes. A partir disso é destacado também a importância da vistoria em campo para verificar condições específicas das edificações, como infraestrutura, fossas rudimentares e proximidade a

* Doutora em Geografia pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), professora adjunta do Departamento de Ciências Geográficas e da Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: cristiana.duarte@ufpe.br

** Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: betania.queiroz@ufpe.br

*** Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – Geotecnia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: bruno.diegom@ufpe.br

**** Doutor em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), professor titular do Departamento de Engenharia Civil e da Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: roberto.coutinho@ufpe.br

***** Mestrando do Programa Pós Graduação em Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). E-mail: guilherme.francisco@ufpe.br

áreas de alto risco. Neste sentido, o estudo demonstra que o uso de VANT para fotogrametria oferece uma solução de baixo custo e alta precisão para atualizar o cadastro de edificações e melhorar a gestão de riscos e desastres em áreas urbanas vulneráveis.

Palavras-chave: VANT; ortofoto; MDT/MDS; comunidades urbanas; risco a deslizamentos.

Aerophotogrammetry with UAV applied to the registration of buildings in landslides risk areas on urban slopes in the northern zone of Recife, Pernambuco, Brazil

ABSTRACT

This study investigates the application of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for the registration and risk assessment of buildings in urban slopes prone to landslides in the Dois Unidos neighborhood, North Zone of Recife, Pernambuco, Brazil. The region faces significant challenges due to irregular occupation and territorial fragmentation, increasing its vulnerability to disasters. Using UAV-based photogrammetry, the research conducted a cadastral survey in the area, identifying 513 buildings. Furthermore, these data were integrated with a landslide susceptibility analysis based on statistical methods, considering factors such as slope, curvature, aspect, Specific Pluviometric Index (SPI), Topographic Wetness Index (TWI), and Height Above the Nearest Drainage (HAND) using the Digital Terrain Model (DTM) from the Pernambuco Tridimensional Project (PE3D, 2016). The integration of these data allowed for a more precise analysis of the involved risk, essential for the implementation of effective preventive and mitigating measures against landslides, thereby enhancing risk and disaster management in vulnerable urban areas. In addition to UAVs and photogrammetry, the study highlights the importance of field inspections to verify specific conditions of buildings, such as infrastructure, rudimentary sewage systems, and proximity to high-risk areas. This combined approach of remote sensing technology and on-site validation provides a low-cost, high-precision solution for updating building registries in vulnerable urban areas, facilitating more effective management of environmental and urban risks.

Keywords: UAV; orthophoto; DEM/DSM; urban communities; landslide risk.

Aerofotogrametría con VANT aplicada al registro de edificaciones en áreas de riesgo a deslizamientos en laderas urbanas en la zona norte de Recife, Pernambuco, Brasil

RESUMEN

Este estudio investiga la aplicación de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) para el registro y evaluación de riesgo de edificaciones en laderas urbanas propensas a deslizamientos en el barrio de Dois Unidos, Zona Norte de Recife, Pernambuco, Brasil. La región enfrenta desafíos significativos debido a la ocupación irregular y la fragmentación territorial, lo que aumenta su vulnerabilidad a desastres. Utilizando fotogrametría con VANT, la investigación realizó el levantamiento catastral en el área, identificando 513 edificaciones. Se integraron los datos a un análisis de susceptibilidad a deslizamientos basado en métodos estadísticos, que utilizó factores como pendiente, curvatura, aspecto, SPI, TWI y HAND a partir del MDT del Proyecto Pernambuco Tridimensional (PE3D, 2016). La integración de estos datos de susceptibilidad con la ubicación de las edificaciones permitió una análisis más precisa del riesgo involucrado, esencial para la implementación de medidas preventivas y mitigadoras efectivas. A partir de esto, también se destaca la importancia de la inspección de campo para verificar condiciones específicas de las edificaciones, como infraestructura, fosas rudimentarias y proximidad a áreas de alto riesgo. En este sentido, el estudio demuestra que el uso de VANT

para fotogrametría ofrece una solución de bajo costo y alta precisión para actualizar el registro de edificaciones y mejorar la gestión de riesgos y desastres en áreas urbanas vulnerables.

Palabras clave: VANT; ortofoto; DEM/DSM; comunidades urbanas; riesgo de deslizamientos.

INTRODUÇÃO

Os eventos climatológicos têm contribuído para a ocorrência de desastres ao redor do mundo, estes são frequentemente desencadeados por uma série de fatores que variam em tipo, intensidade e impacto. As chuvas intensas, por exemplo, resultam em processos de inundações e movimentos gravitacionais de massa que podem devastar comunidades, destruir infraestrutura e causar mortes. No Brasil, estudos mostram que em 2010 a população residindo em áreas de risco era de aproximadamente 8.270.127 habitantes em 2.471.349 domicílios particulares permanentes, distribuídos em 872 municípios (IBGE, 2018). Esses fenômenos apresentam variações regionais distintas dada as particularidades físico-ambientais e a fragmentação territorial dos municípios influenciando os diferentes padrões de distribuição populacional em áreas de risco.

A análise da distribuição espacial dos municípios com áreas de risco revela uma grande concentração na costa leste do Brasil. Esta área, devido à ocupação de encostas íngremes, topos de morros e margens de corpos d'água, mostra-se particularmente vulnerável aos desastres (Tominaga; Santoro; Amaral, 2015). Nesse sentido, é um desafio manter o cadastro atualizado dos domicílios situados em áreas de risco, considerando a dinâmica de crescimento populacional nas comunidades urbanas, onde o desmembramento de terrenos e as construções residenciais são práticas rotineiras para atender ao déficit habitacional.

Segundo Carneiro (2003), o cadastro imobiliário urbano é um registro legal dos imóveis, com o objetivo de arrecadar impostos justos por meio de uma política tributária eficiente. O Imposto Predial e Territorial Urbano (IPTU) é cobrado de pessoas físicas ou jurídicas, e as prefeituras são responsáveis pela fiscalização, garantindo que as medições estejam em conformidade com a documentação para assegurar a arrecadação correta. No entanto, em comunidades sem o planejamento urbano o cadastro de imóveis não integra o banco cadastral, pois as construções estão à margem da legislação de uso e ocupação do território.

Assim, diante da demanda crescente, existem várias metodologias para realização de cadastro urbano voltado ao mapeamento de risco. Santos et al. (2017), por exemplo, utilizaram fichas cadastrais de campo e dados topográficos para o mapeamento de áreas de risco geológico em Maceió,

Alagoas e em outros estados do Brasil. Por sua vez, o uso dos veículos aéreos não tripulados (VANT) facilita a atualização do cadastro das edificações em áreas de risco, pois apresenta um custo menor em comparação com métodos tradicionais de fotogrametria e topografia, além de otimizar os levantamentos de campo com a visão espacial da área.

Segundo Xavier (2017), os VANTs são ferramentas importantes para a coleta de dados ambientais, permitindo melhores decisões em virtude da obtenção de imagens e dados altimétricos de alta resolução e baixo custo. Antunes e Hollatz (2015) utilizaram imagens de VANT para cadastrar os limites de edificações da Fazenda Canguiri da UFPR. Os autores apresentaram resultados com riquezas de detalhes na escala de 1:2000, com informações cartográficas no nível B da NBR 14166 (2022) que regulamenta o cadastro. Weis et al. (2022) atentam aos erros de projeção que devem ser considerados para a avaliação da exatidão cartográfica dos dados, e sugerem a utilização de pontos de apoio suficientes para diminuir o erro de decímetros para centímetros e aumentar a acurácia dos produtos gerados. Com o uso de VANTs, o cadastro obterá o menor erro de geolocalização e de geração dos dados de elevação do terreno e da superfície do terreno, gerando dados mais precisos.

Gonçalves et al. (2024) apresentaram resultados de pesquisa com o objetivo de criar uma única nuvem de pontos através do registro entre duas nuvens distintas, avaliando sua precisão para subsidiar o cadastro 3D, a partir de testes numéricos confrontando a precisão do mapeamento via nuvens LiDAR e VANT com medidas tomadas por equipamento topográfico para avaliar a precisão dos dados. Estes resultados indicaram que a discrepância máxima entre o mapeamento e a referência é de 11mm, indicando que a metodologia tem potencial contributivo no Cadastro Territorial Multifinalitário (CTM) e para realização do cadastro 3D. Para Zekkos et al. (2018), essa tecnologia se destaca em relação ao processo de aerolevantamento tradicional pelas diferenças operacionais de custo e logística. De acordo com Longhitano (2010) os VANTs estão transformando pesquisas e serviços técnicos nas áreas de agricultura de precisão e meio ambiente, oferecendo produtos (imagens sintéticas ou multiespectrais) com alta resolução espacial.

As inúmeras aplicabilidades de uso dessa tecnologia, dependem em suma das características da área de atuação e finalidade de aquisição de informações. Estudos aerofotogramétricos, obtidos com VANT, aplicados a encostas urbanas tem sido realizado pelo Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planície e Desastres - GEGEP /UFPE atendendo a classificação do Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC) classe A e B, os quais contribuem para o cadastro planialtimétrico e análises de estabilidade de encostas. A partir dessas ferramentas, amplia-se a capacidade e velocidade de

levantamentos e diagnósticos técnicos nos territórios, sobretudo em situações/áreas de alto risco e difícil acesso, levando em consideração o cenário atual em que o conhecimento sobre geoinformação tornou-se um dos parâmetros mais importantes para a tomada de decisões em diferentes níveis (local, regional, nacional e até global), tanto no setor público quanto no setor privado.

Deste modo, o presente artigo propõe a aplicação da aerofotogrametria com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) no cadastramento e classificação do Risco Geológico das edificações localizadas nas encostas urbanas do bairro de Dois Unidos, Zona Norte do Recife, Pernambuco, Brasil. Visando, assim, contribuir para a gestão de risco e desastres da área, a partir da cartografia digital atualizada com técnicas aerofotogramétricas de baixo custo e análise espacial considerando o mapeamento de suscetibilidade a deslizamentos e dados do Censo do IBGE de 2022.

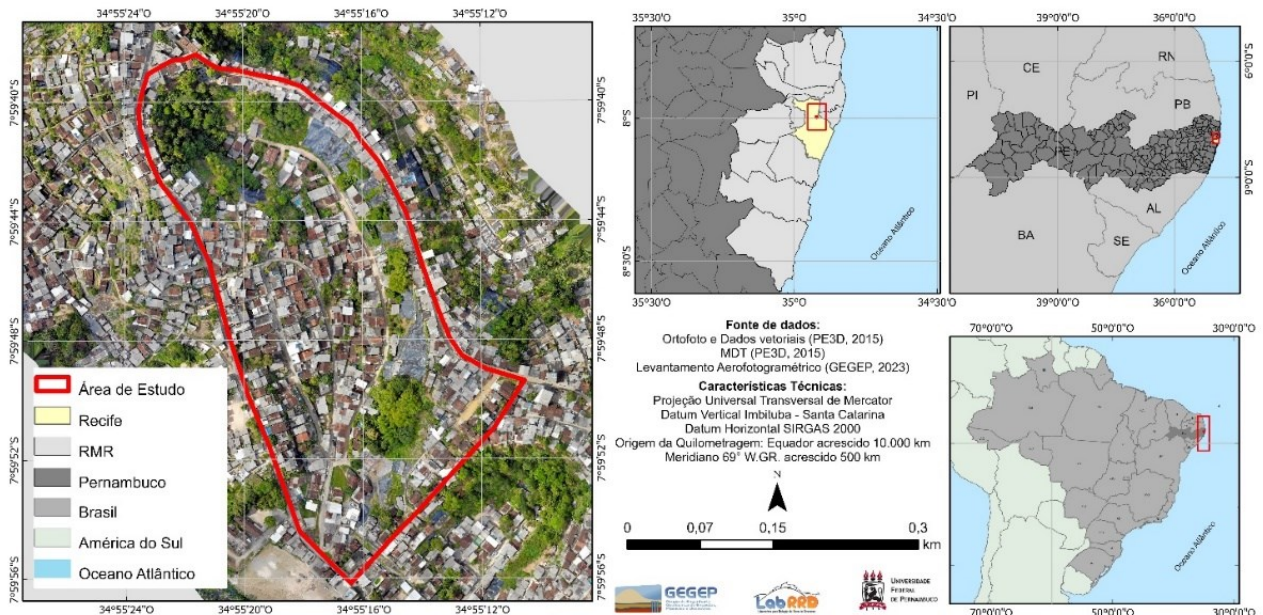
PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Localização e breve caracterização da área de estudo

A área de estudo está localizada na Zona Norte da Região Metropolitana do Recife (RMR), na Região Político Administrativas 02 (RPA 02), na microrregião 2.3 – Dois Unidos (Figura 1). A área territorial deste bairro é de 312 ha., com uma população residente de 32.905 mil habitantes (Recife, 2024).

Segundo Alheiros (2003, p. 109) a Região Metropolitana do Recife é caracterizada, em suas áreas de morro, por ocupações espontâneas ou promovida por loteamentos irregulares em declividades acima dos parâmetros estipulados por Brasil (1999) e Pernambuco (1987). Essas áreas destacam-se de maneira geral por uma ação antrópica desordenada em declives e crescimento de comunidade urbana sem planejamento territorial, que segundo Coutinho et al. (2019) corroboram com o aumento da possibilidade de ocorrência de movimentos gravitacionais de massa e processos erosivos.

Figura 1 - Mapa de localização Dois Unidos, Zona Norte do Recife.



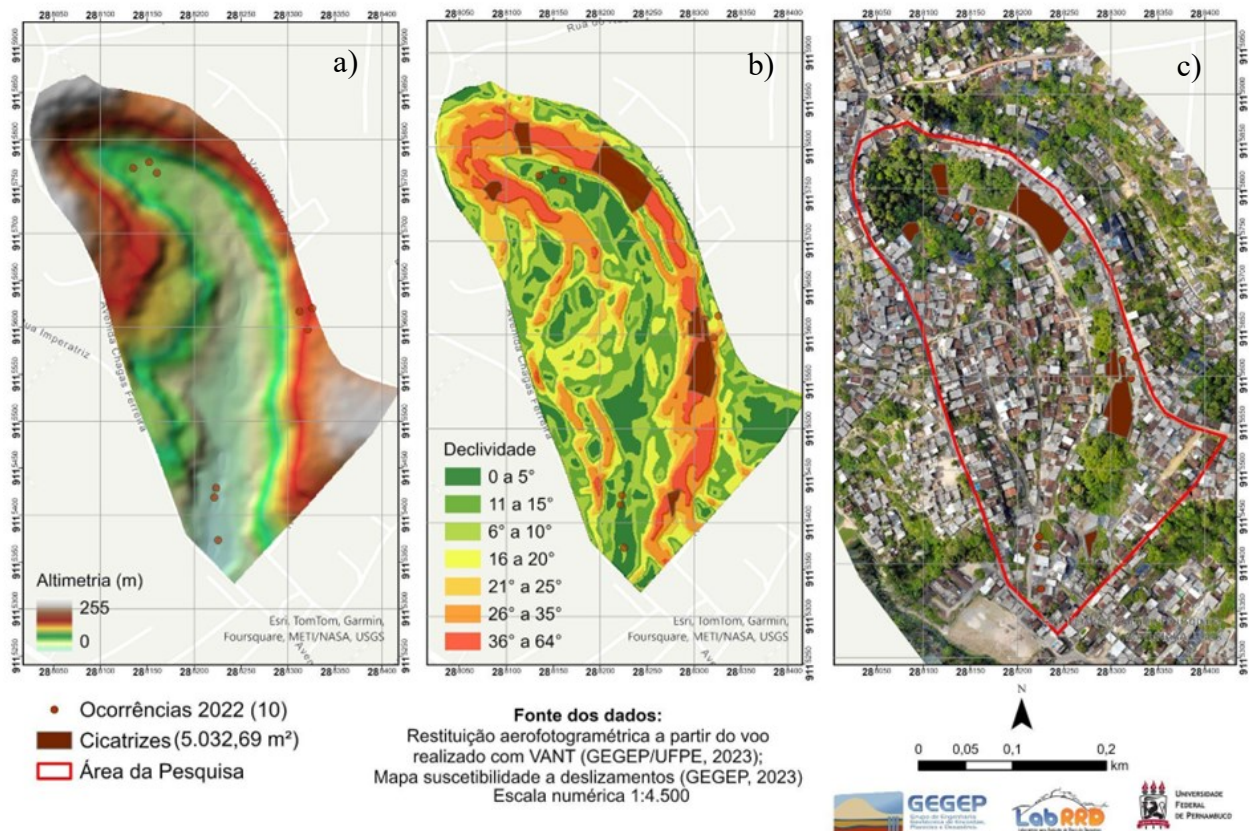
Fonte: Os autores (2024).

A área é caracterizada por relevo de colinas com topos alongados e vales em formato de "V", apresentando altitudes que variam entre 0m, no fundo do vale, e 256m no divisor d'água (Figura 2). As vertentes íngremes, originalmente cobertas por vegetação, têm sido constantemente suprimidas pela população para ações que envolvem tanto aterros quanto cortes nos taludes, em áreas previamente suscetíveis a deslizamentos.

A Figura 2 ilustra a declividade da área, com inclinações que variam entre 21° e 64° ao longo de toda a extensão das encostas, incluindo as áreas marcadas pelas cicatrizes dos deslizamentos registrados após o grande evento de maio de 2022. Esses deslizamentos se concentraram principalmente em taludes com declividades superiores a 26°. Registros da Prefeitura do Recife mostram que as edificações localizadas na base das encostas, em áreas com declividades entre 0° e 5°, foram atingidas pelos sedimentos que se desprenderam dos taludes.

É importante destacar que as edificações situadas na base do maior deslizamento mapeado, localizado no extremo norte da área, foram severamente impactadas, com o acesso completamente obstruído pelo material deslocado e construções total ou parcialmente destruídas, como mostrado na ortofoto (Figura 2). Mais detalhes serão apresentados na seção referente aos resultados.

Figura 2 - Mapa Altimétrico (a), Declividade (b), Ortofoto (c) com inventário de deslizamentos de 2022.



Fonte: Os autores (2024).

Procedimentos metodológicos

Com intuito de classificar o risco de deslizamentos das edificações foi realizado o cadastro das edificações através de Ortofoto e Modelos Digitais de Terreno (MDT) obtidos por meio de levantamento aerofotogramétrico com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), realizado pelo GEGEP, em novembro de 2023. Em seguida fez-se o cruzamento com dados de suscetibilidade a deslizamentos utilizando métodos estatísticos elaborados pelo GEGEP/UFPE em 2023 para, enfim, se classificar as edificações quanto ao seu grau de risco.

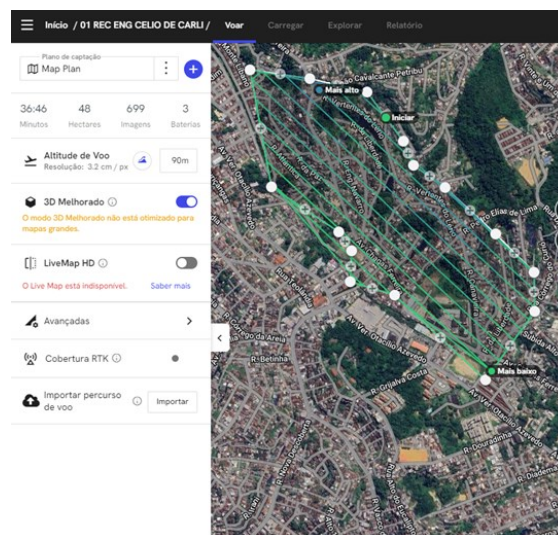
Aerolevantamento fotogramétrico com VANT para cadastro de edificações de Comunidades Urbanas

O levantamento aerofotogramétrico foi realizado com o *DJI Mavic 2 Enterprise Dual Thermal*, a uma altura de 90m acompanhando o terreno, com sobreposição longitudinal de 75% e lateral 65%, com uma velocidade de voo 8m/s. O planejamento foi realizado no aplicativo *DroneDeploy* (Figura 3) e o voo foi realizado com o aplicativo *Pilot* com duração de 40 minutos

aproximadamente, com o uso de 3 baterias para uma área de 48ha. O planejamento e voo seguiram as normas da NBR 14166 (2022); ANAC (2023); Brasil (1984); DECEA (2024).

O processamento das imagens foi feito por meio do software *Agisoft Metashape Professional*, licença pertencente ao GEGEP/UFPE, este tem os princípios da fotogrametria como parâmetros para orientação, ajustes e elaboração dos modelos georreferenciados e tridimensionais apresentados por Andrade (1998). Os produtos obtidos para este artigo foram as ortofotos, o Modelo digital da superfície (MDS) e Modelo digital do terreno (MDT). A validação foi realizada no Software livre QGIS. O cadastro dos elementos ocorreu de acordo com a NBR 13133 (2021) e NBR 14166 (2022), com as simbologias e representações cartográficas de acordo com o IBGE e normas vigentes.

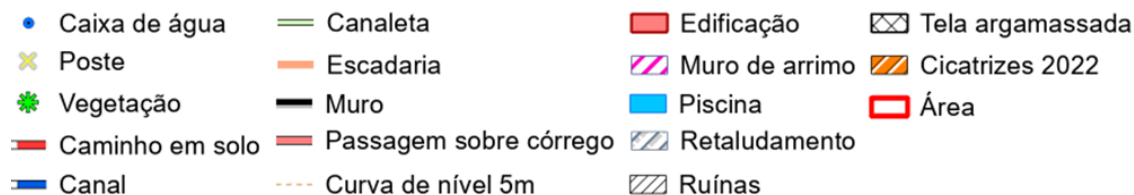
Figura 3 - Planejamento de voo no aplicativo DroneDeploy.



Fonte: Os autores (2024).

O cadastro das edificações ocorreu de forma manual por meio do software ArcGIS Pro, sendo incluído dados sobre caixa d'água, árvores, elementos de drenagem regulares e irregulares (canais, boca de lobo, passagem sobre córrego), poste de energia, piscina e escadarias por exemplo (Figura 4). As classes identificadas a partir das ortofotos extraídas pelo voo com o VANT, serviu como base para observação e validação das classes.

Figura 4 - Legenda de elementos cadastrados a partir da ortofoto e MDT.



Fonte: Os autores (2024).

Análise de estrutura e cobertura

Para a análise da estrutura e cobertura da área de estudo adotou-se a metodologia utilizada por Moreira (2021), na qual os pavimentos das estruturas edificadas e a altura da vegetação são classificados com base no cálculo de subtração do modelo digital de superfície (MDS) e o modelo digital de terreno (MDT) e posteriormente sobreposto aos dados da imagem classificada quanto a sua cobertura. Para atingir esses resultados, primeiramente foi executado a álgebra de mapas com os produtos do MDS e MDT, gerando o mapa da estrutura do terreno. O segundo passo foi classificar os dados matriciais do processamento dos dados do VANT para extrair a classificação de cobertura da terra. Em seguida foram criadas 4 classes, a saber: vegetação arbórea, vegetação arbustiva, solo exposto e área edificada.

O terceiro passo se tratou da poligonização dos dados de cobertura da terra, para recortar e separar as áreas edificadas dos demais atributos. Esse recorte serviu de base para recortar o produto gerado da estrutura do terreno. Após essas etapas, o produto final foi reclassificado para analisar a altura dos pavimentos das edificações. Para análise desse resultado a quantidade de edificações em cada classe foi calculada utilizando a ferramenta de ligação espacial, que possibilita uma contagem direta dos valores dentro de uma área especificada, neste caso utilizou-se a delimitação das edificações.

Análise espacial integrada dos dados de edificações e suscetibilidade a deslizamentos

O modelo de suscetibilidade a deslizamentos desenvolvido pelo GEGEP/UFPE para Zona Norte do Recife utilizou os seguintes fatores condicionantes: declividade, curvatura, aspecto, Índice de Potência de Fluxo (SPI - Stream Power Index), Índice Topográfico de Umidade (TWI - Topographic Wetness Index), HAND (Height Above the Nearest Drainage), com base no MDT do Projeto Pernambuco Tridimensional (PE3D, 2016). Bem como os dados de cobertura da terra e

ordenamento territorial elaborados a partir das ortofotocartas, obtidas por meio levantamento aerofotogramétrico do projeto PE3D. Todos os dados possuem resolução de 1 metro.

O modelo estatístico foi baseado em dados (Data-Based) utilizando a análise bivariada, denominada Razão de Frequência (RF) ou Frequency Ratio (FR), que está relacionada a densidade de processos de movimentos de massa (inventário de deslizamentos) para determinar os pesos das classes dos fatores condicionantes de deslizamentos analisados (Yan et al., 2019; Zahor; Yamungu, 2023; Sonker; Tripathi; Swarnim, 2022). Metodologia semelhante foi aplicada por Duarte et al (2024) no município de Ipojuca, Pernambuco.

As classes de suscetibilidade (alta, média e baixa) foram definidas com base em um gráfico de densidade de deslizamentos, utilizando um inventário de cicatrizes de deslizamentos separado para a elaboração do modelo, constando 5% dos deslizamentos na classe baixa, 15% na média e 80% na alta. Com os resultados de suscetibilidade obtidos pelo método estatístico na área em estudo, foi realizada uma análise espacial entre os dados de suscetibilidade e os polígonos das edificações, utilizando a ferramenta de Ligação Espacial, opção de combinação Intersecção do ArcGIS Pro. Este procedimento teve como objetivo verificar as residências situadas em áreas suscetíveis a deslizamentos, permitindo uma avaliação do risco envolvido.

De tal modo, na análise de risco geológico a deslizamento além dos dados de suscetibilidade da área foi analisado os elementos construtivos e naturais do cadastro que contribuíram ao risco geológico e aos fatores atrelados à infraestrutura urbana local.

Análise de população residente na área

A análise espacial integrada de dados de edificações e suscetibilidade a deslizamentos, realizada com um método estatístico, permitiu cruzar as informações sobre a média de moradores por domicílio para a área em estudo, com base nos dados do Censo 2022. Com o uso de ambiente GIS, foi possível estimar o número aproximado de moradores em cada classe de risco geológico mapeada.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O uso do solo na área em estudo é predominantemente urbano, apresentando padrões típicos de ocupações de comunidades urbanas. A análise da Figura 5 indica que o processo de ocupação tem ocorrido de forma espontânea e se encontra em estágio de consolidação, como evidenciado pelo crescimento da urbanização entre 2013 e 2023. Ao comparar as duas imagens, observa-se a construção de imóveis no topo, no meio e na base da encosta, realizada sem a devida observância de

critérios técnicos de engenharia. Essa situação pode aumentar a suscetibilidade da área a deslizamentos, devido à adição de sobrecargas sobre a encosta, além de outras ações antrópicas, como cortes, aterros, e o descarte inadequado de entulhos e águas servidas.

Figura 5 – Comparação da Expansão da urbanização em a) 2013; b) 2023.



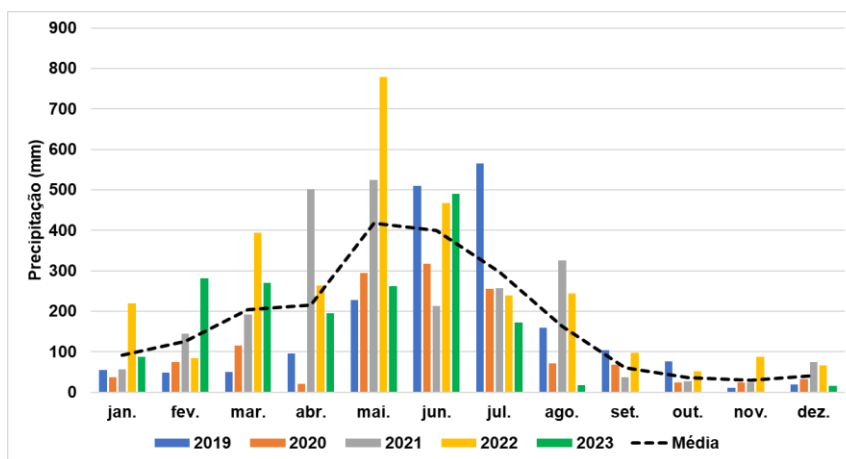
Fonte: Imagens extraídas do software Google Earth® em 28 out. 2024.

As visitas de campo revelaram a predominância de edificações isoladas, em sua maioria construídas em alvenaria e concreto. Além disso, constatou-se a carência de infraestrutura adequada, como drenagem e estruturas de contenção. A cobertura do solo na encosta é composta por vegetação rasteira e árvores de densidade média, distribuídas ao longo de toda a sua extensão.

A área de estudo apresenta a Formação Barreiras como a unidade geológica predominante. Essa formação é amplamente distribuída ao longo do litoral brasileiro e é frequentemente encontrada nas encostas da Região Metropolitana do Recife (RMR) (Coutinho et al., 2019; Coutinho et al., 2023). Litologicamente, é composta por sedimentos areno-argilosos, destacando-se as areias quartzosas, que se intercalam com estratos rítmicos de areia fina e/ou argila, essas características fazem com que os solos da Formação Barreiras sejam suscetíveis a movimentos gravitacionais e a processos erosivos (Coutinho e Severo, 2009). A análise das amostras de solo, conforme o Sistema de Classificação Unificada do Solos (SUCS), revela a presença de Areia Argilosa (SC) e Argila Inorgânica de Alta Plasticidade (CH) (Coutinho e Severo, 2009).

Os dados de um pluviômetro instalado nas proximidades da área de estudo, coletados entre 2019 e 2023, são apresentados na Figura 6. A análise do gráfico revela que o período chuvoso na região se concentra entre os meses de março e agosto, com as maiores médias de precipitação registradas entre maio e julho. Em contraste, o período mais seco ocorre de setembro a fevereiro, destacando-se os meses de outubro, novembro e dezembro como os mais áridos. Durante o intervalo analisado, maio de 2022 se sobressai como o mês mais chuvoso, com um total aproximado de 780mm de precipitação acumulada.

Figura 6 - Precipitação Mensal entre 2019 e 2023 no bairro Dois Unidos.



Fonte: Os autores (2024).

Segundo Marengo et al. (2023), os eventos de chuva ocorridos entre o final de maio e o início de junho de 2022 nos estados de Pernambuco, Alagoas e Paraíba foram desencadeados por distúrbios ondulatórios de leste (DOLs). Esse fenômeno resultou em chuvas excepcionalmente intensas, provocando deslizamentos de terra e inundações em diversas áreas. Na cidade do Recife, no dia 28 de maio de 2022, foi registrado um acúmulo de 204 mm de precipitação, classificado como chuva extrema segundo a escala proposta por Guedes e Silva (2020). Nesse mesmo dia foram registrados inúmeros deslizamentos na Região Metropolitana de Recife que causaram danos materiais e humanos. Os deslizamentos ocorridos neste período foram a base para o desenvolvimento do inventário de cicatrizes de deslizamentos utilizado na construção do mapa de suscetibilidade a deslizamentos da área de estudo (Figura 7-a).

Após as fortes chuvas, os moradores relataram diversas consequências, principalmente danos materiais, como a obstrução de vias devido ao acúmulo de entulho e solo desprendido das encostas (Figura 7-b). Além disso, muitas residências sofreram destruição e comprometimento estrutural, levando, em alguns casos, à remoção dos moradores e à demolição dos imóveis (Figura 7-

c). Atualmente, os moradores estão se mobilizando junto à empresa local para exigir que as autoridades implementem medidas estruturais na área de estudo.

Figura 7 - Consequências dos deslizamentos de maio 2022 na rua Engenheiro Célio de Carli: a) Deslizamento ocorrido em 28/05/2022; b) Entulho obstruindo a rua; c) Danos causados nas residências localizadas na base da encosta.



Fonte: Adaptado de Moraes (2022)

Como a dinâmica das áreas de ocupação espontânea tende a ser acentuada, sem fiscalização efetiva pelas autoridades competentes, é comum que as mudanças que ocorram sejam apenas identificadas por meio de um cadastro detalhado que analise as habitações, como por exemplo as mudanças identificadas na área de Dois Unidos-Recife após a realização do cadastro detalhado a partir das ortofotos geradas pelo VANT. O levantamento cadastral permitiu tanto a atualização do número de habitações (Figura 8-a), como a possibilidade de acompanhamento temporal da dinâmica de crescimento de ocupação na encosta. A partir do mapeamento da estrutura da superfície edificada, foi possível identificar a altura dos pavimentos das edificações dentro da área de interesse (Figura 8-b). A Tabela 1 apresenta os valores totais do número de edificações que estão dispostas sobre as classes de pavimento das estruturas considerando a altura média de 2,5m.

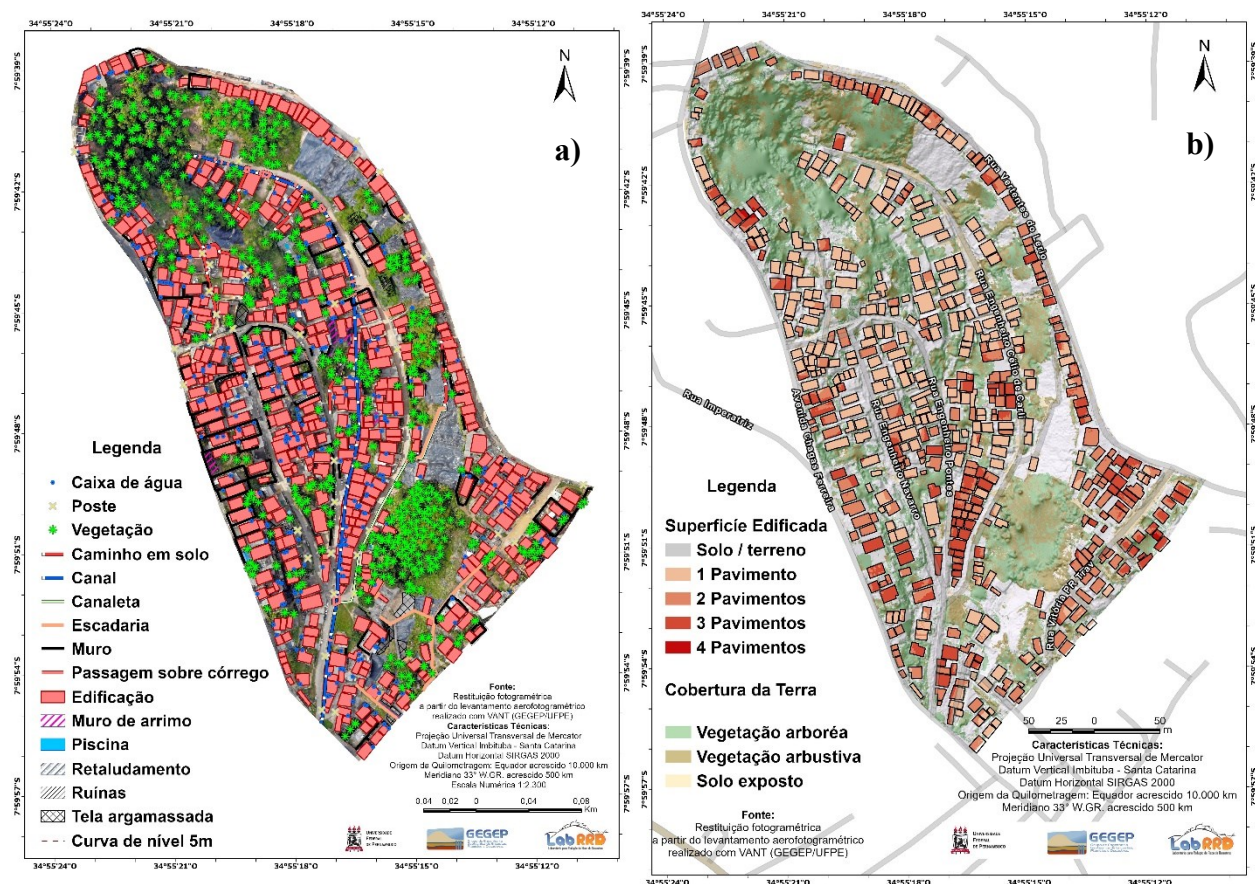
Pôde-se definir também quais loteamentos localizavam-se dentro de cada classe de suscetibilidade, como forma mais rápida de identificação das residências que estavam em área de alta suscetibilidade, consequentemente, de alto risco de deslizamentos (Figura 9). Foram identificadas 76 edificações localizadas na classe alta suscetibilidade, destas 5 já são edificações com estruturas danificadas e/ou ruínas classificando-as como Muito Alto; 202 na classe média e 233 em áreas de baixa suscetibilidade a deslizamento. No entanto, é importante destacar que essa é uma avaliação quantitativa em laboratório, os trabalhos de campo não devem ser eliminados.

Tabela 1 – Classificação das edificações identificadas.

Resultado da classificação (m)	Classes	Número de edificações por classe
< 0,25	Terreno	0
0,25 - 2,50	1 Pavimento (térreo)	153
2,60 – 5,00	2 Pavimentos (1 andar)	223
5,10 - 7,50	3 Pavimentos (2 andares)	128
> 7,50	4 ou maior (3 andares)	7
		Total: 511

Fonte: Os autores (2024).

Figura 8 - Cadastro detalhado das habitações: a) cadastro obtido por fotogrametria; b) classificação de pavimentos.

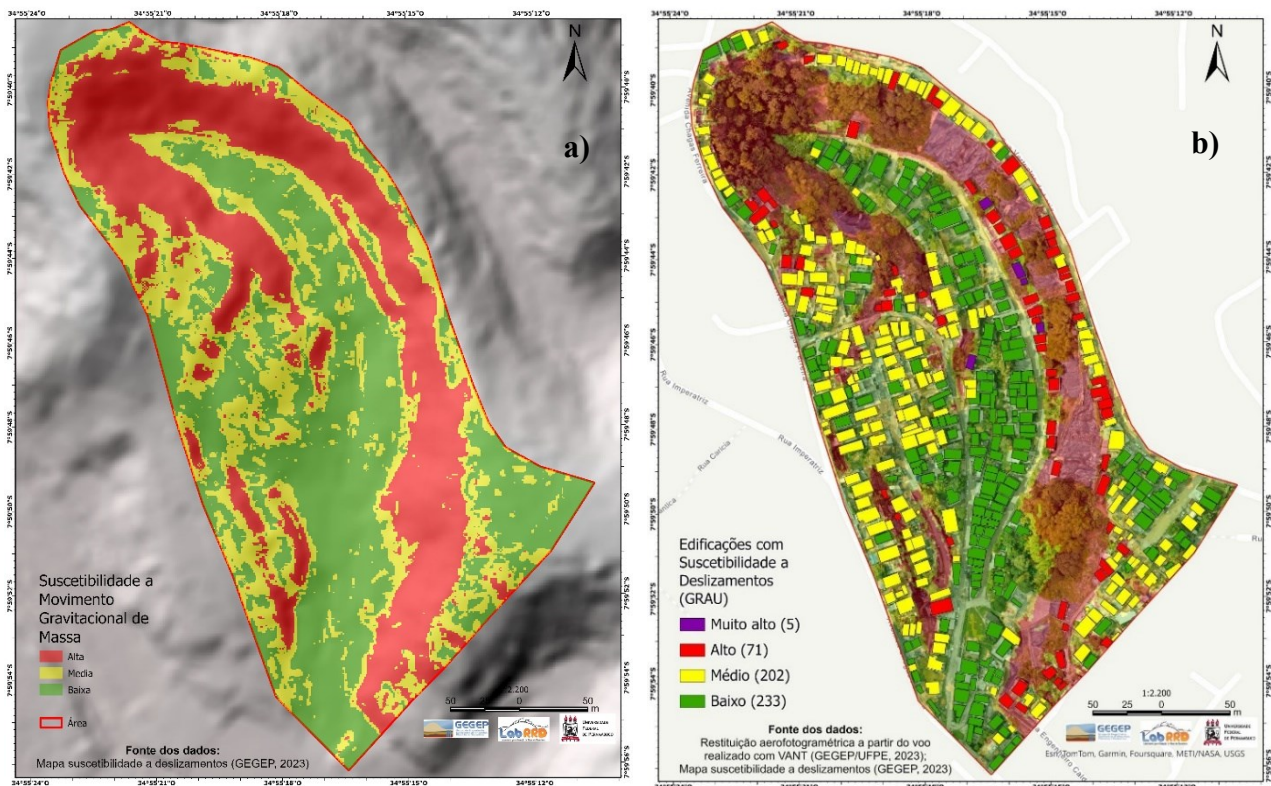


Fonte: Os autores (2024).

Por exemplo, as edificações que estão localizadas em áreas de média suscetibilidade no topo da encosta deve ser avaliadas individualmente para saber das condições de infraestrutura das residências, existência de fossas rudimentares na encosta e lançamento de águas servidas, pois estas ações podem intensificar o risco geológico, bem como as residências que se encontram na base das

encostas próximas às áreas de alta suscetibilidade, mesmo estando localizadas em áreas de baixa suscetibilidade, devem ser analisadas em campo para verificar quais delas podem ser atingidas por um deslizamento.

Figura 9 - Classificação da suscetibilidade (a) e classificação do Risco Geológico das edificações (b).



Fonte: Os autores (2024).

Considerando que a área tem a maioria das edificações menores que 100m², a tabela 2 apresenta as classes de edificações de acordo com as áreas até 50m², entre 51 e 100m², entre 101 e 200m², e acima de 200m².

Das 247 edificações mapeadas com área de até 50m², 50,20% estão classificadas com baixo risco geológico, 33,60% com médio e 14,17% alto e 2,02% muito alto (Gráfico a.1- a.2). Das 233 edificações com área entre 50 a 100m², 42,49% estão classificadas com baixo risco geológico, 43,78% com médio e 13,73% alto (Gráfico b.1 – b.2). Das 30 edificações com áreas entre 100 e 200m², destas 30% estão classificadas com baixo risco geológico, 56,57% com médio e 13,33% alto (Gráfico c.1- c.2). Apenas 1 edificação apresenta-se com área maior que 200m² está classificada com baixo risco geológico (Gráfico d.1 – d.2), conforme exposto na Figura 11.

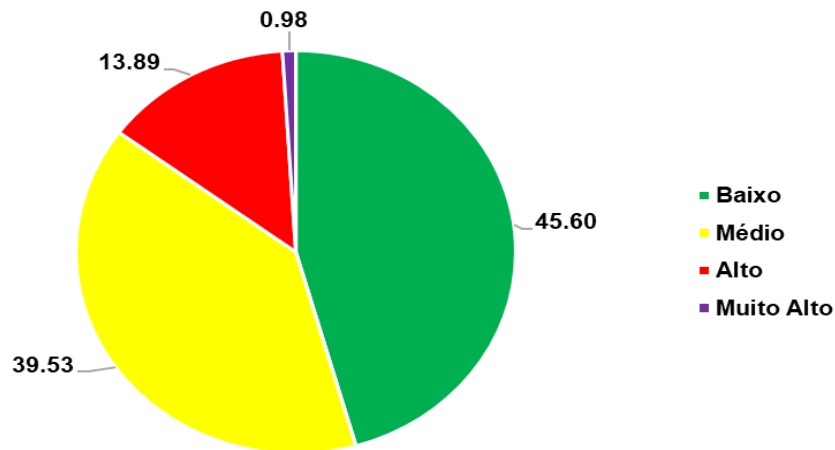
Tabela 2 - Quantidade de edificações existentes por classes de suscetibilidade.

Área das edificações	Baixo	Médio	Alto	Muito alto
50 m ²	124	83	35	5
50 a 100 m ²	99	102	32	0
100 a 200 m ²	9	17	4	0
Acima de 200 m ²	1	0	0	0

Fonte: Os autores (2024).

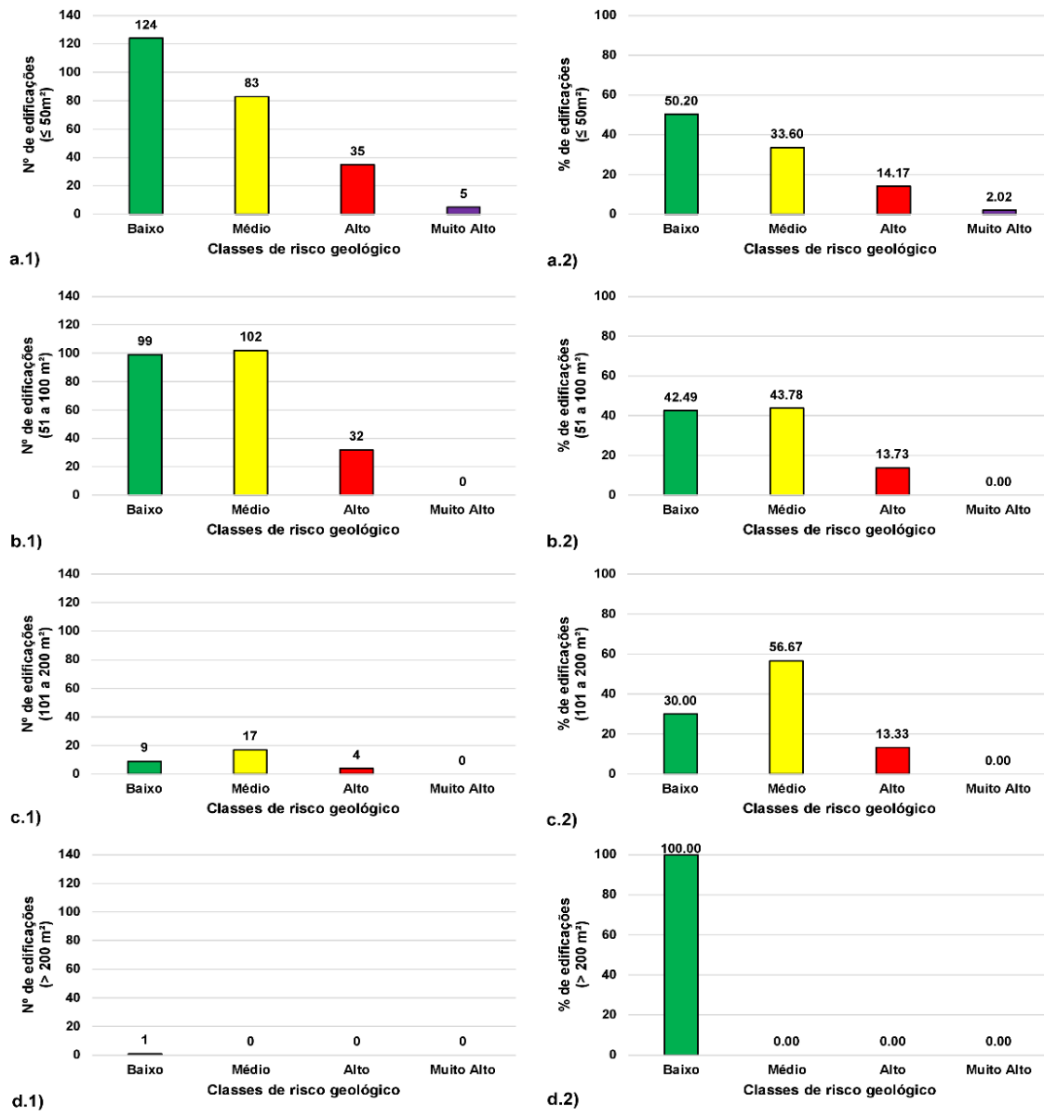
A estimativa de população residente nas 506 edificações cadastradas, considerando a média de moradores por domicílio do Censo 2022, é de aproximadamente 1.430 moradores. Destes, 199 habitantes residem em domicílios localizados nas áreas mapeadas com alto grau de risco geológico, 572 pessoas em médio grau e 659 em áreas de baixo grau de risco. As 5 edificações classificadas com grau muito alto estão interditadas pela Defesa civil municipal e encontram-se desocupadas. A Figura 10 mostra a relação das edificações de acordo com o grau de risco geológico.

Figura 10 - Relação das edificações com o risco geológico.



Fonte: Os autores (2024).

Figura 10 - Conjunto de percentuais de risco nas áreas edificadas.



Fonte: Os autores (2024).

Vale ratificar que as edificações que estão em área de baixa e média suscetibilidade devem passar por uma vistoria mais detalhada em campo. Para averiguar se tem risco de serem atingidas por materiais transportados de deslizamentos das áreas circunvizinhas e/ou se as estruturas mantêm o grau maior de classificação da suscetibilidade.

Como foi visto no decorrer deste trabalho a presente pesquisa contribui para que as comunidades urbanas que não estão contempladas no banco de dados do Cadastro territorial das prefeituras possam atualizar seus cadastros de edificações, sobretudo nas áreas com uma dinâmica de ocupação acelerada. A fotogrametria com VANT corroborou com a geração de dados mais precisos para a área de estudo, como também demonstrado por Antunes e Hollatz (2015) e Weis et al. (2022),

podendo, portanto, ser aplicada com segurança para o cadastro planialtimétrico. O VANT apresenta-se como uma alternativa de baixo custo para a atualização do cadastro, contribuindo significativamente para a gestão de risco e desastres quando analisado em conjunto com dados de suscetibilidade, conforme aplicado neste estudo.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Entendendo que a ausência de cadastros territoriais e mapeamentos confiáveis é uma das características de grande parte dos municípios brasileiros (Brasil, 2021), realizar o cadastro das edificações existentes na área de risco geológico de deslizamentos em encostas urbanas a partir de produtos extraídos de levantamento aerofotogramétrico com Veículos Aéreos Não Tripulados demonstrou grande pertinência em aplicações conjuntas com modelos de suscetibilidade de base estatística.

Vale ressaltar, que estudos com o uso de VANT e LiDAR devem-se aprimorar o cadastro com a criação de nuvens de pontos que é uma abordagem eficaz e precisa para o cadastro 3D, apresentando vantagens significativas em termos de custo e eficiência logística. Para validar a classificação do grau de risco geológico a partir da suscetibilidade utilizando o método estatístico, os autores sugerem a comparação com outros métodos, incluindo métodos determinísticos, modelos matemáticos e físicos já desenvolvidos pelo grupo de pesquisa.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e ao Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres - GEGEP/UFPE pelo suporte financeiro e apoio à pesquisa, que possibilitou a elaboração deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 13133:2021**: Execução de levantamento topográfico – Procedimento. Rio Janeiro: ABNT, 2022. 57 p.
- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR 14166:2022**: Rede de referência cadastral municipal: Requisitos e procedimento. Rio Janeiro: ABNT, 2022. 23 p.

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Regulamento Brasileiro da Aviação Civil RBAC-E nº 94. Emenda nº 23.** 03 abril 2023. Disponível em: <https://www.anac.gov.br/assuntos/legislacao/legislacao-1/rbha-e-rbac/rbac/rbac-e-94>.

Acesso em: 30/10/2024.

ALHEIROS, M. M. *et al.* **Manual de ocupação dos morros da Região Metropolitana do Recife.** Recife: Ensol, 2003. Disponível em: <http://www2.condepefidem.pe.gov.br/web/condepefidem/biblioteca-virtual-download1>. Acesso em: 15 out. 2024.

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria.** Curitiba: SBEE, 1998. 246 p. ISBN 85-86180-07-6.

ANTUNES, A. F. B.; HOLLATZ, R. C. V. Cadastro Técnico Multifinalitário de baixo custo utilizando VANT (veículo aéreo não tripulado). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 17., 2015, João Pessoa. **Anais [...].** São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Disponível em: <https://www.dsr.inpe.br/sbsr2015/files/p1205.pdf>. Acesso em: 15 out. 2024.

BRASIL. Decreto 89.817, de 20 de junho de 1984. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 de jun. de 1984. Disponível em: <https://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1980-1987/decreto-89817-20-junho-1984-439814-publicacaooriginal-1-pe.html>.

BRASIL. LEI Nº 9.785, 29 de janeiro de 1999. Altera a Lei nº 6.766, de 19 de dezembro de 1979 (parcelamento do solo urbano) **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19785.htm.

CARNEIRO, A. F. T. **Cadastro imobiliário e registro de imóveis:** a Lei n. 10.267/2001, Decreto n. 4.449/2002 e atos normativos do Incra. Fabris Editor ed. [s.l.] Porto Alegre, 2003.

COUTINHO, R. Q.; MORAIS, B. D.; MENDES, R. M.; ANDRADE, M. R. M. Alert scenarios for the Metropolitan Region of Recife-PE based on monitoring of rainfall and soil humidity – a case study. **Soils and Rocks**, São Paulo, v. 46, n. 4, 2023. DOI 10.28927/SR.2023.008323. Disponível em: <https://www.soilsandrocks.com/sr-2023-008323>. Acesso em: 29 out. 2024.

COUTINHO, R. Q.; SEVERO, R. N. F. Conferencia Investigación Geotécnica Para Projeto de Estabilidade de Encostas. In: **5ª Conferência Brasileira de Estabilidade de Encostas, COBRAE**, São Paulo. 2009. p. 55.

COUTINHO, R. Q.; SILVA, M. M.; SANTOS, A. N.; LACERDA, W. A. Geotechnical Characterization and Failure Mechanism of Landslide in Granite Residual Soil. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 145, n. 8, 31 maio 2019. DOI [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0002052](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0002052). Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29GT.1943-5606.0002052>. Acesso em: 29 out. 2024.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). ICA 100-40 Aeronaves Não Tripuladas e o Acesso ao Espaço Aéreo Brasileiro. 15 maio 2023. Disponível em: https://www.decea.mil.br/?i=midia-e-informacao&p=pg_noticia&materia=decea-atualiza-normas-de-acesso-de-drones-ao-espaco-aereo-brasileiro.

DUARTE, C. C., COUTINHO, R.Q, DA SILVA, B. Q.; HENRIQUE, H. M. A Aplicação do índice estatístico e análise multicritério no mapeamento da suscetibilidade a deslizamentos, no município do Ipojuca, Pernambuco, Brasil. *Revista Brasileira De Geografia Física*, v. 17(2), 1015–1037. 2024. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.2.p1015-1037>.

GONÇALVES, E. M.; ALBARICI, F. L.; OLIVEIRA, H. C.; REBERTE, J. C. B. Análise do Registro de Nuvens de Pontos Obtidas por SVLT e por VANT para Aplicação no Cadastro Territorial

Multifinalitário. **Revista Brasileira de Cartografia**, [s. l.], v. 76, 22 abr. 2024. DOI <https://doi.org/10.14393/rbcv76n0a-70655>. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/70655>. Acesso em: 29 out. 2024.

GUEDES, R. V. S.; SILVA, T. L. V. Análise Descritiva da Precipitação, Temperatura, Umidade e Tendências Climáticas no Recife - Pe. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [S. l.], v. 13, n. 07, p. 3234–3253, 2020. DOI: 10.26848/rbgf.v13.07.p3234-3253. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/246169>. Acesso em: 29 out. 2024.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **População em áreas de risco no Brasil**. Rio de Janeiro: 2018. Disponível em: https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/6d4743b1a7387a2f8ede699273970d77.pdf. Acesso em: 29 out. 2024.

LONGHITANO, G. A. **VANTS para sensoriamento remoto**: aplicabilidade na avaliação e monitoramento de impactos ambientais causados por acidentes com cargas perigosas. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Transportes) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. doi:10.11606/D.3.2010.tde-10012011-105505. Acesso em: 2024-10-29.

MARENGO, J.A. et al. Flash floods and landslides in the city of Recife, Northeast Brazil after heavy rain on May 25–28, 2022: Causes, impacts, and disaster preparedness. **Weather and Climate Extremes**, [s. l.], v. 39, n. 100545, 2023. DOI <https://doi.org/10.1016/j.wace.2022.100545>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212094722001244>. Acesso em: 29 out. 2024.

MORAES, K. Destroços de deslizamento de terra interditam rua na Zona Norte do Recife há mais de um mês. **JC**, Recife, 12 jul. 2022. Disponível em: <https://jc.ne10.uol.com.br/pernambuco/2022/07/15042716-ha-mais-de-um-mes-comunidade-se-ve-isolada-pelos-destrocos-da-chuva-na-zona-norte-do-recife.html>. Acesso em: 29 out. 2024.

MOREIRA, A. B. **A vulnerabilidade socioespacial à ilha de calor urbana na Cidade de Recife – PE, Brasil**. Orientador: Ranyére Silva Nóbrega. 2021. 155 f. Tese de Doutorado (Doutorado em Geografia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/bitstream/123456789/47059/1/TESE%20Ayobami%20Badiru%20Moreira.pdf>. Acesso em: 29 out. 2024.

PE3D – Pernambuco tridimensional. O que é o programa? 2016. Disponível em: <http://www.pe3d.pe.gov.br/>. Acesso em: 30/10/2024.

PERNAMBUCO. Lei nº 9.989, de 13 de janeiro de 1987. Define as reservas ecológicas da Região Metropolitana do Recife. Assembleia Legislativa do Estado de Pernambuco, Recife, 1987. Disponível em: <https://legis.alepe.pe.gov.br/texto.aspx?tiponorma=1&numero=9989&complemento=0&ano=1987&tipo=&url=>. Acesso em: dia mês ano.

RECIFE. **Dois Unidos**. Disponível em: <https://www2.recife.pe.gov.br/servico/dois-unidos?op=NTI4Mg==>. Acesso em: 29 out. 2024.

SANTOS, J. C.; TOUJAGUEZ, R.; SILVA, B. Q.; SILVA, L. M. Update of Geological Risk Mapping of the Mutange District in the Municipality of Maceió - AL, Brazil. **Serie Correlación Geológica**, Tucumán, v. 33, p. 143 - 154, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/320238189_Update_of_Geological_Risk_Mapping_of_the_Mutange_District_in_the_Municipality_of_Maceio-AL_Brazil. Acesso em: 29 out. 2024.

SONKER, I.; TRIPATHI, J. N.; SWARNIM, M. Remote sensing and GIS-based landslide susceptibility mapping using frequency ratio method in Sikkim Himalaya. **Quaternary Science Advances**, [s. l.], v. 8, n. 100067, 1 dez. 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.qsa.2022.100067>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S266603342200020X?via%3Dihub>. Acesso em: 29 out. 2024.

TOMINAGA, L. K.; SANTORO, J.; AMARAL, R. (org.). **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. 3. ed. São Paulo: Instituto Geológico, 2015. 196 p. ISBN 978-85-87235-09-1. Disponível em: https://www.infraestruturameioambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/233/2017/05/Conhecer_para_Prevenir_3ed_2016.pdf. Acesso em: 29 out. 2024.

WEIS, M. G.; PESSI, D. D.; AQUINO, J. V.; LUIZ, R. B.; MOREIRA, R. M.; PARANHOS FILHO, A. C.; SILVA, N. M. Quality assessment of products generated by survey of area using remotely piloted aircraft and control points. **Exact and Earth Sciences**, [s. l.], v. 11, n. 4, 9 mar. 2022. DOI 10.33448/rsd-v11i4.26396. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/26396>. Acesso em: 29 out. 2024.

XAVIER, R. **A utilização do VANT em levantamentos ambientais**. Orientador: Marciel Lohmann. 2013. Artigo (Especialização em Análise Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/52180>. Acesso em: 29 out. 2024.

YAN, F.; ZHANG, Q.; YE, S.; REN, B. A novel hybrid approach for landslide susceptibility mapping integrating analytical hierarchy process and normalized frequency ratio methods with the cloud model. **Geomorphology**, [s. l.], v. 327, p. 170-187, 15 fev. 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.10.024>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S01695555X18304380?via%3Dihub>. Acesso em: 29 out. 2024.

ZAHOR, Z.; YAMUNGU, N. E. Geographical Information Systems (GIS) and Remote Sensing (RS) Analysis for Landslides Susceptibility Mapping. **University of Dar es Salaam Library Journal**, [s. l.], v. 17, n. 2, p. 72-93, 18 jan. 2023. DOI 10.4314/udslj.v17i2.6. Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/udslj/article/view/239976>. Acesso em: 29 out. 2024.

ZEKKOS, D.; GREENWOOD, W.; LYNCH, J.; MANOUSAKIS, J.; ATHANASOPOULOS-ZEKKOS, A.; CLARK, M.; COOK, K. L.; SAROGLU, C. Lessons Learned from the Application of UAV-Enabled Structure-From-Motion Photogrammetry in Geotechnical Engineering. **International Journal of Geoengineering Case Histories**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 254 - 274, 2018. DOI <http://dx.doi.org/10.4417/IJGCH-04-04-03>. Disponível em: https://www.geocasehistoriesjournal.org/pub/article/view/IJGCH_4_4_3. Acesso em: 29 out. 2024.