

**MONITORAMENTO E CONTROLE DE PROCESSO EROSIVO ATIVO A PARTIR DE MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE E ANÁLISE VOLUMÉTRICA – LUPÉRCIO, SP**

Cláudio L. Ridente GOMES<sup>1</sup>; Lucas S. RISSATTO<sup>2</sup>; Gérson S. de ALMEIDA FILHO<sup>3</sup>; Zeno HELLMEISTER JÚNIOR<sup>4</sup>.

**Resumo** – Este trabalho apresenta a análise da evolução de um processo erosivo ativo, localizado no Distrito de Santa Terezinha (Lupércio, SP), a partir de aerolevantamentos com drone e modelagem digital de superfície. Foram gerados modelos mensais de alta resolução durante o período chuvoso de 2021/2022, que permitiram mensurar os volumes de solo mobilizados e caracterizar a dinâmica erosiva. A erosão apresentou evolução regressiva e lateral acelerada, com perdas de solo superiores a 5.150 m<sup>3</sup> em um intervalo de cinco meses. As medidas propostas para estabilização definitiva do processo erosivo (retaludamento dos taludes, drenagem superficial e de subsuperfície, além da proteção superficial vegetal) foram balizadas em função dos estudos geológicos-geotécnicos realizados e da dinâmica de evolução da erosão.

**Abstract** – This study presents the analysis of the evolution of an active gully erosion process located in the district of Santa Terezinha (Lupércio, São Paulo, Brazil), based on monthly drone-based aerial surveys and digital surface modeling. High-resolution surface models were generated throughout the 2021/2022 rainy season, enabling precise quantification of soil volume loss, detailed assessment of erosional dynamics, and technical support for the design of mitigation measures. The process exhibited rapid regressive and lateral expansion, resulting in the mobilization of over 5.150 cubic meters of soil within five months. The proposed stabilization measures include subsurface drainage, slope regrading, and revegetation, aiming to ensure long-term erosion control.

**Palavras-Chave** – Erosão; Drone; Volume de solo; Modelo Digital de Superfície; Estabilização.

---

1 Tecg. Civil MSc, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de SP, (11) 3767-4498, aranha@ipt.br

2 Eng. Hídrico, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de SP, (11) 3767-4498, rissatto@ipt.br

3 Tecg. Civil MSc, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de SP, (11) 3767-4498, gersaf@ipt.br

4 Geól., MSc, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de SP, (11) 3767-4498, zenohell@ipt.br

## 1. INTRODUÇÃO

Em atendimento à solicitação da Secretaria de Desenvolvimento Econômico do Estado de São Paulo – SDE, no âmbito do Programa de Apoio Tecnológico aos Municípios – PATEM, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, por meio da Área de Cidades, Infraestrutura e Meio Ambiente – CIMA, realizou estudos geológico-geotécnicos, hidrológicos e hidráulicos na cabeceira do córrego da Taiúva, no Distrito de Santa Terezinha, município de Lupércio-SP. O objetivo foi diagnosticar e propor medidas de engenharia para estabilização de processos erosivos que ameaçavam a infraestrutura urbana e os recursos hídricos da região.

Dentre as feições analisadas, destacou-se um processo erosivo ativo, com rápida evolução durante o período chuvoso de 2021/2022. Para o monitoramento da erosão e fundamentação técnica das soluções propostas, foram realizados levantamentos mensais com drone, possibilitando a geração de Modelos Digitais de Superfície (MDS) de alta resolução. Essa abordagem permitiu mapear a dinâmica erosiva e quantificar com precisão os volumes de solo mobilizados ao longo do tempo.

Este trabalho apresenta a metodologia empregada, os resultados obtidos a partir da análise dos MDS.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA ESTUDADA

### 2.1. Localização

A área de estudo está situada na cabeceira do córrego da Taiúva, no Distrito de Santa Terezinha, município de Lupércio, localizado na região oeste do estado de São Paulo (Figura 1). O município pertence às Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) Médio Paranapanema (UGRHI-17) e Peixe (UGRHI-21), sendo a área da erosão inserida nesta última. Lupércio encontra-se a cerca de 400 km da capital paulista. O Distrito de Santa Terezinha está posicionado próximo ao Rio do Peixe, às margens da SP-331.



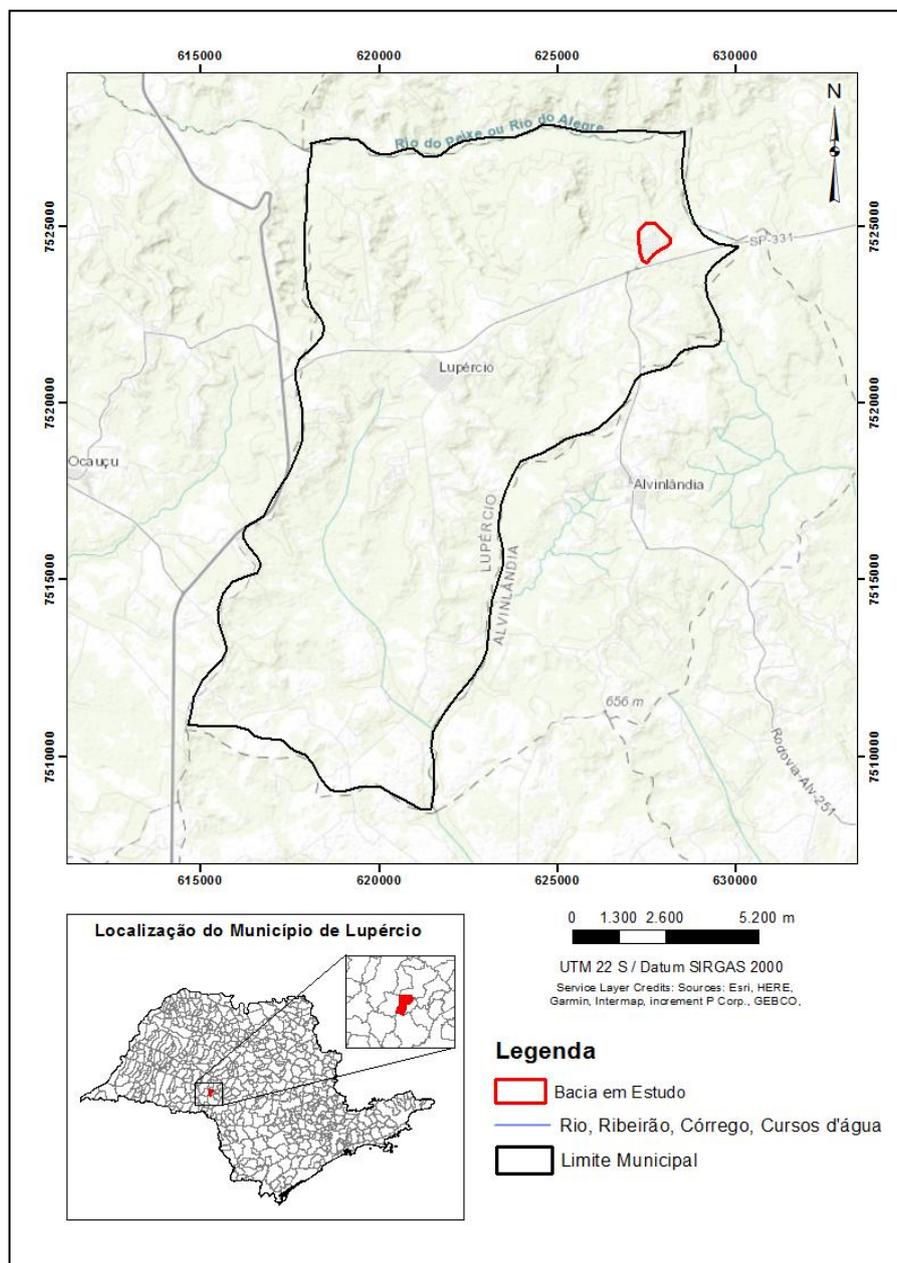


Figura 1. Localização da erosão.

## 2.2. Caracterização geológica

A geologia da área é dominada pelos sedimentos da Formação Marília, pertencente ao Grupo Bauru, conforme subdivisões propostas por FERNANDES (1998) e Perrotta et al. (2005). Esses sedimentos representam depósitos continentais do Cretáceo Superior, com predominância de arenitos maciços, pouco consolidados e com forte presença de cimentação carbonática. A presença de lentes de argilitos e siltitos intercalados, além de nódulos carbonáticos e marcas de raízes, evidencia ambientes deposicionais fluviais a lacustres, sujeitos a flutuações hidrodinâmicas.

A baixa coesão e a heterogeneidade litológica dos materiais da Formação Marília conferem elevada suscetibilidade à erosão, especialmente quando expostos por cortes ou taludes mal estabilizados. A combinação entre a estruturação frágil dos arenitos e a atividade antrópica na superfície contribui para acelerar processos regressivos e colapsos localizados, como observado no caso da Erosão.

### 2.3. Caracterização pedológica

Do ponto de vista pedológico, conforme mapeamento de ROSSI (2017), predominam na área de estudo a associação de Argissolos Vermelho-Amarelos (PVA-1 e PVA-17) e Neossolos Litólicos (RL-17). Os Argissolos, de textura média a argilosa, apresentam horizonte B textural e são comuns em relevos suavemente ondulados, onde a drenagem é moderada. Esses solos, embora estáveis em condições naturais, podem perder coesão e resistência rapidamente quando submetidos à concentração de fluxos superficiais.

Já os Neossolos, desenvolvidos sobre substrato rochoso raso, são solos pouco desenvolvidos e muito suscetíveis a processos erosivos, principalmente em vertentes declivosas. A presença conjunta desses solos em um ambiente sujeito a modificações no regime hidrológico natural — como canalizações irregulares ou supressão vegetal — cria um ambiente crítico para a ocorrência e intensificação de ravinas e boçorocas.

### 3. OBTENÇÃO DO MODELO DIGITAL DE SUPERFÍCIE DA ÁREA DE ESTUDO

Para acompanhar a evolução mensal da erosão foram realizados sobrevoos sistemáticos com o drone Phantom IV (Figura 2), entre outubro de 2021 e março de 2022. Os voos seguiram um planejamento prévio com rotas fixas e sobreposição padronizada de imagens, garantindo consistência nos dados adquiridos ao longo do tempo. Por meio do aplicativo DroneDeploy e com a utilização do KML gerado no Google Earth, foram planejados o mesmo plano de voo para todos os meses com os mesmos parâmetros de altitude, nível de sobreposição frontal e lateral das fotos, e o ângulo da câmera, para a tomada de fotos de toda a voçoroca e seu entorno, sendo utilizadas as seguintes configurações: altitude em relação ao solo de 100 metros; sobreposição das fotos de 75% para a sobreposição frontal e 65% para a sobreposição lateral. O ângulo de câmera utilizado para o levantamento foi de 90° em relação ao equipamento, posição que deixa a câmera completamente voltada ao solo.



Figura 2. Drone utilizado nos levantamentos de campo.

As imagens coletadas em cada campanha mensal foram processadas no software Pix4D, que permitiu a geração de modelos tridimensionais e ortomosaicos georreferenciados com alta precisão. Com base nesses produtos, foi possível criar imagens sobrepostas mês a mês, evidenciando visualmente o avanço do processo erosivo. Essa sobreposição possibilitou identificar áreas de instabilidade (rupturas dos taludes da erosão) e deslocamento de solo ao longo do tempo.

A partir dos modelos digitais de superfície (MDS) e ortomosaicos gerados, as análises foram realizadas no software QGIS 3.22, permitindo a quantificação da área afetada e do volume de solo mobilizado entre os diferentes períodos. Dessa forma, foi possível monitorar com precisão a dinâmica erosiva, fornecendo subsídios técnicos para diagnósticos mais detalhados e propostas de intervenção na área.

### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A imagem 3D da erosão apresentada na Figura 3, foi gerada a partir dos dados obtidos durante os sobrevoos com drone, processados no software Pix4D. Essa visualização tridimensional revelou a morfologia da feição erosiva e sua evolução espacial ao longo dos meses monitorados. A

partir dessa representação, foi possível observar padrões de avanço regressivo da cabeceira da erosão e suas laterais, especialmente na margem direita. (Figura 3).

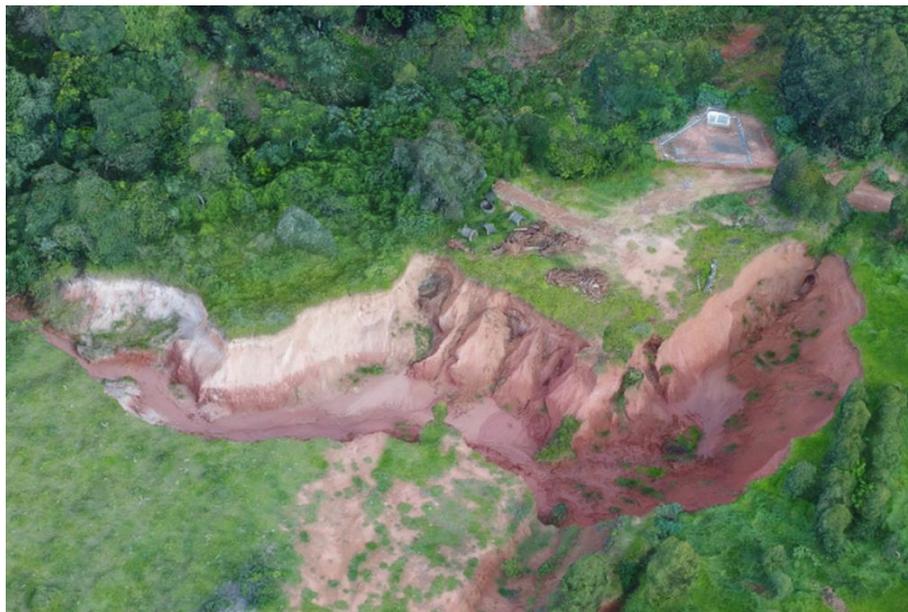


Figura 3. Vista da margem direita da erosão.

Entre outubro de 2021 e março de 2022, a erosão apresentou um comportamento dinâmico, com diferentes intensidades de progressão mês a mês. No início, entre outubro e novembro, o avanço ocorreu principalmente no sentido sudoeste, fortemente influenciado pelo lançamento irregular e concentrado de águas pluviais, associado à ocorrência de “piping” — fenômeno de erosão interna causado pela percolação das águas de subsuperfície. Nesse período, foram mobilizados aproximadamente 643 m<sup>3</sup> de solo, evidenciando um processo ainda incipiente, porém ativo.

No período entre novembro e dezembro, observou-se uma intensificação significativa da erosão. A área afetada cresceu substancialmente, atingindo 420 m<sup>2</sup>, com mobilização volumétrica da ordem de 2.443,6 m<sup>3</sup>. Além da progressão para o sudoeste (cabeceira da erosão), surgiram novas frentes de instabilidade nas suas laterais, associadas à ação de “piping”, devido a recarga do aquífero livre decorrente das chuvas ocorridas em outubro.

Durante o período de dezembro e janeiro, a erosão continuou a evoluir, concentrando-se ainda na sua cabeceira. O avanço registrado foi de 178 m<sup>2</sup> e o volume de solo mobilizado chegou a 1.209,2 m<sup>3</sup>. O comportamento da erosão indicava que o lançamento concentrado de águas era o principal agente deflagrador da sua evolução (cabeceira da erosão).

Já entre janeiro e fevereiro, verificou-se uma desaceleração da evolução do processo. A área afetada aumentou em 250 m<sup>2</sup>, com mobilização de 860 m<sup>3</sup> de solo, concentrando-se na margem direita e na cabeceira. Essa redução está associada a implantação emergencial de valas e murundus que reduziram parcialmente o aporte de águas pluviais na cabeceira da erosão.

Em março, com a intensificação das medidas redenção das águas pluviais, a evolução da erosão foi significativamente reduzida. A presença de estruturas físicas para desvio do fluxo superficial demonstrou eficácia na redução do volume escoado diretamente sobre os taludes expostos. Ao final do período monitorado, o processo erosivo havia afetado cerca de 950 m<sup>2</sup> e mobilizado aproximadamente 5.150 m<sup>3</sup> de solo, confirmando a magnitude do impacto em poucos meses.

Os monitoramentos com UAV (Unmanned Aerial Vehicle) realizados durante períodos curtos, como cinco meses, podem não capturar as variações sazonais completas, limitando a interpretação temporal dos processos erosivos. Por exemplo, em estudo de erosão costeira conduzido por Hoffmann et al. (2023), voos semestrais ao longo de dois anos evidenciaram variações volumétricas marcantes associadas às mudanças sazonais na maré e cobertura vegetal.

A Tabela 1 resume os dados quantitativos referentes à evolução da área afetada e ao volume de solo mobilizado durante os cinco meses de monitoramento, enquanto a Figura 4 sintetiza graficamente a evolução espacial da erosão.

Tabela 1. Índices físicos e parâmetros de resistência dos solos investigados.

Mês	Área Afetada (m <sup>2</sup> )	Volume Mobilizado (m <sup>3</sup> )
Outubro - Novembro	102,7	643,0
Novembro - Dezembro	420	2443,6
Dezembro - Janeiro	178	1209,2
Janeiro - Fevereiro	250	860
Total	950	5150

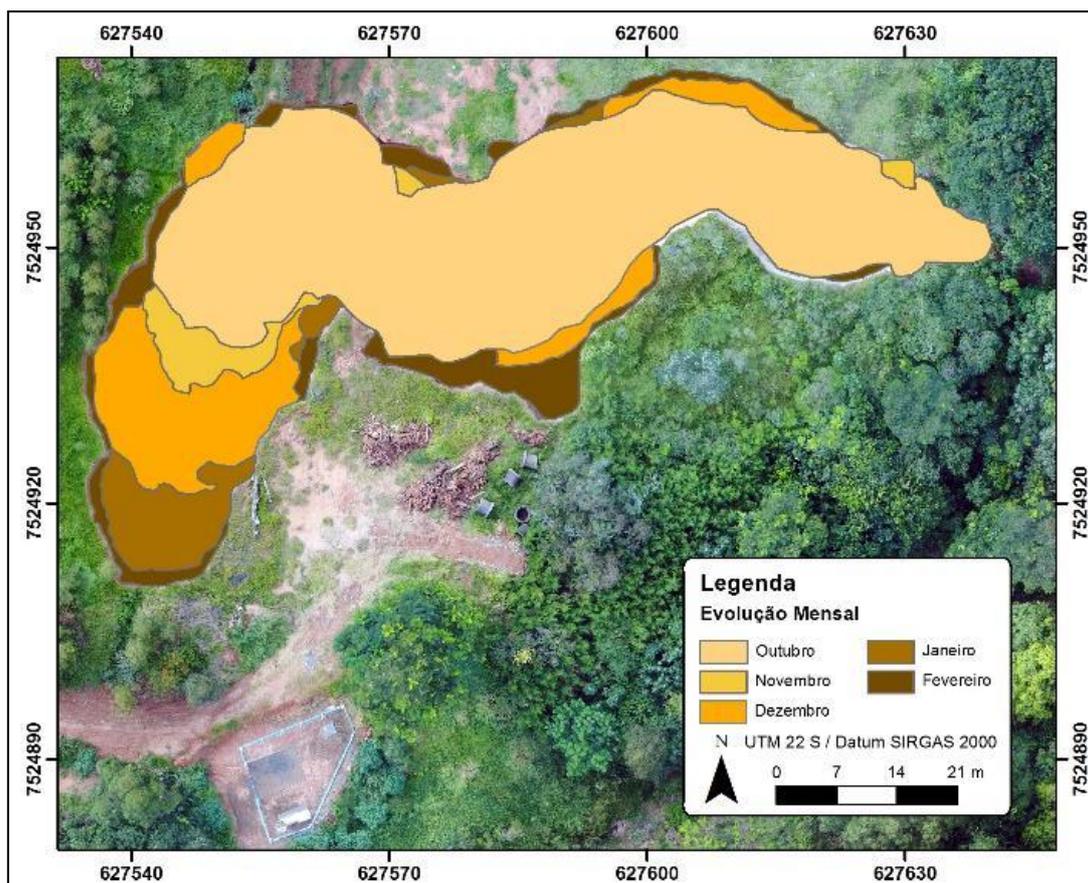


Figura 4. Evolução Gráfica Mensal da Erosão.

Apesar da representatividade topográfica dos modelos gerados, a ausência de pontos de controle em solo (GCPs) e de tecnologias GNSS (Global Navigation Satellite System) avançadas, como RTK (Real Time Kinematic) ou PPK (Post-Processed Kinematic), pode resultar em deslocamentos métricos significativos tanto na vertical quanto na horizontal. Uma pesquisa, envolvendo 14 plataformas UAV comerciais sem RTK/PPK, registrou erros horizontais variando de 0,21 a 1,2 metros, dependendo do equipamento, embora a precisão de posicionamento absoluto permanecesse limitada. Estudos adicionais reforçam que, mesmo com voos bem planejados e sobreposição adequada das imagens, erros verticais podem oscilar entre 0,5 a 2 metros, conforme a topografia local, estabilidade do voo e qualidade da calibração da câmera (Sanz-Ablanedo et al., 2018; Nesbit & Hugenholtz, 2019; James et al., 2020). Embora a padronização dos voos tenha assegurado boa coerência interna entre os modelos, tal abordagem não substitui os métodos de controle geodésico.

No presente estudo, a ausência de GCPs e de georreferenciamento direto pode ter afetado a acurácia absoluta dos Modelos Digitais de Superfície, principalmente nas análises volumétricas e comparações multitemporais. Para minimizar esse efeito, as alturas dos taludes foram obtidas

durante as campanhas de caracterização geológica-geotécnica e demais levantamentos de campo realizados na área de estudo, sendo incorporadas às análises para auxiliar na definição da geometria real da voçoroca e aprimorar a estimativa dos volumes erodidos.

Para a análise da precipitação durante o período do estudo, foi utilizada a estação pluviométrica de código 2249022 (Ocaçu), por ser uma das mais próximas da área de interesse e a única com dados completos para todo o intervalo analisado. A Tabela 2 mostra os dados de chuva acumulada dessa estação.

Tabela 2. Precipitação acumulada de chuva nos períodos do estudo.

<b>Período</b>	<b>Chuva (mm)</b>
Outubro - Novembro	118.4
Novembro - Dezembro	59.9
Dezembro - Janeiro	301.7
Janeiro - Fevereiro	133.4

Os resultados revelam que não há uma relação direta e proporcional entre a quantidade de chuva acumulada e os volumes de solo mobilizado. Por exemplo, entre novembro e dezembro, registrou-se apenas 59,9 mm de chuva, mas um volume mobilizado expressivo de 2.443,6 m<sup>3</sup>. Já entre dezembro e janeiro, a precipitação foi significativamente maior (301,7 mm), mas o volume de solo mobilizado foi inferior (1.209,2 m<sup>3</sup>). Esse comportamento reforça a importância de se considerar não apenas o volume total de precipitação, mas também sua intensidade e distribuição temporal, já que eventos de chuvas intensas e concentradas apresentam maior potencial de desencadear processos erosivos, mesmo quando o acumulado mensal é baixo. Estudos como os de Dunkerley (2019) e Majewski et al. (2023) demonstram que a energia associada a eventos intensos de curta duração é um dos principais fatores responsáveis pela desagregação do solo e pela intensificação da erosão superficial. Além disso, ressalta-se que o efeito da recarga do aquífero livre devido as chuvas ocorridas nos meses anteriores aumentaram o efeito de “piping” na base dos taludes do processo erosivo, gerando novas instabilizações.

## 5. CONCLUSÕES

De acordo com o Mapa de Erosão do Estado de São Paulo (IPT/DAEE, 1997), a área de estudo encontra-se classificada como de Suscetibilidade à Erosão Muito Alta (Classe I). Essa categorização é compatível com a presença dominante de processos erosivos lineares, como ravinas e boçorocas, e com a ocorrência de erosão laminar intensa, resultante da baixa resistência dos solos e da presença de drenagens concentradas.

Os resultados obtidos neste estudo destacam a importância do monitoramento sistemático e georreferenciado para o entendimento da dinâmica erosiva em áreas críticas. A aplicação de tecnologias como drones e softwares de modelagem 3D demonstrou ser uma ferramenta poderosa para diagnóstico rápido, preciso e com excelente relação custo-benefício, especialmente em situações onde a erosão ameaça diretamente áreas urbanizadas ou infraestruturas essenciais.

A comparação entre os períodos monitorados evidenciou que volumes significativos de solo foram mobilizados mesmo em intervalos com menor precipitação acumulada, enquanto períodos com maior volume de chuva apresentaram resposta erosiva inferior. Esse comportamento indica que fatores como a intensidade e a concentração dos eventos de chuva, efeito da ação de “piping” devido a recarga do aquífero livre, a saturação prévia do solo, o lançamento irregular de águas pluviais e a fragilidade estrutural dos taludes exercem influência preponderante sobre a ativação e progressão do processo erosivo.

Os aprendizados deste caso podem ser replicados em outras regiões com características semelhantes, servindo como referência para o uso integrado de tecnologias modernas no enfrentamento de problemas ambientais e geotécnicos em escala municipal e regional.

## REFERÊNCIAS

- DUNKERLEY, D. Rainfall intensity bursts and the erosion of soils: An analysis highlighting the need for high temporal resolution rainfall data for research under current and future climates. *Science of the Total Environment*, v. 691, p. 153–162, 2019
- FERNANDES, L. A. Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru (Ks, Brasil). Tese de Doutorado, IG/USP, p. 216, 1998
- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS/DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA. Mapa de Suscetibilidade à Erosão do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000. São Paulo: IPT/DAEE, 1997. (Relatório Técnico 33.402).
- HOFFMANN, G.; STOKES, D. J.; GOSLING, L. M.; O'CONNOR, J. A. Quantifying coastal erosion and storm impacts using drone surveys: A multi-seasonal approach. *Remote Sensing*, v. 15, n. 2, p. 512, 2023.
- JAMES, M. R.; ROBSON, S.; SMITH, M. W. 3-D uncertainty-based topographic change detection with structure-from-motion photogrammetry: precision maps for ground control and directly georeferenced surveys. *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 45, n. 5, p. 1021–1041, 2020.
- MAJEWSKI, M.; KOWALCZYK, A.; KOWALCZYK, T. Impact of rainfall intensity on soil erosion based on experimental research. *Environmental Earth Sciences*, v. 82, n. 6, 2023.
- NESBIT, P. R.; HUGENHOLTZ, C. H. Performance of DJI Phantom 4 RTK under repeated survey conditions. *Drones*, v. 3, n. 1, p. 1–15, 2019.
- NESBIT, P. R. et al. Investigating UAV platform performance in direct georeferencing without GCPs. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 173, p. 34–47, 2021. (Baseada na referência das 14 plataformas)
- PERROTTA, M. M., et al. Mapa Geológico do Estado de São Paulo, escala 1:750.000. São Paulo: Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, 2005
- ROSSI, M. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado. São Paulo: Instituto Florestal, 2017. 118p.: il. color; mapas. 42x29,7 cm
- SANZ-ABLONADO, E.; RUIZ, L. A.; REY, C. Accuracy of digital surface models and orthomosaics derived from unmanned aerial vehicle photogrammetry using different ground control configurations. *Journal of Surveying and Engineering*, v. 144, n. 4, 2018.