

UTILIZAÇÃO DE GEOTECNOLOGIAS APLICADAS À ANÁLISE TEMPORAL DE VOÇOROCAS: ESTUDO DE CASO EM ANHEMBI - SP

Tiago Antonelli

Universidade de São Paulo, SP, Brasil
tiago.antonelli@sgb.gov.br

Vinicius Hector Abud Louro

Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Austrália
vinnie.louro@gmail.com

RESUMO

Voçorocas são erosões de grande porte que podem causar danos à infraestrutura urbana de vários municípios do Brasil. Conhecer a dinâmica de crescimento dessas feições, bem como entender as causas que potencializam os processos erosivos dessa natureza, são fundamentais para mitigar os prejuízos que as voçorocas podem causar. Com o emprego de geotecnologias, em especial o uso de Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs), foi possível acompanhar uma voçoroca de grande porte no município de Anhembi – SP. Ortofotos e pontos de georreferência gerados, a partir de drones e equipamentos GNSS, permitiram a composição de Modelos Digitais de Terreno de alta precisão, utilizando a técnica de *Structure from Motion*. Comparando Modelos Digitais de Terreno de diferentes épocas do ano, foi possível avaliar a dinâmica erosiva da geomorfologia local, constatando que a voçoroca perdeu volume em períodos mais chuvosos. Também foi possível observar por sensores orbitais passivos que a cultura de eucalipto nos arredores da voçoroca ajudou na estabilização geral da erosão.

Palavras-chave: Structure From Motion. Modelo Digital de Terreno. Chuva.

USE OF GEOTECHNOLOGIES APPLIED TO TEMPORAL ANALYSIS OF GULLY EROSION: CASE STUDY IN ANHEMBI - SP

ABSTRACT

Gullies are large-scale erosions that can cause damage to the urban infrastructure of several municipalities in Brazil. Understanding the growth dynamics of these features and the causes that enhance erosion processes of this nature are essential to mitigate the damage that gullies can cause. With geotechnologies, especially using Unmanned Aerial Vehicles (UAVs), it was possible to monitor a large gully in the municipality of Anhembi - SP. Orthophotos and georeferenced points generated by drones and GNSS equipment allowed the composition of high-precision Digital Terrain Models using the Structure from Motion technique. By comparing Digital Terrain Models from different times of the year, it was possible to evaluate the erosion dynamics of the local geomorphology, finding that the gully lost volume in the rainiest periods. Through passive orbital sensors, it was noted that the eucalyptus cultivation surrounding the gully helped stabilize the erosion.

Keywords: Structure from Motion. Digital Terrain Model. Rain.

INTRODUÇÃO

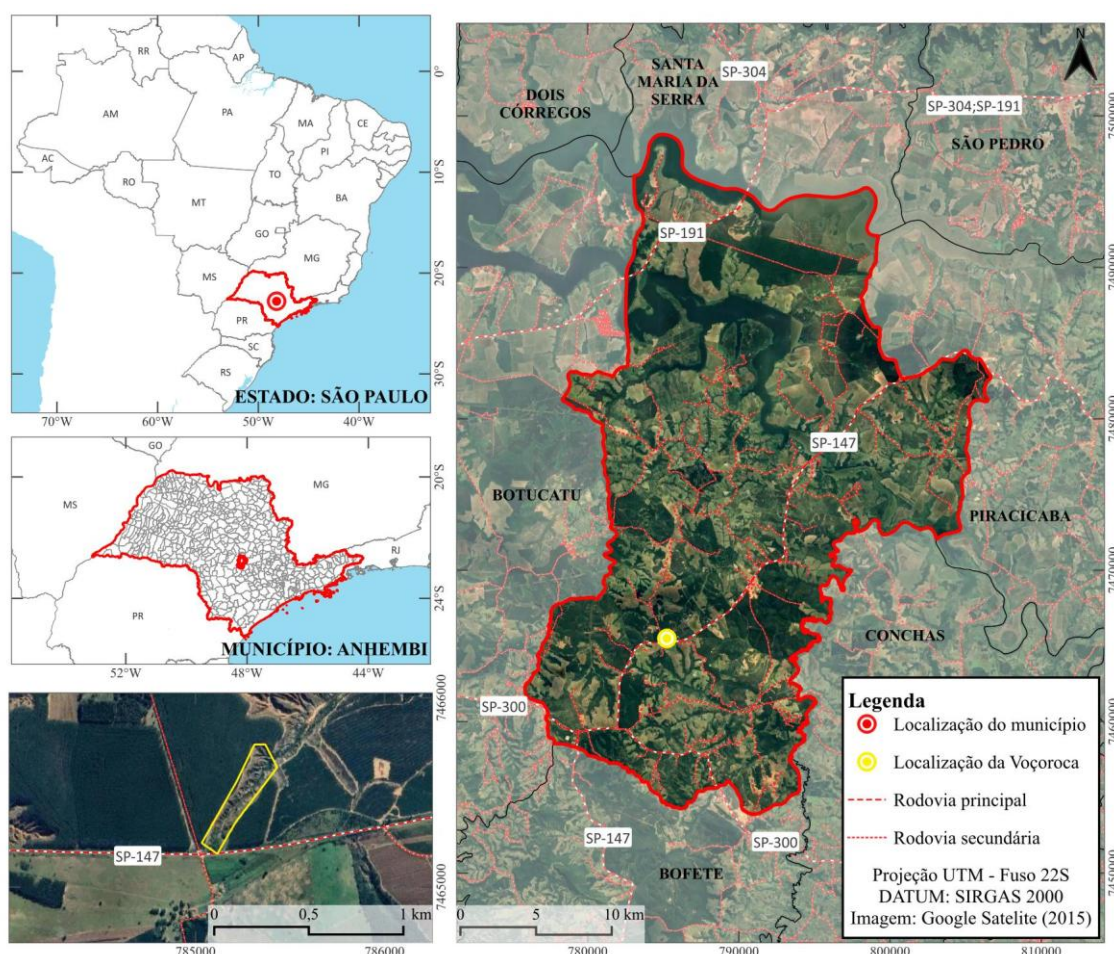
Técnicas de fotogrametria digital, como a *Structure from Motion* (SfM), têm sido recorrentemente utilizadas para o monitoramento e prevenção de eventos geológicos e hidrológicos potencialmente destrutivos (D'Oleire-Oltmanns *et al.*, 2012; Turner, Lucieer e De Jong; 2015; Warrick *et al.*, 2017; Garritano, Guerra e Augustinefullen; 2019). Essa técnica pode ser implementada usando uma variedade de dispositivos portáteis com considerável precisão e resolução. Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) são as plataformas de aquisição mais frequentemente utilizadas com SfM, após 2010, com a redução dos custos dessas tecnologias e robustez dos equipamentos.

A SfM permite a reconstrução automática de uma cena 3D, baseada em um conjunto de imagens de um mesmo alvo, tomadas de diferentes posições, sem a necessidade de determinação de parâmetros externos

da câmera (Viana, 2015). Os produtos gerados por SfM podem ser usados, para análises geomorfológicas, tectônicas, estruturais, geodésicas e na prevenção de desastres (Tahar; Ahmad; Akib, 2011; Niethammer *et al.*, 2012). Séries temporais SfM de alta resolução vinculadas a posicionamentos geodésicos de uma determinada área, com um processo de instabilidade geológica instalado, permitem o monitoramento da evolução desse processo. Isso significa produzir insumos que visem à mitigação e prevenção de desastres naturais, sejam eles caracterizados por movimentos gravitacionais de massa (deslizamentos, corridas de massa), processos hidrológicos (inundações) ou erosivos, como é o caso de ravinas, sulcos e voçorocas.

Este trabalho consiste numa análise temporal de uma voçoroca localizada no município de Anhembi – SP (Figura 1). Essa análise utilizou imagens obtidas via VANTs para quantificar a evolução da feição erosiva ao longo dos anos. Foram monitoradas mudanças morfométricas e volumétricas, relacionando-as com a quantidade de chuva dos períodos, vegetação, sistemas de drenagens de águas pluviais adjacentes à voçoroca e questões geológicas e geomorfológicas.

Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo, em Anhembi – SP, com detalhe sobre a voçoroca e o trecho analisado



Fonte: os autores, imagem Google Satellite, 2015.

Essas informações poderão servir de subsídio para o poder público trabalhar na prevenção e mitigação de danos causados por esses processos. Nesse contexto, a compreensão da taxa de crescimento da voçoroca e a estimativa de volume de solo carregado são dados importantes para a mitigação de danos que podem ser causados pela erosão. Complementarmente, o entendimento do comportamento das voçorocas, em diferentes épocas do ano (estiagem, intermediário e períodos chuvosos), além da correlação desse comportamento com aspectos geológicos, geomorfológicos, uso e ocupação do solo, são fundamentais para subsidiar o entendimento da suscetibilidade de determinado terreno a erosão.

Voçorocas são um tipo de erosão originado por mecanismos atuantes, em diferentes escalas temporais e espaciais, por caminhos preferenciais tomados pelos fluxos de escoamento superficial e/ou subsuperficial, podendo atingir o lençol freático. Frequentemente caracterizadas por grandes extensões, podem ocorrer em terrenos íngremes ou aplainados (Selby, 1991; Guerra, 2007), sendo comuns em terrenos sedimentares em todas as regiões do Brasil. Suas grandes dimensões e complexidade da forma com que ocorrem tendem a afetar áreas de pastos e cultivos e, secundariamente, estruturas civis como rodovias, ferrovias, moradias, entre outras.

Embora a formação e o desenvolvimento das voçorocas tenham sido amplamente estudados, ainda existem lacunas significativas que necessitam de investigação e compreensão (Poesen, 2018). Entre essas lacunas, destacam-se a quantificação e a análise da evolução temporal e espacial dessas formações, a definição das correlações entre os padrões geomorfológicos e sedimentares que apresentam diferentes graus de suscetibilidade à erosão, além da necessidade de um monitoramento preciso das voçorocas.

A utilização de geotecnologias e ferramentas de sensoriamento remoto é hoje crucial para o monitoramento e a compreensão dessas características geológicas. A implementação de VANTs, para a identificação e análise de sinais de instabilidade, bem como para o acompanhamento e geração de produtos georreferenciados, representa um avanço tecnológico significativo nesse campo. Drones, em particular, não apenas facilitam o mapeamento de áreas remotas que são de difícil acesso por métodos tradicionais, mas também proporcionam uma economia de tempo e recursos financeiros nos projetos relacionados. Isso se deve ao fato de que a captura de imagens pode ser realizada, a partir de um ponto fixo, eliminando a necessidade de deslocar equipes para regiões complicadas. A técnica SfM, combinada com a captura de imagens por VANTs, tem ganhado destaque nas geociências, sendo reconhecida por sua facilidade de uso e baixo custo, sem exigir rigor geométrico elevado na aquisição das imagens (Carrivick, Smith; Quincey; 2016).

A adoção de geotecnologias, independentemente de seu grau de complexidade, é essencial para a prevenção de desastres naturais. É importante avaliar a aplicabilidade de cada método, levando em consideração a relação custo-benefício e a acessibilidade que eles oferecem à sociedade. O uso adequado dessas ferramentas para a previsão de desastres não apenas protege vidas, mas também pode resultar em economia financeira para o Estado.

Contexto Geológico

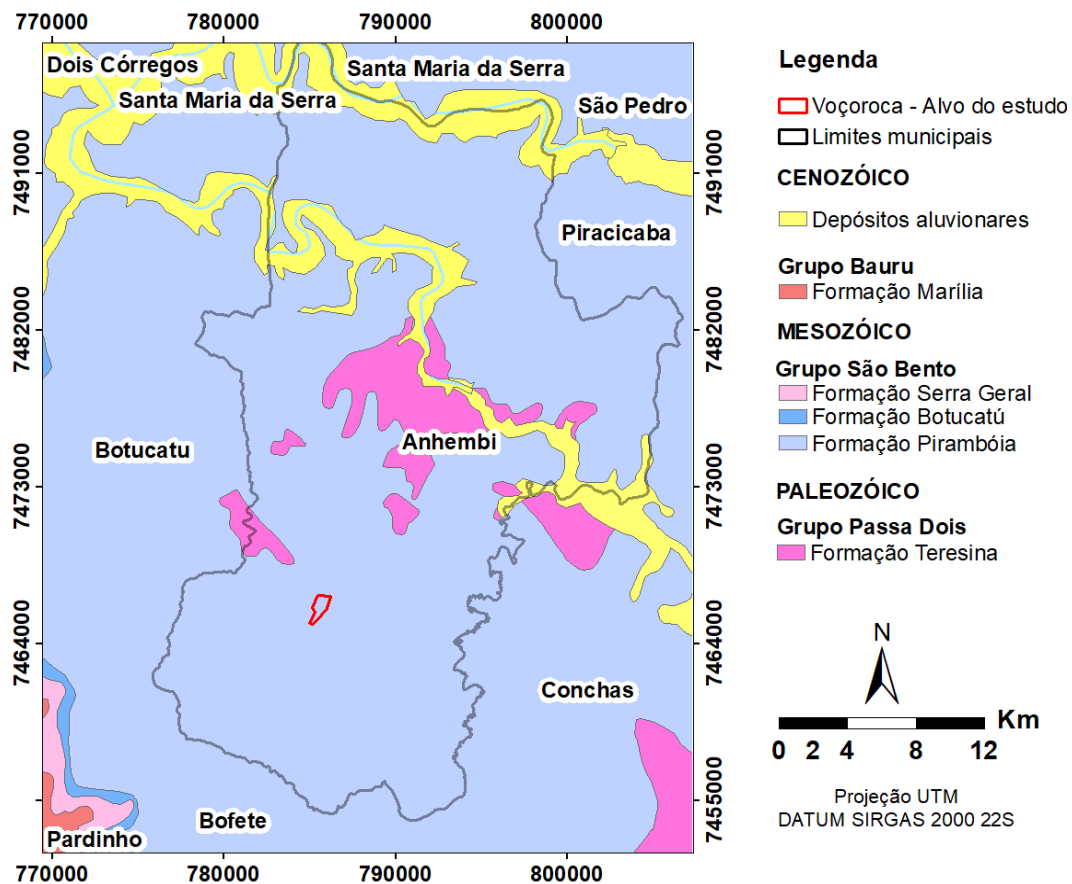
A área de estudo localiza-se na Bacia do Paraná, uma bacia intracratônica de forma ovalada, com um eixo maior na orientação Norte-Sul. Os contornos erosivos dessa bacia são amplamente atribuídos a fenômenos geotectônicos que ocorreram durante as eras mesozoica e cenozoica. Segundo Milani e Ramos (1998), esses fenômenos resultaram na subtração de uma parte significativa da área do contexto deposicional original.

Na região avaliada, afloram rochas pertencentes ao subgrupo Irati e à Formação Teresina, ambos do período permiano, além do grupo triássico-jurássico São Bento. A Formação Teresina é caracterizada por siltitos arroxeados que apresentam fraturas em padrões pastilhados. Por outro lado, as rochas da Formação Irati consistem em sequências de folhelhos e calcários (Araújo, 2003; Figura 2).

O grupo São Bento, presente na área, é formado pelas formações Piramboia, Botucatu e Serra Geral. A Formação Piramboia é composta por arenitos médios e finos dispostos em sequências de estratificações cruzadas de grandes dimensões. Já a Formação Botucatu se caracteriza por arenitos arredondados, de tonalidade avermelhada, com grãos foscos de tamanho médio. As rochas da Formação Serra Geral são representadas por derrames basálticos tabulares que se sobrepõem à Formação Botucatu.

Dentro da voçoroca analisada, observa-se o contato entre as Formações Piramboia, situada no topo e Teresina, na base. Contudo a origem desse contato é um tema controverso. Petri e Fulfaro (1983) afirmam que a deposição da Formação Piramboia é iniciada em amplas áreas do Estado de São Paulo por um regolito fóssil, que se apresenta na forma de brecha de siltito em uma matriz arenosa. A partir de um estudo de fácies, Matos (1995) identificou a influência de processos deposicionais regidos por marés nesse regolito fóssil, evidenciando a alternância entre a deposição de sedimentos finos e períodos de exposição, resultando em uma transição de fácies. O autor sugeriu a criação de uma nova unidade litoestratigráfica, a camada Porangaba, como substituição à denominação de regolito fóssil. Entretanto, em algumas localidades, a camada Porangaba não é observada no contato mencionado. Em vez disso, os arenitos eólicos da Formação Piramboia assentam-se diretamente sobre os sedimentos finos da Formação Teresina, indicando uma erosão mais intensa provocada pela ação eólica (Caetano-Chang; Wu, 1995).

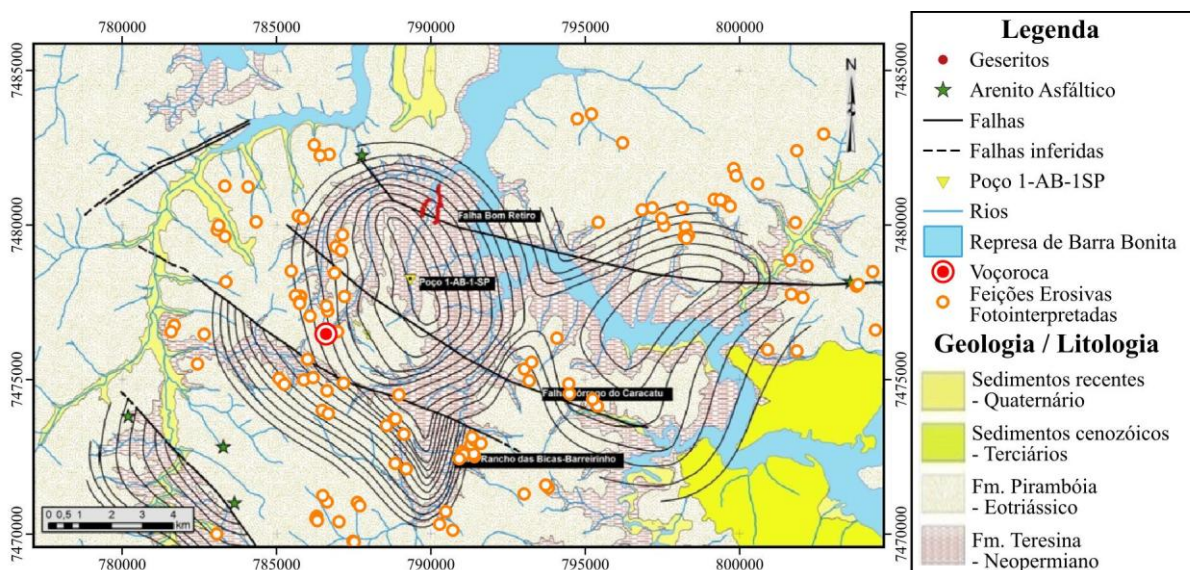
Figura 2 - Mapa geológico da área de estudo



Fonte: adaptado de CPRM, 2019.

Estruturalmente, a área está localizada no Alto Estrutural de Anhembi, que resulta da intersecção de dois grandes lineamentos regionais. Na parte Norte, a Falha de Jacutinga, orientada a Nordeste (Soares *et al.*, 1996), cruza com o lineamento Tietê, que possui direção Noroeste (Saad, 1977). Essa estrutura é caracterizada pelo afloramento de rochas eopérmianas da Formação Teresina, em sua porção central, rodeadas por rochas triássicas da Formação Piramboia (Cavallaro, 2013). Esse alto estrutural expõe os siltitos e arenitos das Formações Teresina e Piramboia, respectivamente, a altitudes mais elevadas, intensificando a erosão na região afetada pelo soerguimento (Figura 3).

Figura 3 - Mapa geológico do Alto Estrutural de Anhembi, com destaque para a voçoroca do presente estudo e feições erosivas fotointerpretadas



Fonte: adaptado de Cavallaro, 2013.

METODOLOGIA E DADOS

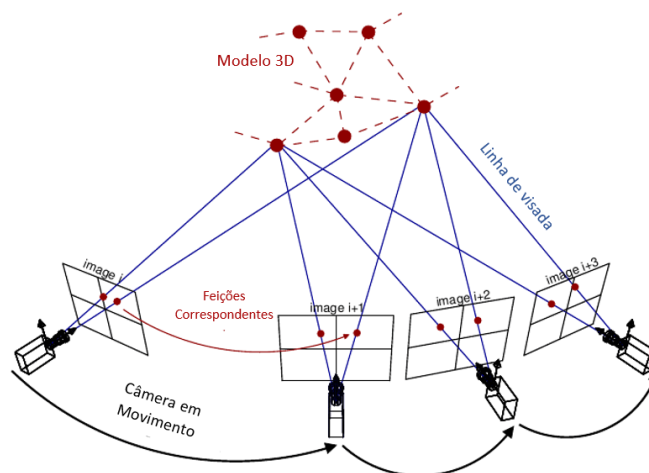
A análise temporal da voçoroca foi realizada, por meio de levantamentos periódicos com drone e utilização do método SfM, para caracterizar as mudanças que a feição erosiva foi sujeita ao longo do tempo. O método SfM tem como objetivo reconstituir a voçoroca por imagens óticas e modelos digitais de terreno, para que seja viável a sua fotointerpretação e a análise do volume de sedimentos erodidos ao longo dos anos. Para a quantificação do volume, foi necessária a geração de Modelos Digitais de Terreno, via processamentos aerofotogramétricos tradicionais (SfM).

Structure from Motion (SfM)

A SfM reconstrói uma cena tridimensional pela composição de imagens 2D georreferenciadas com ao menos 70% de sobreposição, obtidas por um sistema imageador, ou câmera, em movimento (Viana, 2015; Figura 4). A modelagem da superfície é baseada na fotogrametria digital, sendo possível quantificar o volume e área das feições erosivas. No método SfM, para identificar correspondências entre imagens, é necessário rastrear características como pontos de cantos (bordas com gradientes em várias direções) de uma imagem para outra. As trajetórias dessas características entre as imagens são utilizadas, para reconstruir tanto suas posições no espaço tridimensional quanto o movimento da câmera, ou seja, suas posições relativas (Dellaert *et al.*, 2000). Em casos de monitoramento de feições erosivas como voçorocas, o SfM permite a predição da possível degradação futura do ambiente, além do dimensionamento da perda de solo nessas áreas.

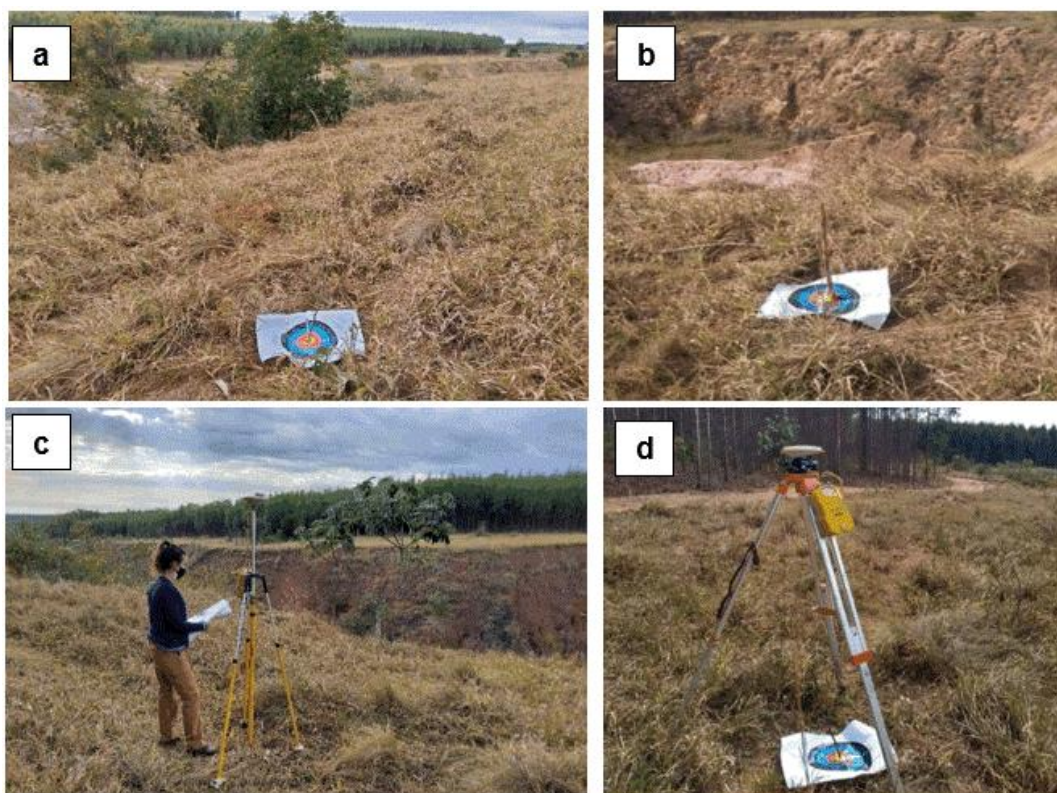
O georreferenciamento foi realizado com equipamentos GNSS de alta precisão (*Global Navigation Satellite System*), contando com ao menos três pontos de controle de solo (*Ground Control Points* - GCPs). Os pontos devem ser distribuídos na cena, evitando configuração linear (Viana *et al.*, 2018). Os pontos de controle, alvos enumerados de 1 a 5 (Figuras 5a e b), foram coletados com dois receptores GNSS Trimble 5700 L1.

Figura 4 - Princípio da SfM, baseado na extração de estruturas 3D a partir das múltiplas imagens sobrepostas



Fonte: extraído de Theia Vision Library, 2024.

Figura 5 - (a) e (b) exemplos das marcações dos alvos para a aquisição dos pontos de controle; (c) receptor GNSS fixo no alvo 1; (d) receptor GNSS móvel, coletando informações em um dos alvos



Fonte: Os autores, 2024.

O Alvo 1 foi utilizado como referência (base; figura 5c), adquirindo efemérides orbitais por 4 horas, aumentando a precisão ao ponto. Os demais alvos adquiriram dados por uma hora cada (Figura 5d). Para vínculo com os imageamentos por drone, todos os pontos foram sinalizados por alvos em superfície. Foram realizados voos manuais, para reconhecimento da área e planejamento (parâmetros na Tabela 1), esse último para o levantamento aerofotogramétrico automatizado.

Tabela 1 - Parâmetros configurados no VANT nas três datas de aquisição

Parâmetros	Configuração dos parâmetros do VANT			
	17/07/2021	24/09/2021	08/04/2022	20/05/2023
Duração do voo	20 min	20 min	20 min	20 min
Número de fotos do voo automático	404	403	404	403
Sobreposição frontal	80%	80%	80%	80%
Sobreposição lateral	80%	80%	80%	80%
Altitude de voo	50 metros	50 metros	50 metros	50 metros
GSD planejado	1,25 cm/pix	1,25 cm/pix	1,25 cm/pix	1,25 cm/pix
Angulação da câmera ao longo de todo o voo	90° (NADIR)	90° (NADIR)	90° (NADIR)	90° (NADIR)

Fonte: Os autores, 2024.

As coordenadas das estações GNSS foram referenciadas à Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo (RBMC), por meio do Alvo 1, que serviu de base de referência local (Garbelini, 2021). O processamento contou com a triangulação da posição da base com oito estações (IBGE, 2008) dentro de um raio de 250 km. Essa metodologia seguiu as recomendações para realizar a transposição entre a base e os demais alvos com eficácia (INCRA, 2012).

As efemérides obtidas pelas estações do IBGE foram processadas, gerando linhas de base e, posteriormente, realizando o ajuste de rede automaticamente para determinar a precisão da coordenada transposta. A coordenada do Alvo 1 foi calculada e ajustada, garantindo a melhor precisão. Isso permitiu usar as coordenadas da base como referência para os demais alvos (IBGE, 2008).

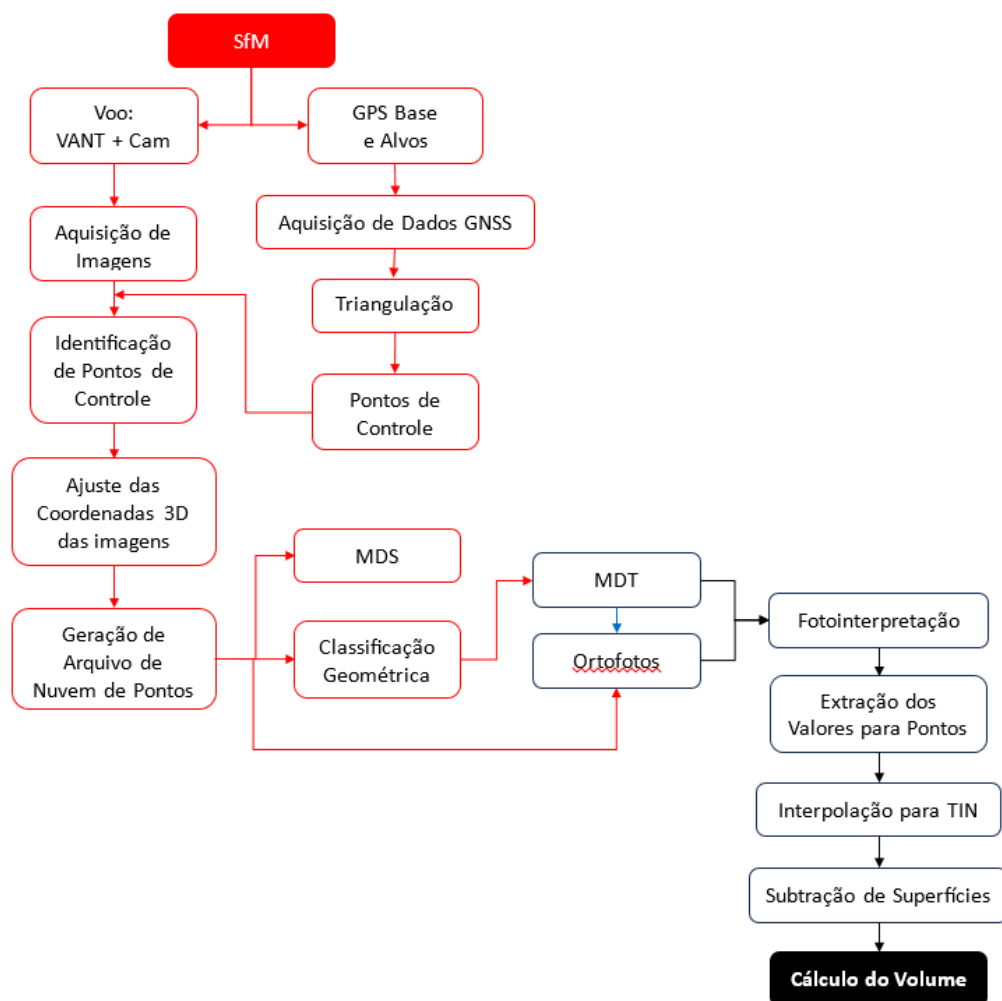
As coordenadas dos pontos de controle vincularam o imageamento automatizado da voçoroca às altitudes GNSS. Os pontos coincidentes em um grupo de imagens sobrepostas foram identificados. Junto à posição e orientação da câmera do drone, as imagens geraram uma nuvem esparsa de pontos 3D com coordenadas X, Y e Z. A partir da nuvem de pontos, é automaticamente realizada a densificação dos pontos, interpolação, estruturação e texturização. Com as informações de posição e altitude, são gerados o modelo 3D, constituído de malhas poligonais obtidas pela tesselação de seus pontos, Modelo Digital de Superfície (MDS) e ortomosaico.

Pela ortorretificação das imagens e geração do MDS, obtém-se o ortomosaico. O MDS auxilia na eliminação das distorções geométricas e na detecção de áreas oclusas. Isso permite uma visão ortogonal da superfície, buscando reconstruir o modelo de forma realista e georreferenciada. Essa visão habilita a medição de distâncias, áreas e direções precisas entre pontos (Shin; Lee, 2021). Para gerar o Modelo Digital de Terreno (MDT), recursos geométricos e de cor foram utilizados para classificar a nuvem de pontos (Becker *et al.*, 2018). Essa filtragem remove os pontos não classificados como terreno (*ground*) da nuvem de pontos e, por consequência, gera o Modelo Digital de Terreno.

Cálculo de Volume da Voçoroca e Relação com Pluviosidade

Após os processamentos das imagens adquiridas pelo VANT, foi possível calcular o volume da voçoroca. O cálculo do volume se baseou na diferença entre a altitude de uma superfície inferida e o MDT (Julian; Nunes, 2020). A metodologia de cálculo de volume da voçoroca pelo método SfM pode ser representado pelo fluxograma da Figura 6.

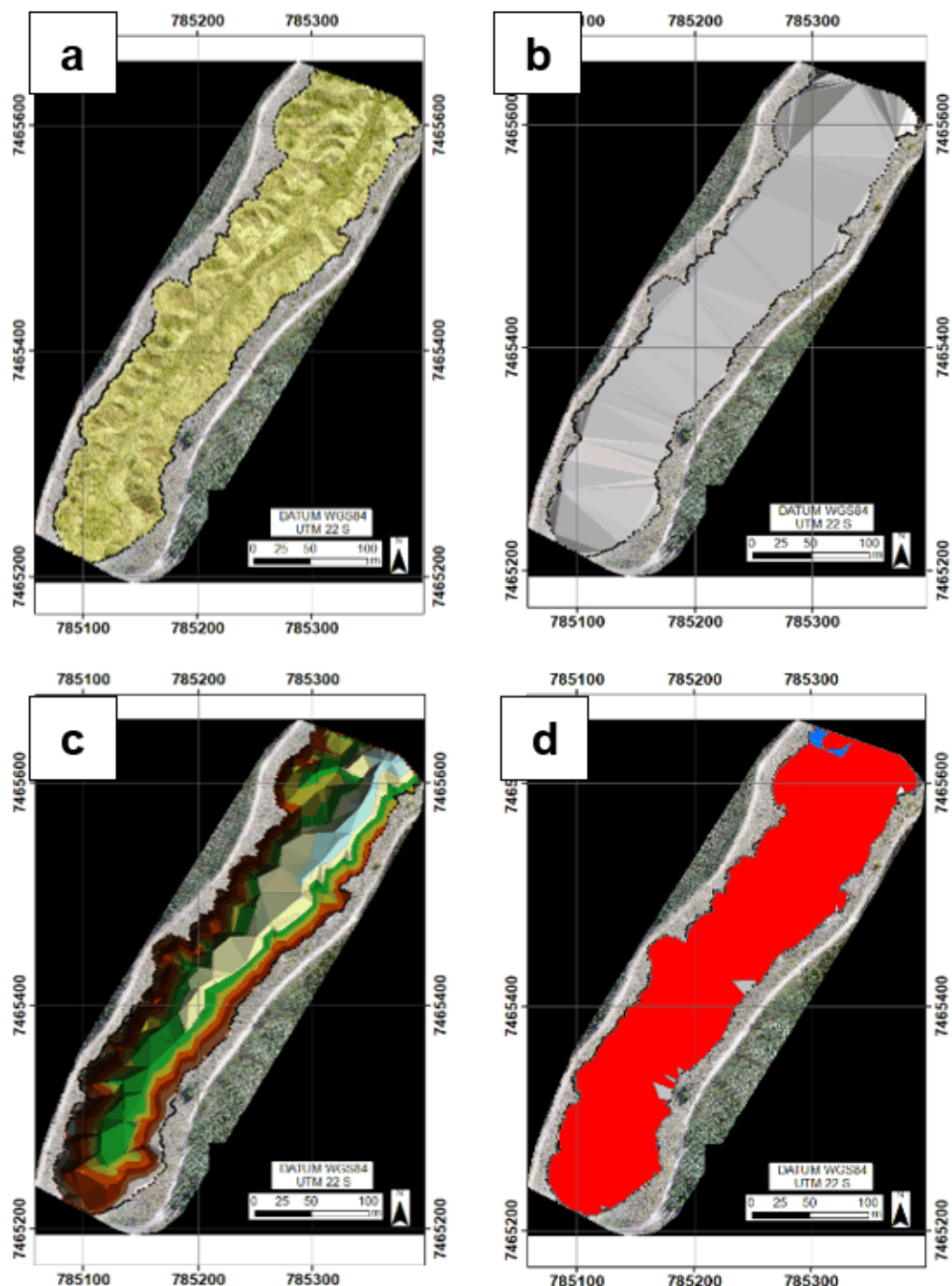
Figura 6 - Fluxograma para o Cálculo do Volume da Voçoroca a partir dos Modelos Digitais de Terreno oriundos do SfM



Fonte: Os autores, 2024.

Por meio de fotointerpretação realizada, a partir das ortofotos geradas nos processamentos das imagens adquiridas pelo drone, foram delimitadas as bordas da voçoroca (Figura 7a). Foram atribuídos aos seus vértices valores de altitude extraídos do MDT e aqueles no limite da voçoroca puderam ser interpolados pelo método linear pela ferramenta TIN (*Triangle Irregular Network*) (Figura 7b). Foi gerada então superfície virtual para a reprodução da topografia original do terreno, antes do início da erosão. Para executar o cálculo do volume erodido, foi calculada a diferença entre as altitudes das duas camadas e multiplicado o resultado pela resolução espacial do MDT, gerando o volume do que está abaixo e acima de superfície original (Figura 7d).

Figura 7 - (a) Delimitação vetorial da superfície original estimada em amarelo e seus respectivos vértices com informação de altitude; (b) Interpolação linear em malha triangular dos vértices para gerar uma superfície 3D; (c) Transformação do arquivo raster do MDT em TIN; e (d) Resultado do cálculo de volume, em vermelho, o volume abaixo da superfície original (volume erodido), em azul, é apresentada a área cujo volume estaria acima da superfície estimada e, em cinza, estaria na mesma altitude da referência



Fonte: Os autores, 2024.

A relação entre volumes de chuvas foi estabelecida com a variação no comportamento do deslocamento de massa da voçoroca. Para tal, foram utilizados dados da base pluviométrica automática (Ref.: 62560000) localizada na Usina Hidrelétrica de Barra Bonita, a 53 km da voçoroca.

Processamento de imagens orbitais – sensores passivos

O monitoramento por drone ocorreu, entre 2021 e 2023, em diferentes estações do ano. Para compreender, no entanto, como a vegetação no entorno da voçoroca reagiu à sua evolução e à consequente correlação entre ambas, foi construída uma série temporal de imagens orbitais com sensores passivos desde a década de 1980. A análise temporal da voçoroca, mediante processamento de imagens orbitais de sensores passivos, deu-se por meio dos produtos fornecidos pelos satélites Landsat 5 e Landsat 8. Embora componham a mesma série, os satélites de monitoramento passivo utilizados não possuem o mesmo tipo de sensor. No Landsat 5, foi utilizado o sensor TM (*Thematic Mapper*), enquanto no Landsat 8, foi utilizado o OLI (*Operational Land Imager*). O primeiro utiliza a técnica *Wiskbroom*, e o segundo utiliza a técnica *Pushbroom*, a qual não executa basculamento, durante o imageamento, o que permitiu diminuição no erro de posicionamento (Kalaf *et al.*, 2013).

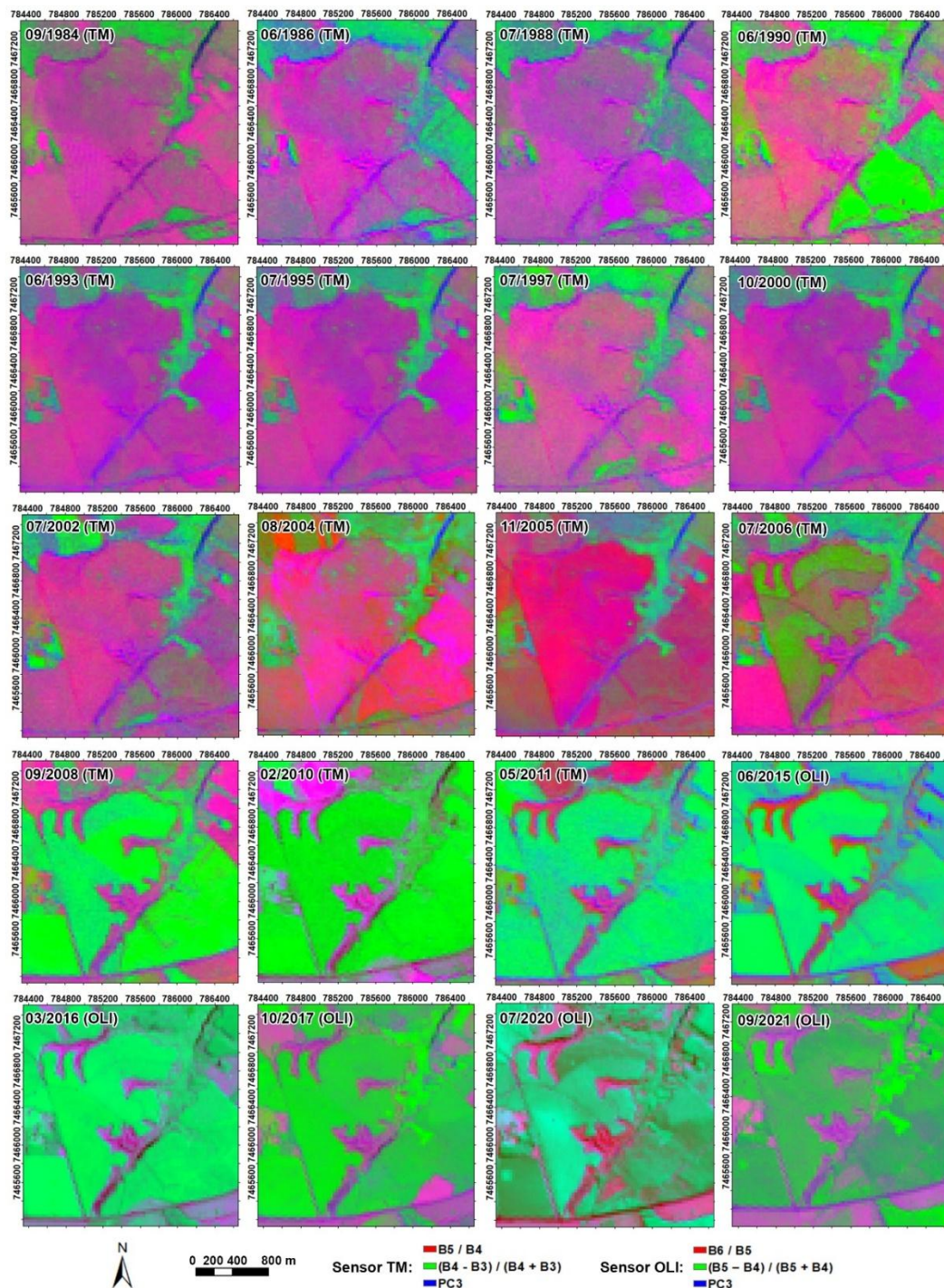
As cenas do satélite Landsat 5, sensor TM (*Thematic Mapper*) e do satélite Landsat 8, sensor OLI (*Operational Land Imager*) foram obtidos para a órbita 220, ponto 76, com resolução espacial de 30 metros. A resolução radiométrica foi de 8 bits no sensor TM e 12bits no OLI. As imagens foram adquiridas na plataforma do INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, em 20 épocas distintas, de 1984 a 2021. A fim de se destacar a evolução da vegetação, foi utilizado o Índice de Vegetação por Diferença Normalizada ($NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$). Para se destacar a drenagem, foi empregada a análise por principais componentes com as bandas azul, verde, vermelho e infravermelho próximo (*Near Infrared* – NIR), com a componente principal 3 (PC3), destacando a drenagem com a maior eficiência. Tal análise determina a correlação existente entre duas ou mais bandas por remoção da redundância dos dados multiespectrais (Sousa *et al.*, 2011).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Levando em consideração a curva espectral do solo da voçoroca estudada, as imagens analisadas dos sensores TM e OLI, datadas de 1984, 1986, 1988, 1990, 1993, 1995, 1997, 2000, 2002, 2004, 2005, 2006, 2008, 2010, 2011, 2015, 2016, 2017, 2020 e 2021, é possível identificar que a região apresenta mata ciliar (cor verde próxima à drenagem), com maior consolidação a partir do ano de 1990, predomínio solo exposto até 2005 (cor magenta) e, em 2006, o surgimento de áreas cobertas por cultura de eucalipto (cor verde uniforme). A cultura de eucalipto se consolida a partir de 2008. Desde então há uma estabilização geral no avanço da erosão (Figura 8). Tal fato é corroborado por diversos autores, como Bastola *et al.* (2018), que discutem a ideia da revegetação, como um método útil para retardar a progressão de voçorocas. As raízes dos eucaliptos ajudam a estabilizar os taludes adjacentes da voçoroca, além de contribuir com o escoamento de águas superficiais, mitigando os processos erosivos no solo.

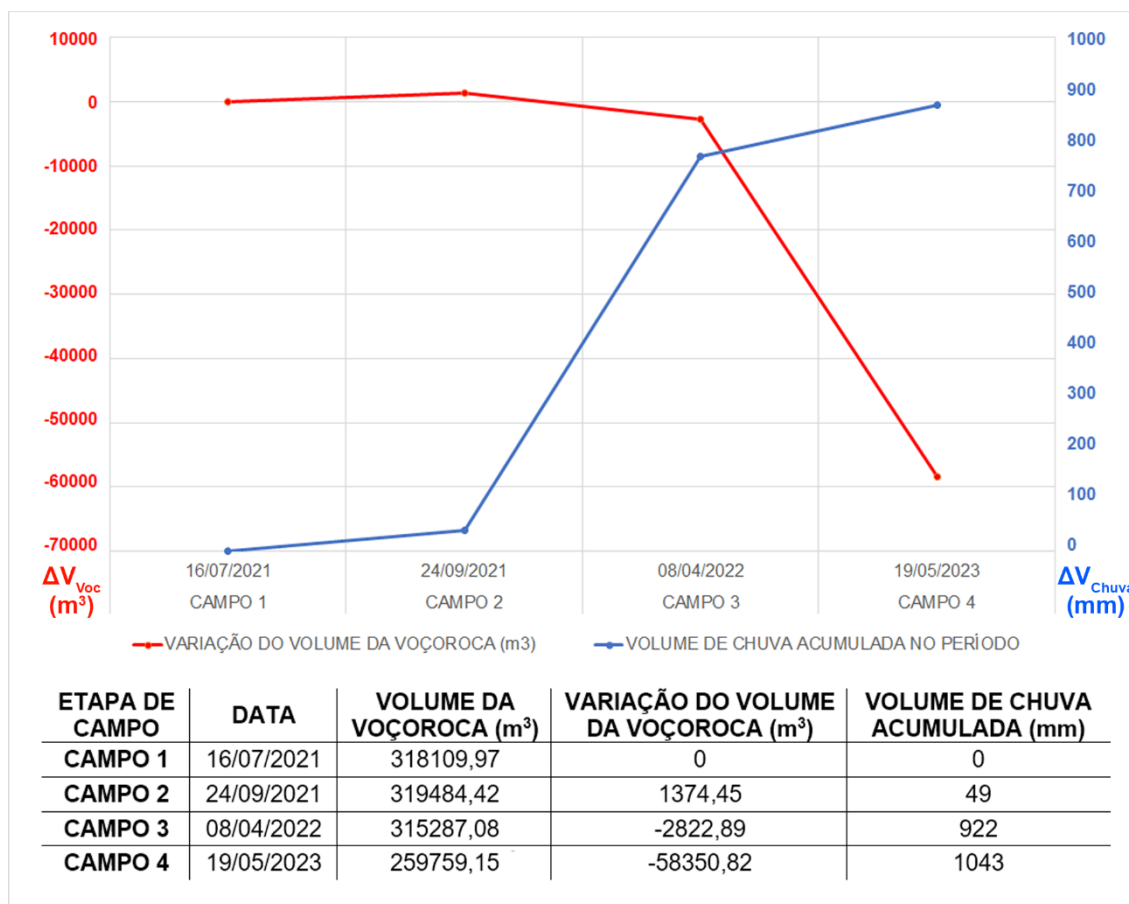
O volume total e a variação do volume da voçoroca entre os períodos analisados, bem como o volume de chuva acumulado precipitado entre os intervalos das aquisições mostraram que houve variações no volume da erosão ao longo do tempo. Entre a primeira e a segunda etapa de campo, houve um aumento no volume da erosão de aproximadamente 1.300 m³ (equivalente ao volume transportado por 44 caminhões, considerando que 1(um) caminhão transporta, em média, 30 m³). Nesse mesmo intervalo, houve uma precipitação acumulada de 49 mm de chuva (Figura 9).

Figura 8 - Evolução temporal da área de estudo segundo imagens do sensor TM (de 1984 a 2011) e do sensor OLI (2011 a 2021). O padrão RGB indica, em vermelho, a relação SWIR1/NIR, representando áreas de solo exposto; em verde, o NDVI, associado à cobertura vegetal; e, em azul, a componente principal 3 (PC3) obtida pela correlação das bandas do visível e do NIR, realçando a drenagem e, em parte, exposição de solo



Fonte: Extraído de Garbelini, 2021.

Figura 9 - Resumo da evolução da voçoroca ao longo das etapas de campo



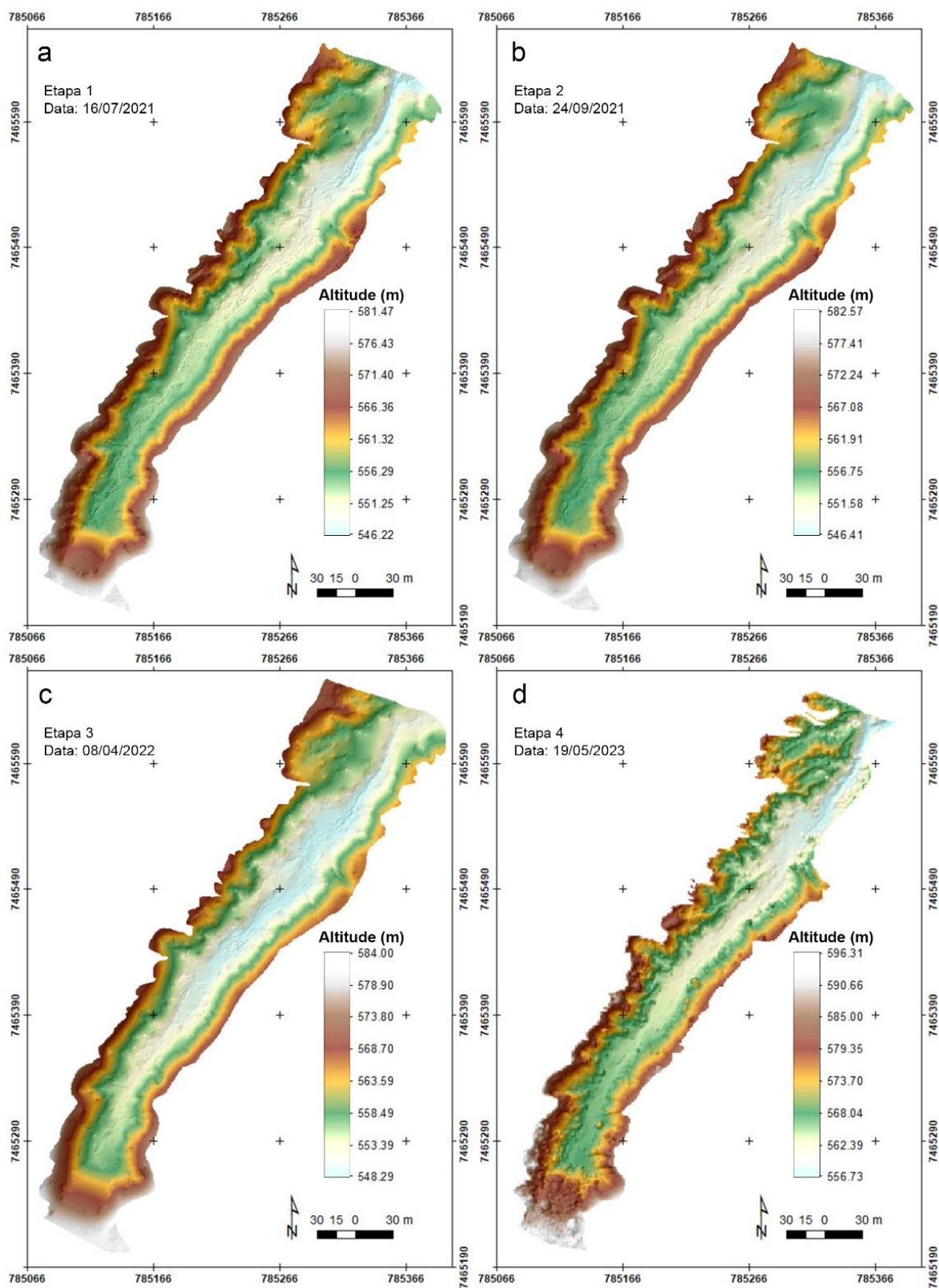
Fonte: Os autores, 2024.

Já entre a segunda e a terceira etapa de campo, houve uma redução de aproximadamente 4.200 m³ no volume da voçoroca (equivalente ao volume transportado por 140 caminhões). Nesse período, a precipitação acumulada foi de 922 mm de chuva. Entre a terceira e quarta etapas de campo, houve um acumulado de chuva de 1.043 mm na região. Nesse período, o volume calculado para a voçoroca diminuiu aproximadamente 18% (Figuras 10 e 11).

Entre os campos 1 e 2, em detrimento da pouca chuva precipitada, houve um aumento do volume da erosão. Tal condição deve ter sido gerada pela potencialização dos processos erosivos causados, principalmente, pela ação do lençol freático, que aflora na base da voçoroca. A transição entre o período seco e úmido constitui-se, em uma época significativa, para evolução de feições erosivas, a despeito do pequeno volume precipitado (Mendes, 1993). A mesma autora pontua que os solos podem apresentar gretas de ressecamento, durante os períodos de seca, fator que contribui para a fragmentação do pacote de solo e a maior friabilidade do material. Nesses casos, o pouco volume de chuva penetrando nas gretas causa um avanço da erosão.

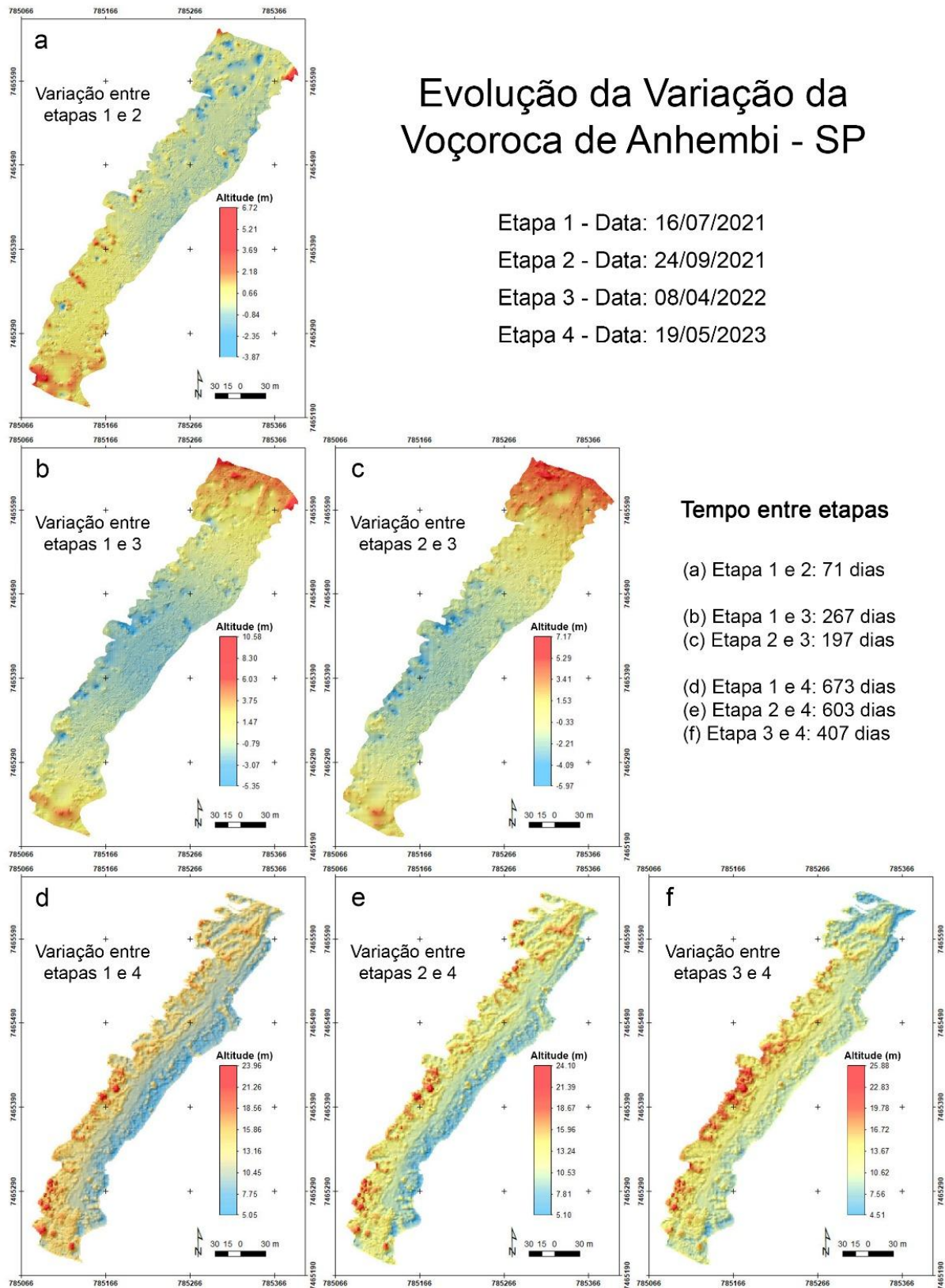
Já entre os campos 2 e 3, houve uma redução no volume da erosão, em detrimento do grande volume de chuva precipitado. Esse fato diverge de Valentin, Poesen e Li (2005), que correlacionam eventos chuvosos intensos com a evolução de voçorocas. Nesse caso, a principal hipótese considerada é que as águas da chuva trouxeram sedimentos externos ao sistema da voçoroca, cuja taxa de sedimentação superou a taxa de erosão. A constatação que os sedimentos depositados são "externos" ao sistema é que a morfologia das paredes e bordas da voçoroca se mantiveram praticamente inalteradas ao longo dos levantamentos. Além disso, mecanismos de drenagens existentes na rodovia a montante da voçoroca podem ter auxiliado na captação de sedimentos e no consequente assoreamento da cavidade.

Figura 10 - (a) MDT da etapa 1; (b) MDT da etapa 2; (c) MDT da etapa 3; (d) MDT da etapa 4



Fonte: Os autores, 2024.

Figura 11 - (a) Variação de Cota entre as etapas de campo 1 e 2; (b) Variação de Cota entre as etapas de campo 1 e 3; (c) Variação de Cota entre as etapas de campo 2 e v3; (d) Variação de Cota entre as etapas de campo 1 e 4; (e) Variação de Cota entre as etapas de campo 2 e 4; (f) Variação de Cota entre as etapas de campo 3 e 4



Fonte: Os autores, 2024.

Entre as etapas de campo 3 e 4 houve uma significativa variação, no volume calculado da erosão, divergindo de Amorim *et al.* (2001) e Valentin, Poesen e Li (2005) que afirmam que há intensificação da erosão após períodos chuvosos. Esses resultados mostram que uma análise ampla e temporal, utilizando imagens ópticas de alta definição, é fundamental, para se entender a dinâmica dos processos erosivos, que podem variar de local para local de acordo com características de uso e ocupação do solo. Foi possível observar que o aporte de sedimentos, durante os 13 meses entre a terceira e quarta etapas de campo, foram substancialmente maiores, se comparado aos intervalos entre campos anteriores. Esse aporte, além de advir das margens e adjacências da voçoroca, é potencializado pelos mecanismos de drenagem de águas pluviais da rodovia SP-147 que tangencia a erosão. Toda a água captada neste trecho da SP-050 é escoada diretamente para a cabeceira da erosão (Figura 12). Juntamente com a água captada e depositada diretamente na voçoroca, um grande volume de sedimentos também é transportado, para o interior da cavidade, fazendo com que o volume da feição erosiva diminua.

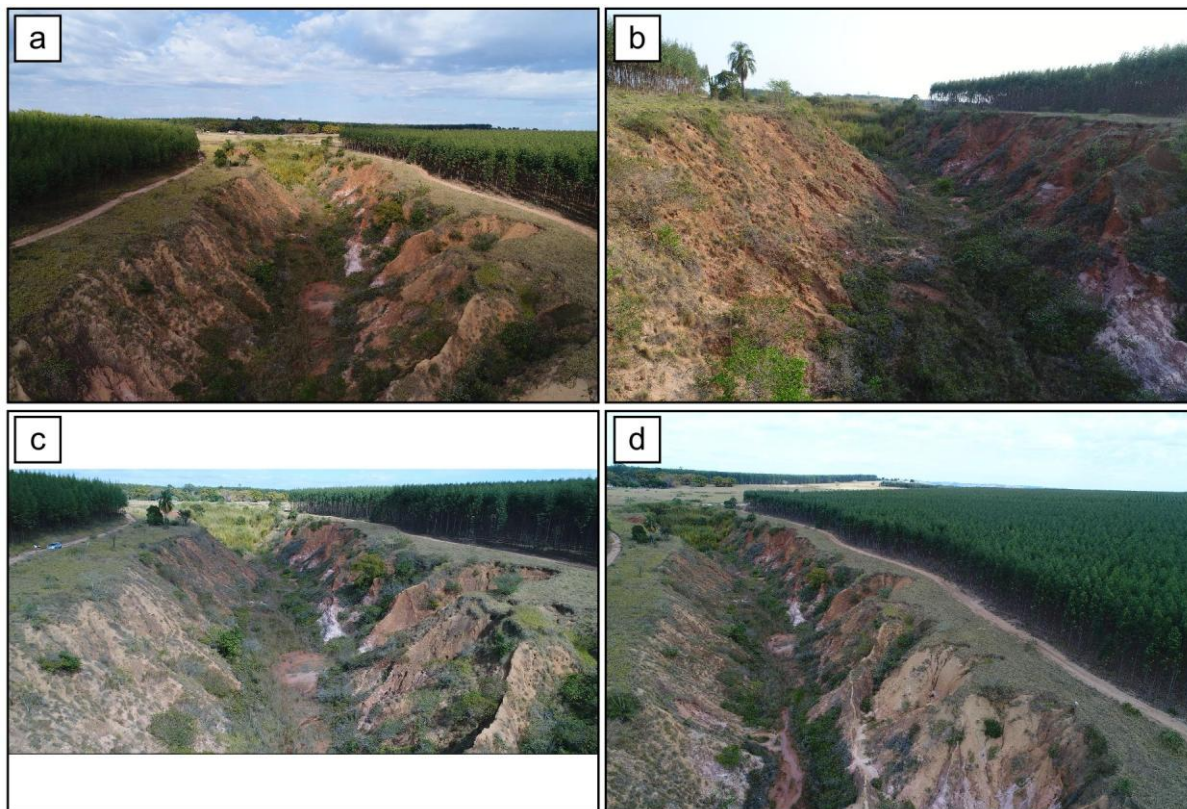
Figura 12 - Captação de águas pluviais da Rodovia SP-147 lançando-as na cabeceira da voçoroca



Fonte: Os autores, 2024.

Além do aporte de sedimentos no canal da voçoroca, durante o período entre as etapas de Campos 3 e 4, a relevante diferença no cálculo do volume entre os levantamentos pode ter sido potencializada pela vegetação, que, no período dos levantamentos do Campo 4, estavam mais proeminentes, se comparado a etapas de campo anteriores. A Figura 13 representa um panorama visual da voçoroca em cada um dos levantamentos de campo. Apesar de se trabalhar com MDTs, a filtragem da nuvem de pontos e consequente eliminação da vegetação pode ter sofrido influência do grande volume de vegetação presente na voçoroca nesse período.

Figura 13 - Fotografias das respectivas etapas de campo: (a) etapa 1; (b) etapa 2; (c) etapa 3; (d) etapa 4.



Fonte: Os autores, 2024.

CONCLUSÕES

A utilização de geotecnologias, em especial os VANTs, têm se mostrado fundamentais para a compreensão e mitigação de desastres de natureza geo-hidrológica. A utilização da metodologia SfM, utilizada em vários levantamentos aerofotogramétricos, em diferentes épocas do ano, numa mesma voçoroca, permitiu o entendimento da sua evolução, correlacionando-o com fatores como precipitação entre os levantamentos, geologia, geomorfologia e uso e ocupação do solo. A região de estudo é naturalmente suscetível a processos erosivos, uma vez que o Alto Estrutural Anhembi expõe camadas rochosas mais profundas, potencializando a ocorrência de processos erosivos.

A partir da análise de caráter regional, utilizando sensores orbitais passivos, pôde-se observar que a introdução da cultura de eucalipto, nos arredores da voçoroca ajudou a estabilizar a erosão em pequena escala. Essa conclusão foi possível pela análise das imagens temporais da região onde está instalada a erosão. Em escala mais local, os levantamentos com VANTs, junto à técnica SfM, permitiram a estimativa do volume da voçoroca, ao longo de três anos, monitorando em detalhe a evolução da voçoroca.

A voçoroca praticamente não apresentou variações morfológicas de larga escala, no período analisado, sugerindo estabilidade no processo. Em termos de variações volumétricas, houve diminuição do volume, em períodos com elevada precipitação, o que sugere que o volume de sedimentos e materiais externos à voçoroca foi superior ao volume de sedimentos e materiais carreados para fora da voçoroca no período.

Entre as etapas de campo 3 e 4, o volume da erosão diminuiu significativamente. Essa diminuição, na ordem de 18%, coincide com o maior volume de chuva registrado entre os períodos de campos realizados. Outro fator que pode ter contribuído, para a diminuição significativa de volume da voçoroca, pode ser em virtude do crescimento da vegetação no período. Esse crescimento é coerente com o deslocamento temporal entre o aumento das chuvas seguido pela redução do volume da voçoroca (Figura 9). Apesar dos cálculos terem sido feitos, utilizando MDTs que, em tese, suprime do modelo a vegetação e outros ruídos, a filtragem da nuvem de pontos pode não ter sido tão eficiente, para esse caso.

A utilização de geotecnologias, em especial de VANTs para análise e compreensão do comportamento de

voçorocas, mostrou-se bastante eficiente e prática, podendo ser uma ferramenta importante para os agentes públicos trabalharem, na mitigação de danos causados por esses processos, de modo que, conhecendo os padrões e comportamentos de uma determinada feição erosiva, pode se agir preventivamente a fim de evitar danos e perdas.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, R. S. S.; SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F.; MATOS, A. T. Influência da declividade do solo e da energia cinética de chuvas simuladas no processo de erosão entre sulcos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, p. 124-130, 2001. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662001000100023>
- ARAUJO, C. C. de. **Gênese das ocorrências de arenito asfáltico da borda leste da Bacia do Paraná, SP**. Tese (Doutorado em Geologia Sedimentar) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. 135p. <https://doi.org/10.11606/T.44.2003.tde-27102015-141633>
- BASTOLA, S.; DIALYNAS Y. G.; BRAS, R. L.; NOTO, L. V.; ISTANBULLUOGLU, E. The role of vegetation on gully erosion stabilization at a severely degraded landscape: a case study from Calhoun Experimental Critical Zone Observatory. **Geomorphology**, v. 308, p. 25–39, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.12.032>
- BECKER, C.; ROSINSKAYA, E.; HÄNI, N.; D'ANGELO, E.; STRECHA, C. Classification of Aerial Photogrammetric 3D Point Clouds. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 84, n. 5, p. 287-295, 2018. <https://doi.org/10.14358/PERS.84.5.287>
- CAETANO-CHANG, M. R.; WU, F. T. As formações Pirambóia e Botucatu no Estado de São Paulo. In: IV SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO SUDESTE, 1995, São Pedro. **Atas do IV Simpósio**, São Pedro, 1995, p. 64.
- CARRIVICK, J. L.; SMITH, M. W.; QUINCEY, D. J. **Structure from Motion in the Geosciences**. 1ª Ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2016. 208p. <https://doi.org/10.1002/9781118895818>
- CAVALLARO, F. de A. **Investigação Geofísica do Alto Estrutural de Anhembi-SP**. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. <https://doi.org/10.11606/T.44.2013.tde-11022014-145456>
- CPRM – Serviço Geológico do Brasil. **Carta de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundação: município de Anhembi, SP**. CPRM, 2019. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/21477>
- DELLAERT, F.; SEITZ S.; THORPE C.; THRUN S. **Structure from Motion without Correspondence**. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. Proceedings v. 2, p. 557-564, 2000.
- D'OLEIRE-OLTMANN, S.; MARZOLFF, I.; PETER, K. D.; RIES, J. B. Unmanned Aerial Vehicle (UAV) for Monitoring Soil Erosion in Morocco. **Remote Sensing**, v. 4, n. 11, p. 3390-3416, 2012. <https://doi.org/10.3390/rs4113390>
- GARBELINI, L. **Aplicação de geotecnologias na caracterização de processos erosivos: estudo de uma voçoroca em Anhembi-SP**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2021. Disponível em: https://bdta.abcd.usp.br/directbitstream/18fa2ef6-2696-487a-8d15-40e4326aa9a4/MONOGRAFIA_CORRIGIDA_GARBELINI_2021.pdf
- GARRITANO, F.; GUERRA, A. J. T.; AUGUSTINEFULLEN, M. Unmanned Aerial Vehicle for monitoring gully erosion in Rio de Janeiro State. In: EUROPEAN GEOSCIENCES UNION GENERAL ASSEMBLY, 2019, Viena. **Geophysical Research Abstracts - EGU 2019**. Viena: European Geosciences Union, 2019. v. 21.
- GOOGLE SATELITE. Google Maps, 2015. <https://www.google.com.br/maps/preview>
- GUERRA, A. J. T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A.; BOTELHO, R.G.M. (organização). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações**. 3ª Ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2007. p. 17–340.

IBGE - Fundação Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Recomendações para Levantamentos Relativo Estático – GPS**. Rio de Janeiro: IBGE, 2008.

INCRA - Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária. **Manual Técnico de Posicionamento: georreferenciamento de imóveis rurais**. Brasília/DF: INCRA, 2013.

JULIAN, C.; NUNES, J. O. R. Uso de VANT e geoprocessamento para cálculo de solo erodido em voçoroca localizada no distrito de Amadeu Amaral. Marília/SP - Brasil. **Revista Brasileira De Geomorfologia**, v. 21, n. 4, p. 835-845, 2020. <https://doi.org/10.20502/rbg.v21i4.1818>

KALAF, R.; BRASILEIRO, R.; CARDOSO, P.V.; CRUZ, C.B.M. Landsat 8: Avanços para mapeamento em mesoescala. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOPROCESSAMENTO, 4., Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 2013.

MATOS, S. L. F. D. **O contato entre o Grupo Passa Dois e a Formação Pirambóia na borda da Bacia do Paraná no estado de São Paulo**. Dissertação (Mestrado em Sedimentologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1995. <https://doi.org/10.11606/D.44.1995.tde-22102015-141645>

MENDES, I. A. **A dinâmica erosiva do escoamento pluvial na bacia do córrego Lafon – Araçatuba – SP**. Tese (Doutorado em Geografia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. 171p.

MILANI, E. J.; RAMOS, V. A. Orogenias Paleozóicas no Domínio Sul-ocidental do Gondwana e os Ciclos de Subsidência da Bacia do Paraná. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 28, n. 4, p. 473-484, 1998. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.1998473484>

NIETHAMMER, U.; JAMES, M. R.; ROTHMUND, S.; TRAVELLETTI, J.; JOSWIG, M. UAV-based remote sensing of the Super-Sauze landslide: Evaluation and results. **Engineering Geology**, v. 128, p. 2-11, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.03.012>

PETRI, S.; FÚLFARO, V. J. **Geologia do Brasil**. São Paulo: T. A. Queiroz, 1983. 631 p.

POESEN, J. Soil Erosion in the Anthropocene: Research Needs. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 43, n. 1, p. 64–84, 2018. <https://doi.org/10.1002/esp.4250>

SAAD A. R. **Estratigrafia do subgrupo Itararé no Centro Sul do Estado de São Paulo**. Dissertação (mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1977. <https://doi.org/10.11606/D.44.1977.tde-12082015-153523>

SELBY, M. J. **Earth's changing surface: an introduction to geomorphology**. 5. ed. Oxford: Oxford University Press, 1991.

SHIN, Y. H.; LEE, D. C. True Orthoimage Generation Using Airborne LiDAR Data with Generative Adversarial Network-Based Deep Learning Model. **Journal of Sensors**, v. 2021, n. 1, 2021. <https://doi.org/10.1155/2021/4304548>

SOARES, P. C.; ROSTIROLLA, S. P.; FERREIRA, F. J. F.; STEVANATO, R. O alto estrutural Pitanga-Quatiguá-Jacutinga na Bacia do Paraná: uma estrutura litosférica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 39, 1996, Salvador. **Anais...** Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia, 1996. P. 411-414.

SOUSA, A. M.; MESQUITA, P.; GONÇALVES, A. C.; MARQUES DA SILVA, J. R.; SILVA, L. L. Detecção de vegetação arbórea através de segmentação e classificação orientada a objecto de imagens multiespectrais de alta resolução (Quickbird). In: CONGRESSO IBÉRICO DE AGRO-ENGENHARIA, 4., **Anais...** Universidade de Évora, Portugal. 2011. <http://hdl.handle.net/10174/2807>

TAHAR, K. N.; AHMAD, A.; AKIB, W. A. A. W. M. **Unmanned aerial vehicle technology for low cost landslide mapping**. In: 11TH SOUTHEAST ASIAN SURVEY CONGRESS AND 13TH INTERNATIONAL SURVEYORS' CONGRESS INNOVATION TOWARDS SUSTAINABILITY, Kuala Lumpur, 2011.

THEIA VISION LIBRARY. **Structure from Motion (SfM)**. Disponível em: <http://theia-sfm.org/sfm.html>. Acesso em: 28 set. 2024.

TURNER, D.; LUCIEER, A.; DE JONG, S. M. Time Series Analysis of Landslide Dynamics Using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV). **Remote Sensing**, v. 7, n. 2, p. 1736-1757, 2015. <https://doi.org/10.3390/rs70201736>

VALENTIN, C.; POESEN, J.; LI, Y. Gully erosion: Impacts, factors and control. **Catena**, v. 63, n. 2-3, p. 132-153, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2005.06.001>

VIANA, C. D.; GROHMANN, C. H.; BUSARELLO, M. D. S. T.; GARCIA, G. P. B. Structural analysis of clastic dikes using Structure from Motion - Multi-View Stereo: a case-study in the Paraná Basin, southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 48, n. 4, p. 839-852, 2018. <https://doi.org/10.1590/2317-4889201800201898>

VIANA, C. D. **Análise estrutural de descontinuidades baseada em técnicas de structure from motion: aplicação em mina a céu aberto**. Dissertação (Mestrado em Geotectônica) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015. <https://doi.org/10.11606/D.44.2015.tde-08072015-150656>

WARRICK, J.; RITCHIE, A.; ADELMAN, G.; ADELMAN, K.; LIMBER, P. W. New Techniques to Measure Cliff Change from Historical Oblique Aerial Photographs and Structure-from-Motion Photogrammetry. **Journal of Coastal Research**, v. 33, n. 1, p. 39–55, 2017. <https://doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-16-00095.1>

Recebido em: 06/11/2024

Aceito para publicação em: 23/01/2025