

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Análise temporal de escorregamentos em São Sebastião - SP: Aplicação da técnica
de Structure from Motion - Multi View Stereo**

LAURA SELVATI DO PATROCINIO JUSTINIANO

Monografia apresentada para a disciplina
0440500 - Trabalho de Formatura (2024)
sob orientação de

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique
Grohmann de Carvalho

Nº TF-24/31

São Paulo
2024

À minha Vovó, que está cuidando de mim do céu.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, minha profunda gratidão à minha família: à minha mãe, Patrícia, ao meu pai, Sebastião, aos meus irmãos, Pedro e Bruno, ao meu avô, Ivalci, e aos meus tios, Paulo e Ivete. Mesmo à distância, vocês estiveram sempre presentes ao meu lado, me apoiando incondicionalmente ao longo desses anos. Suas palavras de incentivo e carinho me deram força nos momentos difíceis e foram essenciais para cada passo desta jornada.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Carlos Grohmann (Guano), pelo apoio durante este ano e por ter me recebido com um projeto incrível, em que senti que realmente poderia fazer alguma diferença.

Às minhas melhores amigas em São Paulo, Namaria e Bau, muito obrigada por essa trajetória que traçamos juntas desde que saímos do interior e chegamos em São Paulo, em 2019, por terem me apoiado, dado sermões e estarem sempre por perto quando eu preciso e surto (mesmo eu ficando bicuda). Menção honrosa à Luna Horta, Luísa Porta, Merlin, Naná e Nina, por serem animais que estão sempre por perto para dar apoio emocional.

Aos meus amigos, Pre, Yoshi, Igor, Mika, Chorão, Porteira e Armando, que, embora eu tenha conhecido alguns e ficado próxima só este ano, fizeram parte da minha graduação, do meu dia a dia no IGc e da minha vida.

Ao Igor, Denner, Fábio, Manolo e aos Gnomos, por tornarem meus dias mais leves, e por terem me dado a oportunidade de eu me encontrar como geóloga.

Ao Clube de Regatas do Flamengo, por ter conquistado 13 títulos no período em que estive na graduação.

Ao Vi, por estar comigo nesses cinco anos, escutando minhas reclamações e as coisas de geologia que não faziam sentido nenhum para você. Por ter feito meus dias antes cinzentos, dourados. Por ter feito tudo que podia por mim e por estar ao meu lado, mesmo sem concordar.

*“A ciência, meu rapaz, é feita de erros, mas de erros que
é bom cometer, pois levam, pouco a pouco, à verdade.”*

Viagem ao Centro da Terra, Jules Verne

RESUMO

Escorregamentos são movimentos de massa altamente destrutivos, que causam grandes danos materiais e perdas de vidas, sendo frequentes na Serra do Mar devido a fatores físicos como alta declividade, intemperismo e alta pluviosidade, além da influência da vegetação e do uso e ocupação do solo. O evento extremo ocorrido em fevereiro de 2023 provocou significativas mudanças na paisagem e diversos danos, revelando a necessidade de monitoramento contínuo para mitigação de riscos. Métodos de fotogrametria digital, como o *Structure from Motion - Multi View Stereo* (SfM-MVS), surgem como ferramentas eficientes para a prevenção de riscos geológicos e para o monitoramento da evolução de escorregamentos.

Este trabalho tem como objetivo analisar a evolução espacial dos escorregamentos no Morro da Baleia, município de São Sebastião - SP, a partir de dados obtidos em 2023 e 2024, utilizando o método SfM-MVS. Foram gerados produtos individuais para cada ano, incluindo Modelos Digitais de Elevação, Ortomosaicos e Malha Poligonal, derivados das nuvens densas de pontos criadas pelo método aplicado. A análise quantitativa das modificações na superfície foi realizada a partir da medição das distâncias entre as nuvens de pontos dos dois períodos. Os resultados indicam que as áreas impactadas pelas fortes chuvas sofreram mudanças significativas, observando-se medidas de mitigação, como o reflorestamento dos escorregamentos com solo exposto, e a ocorrência de novas movimentações de massa. Este estudo contribui para o monitoramento das áreas suscetíveis a escorregamentos, revalidando a importância das técnicas de fotogrametria digital para o monitoramento e a prevenção de riscos geológicos.

Palavras-chave: Fotogrametria Digital, *Structure from Motion - Multiview Stereo*, Monitoramento, Deslizamentos, Serra do Mar

ABSTRACT

Landslides are highly destructive mass movements that cause extensive material damage and loss of life, occurring frequently in the Serra do Mar region due to physical factors such as steep slopes, weathering, and high rainfall, as well as the influence of vegetation and land use. The extreme event that occurred in February 2023 triggered significant landscape changes and various damages, underscoring the need for continuous monitoring to mitigate risks. Digital photogrammetry methods, such as Structure from Motion - Multi View Stereo (SfM-MVS), have emerged as efficient tools for geological risk prevention and landslide evolution monitoring.

This study aims to analyze the spatial evolution of landslides on Morro da Baleia, in São Sebastião, SP, using data collected in 2023 and 2024 with the SfM-MVS method. Individual products were generated for each year, including Digital Elevation Models, Orthomosaics, and Meshes derived from the dense point clouds created by the applied method. Quantitative surface modification analysis was performed by measuring the distances between point clouds of both periods. The results indicate that areas impacted by heavy rains have undergone significant changes, with mitigation measures, such as reforestation of landslide areas with exposed soil, and the occurrence of new mass movements being observed. This study contributes to monitoring susceptible landslide areas, reaffirming the importance of digital photogrammetry techniques for monitoring and preventing geological risks.

Key words: Digital Photogrammetry, Structure from Motion - Multiview Stereo, Monitoring, Landslides, Serra do Mar

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS.....	3
2.1. Objetivos Gerais	3
2.2. Objetivos Específicos	3
3. EMBASAMENTO TEÓRICO.....	3
3.1. Área de Estudo	3
3.2. Movimentos de Massa.....	5
3.3. Fotogrametria Digital.....	6
4. MATERIAIS E MÉTODOS;.....	8
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	11
5.1. Ano de 2023	12
5.2. Ano de 2024	14
5.3. Análise temporal entre os modelos	16
6. CONCLUSÕES.....	29
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização, área de estudos localizada dentro do polígono vermelho.	1
Figura 2 - Morro da Baleia antes do desastre em 2023. Fonte: Google Earth Pro.....	2
Figura 3 -- Morro da Baleia após o desastre em 2023. Fonte: Google Earth Pro.....	2
Figura 4 - (A) Distribuição espacial dos deslizamentos rasos (coroas) (B) Distribuição dos pontos (coroas) e polígonos (áreas afetadas pelos deslizamentos) na região de estudo. Adaptado de Coelho et al., 2024.....	3
Figura 5 - Mapa geomorfológico da área de estudo.	4
Figura 6 - Fluxograma das etapas do processamento por SfM-MVS. Adaptado de Viana (2021).	8
Figura 7 - Deslizamentos notáveis que serão detalhados neste trabalho.	11
Figura 8 - (A) Nuvem esparsa colorida do ano de 2023. (B) Nuvem densa de pontos com cor sólida de 2023. (C) Nuvem densa de pontos colorida do ano de 2023 (D) Posicionamento das câmeras em relação a nuvem densa de pontos de 2023	12
Figura 9 - (A) Modelo poligonal com referência para o norte em visão nadir para o ano de 2023. (B) Modelo poligonal rotacionado para o ano de 2023.	13
Figura 10 - Ortomosaico do ano de 2023	13
Figura 11 - (A) Modelo digital de elevação do ano de 2023. (B) Modelo digital de elevação com curvas de nível do ano de 2023.	14
Figura 12 - (A) Nuvem esparsa colorida do ano de 2024. (B) Nuvem densa de pontos com cor sólida de 2024. (C) Nuvem densa de pontos colorida do ano de 2024. (D) Posicionamento das câmeras em relação a nuvem densa de pontos de 2024.	14
Figura 13 - (A) Modelo poligonal com referência para o norte em visão nadir para o ano de 2024. (B) Modelo poligonal rotacionado para o ano de 2024.	15
Figura 14 - Ortomosaico do ano de 2024.	15
Figura 15 - (A) Modelo digital de elevação do ano de 2024. (B) Modelo digital de elevação com curvas de nível do ano de 2024.	16
Figura 16 - Histograma original em que o eixo x apresenta a distância e o eixo y a quantidade de pontos. (A) Histograma original (B) Histograma restrinido.	17
Figura 17 - Modelo resultante do Cloud-Cloud entre os anos de 2023 e 2024.	17
Figura 18 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para o escorregamento 1. (C) Cloud-Cloud entre os anos.....	19
Figura 19 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para o escorregamento 2. (C) Cloud-Cloud entre os anos.....	20
Figura 20 – Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para a área de escorregamento 3. (C) Cloud-Cloud entre os anos.....	21

Figura 21 – Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para os deslizamentos da área 4. (C) Cloud-Cloud entre os anos.....	22
Figura 22 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para o escorregamento 5. (C) Cloud-Cloud entre os anos.....	23
Figura 23 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para o escorregamento 6. (C) Cloud-Cloud entre os anos.....	24
Figura 24 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para os escorregamentos das áreas 7 e 8. (C) Cloud-Cloud entre os anos.	25
Figura 25 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para o escorregamento 9. (C) Cloud-Cloud entre os anos.....	26
Figura 26 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para os escorregamentos 10, 11 e 12 e 14. (C) Cloud-Cloud entre os anos.	27
Figura 27 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para o escorregamento 2. (C) Cloud-Cloud entre os anos.....	28

1. INTRODUÇÃO

O contexto geológico-geomorfológico em que está inserido o município de São Sebastião, localizado no litoral norte do estado de São Paulo, influencia a ocorrência de escorregamentos, e métodos de fotogrametria digital - como o *Structure from Motion - Multi View Stereo* - podem ser aplicados na análise desses movimentos de massa para melhor compreensão de sua dinâmica. Este trabalho focará nos escorregamentos presentes no Morro da Baleia, dentro do polígono vermelho (Figura 1).

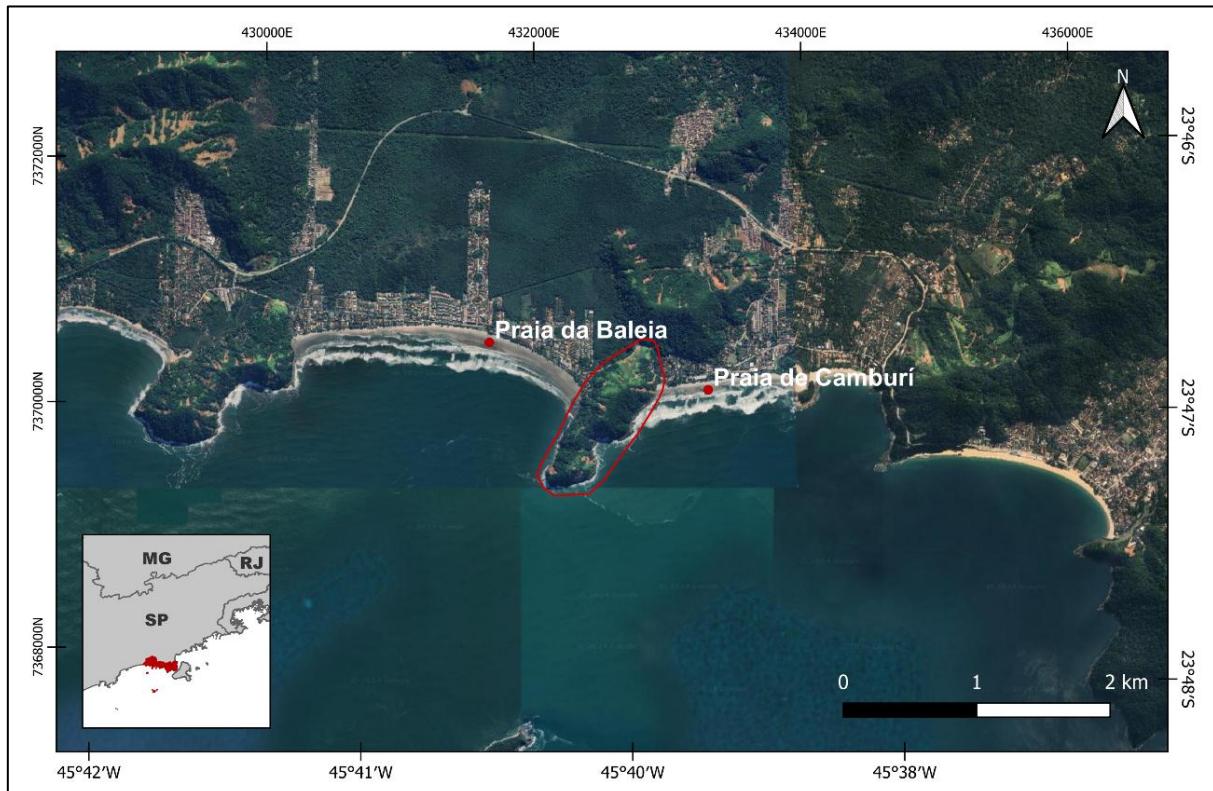


Figura 1 - Mapa de localização, área de estudos localizada dentro do polígono vermelho.

Escorregamentos são movimentos de massa com grande capacidade destrutiva, em quesitos de danos materiais e de vida, como no desastre ocorrido no município de São Sebastião no início de 2023, que choveu mais de 680mm em dois dias (Marengo et al., 2024), em que mais de 60 pessoas faleceram (G1, 2023), 40 desaparecidos e, aproximadamente, 1.730 desabrigadas (Agência Brasil, 2023). Esse evento extremo que ocorreu entre os dias 18 e 19 de fevereiro 2023, afetou diretamente o Morro da Baleia, visível ao comparar imagens de satélites entre 2022 – antes do desastre – e 2023 (Figura 2 e 3). Esses fenômenos são comuns na Serra do Mar, devido à combinação de fatores do meio físico, como alta declividade, intemperismo e alta pluviosidade, além da influência da vegetação e uso e ocupação da terra (Marengo et al., 2024).

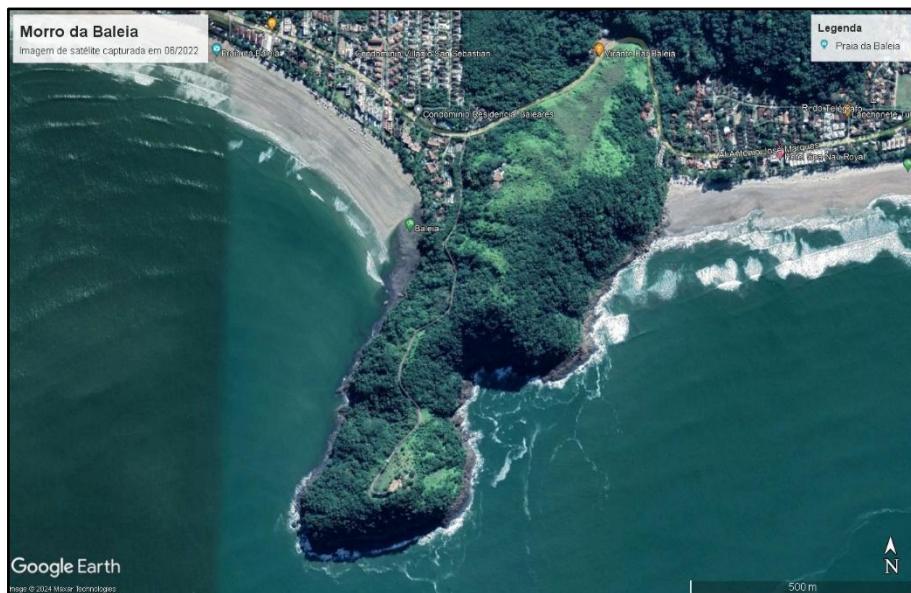


Figura 2 - Morro da Baleia antes do desastre em 2023. Fonte: Google Earth Pro

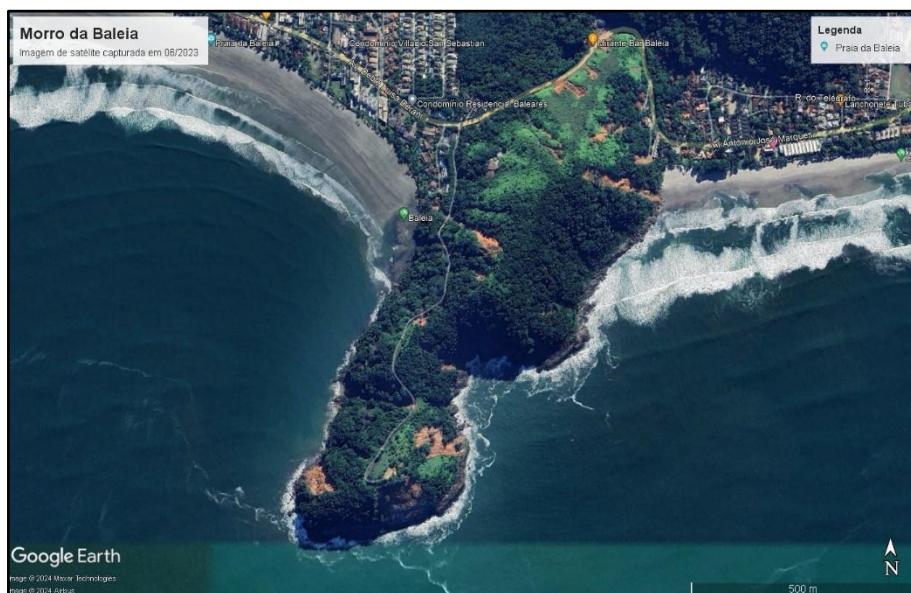


Figura 3 -- Morro da Baleia após o desastre em 2023. Fonte: Google Earth Pro

O *Structure from Motion - Multi View Stereo* (SfM-MVS) é uma técnica de fotogrametria digital, em que é possível gerar modelos tridimensionais do terreno a partir de dados coletados - fotografias - em 2D. Os produtos gerados são modelos digitais de elevação, de superfície e ortomosaicos. Atualmente, nas geociências, o método é utilizado na quantificação de propriedades, como volume, distâncias e altitudes, com aplicabilidade em desastres naturais, geologia estrutural, geomorfologia, recursos naturais, sedimentologia, sensoriamento remoto e vulcanologia (Viana, 2021).

Realizar uma modelagem tridimensional do escorregamento do Morro da Baleia pelo método de SfM-MVS para os anos de 2023 e 2024 permitirá uma comparação da topografia nessas datas, bem como uma quantificação de movimentações ocorridas no período, além do processo de restauração da área. Essas modelagens que serão geradas auxiliam a

prevenção ao risco geológico, em uma região que possui aspectos físicos que corroboram para a ocorrência de escorregamentos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivos Gerais

O objetivo principal é a análise espaço-temporal dos produtos gerados com a técnica de *Structure from Motion - Multi View Stereo* (nuvens de pontos 3D, ortomosaicos e modelos digitais de superfície) - através de dados obtidos com drone para o escorregamento de Morro da Baleia coletados em 2023 e 2024.

2.2. Objetivos Específicos

- Desenvolver nuvens densas e esparsas de pontos em 3D;
- Desenvolver diferentes representações tridimensionais de duas coletas de dados (2023-2024), como ortomosaicos e modelos digitais de superfície;
- Estimar as mudanças na topografia entre os anos, considerando a diferença relativa entre os conjuntos de dados, uma vez que os levantamentos não possuem posicionamento preciso com apoio de pontos de controle.

3. EMBASAMENTO TEÓRICO

3.1. Área de Estudo

A área de estudo está localizada no município de São Sebastião, no litoral norte paulista, sendo que a oeste está localizada a Praia da Baleia e a leste a Praia do Camburí. O Morro da Baleia (Figura 4) – foco deste estudo – possui cerca de 26 pontos de deslizamentos ao redor de sua encosta (Coelho et al., 2024).

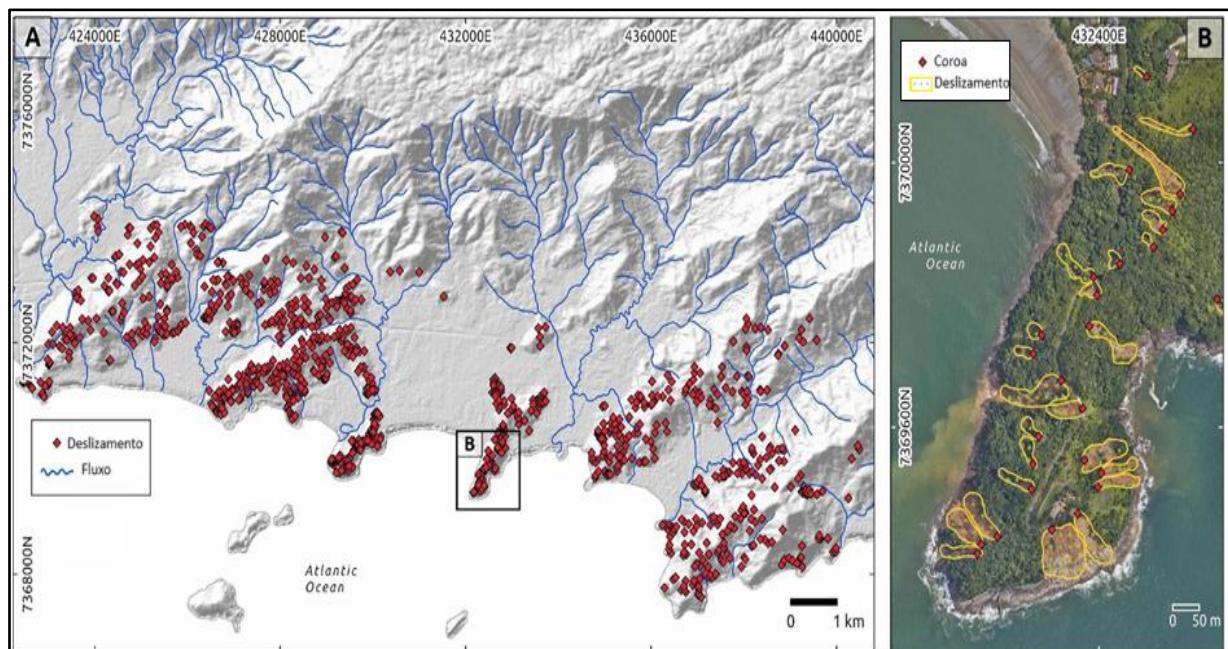


Figura 4 - (A) Distribuição espacial dos deslizamentos rasos (corrosões) (B) Distribuição dos pontos (corrosões) e polígonos (áreas afetadas pelos deslizamentos) na região de estudo. Adaptado de Coelho et al., 2024

O município de São Sebastião está presente na Província Costeira, que se divide em duas zonas geomorfológicas (Figura 5): as baixadas litorâneas - com as planícies costeiras descontínuas, no mapa sendo representado pelas porções amarelas - e a Serrania Costeira, presente na subzona Serra do Mar – no mapa como porções amarronzadas. A Serra do Mar é um conjunto de escarpas na borda oriental do Planalto Atlântico, que se estende de forma contínua do Estado do Rio de Janeiro ao norte do Estado de Santa Catarina (Almeida, 2018).

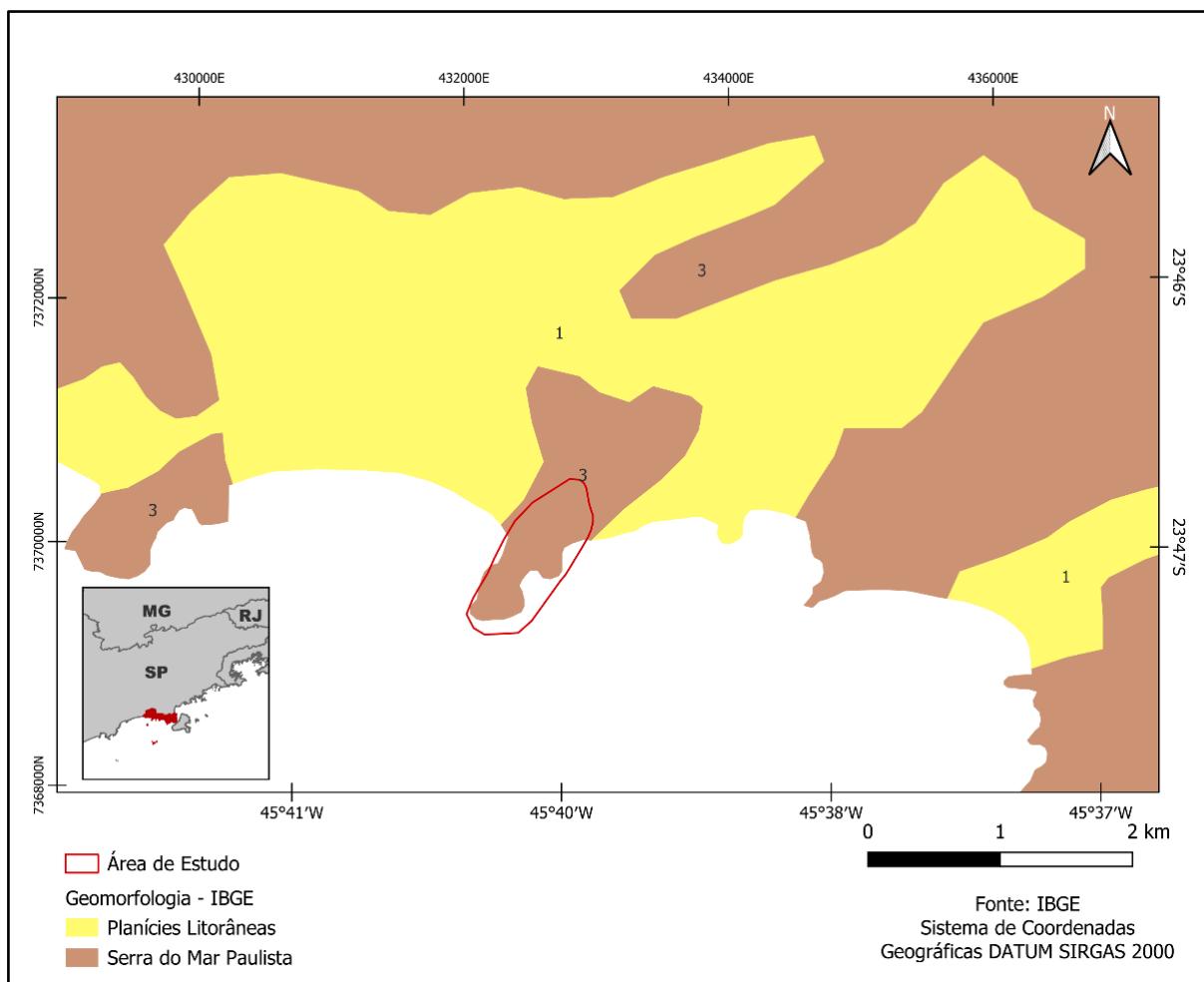


Figura 5 - Mapa geomorfológico da área de estudo.

A área de trabalho está inserida no contexto geotectônico da Faixa Ribeira, faixa móvel gerada entre a colagem do Cráton São Francisco e o Cráton do Rio de La Plata, durante o evento orogênico que formou parte do Supercontinente Gondwana (Brito Neves et al., 1991).

Apresenta rochas do embasamento cristalino, com graus diferentes de metamorfismo e rochas ígneas - granitos, granodioritos, sienitos e outras - muito fraturadas e bandadas (Ross, 2018). Estão presentes duas unidades geológicas principais: o Complexo Costeiro e as Coberturas Cenozoicas. O Complexo Costeiro tem idade Neoproterozóica, tendo como litotipo principal os migmatitos, além das rochas metamórficas de alto grau, de fácies granulito e anfibolito. A Cobertura Cenozoica é composta por depósitos recentes, como baixos terraços marinhos, mangues, aluviões e cordões arenosos - sedimentos oriundos do embasamento cristalino (Fúlfaro, 1974).

Pedologicamente, a região é caracterizada por Argissolos Amarelos, Argissolos Vermelho-Amarelos, Cambissolos Háplicos, Espodossolos Humilúvicos, Gleissolos Háplicos, Gleissolos Sálicos, Neossolos Flúvicos, Neossolos Litólicos, Neossolos Quartzarênicos e Organossolos Háplicos (Rossi, 2017).

A área possui clima tropical úmido, com altos índices pluviométricos. As ocorrências dos deslizamentos associam-se a grandes volumes de chuva. Os maiores índices pluviométricos são nos meses de janeiro e fevereiro (Marengo et al., 2024). A região de estudo é coberta por vegetação da Mata Atlântica, tendo feições características do relevo montanhoso, com grande biodiversidade. Entretanto, o pacote de solo não é muito desenvolvido, devido ao relevo acidentado (Santos, 2004).

A série de eventos de movimentação de massa que ocorreu em São Sebastião em 2023 está associada, principalmente, às chuvas intensas que atingiram a região entre os dias 18 e 19 de fevereiro (Marengo et al., 2024). Entretanto, a predisposição da área, considerando os fatores descritos, influenciou o desenvolvimento e evolução de deslizamentos.

3.2. Movimentos de Massa

Movimentos de massa são processos erosivos dinâmicos envolvendo materiais que repousam sobre as superfícies das vertentes ou encostas, como solos, rochas e vegetação, e através da ação da gravidade, deslocam-se (Guidicini et al., 1984). Apesar de fazerem parte da evolução geomorfológica em regiões serranas, alguns fatores aumentam a probabilidade de ocorrências, inclusive antrópicos, como o crescimento indiscriminado da população em áreas de risco, que consequentemente, se instalaram em habitações irregulares.

Os movimentos de massa são classificados de acordo com o material que sofreu deslocamento - seja ele rocha, solo, ou ambos -, velocidade e o mecanismo do movimento, o modo de deformação, a geometria da massa movimentada e o conteúdo de água (Fernandes et al., 1996). Escorregamentos são movimentos rápidos e em curtos períodos, em que o material presente no terreno possui um centro de gravidade que ocasiona um deslocamento para baixo e para fora do talude (Guidicini et al., 1984). Os principais tipos de movimentos de massa que ocorrem em encostas estão simplificados na Tabela 1, baseados em Highland (2008) e Tominaga (2005).

Tabela 1 - Principais tipos de movimentos de massa em encostas.

Processo	Material	Dinâmica
Quedas	Rocha ou solo	Movimentos repentinos, para baixo, que se desprendem de taludes íngremes ou de penhascos. Rolamento de matacão e tombamento
Escorregamento	Rocha ou solo	Ocorre sobre superfícies em ruptura ou sobre zonas relativamente finas

		com intensa deformação por cisalhamento
Corrida	Solo, lama ou detritos	Com velocidades médias a altas, mobiliza grandes volumes de material, com movimento semelhante ao de um líquido viscoso.
Rastejo	Solo, depósitos, rocha alterada/fraturada	Nome informal dado ao um fluxo lento de terra, constante, sazonal ou intermitente.

Esse processo é influenciado por diversos fatores, nomeados agentes predisponentes e efetivos. Os agentes predisponentes estão associados ao complexo geológico, morfológico, climático-hidrológico, gravidade, incidência solar e vegetação original, enquanto os agentes efetivos preparatórios são pluviosidade, erosão pela água ou vento, congelamento e degelo, variação de temperatura, dissolução química, ação de fontes e mananciais, oscilações dos níveis dos lagos, marés e lençóis freáticos, ação humana e de animais. Ainda, os agentes imediatos são chuva intensa, fusão de gelo e neve, erosão, terremotos, ondas, vento, ação do homem, entre outros (Guidicini et al., 1984).

A Serra do Mar possui um grande histórico de desastres relacionados a movimentos de terra, os movimentos mais comuns na região da Serra do Mar são escorregamentos rasos planares do regolito e de rochas, em áreas de áreas de inclinação média a alta (Vieira et al., 2015). Encostas florestadas podem se apresentar instáveis (De Ploey et al., 1974), além do avanço da urbanização em direção às montanhas, que pode agravar esses eventos (Vieira et al., 2015)

3.3. Fotogrametria Digital

Segundo o estatuto da *International Society of Photogrammetry and Remote Sensing* (ISPRS), fotogrametria é a ciência e tecnologia, em que é possível adquirir um dado confiável, muitas vezes através do tempo, de objetos e cenas utilizando imagens (ISPRS, 2024). A evolução da fotogrametria pode ser definida em quatro fases: fotogrametria pioneira (1840-1900), analógica (1901-1950), analítica (1951-1990) e digital (1990-atual). A fotogrametria apareceu pela primeira vez em 1840, momentos após o surgimento da fotografia, em que rapidamente foi incorporada na coleta de dados topográficos. Na primeira metade do século XIX, a utilização de fotografias analógicas associadas a aparelhos óptico-mecânicos facilitou o mapeamento de grandes áreas. Na fase seguinte, com os avanços tecnológicos, os computadores substituíram os aparelhos óptico-mecânico na restituição de fotografias reveladas (Coelho, 2007).

Atualmente, a fotogrametria digital, em que computadores processam imagens digitais e digitalizadas, tem como objetivo a reconstrução de um espaço tridimensional (espaço-objeto), a partir de imagens bidimensionais (espaço-imagem) (Viana, 2021). O fenômeno da

estereoscopia permite a visualização em três dimensões de cenas com imagens de superposição a partir de 50% de sobreposição (Coelho, 2007).

Estudos baseados em fotogrametria digital são difundidos nas geociências, aplicados predominantemente em superfícies que se modificam rapidamente como deslizamentos, rios entrelaçados, geleiras e escarpas costeiras (Caverrick et al., 2016).

Além disso, a técnica apresenta maior flexibilidade e facilidade de coleta e no processamento dos dados, ao comparar com os levantamentos feitos por *lidar* (*light detection and ranging*). Algumas vantagens notáveis são: possibilidade de obter diferentes resoluções espaciais, a facilidade por ser apenas uma câmera e possuir um baixo custo (Liao et al., 2021). A coleta dos dados é feita de forma simples, com uma câmera digital acoplada em diversas possibilidades de plataformas terrestres e aéreas, como tripé, drones, pipas e aeronaves (Viana, 2021). Apesar das diferentes plataformas em que a câmera pode ser acoplada, levantamentos aéreos permitem obter a melhor combinação de área coberta pela captura e diferentes resoluções.

Com os avanços tecnológicos, o conjunto de imagens obtido pode ser processado utilizando algoritmos que identificam pontos em comum entre elas. O *Structure from Motion* (SfM) é uma técnica da fotogrametria digital, introduzida por Ullman (1979), em que é possível estimar estruturas tridimensionais através de sequências de imagens bidimensionais, coletadas em diferentes pontos de vista (Carrivick et al., 2016). Ainda, segue alguns princípios da fotogrametria tradicional, em que requere imagens que mostram diversos pontos de vista e os pontos notáveis do objeto que precisam ser vistos em três ou mais imagens (Westoby et al., 2012).

O SfM-MVS é um fluxo de trabalho em que realiza a detecção de ponto-chaves no conjunto de imagem e gera uma correspondência entre eles, além de remover pontos-chave que podem estar geometricamente inconsistentes.

Ao longo do processamento, os dados iniciais passam por um algoritmo de inversão, e os pontos com baixa precisão são descartados, o que além de tornar os produtos gerados de alta qualidade, quantifica os erros automaticamente. Mantendo o princípio dos pontos notáveis da fotogrametria, a feição é identificada em cada imagem do conjunto, em que a posição é usada para calcular sua posição x, y, z em um espaço tridimensional.

Ao repetir essa operação em diversos pontos, é possível reconstruir a porção de interesse em um modelo 3D (Carrivick et al., 2016). Porém, o SfM gera um modelo dentro de um sistema de referência relativo, em que as coordenadas do modelo construído são arbitrárias, dependendo de pontos de controle com coordenadas conhecidas - chamados de *Ground Control Points* (GCP) - para estarem georreferenciadas (Westoby et al., 2012).

4. MATERIAIS E MÉTODOS;

Os dados primários deste trabalho foram imagens capturadas por drone do modelo DJI Phantom 4 Pro, com câmera de 20 MP, em maio de 2023 e abril de 2024, com espaçamento de aproximadamente um ano entre os registros. Os dois levantamentos foram realizados a partir de planos de voos automáticos e iguais para os anos. Os dados de 2023 foram processados a partir de 1131 imagens, enquanto isso os modelos de 2024 foram elaborados a partir de 857 imagens.

Para obter os produtos desejados, o processamento a partir da técnica SfM-MVS segue por algumas etapas que envolvem processamento, pós-processamento e geração dos produtos. O processamento de imagens segue três etapas: reconhecimento de pontos em comum, construção da nuvem esparsa, realizados pelo SfM, e o refinamento do modelo e geração de uma nuvem densa, realizado pelo MVS. O fluxograma (Figura 6) resume os estágios pelos quais o dado primário será submetido.

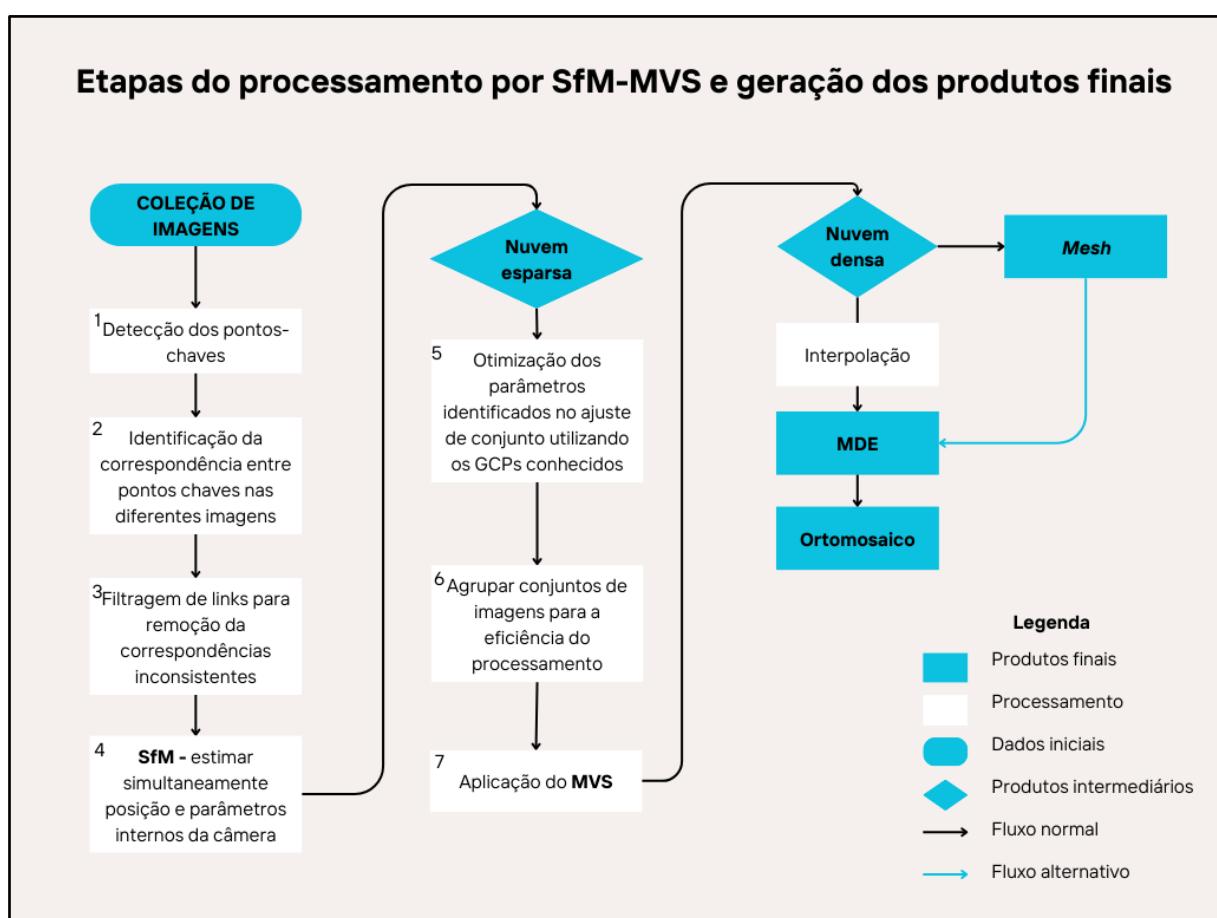


Figura 6 - Fluxograma das etapas do processamento por SfM-MVS. Adaptado de Viana (2021).

Segundo Carrivick et al. (2016) e sintetizado por Viana (2021), no fluxo normal de processamento, o primeiro passo é a determinação dos pontos-chave (1), importantes para que as imagens correspondam entre si. Em seguida, é realizada a comparação entre as

diferentes imagens do conjunto, identificando a correspondência entre esses pontos-chave (2).

O passo seguinte (3) tem como objetivo eliminar as imagens geometricamente inconsistentes, para que seja realizado o *Structure from Motion* (4). O algoritmo possui como entrada o conjunto de imagens e produz simultaneamente três produtos: um conjunto de pontos em 3D (nuvem esparsa), a pose (posição e orientação) e os parâmetros internos da câmera, através do ajuste de feixe.

Posteriormente, o georreferenciamento da nuvem de pontos é realizado. Os próximos passos (5 e 6) preparam as imagens para o algoritmo *Multi-View Stereo*, que são considerados opcionais, mas recomendados para um processamento mais simples e preciso (Viana, 2021). Pode-se utilizar os GCPs para gerar coordenadas em UTM e a decomposição do conjunto de imagens em subconjuntos que se sobreponham, para facilitar o processamento. Quando não emprega os GCPs, os modelos estão sujeitos à diferença de coordenadas XYZ, em que a diferença principal é observada no eixo Z – ou seja - na elevação (Grohmann et al., 2023). As etapas no sistema SfM-MVS finalizam com a geração da nuvem de pontos densa no algoritmo MVS (7).

No pós-processamento, a nuvem de pontos densa (que possui maior densidade de pontos e maior detalhamento da superfície em que está sendo realizado o estudo) é manipulada em programas de SIG (Sistemas de Informação Geográfica), seja para gerar modelos digitais de elevação ou uma malha poligonal (*mesh*) - geralmente uma malha triangular -, que pode receber textura. A malha poligonal é um produto versátil que pode ser utilizado para gerar modelos digitais de elevação, e consequentemente ortomosaicos (Over et al., 2021). Os ortomosaicos são desenvolvidos após as vistas oblíquas de regiões planas serem descartadas, recalculadas com base no modelo tridimensional ou do MDE (Modelo Digital de Elevação) (Carneiro et al., 2014).

Os softwares que foram aplicados são: Agisoft Metashape Profissional Versão 2.1.2. (Agisoft, 2024) e CloudCompare 2.14.alpha (CloudCompare, 2024), além do QGIS 3.34.9 'Prizren' (QGIS, 2024). O Metashape é um software mais amigável considerando suas funcionalidades e por não ser necessário softwares adicionais, ao realizar a reconstrução tridimensional da superfície em que o estudo foi executado. Ainda, suas funções incluem a classificação da nuvem de pontos, geração de modelos digitais de elevação (MDE), de ortomosaicos e processamento de imagens multiespectrais (Carrivick, 2016), entretanto é um software comercial. O CloudCompare foi utilizado para comparar as duas nuvens de pontos – de 2023 e 2024 -, porém ele possui outras funcionalidades como a manipulação geral dos pontos, como edições e operações nos modelos. Ele possui a vantagem de ser um software livre e ter diversos *plug-ins*. Em conjunto, o software QGIS, que possui vantagens por ser um programa livre e que foi utilizado na produção de mapas, georreferenciamento e análise espacial.

O processamento utilizando o Metashape consiste em três etapas principais: o alinhamento, o desenvolvimento da malha poligonal e o MDE, além da criação do ortomosaico. No primeiro momento, o *software* identifica pontos notáveis nas imagens e os corresponde entre diferentes imagens, formando os *tie points* – a nuvem esparsa. Além disso, o *software* determina a posição da câmera para cada imagem e ajusta os parâmetros de calibração da câmera, tanto internos quanto externos. Os resultados são apresentados na forma de uma nuvem de pontos esparsa e um conjunto de posições de câmeras. A nuvem esparsa de pontos é a base para a criação de mapas de profundidade baseados nos pares estereoscópicos. A segunda etapa consiste na criação de uma malha ou MDE, em que se pode aplicar uma textura na malha para uma representação mais fotorrealista da cena. A nuvem de pontos densa é gerada com base nas posições estimadas das câmeras e nas imagens, utilizando correspondência estereoscópica densa. A elaboração do MDE se o dado de entrada for a nuvem de pontos densa, ele pode incluir tanto o terreno quanto objetos acima do solo, como árvores e edifícios ou apenas o terreno. Por fim, a terceira e última etapa é a criação de um ortomosaico, que pode ser georreferenciado e utilizado como base para diversos tipos de mapas e para análises e vetorização em pós-processamento. O ortomosaico é elaborado a partir do MDE ou de uma malha (Agisoft, 2022).

No processamento no CloudCompare, é realizado o alinhamento dos modelos dos anos estudados, com a função *Align*. Como referência, é empregada a nuvem de pontos mais densa, com o objetivo de diminuir a variância presente entre os produtos, combinando dados de rotação, translação e escala, de modo a alinhar as nuvens sem distorções (Saunders, 2014). Como pontos de referência, é indicado o uso de pontos sem relação com as áreas instáveis, fora dos corpos de deslizamento, como telhados, piscinas e outras estruturas relativamente estáveis (Yordanov et al., 2022). A checagem da qualidade do alinhamento foi realizada visualmente.

Após esse alinhamento, foi executada a funcionalidade *cloud-cloud distance*, que permite calcular as distâncias entre duas nuvens de pontos, designando uma como "Nuvem Comparada" e a outra como "Nuvem de Referência". Para garantir a precisão dos resultados, a nuvem de referência deve ser selecionada visando a maior densidade de pontos (CloudCompare, 2015).

Os parâmetros de análise, que influenciam na precisão do resultado e na velocidade de processamento, são o nível do *octree* e a distância máxima. O nível do *octree* indica o grau de subdivisão de uma nuvem de pontos em uma estrutura tridimensional. Um nível mais alto cria células menores, aumentando a precisão da comparação, enquanto um nível mais baixo resulta em células maiores, acelerando o processamento, mas com menor precisão nas medições. Já a distância máxima é um parâmetro que limita a busca por correspondências entre pontos das duas nuvens. Se a distância entre um ponto da nuvem comparada e seu correspondente na nuvem de referência ultrapassar esse valor, o software utiliza um valor

substituto em vez de calcular a distância verdadeira (CloudCompare, 2015). Na aplicação da função, não foi habilitado a função de distância máxima e o nível do octree foram estabelecidos automaticamente pelo software para cada divisão do modelo. Após o cálculo, os resultados são visualizados em um campo escalar colorido, facilitando a análise das diferenças entre as nuvens (CloudCompare, 2015).

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A aplicação do SfM-MVS implica na geração de três produtos: os conjuntos de dados 3D, a pose da câmera e os parâmetros internos da câmera. As nuvens de pontos – esparsas e densas – podem ser manipuladas para gerar modelos tridimensionais, como Malhas (*mesh*), Modelos Digitais de Elevação e Ortomosaicos. Para gerar as nuvens, os dados de 2023 e 2024 foram processados pelo algoritmo do SfM-MVS através do software Metashape, seguindo o processo apresentado em Materiais e Métodos.

Os produtos foram gerados individualmente para os anos analisados, sendo que os arquivos de nuvem foram exportados no formato .ply, e a malha poligonal também foi exportada no formato .ply. O MDE e o Ortomosaico foram exportados em formato .tif.

Para fins de visualização, os modelos serão apresentados de diversos ângulos – representados pelas direções de x, y e z no canto inferior direito das imagens – e com um foco maior em 16 deslizamentos, como referência foi elaborado um mapa para melhor observação da localização desses pontos de deslizamentos no espaço (Figura 7).



Figura 7 - Deslizamentos notáveis que serão detalhados neste trabalho.

As áreas afetadas pelos deslizamentos 1 a 7 estão na porção sul da península, em que a ocupação humana é menor, que a maior parte dos escorregamentos aconteceram sem colocar em risco direto à população ao entorno. Já do 8 ao 16, estão mais próximos das construções e da estrada, em que a movimentação da massa exporia os moradores a alto risco geológico.

5.1. Ano de 2023

O processamento dos dados de 2023 teve como dado de entrada 1331 imagens, gerando – como produto primário – uma nuvem esparsa (*tie points*) com 1.854.505 pontos (Figura 8a), produto do SfM, e uma nuvem densa, produto do MVS (Figura 8b e 8c) com 423.470.277 pontos. Os posicionamentos das imagens processadas são apresentados em forma de polígonos azuis na Figura 8d, sobreposta a nuvem densa de pontos.

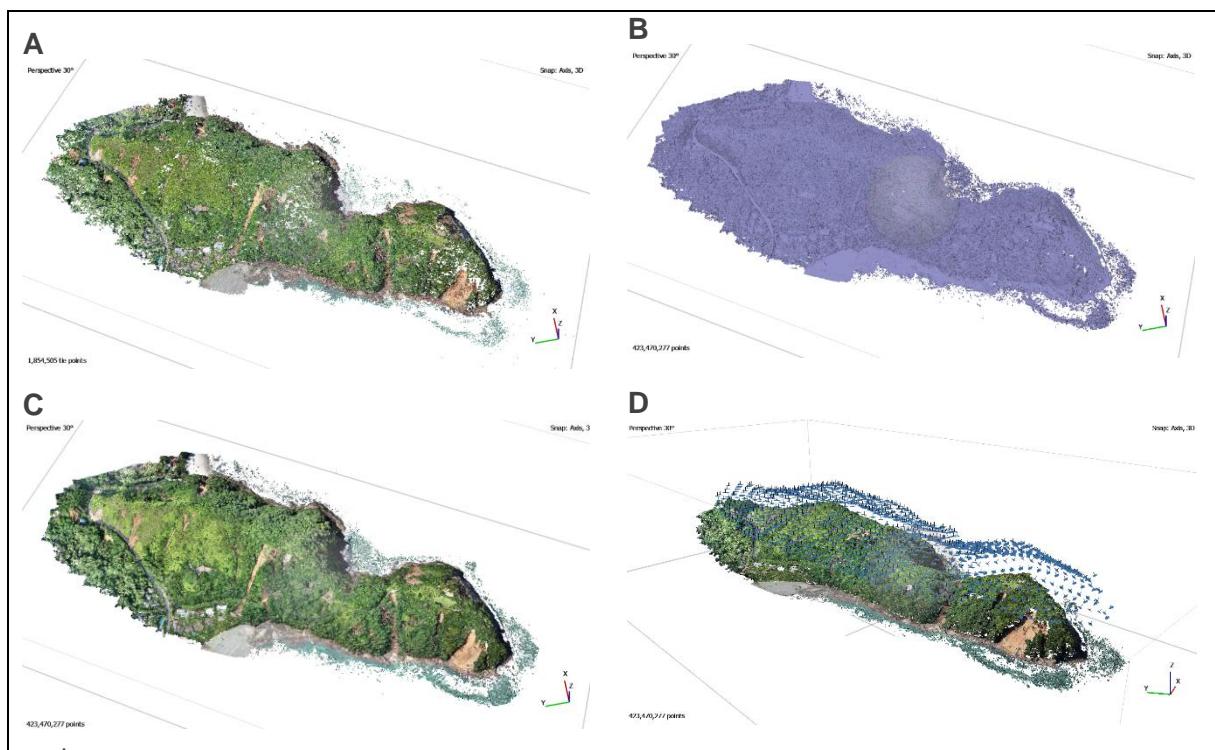


Figura 8 - (A) Nuvem esparsa colorida do ano de 2023. (B) Nuvem densa de pontos com cor sólida de 2023. (C) Nuvem densa de pontos colorida do ano de 2023 (D) Posicionamento das câmeras em relação a nuvem densa de pontos de 2023

Em relação ao modelo tridimensional triangular – malha – do ano de 2023 (Figura 9a e 9b), formou-se um modelamento com 58.248.965 vértices e 116.433.553 faces, em que foi aplicado textura.

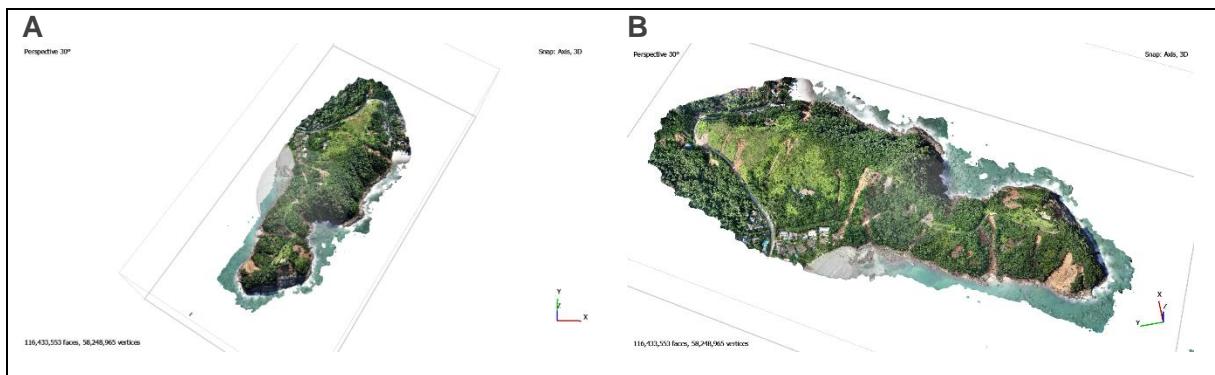


Figura 9 - (A) Modelo poligonal com referência para o norte em visão nadir para o ano de 2023. (B) Modelo poligonal rotacionado para o ano de 2023.

Os produtos em formato .tif – MDE e o ortomosaico (Figura 10) – foram exportados do Metashape e manipulados no QGIS. O MDE (Figura 11a) tem como intervalo - 85.88 a 77,30 metros; foi aplicada a simbologia Falsa-Cor (*spectral/invertido*). Para a criação das curvas de nível (Figura 11b), foi adotado intervalo de 10m entre as curvas.

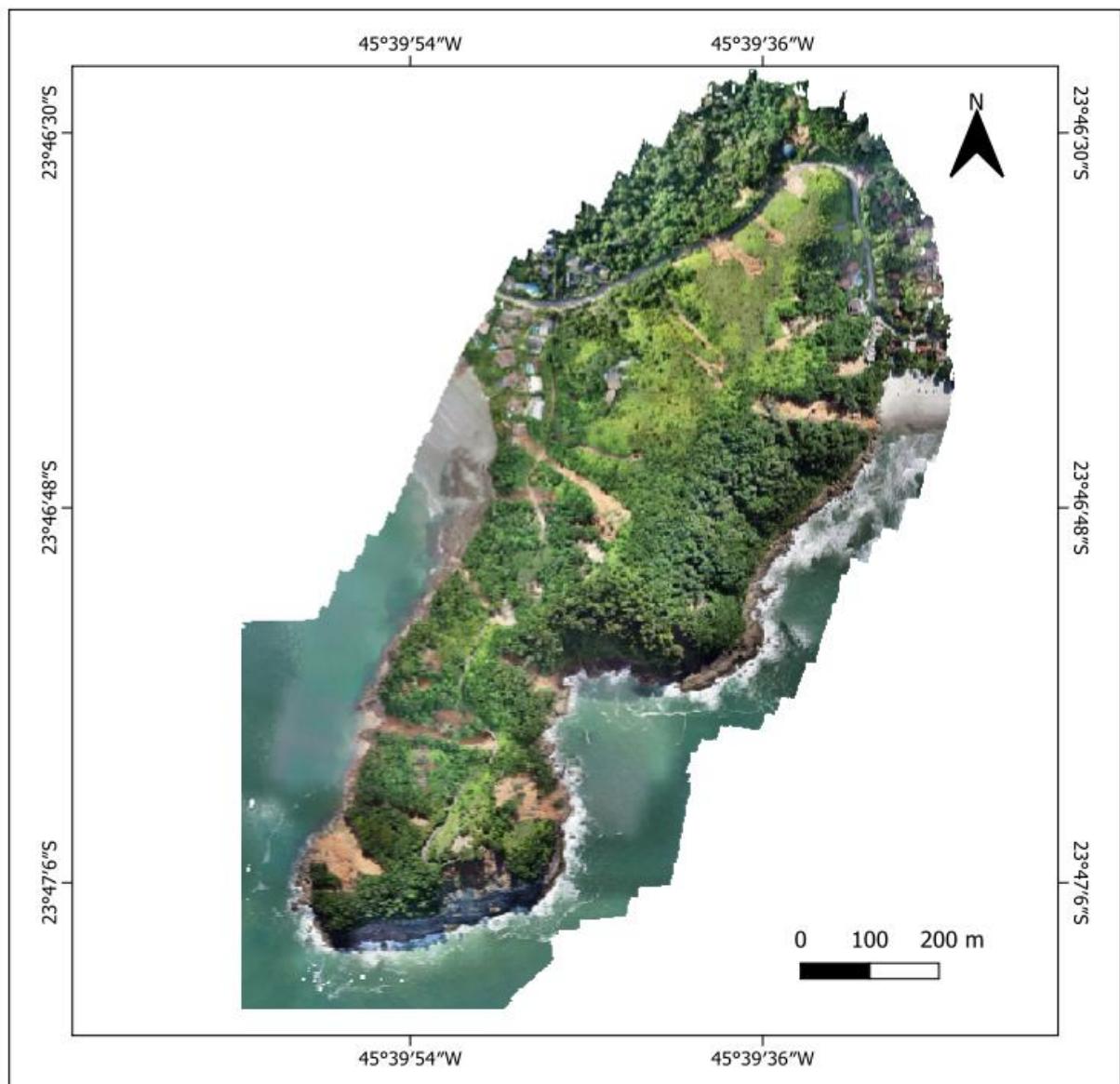


Figura 10 - Ortomosaico do ano de 2023

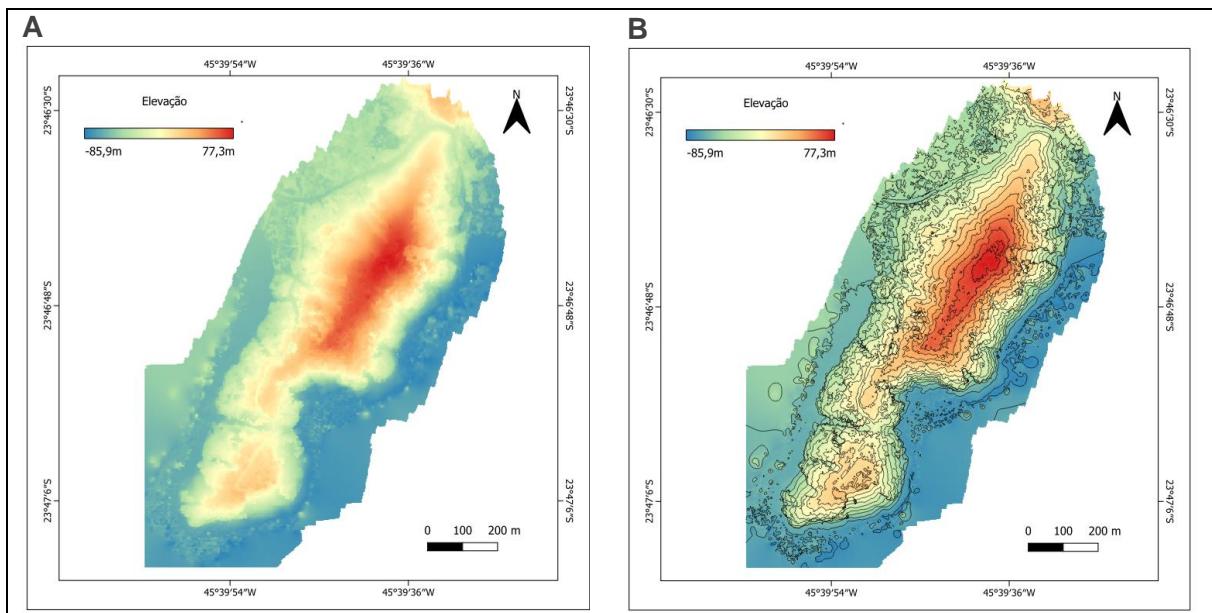


Figura 11 - (A) Modelo digital de elevação do ano de 2023. (B) Modelo digital de elevação com curvas de nível do ano de 2023.

5.2. Ano de 2024

Já em 2024, teve como dado de entrada 851 imagens, em que o primeiro produto a ser gerado foi a nuvem de pontos esparsa – produto do SfM – com 929.595 pontos (Figura 12a). A aplicação do MVS criou uma nuvem densa com 345.371.400 pontos (Figura 12b e 12c). O posicionamento das imagens em relação à nuvem de pontos densa está apresentado na figura 12d por polígonos azuis.

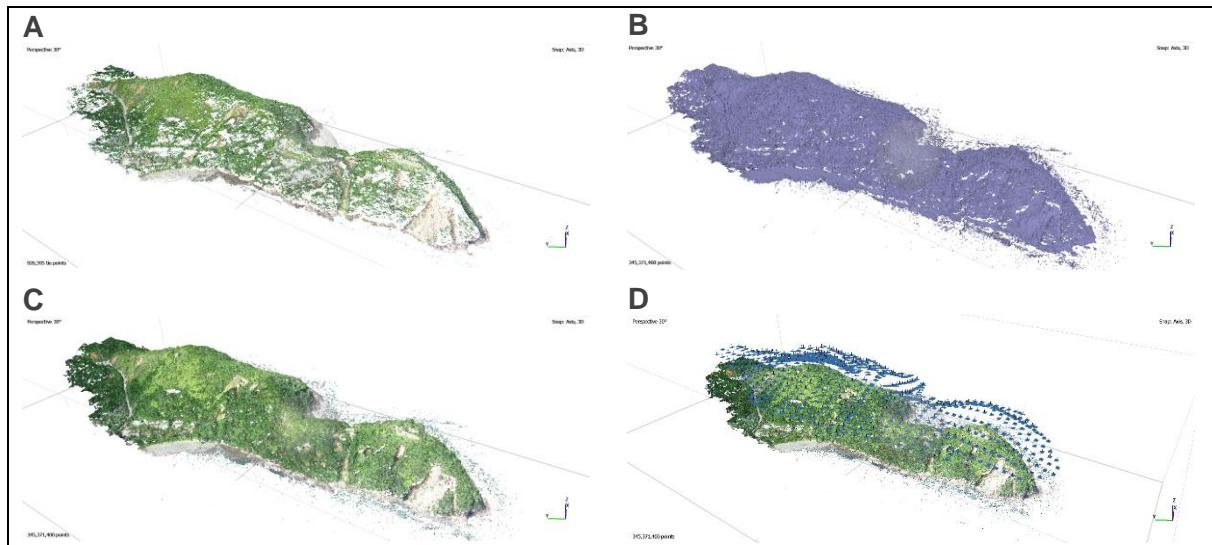


Figura 12 - (A) Nuvem esparsa colorida do ano de 2024. (B) Nuvem densa de pontos com cor sólida de 2024. (C) Nuvem densa de pontos colorida do ano de 2024. (D) Posicionamento das câmeras em relação a nuvem densa de pontos de 2024.

A criação da malha poligonal relativa ao ano de 2024, possui como características 44.637.122 vértices e 89.232.928 faces. Abaixo, é apresentado o posicionamento da malha em relação ao norte vista a partir do nadir (Figura 13a) e em outro ângulo para melhor visualização do modelo 3D (Figura 13b).

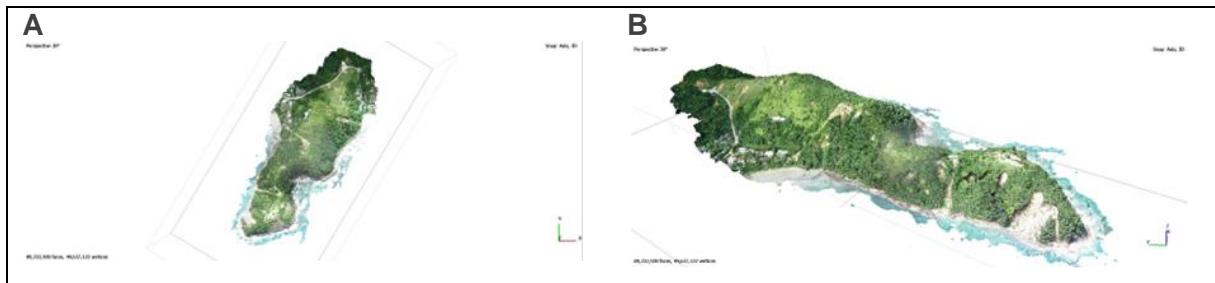


Figura 13 - (A) Modelo poligonal com referência para o norte em visão nadir para o ano de 2024. (B) Modelo poligonal rotacionado para o ano de 2024.

Os produtos em formato .tif foram manipulados para a formação de 3 mapas – um ortomosaico (Figura 14) e dois MDE (Figura 15a e 15b). Para a geração do MDE (Figura 14a), foi aplicada a simbologia Falsa-Cor (*spectral/invertido*), assim como o modelo do ano de 2023, e tinha intervalo -181,33 a 113,02. Para a criação das curvas de nível (Figura 14b), foi adotado intervalo de 10m entre as curvas.

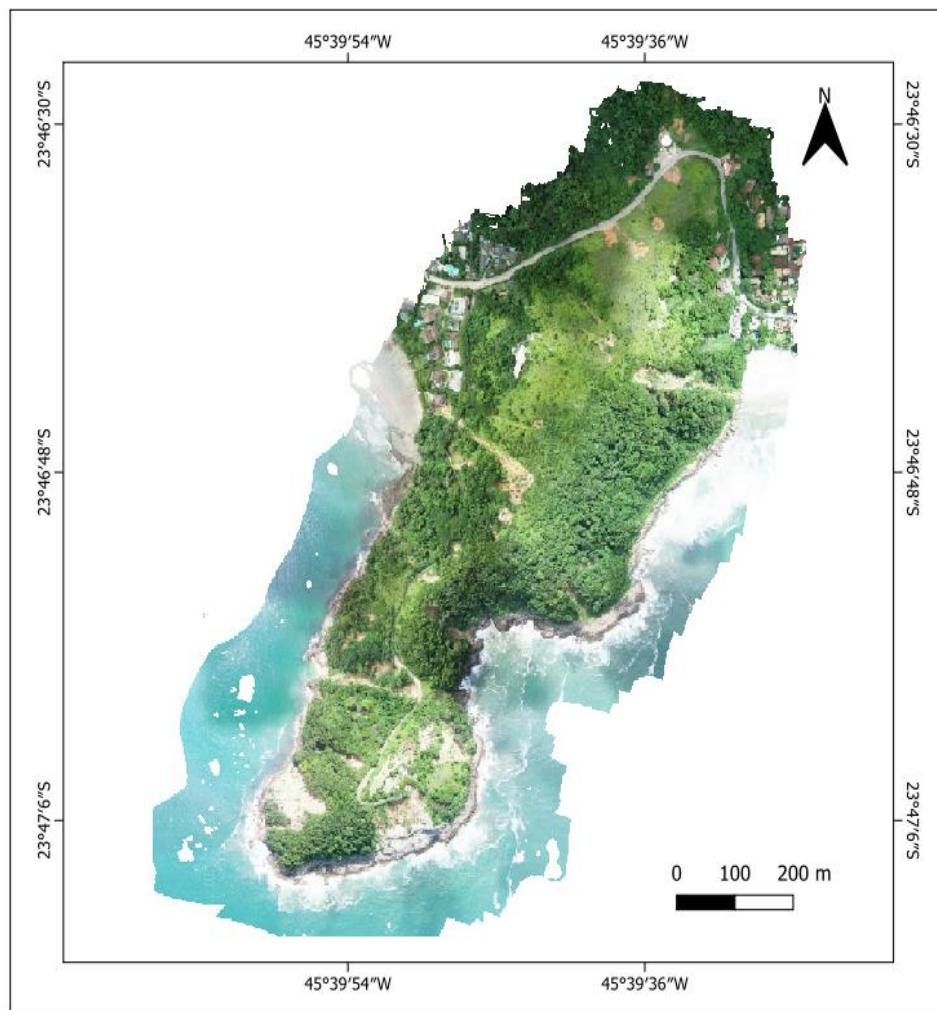


Figura 14 - Ortomosaico do ano de 2024.

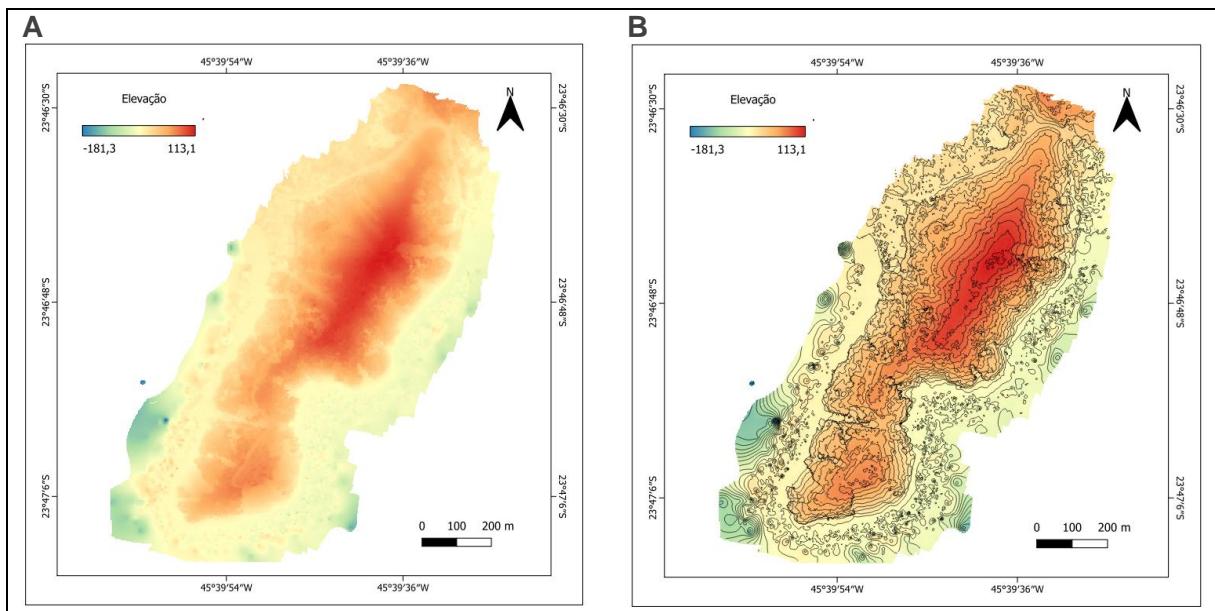


Figura 15 - (A) Modelo digital de elevação do ano de 2024. (B) Modelo digital de elevação com curvas de nível do ano de 2024.

5.3. Análise temporal entre os modelos

O modelo de 2023 está mais fotorrealista em comparação ao modelo de 2024 devido a fatores externos durante a captura das imagens, no caso a alta taxa de incidência de luz nos dias em que a captura foi feita, em que o excesso de luz interfere na forma em que o algoritmo diferencia diferentes superfícies. Essa diferença também é observada na quantidade de imagens capturadas, que em 2023 foi maior que 2024, influenciando a quantidade de pontos nas nuvens criadas pelo algoritmo.

Quantitativamente, para a aplicação do *cloud to cloud* (C2C) no Cloudcompare, primeiramente, as nuvens de pontos foram divididas em 4 partes – nomeadas NE, NW, SW e SE – para otimizar o processamento. Os recortes correspondentes dos anos de 2023 e 2024, foram alinhados utilizando como referência a nuvem de pontos de 2023. Os parâmetros automáticos para execução do C2C estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Relação entre as partes do modelo e a quantidade de octrees gerados no processamento automático.

Parte	Octree
NE	9
NW	10
SW	9
SE	9

As barras de cores localizada no lado direito das figuras representativas dos resultados do C2C mostram o desvio entre as nuvens de pontos em metros, que apesar de variar de 0 a 214, a distribuição de cores foi restringida de 0 a 40 metros. Essa restrição foi baseada no histograma original (Figura 16a), que mostra a distribuição de pontos por distância, em que

foi possível observar a maior frequência de pontos e limitar as distâncias na escala de cor. O histograma corrigido é apresentado na Figura 16b.

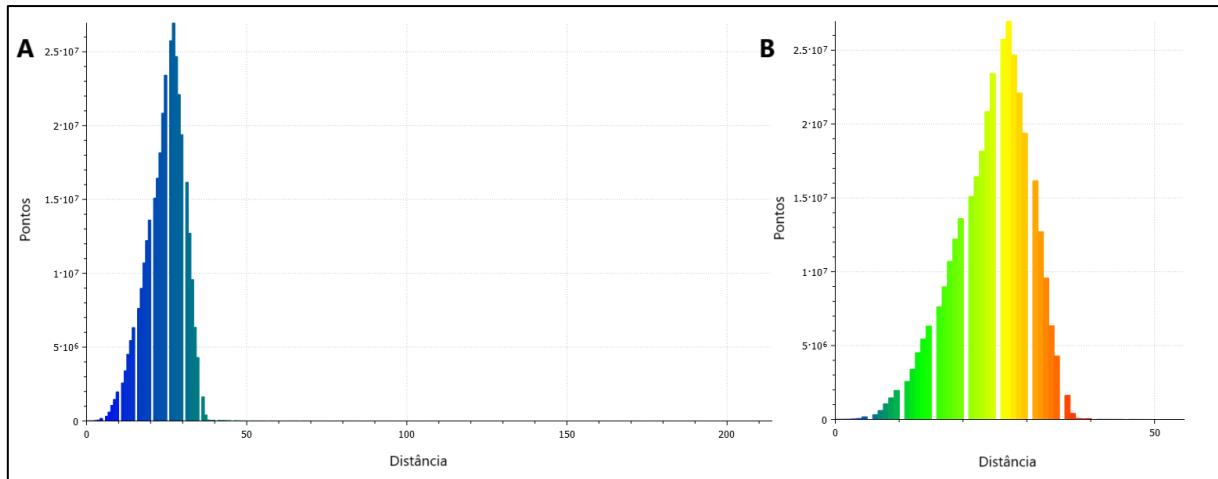


Figura 16 - Histograma original em que o eixo x apresenta a distância e o eixo y a quantidade de pontos. (A) Histograma original (B) Histograma restrinrido.

Esse processo foi importante para diminuir a interferência de valores anômalos, que estão associadas à discrepância entre as dimensões espaciais das nuvens de pontos, nos extremos do modelo. Esses valores anômalos foram reprojetados para 40m de distância. O modelo resultante da aplicação do C2C e a restrição dos dados, retirando os valores anômalos, está apresentado na Figura 17.

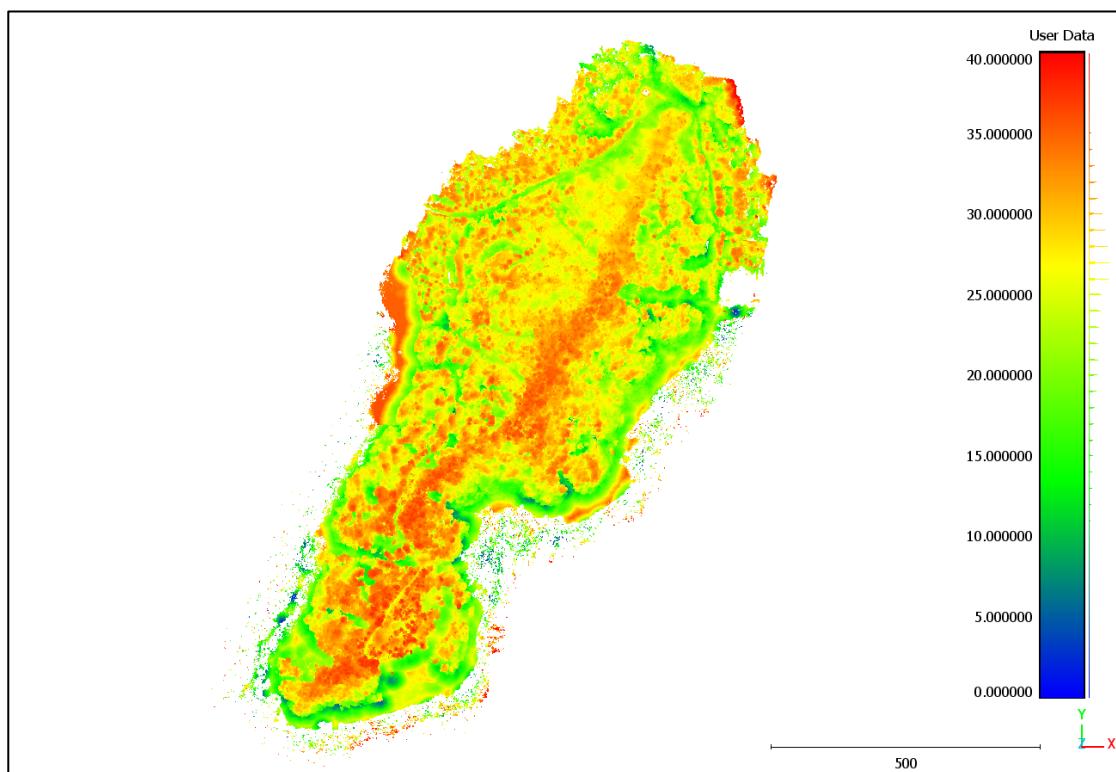


Figura 17 - Modelo resultante do Cloud-Cloud entre os anos de 2023 e 2024.

As pequenas diferenças ocorrem em todo morro, podendo ser relacionadas ao georreferenciamento dos pontos, que apesar de alinhados, ainda possuem pequenos erros devido a diferença de densidade entre as nuvens de pontos. Os resultados apresentados podem ser interpretados de diferentes formas, podendo estar relacionados, por exemplo, a revegetação da área, reconstrução de estruturas danificadas pelo desastre recente e a novas movimentações de massa.

Em geral, nos resultados do C2C, os deslizamentos se apresentam como porções esverdeadas, em que as movimentações recentes aparecem como manchas com maiores distâncias.

Entretanto, é observada o deslocamento dos dados visto que, nenhuma área mostrou-se estável com os resultados disponíveis (com baixíssimas movimentações). Isso pode ser justificado, assim como os resultados anômalos do eixo z, com a não utilização de GCPs durante a coleta dos dados. Para fins interpretativos, foi desconsiderado os valores das distâncias calculadas, no que diz a respeito dos resultados numéricos. Assim, as interpretações serão baseadas na diferença entre os pontos na região analisada, sem o cálculo direto da diferença das distâncias.

Considerando os pontos notáveis selecionados para maior detalhamento, o Ponto 1 (Figura 18) está localizado na porção norte do morro e é observado a partir da Praia da Baleia. Este escorregamento apresenta uma extensão de 116 metros e largura de 50 metros, medidas obtidas por meio da função Régua no software Metashape. A partir da análise dos modelos, observou-se uma distância entre os modelos nas porções mais centrais do morro – com índices de 26 e 28 metros. Pode ser interpretada como uma pequena movimentação que ocasionou um fluxo, seguido da deposição desse material na base do deslizamento.

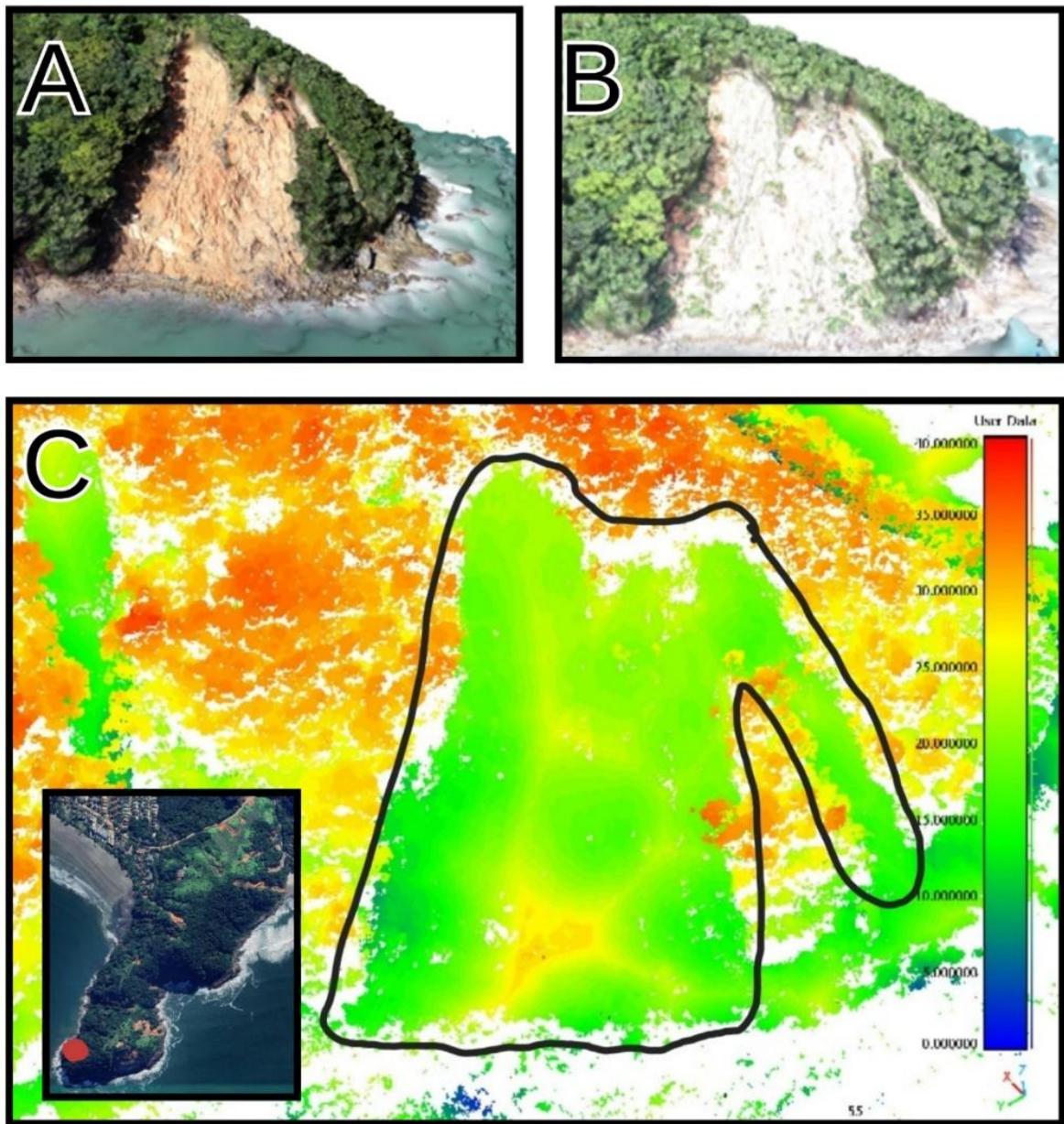


Figura 18 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para o escorregamento 1. (C) Cloud-Cloud entre os anos.

No Ponto 2 (Figura 19), existe o escorregamento que representa o extremo sul da península, voltado para o mar. Com as análises do C2C, foi identificada uma mancha amarelada de grande extensão, podendo ser interpretado como uma movimentação recente na encosta que gerou a deposição do material nas porções inferiores.

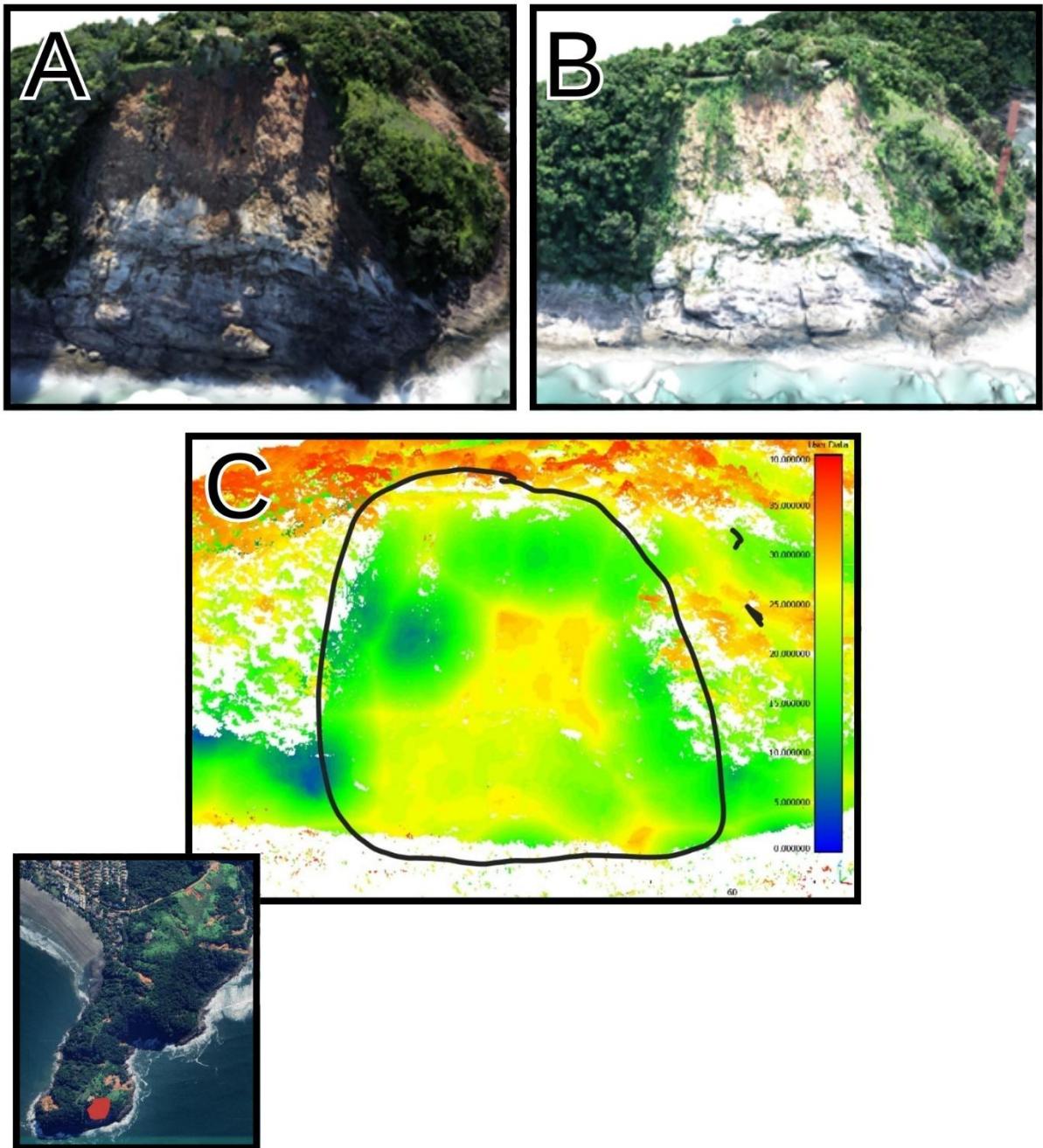


Figura 19 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para o escorregamento 2. (C) Cloud-Cloud entre os anos.

No outro lado do morro, visto a partir da Praia de Camburí, existem outros deslizamentos expressivos – abrangidos pela área 3. O escorregamento da Figura 20, possui 72,4m de largura e na porção que alcança o costão, possui 88,3m de comprimento, enquanto na porção superior atinge 62,4m. Entre o período analisado, as diferenças vistas a partir do C2C são dadas por novos deslizamentos e pela recuperação da vegetação nas porções mais centrais do escorregamento na encosta.

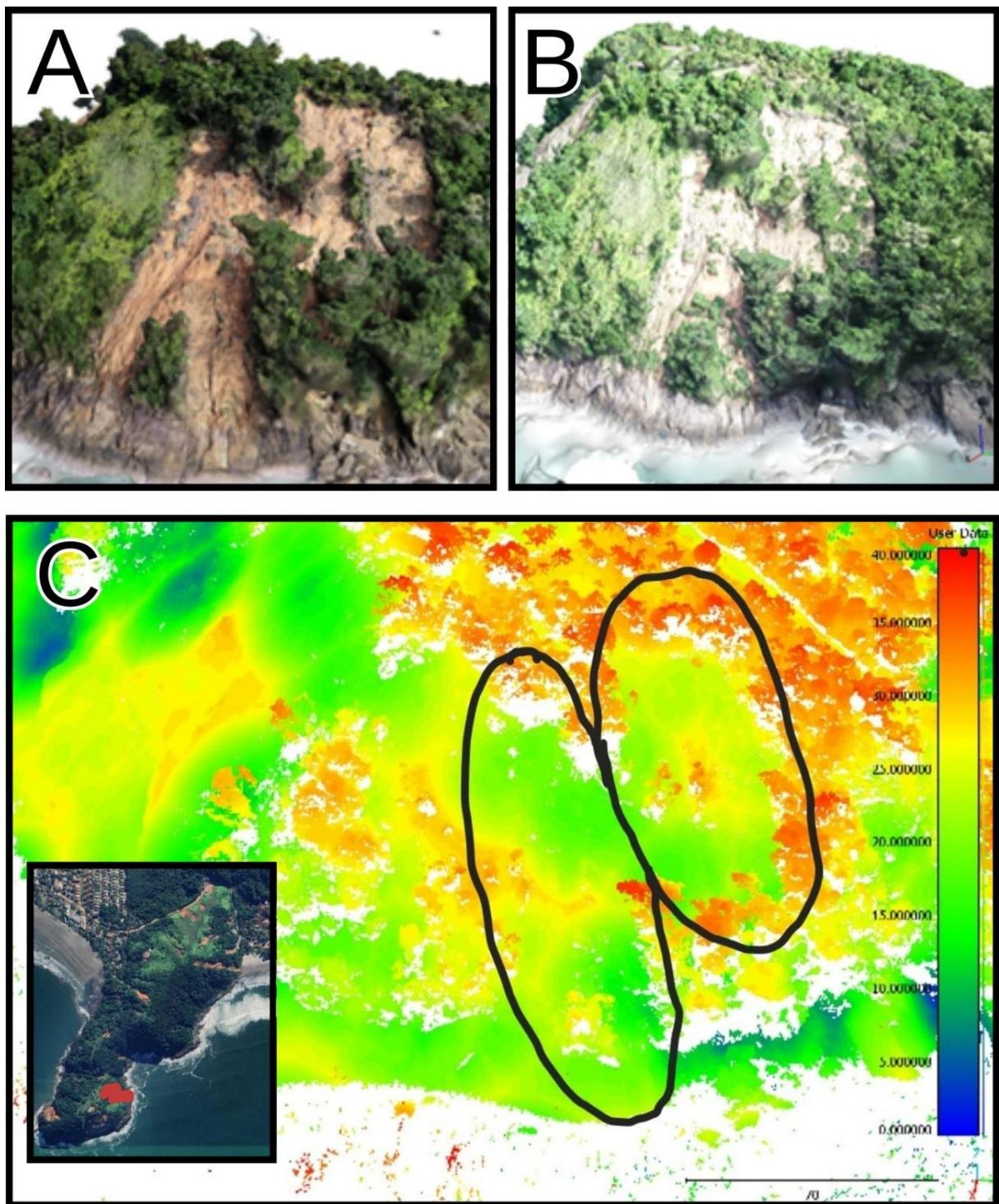


Figura 20 – Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para a área de escorregamento 3. (C) Cloud-Cloud entre os anos.

A área 4 (Figura 21) é composta por 8 deslizamentos, em que o maior encontra o costão rochoso. Os escorregamentos, que compõe essa área, apresentam grandes distâncias, de forma geral, porém essas distâncias não estão associadas a novos eventos, e sim é dada pela recuperação da vegetação e – no caso do deslizamento principal – pela reconstrução da estrada de acesso, na porção superior, que foi danificada durante as chuvas de 2023.

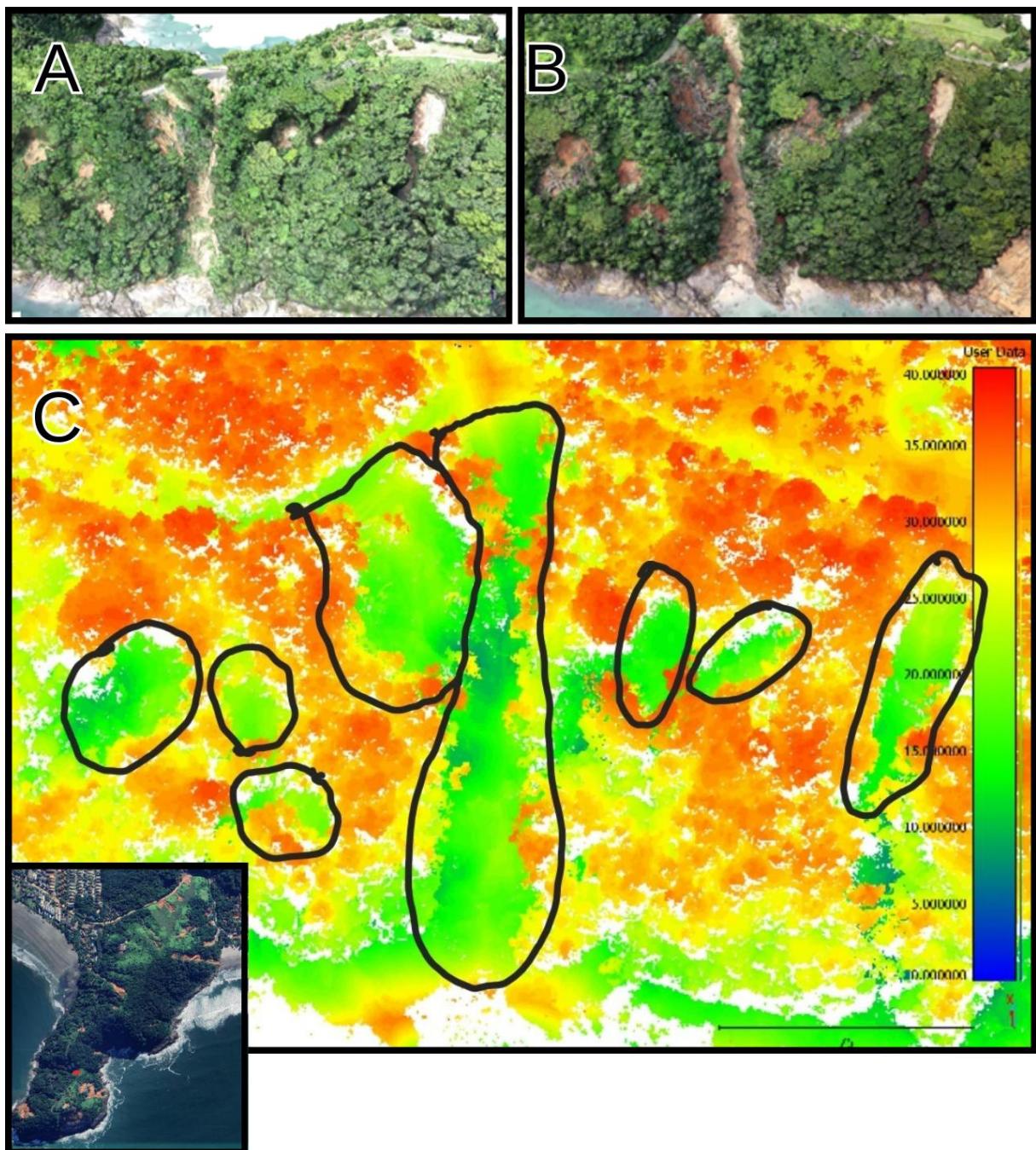


Figura 21 – Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para os deslizamentos da área 4. (C) Cloud-Cloud entre os anos.

Já o deslizamento referente ao ponto 5 (Figura 22), possui 110m de comprimento e 25m de largura. Os resultados do C2C indicam que a área superior (onde está localizada a mancha amarelada, se modificou, podendo ser interpretado como o reflorestamento de algumas porções da área, visto que esse deslizamento está nas proximidades da estrada principal. Em relação a escorregamentos, manteve-se relativamente estável, com ocorrência de movimentações na base do escorregamento.

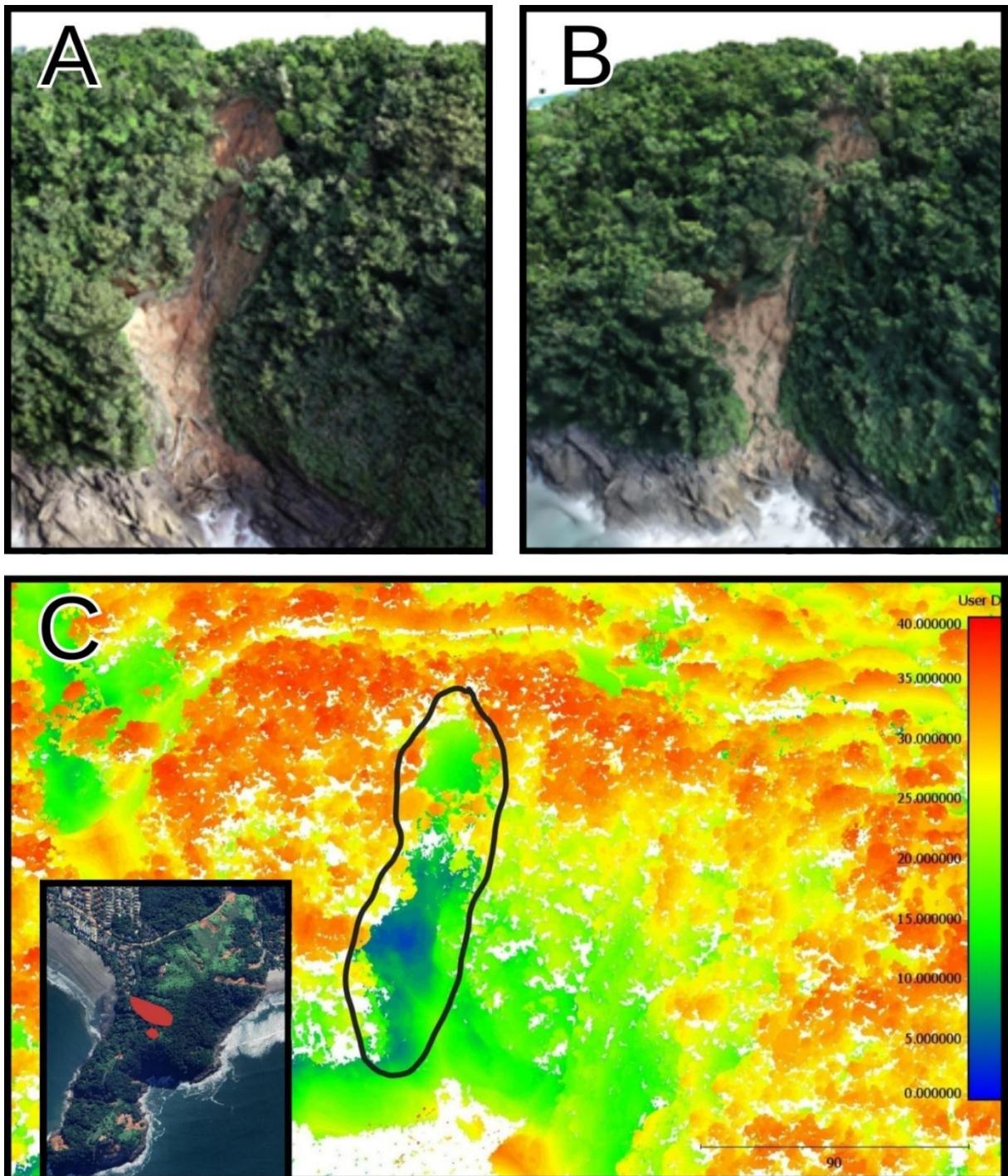


Figura 22 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para o escorregamento 5. (C) Cloud-Cloud entre os anos.

O ponto 6 (Figura 23) é composto por um escorregamento principal, que alcança o costão rochoso, percorrendo toda encosta. As manchas laranja avermelhadas na parte inferior do deslizamento no resultado do C2C (Figura 23c) indicam o processo de reflorestamento em andamento.

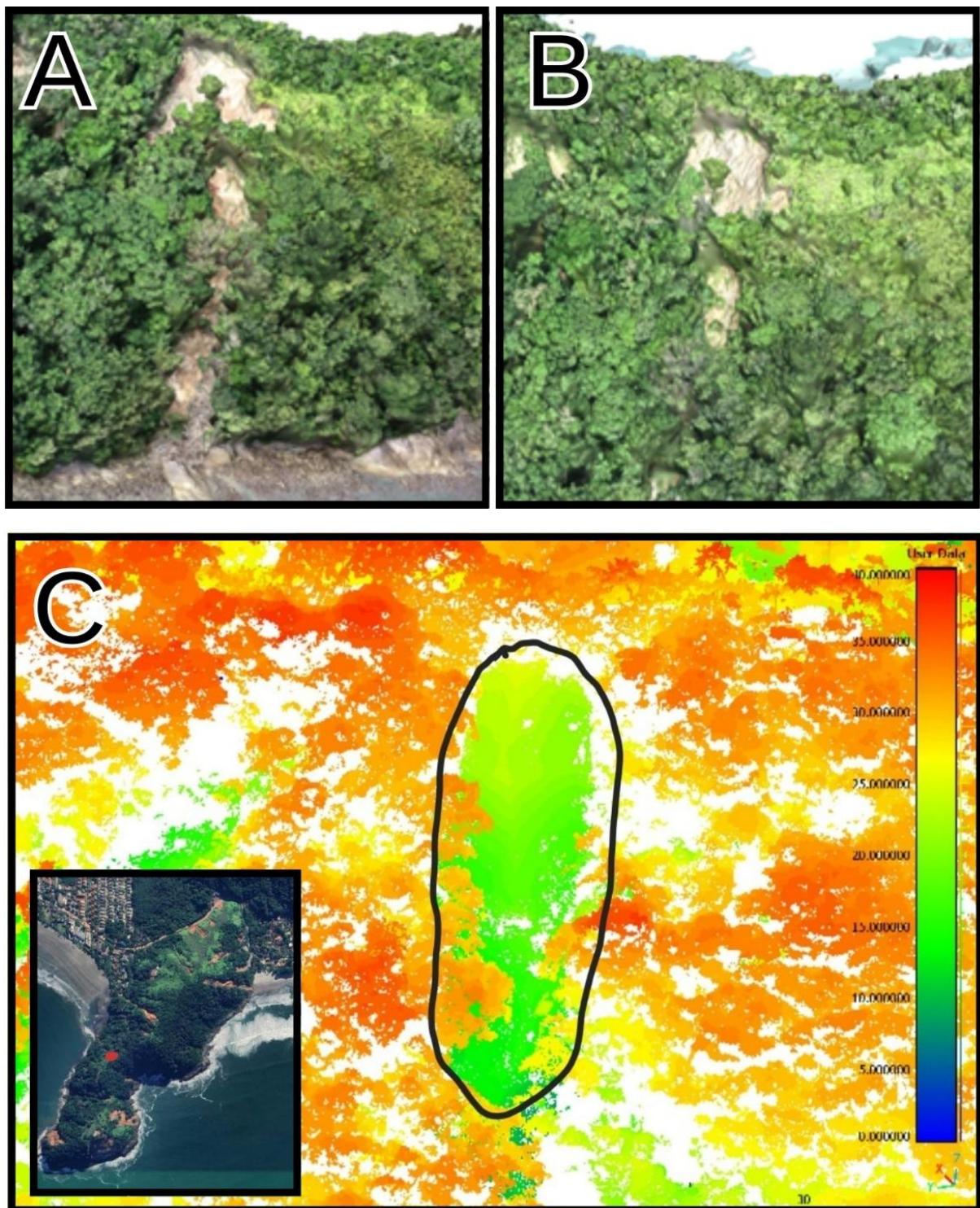


Figura 23 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para o escorregamento 6. (C) Cloud-Cloud entre os anos.

Mais próximo as residências, também existem os escorregamentos notáveis 7 e 8 (Figura 24), que ao evoluir podem ocasionar danos materiais e de vida. Ele possui 210m de extensão, percorrendo toda encosta, e 15m de largura. Entre as coletas, foi observada a recuperação parcial da vegetação na área que abrange os pontos citados, o que pode indicar um processo de estabilização do solo, embora ainda persista o risco de novos deslocamentos.

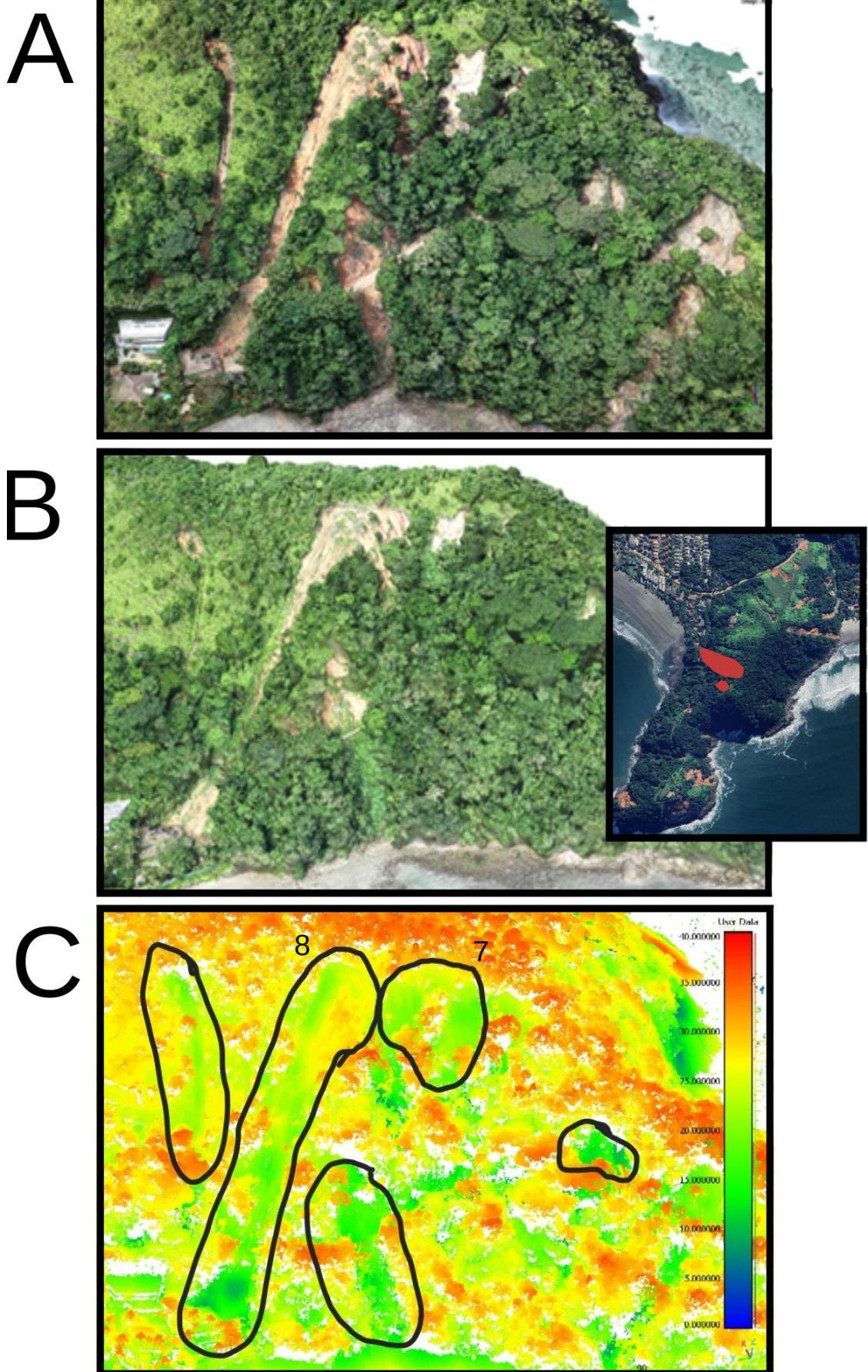


Figura 24 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para os escorregamentos das áreas 7 e 8.
(C) Cloud-Cloud entre os anos.

A área 9 (Figura 25) está localizada nas proximidades dos deslizamentos 7 e 8. No período abrangido pelo estudo, não foram observadas mudanças significativas nas características superficiais do escorregamento, o que sugere uma estabilidade relativa da área.

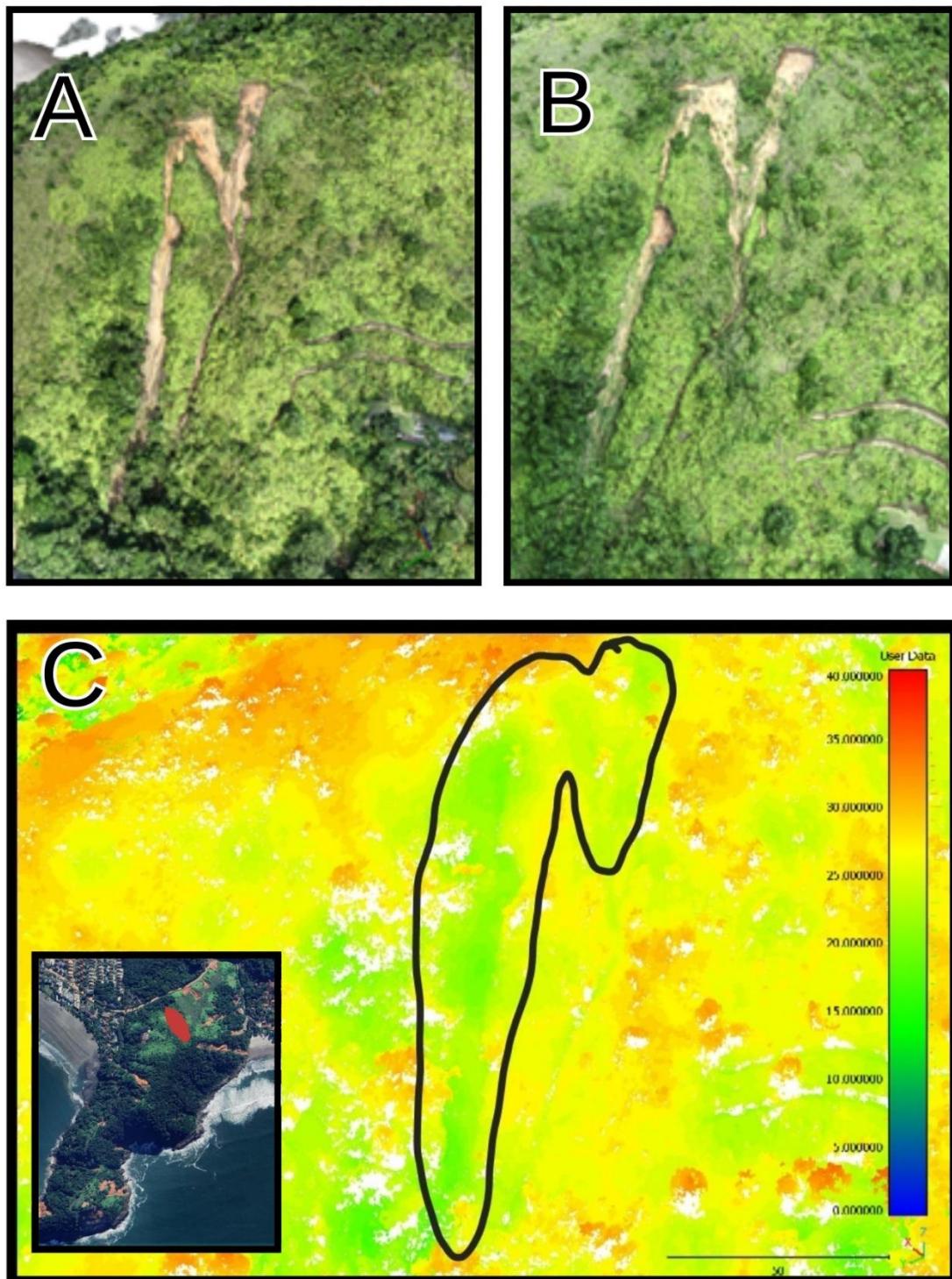


Figura 25 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para o escorregamento 9. (C) Cloud-Cloud entre os anos.

A área abrangida pelos escorregamentos 10, 11 e 12 e 14 (Figura 26) é vista a partir da Praia de Camburí, em que o maior escorregamento alcança a faixa de areia. Esta porção

possui grande importância por estar associada a residências localizadas na base do morro e próximas a praia, o que aumenta os riscos potenciais associados aos movimentos de massa de solo. Durante o período analisado, observou-se a recuperação da vegetação em todos os deslizamentos, sendo esse processo mais evidente no escorregamento 12.

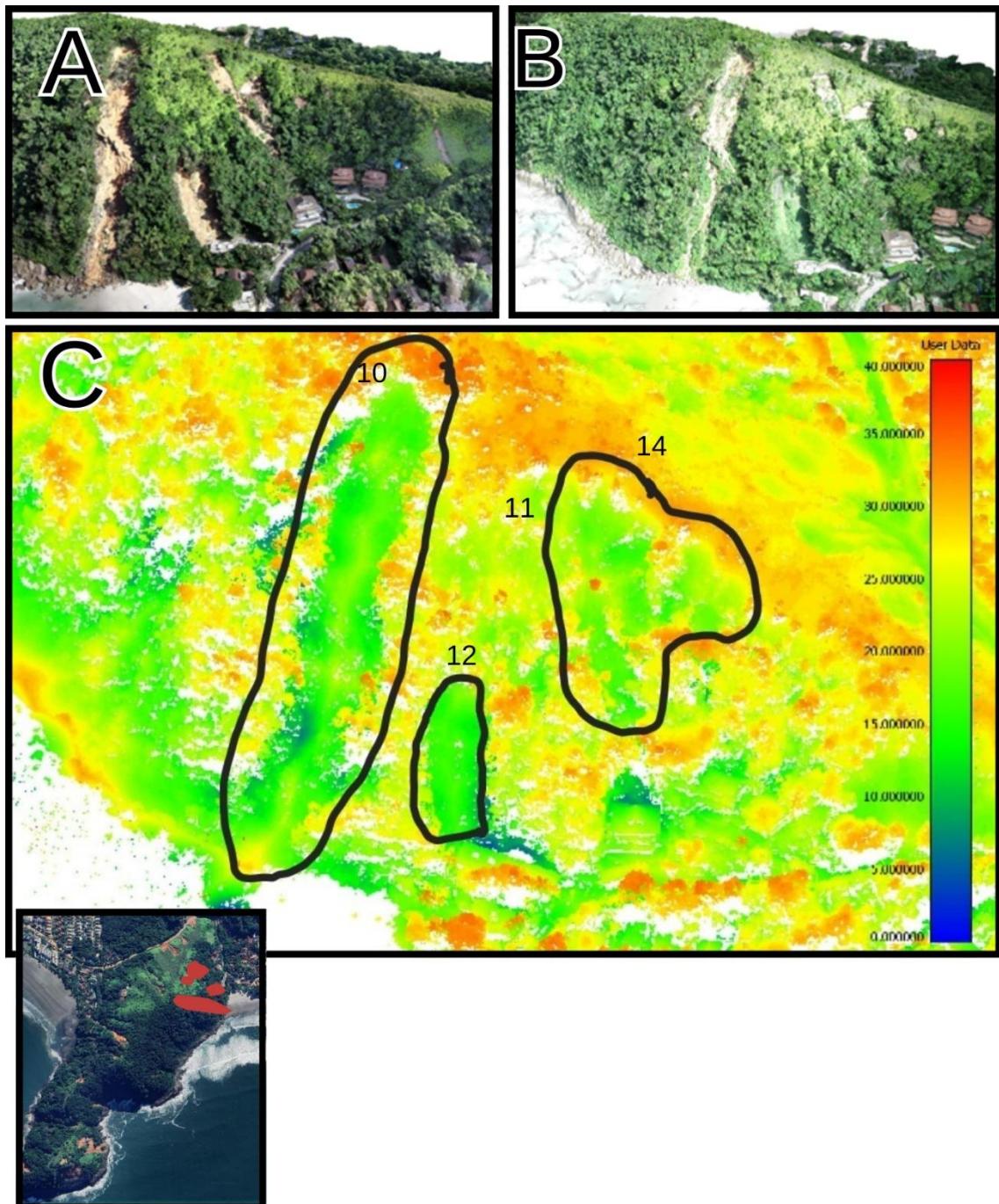


Figura 26 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para os escorregamentos 10, 11 e 12 e 14. (C) Cloud-Cloud entre os anos.

Ainda, é possível observar alguns desses deslizamentos - 13, 15 e 16 - nas margens da estrada que permite o acesso às porções mais altas do morro (Figura 27). Caracterizando da esquerda para a direita, eles possuem dimensões – comprimento x largura – de 36,8 x 26,2m,

66,8 x 11,1m e 90,9 x 37,1m. Os deslizamentos não apresentaram movimentações importantes.

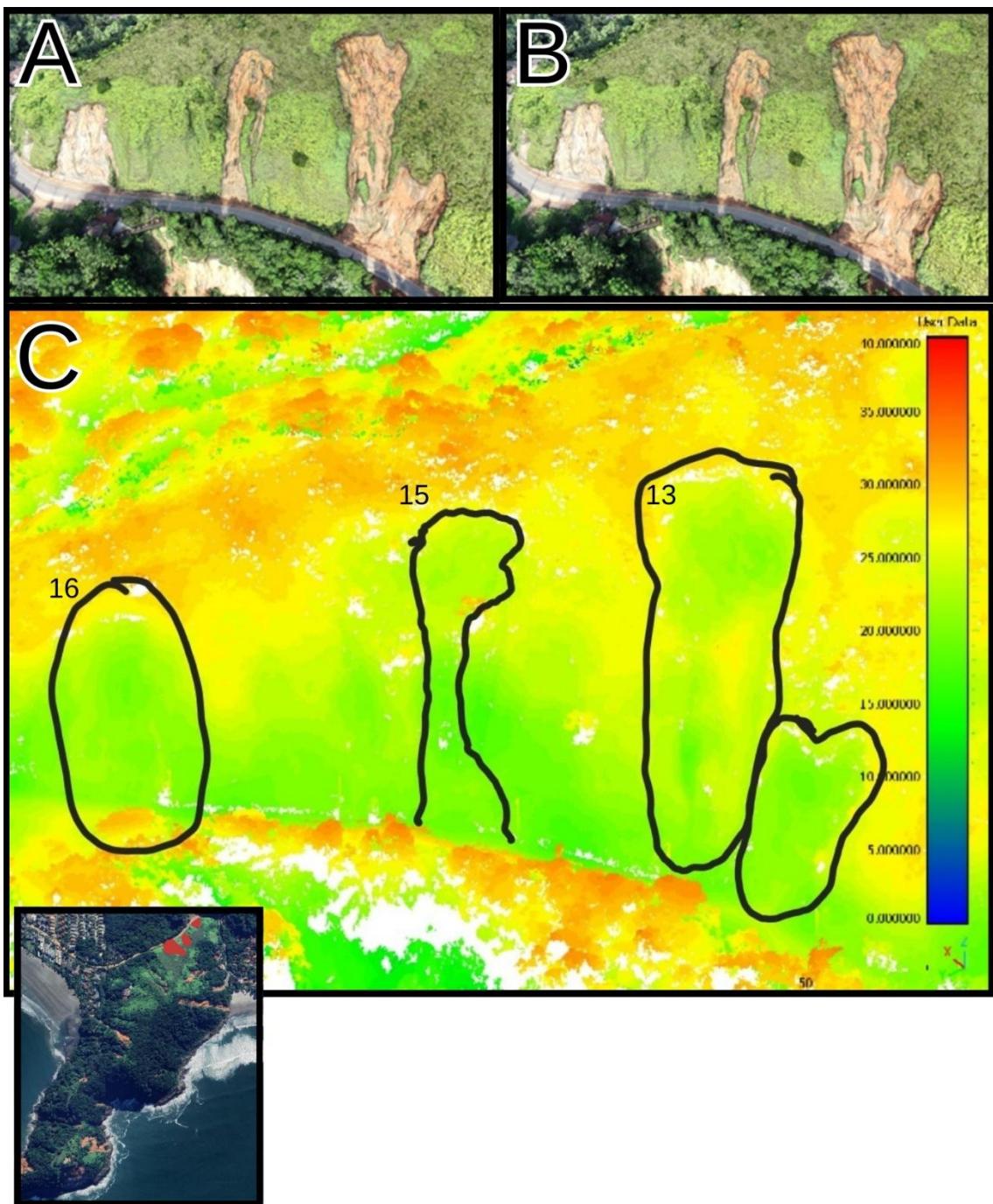


Figura 27 - Modelos poligonais para o ano de 2023 (A) e 2024 (B) para o escorregamento 2. (C) Cloud-Cloud entre os anos.

Em suma, os resultados e as interpretações referentes aos deslizamentos abordados nesse trabalho, estão apresentados na Tabela 3. Como forma de simplificação, os resultados foram classificados entre pouca, média e alta movimentação e as interpretações foram diferenciadas entre revegetação, novas movimentações de massa, reconstrução de estruturas danificadas e estabilidade relativa. A estabilidade relativa é um parâmetro generalista que

implica na estabilidade apenas durante o período de 2023 e 2024, que pode ser uma interpretação que subestima os dados, visto que o método aplicado apresentou limitações.

Tabela 3 - Resumo dos resultados obtidos.

Deslizamentos	Resultados	Interpretações
1	Média	Novas movimentações de massa
2	Média	Novas movimentações de massa
3	Média	Novas movimentações de massa e revegetação nas áreas mais centrais do deslizamento.
4	Pouca	Reconstrução de estruturas danificadas e novas movimentações de massa.
5	Média	Revegetação e novas ocorrências de movimentações.
6	Média	Revegetação
7	Média	Revegetação
8	Média	Revegetação
9	Pouca	Estabilidade relativa
10	Pouca/Média	Revegetação
11	Média	Revegetação
12	Alta	Revegetação
13	Pouca	Estabilidade relativa
14	Pouca	Revegetação
15	Pouca	Estabilidade relativa
16	Pouca	Estabilidade relativa

6. CONCLUSÕES

A análise temporal, utilizando como base produtos gerados a partir da técnica de *Structure from Motion - Multiview Stereo*, é essencial para o monitoramento de áreas acometidas por riscos geológicos - como é o caso do município de São Sebastião. A técnica empregada permitiu criar as nuvens de pontos densas que geraram produtos como os modelos tridimensionais, ortomosaicos e o MDE. Ao comparar, qualitativamente, os modelos triangulares e, quantitativamente, as nuvens de pontos densa, acompanhou-se a evolução de deslizamentos que recentemente provocaram danos à comunidade ao entorno. Entretanto, é possível observar algumas limitações referentes ao modelo, podendo estar associados com a não utilização de GCPs durante a coleta dos dados.

Novas movimentações de massa foram observadas nos deslizamentos 1, 2, 3, 4 e 5, localizados – majoritariamente – nas porções menos povoadas do Morro da Baleia, nas regiões mais próximas do oceano, ao sul da península. Além dos deslizamentos que mantiveram uma estabilidade relativa no período, como é o caso dos pontos 9, 13, 15 e 16.

O processo de recuperação da vegetação, sendo um método natural ou artificial, se mostrou como uma medida eficaz e frequente no tratamento dos escorregamentos que acometeram o Morro da Baleia em 2023, durante os eventos extremos de chuva. A vegetação atua como barreira contra a erosão superficial e contribui para a estabilidade do solo, reduzindo a probabilidade de novas ocorrências de áreas suscetíveis. Esse processo foi observado nos deslizamentos nomeados 3, 5, 6, 7, 8, 10, 11, 12 e 14.

Porém, apesar de ter sido observada a evolução da vegetação e a estabilização relativa da maioria dos deslizamentos, o monitoramento é a medida mais eficaz na prevenção de riscos geológicos. A aplicação da técnica de SfM-MVS fornece dados que auxiliam na identificação prévia de áreas instáveis, permitindo a aplicação de medidas preventivas antes que ocorram os desastres. Dessa maneira, o monitoramento combinando modelagem 3D com os conhecimentos prévios da área, tornam-se indispensáveis para a gerenciamento de áreas acometidas por riscos geológicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Brasil, 2023, Governo federal reconhece calamidade em seis municípios paulistas: Agência Brasil. Disponível em: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2023-02/governo-federal-reconhece-calamidadeem-seis-municípios-paulistas>. Acesso em: out. 2024.
- Agisoft, 2022, Agisoft Metashape User Manual Professional Edition v. 1.8: Disponível em: https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1.8_en.pdf. Acesso em: out. 2024.
- Agisoft, 2022, Agisoft Metashape Professional Edition (versão 1.8): Disponível em: <https://www.agisoft.com/downloads/installer/>. Acesso em: out. 2024.
- Almeida, F. F. M., 2018, Fundamentos geológicos do relevo paulista: v. 39, n. 3. doi: 10.33958/revig.v39i3.600.
- Bispo, P. C., Almeida, C. M., Valeriano, M. M., Medeiros, J. S., Crepani, E., 2011, Análise da suscetibilidade aos movimentos de massa em São Sebastião (SP) com o uso de métodos de inferência espacial: Geociências, v. 20, n. 3, p. 467-478.
- Brito Neves, B. B. de, Cordani, U. G., 1991, Tectonic evolution of South America during the late Proterozoic: Precambrian Research, v. 53, n. 1-2, p. 23-40. doi: 10.1016/0301-9268(91)90004-T.
- Carneiro, D. S., Toonstra, G. W. A., Souza, H. L. S., Pereira, T. A. J., 2014, Qualidade de ortomosaicos de imagens de VANT processados com os softwares APS, Pix4D e Photoscan: V Simpósio Brasileiro de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação, Recife, PE, p. 747-754, nov. 2014.
- Carrivick, J. L., Smith, M. W., Quincey, D. J., 2016, Structure from Motion in the Geosciences: Wiley Blackwell, 208 p.
- CloudCompare, 2015, CloudCompare version 2.6.1 User Manual: Disponível em: <https://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>. Acesso em: jul. 2024.
- CloudCompare, 2024, CloudCompare (versão 2.14.alpha): Disponível em: <http://www.cloudcompare.org/>. Acesso em: jul. 2024.
- Coelho, R. D., Viana, C. D., Dias, V. C., Grohmann, C. H., 2024, Landslides of the 2023 summer event of São Sebastião, southeastern Brazil: spatial dataset: Brazilian Journal of Geology, v. 54, n. 2, e20240006. doi: 10.1590/2317-4889202420240006.
- Coelho, C. A. S., Brito, J. L. S., 2007, Fundamentos de fotogrametria: Rio de Janeiro, EdUERJ, 196 p. ISBN 978-85-7511-114-7.
- De Ploey, J., Cruz, O., 1979, Landslides in the Serra do Mar, Brazil: Catenac, v. 6, n. 2, p. 111-122. doi: 10.1016/0341-8162(79)90001-8.
- Fernandes, N., Amaral, C. P., 1996, Movimentos de massa: uma abordagem geológica-geomorfológica: In: Guerra, A. J. T., Cunha, S. B. (Org.), Geologia e Meio Ambiente, Rio de Janeiro, Bertrand, p. 123-194.
- Fúlfaro, V. J., Suguio, K., Ponçano, W. L., 1974, A gênese das planícies costeiras paulistas: XXVIII Congresso Brasileiro de Geologia, Porto Alegre.
- Grohmann, C.H., Sawakuchi, A. O., Mendes, V. R., 2011, Cell size influence on DEM volume calculation: Conference Proceedings, ESRI, California, p. 63-66.
- Guidicini, G., Nieble, C. M., 1984, Estabilidade de Taludes Naturais e de Escavação: São Paulo, Edgard Blucher, 194 p. ISBN 978-85-2120-186-1.
- G1, 2023, São Sebastião tem pessoas debaixo de escombros após fortes chuvas, diz prefeito da cidade: G1, 19 fev. Disponível em: <https://g1.globo.com/sp/vale-do-paraiaba-regiao/noticia/2023/02/19/sao-sebastiao-tem-pessoas-debaixo-de-escombros-apos-fortes-chuvas-diz-prefeito-da-cidade.ghtml>. Acesso em: abr. 2024.
- Highland, L. M., Brobrowsky, P., 2008, The landslide handbook –A guide to understanding landslides: Reston, Geological Survey Circular 1325, 129p.
- IBGE, 2023, BDIA: Disponível em: [BDIA - Banco de Dados e Informações Ambientais](https://www.ibge.gov.br/estatisticas/ambiente/BDIA-Banco-de-Dados-e-Informacoes-Ambientais.html). Acesso em: out. 2024.
- ISPRS, 2024, Statutes: Disponível em: <https://www.isprs.org/documents/statutes.aspx>. Acesso em: abr. 2024.
- Liao, J., Zhou, J., Yang, W., 2021, Comparing LiDAR and SfM digital surface models for three land cover types: Open Geosciences, v. 13, p. 497-504. doi: 10.1515/geo-2020-0257.

- Marengo, J. A., et al., 2024, Heavy rains and hydrogeological disasters on February 18th–19th, 2023, in the city of São Sebastião, São Paulo, Brazil: from meteorological causes to early warnings: *Nat Hazards*, v. 120, p. 7997-8024. doi: 10.1007/s11069-024-06558-5.
- Over, J. R., Ritchie, A. C., Kranenburg, C. J., Brown, J. A., Buscombe, D., Noble, T., Sherwood, C. R., Warrick, J. A., Wernette, P. A., 2021, Processing coastal imagery with Agisoft Metashape Professional Edition, version 1.6 — Structure from motion workflow documentation: U.S. Geological Survey Open-File Report 2021-1039, 46 p., doi: 10.3133/ofr20211039.
- Ross, J. L. S., Fierz, M. S. M., 2018, A Serra do Mar e a Planície Costeira em São Paulo: morfogênese, morfodinâmica e as suas fragilidades: *Boletim Paulista de Geografia*, v. 100, p. 17-38.
- Rossi, M., 2017, Mapa pedológico do Estado de São Paulo: revisado e ampliado: São Paulo, Instituto Florestal, v. 1, p. 105-107, ISBN: 978-85-64808-16-4.
- Santos, A. R., 2004, A grande barreira da Serra do Mar: da trilha dos Tupiniquins à Rodovia dos Imigrantes: São Paulo, O Nome da Rosa, 111 p., ISBN: 8586872350.
- Saunders, G., 2014, Development of photogrammetric methods for landslide analysis: developing an efficient method to create 3-dimensional models of landslide tracks [Tese de Mestrado]: Departamento de Geociências, Universidade de Oslo, Oslo. Orientador: Dr. Karen Mair. Coorientador: Dr. Olivier Galland.
- Tominaga, L. K., Santoro, K., Amaral, R., 2015, Desastres naturais: conhecer para prevenir: São Paulo, Instituto Geológico, 196 p., ISBN 978-85-87235-09-1
- Ullman, S., 1979, The Interpretation of Structure from Motion: *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 203, n. 1153, p. 405–426, doi: 10.1098/rspb.1979.0006.
- Viana, C. D., 2021, Fotogrametria digital multi-escala para aquisição de dados estruturais [Tese de Doutorado]: São Paulo, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 258 p., doi:10.11606/T.44.2021.tde-18012022-122057.
- Vieira, B. C., Gramani, M. F., 2015, Serra do Mar: The Most “Tormented” Relief in Brazil: Landscapes and Landforms of Brazil, p. 285–297, doi:10.1007/978-94-017-8023-0_26.
- Westoby, M. J., Brasington, J., Glasser, N. F., Hambrey, M. J., Reynolds, J. M., 2012, Structure-from-Motion’ photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications: *Geomorphology*, v. 179, p. 300-314, doi: 10.1016/j.geomorph.2012.08.021.
- Wheaton, J. M., Brasington, J., Darby, S. E., Sear, D. A., 2009, Accounting for uncertainty in DEMs from repeat topographic surveys: improved sediment budgets: *Earth Surface Processes and Landforms*, v. 35, n. 2, p. 136-156, doi: 10.1002/esp.1886.
- Yordanov, V., Biagi, L., Truong, X. Q., Brovelli, M., 2022, Landslide surveys using low-cost UAV and foss photogrammetric workflow: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XLIII-B2-2022, p. 493-499. doi: 10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2022-493-2022.