

INSTABILIZAÇÕES DE ENCOSTAS E AEROFOTOGRA- METRIA POR *DRONE* – UMA IMPORTANTE INTERAÇÃO PARA AGILIZAR AVALIAÇÕES E ANÁLISES GEOTÉCNICAS PRELIMINARES

Marcelo Freitas Guimarães

Géologo, Reconverte Planejamento e Projetos, São Paulo, Brasil, marcelo.guimaraes@reconverte.com.br

José Antonio Gonçalves

Eng. Géologo, Reconverte Planejamento e Projetos, São Paulo, Brasil, jag@reconverte.com.br

Ana Cristina Akinaga Hatori

Engenheira Civil, Reconverte Planejamento e Projetos, São Paulo, Brasil, ana.hatori@reconverte.com.br

Giulia Vicenzo Rafael

Géologa, Reconverte Planejamento e Projetos, São Paulo, Brasil, giulia.rafael@reconverte.com.br

Lucas Deroide do Nascimento

Engenheiro Civil, Reconverte Planej e Projetos, São Paulo, Brasil, lucas.nascimento@reconverte.com.br

RESUMO: O contexto geológico-geomorfológico da Serra do Mar é identificado como uma das áreas mais susceptíveis a movimentos de massa do país. O relevo escarpado e encostas íngremes, associado ao elevado índice pluviométrico da região, condicionam a ocorrência de processos de dinâmica superficial e movimentos de massa frequentes. Com o advento das mudanças climáticas e o consequente aumento na intensidade e frequência de eventos extremos, temos visto aumentada a responsabilidade dos profissionais da área geotécnica, em aprimorar os métodos de avaliação e dar maior agilidade no reconhecimento das áreas que apresentam risco à comunidade e ao meio ambiente. Neste sentido, este trabalho apresenta a aplicação de novas tecnologias de captação e tratamento aerofotogramétrico de imagens obtidas por *drones*, em diversos trabalhos desenvolvidos na região da Serra do Mar, como ferramenta essencial aos diagnósticos geotécnicos e ao desenvolvimento de projetos de contenção e recuperação de áreas degradadas. Fundamenta-se na captação e tratamento de dados geoespaciais, extraídos de fotografias aéreas, capazes de dimensionar e modelar a superfície do terreno, caracterizando suas feições geométricas e aplicando na metodologia de Classificação de Áreas de Risco desenvolvida pelo Serviço Geológico do Brasil, apresentada no documento “Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa”.

PALAVRAS-CHAVE: Geotecnia, Área de Risco, Modelagem de Superfície, *Drone*, Aerofotogrametria.

ABSTRACT: The geological-geomorphological context of the “Serra do Mar” is identified as one of the area’s most susceptible to mass movements in the country. The rugged terrain and steep slopes, coupled with the region's high rainfall, condition the occurrence of surface dynamic processes and frequent mass movements. With the advent of climate change and the consequent increase in the intensity and frequency of extreme events, we have seen an increase in the responsibility of geotechnical professionals to improve assessment methods and provide greater agility in recognizing areas that present a risk to the community and the environment. This work presents the application of new technologies for capturing and processing aerophotogrammetric images obtained by drones, as an essential tool for geotechnical diagnoses and the development of containment and recovery projects for degraded areas. The basis is the capture and processing of geospatial data, from aerial photographic surveys, capable of dimensioning and modelling the surface of the terrain, characterizing its geometric features for the application of the Risk Area Classification methodology developed by the Geological Survey of Brazil, presented in the "Manual for Mapping Danger and Risk to Gravitational Mass Movements".

KEYWORDS: Geotechnics, Risk Area, Surface Modeling, Drone, Aerophotogrammetry.

1 INTRODUÇÃO

Eventos climáticos extremos ocorridos nos últimos anos, deixaram cicatrizes nas encostas da Serra do Mar do litoral do sudeste brasileiro. Em especial, o temporal que atingiu o município de São Sebastião na madrugada do dia 19 de fevereiro de 2023, quando a cidade foi afetada por um dos maiores eventos climáticos já registrados na região. Um volume excepcional, de quase 700 mm de chuva, precipitou em apenas seis horas, provocando deslizamentos de terra, alagamentos e desmoronamentos de casas, deixando bairros inteiros destruídos, contabilizando milhares de desabrigados e 64 vítimas fatais.

O desastre natural, abriu uma frente de trabalhos relacionados à avaliação de áreas de risco, além do desenvolvimento de projetos de contenção e estabilização de áreas de encostas nas regiões urbanas afetadas. O período envolveu uma série de trabalhos de campo, que incluiu visitas técnicas e mapeamento geológico-geotécnico associado à coleta de dados geoespaciais extraídos de aerofotolevantamentos.

Os dados foram processados com a utilização do *software* Agisoft Metashape[®], específico para modelagem 3D, considerando as limitações do equipamento às características das áreas, ajustando situações particulares com medições extraídas em campo.

É importante destacar que, para além da caracterização da topografia do terreno, os aerofotolevantamentos permitiram, de forma excepcional, observar áreas, até então, inacessíveis, assim com a obtenção de visadas panorâmicas aéreas, possíveis apenas por voos tripulados.

Definidas as condições físicas, geológicas e espaciais, as áreas foram então identificadas quanto ao tipo de instabilidade instalada, com a posterior classificação do grau de risco a que estavam submetidas, tendo como base de referência os parâmetros mais recentes disponíveis na literatura, no que diz respeito à classificação de áreas de risco desenvolvida para o território brasileiro, e que estão compilados no *Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa* (CPRM, 2018), um documento elaborado pelo Serviço Geológico Brasileiro, em cooperação com o Departamento de Acidentes Naturais do Japão, que estabelece critérios técnicos práticos para delimitação e classificação de áreas de risco, utilizado por geólogos e engenheiros geotécnicos.

Os resultados de alguns dos trabalhos executados pela equipe da Reconvertê são apresentados, em forma de imagens e produtos gerados durante todo processo de avaliação, destacando a ocorrência de instabilidades de massa dos tipos: escorregamentos planares superficiais e fluxo de detritos; que ocorreram em regiões de relevo montanhoso da Serra do Mar, em coberturas de solo de alteração de rochas granito-gnáissicas do embasamento cristalino, nos costões das praias de Boiçucanga, Camburi, Barra do Sahy e Engenho.



Figura 1- Imagem de satélite extraída do Google Earth[®], indicando as áreas de risco avaliadas, com destaque para as cicatrizes de escorregamento na fotografia aérea da encosta sul da Praia da Barra do Sahy.

2 METODOLOGIA

Entre o diagnóstico geotécnico e a elaboração do projeto de estabilização, são desenvolvidas três etapas. A primeira, corresponde ao Laudo de Vistoria, fase onde o grau de risco e o tipo de instabilidade são caracterizados. Na segunda etapa, desenvolve-se o Laudo de Estabilidade, a partir de uma investigação detalhada das áreas classificadas, na fase anterior, como de Risco Alto a Muito Alto. Nesta fase são coletados dados de sondagens e processadas as análises de estabilidade para obtenção dos fatores de segurança (FS). Na terceira e última etapa é elaborado o projeto de estabilização, que pode prever uma adequação do terreno para a implantação de projetos de contenção, sempre associados a projetos de drenagem superficial.

O processamento dos dados nas três etapas exigem a interação com outros *softwares*, como o programa Autocad[®], onde, por exemplo, podem ser aplicados filtros para delimitação de um determinado padrão de declividade, gerados a partir dos dados coletados pelo aerofotolevantamento. Também são utilizados *softwares* de modelagem matemática nas análises de estabilidade, como o Slide2[®]. No entanto, este artigo trata mais especificamente da fase do trabalho de campo, relacionada à coleta de dados aerofotogramétricos, com apresentação de imagens e exemplos de possíveis produtos gerados nas diferentes etapas da avaliação.

2.1 Atividades de Campo

2.1.1 Mapeamento Geológico-Geotécnico

Foram realizadas visitas técnicas destinadas ao mapeamento geológico-geotécnico das áreas, a partir do caminhamento em torno do perímetro de abrangência das instabilidades e das áreas de interesse, visando identificar os tipos de movimentos gravitacionais de massa instalados e de indícios de possíveis novas movimentações.

O mapeamento geológico-geotécnico esteve sempre focado nas seguintes observações:

- ✓ Na descrição tátil-visual dos materiais e características físicas das rochas e solos presentes nas áreas, incluindo parâmetros de resistência, porosidade, densidade, etc;
- ✓ Na identificação e mapeamento de falhas, rupturas, juntas de movimentação e outras estruturas geológicas que possam indicar a instabilidade do terreno;
- ✓ Na análise da topografia, como altura e inclinação de taludes, e de sua influência na drenagem e nos processos de instabilidade;
- ✓ Na dinâmica das águas superficiais e subterrâneas;
- ✓ Nos aspectos da cobertura vegetal e da proteção superficial dos taludes;
- ✓ Na delimitação das áreas que possam ser afetadas pelos movimentos de massa.

2.1.2 Levantamento Aerofotogramétrico

O levantamento aerofotogramétrico realizado por Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT ou *Drone*) obedeceu as seguintes etapas na coleta dos dados aéreos de alta resolução:

- ✓ Planejamento da missão ou do voo: onde foram definidos, previamente, os limites da área a ser mapeada, o modelo de *drone* utilizado e as características do voo, tais como, a altitude de sobrevoo, os padrões de sobreposição das imagens, entre outras.
- ✓ Preparação do Equipamento: verificação do estado de manutenção do *drone* e calibragem das câmeras e sensores, garantindo as configurações adequadas e o funcionamento correto do equipamento;
- ✓ Execução da Missão: decolagem e execução do planejamento do voo, capturando imagens a intervalos regulares de forma pré-programada.
- ✓ Processamento dos dados por *software* especializado: processo que envolve a identificação de pontos de controle e de amarração em solo, para correção de distorções e ruídos, gerando os modelos digitais do terreno (MDT) e de superfície (MDS).
- ✓ Elaboração dos produtos finais: Com base nos dados gerados, tais como, altimetria, curvas de nível e volumes de material movimentado, foram elaborados diversos produtos finais, como mapas topográficos, modelos 3D, ortofotos, entre outros, os quais, posteriormente, foram utilizados nos projetos de estabilidade desenvolvidos para cada área.

2.1.3 Critérios para Caracterização e Classificação das Áreas de Risco

Dentre os diversos tipos de movimentos de massa existentes, listados na *Tabela 1*, dois foram os processos observados e analisados na região: escorregamentos (ou deslizamentos) planares superficiais e fluxo de detritos, para os quais as atenções aqui estão voltadas.

Processo	Geometria, Material e Dinâmica
QUEDA	<ul style="list-style-type: none"> Sem planos de deslocamento Movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado Velocidades muito altas (vários m/s) Material rochoso, rolamento de matacão ou tombamento Geometria variável: lascas, placas, blocos, etc.
DESLIZAMENTOS/ ESCORREGAMENTOS	<ul style="list-style-type: none"> Poucos planos de deslocamento (externos) Velocidades médias (m/h) a altas (m/s) Pequenos a grandes volumes de materiais Geometria e materiais variáveis PLANAR: solos pouco espessos; plano de fraqueza na interface solo/rocha ROTACIONAL: solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas
FLUXO DE DETRITOS	<ul style="list-style-type: none"> Muitas superfícies de deslizamento Movimento semelhante ao de um líquido viscoso Desenvolvimento ao longo das drenagens Velocidades médias a altas Mobilização de solo, rocha, detritos e água Grandes volumes de material, extenso raio de alcance

O potencial para ocorrência de um deslizamento planar pode ser reconhecido na topografia através da avaliação da inclinação e da magnitude de uma encosta. As evidências deste processo de instabilização são refletidas em trincas no terreno, muros, paredes e pisos; depressões na superfície do solo ou pavimentos, inclinação e tombamento de árvores, muros, ou postes; ou quaisquer outros elementos que indiquem deslocamentos de massas no terreno.

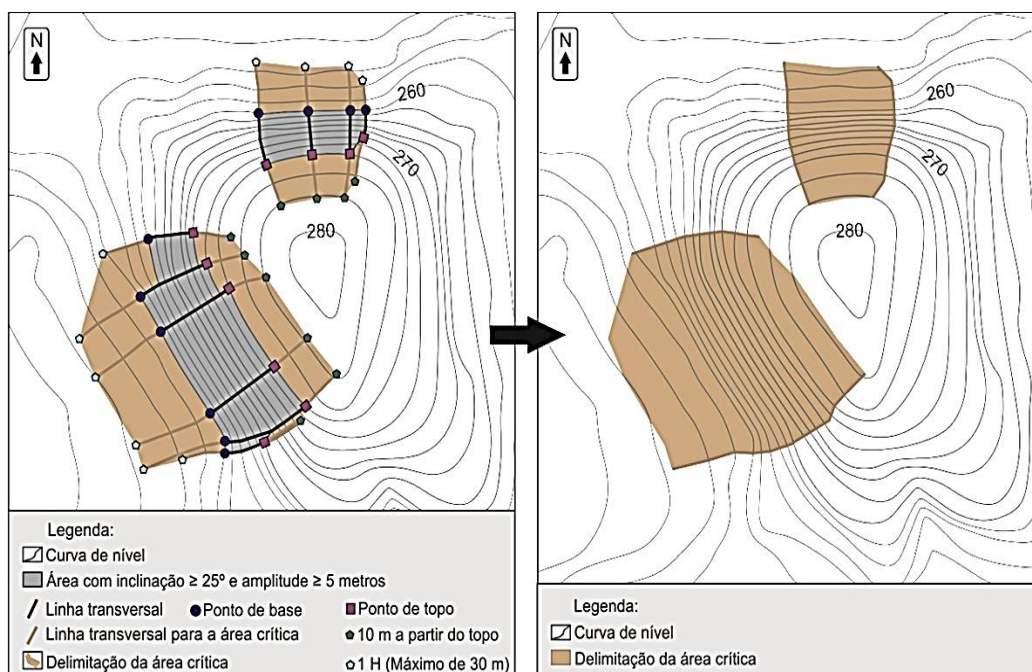


Figura 2- Esquema para definição de Área Crítica de ocorrências de deslizamento planar.

Estudos indicam que movimentos de massa deste tipo ocorrem em porções da encosta com inclinação maior ou igual a 25° e altura superior a 5 m. A metodologia define que a delimitação da área crítica, a jusante do pé da encosta, deve corresponder à altura de sua vertente, fixando uma distância máxima de 30 m. Dessa forma, tomando-se como exemplo uma encosta com altura de 20 m, deve-se delimitar uma área crítica de 20 m de distância, a jusante do pé da encosta, que corresponde à área com possibilidade de ser impactada pelo material movimentado, porém, para o caso de uma vertente com 40 m de altura, essa delimitação da área crítica deve ser fixada em 30 m, a jusante do pé da encosta.

Já a montante, na região de crista da encosta, uma porção é considerada crítica devido à possibilidade de desestabilização, por processo de desconfinamento, após a ocorrência de um deslizamento, tornando a área instável e susceptível a uma nova movimentação. Diferentemente da área a jusante, cujo perímetro é proporcional à altura da encosta, a área crítica à montante é padronizada em 10 m, a partir da delimitação de topo do trecho com inclinação igual ou superior a 25° . Conforme esquema observado na Figura 2.

Quanto ao regime de fluxo de detritos, trata-se de um processo caracterizado por um rápido deslocamento de massa fluida de alta viscosidade, composta por solo, rocha, vegetação, detritos de origem antrópica (aterro) e água.

O processo se instala em vales encaixados de relevo montanhoso, durante eventos pluviométricos intensos e de longa duração, a partir do deslocamento de colúvios ou corpos de tálus, provenientes de deslizamentos recentes, e da remobilização de antigos depósitos sedimentares acumulados ao longo dos canais de drenagem. O material transportado é então depositado, sob a forma de leques aluviais, ao atingir as porções mais aplainadas do relevo, que nos casos avaliados, corresponde à região da planície costeira.

Na identificação de bacias hidrográficas com potencial para ocorrência de fluxo de detritos são necessárias informações sobre a área da bacia de contribuição, condições de confinamento das drenagens e inclinação média do talvegue. A bacia de contribuição deve possuir área igual ou superior a 1 ha, drenagem em vale confinado e linha de talvegue com inclinação média de, no mínimo, 10° .

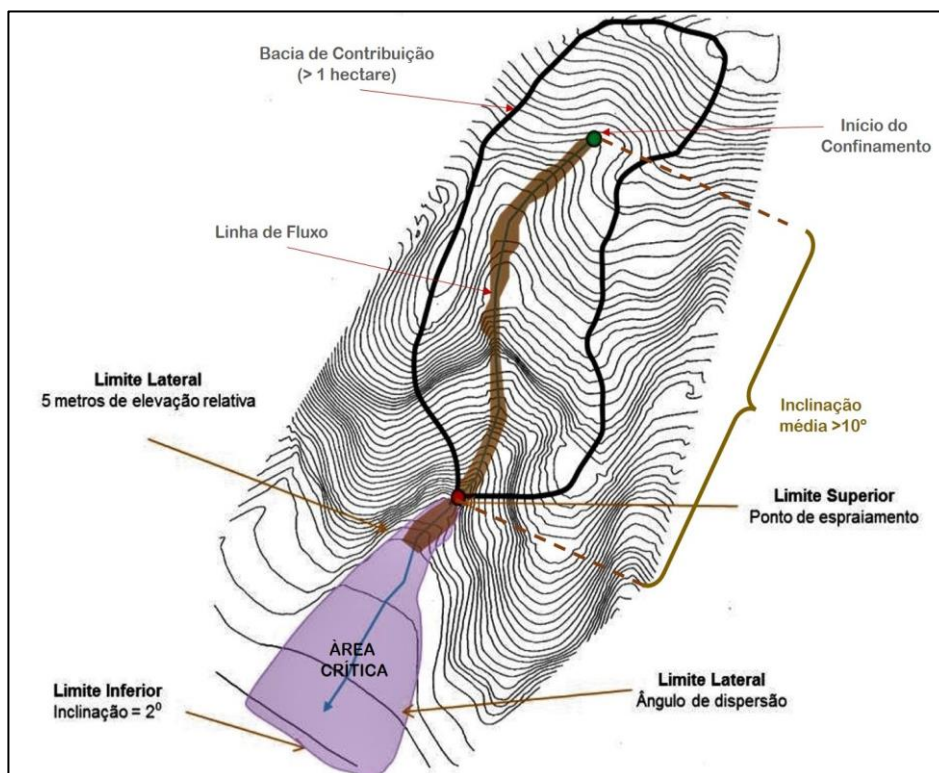


Figura 3- Croqui esquemático das áreas que compõem o regime de fluxo de detritos.

As principais estruturas que formam este tipo de bacia são apresentadas, graficamente, na Figura 3, onde são definidos os seguintes atributos notáveis, por critérios topográficos: Ponto de Início do Confinamento, Linha de Fluxo e Ponto de Espraiamento. Este último ponto notável, representa o final do confinamento do vale e início da região aplainada, que coincide com o início da deposição do leque aluvial.

No que diz respeito à definição do grau do risco ou possibilidade de ocorrência de movimentos de massa, foi adotada a classificação proposta pelo Ministério das Cidades e pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (2007) que está fundamentada nos seguintes parâmetros: (a) histórico de ocorrências, (b) identificação dos tipos de movimento gravitacional de massa, (c) delimitação da estimativa de alcance dos eventos, (d) reconhecimento de feições de instabilidade no terreno e (e) resistência das construções. As classes de risco (Tabela 2) são expressas nas cores semafóricas: verde para risco baixo (R1); amarelo para risco médio (R2); laranja para risco alto (R3); vermelho para risco muito alto (R4).

Tabela 2. Tipologia dos movimentos de massa com destaque para as ocorrências da região.

Grau de Risco	Descrição
R1 Baixo	Não há indícios de desenvolvimento de processos destrutivos em encostas e margens de drenagens. Mantidas as condições existentes, não se espera a ocorrência de eventos destrutivos.
R2 Médio	Observa-se a presença de alguma(s) evidência(s) de instabilidade (encostas e margens de drenagens), porém incipiente(s). Mantidas as condições existentes, é reduzida a possibilidade de ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.
R3 Alto	Observa-se a presença de significativa(s) evidência(s) de instabilidade (trincas no solo, degraus de abatimento em taludes, etc.). Mantidas as condições existentes, é perfeitamente possível a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas intensas e prolongadas.
R4 Muito Alto	As evidências de instabilidades são expressivas e estão presentes em grande número e/ou magnitude. Mantidas as condições existentes, é muito provável a ocorrência de eventos destrutivos durante episódios de chuvas prolongadas.

3 IMAGENS E PRODUTOS GRÁFICOS GERADOS

A seguir, são apresentadas imagens e alguns exemplos dos produtos gráficos gerados:

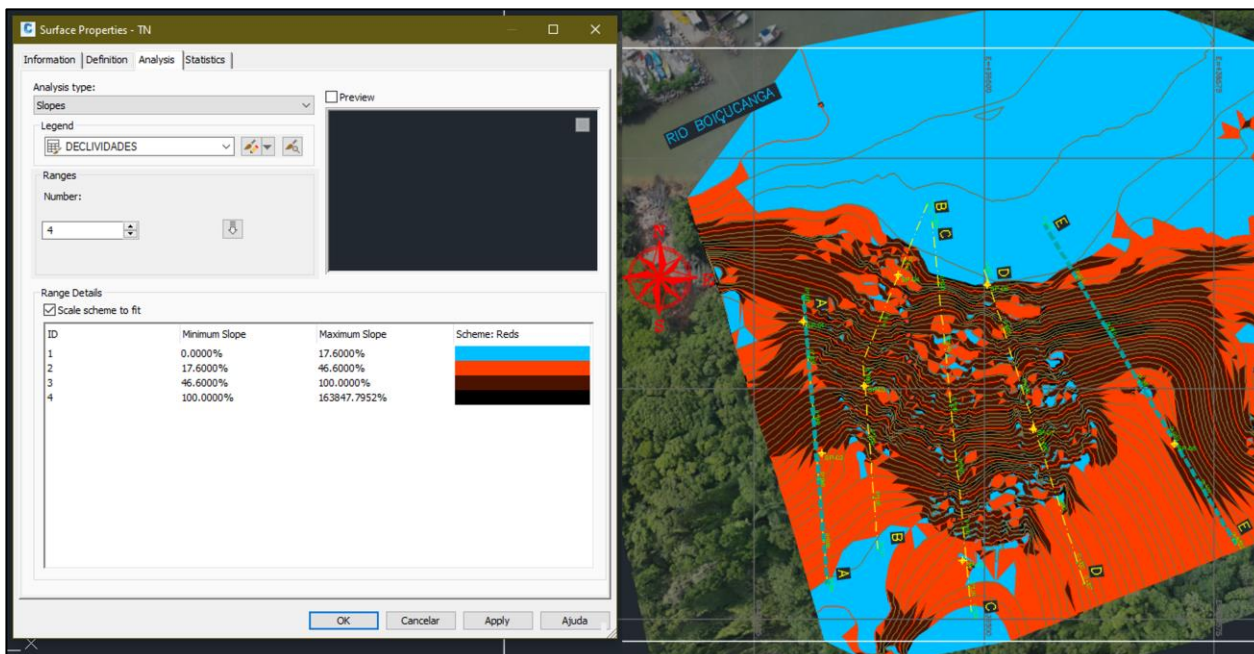


Figura 4- Mapa de declividade da encosta, os valores em percentuais e seus equivalentes em ângulos são: 0% a 17,6% = 0° a 10°; 17,6% a 46,6% = 10° a 25°; 46,6% a 100% = 25° a 45°; >100% = >45°.

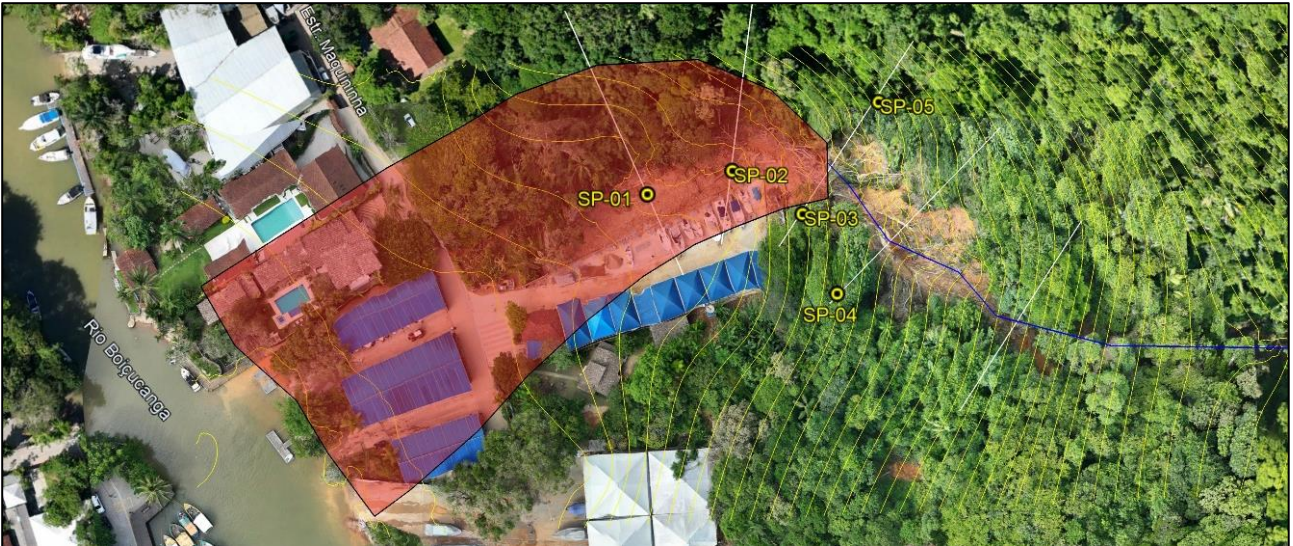


Figura 5 - Ortofoto com curvas de nível de encosta na praia de Boiçucanga. O polígono vermelho destaca a área crítica para ocorrência de atingimento por fluxo de detritos.

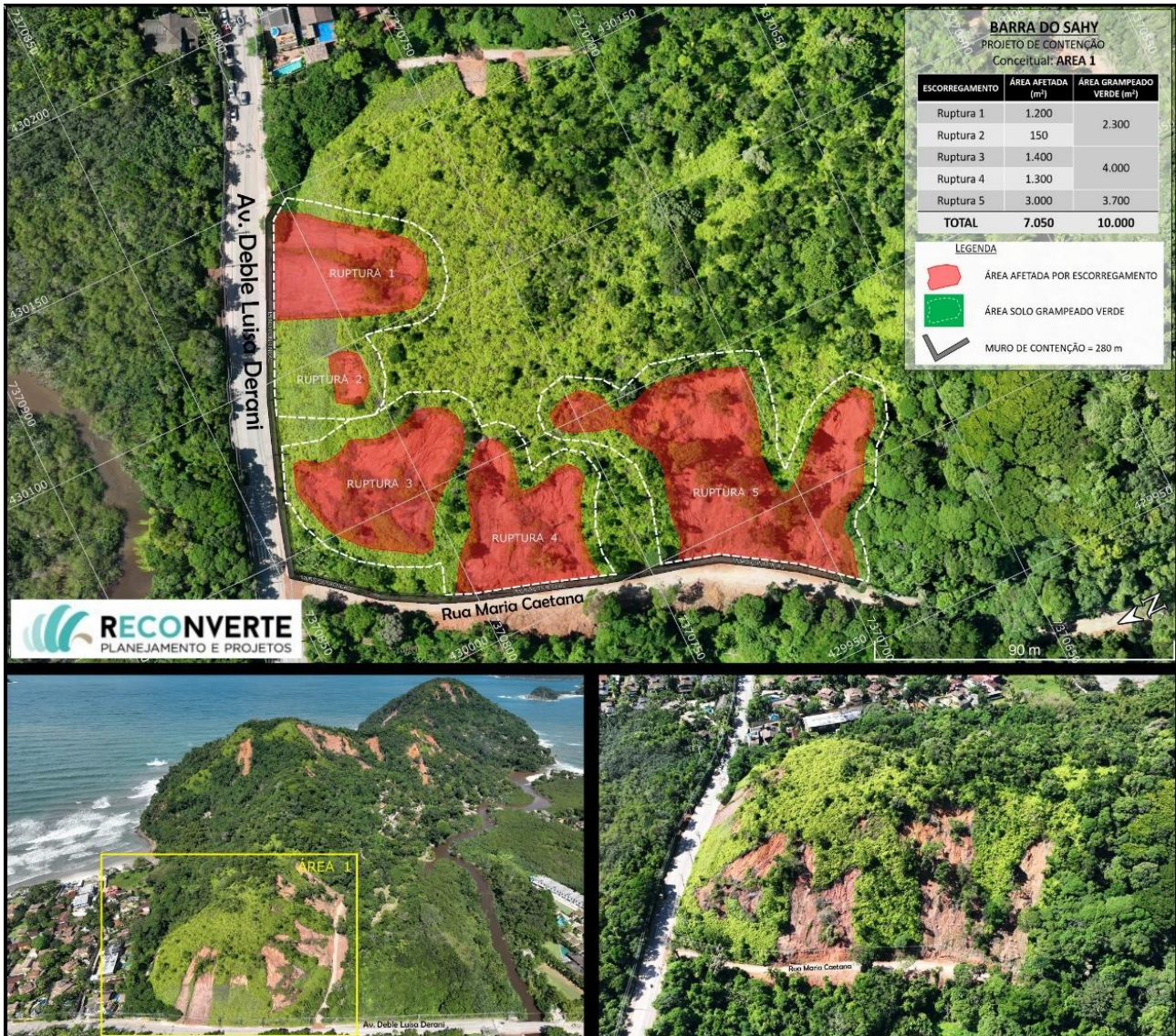


Figura 6 - Mosaico de imagens com projeto conceitual para estabilidade de encosta na Barra do Sahy.

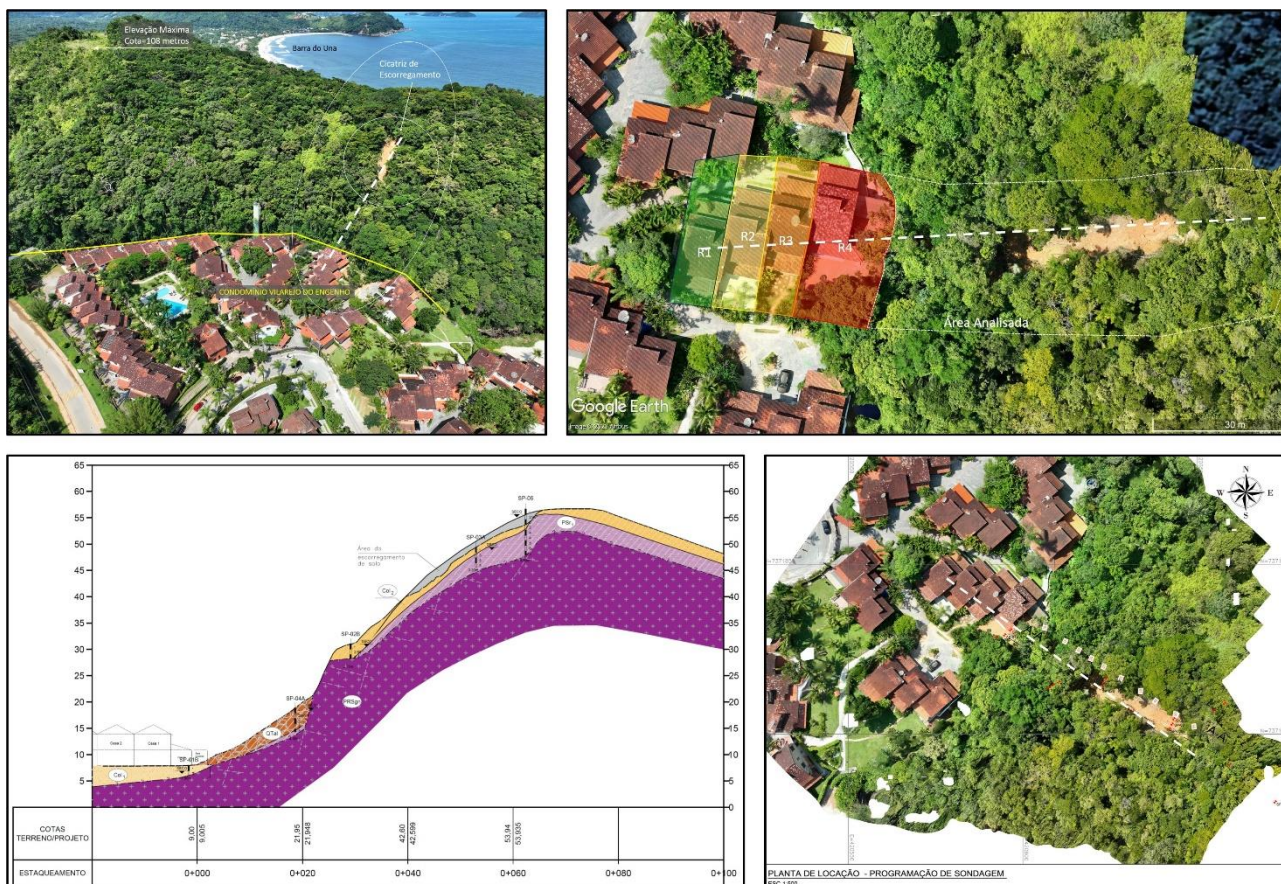


Figura 7 - Produtos gerados na avaliação de risco de deslizamento planar em encosta na Praia do Engenho.

4 CONCLUSÃO

A aerofotogrametria por *drone* demonstrou-se uma ferramenta valiosa na análise de risco geológico associado a instabilidade de encostas, podendo auxiliar o poder público a reduzir os impactos negativos de desastres naturais e a proteger vidas e propriedades, tanto de forma preventiva, através do monitoramento periódico de áreas consideradas críticas, como no planejamento de planos de emergência e projetos de estabilização de áreas impactadas. Permite a criação de mapas precisos do terreno em um curto espaço de tempo e de forma mais eficiente do que os métodos tradicionais de levantamento geológico pois ajuda a identificar padrões e tendências geológicas, que não seriam facilmente visíveis no nível do solo, possibilitando uma melhor compreensão das instabilidades naturais em larga escala.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CPRM, 2018. *Manual de Mapeamento de Perigo e Risco a Movimentos Gravitacionais de Massa – Projeto de Fortalecimento da Estratégia Nacional de Gestão Integrada de Desastres Naturais – Projeto GIDES*. (livro eletrônico): CPRM - Coordenação: Jorge Pimentel e Thiago Dutra dos Santos. – Rio de Janeiro: CPRM/SGB – Serviço Geológico do Brasil, 2018; Versão 1. 213 páginas (pdf).
- MINISTÉRIO DAS CIDADES / INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT, 2007. *Mapeamento de Riscos em Encostas e Margem de Rios*. Org.: Celso S. Carvalho, Eduardo S. Macedo; Agostinho T. Ogura. Brasília: Ministério das Cidades; IPT, 176 páginas (pdf)
- NORMA: ABNT - NBR 11682:2009. Associação Brasileira de Normas Técnicas - *Estabilidade de Encostas*. 33 páginas