

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

(TF-2021/10)
MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

SENSORIAMENTO REMOTO ATRAVÉS DE AERONAVES REMOTAMENTE
PILOTADAS (RPA) PARA APLICAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOTECNIA

Francesco Barale

Orientador: Prof. Dr. Carlos Henrique Grohmann de Carvalho
Co-Orientador: Geol. MSc. Rodolfo Pedroso Garcia

SÃO PAULO
2021

Espero deixar algo que possa ser útil para a sociedade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha mãe Ana Maria, que apesar de todas as adversidades é a maior mãe do mundo e a pessoa que me dá forças, agradeço meus irmãos e irmã. Ao Enrico, por sempre me ouvir e me dar forças nos melhores e piores momentos, a Loredana, por me ajudar a limpar a mente e focar em meus objetivos, Corrado, pelas risadas, feijoadas e festas familiares e Augusto, por cuidar da Dona Ana e do Enrico, mantendo a família unida em outro continente.

Agradeço ao Lucas e Francy, Vinícius, Ricardo e a melhor banda de classic rock da geologia, os Aerolithos me trouxeram muitas alegrias e momentos inesquecíveis. Agradeço a todos meus amigos Pamonha, Navara, Rico, Trevas, Lilo, Missanga, Kalípso, Paraná, Aqua e Gui por passarmos estes últimos anos de faculdade juntos e proporcionar boas risadas e muitas conversas. Agradeço a toda turma 59 (cinquenta e *love*) a melhor turma da geologia. Agradeço aos professores que marcaram minha história Boggiani, André Negrão, Adriana Alves, Silvio Vlach, Gergely, Ivo Karmann, Marcos Egydio, Maria Helena, Mário Campos, Miguel Basei, Patrício Muñoz, Renato de Moraes, Valdecir Janasi, Excelso Ruberti, Caetano Juliani, Edilson Pizzato, Gustavo, Gallas, Renato Paes, Veridiana, Giannini e Teodoro. Agradeço a todos os funcionários do Instituto de Geociências, galera da cantina, principalmente o Alex, galera do CEPEGE, Ideval e o pessoal do museu, a galera da biblioteca e aos motoristas que são pessoas fantásticas. Agradeço a Gláucia uma pessoa que tenho um enorme carinho e ao pessoal da Geo Supply Rodolfo, André, Lucas, Diego, Stephano e Pedro que me proporcionaram uma grande mudança e novas amizades. A todos meus familiares, obrigado.

Passei por uma provação muito grande em 2019, me divorciei e pensei em desistir da faculdade. O poço no qual estava caindo parecia não ter fim, mas descobri verdadeiros amigos nesta fase dramática, não posso deixar de agradecer ao Marcos (Marcão Superman), Carlos e sua família (meu compadre), Lucas Cervi (Cabelo), Pedro (Eskroto), Adão, Fernando (Lampião), Carlos (Guano), Nicola, Washington, Angell e Maverik, Renato (Lesma), a todos muito obrigado! Ainda que tenha sido doloroso, agradeço minha ex-esposa Daiane por me apresentar a geologia e pelo crescimento pessoal que proporcionamos um ao outro. Um agradecimento especial ao Zé Delivery que me abastece sem me julgar e a todos os criadores de aplicativos de encontros, foi realmente uma ótima ideia. Roberta, eu não canso de te ver sorrir, ao seu lado meu mundo volta a tomar forma, me deixando muito mais feliz, obrigado.

A todas as pessoas que passaram pela minha vida, quero dizer muito obrigado, mesmo as pessoas que tiveram uma passagem breve, as pessoas das quais não me importo e até aquelas que de alguma forma me machucaram. Obrigado, obrigado por me moldar, por me proporcionar experiências, por ajudar a construir quem eu sou hoje. Um homem que sempre quer ser melhor do que foi no dia anterior.

Dentro da minha humanidade,
entre erros e acertos, procurei dar o meu melhor.
De todas as vozes na minha mente uma se destacou:
“É aqui que a nova história começa.”

RESUMO

A utilização de modelos tridimensionais gerados por aerolevanteamento nas Ciências da Terra tem se consagrado e caminhado lado a lado com o avanço da tecnologia. Trata-se de uma ferramenta poderosa que hoje é utilizada em vários setores, como áreas da geologia aplicada, agricultura e engenharia com facilidade de uso e baixo custo. O objetivo deste trabalho foi gerar modelos tridimensionais de qualidade em área de barragem de rejeitos de mineração em duas datas distintas. A função dos aerolevanteamentos é de avaliar periodicamente o rebaixamento do reservatório, as ombreiras e sinais de erosão em toda estrutura da barragem. A partir dos dados obtidos foi possível avaliar a precisão e acurácia no arranjo de pontos de controle, a da variabilidade da superfície topográfica e mudanças temporais da barragem. Para geração do plano de voo e levantamento em campo foi utilizado o programa DroneDeploy. A coleta de dados contou com a mesma rotina para as duas datas, começando com a distribuição dos alvos e coleta das coordenadas com GPS de precisão (RTK - Real Time Kinematic), seguida do aerolevanteamento com o RPA DJI Phantom 4 Pro V2. O processamento dos dados foi realizado no software Pix4Dmapper que apresentou resultados satisfatórios quanto à precisão dos GSDs. Os modelos digitais de superfície, de terreno e ortomosaicos obtidos foram inseridos no software QGIS, para uma determinação das diferenças entre as duas datas dos aerolevanteamentos, como locais de erosão e de acúmulo de fluxo superficial. O método empregado é ferramenta poderosa para as inspeções visuais, e quando utilizada com critério pode ser capaz de diminuir a exposição de trabalhadores em locais de risco.

Palavras-chave: Sensoriamento remoto, geotecnia, aerolevanteamento, drone, RPA, modelo digital de superfície, modelo digital de terreno, curva de nível, ortomosaico, avaliação temporal.

ABSTRACT

The use of three-dimensional models generated by aerial surveys in Earth Sciences has become established and goes hand in hand with the advancement of technology. It is a powerful tool currently used in various sectors, such as applied geology, agriculture, and engineering, with ease of use and low cost. The objective of this work was to generate three-dimensional quality models in a mining tailings dam area on two different dates. The function of aerial surveys is to periodically assess the lowering of the reservoir, the abutments, and signs of erosion in the entire structure of the dam. From the data obtained, it was possible to evaluate the precision and accuracy in the arrangement of control points, the variability of the topographic surface, and temporal changes in the dam. DroneDeploy was used for flight planning and execution. Data collection had the same routine for both dates, starting with distributing targets and collecting coordinates with precision GPS (RTK - Real Time Kinematic), followed by aerial survey with the RPA DJI Phantom 4 Pro V2. Data processing was performed using the Pix4Dmapper software, which presented satisfactory results regarding the accuracy of the GSDs. The digital surface, terrain, and orthomosaic models were inserted into QGIS to determine the differences between the two dates of the aerial surveys, such as erosion and surface flow accumulation sites. The method used is a powerful tool for visual inspections, and when used judiciously, it may be able to reduce workers' exposure in risky places.

Keywords: Remote sensing, geotechnics, aerial survey, drone, RPA, digital surface model, digital terrain model, contour line, orthomosaic, temporal evaluation.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. ÁREA DE ESTUDO	8
3. OBJETIVOS	9
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
4.1 Geologia Regional	10
4.2 Structure from Motion - Multi View Stereo – SfM-MVS.....	11
4.3 Nuvem de Pontos	13
4.4 Modelo Digital de Superfície - MDS	13
4.5 Modelo Digital de Terreno - MDT	13
4.6 Curva de Nível	14
4.7 Ortomosaico	14
5. MATERIAIS E MÉTODOS	14
5.1 Legislação	14
5.2 Google Earth Pro	15
5.3 GPS de Precisão	16
5.4 DroneDeploy.....	17
5.5 Sobreposição de Imagens	19
5.6 Ground Sampling Distance - GSD	19
5.7 Pix4Dmapper	20
5.8 QGIS	20
5.9 Remotely Piloted Aircraft - RPA.....	20
6. RESULTADOS OBTIDOS	21
6.1 Pontos de Controle	21
6.2 Processamento de Imagens	24
6.3 Ajuste do Modelo	26
6.4 Nuvem de Pontos	29
6.5 Ortomosaico	31
6.6 Modelo Digital de Superfície - MDS	36
6.7 Modelo Digital de Terreno - MDT	38
6.8 Curva de Nível	39
6.9 Relatório de Processamento de Dados.....	41
6.10 Avaliação Temporal	45
7. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	52
8. CONCLUSÕES	55
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57

1. INTRODUÇÃO

A utilização de modelos tridimensionais gerados por aerolevantamento nas Ciências da Terra tem se consagrado e caminhado lado a lado com o avanço da tecnologia. Trata-se de uma ferramenta poderosa que hoje é utilizada em vários setores, como áreas da geologia aplicada, agricultura e engenharia e vem promovendo uma demanda por pessoas capacitadas, softwares de modelos digitais de alta resolução, com a facilidade de uso e baixo custo.

Executar a tarefa de adquirir dados confiáveis, processá-los de forma correta e criteriosa para que possam ser reproduzidos e utilizados na atividade exigida é um esforço que vem se tornando cada vez mais necessário no mercado de trabalho.

O desenvolvimento que antecede o processamento dos dados, a utilização dos programas, a realização do estudo da área de voo, seu planejamento, a localização dos pontos de controle, a solicitação do pedido de voo e a ida ao campo foi supervisionada por um geólogo da empresa onde o aluno trabalha, Geo Supply Soluções Geológicas, sediada em Belo Horizonte. Em negociação com um de seus clientes a empresa conseguiu autorização para o uso dos dados apresentados neste trabalho, com o compromisso de que seu nome e sua exata localização não fossem revelados.

O estudo trata de uma análise comparativa entre dois projetos que pretendem gerar modelos aerofotogramétricos com mesmo plano de voo, em área de barragem de rejeitos de mineração. Para este trabalho foram utilizados GPS de precisão e RPA (*Remotely Piloted Aircraft* ou Aeronave Remotamente Pilotada) *DJI Phantom 4 Pro V2*, além dos softwares *Google Earth Pro*, *DroneDeploy*, *Pix4Dmapper* e *QGIS* para produzir e analisar modelos digitais de elevação e terreno, curvas de nível e ortomosaicos.

2. ÁREA DE ESTUDO

A barragem de estudo do aerolevantamento pertence a uma mineradora onde a empresa Geo Supply Soluções Geológicas é prestadora de serviços. Foi negociado com o cliente que gentilmente concedeu a permissão para o uso dos dados, desde que o nome e sua exata localização não fossem revelados. Esta barragem de rejeito é uma das muitas barragens que a empresa presta serviços de aerolevantamento (Figura 1).

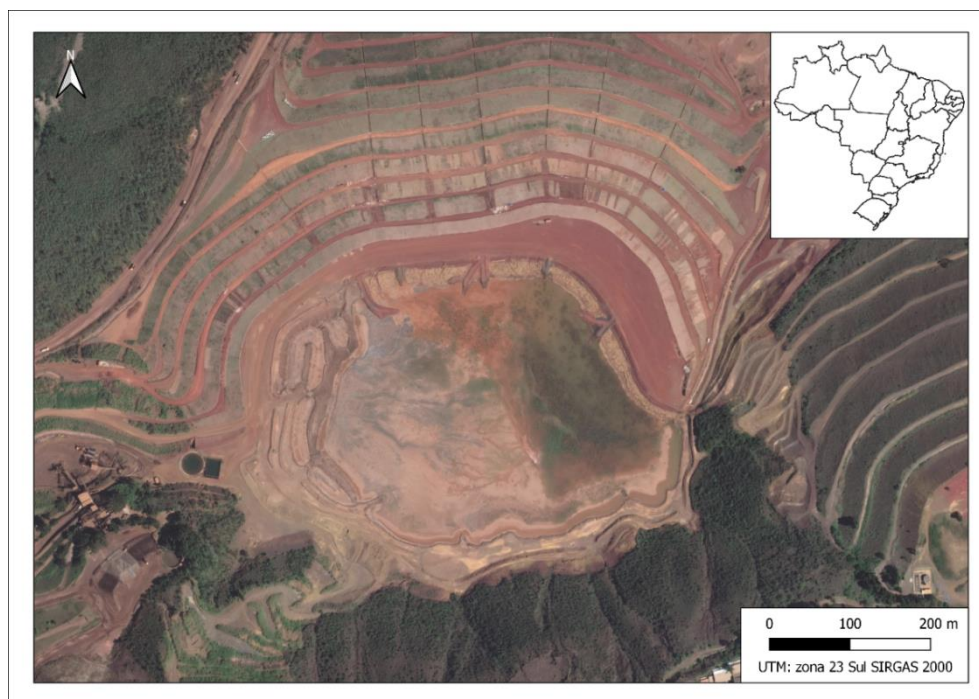


Figura 1 – Barragem de rejeitos referente ao estudo do aerolevantamento.

A barragem, da sua base até o início do reservatório possui um desnível de aproximadamente 100 metros. A cota do reservatório encontra-se aproximadamente em 1174 metros. O material depositado no reservatório é referente a rejeitos e resíduos que não têm valor comercial para a mineração de ferro da região. As ombreiras direita e esquerda sofrem com modificações devido a dinâmica da atividade mineira.

3. OBJETIVOS

Os objetivos propostos são (1) gerar modelos tridimensionais de qualidade para que seja realizada a (2) avaliação da precisão e acurácia no arranjo de pontos de controle utilizados, (3) análise das características da superfície topográfica e suas mudanças temporais, com base em dois voos, realizados em datas distintas, utilizando um único plano de voo do mesmo local.

São discutidos os seguintes resultados: Ortomosaico, Modelo Digital de Terreno - MDT, Modelo Digital de Superfície - MDS e Curvas de Nível. Os resultados foram analisados com a intenção de comparar feições para os propósitos do mapeamento da barragem. Por fim, elaborar uma análise crítica acerca de precisão e acurácia baseados no arranjo de pontos de controle.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para fundamentar a compreensão dos modelos digitais gerados, existe a necessidade de elucidar sobre as sobreposições de imagens digitais, conceitos como a criação de espaços tridimensionais, nuvens de pontos, MDS, MDT, curvas de nível e ortomosaico.

4.1 Geologia Regional

Preservando as condições de confidencialidade solicitadas pela empresa responsável da área de estudo, as descrições geológicas serão sucintas para que não seja possível sua exata localização.

Durante o período Neoarquiano-Paleoproterozóico, entre 2600 e 2000 Ma ocorria a abertura e o fechamento de uma bacia onde um pacote de rochas clásticas e químicas de 6.000 metros de espessura se formava (Dorr, 1969; Babinski *et al.*, 1991; Renger *et al.*, 1995). Separadas por uma discordância regional, Alkmim e Martins-Neto (2012) subdividiram esse pacote de rochas paleoproterozóicas em duas sequências. A sequência basal, segundo Dorr (1969) e Renger *et al.* (1995), envolvem sedimentos continentais a marinhos, podendo ser representado, segundo Schorscher (1992) e Canuto (2010), como o estágio de desenvolvimento de uma bacia de margem passiva. A sequência sobrejacente, composta pelos turbiditos, foi interpretada por Alkmim e Marshak (1998), como um depósito em leque submarino marcando a inversão da margem passiva.

A sequência sedimentar basal continental para marinha foi subdividida em:

- Rochas que representam o *rift* e as fases de transição do desenvolvimento da margem passiva (Renger *et al.*, 1995; Alkmim e Marshak, 1998), pacote de 600 metros de espessura de arenitos aluviais e marinhos contendo urânio-ouro, conglomerados e pelitos submarinhos subordinados (Simmons e Maxwell, 1961; Dorr, 1969);
- Um pacote de sedimentos marinhos que foi representado como sendo o estágio de subsidência térmica da margem passiva continental (Alkmim e Marshak, 1998), com 400 metros de espessura que inclui formações ferríferas bandadas e carbonatos (Dorr, 1969);
- Rochas siliciclásticas com carbonatos menores, interpretada como um depósito turbidítico, em leque submarino, com 450 metros de espessura de sedimentos deltaicos a marinhos rasos a profundos (Alkmim e Martins-Neto, 2012; Renger *et al.*, 1995).

Esta última representando o local de estudo com rocha carbonática, itabirito, dolomito, filito e mármore, como apresentado na figura 2.

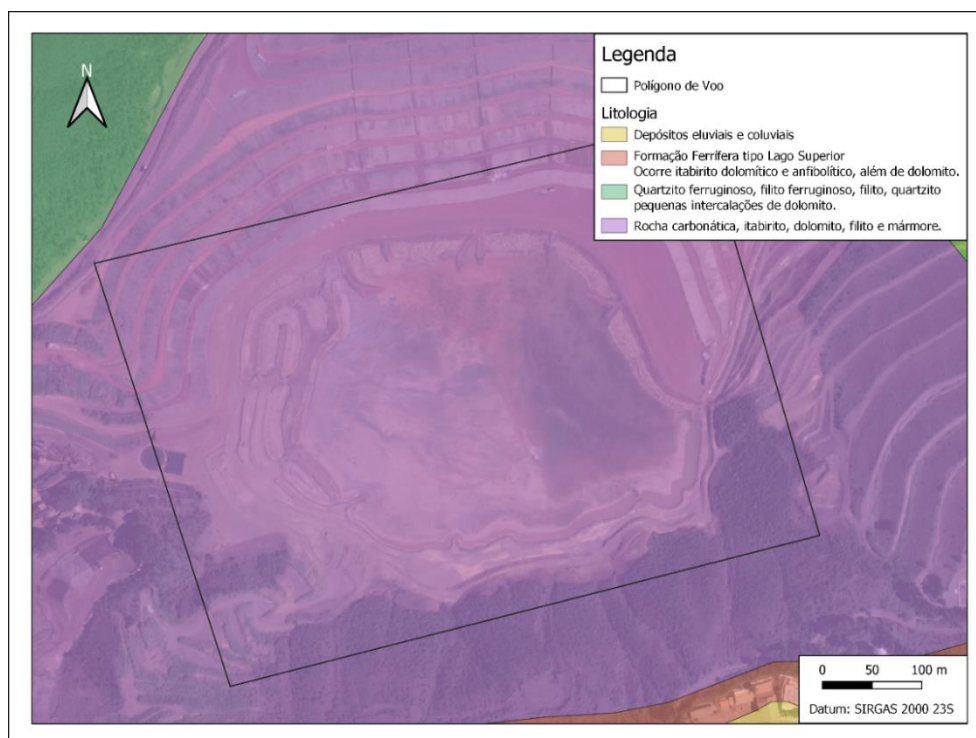


Figura 2 – Mapa de representação litológica da área de estudo.

4.2 Structure from Motion - Multi View Stereo – SfM-MVS

A utilização de imagens digitais na criação de espaços tridimensionais teve início no final da década de 1980 e desde então, os modelos vem se tornando cada vez mais complexos e automatizados por intermédio de recursos tecnológicos computacionais.

Structure from Motion - Multi View Stereo (SfM-MVS) é uma ferramenta segundo Carrivick *et al.* (2016), desenvolvida para reconstruir cenas tridimensionalmente, identificando automaticamente características de correspondência em uma coleção de sobreposições de imagens digitais 2D, ou seja, um conjunto de fotografias tiradas de diferentes posições.

O processo responsável pela geração da reconstrução da geometria tridimensional, que compõe o modelo, inicia-se com a aquisição do conjunto de imagens digitais com imageamento de intervalo, obtidas por uma única câmera em movimento ou várias câmeras em posições distintas. As imagens são rastreadas para a detecção de características de correspondência com a procura de pontos de interesse. Ao combinar as correspondências são gerados pontos chaves cujos dados de posicionamento, orientação da câmera e a geometria do cenário são calculados automaticamente a partir de posições diferenciais de múltiplos recursos combinados, permitindo uma reconstrução automática de uma cena

tridimensional (Carrivick *et al.* 2016). O fluxograma da figura 3 resume os passos do SfM-MVS:

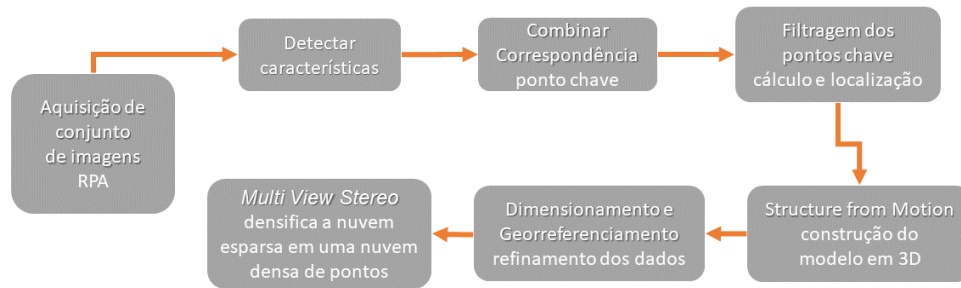


Figura 3 – Fluxograma da construção de nuvens de pontos, iniciando por um dado conjunto de imagens, detectando suas características, combinando as correspondências, filtragem, SfM, refinamento dos dados e geração da nuvem de pontos (Carrivick *et al.* 2016).

O próximo passo é o ajuste de conjunto (Figura 4), que busca e combina as características semelhantes entre as imagens, minimiza os erros, refinando os parâmetros usados na projeção e gera uma nuvem de pontos georreferenciados, a nuvem de pontos esparsa. O processo é favorecido em conjuntos de imagens com grandes áreas de sobreposições que capturem toda a estrutura tridimensional da cena, registrando diversos ângulos e posicionamentos (Westoby *et al.* 2012). A estrutura do ajuste de conjunto permite que haja a combinação de múltiplos sensores em uma estrutura com princípios de otimização (Furukawa & Hernández, 2015).

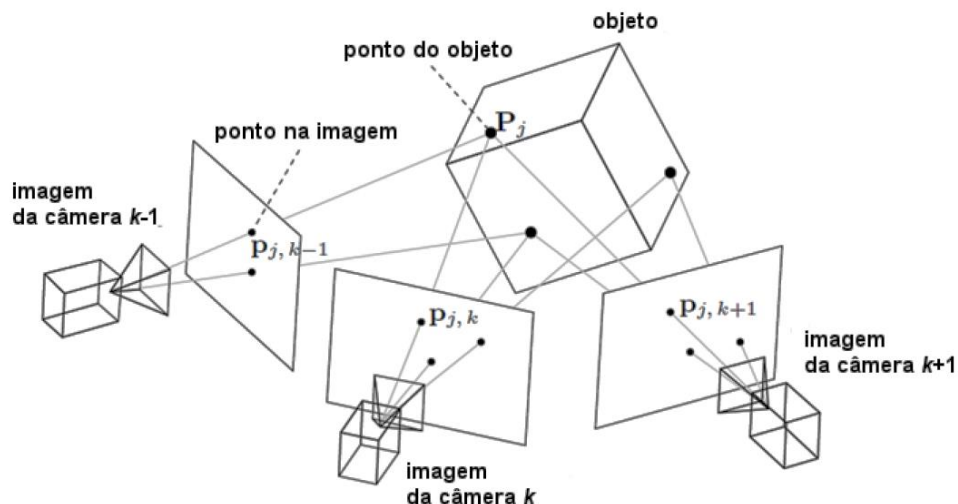


Figura 4 – Reprodução do SfM. A projeção do ponto P_j do objeto 3D registrado pela câmera em diferentes posições/tempo ($k-1$, k e $k+1$), resulta no ponto 2D rastreado $p_{j,k}$ (Kurz *et al.*, 2011).

Gerada por SfM a nuvem de pontos esparsa faz parte intermediária na produção de nuvens de pontos muito mais densas usando MVS. Em comparação com uma nuvem de pontos esparsa gerada por SfM, uma nuvem de pontos densa gerada por MVS mostra um aumento na densidade de pontos de pelo menos duas ordens de magnitude (Carrivick *et al.*, 2016).

Com a nuvem densa de pontos do MVS é possível gerar uma malha irregular triangular (Viana, *et al.*, 2016) e reconstruir completamente uma cena 3D usando um mapa de textura com coordenadas (U, V) atribuídas a cada vértice do triângulo. Esta malha geralmente é usada para calcular um Modelo Digital de Elevação (MDE ou DEM – *Digital Elevation Model*) em arquivo raster (Tavani *et al.*, 2014).

4.3 Nuvem de Pontos

Como o próprio nome já diz a nuvem de pontos é um conjunto de pontos apresentado com mesmo sistema de coordenadas. Em um sistema de coordenadas tridimensional, estes pontos são geralmente definidos por coordenadas X, Y e Z, relacionando-se geram um modelo com densidade suficiente apresentando uma cena tridimensional muito próxima a realidade. Segundo Carrivick (2016) as nuvens de pontos derivadas de SfM-MVS e as superfícies texturizadas são inerentemente multidimensionais (x, y, z, orientação do ponto, cor, textura) e transformadas com relativa facilidade em ortofotografias e MDEs.

4.4 Modelo Digital de Superfície - MDS

Os Modelos Digitais de Superfície (MDS ou MDE-Modelo Digital de Elevação usado de maneira genérica), representam a superfície obtida no aerolevantamento agregando cobertura vegetal, edificações, elementos geográficos e antrópicos (Viana, 2015).

4.5 Modelo Digital de Terreno - MDT

O termo Modelo Digital de Terreno (MDT) deve ser reservado para casos onde o modelo é produzido a partir de valores da altitude do nível do terreno (Guth *et al.*, 2021). A representação digital de uma superfície projetada para mostrar a diferença topográfica oferece informações de todo o plano altimétrico e físico do terreno, excluindo cobertura vegetal, edificações e elementos geográficos (Keim *et al.*, 1999).

4.6 Curva de Nível

A partir dos Modelos Digitais de Terreno, obtém-se as Curvas de Nível (Felgueiras e Câmara, 2001), estas podendo variar suas distâncias umas das outras, de acordo com cada trabalho de geoprocessamento, gerando isolinhas de mesma cota topográfica que retratam a declividade do terreno.

4.7 Ortomosaico

O Ortomosaico corresponde ao mosaico das ortofotos (Sopchaki *et al.*, 2018), é uma imagem georreferenciada de alta resolução derivada da sobreposição das imagens obtidas pelo RPA, que são as imagens capturadas durante o sobrevoo de uma determinada área.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho teve início com o cadastramento do aluno como piloto no DECEA, seguido do aprendizado em softwares de planejamento de voo, processamento de dados pós voo, até o manuseio de equipamentos como GPS de precisão e RPA (*Remotely Piloted Aircraft* ou Aeronave Remotamente Pilotada). A empresa Geo Supply Soluções Geológicas proporcionou o aprendizado do aluno desde o início de agosto de 2020.

5.1 Legislação

O órgão SARPAS (Solicitação de Acesso de Aeronaves Remotamente Pilotadas) faz parte do DECEA (Departamento de Controle do Espaço Aéreo) do Ministério da Defesa, trata-se de um *link* com a Força aérea Brasileira para solicitar acesso ao espaço aéreo em que se deseja voar. Um ponto importante trata-se de realizar os pedidos de voos, uma vez que o espaço aéreo apresenta uma demanda de diversos tipos de uso como por exemplo helicópteros, voos comerciais e ultraleves, dessa forma evitando conflito e minimizando o risco com qualquer outra aeronave ou usuário. Além disso, o portal informa quais são as regras, reúne a legislação vigente e orienta para que se faça operações seguras de voo.

Para iniciar um voo com RPA (*Remotely Piloted Aircraft* ou Aeronave Remotamente Pilotada) é necessário ser cadastrado no DECEA e cadastrar o piloto. Existe um seguro obrigatório chamado RETA (Responsabilidade Civil do Explorador ou Transportador Aéreo), que se faz para depois solicitar um pedido de voo no SARPAS seguindo sempre as regras da legislação vigente (Figura 5).

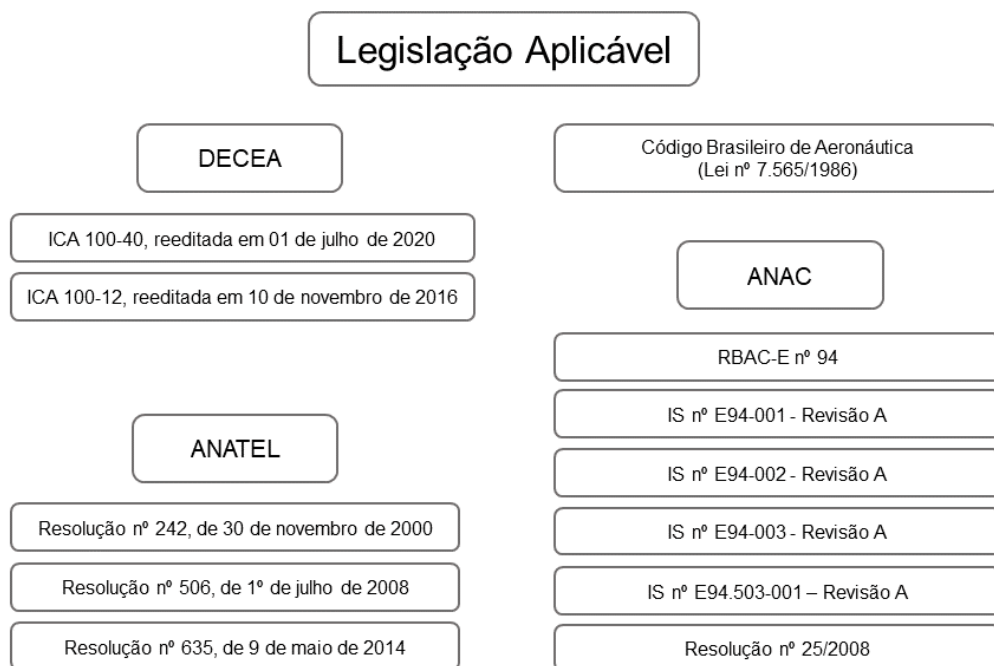


Figura 5 – Legislações que se aplicam ao uso de RPAs (*Remotely Piloted Aircraft* ou Aeronave Remotamente Pilotada).

5.2 Google Earth Pro

O *Google Earth Pro* permite viajar virtualmente pelo nosso planeta, dispondo de uma série de ferramentas. As mais usadas em um projeto de aerolevantamento são a adição de marcadores, geração polígonos da região do voo e verificação da topografia, além da visualização de estradas para acessar a área do aerolevantamento (<https://about.google/>).

Utilizando o programa em escritório realizou-se o planejamento para definição do polígono, das posições dos alvos e equipamentos em campo, viabilidade e logística. Os alvos foram distribuídos dentro do polígono levando em consideração a visualização dos elementos de interesse, acessos e possíveis pontos de decolagem, desníveis de elevação e possíveis obstáculos como árvores, edificações, linhas de transmissão, torres de telefonia e montanhas (Figura 6).



Figura 6 – Polígono editado no programa *Google Earth Pro* referente a área do aerolevanteamento com pontos de controle previamente demarcados.

5.3 GPS de Precisão

Foram distribuídos alvos em lona com cores preto e branco, numerados, com dimensões 1x1m, retirado as coordenadas com o GPS de precisão (RTK - *Real Time Kinematic*). O equipamento conta com baterias, devidamente carregadas, um tripé para montar a base do RTK (Figura 7) e um monopé com suporte para o *rover* e coletora de coordenadas (Figura 8).

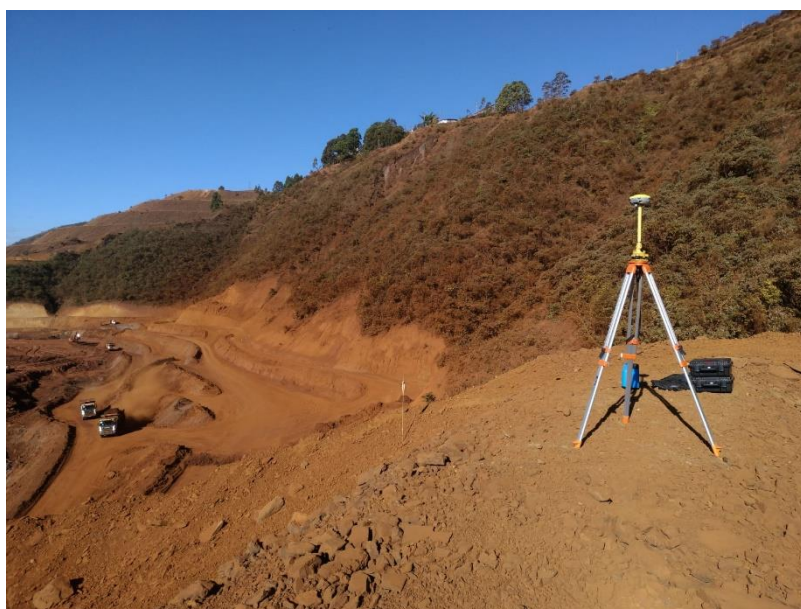


Figura 7 – Base do GPS de precisão – RTK, ao fundo visão da movimentação de caminhões na barragem.



Figura 8 – Coletando as coordenadas dos pontos de controle na barragem de rejeitos utilizando RTK, alvo preto e branco com medidas de 1x1 metro.

O GPS de precisão requer uma correção nos dados pelo PPP (Posicionamento por Ponto Preciso), esta correção é realizada gratuitamente no site do IBGE (ibge.gov.br em Serviço online para pós-processamento de dados GNSS), necessário para uma ter uma boa precisão referenciadas ao SIRGAS2000 (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas). O Sistema de Posicionamento Global por Satélite (GNSS), funciona enviando as informações de correção da posição em tempo real para um receptor *rover*, dessa forma obtendo precisão dos pontos de controle da área de estudo.

5.4 DroneDeploy

O *DroneDeploy* é um aplicativo de voo automatizado que permite criar projetos e gerenciar voos. Este aplicativo permite importar polígonos gerados no *Google Earth Pro* agilizando o processo de criação de projetos. Em campo pode ser acessado por aplicativo no celular (sistemas *Android* e *iOS*) e em escritório pelo site da própria empresa (<https://www.dronedeploy.com/about/>).

O aplicativo foi utilizado em escritório na plataforma *web* para geração do plano de voo. Posteriormente utilizado em um celular com sistema *android* para realização do levantamento em campo. A figura 9 mostra como são apresentadas as configurações da plataforma que tem como idioma a língua inglesa.

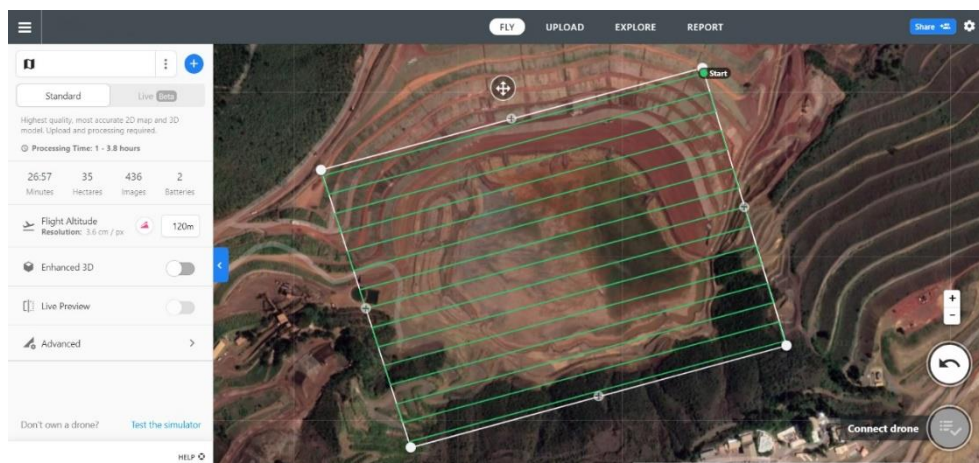


Figura 9 – Planejamento de voo utilizando o software *DroneDeploy*, janela a esquerda apresenta algumas configurações (idioma em inglês) como: tempo de voo, quantidades de imagens calculadas para registro e número de baterias que serão utilizadas, esses números são atualizados conforme o tamanho do polígono editado.

Na aba de *Advanced Settings* ou configurações avançadas (Figura 10) é possível editar as sobreposições laterais e frontais (*Front*, *Slide Overlap*), rotacionar o polígono para posicionar o ponto de partida do voo (*Flight Direction*), controlar a velocidade (*Mapping Flight Speed*), e indicar quantos pontos de passagens são necessários para o planejamento (*Waypoints*). Também é possível utilizar algumas configurações como evasão de obstáculos (*Obstacle Avoidance*), apresentar mapa existente (*Show Existing Map*) e escolher a câmera fotográfica correta que acompanha o RPA (*Planning Camera*).

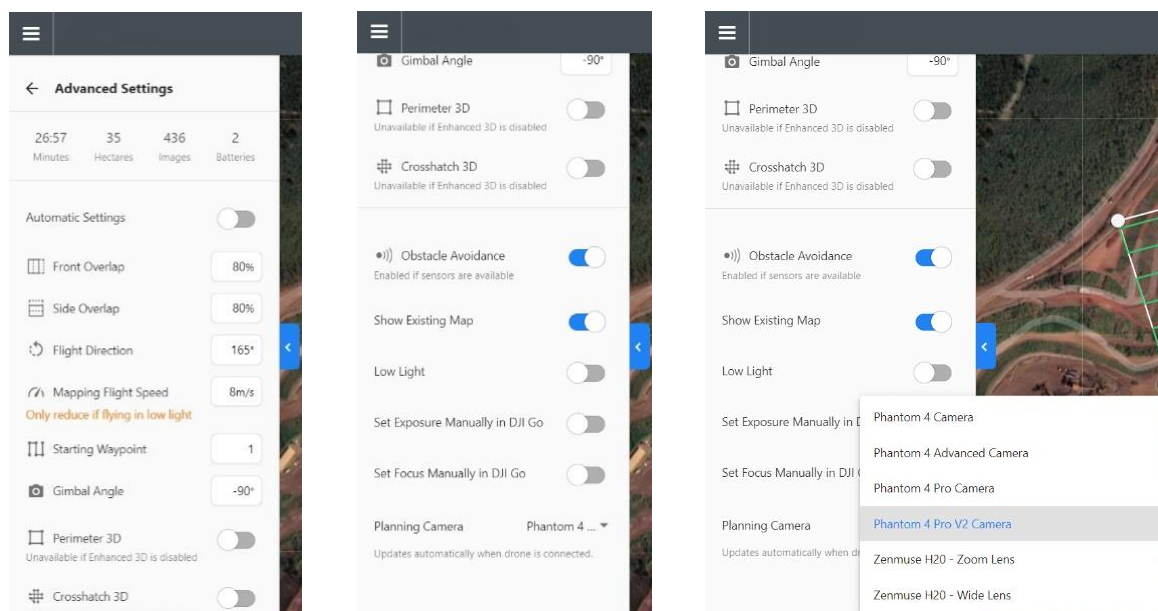


Figura 10 – Aba de configurações avançadas (*advanced settings*) do aplicativo *DroneDeploy*.

5.5 Sobreposição de Imagens

Os profissionais da empresa Geo Supply possuem vasta experiência em aerolevantamentos. Devido a esta experiência é utilizada uma sobreposição entre as imagens de 80% frontal por 80% lateral, sendo adequada para o propósito do trabalho, para geração do ortomosaico e avaliação temporal. A câmera permaneceu em modo nadir, a velocidade do voo de 8m/s, a área total foi calculada pelo aplicativo com um total de 35 hectares (Figura 11).

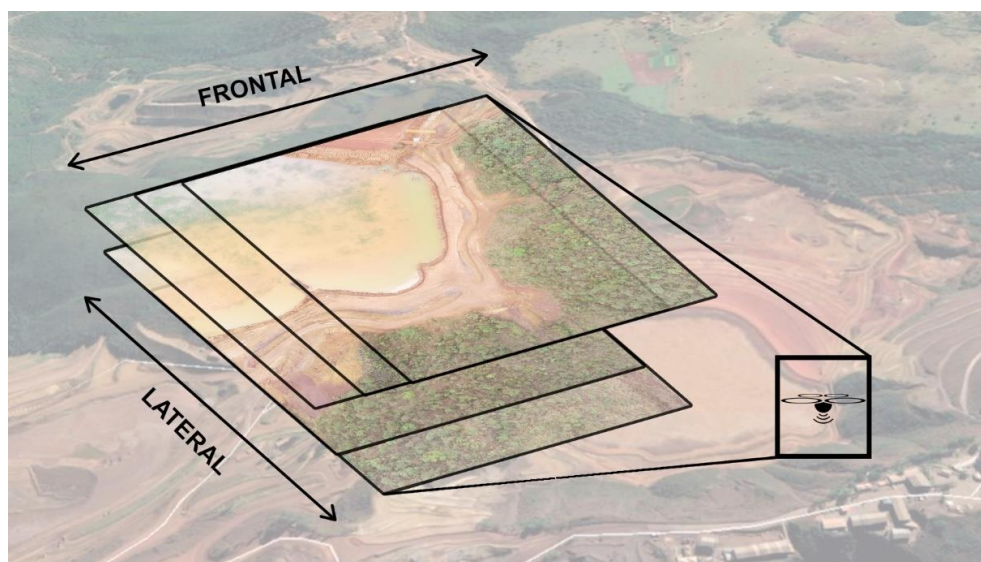


Figura 11 – A figura reproduz de forma didática a realização das sobreposições, lateral 80%, frontal 80%.

5.6 Ground Sampling Distance - GSD

O GSD – *Ground Sampling Distance* ou Distância de Amostragem do Solo é a distância entre dois centros de pixels (X e Y) consecutivos medidos no solo (Figura 12), ele é relacionado à altura do voo, quanto maior a altitude do voo, maior o valor do GSD.

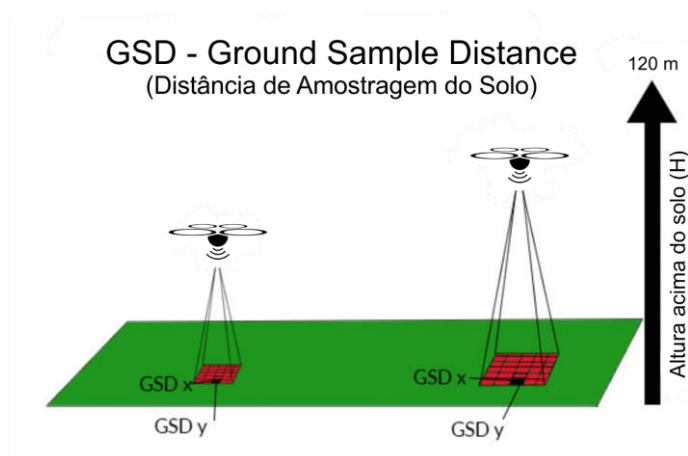


Figura 12 – Quanto maior for o GSD, menor será a resolução espacial da imagem e menos detalhes visíveis. Por exemplo, um GSD de 5 cm significa que um pixel na imagem representa linearmente 5 cm no solo ($5 \times 5 = 25 \text{ cm}^2$).

5.7 Pix4Dmapper

O *Pix4Dmapper* é um dos softwares desenvolvidos pela empresa *Pix4D*, ele utiliza uma série de algoritmos, os quais não são livres ou de código aberto. São algoritmos de fotogrametria e visão computacional para transformar imagens RGB, em mapas e modelos 3D. Este software permite processar os dados do aerolevanteamento e gera ortomosaicos, MDS, MDT e curvas de nível, ao final apresenta um documento do processamento dos dados (<https://www.pix4d.com/about-us>).

5.8 QGIS

O QGIS é um aplicativo profissional de Sistema de Informação Geográfica (GIS) livre e de código aberto (*Free Open Source Software* - FOSS), sendo um projeto inicial da *Open Source Geospatial Foundation* (OSGeo). Ele permite criar, editar, visualizar, publicar e analisar as informações geoespaciais (https://QGIS.org/pt_BR/site/about/index.html).

5.9 Remotely Piloted Aircraft - RPA

Para a coleta de dados foi utilizada um RPA - *Remotely Piloted Aircraft* ou Aeronave Remotamente Pilotada, modelo *DJI Phantom 4 Pro V2* (Figura 13), com uma câmera acoplada na parte inferior, lente 8,8mm (equivalente a 24mm no formato 35mm) e recursos em modo automático: abertura (entre f/2.8-f/11), ISO (100 até 3200) e velocidade de disparo (obturador entre 8-1/2000 segundos), além de baterias carregadas e cartão de memória.



Figura 13 – RPA em funcionamento, *DJI Phantom 4 Pro V2*. Voo realizado no período da manhã.

Para obter melhores imagens do sobrevoo a intensidade de luz é crucial, o sol do meio-dia é muito forte, pode deixar as fotos estouradas e sombras duras, dificultando a etapa de classificação da nuvem de pontos. O horário recomendado para dias com muito sol varia no período da manhã até antes do meio-dia, também pode ser realizado no período da tarde, a partir das 15:30h, quando as sombras estão suavizadas.

Enquanto ocorre o aerolevanteamento uma pessoa acompanha o percurso do voo no aplicativo do celular, tendo em mãos o controle remoto, enquanto a outra pessoa permanece com atenção no RPA utilizando binóculos, para o caso de alguma emergência. Ao final do aerolevanteamento todos os equipamentos são recolhidos e a próxima etapa é o processamento dos dados realizados em escritório.

6. RESULTADOS OBTIDOS

Os dados processados correspondem aos dias 13 de agosto e 22 de outubro de 2020.

6.1 Pontos de Controle

As figuras a seguir apresentam os resultados da diferença elipsoidal das coordenadas em SIRGAS 2000 em função do tempo, conforme o tempo avança a linha azul deixa de oscilar e começa a se estabilizar. O desvio padrão em função do tempo que representa a confiabilidade do processamento, não a exatidão da coordenada, conforme o tempo avança a linha vermelha tende a se estabilizar. As figuras 14,15 e 16 referem-se aos dados de 13 de agosto e as figuras 17, 18 e 19 são referentes aos dados de 22 de outubro.

13 de agosto de 2020

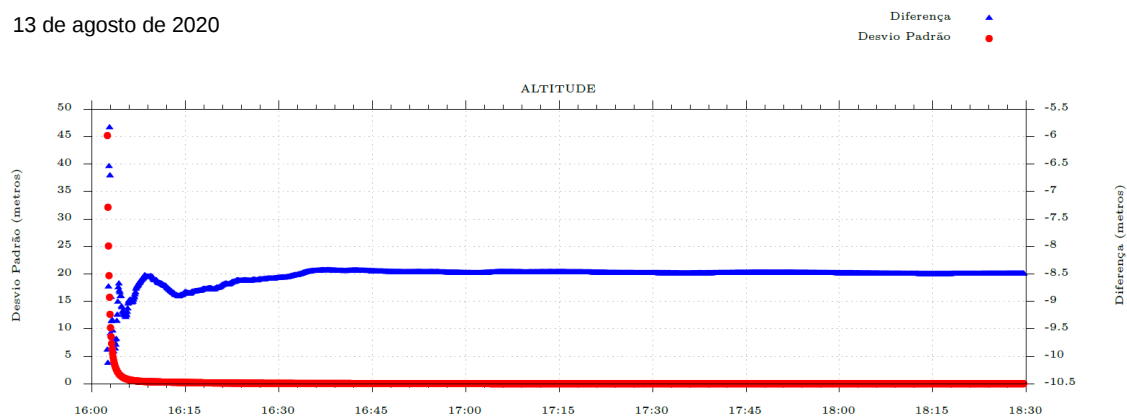


Figura 14 – Gráfico de correção da altitude processado pelo IBGE, em azul tempo decorrido pela diferença, em vermelho tempo decorrido pelo desvio padrão.

13 de agosto de 2020

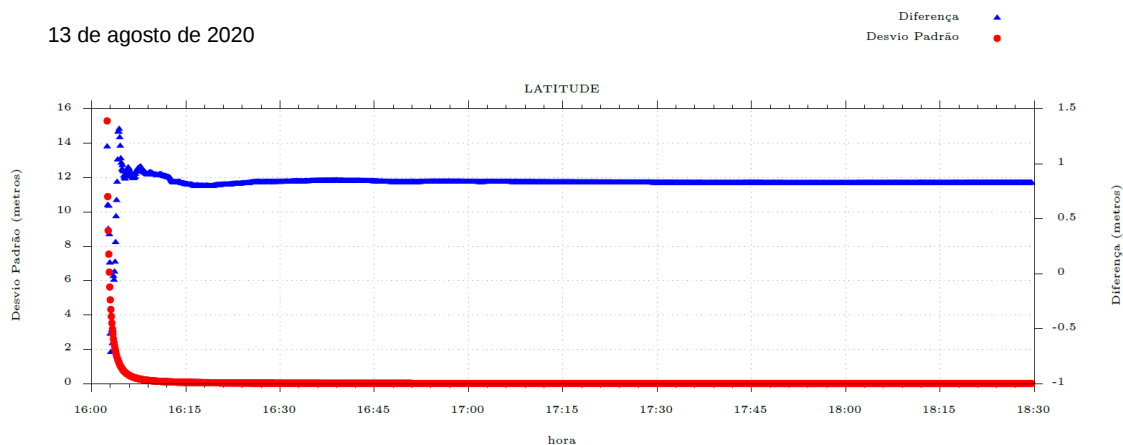


Figura 15 – Gráfico de correção da latitude processado pelo IBGE, em azul tempo decorrido pela diferença, em vermelho tempo decorrido pelo desvio padrão.

13 de agosto de 2020

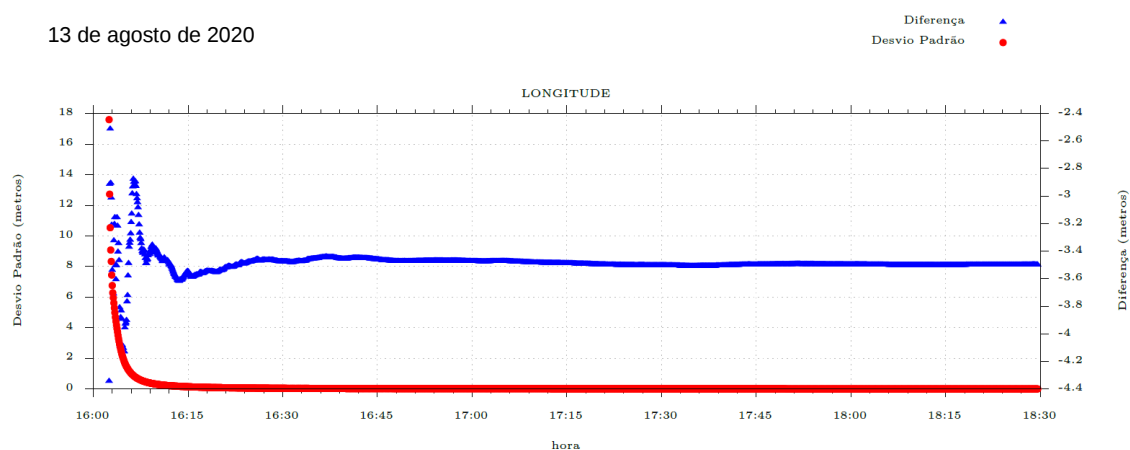


Figura 16 – Gráfico de correção da longitude processado pelo IBGE, em azul tempo decorrido pela diferença, em vermelho tempo decorrido pelo desvio padrão.

22 de outubro de 2020

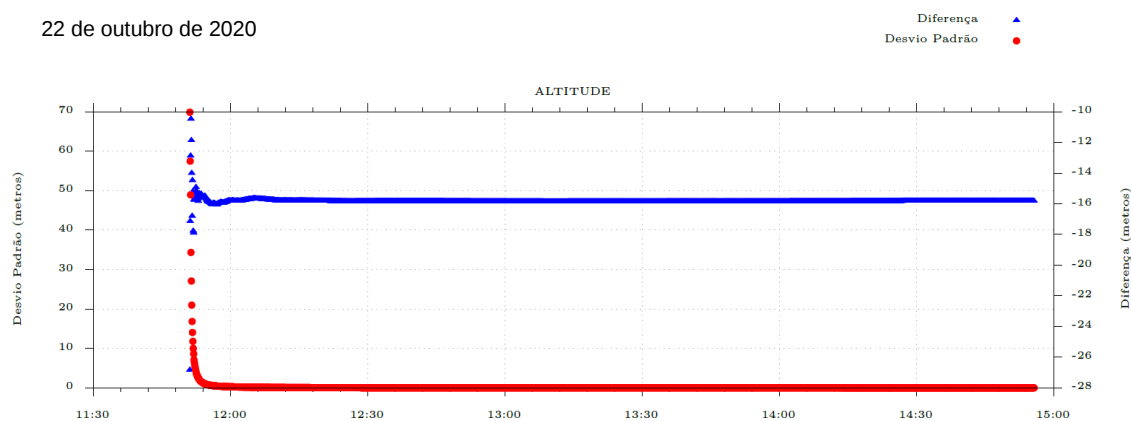


Figura 17 – Gráfico de correção da altitude processado pelo IBGE, em azul tempo decorrido pela diferença, em vermelho tempo decorrido pelo desvio padrão.

22 de outubro de 2020

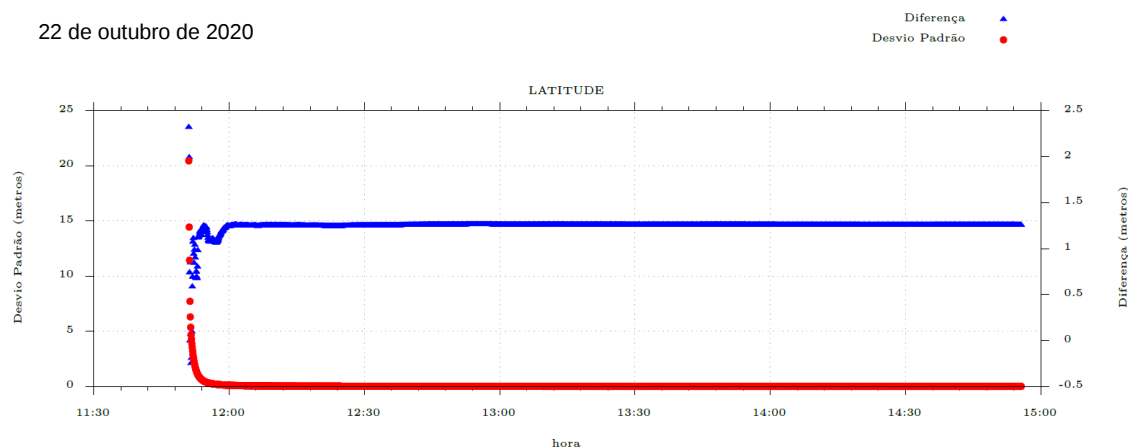


Figura 18 – Gráfico de correção da latitude processado pelo IBGE, em azul tempo decorrido pela diferença, em vermelho tempo decorrido pelo desvio padrão.

22 de outubro de 2020

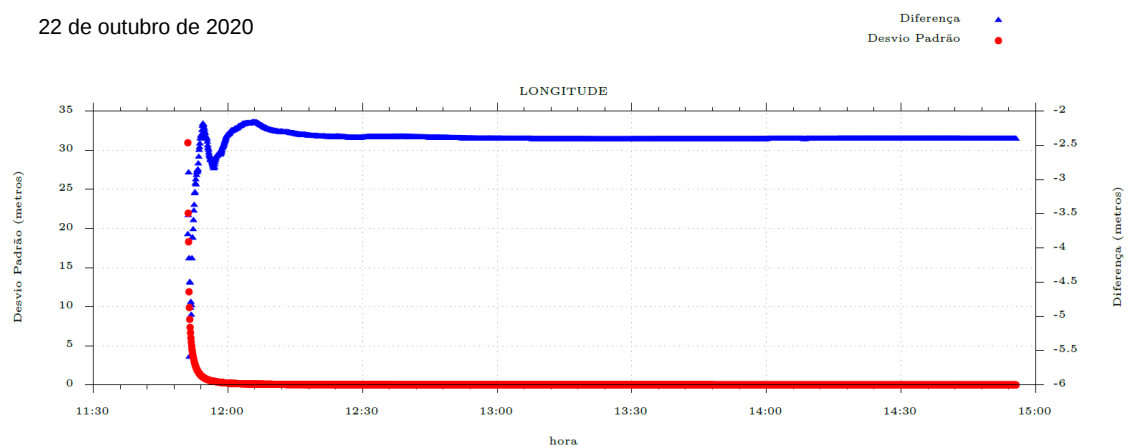


Figura 19 – Gráfico de correção da longitude processado pelo IBGE, em azul tempo decorrido pela diferença, em vermelho tempo decorrido pelo desvio padrão.

6.2 Processamento de Imagens

As imagens dos voos foram processadas utilizando o software *Pix4Dmapper*. O programa foi configurado para iniciar o primeiro passo do processamento que verifica, calibra e sobrepõe as imagens gerando assim a nuvem de pontos 3D. Posteriormente a nuvem de pontos é utilizada para confecção do ortomosaico, modelo digital de superfície (MDS), modelo digital de terreno (MDT) e curvas de nível. O processamento dos dados dos dias 13 de agosto e 22 de outubro de 2020, indicou sobreposição satisfatória de fotografias, como são mostradas a seguir (Figuras 20, 21, 22 e 23).

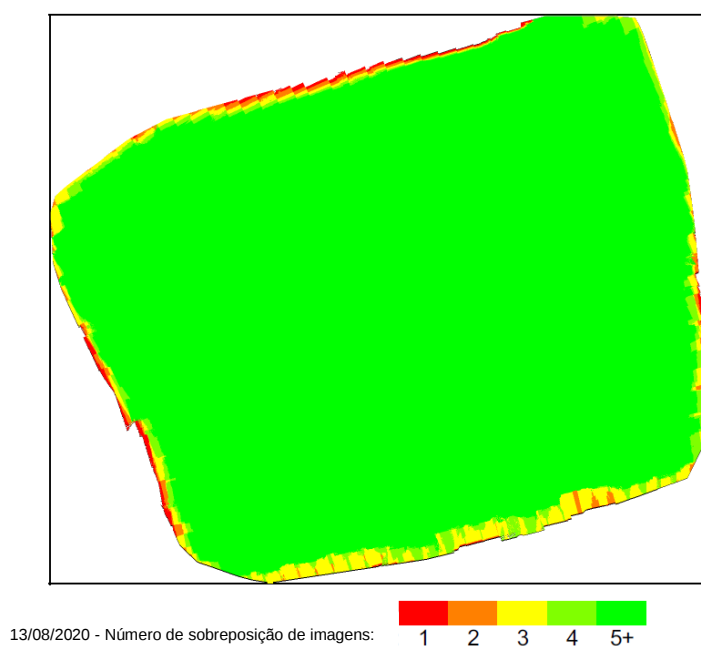


Figura 20 – Número de sobreposição de imagens de 13 de agosto, calculadas para cada pixel do ortomosaico. Vermelho, laranja e amarelo indicam baixa sobreposição, em verde uma sobreposição satisfatória.

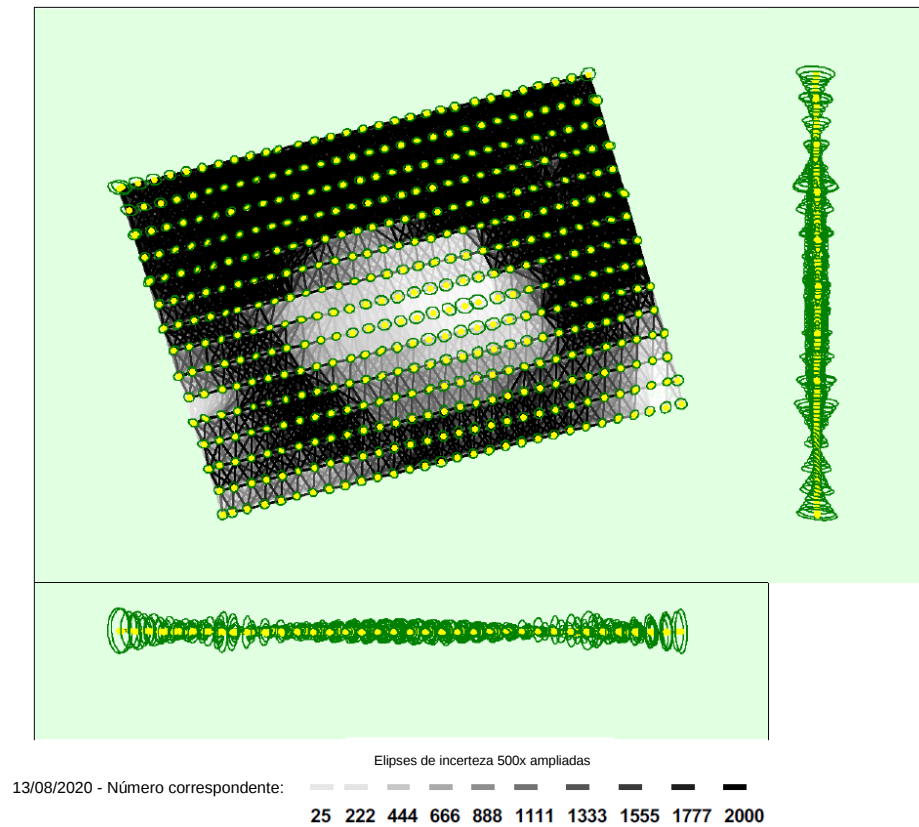


Figura 21 – Posição e número entre as imagens correspondentes dos dados de 13 de agosto. As elipses verdes apresentadas ao lado e abaixo representam a incerteza relativa da posição da câmera. Quanto mais claro, menos imagens correspondentes no processamento.

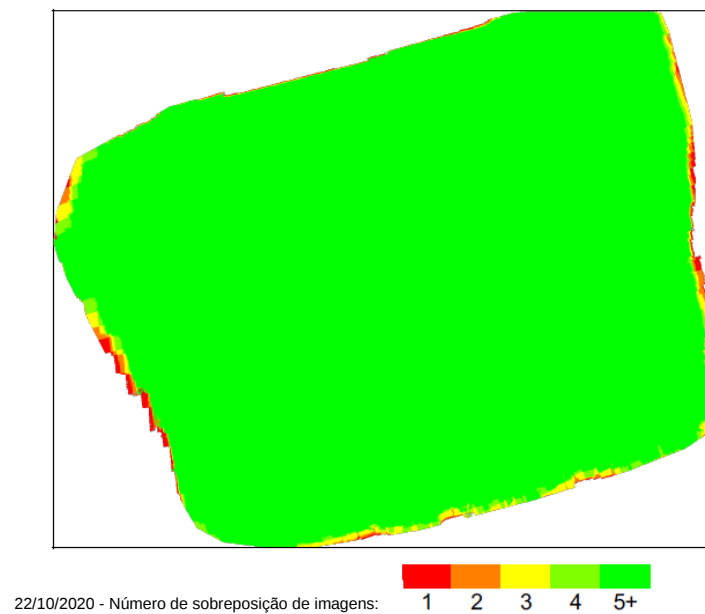


Figura 22 – Número de sobreposição de imagens de 22 de outubro, calculadas para cada pixel do ortomosaico. Vermelho, laranja e amarelo indicam baixa sobreposição, em verde uma sobreposição satisfatória.

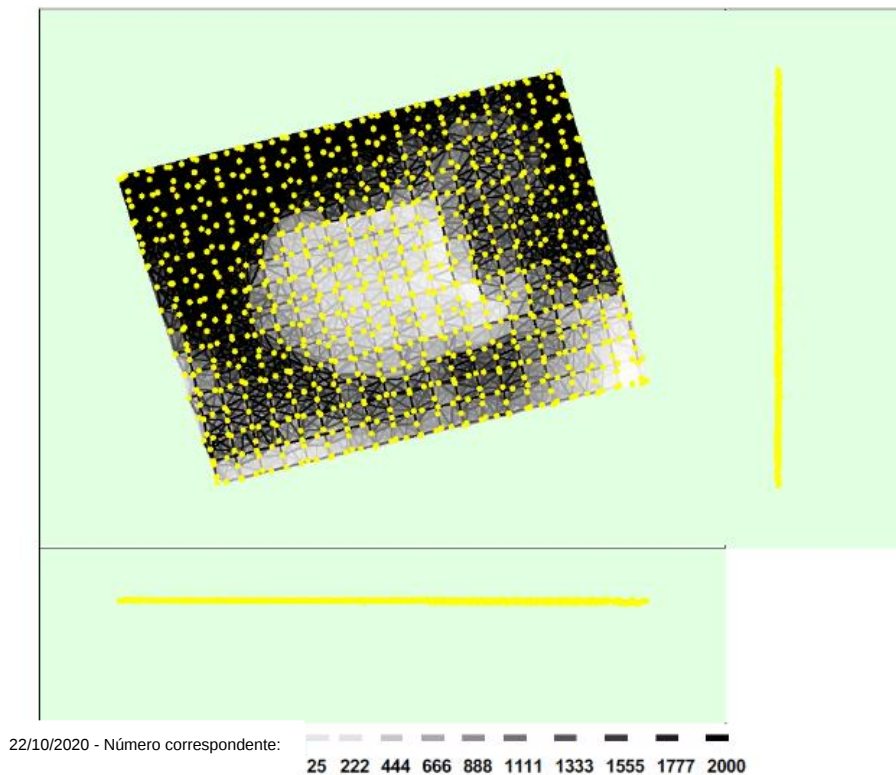


Figura 23 – Posição e número entre as imagens correspondentes dos dados de 22 de outubro. Quanto mais claro, menos imagens correspondentes no processamento.

6.3 Ajuste do Modelo

No processamento do *Pix4Dmapper* os centros dos pontos de controle (centros dos alvos postos em campo), são marcados em todas as imagens que aparecem aquele determinado alvo, conhecido como ajuste do modelo. As tabelas 1 e 2 trazem informações sobre as coordenadas de X, Y, Z, indicando a posição inicial do GCP adquirida com o RTK. Duas informações que devem ser observadas com maior atenção nessa tabela, o erro teórico e o erro na posição inicial, que são calculados após a primeira etapa de processamento, fornecendo uma boa estimativa de precisão do modelo.

O erro teórico sendo baixo, significa que o elipsoide de erro para esse GCP específico é pequeno, de modo que há uma boa precisão relativa, se for alto indica que a precisão relativa não é tão boa. O erro para a posição inicial do GCP fornece a diferença entre a posição inicial do GCP e a calculada em cada direção X, Y, Z. Se o erro for baixo, significa que o projeto tem uma boa acurácia absoluta, enquanto se for alto indica problemas com o georreferenciamento.

Tabela 1 – Tabela resumida demonstra como os dados são apresentados na figura 24 de 13 de agosto, idioma inglês devido a configuração do programa *Pix4Dmapper*, seguido de tradução.

Type (Tipo):	3D GCP
X (m):	593816.979
Y (m):	7777955.001
Z (m):	1183.517
Nº Marked Images (Imagens Marcadas):	27
Horizontal Accuracy (Precisão horizontal)(m):	0.020
Vertical Accuracy (Precisão vertical)(m):	0.020
Theoretical Error S (Erro Teórico)(X,Y,Z)(m):	0.002, 0.002, 0.004
Max.Orthogonal Ray Distance D (Máxima Distância do Raio Ortogonal)(X,Y,Z)(m):	0.005, 0.024, -0.006
Error to GCP Initial Position (Erro na Posição Inicial do GCP)(m):	0.013, -0.015, 0.002

A figura 24 de 13 de agosto apresenta um ponto de controle como exemplo, presente na nuvem densa de pontos 3D, as informações ao lado, resumidas na tabela 1, referem-se as coordenadas do ponto inicial em X, Y, Z, acurácia/precisão na horizontal e vertical, número de imagens referentes aquele determinado ponto, erro teórico e o erro da posição inicial do GCP.

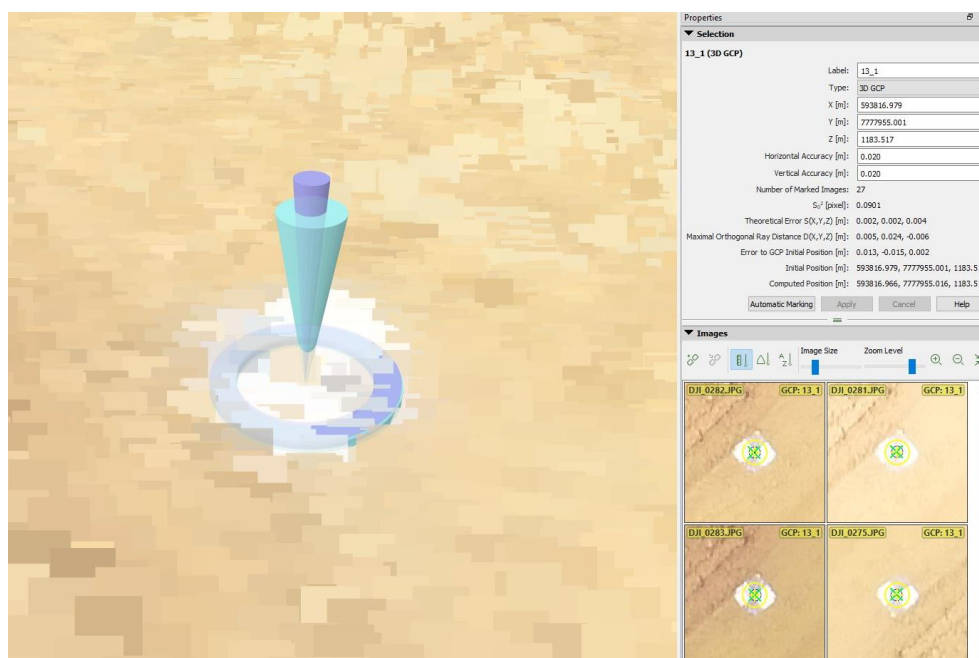


Figura 24 – Pontos de controle (GCP) da nuvem densa de pontos 3D, 13 de agosto. A direita as informações do tipo de ponto e suas coordenadas, abaixo os GCPs marcados nas fotos. Idioma inglês do programa *Pix4Dmapper*.

Tabela 2 – Tabela resumida demonstra como os dados são apresentados na figura 25 de 22 de outubro, idioma inglês devido a configuração do programa *Pix4Dmapper*, seguido de tradução.

Type (Tipo):	3D GCP
X (m):	593800.435
Y (m):	7777972.391
Z (m):	1182.273
Nº Marked Images (Imagens Marcadas):	53
Horizontal Accuracy (Precisão horizontal)(m):	0.020
Vertical Accuracy (Precisão vertical)(m):	0.020
Theoretical Error S (Erro Teórico)(X,Y,Z)(m):	0.002, 0.002, 0.005
Max.Orthogonal Ray Distance D (Máxima Distância do Raio Ortogonal)(X,Y,Z)(m):	0.021, 0.059, 0.008
Error to GCP Initial Position (Erro na Posição Inicial do GCP)(m):	-0.028, 0.007, 0.005

A figura 25 de 22 de outubro apresenta um ponto de controle como exemplo, presente na nuvem densa de pontos 3D, as informações ao lado referem-se aos valores de coordenadas do ponto inicial em X, Y, Z, resumida na tabela 2, número de imagens referentes aquele determinado ponto, acurácia/precisão na horizontal e vertical, erro teórico e o erro da posição inicial do GCP.

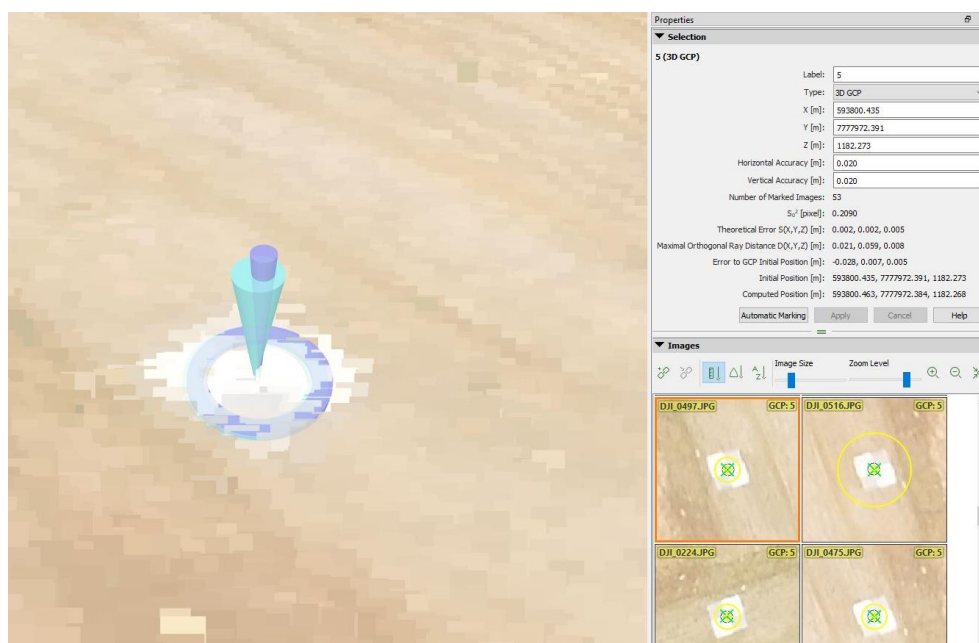


Figura 25 – Pontos de controle (GCP) vistos na nuvem densa de pontos 3D, 22 de outubro. A direita as informações do tipo de ponto e suas coordenadas, abaixo os GCPs marcados nas fotos. Idioma inglês do programa *Pix4Dmapper*.

Após a marcação dos instrumentos e escolha dos pontos de controle (GCP) e pontos de checagem (CP) (Tabela 3), o *Pix4Dmapper* oferece uma ferramenta chamada *Reoptimize* (reotimizar). Este processo aprimora otimizando novamente as posições da câmera e seus parâmetros internos, este passo que melhora a precisão do projeto e deve ser aplicado após alterações da primeira etapa de processamento.

Tabela 3 – Relação de pontos de controle, GCP, *check points* – CP e total de pontos.

Pontos de Controle			
Datas	GCP	Check Point - CP	Total
13 de agosto de 2020	6	3	9
22 de outubro de 2020	7	4	11

6.4 Nuvem de Pontos

A nuvem de pontos 3D é gerada a partir da sobreposição das fotografias e posteriormente densificada, utilizando milhares de pontos (Tabela 4). O próximo passo é classificar a nuvem de pontos densa para gerar os modelos digitais de superfície e de terreno com menor ruído possível. Essa classificação é realizada por grupos predefinidos (Figura 26 e 27).

Tabela 4 – Número total de pontos 3D densificados obtidos para cada projeto.

Nuvem de Pontos Densa	
13 de agosto de 2020	38.689.390 pontos
22 de outubro de 2020	63.553.462 pontos



Figura 26 – Grupos predefinidos da classificação de nuvem de pontos densa. Idioma inglês do programa *Pix4Dmapper*, seguido de tradução.

A edição de nuvem de pontos densa é realizada com critério, classificando e eliminando ao máximo ruídos para que o resultado nos modelos digitais de superfície e de terreno sejam compatíveis com a realidade.



Figura 27 – Detalhe de escavadeira e caminhão, classificado como *Human Made Object* (Objeto de Fabricação Humana). Em amarelo o chão e cinza superfície da estrada.

As nuvens de pontos densa dos aerolevantamentos (Figuras 28 e 29) mostram porções em preto referente a ruídos que foram desabilitadas na edição da nuvem de pontos densa.

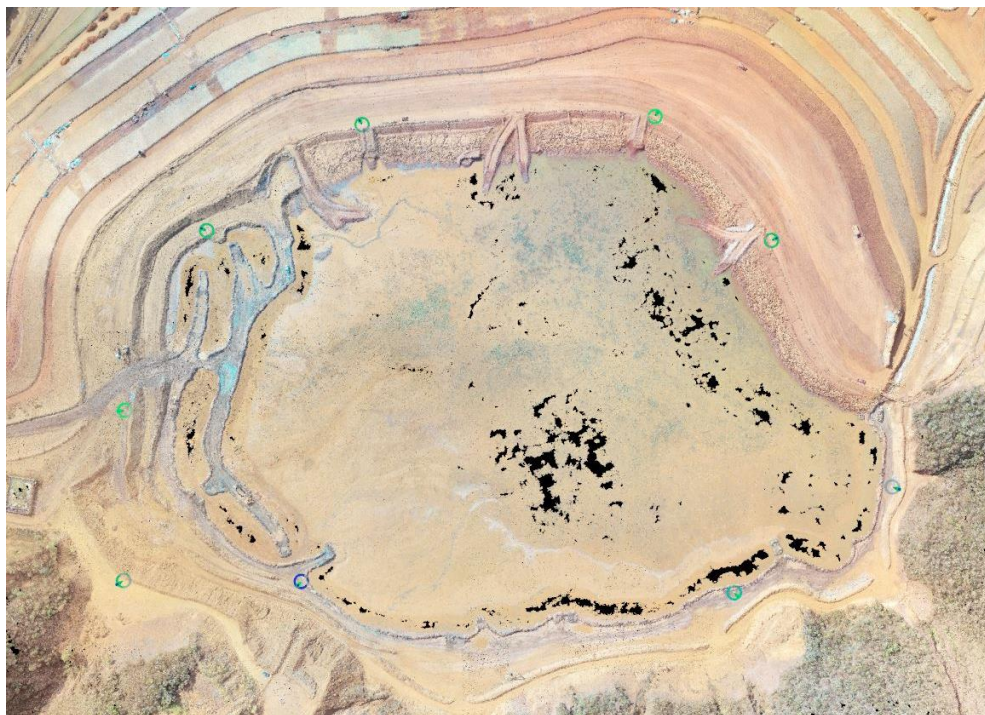


Figura 28 – Nuvem densa de pontos de 13 de agosto, pequenos círculos em verde representam as coordenadas dos pontos de controle inseridas no início do processamento.

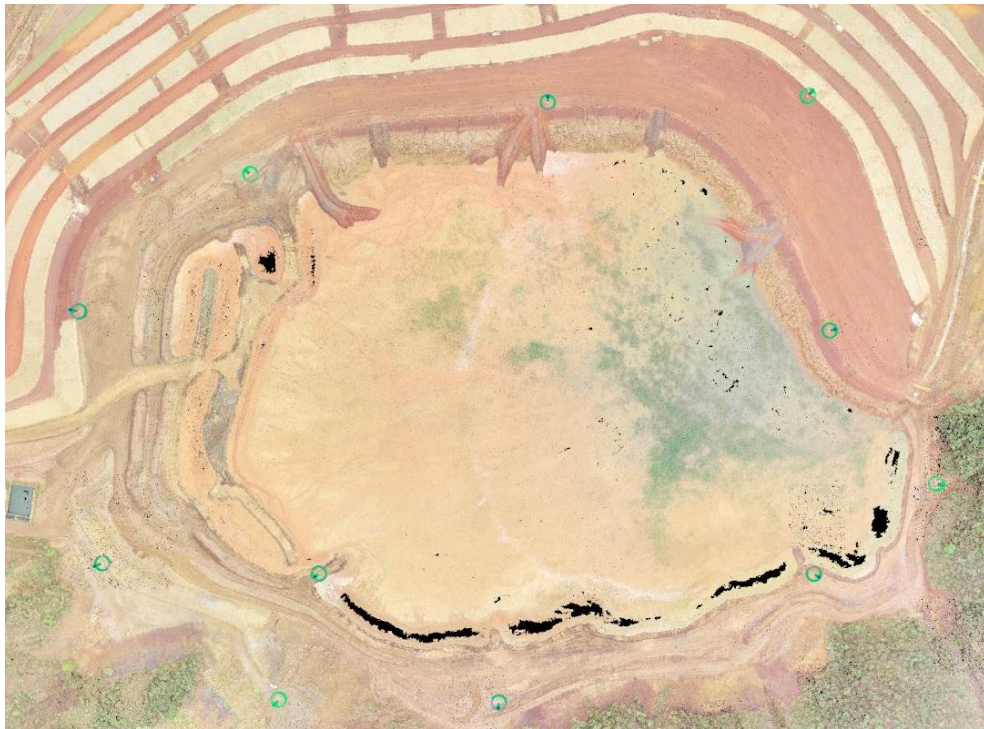


Figura 29 – Nuvem densa de pontos de 22 de outubro, pequenos círculos em verde representam as coordenadas dos pontos de controle inseridas no início do processamento.

6.5 Ortomosaico

O ortomosaico é gerado na terceira etapa do processamento e georreferenciado, seguido do MDS e MDT. O arquivo é gerado em alta resolução sendo possível realizar análises visuais e inspeções de forma remota (Figura 30). A função do aerolevanteamento é avaliar periodicamente o rebaixamento do reservatório, as ombreiras e sinais de erosão em toda estrutura da barragem.

As figuras 31, 32, 33 e 34 correspondem aos dados processados de 13 de agosto de 2020. Podem ser observadas a rotina do maquinário pesado abrindo acessos dentro do reservatório e removendo material, as bombas extraindo a água e a formação de gretas de contração a montante, o rebaixamento do reservatório, sinais de erosão a montante, o maquinário espalhando terra para o nivelamento do talude e a aplicação de grama.

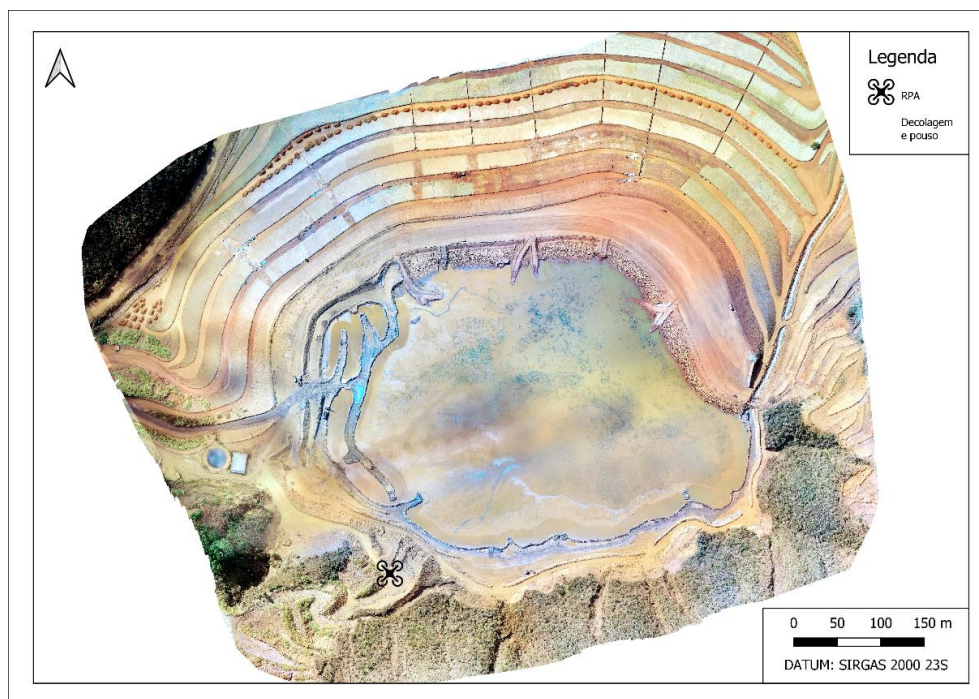


Figura 30 – Ortomosaico em alta resolução da barragem de 13 de agosto.

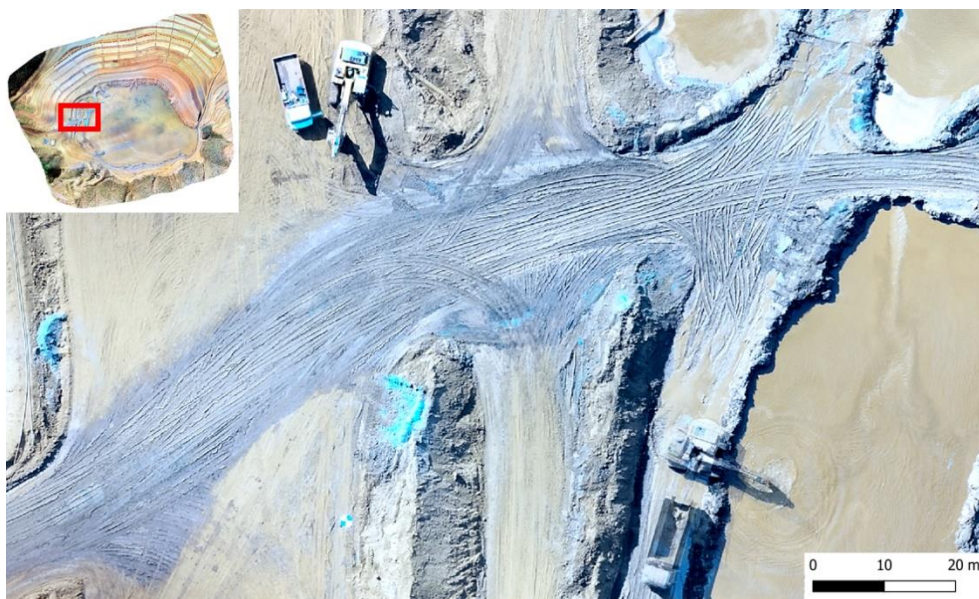


Figura 31 – Detalhe do ortomosaico, rotina do maquinário abrindo acessos, removendo material do reservatório, é possível notar a qualidade do ortomosaico pelos rastros deixados do maquinário, 13 de agosto.

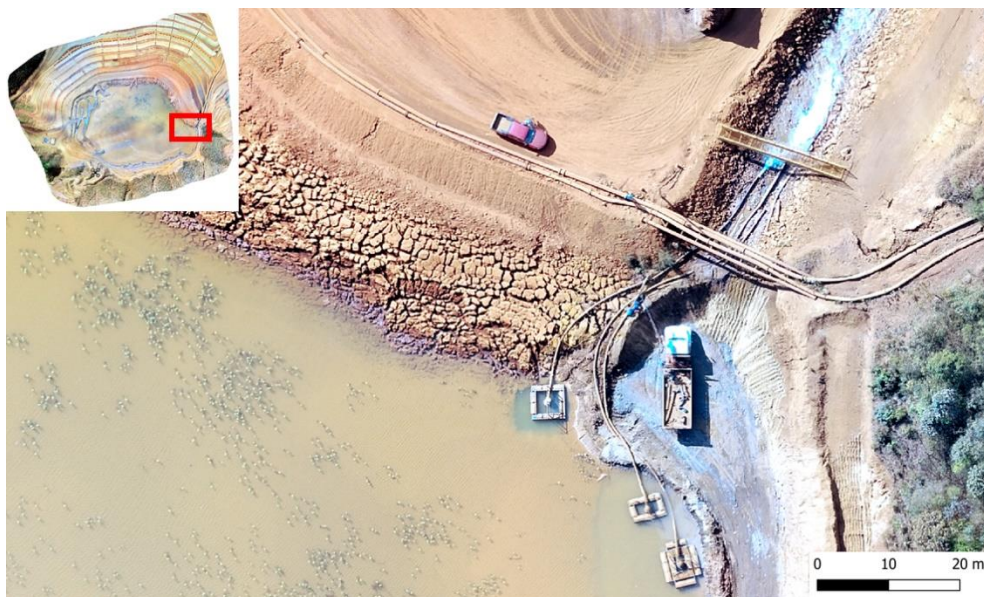


Figura 32 – Detalhe das bombas extraindo a água e a formação de gretas de contração a montante devido o rebaixamento do reservatório e sinais de erosão, 13 de agosto.



Figura 33 – Detalhe do ortomosaico a jusante, maquinário espalhando terra para o nivelamento do talude, 13 de agosto.

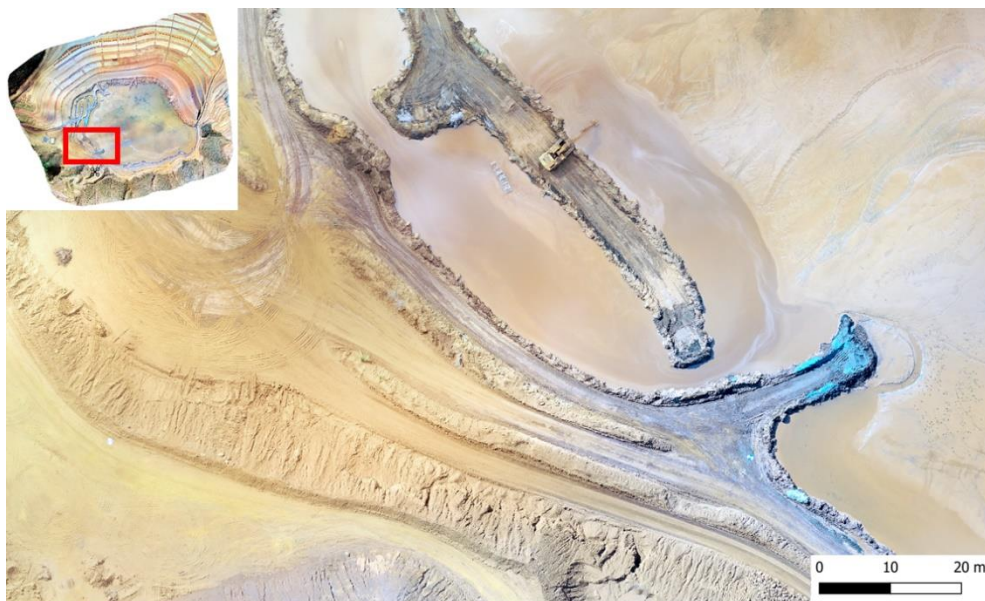


Figura 34 – Detalhe do ortomosaico na ombreira esquerda maquinário abrindo acesso e removendo material do reservatório, sinais de erosão a montante, 13 de agosto.

A figura 35 corresponde ao ortomosaico alta resolução, utilizado para análises visuais e inspeções de forma remota. As figuras 36, 37, 38 e 39 correspondem aos dados processados de 22 de outubro de 2020. Podem ser observadas as mesmas etapas de trabalho, a rotina do maquinário abrindo acessos dentro do reservatório e removendo material, as bombas extraindo a água e a formação de gretas de contração a montante, pontuar sinais de erosão próximo a tubulação, a construção de escada hidráulica no talude e finalmente a remoção de material de dentro do reservatório.

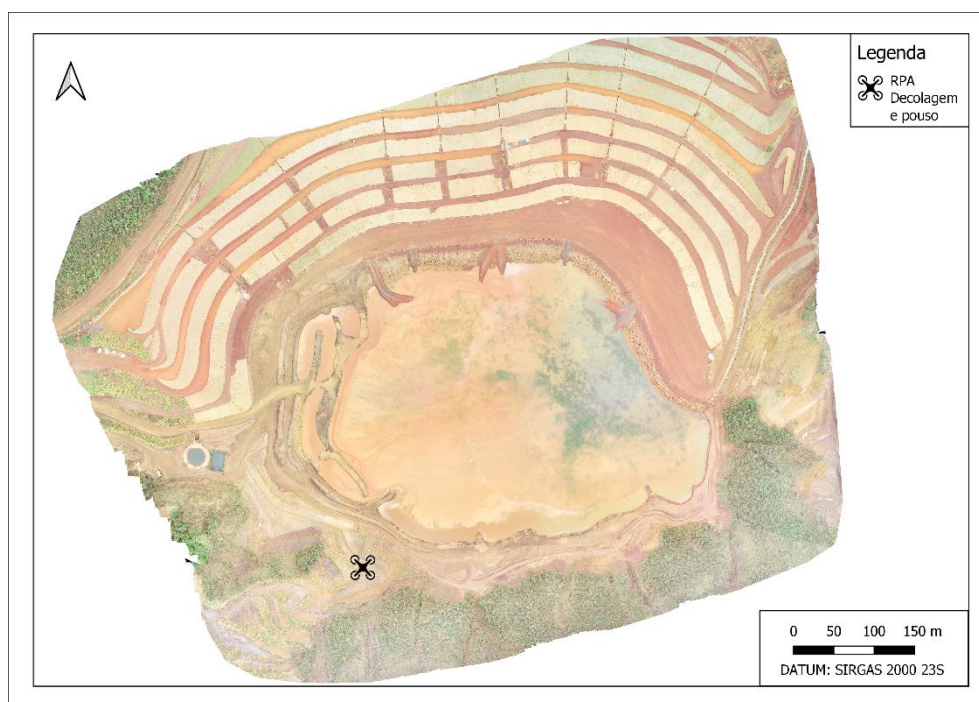


Figura 35 – Ortomosaico em alta resolução da barragem de 22 de outubro.



Figura 36 – Detalhe do ortomosaico, maquinário pesado abrindo acessos, removendo material do reservatório e rastros de seus movimentos, 22 de outubro.



Figura 37 – Bombas extraíndo a água e a formação de gretas de contração a montante devido o rebaixamento do reservatório e sinais de erosão próximo a tubulação, 22 de outubro.



Figura 38 – Detalhe do ortomosaico a jusante, construção de escada hidráulica no talude, 22 de outubro.

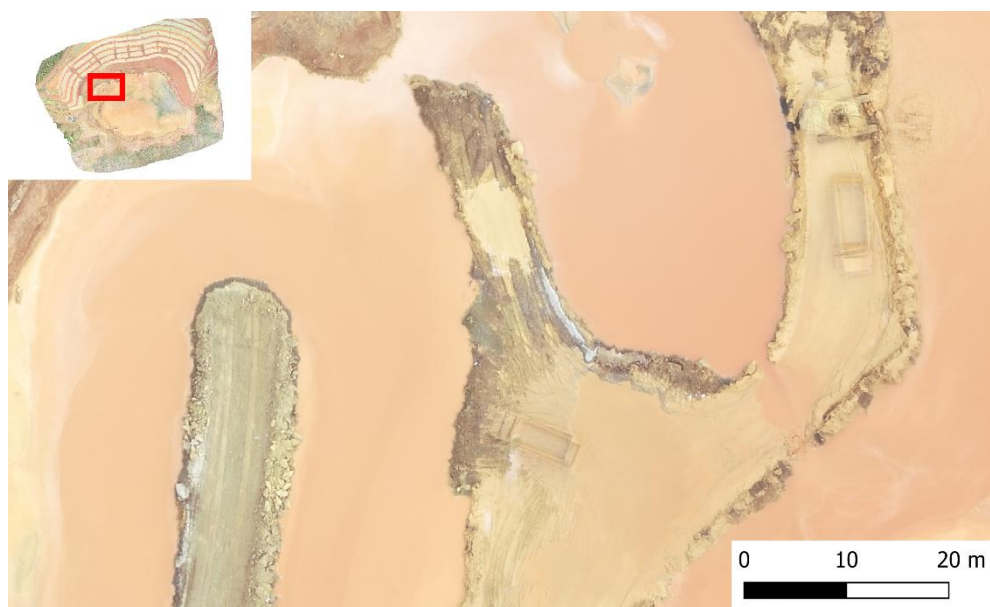


Figura 39 – Remoção de material de dentro do reservatório, 22 de outubro.

6.6 Modelo Digital de Superfície - MDS

O MDS é gerado após a classificação da nuvem de pontos densa. O MDS apresenta a geometria da superfície da área levantada, incluindo objetos como construções, edificações, os instrumentos e vegetações. As figuras 40 e 41, respectivamente de 13 de agosto e 22 de outubro, mostram os MDSs com suas texturas e rugosidades da vegetação, solo exposto, construções, elementos geográficos e antrópicos.

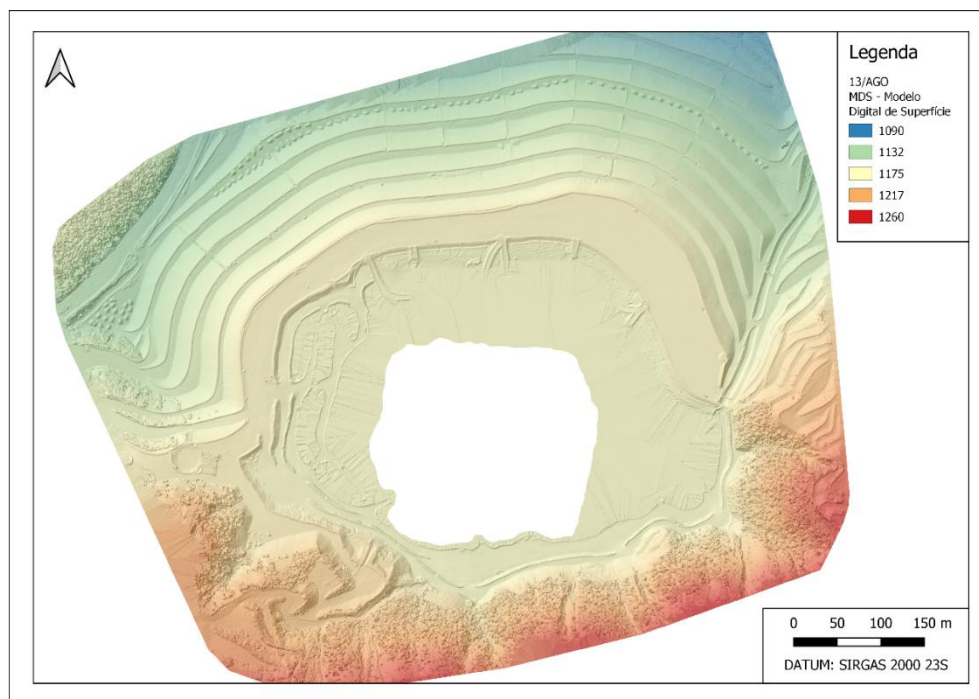


Figura 40 – MDS - Modelo Digital de Superfície com relevo sombreado, 13 de agosto.

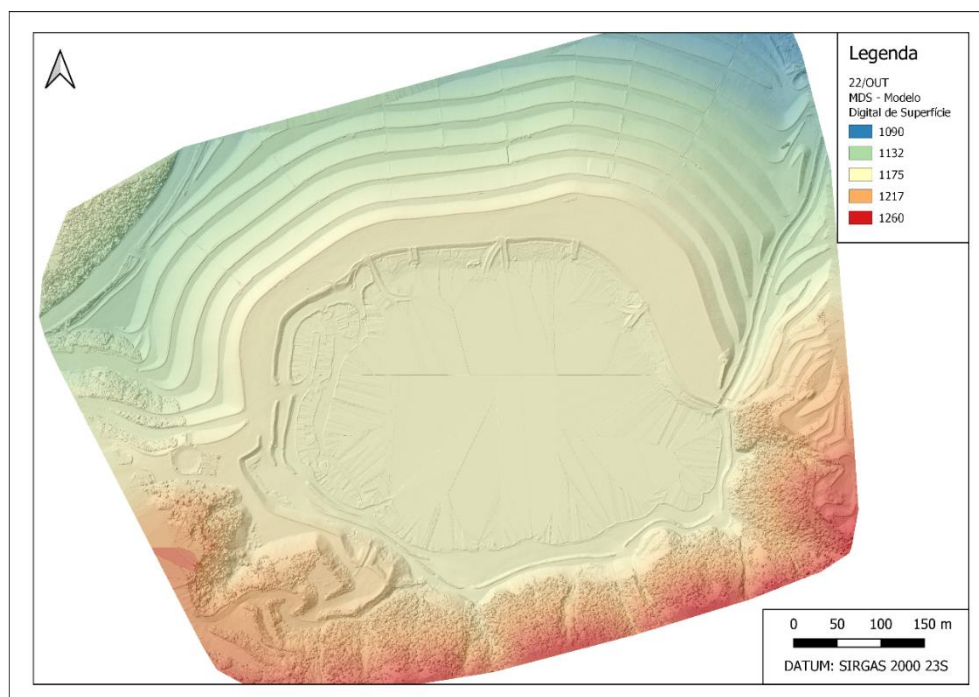


Figura 41 – MDS - Modelo Digital de Superfície com relevo sombreado, 22 de outubro.

6.7 Modelo Digital de Terreno - MDT

O MDT também é gerado após a classificação da nuvem de pontos densa. O MDT apresenta a topografia da área, oferecendo informações de todo o plano altimétrico e físico do terreno excluindo cobertura vegetal, edificações e maquinário. As figuras 42, 43, 44 e 45 apresentam o relevo sombreado e comparam o MDT e MDS como resultado edição da nuvem de pontos densa. De um lado o MDT livre de rugosidades e vegetação do outro o MDS com seus detalhes.

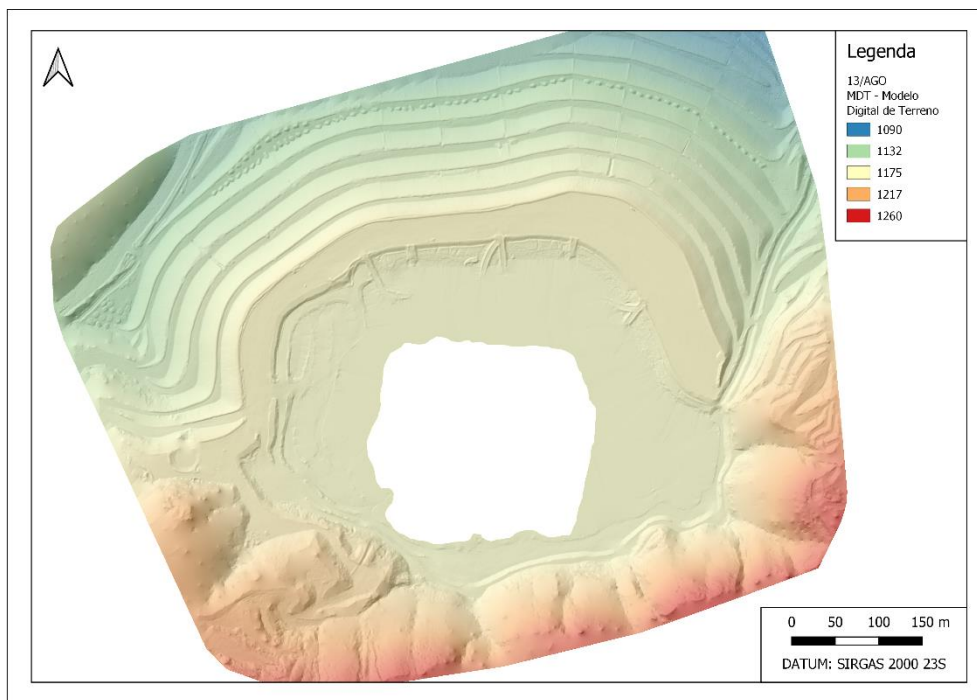


Figura 42 – MDT - Modelo Digital de Terreno com relevo sombreado, 13 de agosto.



Figura 43 – Detalhe do MDT (esquerda) e MDS (direita), ambos com relevo sombreado, 13 de agosto.

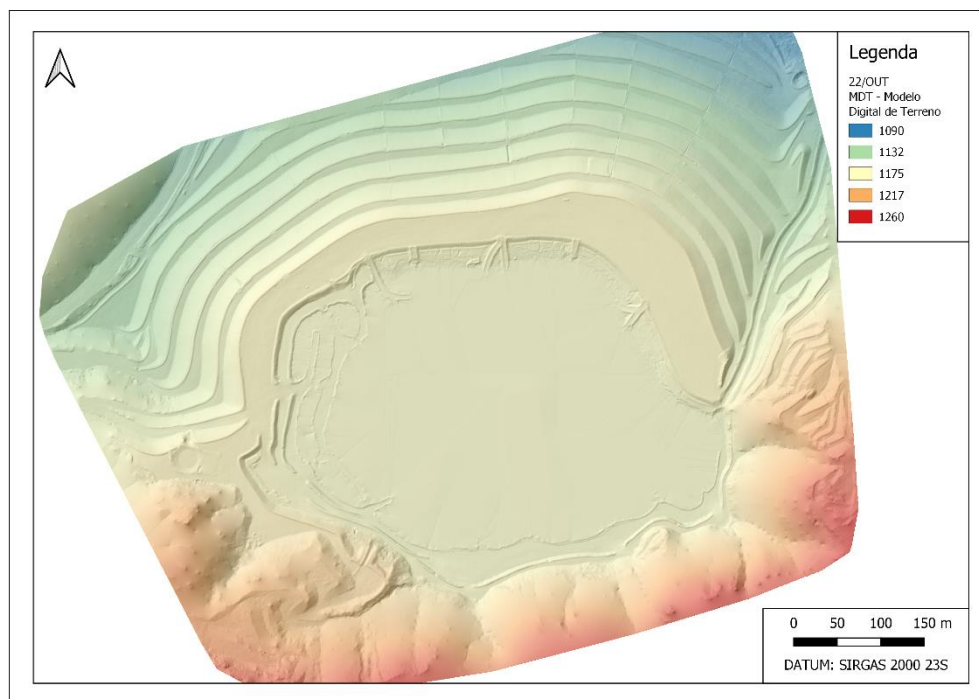


Figura 44 – MDT - Modelo Digital de Terreno com relevo sombreado, 22 de outubro.

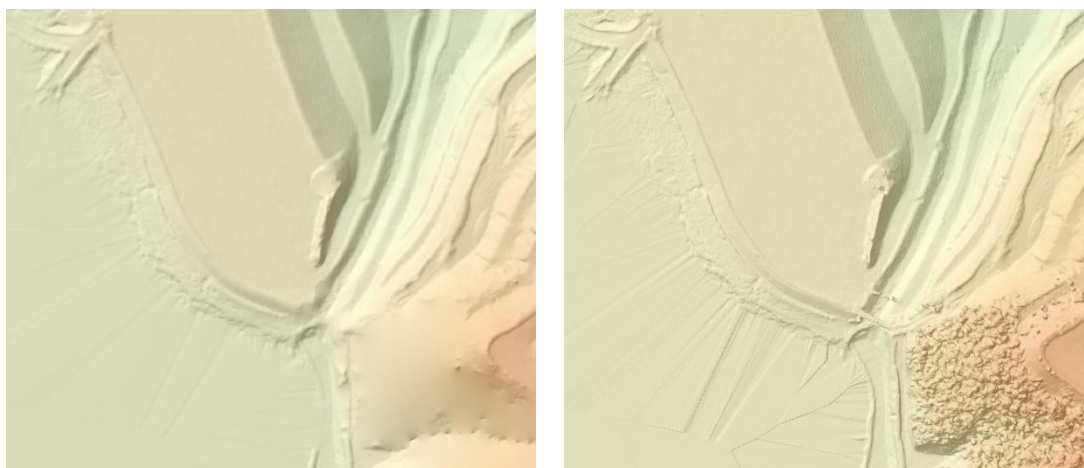


Figura 45 – Detalhe do MDT (esquerda) e MDS (direita), ambos com relevo sombreado, 22 de outubro.

6.8 Curva de Nível

A partir do MDT obtém-se as Curvas de Nível (Figuras 46 e 48), podendo variar suas distâncias umas das outras, neste caso espaçadas de meio em meio metro, gerando isolinhas de mesma cota topográfica que retratam minuciosamente a declividade do terreno. Além das curvas de nível nas figuras abaixo, um perfil topográfico apresenta em um mesmo ponto (amarelo) a cota para as duas datas. As figuras 47 e 49 apresentam detalhes das curvas de nível geradas e sobrepostas ao MDT e ao ortomosaico.

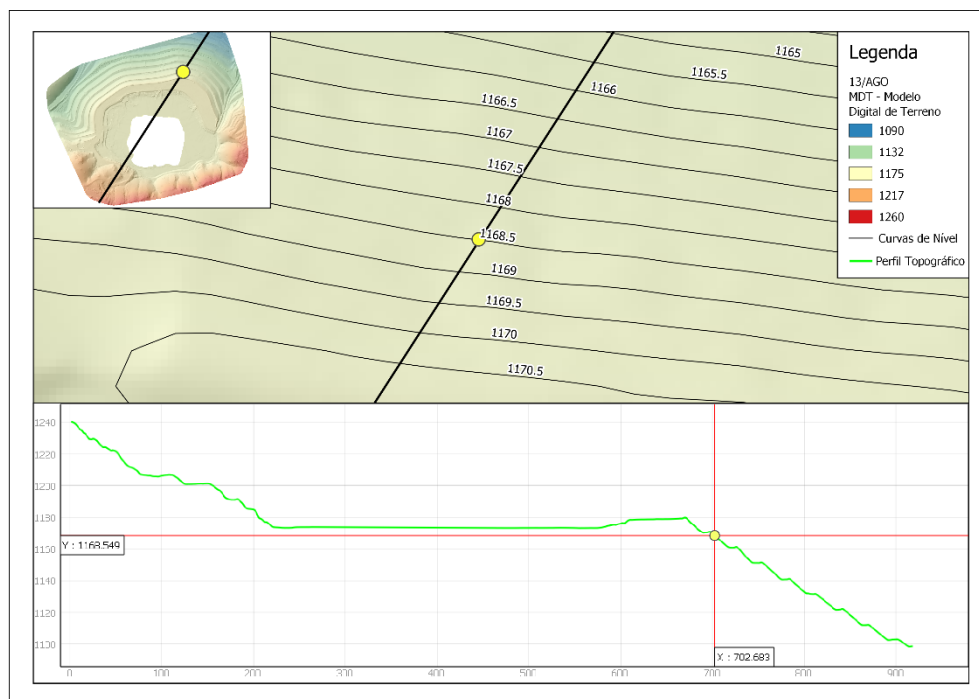


Figura 46 – MDT com curvas de nível e perfil topográfico de 13 de agosto, ponto amarelo indica a cota 1168,549 metros condizente com perfil topográfico.



Figura 47 – MDT com curvas de nível (esquerda), ortomosaico com curvas de nível (direita). Ambos demonstram como as curvas de nível geradas são condizentes a declividade do modelo.

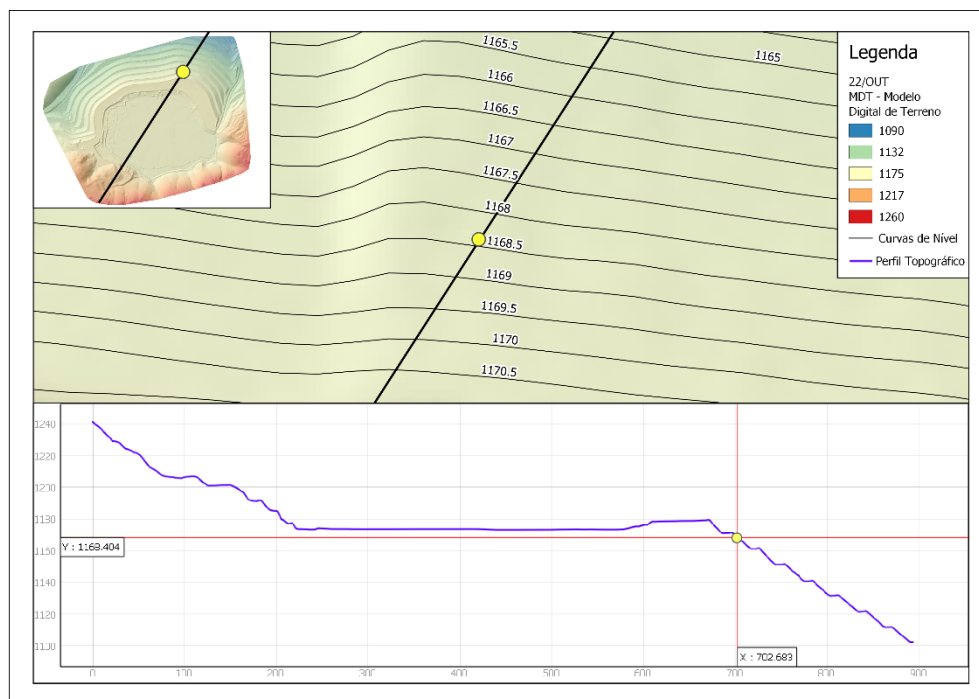


Figura 48 – MDT com curvas de nível e perfil topográfico de 22 de outubro, ponto amarelo indica a cota 1168,404 metros condizente com perfil topográfico.

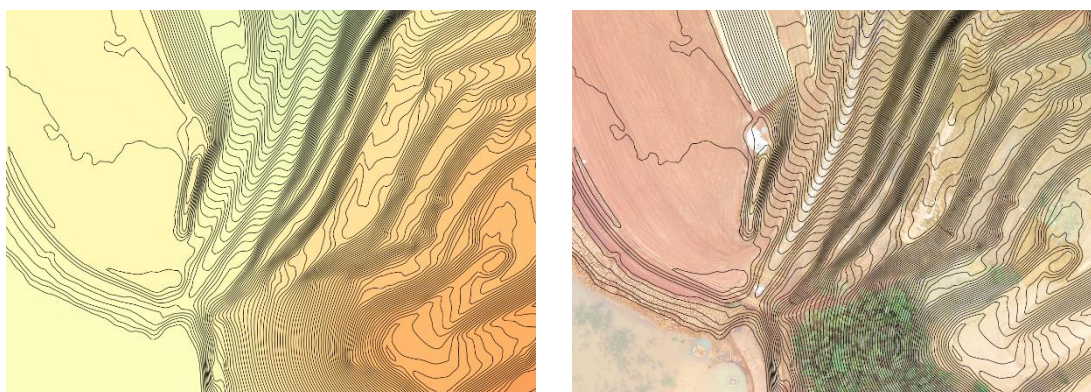


Figura 49 – MDT com curvas de nível (esquerda), ortomosaico com curvas de nível (direita). Ambos demonstram como as curvas de nível geradas são condizentes a declividade do modelo.

6.9 Relatório de Processamento de Dados

O *Pix4Dmapper* gera ao final um relatório de processamento de dados, os mais relevantes ao trabalho são apresentados a seguir como por exemplo, tamanho do GSD, tamanho da área convertida, quantidade de imagens utilizadas, tempo de processamento, erros médios dos pontos de controle (GCP e CP) e diferença de geolocalização. As tabelas 5 e 6 apresentam os resultados de 13 de agosto e 22 de outubro de 2020, respectivamente.

Tabela 5 – Resultado do processamento dos dados de 13 de agosto.

CONJUNTO DE DADOS - 13 DE AGOSTO DE 2020	
GSD	3.98 cm/pixel
Área convertida	0.539 km ² / 53.9151 ha
Imagens	Média de 27.524 pontos-chave por imagem (pontos característicos detectados)
Conjunto de dados	456 de 456 imagens calibradas (100%)
Otimização da câmera	0,77% de diferença relativa entre os parâmetros iniciais e otimizados da câmera interna
Combinando	Mediana de 13.750,1 correspondências por imagem calibrada
Georreferenciamento	6 GCPs (6 3D), erro RMS médio = 0,007 m (0,7cm)
Pontos 3D densificados	38.689.390
Tempo de Processamento	10:23:48 (h:m:s)

Tabela 6 – Resultado do processamento dos dados de 22 de outubro.

CONJUNTO DE DADOS - 22 DE OUTUBRO DE 2020	
GSD	3.96 cm/pixel
Área convertida	0.546 km ² / 54.6218 ha
Imagens	Média de 25.544 pontos-chave por imagem (pontos característicos detectados)
Conjunto de dados	898 de 898 imagens calibradas (100%)
Otimização da câmera	0,64% de diferença relativa entre os parâmetros iniciais e otimizados da câmera interna
Combinando	Mediana de 7.742,55 correspondências por imagem calibrada
Georreferenciamento	7 GCPs (7 3D), erro RMS médio = 0,014 m (1,4cm)
Pontos 3D densificados	63.553.462
Tempo de Processamento	17:42:32 (h:m:s)

As figuras 50 e 51 correspondem ao ortomosaico e MDS de 13 de agosto e 22 de outubro, o MDS corresponde a nuvem de pontos antes de ser densificada.

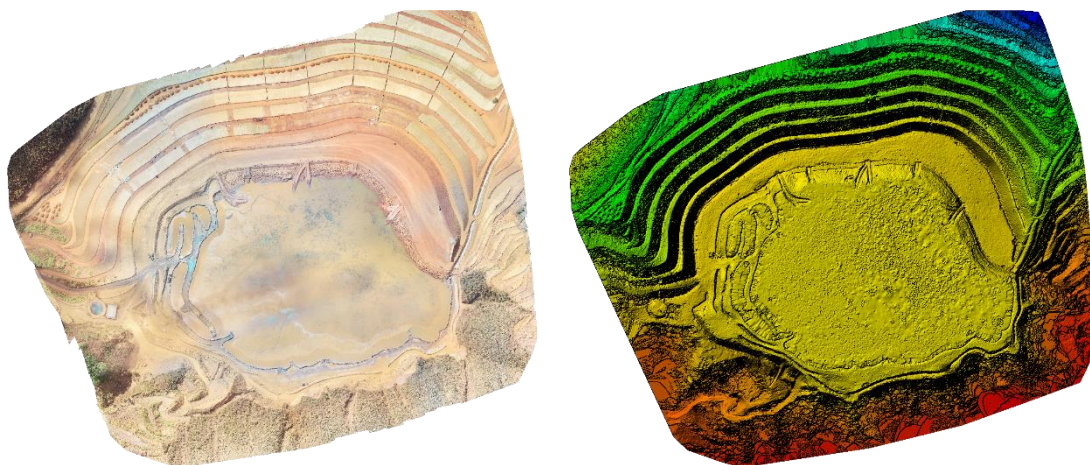


Figura 50 – Ortomosaico e MDS correspondente antes da densificação, 13 de agosto.

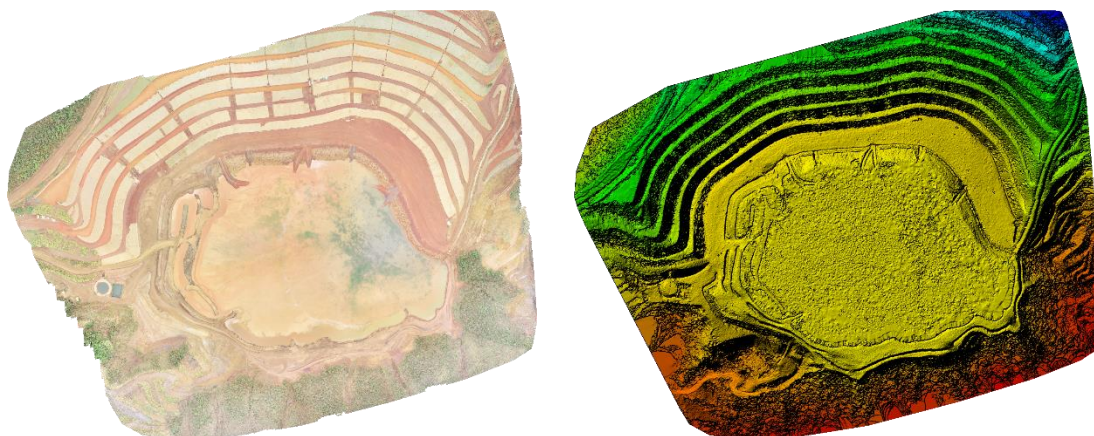


Figura 51 – Ortomosaico e MDS correspondente antes da densificação, 22 de outubro.

As tabelas 7, 8, 9 e 10 correspondem ao resultado do processo de ajuste das imagens mencionado no item 6.3 Ajuste do Modelo. As tabelas informam os erros médios nas três direções de coordenadas X, Y, Z, a última coluna informa o número de imagens calibradas automaticamente versus manualmente.

Tabela 7 – Precisão de localização por GCP, erros médios nas três direções de coordenadas. Última coluna conta com o número de imagens calibradas automaticamente vs. manualmente.

PONTOS DE CONTROLE – GCP - 13 DE AGOSTO DE 2020						
Nome GCP	Acurácia XY/Z(m)	Erro X(m)	Erro Y(m)	Erro Z(m)	Erro de Projeção (px)	Imagens Calibradas
7_1 (3D)	0.020/0.020	0.004	0.002	-0.004	0.726	36/36
9_1 (3D)	0.020/0.020	-0.025	0.004	0.002	0.246	30/30
10_1 (3D)	0.020/0.020	-0.001	0.008	-0.004	0.346	30/30
13_1 (3D)	0.020/0.020	0.013	-0.015	0.002	0.380	27/27
16_1 (3D)	0.020/0.020	0.001	-0.006	0.006	0.354	30/30
20_1 (3D)	0.020/0.020	0.007	0.007	-0.001	0.312	22/22
Média (m)		-0.000057	0.000064	0.000163		
Sigma (m)		0.011982	0.008207	0.003637		
Erro RMS(m)		0.011982	0.008207	0.003641		

Tabela 8 – Precisão de localização por GCP, erros médios nas três direções de coordenadas. Última coluna conta com o número de imagens calibradas automaticamente vs. manualmente.

PONTOS DE CONTROLE - GCP - 22 DE OUTUBRO DE 2020						
Nome GCP	Acurácia XYZ(m)	Erro X(m)	Erro Y(m)	Erro Z(m)	Erro de Projeção (px)	Imagens Calibradas
1 (3D)	0.020/0.020	0.036	-0.020	-0.005	0.466	65/65
5 (3D)	0.020/0.020	-0.028	0.007	0.005	0.511	53/53
8 (3D)	0.020/0.020	0.002	0.015	0.000	0.397	66/66
9 (3D)	0.020/0.020	0.000	-0.028	-0.001	0.522	64/64
10 (3D)	0.020/0.020	-0.031	0.011	0.002	0.878	56/56
12 (3D)	0.020/0.020	0.011	0.028	-0.005	0.465	65/65
13 (3D)	0.020/0.020	0.009	-0.012	0.005	0.568	62/63
Média (m)		-0.000125	0.000103	0.000158		
Sigma (m)		0.021639	0.018768	0.003721		
Erro RMS(m)		0.021640	0.018769	0.003724		

Tabela 9 – Precisão de localização por CP, erros médios nas três direções de coordenadas. Última coluna conta com o número de imagens calibradas automaticamente vs. manualmente.

PONTOS DE CONTROLE – CP (Check Point) - 13 DE AGOSTO DE 2020						
Nome CP	Acurácia XYZ(m)	Erro X(m)	Erro Y(m)	Erro Z(m)	Erro de Projeção (px)	Imagens Calibradas
8		0.0055	0.0312	-0.0101	0.3652	27/27
12		0.0587	-0.0222	-0.0721	0.3414	36/36
17		-0.0416	0.0482	-0.0491	0.5706	25/25
Média (m)		0.007555	0.019076	-0.043738		
Sigma (m)		0.040975	0.03024	0.02586		
Erro RMS(m)		0.041666	0.035572	0.050672		

Tabela 10 – Precisão de localização por CP, erros médios nas três direções de coordenadas. Última coluna conta com o número de imagens calibradas automaticamente vs. manualmente.

PONTOS DE CONTROLE - CP - 22 DE OUTUBRO DE 2020						
Nome Check Point	Acurácia XYZ(m)	Erro X(m)	Erro Y(m)	Erro Z(m)	Erro de Projeção (px)	Imagens Calibradas
15		-0.0373	0.0184	0.0017	0.4274	65/65
17		-0.1023	0.0016	0.0243	0.4971	63/63
18		-0.0052	0.0432	-0.0769	0.5991	43/43
20		-0.0712	-0.0202	0.0052	0.4976	57/57
Média (m)		-0.054001	0.010758	-0.011422		
Sigma (m)		0.036376	0.023202	0.038788		
Erro RMS(m)		0.065110	0.025575	0.040435		

As tabelas 11 e 12 apresentam a porcentagem de imagens calibradas com erro de geolocalização em X, Y, Z, dentro de um intervalo de erro predefinido (erros mínimos e máximos).

Tabela 11 – Erros de geolocalização em X, Y e Z dos modelos, (RMS - *Root Mean Square* ou Raiz Quadrada Média).

GEOLOCALIZAÇÃO - 13 DE AGOSTO DE 2020				
Erro Min (m)	Erro Máx (m)	Erro X (%)	Erro Y (%)	Erro Z (%)
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	0.00	0.00	0.00
-3.00	0.00	51.32	48.03	43.64
0.00	3.00	48.68	51.97	53.36
3.00	6.00	0.00	0.00	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Média (m)		1.692	-0.846	-85.220
Sigma (m)		0.319	0.238	0.933
Erro RMS (m)		1.722	0.878	85.225

Tabela 12 – Erros de geolocalização em X, Y e Z dos modelos, (RMS - *Root Mean Square* ou Raiz Quadrada Média).

GEOLOCALIZAÇÃO - 22 DE OUTUBRO DE 2020				
Erro Min (m)	Erro Máx (m)	Erro X (%)	Erro Y (%)	Erro Z (%)
-	-15.00	0.00	0.00	0.00
-15.00	-12.00	0.00	0.00	0.00
-12.00	-9.00	0.00	0.00	0.00
-9.00	-6.00	0.00	0.00	0.00
-6.00	-3.00	0.00	0.00	0.00
-3.00	0.00	46.55	45.32	59.47
0.00	3.00	53.45	54.68	40.53
3.00	6.00	0.00	0.00	0.00
6.00	9.00	0.00	0.00	0.00
9.00	12.00	0.00	0.00	0.00
12.00	15.00	0.00	0.00	0.00
15.00	-	0.00	0.00	0.00
Média (m)		-0.628	-0.607	-103.746
Sigma (m)		0.320	0.362	0.0842
Erro RMS (m)		0.705	0.707	103.749

6.10 Avaliação Temporal

A avaliação temporal é produzida com base em comparações ao longo do tempo. Utilizando o software QGIS realizou-se uma inspeção visual de anomalias nas estruturas de 13 de agosto e 22 de outubro, pontuando locais para possíveis medidas corretivas nos ortomosaicos (Figuras 52 e 53). Com o MDT aberto no QGIS roda-se um comando do SAGA-GIS para

determinação do acúmulo de fluxo superficial (*Flow Accumulation* - Conrad, 2004) que calcula a área de captação com base nos valores de elevação, resultando no acúmulo superficial. Configura-se para sobrepor o ortomosaico, permitindo visualizar regiões onde o fluxo superficial se destaca. Com a precisão dos modelos gerados é possível obter a posição exata das feições de interesse que se deseja identificar ou monitorar.

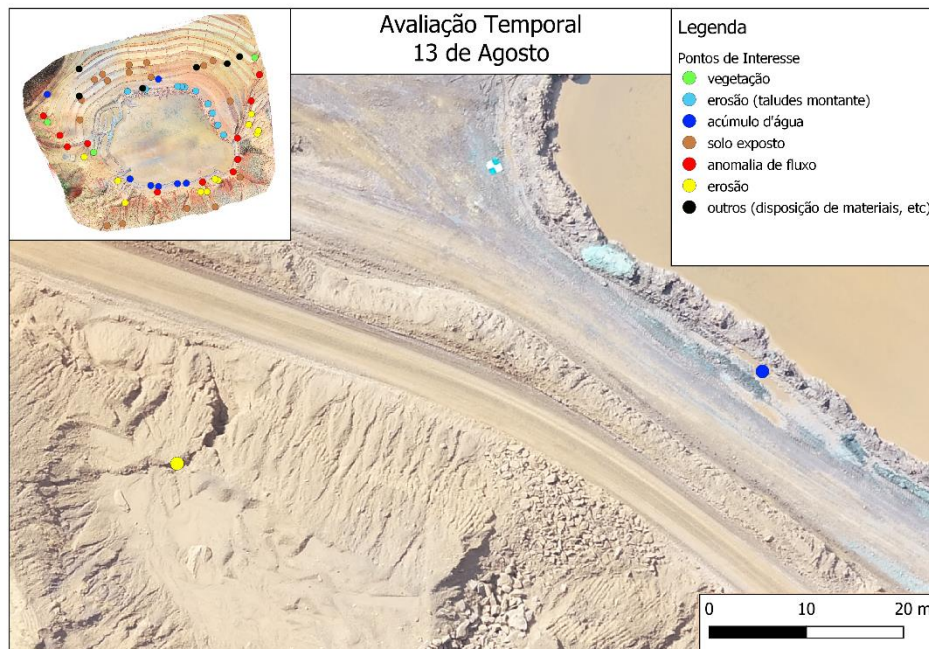


Figura 52 – Ortomosaico de 13 de agosto, pontos amarelos indicam erosão e ponto azul acúmulo de água.

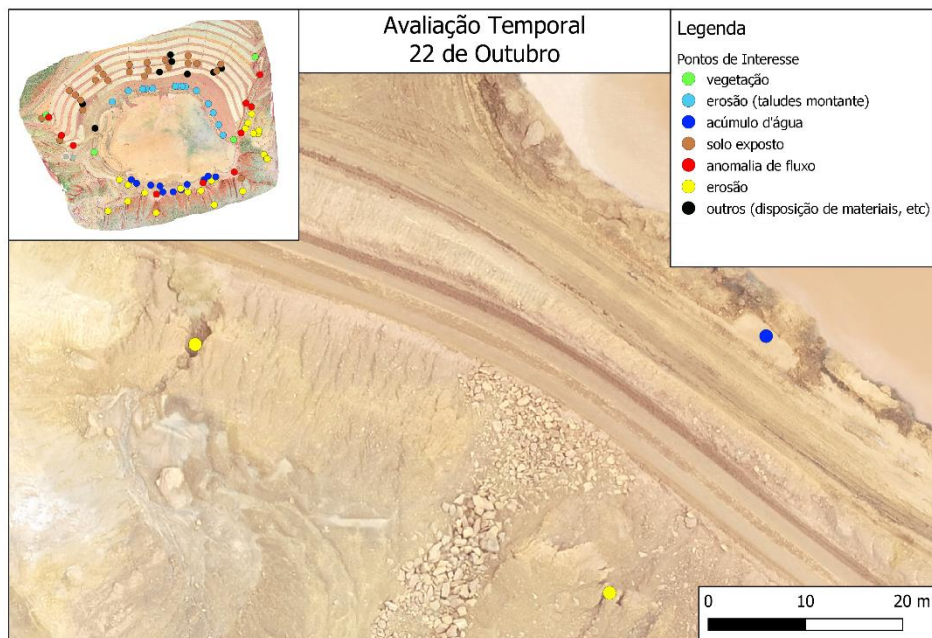


Figura 53 – Ortomosaico de 22 de outubro, pontos amarelos indicam erosão e ponto azul acúmulo de água.

A figura 54 apresenta um ponto de erosão e um ponto de crescimento de vegetação, a figura 55 mostra que ocorreu a correção da erosão e a permanência do crescimento da vegetação.

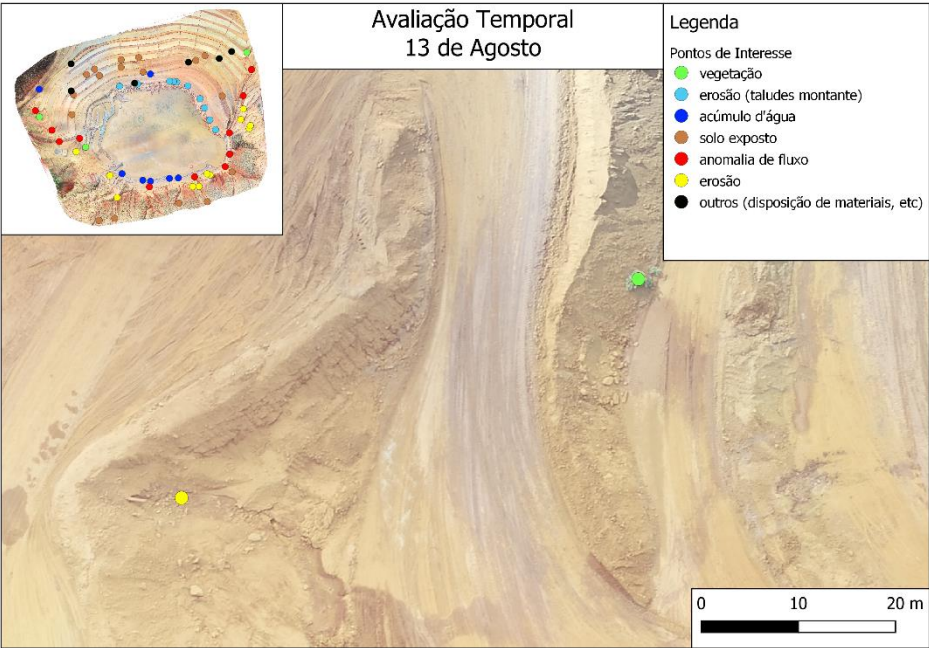


Figura 54 – Ortomosaico de 13 de agosto, ponto amarelo indica erosão e ponto verde vegetação.

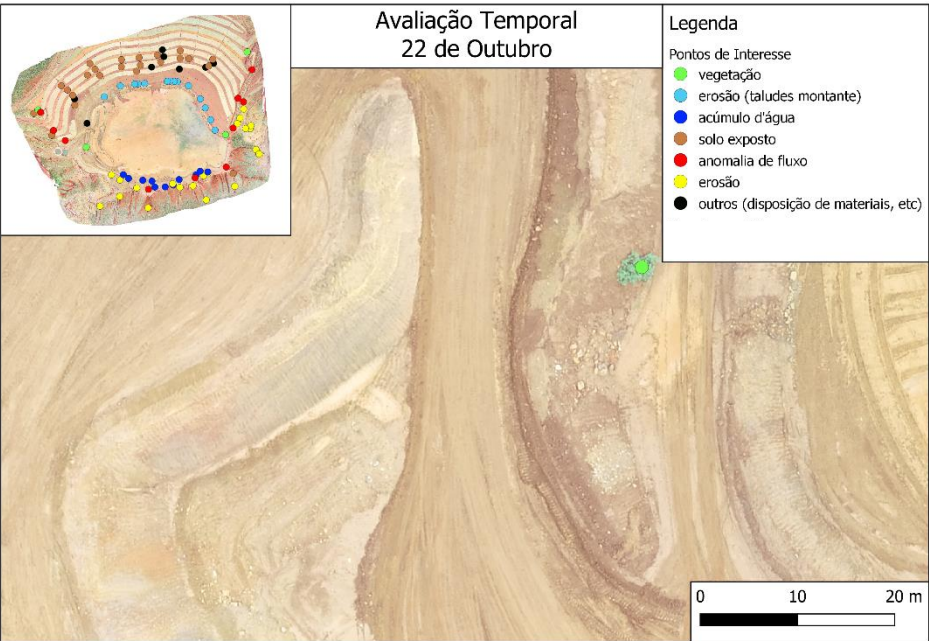


Figura 55 – Ortomosaico de 22 de outubro, correção da erosão mostrada na figura anterior e permanece o crescimento da vegetação.

A figura 56 apresenta o ortomosaico com sobreposição do acúmulo de fluxo e dois pontos que marcam a anomalia de fluxo. A figura 57 mostra que ocorreu uma correção, mas que ainda há uma anomalia no local.

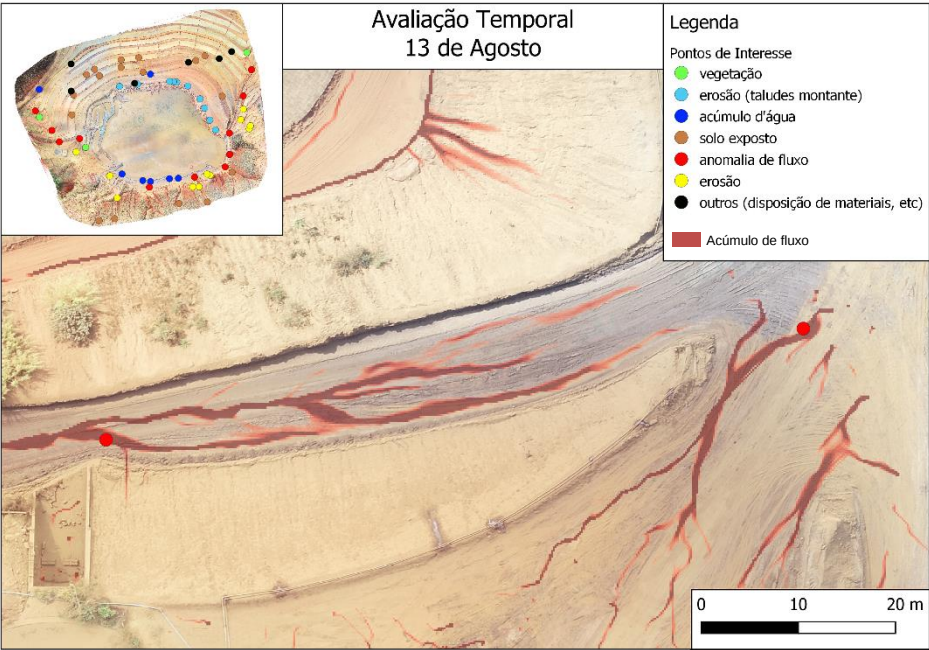


Figura 56 – Ortomosaico com sobreposição do acúmulo de fluxo de 13 de agosto, pontos em vermelho indicam anomalia de fluxo.

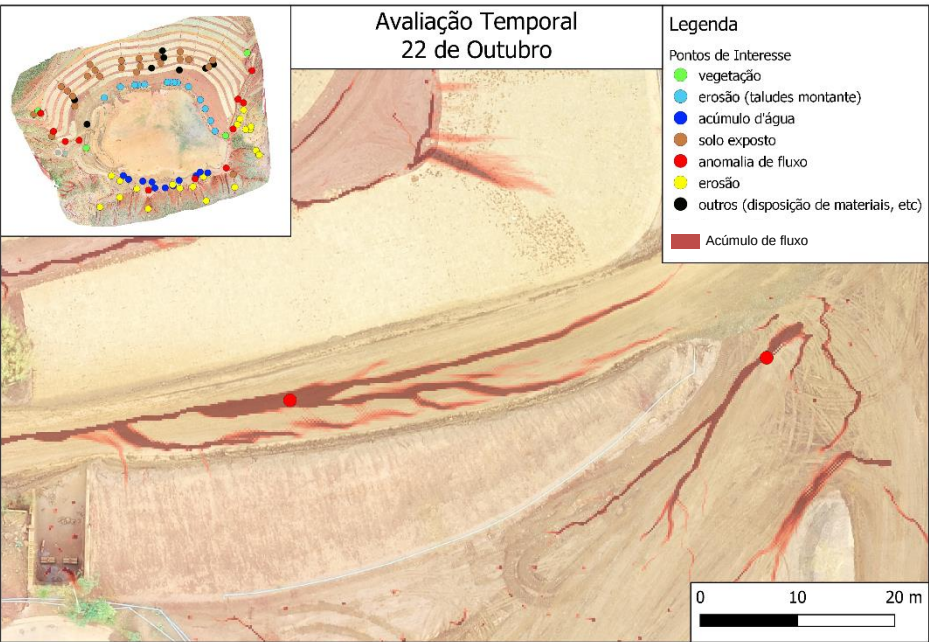


Figura 57 – Ortomosaico com sobreposição do acúmulo de fluxo de 22 de outubro, mesmo com a correção ocorrem anomalia de fluxo.

A figura 58 apresenta o ortomosaico com pontos que marcam solo exposto e disposição de materiais devido a execução de trabalho para escada hidráulica e aplicação de grama. A figura 59 apresenta o trabalho em andamento, ainda há parte de solo exposto no local.

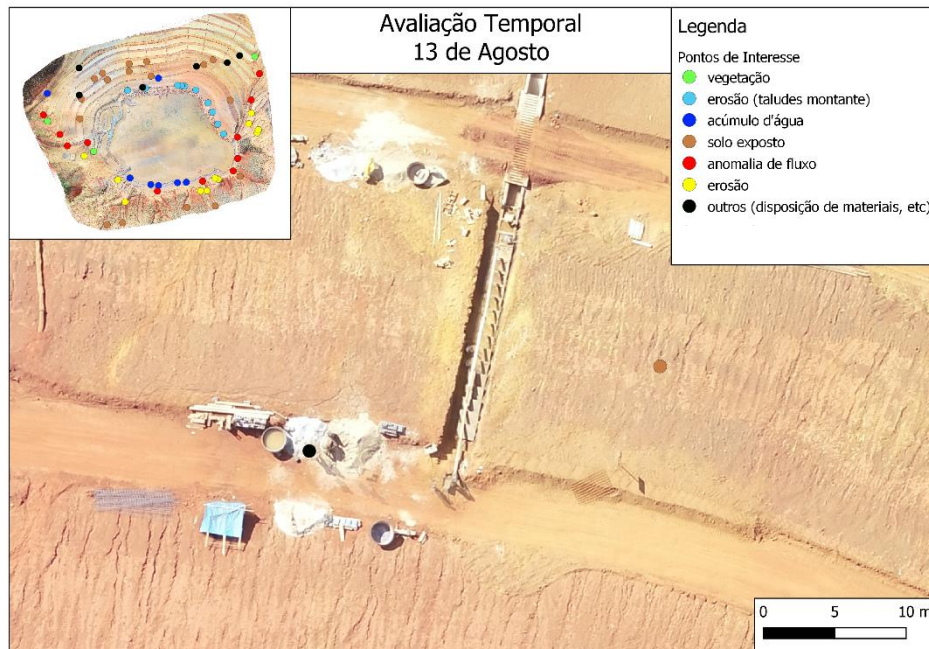


Figura 58 – Ortomosaico de 13 de agosto, ponto em marrom indica solo exposto e ponto preto disposição de materiais.

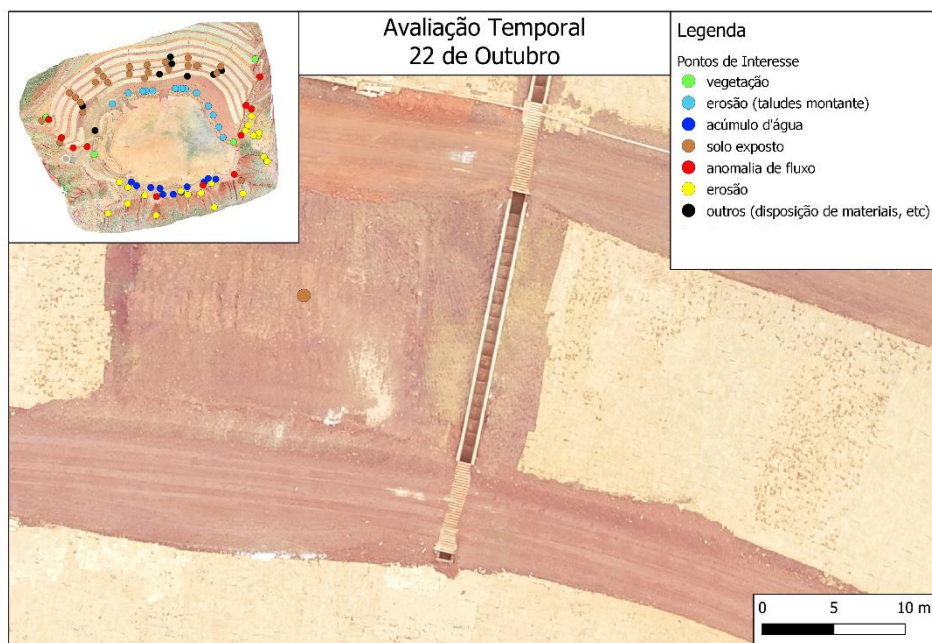


Figura 59 – Ortomosaico de 22 de outubro, trabalho em andamento permanece solo exposto.

A figura 60 apresenta o ortomosaico com sobreposição do acúmulo de fluxo e dois pontos, um que marca a anomalia de fluxo e outro que mostra um ponto de erosão. A figura 61 mostra mudança de anomalia de fluxo, permanece ponto de erosão.

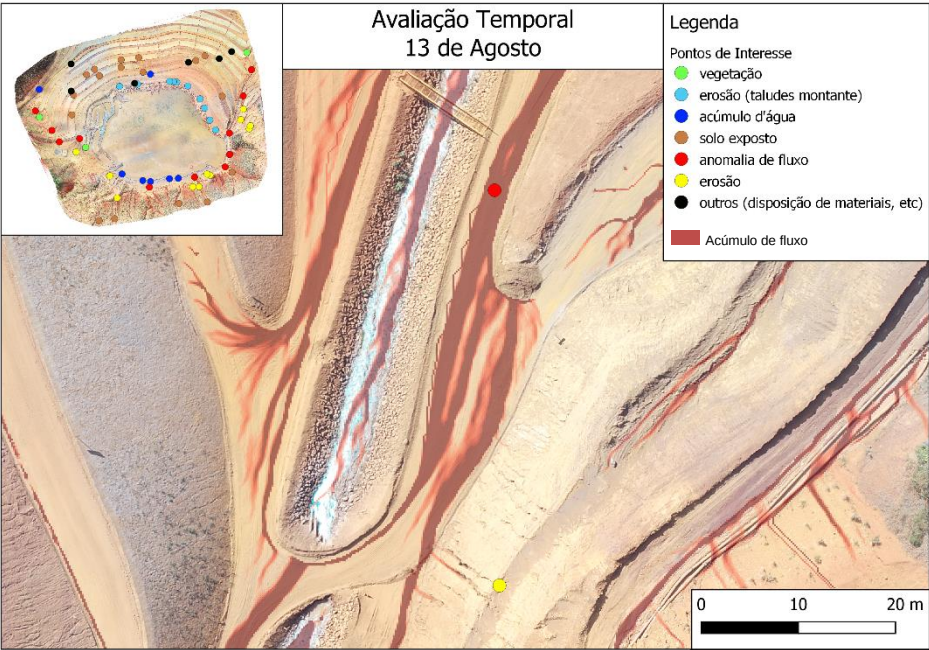


Figura 60 – Ortomosaico com sobreposição do acúmulo de fluxo de 13 de agosto, ponto de anomalia de fluxo e ponto de erosão.

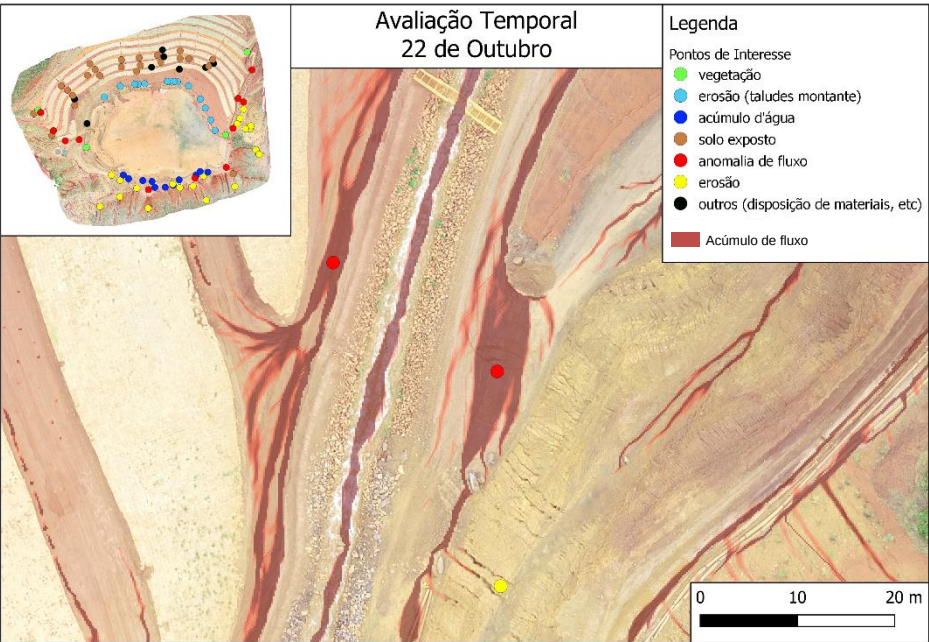


Figura 61 – Ortomosaico com sobreposição do acúmulo de fluxo de 22 de outubro, dois pontos de anomalia de fluxo e ponto de erosão.

A figura 62 apresenta o ortomosaico com sobreposição do acúmulo de fluxo, existem pontos referentes a exposição do solo, um ponto de erosão e um de anomalia de fluxo. A figura 63 mostra correção da anomalia de fluxo e aplicação de grama no talude, ainda com pontos de solo exposto e disposição de materiais.

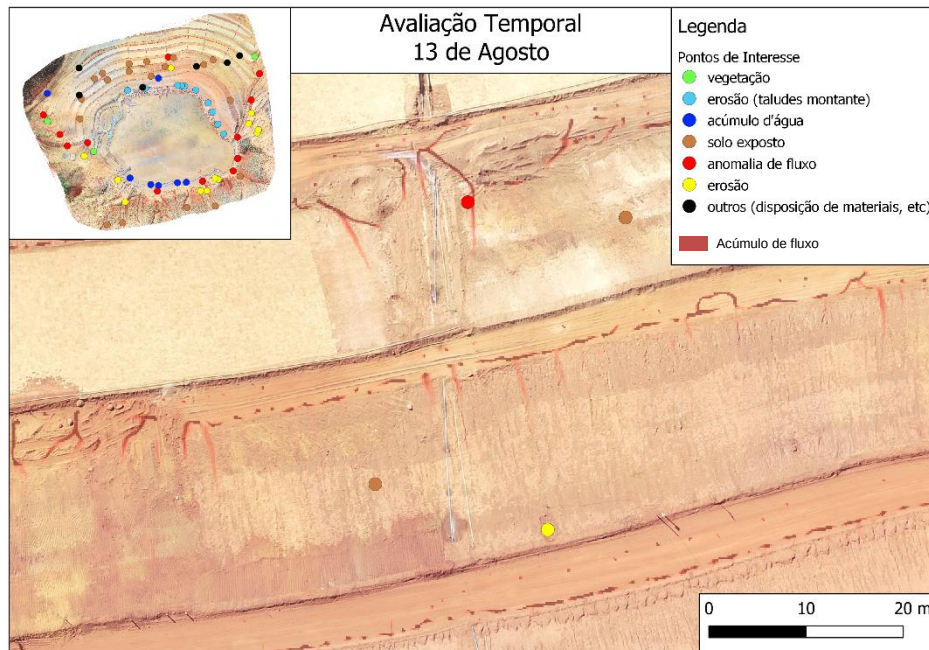


Figura 62 – Ortomosaico com sobreposição do acúmulo de fluxo de 13 de agosto, ponto de anomalia de fluxo, solo exposto e erosão.

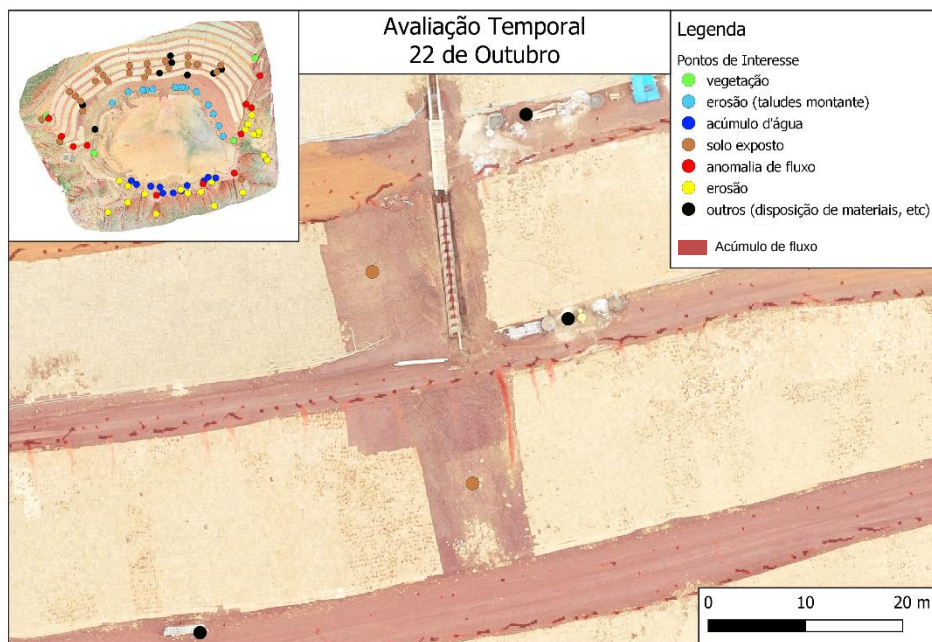


Figura 63 – Ortomosaico com sobreposição do acúmulo de fluxo de 22 de outubro, correção da anomalia de fluxo e aplicação de grama nos taludes, pontos de solo exposto e disposição de materiais.

7. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Neste trabalho os passos que antecedem a realização do aerolevantamento se mostraram eficientes e sem dificuldades de serem reproduzidos, o próprio aerolevantamento ocorreu normalmente nos dois dias da aquisição dos dados. Algumas observações merecem ser ressaltadas.

Para o planejamento do polígono de voo é preciso expandir a área tentando deixar a região de interesse ao centro, pois nas bordas do polígono ocorrem distorções devido o modelo de lente geralmente utilizado nos RPAs (lente grande angular). Os pontos de controle devem ser bem distribuídos, evitando as bordas, segundo Viana (2015) esse cuidado evita erro de posicionamento no momento do georreferenciamento.

A aquisição dos dados na mineração ocorreu com pequenas mudanças. Por se tratar de uma mineradora ativa a dinâmica do maquinário é intensa, com muitos caminhões e máquinas de grande porte escavando e realizando mudanças nos acessos ao redor do reservatório. Dessa forma não foi possível posicionar os alvos exatamente nos locais planejados por motivos de segurança, tanto no dia 13 de agosto quanto no dia 22 de outubro de 2020 (Figura 64). As mudanças dos alvos e consequentemente a coleta de coordenadas distintas mostraram um reflexo nos resultados dos processamentos de dados.

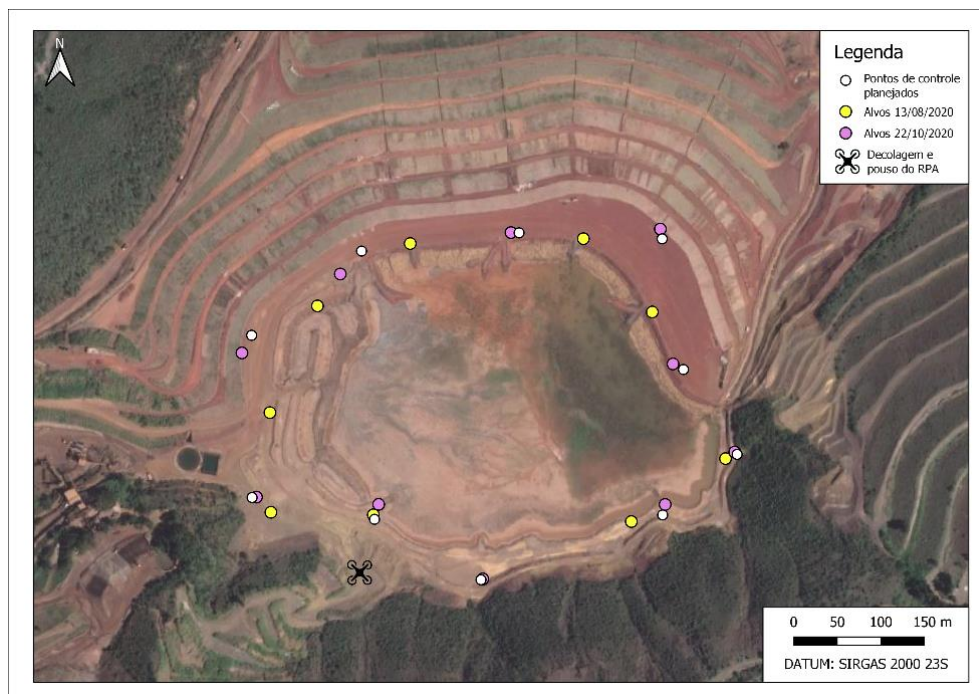


Figura 64 – Mapa de localização dos pontos de controle. Pontos em branco referem-se aos locais de distribuição dos alvos previamente demarcados em escritório, pontos em amarelo referem-se aos locais de posicionamento dos alvos no dia 13 de agosto, pontos em roxo claro aos locais de posicionamento dos alvos do dia 22 de outubro.

Os dados processados de 13 de agosto (Tabela 5) mostram que foram utilizadas todas as 456 imagens do voo, com média de 27.524 pontos chaves por imagens, além da média de 13.750,11 imagens com correspondências. O georreferenciamento apresentou um erro médio RMS de 0,007 m (0,7 cm) e a nuvem de pontos densificada contem 38.689.390 pontos.

Os dados de 22 de outubro (Tabela 6) foram utilizadas todas as 898 imagens do voo, uma média de 25.544 pontos chaves por imagem e em média 7.742,55 imagens correspondentes. O georreferenciamento apresentou um erro médio RMS de 0,014 m ou 1,4 cm, e a nuvem de pontos densificada contem 63.553.462 pontos.

Os resultados do processamento do GCP de 13 de agosto apontam os erros individuais referentes aos GCPs 9_1 e 13_1 são da ordem de centímetros, enquanto o restante dos GCPs é da ordem de milímetros. Na média os erros ficam na ordem de milímetros, enquanto que o RMS em X é de 1,1982 centímetros, Y é 0,8207 centímetros e Z é 0,3641 centímetros. Estes valores sugerem que no momento da marcação do centro dos alvos nas imagens do modelo, algumas imagens podem não ter sido marcadas tão ao centro quanto possível (Tabela 7).

O resultado de 22 de outubro aponta erros em todos GCPs da ordem de centímetros em comparação aos GCPs de 13 de agosto, da ordem de milímetros. A média os erros permanecem baixos, enquanto que o RMS em X é de 2,1640 centímetros, Y é 1,8769 centímetros e Z é 3,724 centímetros. Valores que sugerem erro de marcação do centro dos alvos, algumas imagens podem não ter sido marcadas tão ao centro (Tabela 8).

O resultado de 13 de agosto dos CPs (*Check Point*) aponta erros individuais da ordem de centímetros, sendo todos negativos em Z, podendo ser referentes a limpeza na classificação da nuvem de pontos. A média em X é 0,7555 centímetros, em Y 1,9076 centímetros e em Z -4,3738 centímetros, o RMS em X é 4,1666, em Y 3,5572 e em Z 5,0672. Estes valores sugerem o mesmo erro ocorrido no GCP, no momento da marcação do centro dos alvos nas imagens do modelo, algumas imagens podem não ter sido marcadas tão ao centro quanto possível (Tabela 9).

Os CPs (*Check Point*) de 22 de outubro apontam erros da ordem de centímetros, sendo todos negativos em X, referentes a limpeza na classificação da nuvem de pontos. A média em X é -5,4001 centímetros, em Y 1,0758 centímetros e em Z -1,1422 centímetros, o RMS em X é 6,5110, em Y 2,5575 e em Z 4,0435 centímetros. Estes valores sugerem um erro ocorrido no momento da marcação do centro dos alvos nas imagens do modelo (Tabela 10).

As tabelas 11 e 12 apresentam os valores em porcentagens da geolocalização das imagens dentro do intervalo de erros predefinidos (erros mínimos e máximos). Esses erros encontram-se no intervalo mínimo de -3.00 m e máximo de 3.00 m. Indicando que o modelo sofreu ajuste

em metros e que a causa deste erro pode ser do ajuste dos GCPs ocorrido no momento da marcação do centro dos alvos.

O resultado dos GSDs foi satisfatório para os dois aerolevantamentos, em 13 de agosto o GSD foi de 3,98 cm/pixel, enquanto que para o dia 22 de outubro foi de 3,96 cm/pixel, valores baixos que significam maior resolução espacial e mais detalhes visíveis observados na imagem, como explica artigo do Pix4D (*Ground Sampling Distance (GSD) in photogrammetry*).

Ao utilizar o MDT de 13 de agosto no software QGIS, a ação do comando do SAGA-GIS que mostra o escoamento superficial não pode ser concluída. Constatou-se que a correspondência das imagens no centro do reservatório era muito baixa, como pode ser vista na figura 21. Segundo Harwin e Lucieer (2012), a textura homogênea, como por exemplo, a água e a vegetação densa podem limitar os processos de geração da nuvem de pontos. Neste caso, a água no centro do reservatório apresenta uma textura homogênea, significa que o ajuste do modelo não encontrou muitas imagens correspondentes, deixando a região do reservatório com falhas. A solução foi realizar um recorte no centro do reservatório, retirando a área que não obteve correspondência de imagens, dessa forma permitindo a conclusão do comando do SAGA-GIS.

Pela pouca correspondência de imagens do reservatório do dia 13 de agosto o plano de voo de 22 de outubro sofreu alteração. Ao invés de realizar voos apenas em linhas paralelas, também foi realizado em linhas perpendiculares (Figura 65). O resultado surpreendeu obtendo menos correspondências entre as imagens (Figura 23), mesmo sendo o dobro de dados apresentados na tabela 6.



Figura 65 – Mudança do panejamento de voo de 22 de outubro.

O MDT e MDS de 13 de agosto apresentam recorte no centro do reservatório, a qualidade dos modelos não foi alterada. O MDT e MDS de 22 de outubro apresentam menores valores de pontos chaves e imagens correspondentes, mas não foi preciso realizar recorte na região

do reservatório uma vez que o comando do SAGA-GIS, que calcula o acúmulo de fluxo superficial foi concluído perfeitamente.

As curvas de nível geradas a partir do MDT de ambas as datas são condizentes a declividade dos modelos, como mostram as figuras 46 e 48.

Os ortomosaicos foram gerados em alta resolução e com a precisão dos modelos foi possível realizar análises visuais, permitindo verificar a estrutura da barragem remotamente e pontuar anomalias. As análises realizadas em datas distintas permitiram observar que medidas corretivas foram tomadas a fim de minimizar impactos, enquanto outros pontos continuam sendo monitorados. Algumas observações:

- A variação do nível do reservatório, com média de 40 cm a mais de água pode ser visto nas figuras 32 e 37, ressaltando que agosto costuma chover pouco comparado com outubro;
- A correção do processo erosivo, visto nas figuras 54 e 55;
- A anomalia de fluxo da estrada, após a correção a inclinação o escoamento permaneceu inadequado, figuras 56 e 57;
- A retirada de materiais do talude e a exposição do solo por longo período, figuras 58 e 59;
- A correção da anomalia de fluxo com a construção de escada hidráulica e aplicação de grama no talude, figuras 62 e 63.

8. CONCLUSÕES

O trabalho teve o propósito de demonstrar a aplicabilidade da metodologia em uma barragem de rejeitos, utilizando aeronave remotamente pilotada (RPA) associada a tecnologia de software que opera por SfM-MVS obtendo ótimos resultados em ortomosaicos, MDSS, MDTs e curvas de nível. Com o ortomosaico análises importantes foram realizadas, tanto para identificação e monitoramento de anomalias quanto para avaliação de melhorias.

Os objetivos propostos foram finalizados e dos resultados obtidos conclui-se:

- O planejamento do voo que abrange a área de interesse foi usado perfeitamente para aquisição dos dados nas duas datas;
- Apesar da diferença na disposição dos pontos de controle na aquisição dos dados foi possível aferir o posicionamento dos modelos, em 13 de agosto os GCPs e CPs no geral, obtiveram erros na casa dos milímetros, apresentando um RMS de 0,7 cm. Em 22 de outubro obtiveram erros na casa dos centímetros, possivelmente pela alta

quantidade de imagens no momento da marcação do centro dos alvos, permanecendo com RMS de 1,4 cm;

- O resultado dos GSDs foi satisfatório para os dois aerolevantamentos, 3,98 cm/pixel em 13 de agosto e 3,96 cm/pixel em 22 de outubro, valores baixos que significam maior resolução espacial e mais detalhes visíveis;
- Os erros sugeridos como sendo do momento da marcação do centro dos alvos podem ser relacionados a fatores que dificultam a precisão da marcação nas imagens, como diferentes ângulos, posições, foco da lente e intensidade de iluminação;
- O critério na classificação da nuvem de pontos densa de ambas as datas gerou MDSs e MDTs que se mostram muito próximos da realidade, o mesmo pode ser dito das curvas de nível, geradas a partir dos MDTs que apresentam declividades condizentes com a realidade do terreno;
- A avaliação temporal produzida a partir dos ortomosaicos mostrou-se uma ferramenta expressiva permitindo explorar características da estrutura, pontuando feições de interesse com precisão e acompanhando seu progresso;
- O cálculo do acúmulo de fluxo superficial no MDT resultou em padrões de escoamento superficial da estrutura, somada a avaliação temporal e usada com critério revela-se uma ferramenta de grande utilidade para as inspeções visuais.

Por fim, a conclusão deste trabalho em um período de pandemia mundial evidencia a união da tecnologia e segurança, adquirindo e processando dados confiáveis e diminuindo a exposição de trabalhadores em locais de risco, produzindo material de qualidade que auxilia a atividade da mineração. Este é só um exemplo de aplicação da metodologia, onde muitas outras frentes de trabalho podem desfrutar dos procedimentos executados.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim, F. F., & Marshak, S. 1998. The transamazonian orogeny in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil: Paleoproterozoic collision and collapse in the southern São Francisco craton region. *Precambrian Research*, 90(1-2), 29-58.
- Alkmim, F. F., & Martins-Neto, M. A. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 33(1), 127-139.
- Anders, N., Masselink, R., Keesstra, S., & Suomalainen, J., 2013. High-Res Digital Surface Modeling using Fixed-Wing UAV-based Photogrammetry. In: *Geomorphometry 2013*, Nanjing, China.
- Babinski, M., Chemale Jr, F., & Van Schmus, W. R. 1991. Pb/Pb geochronology of carbonate rocks of the Minas Supergroup, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. In *AGU FALL MEETING*, San Francisco (p. 531).
- Canuto, J. R. 2010. Estratigrafia de sequências em bacias sedimentares de diferentes idades e estilos tectônicos. *Brazilian Journal of Geology*, 40(4), 537-549.
- Carrivick, J. L., Smith, M. W., & Quincey, D. J. 2016. *Structure from Motion in the Geosciences*. John Wiley & Sons.
- Conrad O. 2004. SAGA-GIS Module Library Documentation (v2.2.0). http://www.saga-gis.org/saga_tool_doc/2.2.0/tin_tools_5.html (acessado em Outubro de 2021).
- Dorr, J. V. N. 1969. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil (No. 641-A, pp. A1-A110). US Government Printing Office.
- Felgueiras, C. A., & Câmara, G. 2001. Modelagem numérica de terreno. Fuks, Sd, Carvalho, Ms, Câmara, G. & Monteiro, AMV *Análise Espacial de Dados Geográficos*. <http://www.dpi.inpe.br/gilberto/livro/analise/index.html> (acessado em Agosto de 2021).
- Furukawa, Y., & Hernández, C. 2015. Multi-view stereo: A tutorial. *Foundations and Trends® in Computer Graphics and Vision*, 9(1-2), 1-148.
- Guth, P. L., Van Niekerk, A., Grohmann, C. H., Muller, J. P., Hawker, L., Florinsky, I. V., ... & Strobl, P. 2021. Digital elevation models: Terminology and definitions. *Remote Sensing*, 13(18), 3581.

- Harwin, S., & Lucieer, A. 2012. Assessing the accuracy of georeferenced point clouds produced via multi-view stereopsis from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery. *Remote Sensing*, 4(6), 1573-1599.
- Keim, R. F., Skaugset, A. E., & Bateman, D. S. 1999. Digital terrain modeling of small stream channels with a total-station theodolite. *Advances in water resources*, 23(1), 41-48.
- Kurz, C., Thormählen, T., & Seidel, H. P. 2011. Visual fixation for 3d video stabilization. *JVRB- Journal of Virtual Reality and Broadcasting*, 8(2).
- Pix4D - Ground sampling distance (GSD) in photogrammetry. <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202559809-Ground-sampling-distance-GSD-in-photogrammetry> (acessado em Julho de 2021).
- Pix4D - How are tie points errors defined - Mean, Sigma, RMS? <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/203604125-How-are-tie-points-errors-defined-Mean-Sigma-RMS> (acessado em Outubro de 2021).
- Renger, F. E., Noce, C. M., Romano, A. W., & Machado, N. 1995. Sedimentary evolution of the Minas Supergroup: 500 Ma of geological record in the Quadrilátero Ferrífero of Minas Gerais, Brazil Abstr. In International Conference on Tectonics and Metallogeny of Early/Mid Precambrian Orogenic Belts. Bureau des Congrès de la Ecole Polytechnique de Montréal, Montreal, Canada.
- Schorscher, J. H. D. 1992. Arcabouço petrográfico e evolução crustal de terrenos pré-cambrianos do sudeste de Minas Gerais: quadrilátero ferrífero, espinhaço meridional e domínios granito-gnáissicos adjacentes (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).
- Simmons, G. C., & Maxwell, C. H. 1961. Grupo Tamanduá da Serie Rio das Velhas: Brazil. Departamento Nacional de Produção Mineral Div. Geol. Mineral. Bol, 211, 30.
- Sopchaki, C. H., da Paz, O. L. D. S., de Salles Graça, N. L. S., & Sampaio, T. V. M. (2018). Verificação da qualidade de ortomosaicos produzidos a partir de imagens obtidas com aeronave remotamente pilotada sem o uso de pontos de apoio. *Raega-O Espaço Geográfico em Análise*, 43, 200-214.
- Stumpf, A., Malet, J. P., Allemand, P., Pierrot-Deseilligny, M., & Skupinski, G. 2015. Ground-based multi-view photogrammetry for the monitoring of landslide deformation and erosion. *Geomorphology*, 231, 130-145.

- Tarolli, P., Arrowsmith, J. R., & Vivoni, E. R. 2009. Understanding earth surface processes from remotely sensed digital terrain models. *Geomorphology*, 113(1), 1-3.
- Tavani, S., Granado, P., Corradetti, A., Girundo, M., Iannace, A., Arbués, P., & Mazzoli, S. 2014. Building a virtual outcrop, extracting geological information from it, and sharing the results in Google Earth via OpenPlot and Photoscan: An example from the Khaviz Anticline (Iran). *Computers & Geosciences*, 63, 44-53.
- Tempfli, K., Huurneman, G., Bakker, W., Janssen, L. L., Feringa, W. F., Gieske, A. S. M., ... & Woldai, T. 2009. Principles of remote sensing: an introductory textbook. International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
- Viana, C. D., 2015. Análise estrutural de descontinuidades baseada em técnicas de Structure from Motion: aplicação em mina a céu aberto. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo.
- Viana, C. D., Endlein, A., da Cruz Campanha, G. A., & Grohmann, C. H. 2016. Algorithms for extraction of structural attitudes from 3D outcrop models. *Computers & geosciences*, 90, 112-122.
- 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*, 179, 300-314.