

# Utilização de drones na gestão de instalações de armazenamento de água e de resíduos industriais

<https://doi.org/10.21814/uminho.ed.142.40>

**Pedro Ferreira<sup>1</sup>, Luis Ribeirinho<sup>1</sup>,  
Gonçalo Tavares<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> TPF – Consultores de Engenharia e Arquitetura, S.A., Lisboa

## Resumo

Os drones, também conhecidos como *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV), têm desempenhado um papel transformador na indústria da engenharia. Neste artigo, discute-se o impacto destes veículos equipados com câmara e sensores, destacando a sua crescente integração com o *Building Information Modelling* (BIM). Os drones encontram aplicações em diversos domínios, desde levantamentos topográficos até monitorização de locais de construção, inspeções estruturais e monitorização ambiental. O caso de estudo destacado neste artigo ilustra o seu uso na prestação de serviços em instalações de armazenamento de água e de resíduos industriais. Esta prestação de serviços inclui a modelação da deposição de resíduos, a avaliação da capacidade de armazenamento de água e de resíduos e o controlo geométrico tanto da estrutura de contenção como dos resíduos. Estas atividades baseiam-se nos ortofotomapas e na nuvem de pontos gerados pelo levantamento com drone. A tecnologia subjacente à produção desses elementos envolve um drone de alta precisão com posicionamento cinemático em tempo real (RTK), software de planeamento de voo, fotogrametria e ferramentas de processamento de nuvens de pontos. Este artigo também aborda alguns desafios como a interferência das superfícies refletoras na fase de processamento das nuvens de pontos, da regulamentação associada ao uso de UAVs e das limitações meteorológicas. Com os avanços tecnológicos em UAVs e Inteligência Artificial, é esperada uma maior integração destas tecnologias em projetos de infraestruturas em grande escala. Este artigo destaca o papel vital dos drones como uma ferramenta essencial no cenário moderno da engenharia.

## 1. Introdução

Os drones, frequentemente designados por *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV) são veículos operados sem um piloto a bordo [1]. Inicialmente concebidos para aplicações militares, estas plataformas aéreas evoluíram rapidamente para se tornarem instrumentos fundamentais em várias outras áreas [2]. No cenário da engenharia atual, a integração de drones deu início a uma mudança de paradigma nas metodologias convencionais, gerando uma infinidade de vantagens [3]. Proporcionam soluções rentáveis, melhoram as medidas de segurança em inspeções de risco e apresentam capacidades de resposta rápida a missões de levantamento aéreo. Além disso, a sua aptidão para obter dados precisos, realizar mapeamento de áreas e monitorizar operações de infraestruturas catalisa a eficiência, a tomada de decisões informadas e estratégias de manutenção proativas [4].

A associação das tecnologias BIM e drones resulta num poderoso conjunto de ferramentas, tecnologias e metodologias que, em conjunto, possibilitam uma abordagem transformadora na criação e administração de projetos. A integração de drones na estrutura do BIM amplifica as capacidades de gestão de projetos, aproveitando a recolha de dados aéreos com sensores sofisticados e tecnologia de imagem. Os drones com câmaras de alta resolução, sensores e sistemas GNSS captam dados com grande rigor do local, oferecendo uma representação visual abrangente do ambiente do projeto [5]. Estas perspetivas aéreas complementam as ferramentas digitais do BIM, melhorando a visualização do projeto e a precisão dos dados ao longo do ciclo de vida do projeto. Os dados aéreos capturados integram-se perfeitamente no software BIM, permitindo um mapeamento preciso para a modelação 3D e uma análise espacial com grande rigor [6]. Esta integração aumenta o rigor da documentação do projeto e facilita a tomada de decisões informadas, fornecendo às partes interessadas informações atualizadas e detalhadas sobre a área de estudo [7].

Além disso, os drones contribuem para melhorar as práticas de gestão da construção. Facilitam inspeções regulares ao local, avaliações estruturais e monitorização do progresso, oferecendo uma alternativa económica e eficiente em termos de tempo aos métodos manuais tradicionais. Ao capturar dados de alta qualidade com rapidez e precisão, os drones aumentam as capacidades de monitorização e controlo de qualidade do projeto BIM [8].

## 2. Estudo de caso: drones em instalações de armazenamento de água e resíduos industriais

A TPF – Consultores de Engenharia e Arquitetura, S.A. (TPF Consultores), no âmbito de um *Engineer of Record* (EOR) para serviços para instalações de armazenamento de rejeitados e água é responsável pela produção de relatórios detalhados sobre o progresso da construção das bermas internas de descarga de rejeitados espessados (resíduos industriais mineiros) e dos sistemas ativos de deposição de rejeitados. Estes relatórios, realizados anual e mensalmente, englobam diversas avaliações, como o

registro de dados geométricos e operacionais, registros fotográficos e recomendações específicas do local. As avaliações mensais envolvem descrições aprofundadas, documentação fotográfica, avaliação da evolução da deposição e planos de deposição suportados por levantamentos e modelação. Para obter estes relatórios, a TPF Consultores utiliza um drone DJI Phantom 4 RTK para realizar os levantamentos. Os dados aéreos recolhidos são processados através da plataforma DroneDeploy baseada na nuvem, produzindo nuvens de pontos, ortofotomapas e facilitando a visualização, partilha, e análises entre mapas. Além disso, os softwares CloudCompare, Autodesk Civil 3D, GeoHECHMS e Muk3D são utilizados em conjunto com os dados gerados pela plataforma DroneDeploy. Estas ferramentas auxiliam na realização dos levantamentos topográficos com precisão dentro dos requisitos exigidos para este tipo de trabalho, incluindo a modelação avançada e análise volumétrica, o que resulta em relatórios e planeamento abrangentes e precisos.

## 2.1. Barragem de rejeitados

Uma barragem de rejeitados é um reservatório feito para reter resíduos sólidos e água resultantes dos processos de extração de minérios. Estes resíduos são bombeados em forma líquida para o local de retenção e depositados usando diferentes métodos [9]. Estas barragens estão entre as maiores estruturas construídas no mundo [10].

Neste caso de estudo, a área de deposição estende-se por 237 hectares, medindo nos seus pontos mais afastados, 2,1 quilómetros de comprimento de Este para Oeste e 1,7 quilómetros de Norte para Sul, com um desnível altimétrico de 40 metros. Uma grande parte desta área é inacessível, não sendo possível realizar-se inspeções e levantamentos topográficos utilizando métodos clássicos.

## 2.2. DJI Phantom 4 RTK

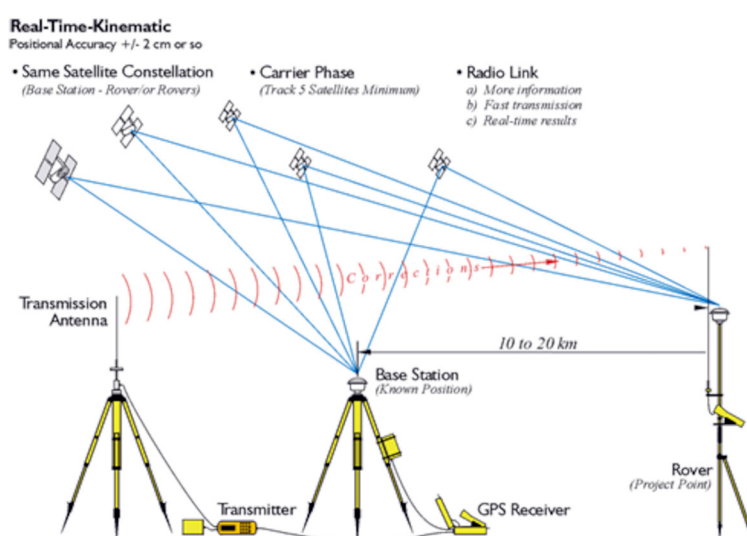
O drone utilizado neste caso de estudo foi o DJI Phantom 4 RTK, equipamento que se destaca por integrar um sistema *Real-Time Kinematic* (RTK) que garante uma precisão dentro da tolerância do projeto. Possui uma autonomia em voo de aproximadamente 30 minutos com uma bateria, uma câmara com um sensor de 1" CMOS e 20 Megapixel e uma velocidade mecânica do obturador de 8 - 1/2000 s. O DJI Phantom 4 RTK satisfaz também os requisitos de precisão de mapeamento para o "standard" Digital Orthophotos Class III [11].

## 2.3. Posicionamento RTK

O posicionamento RTK é uma técnica utilizada para melhorar a precisão de uma solução de navegação através das observações emitidas por posicionamento global por satélite (GNSS), como o GPS, GLONASS, Galileo e BeiDou [12]. Esta técnica é baseada na utilização da medição simultânea da fase das ondas portadoras dos sinais capturados pelo drone e por uma estação de referência permanente com coordenadas

conhecidas, sendo as observações capturadas por esta estação enviadas através de um sistema de comunicação diretamente para o drone, corrigindo as observações capturadas por este. Esta técnica permite mitigar a maior parte dos erros que afetam o posicionamento. As observações capturadas por uma estação de referência GNSS permanente, de observação contínua, permitem ser utilizadas como correções para posicionamento RTK numa área de raio aproximado de 20 quilómetros. Neste caso, a estação de referência GNSS permanente utilizada pertence à Rede Nacional de Estações Permanentes (ReNEP), cuja gestão e manutenção está a cargo da Direção Geral do Território (DGT). Com esta técnica é possível alcançar valores de precisão na ordem de poucos centímetros [13] [14]. A figura 1 [15] mostra um diagrama ilustrativo do método de posicionamento GNSS RTK.

**Figura 1**  
Real-Time Kinematic.  
Fonte: GPS for Land  
Surveyors.



## 2.4. Planeamento do voo e aquisição de imagens

Neste caso de estudo, o processo de planeamento de voo foi executado utilizando as capacidades do DroneDeploy e a aplicação DJI GS RTK. A utilização combinada destes programas permitiu uma abordagem precisa ao planeamento da missão, incorporando funcionalidades avançadas para uma definição ótima dos parâmetros de voo e uma precisão centimétrica durante a navegação e recolha de dados.

Antes do primeiro voo nesta área, foi efetuada uma verificação pré-voo do drone e dos seus acessórios para garantir que estavam em boas condições. A distância da amostragem do solo (GSD), foi determinada a partir da altura de voo e dos parâmetros da câmara, calculada utilizando a seguinte fórmula [16]:

$$GSD = \frac{S_i \times H \times 100}{F_r \times IM_i}$$

em que  $S_l$  é a largura real do sensor (mm),  $H$  a altura do voo (m),  $F_r$  é a distância focal real (mm) e  $IM_l$  é a largura da imagem (px). Sabendo as características da câmara deste drone foi possível calcular o GSD, em que  $S_l$  é igual a 13,2 mm,  $H$  é igual a 90 m,  $F_r$  é igual a 8,8 mm e  $IM_l$  é igual a 5472 px, o que resulta num GSD de 2,47 cm/px.

A fase subsequente envolveu a importação do mapa de base da área de estudo (definido no formato \*.kmz) para o DroneDeploy. Esta etapa foi essencial para calcular a duração do voo e a quantidade de baterias necessárias, bem como para efetuar ajustes essenciais na área delimitada para o voo, como a otimização da sobreposição de imagens. Estas medidas garantiram que o ficheiro .kmz importado para a aplicação DJI GS RTK fosse ajustado para um bom desempenho durante as missões. Utilizando o padrão de voo definido pela aplicação DJI GS RTK, o DJI Phantom 4 RTK consegue cobrir a totalidade da área de forma automática em passagens paralelas, captando fotografias sobrepostas da área de estudo. Neste caso de estudo, são normalmente captadas aproximadamente 2900 fotografias todos os meses (figura 2), num período que pode levar entre 5 e 8 horas para toda a área. Esta diferença de tempo explica-se pelas condições atmosféricas e pelo tempo necessário para adquirir o número mínimo de satélites.

#### Map Details Summary ⓘ

Project Name	24Out2023
Photogrammetry Engine	DroneDeploy Proprietary
Date Of Capture	Oct 24, 2023
Date Processed	Oct 26, 2023
GSD Orthomosaic (GSD DEM)	2.59cm/px (DEM 10.36cm/px)
Area Bounds (Coverage)	5739071.48m <sup>2</sup> (59%)
Image Sensors	DJI - FC6310R
Average GPS Trust	0.06m

#### Quality & Accuracy Summary ⓘ

Image Quality	High texture images
Median Shutter Speed	1/240
Images Uploaded (Aligned %)	2956 (100%)
Camera Optimization	0.00% variation from reference intrinsics
GCP & Checkpoint count	74 GCPs - Mean RMS Error 3.15cm 18 Checkpoints - Mean RMS Error 2.44cm

**Figura 2**

Extrato do relatório produzido após o processamento no DroneDeploy.

Neste processo são utilizados pontos de controlo (GCP) que servem como marcadores de referência no solo com coordenadas conhecidas e são utilizados para melhorar a qualidade e precisão dos mapas. Os pontos de verificação (Checkpoints) são pontos de referência adicionais, utilizados para validar de forma independente a qualidade e a precisão dos mapas. Mensalmente, antes dos voos, é realizado o levantamento topográfico clássico destes pontos.

## 2.5. Processamento das imagens

O processamento de dados é uma fase crítica no fluxo de trabalho da operação, e o DroneDeploy é uma plataforma abrangente para o tratamento eficiente e a

extração de informações significativas dos dados aéreos recolhidos. Após o drone ter completado a sua missão e captado as imagens da área designada, as imagens são carregadas para a plataforma DroneDeploy. O software utiliza algoritmos fotogramétricos avançados para gerar um mapa aéreo preciso, nuvem de pontos e modelos tridimensionais. Estes mapas e modelos fornecem informações importantes sobre a topografia e das características gerais do terreno. O DroneDeploy simplifica também o cálculo de volumes e áreas para fins de construção. Ao tirar partido dos modelos 3D e dos dados geoespaciais, a plataforma permite medir com precisão volumes e áreas, o progresso da construção e a ocupação do solo. A plataforma facilita também a colaboração e a comunicação entre os membros da equipa, fornecendo ferramentas de anotação e colaboração. Os utilizadores podem marcar diretamente pontos de interesse específicos nos mapas, partilhar ideias e colaborar em tempo real. Esta funcionalidade aumenta a eficiência global das equipas de projeto, permitindo uma rápida tomada de decisões com base nos dados analisados. Além disso, o DroneDeploy permite aos utilizadores exportar os dados processados em vários formatos, incluindo mapas georreferenciados, modelos 3D e nuvens de pontos.

## 2.6. Processamento da nuvem de pontos

Após ter sido gerada a nuvem de pontos no DroneDeploy, o passo seguinte consiste em exportá-la da plataforma e importá-la para um software especializado de processamento de nuvens de pontos. O processamento de nuvens de pontos, especialmente quando se trata de conjuntos de dados extensos, pode ser uma tarefa complexa. No presente estudo, o DroneDeploy gera aproximadamente 60 milhões de pontos. Ainda assim, o uso de ferramentas e técnicas adequadas permite que este processo seja eficiente.

O CloudCompare oferece recursos robustos para a classificação e processamento rápido de nuvens de pontos [17]. O CloudCompare aborda um dos principais desafios no processamento de nuvens de pontos – a limpeza de dados, funcionalidade que aumenta consideravelmente a qualidade e a confiabilidade dos dados. Esta solução oferece também ferramentas de filtragem para remover ruídos ou valores divergentes do conjunto de dados da nuvem de pontos. Apesar de isso não limpar diretamente corpos de água, com as ferramentas de segmentação no CloudCompare são separadas as áreas específicas de interesse dentro da nuvem de pontos, permitindo a limpeza do ruído produzido por esses corpos. Outra funcionalidade do CloudCompare é a ferramenta de rasterização. Trata-se de um recurso poderoso para converter as nuvens de pontos numa grelha *raster* 2.5D que depois permite gerar curvas de nível [18] na escala 1:100.

É esse conjunto de curvas de nível, que é importado para o Autodesk Civil 3D com o propósito de gerar o Modelo Digital do Terreno (DTM). Esse modelo, uma representação digital das características topográficas do terreno, é então partilhado entre todos os membros da equipa por meio de um *datashortcut*. Este processo permite que todos os profissionais envolvidos no projeto tenham acesso ao DTM atualizado e possam colaborar de forma consistente e eficiente no desenvolvimento e planeamento do projeto.

## 2.7. Modelação e análise avançada

Para a modelação e análise avançada é utilizado o software Muk3D, que oferece um conjunto abrangente de ferramentas para aumentar significativamente a produtividade e a eficiência, reduzindo os custos e o tempo investido em tarefas de análise e modelação 3D. O Muk3D é um software especializado em modelação 3D complexa, centrando-se principalmente em instalações de armazenamento de rejeitados e estruturas de terraplanagem de grande escala. Com o Muk3D, os especialistas podem simular dinamicamente o processo de enchimento das instalações com base em diversos dados, incluindo as características dos rejeitados e a colocação dos pontos de descarga. Complementando as funcionalidades do Muk3D, o Autodesk Civil 3D fornece uma plataforma versátil para o projeto e a documentação de engenharia civil aproveitando o DTM partilhado. Esta estrutura colaborativa facilita as capacidades de análise melhoradas, os processos de tomada de decisão informados e os fluxos de trabalho simplificados, integrando eficazmente a capacidade de modelação e documentação.

Para os especialistas que utilizam o GeoHECHMS – um software de análise e simulação centrado na modelação hidrológica e hidráulica – a interação colaborativa entre o Muk3D e o Autodesk Civil 3D também apresenta vantagens. Estes especialistas podem aceder a dados precisos do terreno integrando estes modelos partilhados com o GeoHECHMS, garantindo simulações hidrológicas e hidráulicas precisas. Este modelo de dados partilhados fornece uma base confiável para modelar o fluxo de água, a erosão e o transporte de sedimentos. É assim possível realizar análises abrangentes combinando os recursos de modelagem de terraplanagem e rejeitados do Muk3D com as simulações hidrológicas do GeoHECHMS. Esta integração permite uma avaliação mais holística dos padrões de fluxo de água, movimento de sedimentos e riscos de erosão. O modelo compartilhado é uma referência comum, garantindo a consistência na representação do terreno no Muk3D, Autodesk Civil 3D e GeoHECHMS. Esta plataforma partilhada promove fluxos de trabalho colaborativos entre especialistas em modelação e gestão da água. Isto simplifica a configuração e inicialização de modelos, reduzindo a introdução manual de dados e potenciais erros.

## 3. Desafios e considerações

Abordar os desafios e considerações associados à integração de drones na engenharia implica lidar com vários fatores que podem influenciar a sua utilização eficaz, incluindo:

- Interferência de superfícies refletoras: estas representam um desafio durante o processamento de nuvens de pontos, causando imprecisões na recolha e análise de dados. Encontrar métodos para mitigar estas interferências, como ajustar as trajetórias de voo ou empregar técnicas de levantamento alternativas, torna-se crucial para um processamento preciso de dados.



- **Quadro regulamentar:** o uso de drones está sujeito a diretrizes e regulamentos rigorosos. A conformidade com as estruturas legais relativas a permissões de voo, restrições de espaço aéreo, segurança e privacidade de dados é essencial. A adesão a estas diretrizes garante a utilização responsável e legal da tecnologia de drones.
- **Restrições Meteorológicas:** as condições climáticas têm um impacto significativo nas operações dos drones. Condições meteorológicas adversas, como ventos fortes, precipitação ou baixa visibilidade, podem dificultar os voos dos drones, afetando os horários de trabalho e a precisão da recolha de dados. As estratégias para gerir e adaptar os fluxos de trabalho às limitações relacionadas com o clima são fundamentais para manter a eficiência operacional.

Aliar a integração do BIM com sistemas de informação geográfica (SIG) e o potencial da inteligência artificial (IA) como desafios e considerações essenciais neste contexto também é crucial para compreender o panorama futuro destas tecnologias.

A integração do BIM com SIG representa um desafio e uma oportunidade [19]. Embora estas tecnologias ofereçam conjuntos de dados valiosos e complementares, a sua integração eficaz ainda é um desafio. A harmonização de padrões, formatos de dados e processos entre o BIM, que se concentra na representação 3D detalhada de edifícios e infraestruturas, e o SIG, que se concentra na análise espacial e geográfica, requer abordagens cuidadosas para garantir uma colaboração eficiente e a troca de informações sem perdas [20]. Por outro lado, a IA pode desempenhar um papel crucial na integração entre BIM e SIG e na análise avançada dos dados, permitindo a deteção automatizada de padrões, identificação de anomalias e até previsões mais precisas.

A colaboração entre estas tecnologias promete ampliar ainda mais a capacidade de análise, previsão e tomada de decisão, oferecendo uma visão mais holística e eficiente na fase de projeto, construção, gestão e manutenção [21].

No entanto, superar os desafios de integração, garantir a conformidade regulatória e ética [22], desenvolver algoritmos de IA robustos e confiáveis, e desenvolver medidas de cibersegurança fortes, são imperativos para aproveitar todo o potencial destas tecnologias [23].

## 4. Conclusão

A integração de drones na gestão de instalações de armazenamento de água e resíduos industriais representa um avanço fundamental na engenharia. Este artigo pretende ilustrar a transformação que os drones, aliados a software avançado, trouxeram para a captura, processamento e análise de dados em larga escala desempenhando também um papel central na aquisição de dados aéreos precisos e detalhados, permitindo a visualização de áreas extensas, muitas vezes inacessíveis por métodos convencionais. A sua conjugação com plataformas como DroneDeploy



simplifica não apenas o processamento de imagens, mas também a colaboração entre equipas, oferecendo uma visão detalhada do terreno, cálculos precisos e uma base sólida para análises complexas. O processamento e a análise de dados utilizando plataformas de software como as abordadas neste artigo, demonstram a capacidade de gerar informações sobre o terreno. Estes recursos permitem simulações precisas, fundamentais para avaliar o enchimento de barragens de rejeitados e garantir a segurança e eficácia destas estruturas. A colaboração entre software especializado, a partilha eficaz de dados e a integração de várias tecnologias exemplificam a sinergia entre drones, processamento de dados e modelação avançada. A contínua evolução tecnológica e a adaptação a desafios em constante mudança são cruciais para maximizar o potencial dos drones na Engenharia, promovendo uma abordagem mais eficiente, precisa e segura.

## Referências

- [1] F. Nex e F. Remondino, «UAV for 3D mapping applications: a review», *Appl. Geomat.*, vol. 6, n.º 1, pp. 1-15, mar. 2014, doi: 10.1007/s12518-013-0120-x.
- [2] K. Al-Dosari, Z. Hunaiti, e W. Balachandran, «A Review of Civilian Drones Systems, Applications, Benefits, Safety, and Security Challenges», em *The Effect of Information Technology on Business and Marketing Intelligence Systems*, vol. 1056, M. Alshurideh, B. H. Al Kurdi, R. Masa'deh, H. M. Alzoubi, e S. Salloum, Eds., em *Studies in Computational Intelligence*, vol. 1056., Cham: Springer International Publishing, 2023, pp. 793-812. doi: 10.1007/978-3-031-12382-5\_43.
- [3] R. Salvini *et al.*, «UAV-mounted Ground Penetrating Radar: an example for the stability analysis of a mountain rock debris slope», *J. Mt. Sci.*, vol. 20, n.º 10, pp. 2804-2821, out. 2023, doi: 10.1007/s11629-023-8162-y.
- [4] F. Nex e F. Remondino, «Preface: Latest Developments, Methodologies, and Applications Based on UAV Platforms», *Drones*, vol. 3, n.º 1, p. 26, mar. 2019, doi: 10.3390/drones3010026.
- [5] D. F. R. Parracho, «Processos Digitais para a Realização de Levantamentos Fotogramétricos e Termográficos com Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT)», Universidade do Porto (Portugal), 2021.
- [6] S. I. Cho, J. H. Lim, S. B. Lim, e H. C. Yun, «A Study on DEM-based Automatic Calculation of Earthwork Volume for BIM Application», *J. Korean Soc. Surv. Geod. Photogramm. Cartogr.*, vol. 38, n.º 2, pp. 131-140, 2020, doi: 10.7848/ks-gpc.2020.38.2.131.
- [7] C. Bonilla, B. Brentan, I. Montalvo, D. Ayala-Cabrera, e J. Izquierdo, «Digitalization of Water Distribution Systems in Small Cities, a Tool for Verification and Hydraulic Analysis: A Case Study of Pamplona, Colombia», *Water*, vol. 15, n.º 21, p. 3824, nov. 2023, doi: 10.3390/w15213824.

- [8] S. Lee, J. Y. Bae, A. Sharafat, e J. Seo, «Waste Lime Earthwork Management Using Drone and BIM Technology for Construction Projects: The Case Study of Urban Development Project», *KSCE J. Civ. Eng.*, dez. 2023, doi: 10.1007/s12205-023-1245-z.
- [9] D. Kossoff, W. E. Dubbin, M. Alfredsson, S. J. Edwards, M. G. Macklin, e K. A. Hudson-Edwards, «Mine tailings dams: Characteristics, failure, environmental impacts, and remediation», *Appl. Geochem.*, vol. 51, pp. 229-245, dez. 2014, doi: 10.1016/j.apgeochem.2014.09.010.
- [10] S. G. Vick, «Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams», 2020, doi: 10.14288/1.0394902.
- [11] «Phantom 4 RTK - Product Information – DJI», DJI Official. Acedido: 23 de dezembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.dji.com/pt/phantom-4-rtk/info>
- [12] N. Shen *et al.*, «A Review of Global Navigation Satellite System (GNSS)-based Dynamic Monitoring Technologies for Structural Health Monitoring», *Remote Sens.*, vol. 11, n.º 9, p. 1001, abr. 2019, doi: 10.3390/rs11091001.
- [13] L. C. R. P. Silva, «Avaliação e melhoramento de qualidade posicional de base de dados geográficos de sinalização rodoviária», 2019, [Em linha]. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/125672/2/378531.pdf>
- [14] «Bem-vindo à página da ReNEP | ReNEP». Acedido: 23 de dezembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://renep.dgterritorio.gov.pt/>
- [15] «RTK and the Federal Communications Commission (FCC) | GEOG 862: GPS and GNSS for Geospatial Professionals». Acedido: 27 de dezembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.e-education.psu.edu/geog862/node/1845>
- [16] Y.-H. Tu, S. Phinn, K. Johansen, A. Robson, e D. Wu, «Optimising drone flight planning for measuring horticultural tree crop structure», *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.*, vol. 160, pp. 83–96, 2020.
- [17] T. Beni *et al.*, «Classification of rock slope cavernous weathering on UAV photogrammetric point clouds: The example of Hegra (UNESCO World Heritage Site, Kingdom of Saudi Arabia)», *Eng. Geol.*, vol. 325, p. 107286, nov. 2023, doi: 10.1016/j.enggeo.2023.107286.
- [18] «Rasterize – CloudCompareWiki». Acedido: 25 de dezembro de 2023. [Em linha]. Disponível em: <https://www.cloudcompare.org/doc/wiki/index.php/Rasterize>
- [19] J. Cho, C. Kim, K. J. Lim, J. Kim, B. Ji, e J. Yeon, «Web-based agricultural infrastructure digital twin system integrated with GIS and BIM concepts», *Comput. Electron. Agric.*, vol. 215, p. 108441, dez. 2023, doi: 10.1016/j.compag.2023.108441.

- [20] A. M. Abd, A. H. Hameed, e B. M. Nsaif, «Documentation of construction project using integration of BIM and GIS technique», *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 21, n.º 7, pp. 1249-1257, nov. 2020, doi: 10.1007/s42107-020-00273-9.
- [21] Z. Liu, X. Gu, Y. Chen, e Y. Chen, «System Architecture and Key Technologies for the Whole Life Cycle of Smart Road», *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1972, n.º 1, p. 012105, jul. 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1972/1/012105.
- [22] E. Redondo, «Investigación aplicada al ámbito de la expresión gráfica arquitectónica por medios digitales. Marco de referencia y hoja de ruta», *VLC Arquít. Res. J.*, vol. 10, n.º 2, pp. 203-224, out. 2023, doi: 10.4995/vlc.2023.19787.
- [23] M. Chiang e T. Zhang, «Fog and IoT: An Overview of Research Opportunities», *IEEE Internet Things J.*, vol. 3, n.º 6, pp. 854-864, dez. 2016, doi: 10.1109/JIOT.2016.2584538.