

Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP): um meio rápido e acurado para monitoramento de aterros sanitários

Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS): a fast and accurate way for monitoring landfills

Barbara Fernanda da Cunha Tasca¹; Fernanda Miguel Franco²; Auberto José Barros Siqueira³

¹ Ministério Público do Estado de Mato Grosso, Centro de Apoio Técnico à Execução Ambiental, Cuiabá/MT, Brasil. Email: barbarafernandatasca@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0034-0892>

² Ministério do Desenvolvimento Agrário e Agricultura Familiar, Superintendência de Mato Grosso, Várzea Grande/MT, Brasil. Email: fermigfran@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3903-2435>

³ Universidade Federal de Mato Grosso, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Cuiabá/MT, Brasil. Email: ajbsiqueira@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9364-4520> /

Resumo: Os aterros sanitários são uma das principais alternativas para a disposição de resíduos sólidos no Brasil. No entanto, muitos deles se transformaram em lixões a céu aberto devido às ineficiências operacionais, destacando a necessidade de monitoramento ambiental. Este estudo avaliou a aplicabilidade de ortomosaico e de modelo digital de superfície obtidos via aeronave remotamente pilotada para o monitoramento de aterros sanitários. A área de estudo foi o aterro sanitário de Cuiabá, Brasil. O aerolevantamento seguiu procedimentos fotogramétricos, utilizando pontos de controle coletados com GPS geodésico para garantir a correção da altitude. As imagens capturadas foram processadas por meio de software de fotogrametria para produção do ortomosaico e do modelo digital de superfície de alta resolução. A análise revelou problemas críticos na estrutura e operação do aterro, como vazamentos de chorume, abandono de lagoas de tratamento de chorume, exposição inadequada de resíduos e evidências de queimada de resíduos sólidos. Essas condições representam riscos ambientais significativos, como contaminação do solo e de águas subterrâneas, bem como impactos à saúde pública. O estudo conclui que a aeronave remotamente pilotada é uma ferramenta eficiente para monitoramento contínuo de aterros sanitários, fornecendo dados precisos para identificar falhas operacionais e melhorar a gestão ambiental.

Palavras-chave: Resíduos sólidos; Monitoramento; Aerolevantamento.

Abstract: Sanitary landfills are one of the main alternatives for solid waste disposal in Brazil. However, many of them have turned into open dumps due to operational inefficiencies, highlighting the need for effective monitoring. This study evaluated the applicability of orthomosaic and digital surface model obtained via remotely piloted aircraft system for the environmental monitoring of landfills. The study area was the landfill of Cuiabá, Brazil. The aerial survey followed photogrammetric procedures, utilizing control points collected with geodetic GPS to ensure altitude correction. The images captured by the remotely piloted aircraft system were processed using photogrammetry software to produce a high-resolution orthomosaic and digital surface model, which served as a basis for analyzing the structural and operational conditions of the landfill. The analysis revealed critical issues such as leachate leaks, abandonment of leachate treatment ponds, improper exposure of waste, and evidence of solid waste burning. These conditions pose significant environmental risks, such as soil and groundwater contamination, as well as public health impacts. The study concludes that remotely piloted aircraft systems are an efficient tool for continuous landfill monitoring, providing accurate data to identify operational failures and improve environmental management.

Keywords: Solid waste; Monitoring; Aerial survey.

Recebido: 03/03/2025; Aceito: 16/05/2025; Publicado: 09/06/2025.

1. Introdução

O crescimento contínuo de resíduos sólidos no Brasil tem trazido desafios significativos para a gestão da saúde pública. Segundo dados da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2020), entre 2010 e 2019, a geração total de resíduos sólidos urbanos no Brasil registrou considerável incremento, passando de 67 milhões para 79 milhões de tonelada por ano, e a geração per capita aumentou de 348 quilogramas por ano para 379 quilogramas por ano.

Grande parte desses resíduos é disposta em aterros sanitários, com um aumento de 33 milhões de toneladas por ano em 2010 para 43 milhões de toneladas por ano em 2019, ou seja, um incremento de 10 milhões de toneladas. Contudo, a quantidade de resíduos destinada para unidades inadequadas (lixões e aterros controlados) também cresceu, passando de 25 milhões de toneladas por ano para pouco mais de 29 milhões de toneladas por ano (ABRELPE, 2020).

Para enfrentar a crescente geração de resíduos sólidos e mitigar os impactos ambientais de sua disposição inadequada, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), por meio da Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010). Essa legislação estabelece diretrizes para o gerenciamento de resíduos sólidos, com ênfase na disposição ambientalmente adequada. A implantação de aterros sanitários é comumente praticada por gestores públicos devido à sua operação simples e baixo custo em comparação com outras técnicas de tratamento. Além disso, quando bem gerenciados, apresentam eficácia no controle de problemas ambientais (LIMA, 2005).

Apesar disso, muitos aterros sanitários, que inicialmente atendem aos padrões de conformidade ambiental, rapidamente se transformam em lixões a céu aberto ou aterros “controlados”, devido à falta de monitoramento e manutenção. Essa deterioração agrava os danos ambientais e representa riscos significativos à saúde pública, como observado no município de Cuiabá, Estado de Mato Grosso (MT), Brasil (LAUREANO; SHIRAIWA, 2008). Assim, torna-se fundamental a exploração de novas tecnologias e ferramentas que auxiliem no diagnóstico e no monitoramento de áreas degradadas pela disposição inadequada de resíduos sólidos (PARENTE, 2016).

O uso de geotecnologias, como Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e imagens aéreas, tem se destacado como ferramenta para auxiliar no diagnóstico e monitoramento de aterros sanitários, sendo utilizado desde a seleção de locais ideais para sua implantação, até a realização do monitoramento ambiental após seu fechamento (BEZERRA, 2014). As Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP) oferecem uma alternativa viável para a obtenção de imagens aéreas e modelos digitais de superfície de alta resolução, pois modelam com precisão a topografia do terreno quando combinadas com o Sistema de Posicionamento Global (GPS) geodésico (GALIN *et al.*, 2019; LINDSAY, 2016). Além disso, essa tecnologia oferece qualidade e custo-benefício superiores aos métodos tradicionais de levantamento topográfico (SILVA *et al.*, 2015).

Estudos têm explorado a eficácia da ARP no monitoramento de aterros sanitários. Mello e Simões (2019) compararam dados volumétricos obtidos por ARP com medições realizadas por uma estação total em um aterro sanitário localizado em Betim, Minas Gerais. Os resultados demonstram que a ARP é uma ferramenta precisa para o monitoramento volumétrico de aterros sanitários, sendo altamente eficaz para garantir sua conformidade operacional. Wyard *et al.* (2022) se concentraram no mapeamento da cobertura vegetal de um aterro sanitário utilizando ARP. A pesquisa enfatiza a otimização dos protocolos de aquisição de dados e o processamento por meio de ferramentas de código aberto, tornando a tecnologia mais acessível e eficiente. Além disso, Hassan *et al.* (2023) examinaram uma abordagem baseada em ARP para o monitoramento de aterros sanitários, destacando a fusão de sensores para detectar problemas como o acúmulo de água na área.

A versatilidade e o baixo custo da ARP são particularmente vantajosos para o monitoramento e a operação de aterros sanitários, oferecendo resolução temporal flexível, com possibilidade de múltiplos levantamentos ao longo do ano. Além disso, é possível adquirir imagens aéreas de alta resolução, livres de interferências atmosféricas, como nuvens e gases. Outros fatores vantajosos são citados por Malta *et al.* (2017), como a identificação de drenos de chorume e biogás, a determinação das cotas dos taludes, o volume da jazida utilizada para recobrimento e a avaliação do avanço da operação.

Dante disso, o objetivo deste estudo foi utilizar ortomosaico e modelo digital de superfície, gerados por aerolevantamento e fotogrametria, como ferramentas para investigar a situação do aterro sanitário de Cuiabá, contribuindo para seu diagnóstico, gestão e planejamento futuro.

2. Metodologia

2.1 Área de estudo

O aterro sanitário objeto deste estudo está localizado em Cuiabá-MT, às margens da Estrada Balneário Letícia, no bairro Novo Paraíso, região noroeste da área semiurbana de Cuiabá (Figura 1). O local foi o centro de disposição de resíduos sólidos por 26 anos (1997 a 2023), sendo desativado pela Prefeitura de Cuiabá em março de 2023 devido à inviabilidade de adequação à PNRS (FERREIRA, 2023).

2.1.1 Antecedentes

Ao longo das últimas quatro décadas, a destinação final de resíduos sólidos de Cuiabá passou por duas mudanças (Figura 1). As áreas abandonadas deixaram um histórico de passivos socioambientais que ainda não estão em conformidade com a legislação vigente (KNECHTEL *et al.*, 2013; RIBEIRO; CANTÓIA, 2020; SHIRAIWA *et al.*, 2002).

Entre 1982 e 1997, os resíduos eram dispostos em um lixão a céu aberto na região norte da área periurbana de Cuiabá, às margens da rodovia MT 251 (Figura 1), o qual foi fechado por decisão judicial em vista do seu alto estado de saturação. Nesse período de 15 anos, foram acumulados cerca de 700 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos no local, gerando passivos ambientais, incluindo frequentes incêndios com fumaças tóxicas e pluma de contaminação do lençol freático por chorume, expondo a população do entorno a riscos de saúde (KNECHTEL *et al.*, 2013; RIBEIRO; CANTÓIA, 2020; SHIRAIWA *et al.*, 2002).

Após o fechamento desse lixão, o centro de disposição de resíduos sólidos de Cuiabá passou a ser o local de estudo desta pesquisa. O local se tratava de uma área de 50 hectares no entorno de uma mina de ouro abandonada na Estrada Balneário Letícia (CARVALHO; SILVA, 2011; CUIABÁ, 2013). Essa unidade de disposição de resíduos não estava licenciada para ser um aterro sanitário, mas sim para ser uma usina de triagem, reciclagem e compostagem, que seria operada por uma cooperativa de catadores. No entanto, no segundo ano, esse projeto fracassou (CUIABÁ, 2013; RIBEIRO; CANTÓIA, 2020). Tanto a tecnologia quanto a capacidade de processamento foram subdimensionadas e os resíduos sólidos passaram a ser dispostos sem qualquer tratamento no entorno da área inicial, tornando-se um aterro controlado (CARVALHO; SILVA, 2011; CUIABÁ, 2013; RIBEIRO; CANTÓIA, 2020).

Em 26 anos de operação (1997-2023), o planejamento e a gestão ambiental nunca foram satisfatórios. O aterro operou com autorizações emergenciais emitidas pela Secretaria Estadual do Meio Ambiente de Mato Grosso (SEMA-MT) para a construção de novas células de resíduos anexas ao local inicial, onde os resíduos eram dispostos em condições ambientais precárias. Essas células foram rapidamente saturadas, com os resíduos espalhados no entorno. Houve trocas frequentes de empresas de gestão (CUIABÁ, 2013; CUIABÁ, 2020), bem como persistência de problemas socioambientais relacionados às condições insalubres de trabalho dos coletores (REIBEIRO; CANTÓIA, 2020). Mesmo coletado, o chorume costumava ser lançado no rio sem tratamento adequado, gerando pluma de contaminação das águas subterrâneas (LAUREANO; SHIRAIWA, 2008; SHIRAIWA *et al.*, 2002).

Somente em 2016, quando 600 toneladas de resíduos não tratados eram dispostos diariamente no aterro controlado e as projeções estimavam um acréscimo de 4 milhões de toneladas até 2036 (CUIABÁ, 2016a), o município apresentou o Estudo e Relatório de Impacto Ambiental (EIA/RIMA), visando obter a licença de operação do aterro. Essa licença era uma exigência do Ministério Público do Estado de Mato Grosso, que não havia sido cumprida desde 2013 (CAETANO, 2016; CUIABÁ, 2020; SANFORD, 2013).

Embora reconhecesse a intensa degradação ambiental do local, o município propôs a construção de células de resíduos adicionais, contíguas às anteriores, com melhorias no sistema de controle ambiental. O novo centro de disposição de resíduos sólidos, denominada Novo Aterro Sanitário de Cuiabá, deveria estar em conformidade com a PNRS, incluindo medidas de apoio à reciclagem realizada pelos catadores locais (CUIABÁ, 2016b; CUIABÁ, 2020). No entanto, essas medidas não foram suficientes para evitar as condições insalubres e a saturação precoce do aterro controlado (ALMEIDA, 2018; RIBEIRO; CANTÓIA, 2020) e o local foi, finalmente, fechado definitivamente em 2023.

A área de estudo abrange o maciço total de resíduos, composto pelas células construídas entre 1997 e 2017, ano seguinte à submissão do EIA/RIMA para licenciamento do aterro, o que ocorreu 19 anos após o início das operações. Até o seu fechamento definitivo em 2023, o maciço de resíduos teve um aumento de cerca de 10% desde 2017, ano em que este levantamento aéreo foi realizado (Figura 2).

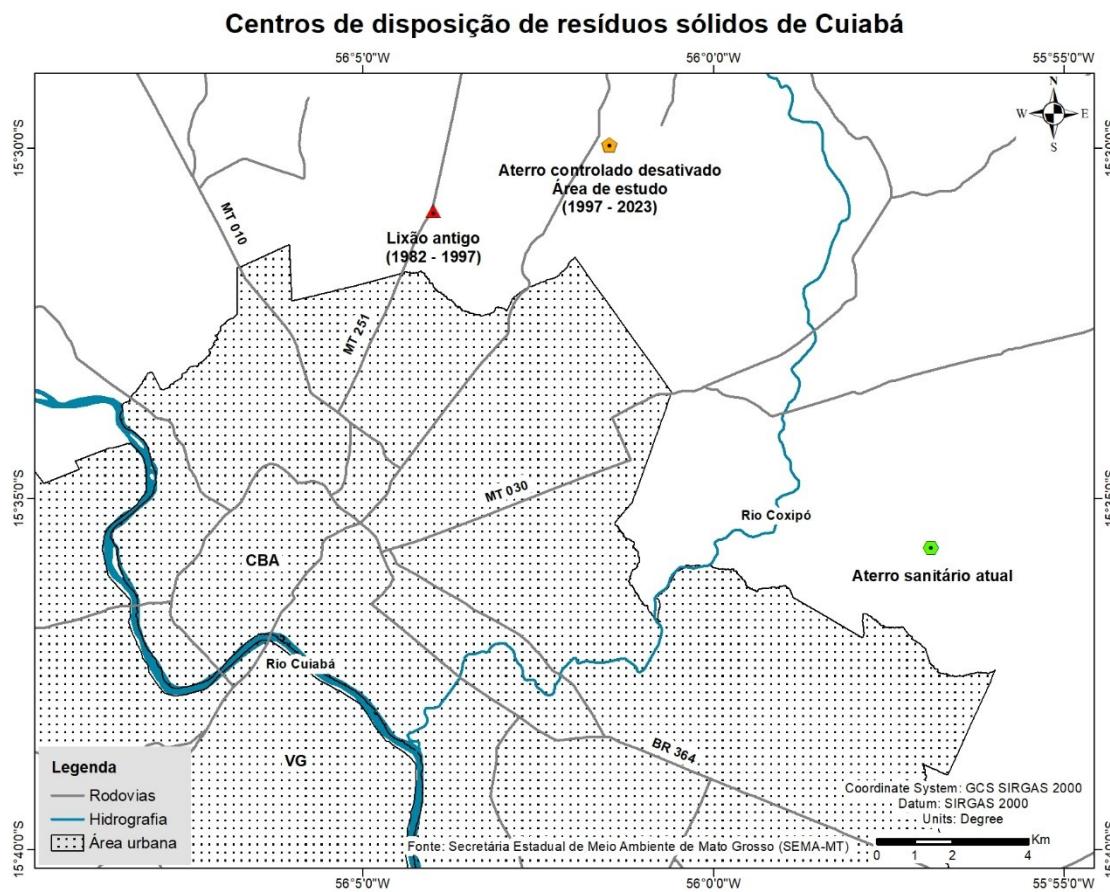


Figura 1 – Centros de disposição de resíduos sólidos de Cuiabá entre 1982 e 2025. 1) Período entre 1982 e 1997 – lixão a céu aberto ao longo da MT-251; 2) Período entre 1997 e 2023 – aterro controlado ao longo da Rodovia Balneário Letícia; 3) A partir de 2023 – aterro sanitário Ecoparque Pantanal.

Fonte: Autores (2025).

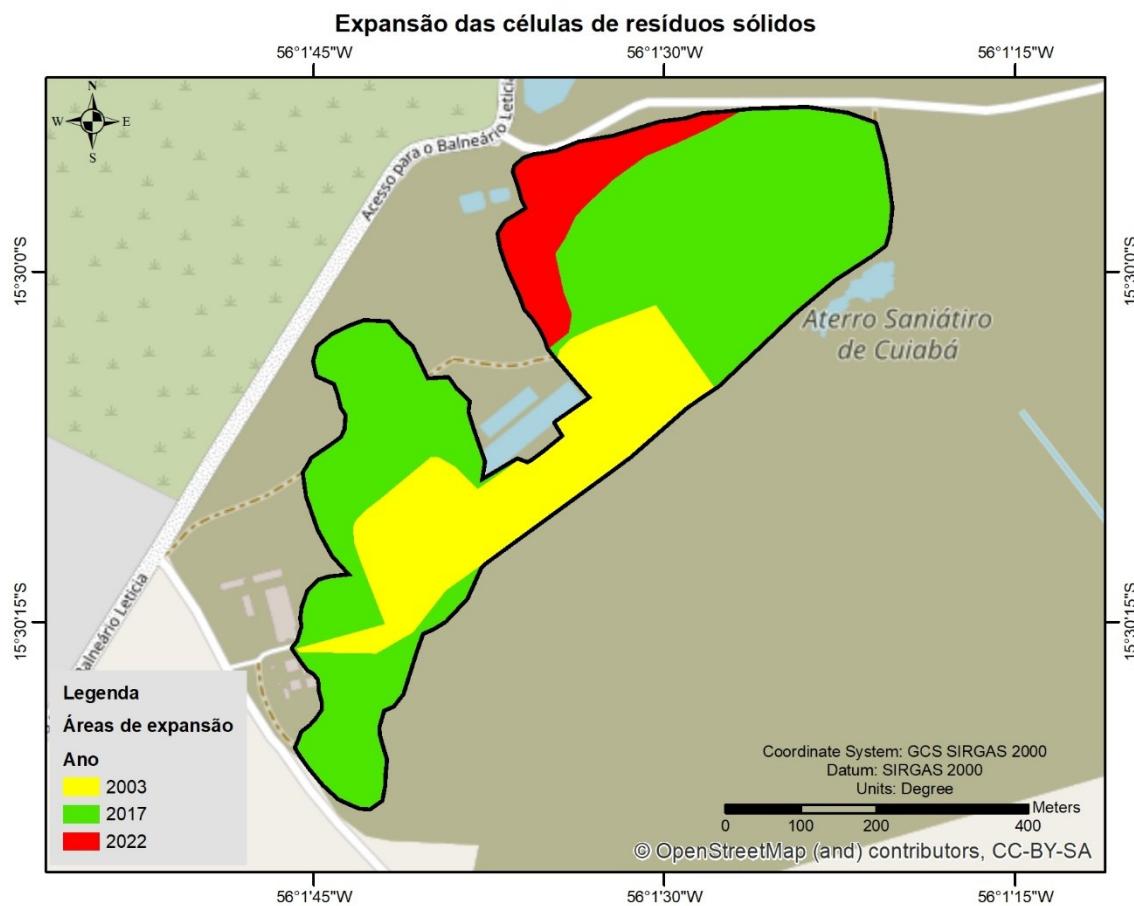


Figura 2 – Expansão dos limites da célula de resíduos sólidos no aterro controlado ao longo da Estrada Balneário Letícia entre 2002 e 2023. O levantamento aéreo foi realizado em 2017, quando o maciço de resíduos sólidos correspondia às áreas em amarelo e verde.

Fonte: Autores (2025).

2.2 Procedimentos

O desenvolvimento dessa pesquisa seguiu as seguintes etapas: 1) planejamento do levantamento aéreo; 2) aquisição de imagens; 3) pré-processamento; 4) processamento do Modelo Digital de Superfície (MDS); 5) processamento do ortomosaico; 6) validação; 7) documentação; 8) avaliação das condições do aterro.

2.2.1 Planejamento do levantamento aéreo

Planejar o voo é imprescindível para qualquer levantamento aéreo que utilize ARP. Para isso, utilizou-se o software eMotion, versão 4 (AGEAGLE, 2023), que permite realizar o aerolevantamento automaticamente, bem como a visualização do trajeto de voo durante o procedimento.

O levantamento aéreo foi realizado em 4 de agosto de 2017, com cobertura de 136,638 hectares. Foi utilizada a ARP senseFly eBee em conjunto com a câmera IXUS 127 HS (EGEAGLE, 2022), com resolução de 4608x3456 pixels. O voo alcançou uma altitude de 253,53 metros, atingindo uma Distância de Amostragem no Solo (GSD) média de 7,78 cm.

As trajetórias de voo foram planejadas com sobreposição suficiente (geralmente 60-80% entre imagens consecutivas) para garantir correlação adequada entre as imagens e permitir a reconstrução tridimensional da superfície. As imagens aéreas digitais foram processadas utilizando o software Pix4Dmapper Pro, versão 3.1.22 (PIX4D, 2024).

2.2.2 Aquisição de imagens

Foram capturadas um total de 159 imagens, todas calibradas e georreferenciadas usando cinco pontos de controle (GCP). As coordenadas do GCP foram obtidas usando um receptor GNSS de dupla frequência, com tecnologia RTX, Trimble R10 (TRIMBLE, 2014). Essas coordenadas foram usadas para corrigir a posição da imagem, garantindo que todos os dados estivessem devidamente alinhados com o sistema de coordenadas SIRGAS 2000/UTM 21S.

2.2.3 Pré-processamento

Durante o processamento inicial, os parâmetros internos da câmera, como distância focal e coeficiente de distorção, foram ajustados para corrigir qualquer distorção óptica e garantir a precisão da medição. A tabela 1 mostra as informações de calibração da câmera.

Tabela 1 – Parâmetros internos da câmera.

	Distância focal	Ponto principal X	Ponto principal Y	R1	R2	R3	T1	T2
Valores iniciais	3.270,924 (pixel) 4,380 (mm)	2.303,999 (pixel) 3,085 (mm)	1.728,000 (pixel) 2,314 (mm)	-0,049	0,059	-0,036	0,000	-0,003
Valores otimizados	3.297,160 (pixel) 4,415 (mm)	2.235,585 (pixel) 2,993 (mm)	1.787,972 (pixel) 2,394 (mm)	-0,038	0,041	-0,020	0,004	-0,004
Incertezas (Sigma)	1.169 (pixel) 0,002 (mm)	0,408 (pixel) 0,001 (mm)	0,380 (pixel) 0,001 (mm)	0,001	0,002	0,001	0,000	0,000

Fonte: Autores (2025), adaptado de Pix4Dmapper (2017).

Adicionalmente, as imagens foram alinhadas entre si por meio de um ajuste de bloco, o que minimizou os erros de posição e orientação ao otimizar a posição relativa da câmera e dos pontos capturados.

2.2.4 Processamento do Modelo Digital de Superfície (MDS)

A partir da nuvem de pontos esparsa inicial (gerada pelo ajuste de blocos), o software densificou a nuvem utilizando técnicas de correspondência de múltiplas imagens. A nuvem densificada continha 15.991.307 pontos 3D com uma densidade média de 5,62 pontos 3D por metro cúbico.

Os pontos densificados foram interpolados para gerar o MDS, utilizando o método de Ponderação de Distância Inversa (IDW) para suavizar a superfície e corrigir pequenas inconsistências. Em seguida, filtros de remoção de ruído e suavização de superfície (tipo "Sharp") foram aplicados para melhorar a qualidade visual e reduzir imperfeições no MDS.

A técnica de interpolação IDW foi adotada neste estudo devido à densa nuvem de pontos gerada pela fotogrametria e sua distribuição uniforme em grandes feições com bordas bem definidas. O IDW é um método determinístico direto, simples de executar e computacionalmente eficiente, tornando-o adequado para grandes conjuntos de dados (KANG; SUH, 2021, LI; HEAP, 2014). Além disso, ele mantém descontinuidades e transições acentuadas no terreno, como as bordas do aterro (MOUSSA; ABOUD, 2024). Outra vantagem do IDW é que ele considera influências espaciais locais sem assumir qualquer autocorrelação estocástica prévia, o que ajuda a prevenir distorções em áreas onde a variabilidade espacial é inconsistente ou anisotrópica (AMADU *et al.*, 2022). Essa característica foi especialmente importante para o aterro de Cuiabá, onde a superfície apresenta heterogeneidades significativas, incluindo células de idades e tamanhos variados.

Por outro lado, técnicas geoestatísticas como a krigagem envolvem modelagem de variogramas e são mais adequadas para conjuntos de dados esparsos, onde a estimativa da incerteza é fundamental (AMADU *et al.*, 2022; LI; HEAP, 2014). Embora a krigagem seja eficaz para cenários que exigem estimativa da incerteza, essas condições não se aplicam ao presente estudo, que se baseou em uma nuvem de pontos densa e uniformemente distribuída. Comparada à krigagem, o IDW captura variações de declive e contorno com maior precisão e evita o excesso de suavização (KANG; SUH, 2021), o que é crucial para representar com precisão os limites e perfis topográficos das células de resíduos do aterro.

2.2.5 Processamento do ortomosaico

As imagens aéreas foram corrigidas geometricamente para eliminar distorções de perspectiva e variações de escala causadas pela topografia e pela inclinação da câmera durante o voo. Posteriormente, as imagens ortorretificadas foram mescladas para criar um mosaico contínuo, representando a superfície da área mapeada em uma projeção plana. A resolução final do ortomosaico foi mantida igual ao GSD (7,78 cm/pixel), garantindo a preservação dos detalhes captados nas imagens individuais.

2.2.6 Validação

Os erros médios das coordenadas do GCP foram analisados para validar a precisão do georreferenciamento e do modelo. O ortomosaico e o MDS foram revisados visualmente para identificar potenciais erros de sobreposição ou distorções.

A avaliação da precisão do MDS foi realizada de acordo com o Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC), regulamentado pelo Decreto-Lei n. 89.817/1984. O procedimento envolveu a comparação das coordenadas dos GCP com as coordenadas correspondentes derivadas do modelo fotogramétrico. A análise incluiu o cálculo dos erros planimétricos e altimétricos médios, bem como do Erro Padrão Planialtimétrico (EPP) para verificar a conformidade com os limites da classe de precisão definidos pelo PEC.

2.2.7 Documentação

Todas as etapas de processamento foram documentadas, incluindo detalhes sobre os parâmetros de calibração, ajustes realizados e especificações dos produtos finais. Metadados completos foram gerados para garantir a rastreabilidade e a reutilização dos dados geoespaciais.

2.2.8 Avaliação das condições do aterro

Por fim, foi realizada uma análise por meio da interpretação visual do ortomosaico, destacando os principais pontos críticos do aterro controlado. Essa etapa teve como objetivo identificar anomalias e falhas operacionais que pudessem comprometer a operação ambientalmente adequada do local. A interpretação incluiu a avaliação dos padrões de disposição de resíduos sólidos, a identificação de áreas com falta de cobertura ou compactação, potenciais pontos de drenagem inadequada e indícios de acúmulo de chorume. No mais, a análise visual teve como objetivo identificar eventuais indícios de irregularidades, como queimadas, e avaliar as condições estruturais das lagoas de tratamento de chorume.

3. Resultados e discussão

O ortomosaico e o MDS gerados pela aerofotogrametria (Figura 3) apresentaram GSD de 7,78 centímetros, com erro médio de reprojeção de apenas 0,161 pixels, indicando que o ajuste de bloco, o ajuste posicional e a orientação da imagem estavam bem alinhados, com posições calculadas da câmera e dos GCPs muito semelhantes à posição real. Os GCPs foram medidos com alta precisão (precisão de 0,020 m em XY/Z) (Tabela 2), sendo essenciais para o georreferenciamento e o ajuste posicional das imagens.

Tabela 2 – Precisão de localização por GCP e erros médios nas três direções de coordenadas. A última coluna contabiliza o número de imagens calibradas em que o GCP foi verificado automaticamente em comparação com a marcação manual.

GCP	Acurácia XY/Z (m)	Erro X (m)	Erro Y (m)	Erro Z (m)	Projeção de erro [pixel]	Verificação
PC1 (3D)	0.020/ 0.020	0.031	-0.053	0.009	0.801	11 / 11
PC2 (3D)	0.020/ 0.020	-0.009	0.022	-0.011	0.605	14 / 14
PC3 (3D)	0.020/ 0.020	-0.005	0.012	0.027	0.798	15 / 15
PC4 (3D)	0.020/ 0.020	0.010	0.007	-0.021	0.844	17 / 17
PC5 (3D)	0.020/ 0.020	-0.038	0.002	0.042	0.645	12 / 12
Média (m)		-0.002316	-0.002035	0.009352		

Sigma (m)		0.022521	0.026401	0.023253		
Erro RMS (m)		0.022640	0.026479	0.025063		

Fonte: Adaptado pelos autores (2025) do relatório Pix4Dmapper (2017).

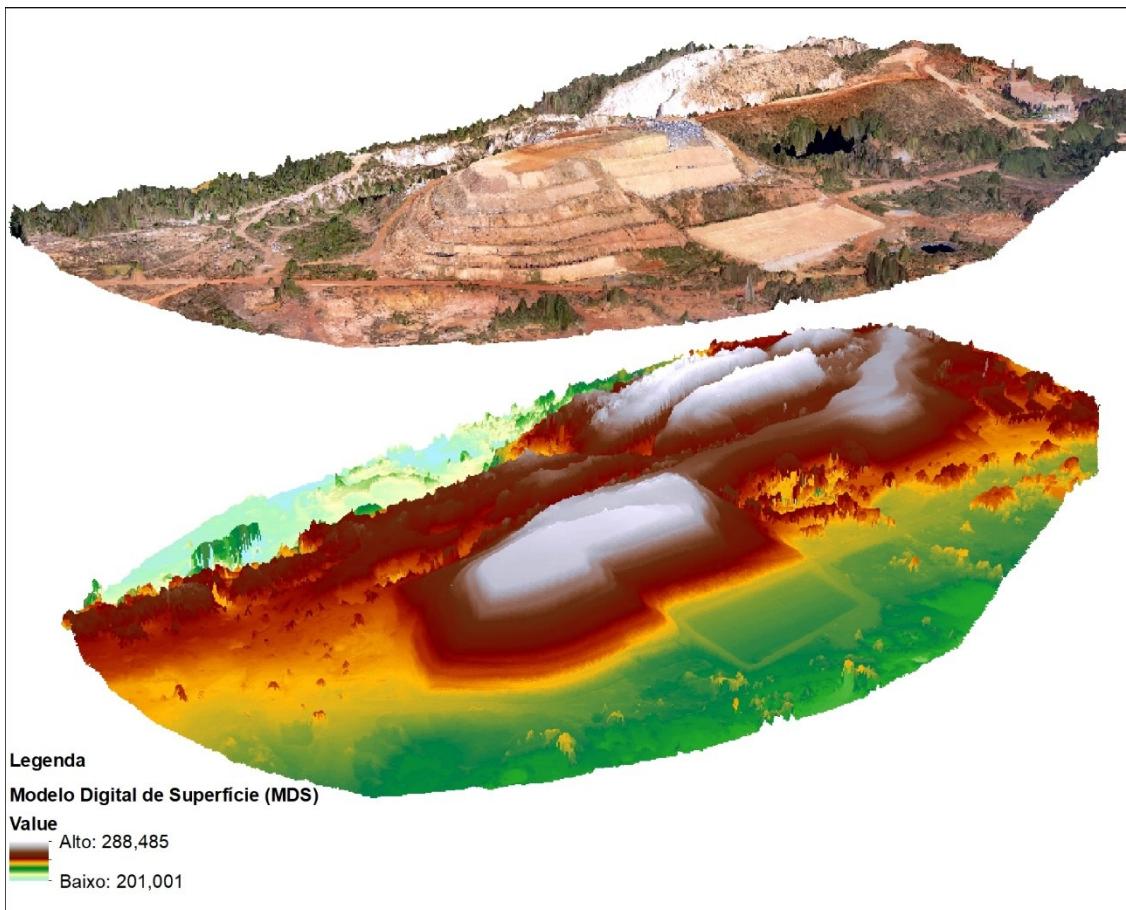


Figura 3 – Visualização em perspectiva 3D do ortomosaico e Modelo Digital de Superfície (MDS).

Fonte: Autores (2025).

Os resultados da avaliação da exatidão cartográfica do MDS indicaram erros RMS (Root Mean Square) de 0,0226 metros em X, 0,0265 metros em Y e 0,0251 metros em Z, com EPP tridimensional médio de 0,0248 metros. Esses valores atendem aos limites da Classe de Exatidão A na escala 1:1.000, conforme o PEC, que admite erro máximo de 0,5 metros e erros RMS de até 0,3 metros para planimetria. Para altimetria, o Decreto-Lei nº 89.817/1984 estabelece que o erro padrão não deve ultrapassar um terço da equidistância das curvas de nível. Considerando o erro RMS vertical de 0,0251 metros, é exigida uma equidistância mínima de 7,5 centímetros. Assim, o uso de curvas de nível com equidistância de 10 centímetros é apropriado, garantindo a conformidade com os padrões da Classe A. Isso demonstra que os produtos são adequados para aplicações de alta precisão, incluindo análise espacial e monitoramento ambiental, evidenciando a qualidade e exatidão do modelo fotogramétrico utilizado.

O PSE médio de 0,024 metros ilustra o alto nível de precisão tanto horizontal quanto vertical (Tabela 2). A precisão relativa das posições das câmeras foi de 0,111 metros no eixo X, 0,118 metros no eixo Y e 0,095 metros no eixo Z. Além disso, as diferenças relativas entre os parâmetros internos iniciais e otimizados das câmeras foram de apenas 0,8%, indicando que o levantamento aéreo possui precisão adequada para aplicações que exigem detalhes de alta fidelidade.

Em vista disso, o ortomosaico e o MDS possuem resolução planialtimétrica suficiente para detalhar as condições do aterro. De acordo com Filkin *et al.* (2022), a precisão é maior em terrenos de baixa complexidade, onde a sobreposição das

células de resíduos é mínima e o maciço de resíduos possui bordas laterais e basais distintas, permitindo uma diferenciação clara do terreno circundante. Neste estudo, essas características são evidentes, com o aterro se destacando visualmente devido à diferença de altura em relação ao terreno aplainado no seu entorno. Isso permitiu uma identificação clara do nível de base onde os resíduos eram depositados.

A criação de um MDS de alta resolução altimétrica corresponde a uma nova abordagem de concepção, implementação e monitoramento de projetos de aterros sanitários (FILKIN et al., 2022). A partir de modelos com precisão adequada, é possível calcular um conjunto de parâmetros como volumes, áreas, perímetros, bem como produtos derivados, incluindo perfis topográficos, imagens sombreadas, mapas de declividade e aspecto, intervalos hipsométricos e perspectivas tridimensionais.

Com base no MDS obtido por fotogrametria, foram gerados perfis topográficos das células de resíduos (Figura 5) utilizando seções transversais do aterro (Figura 4).

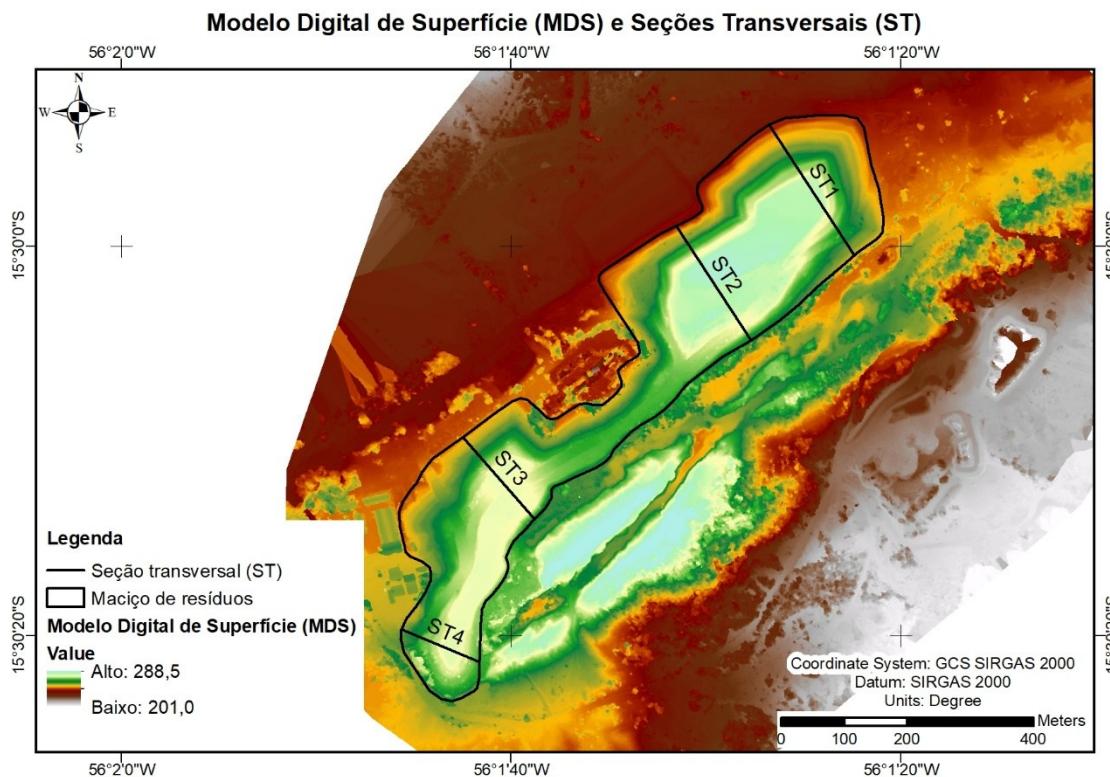
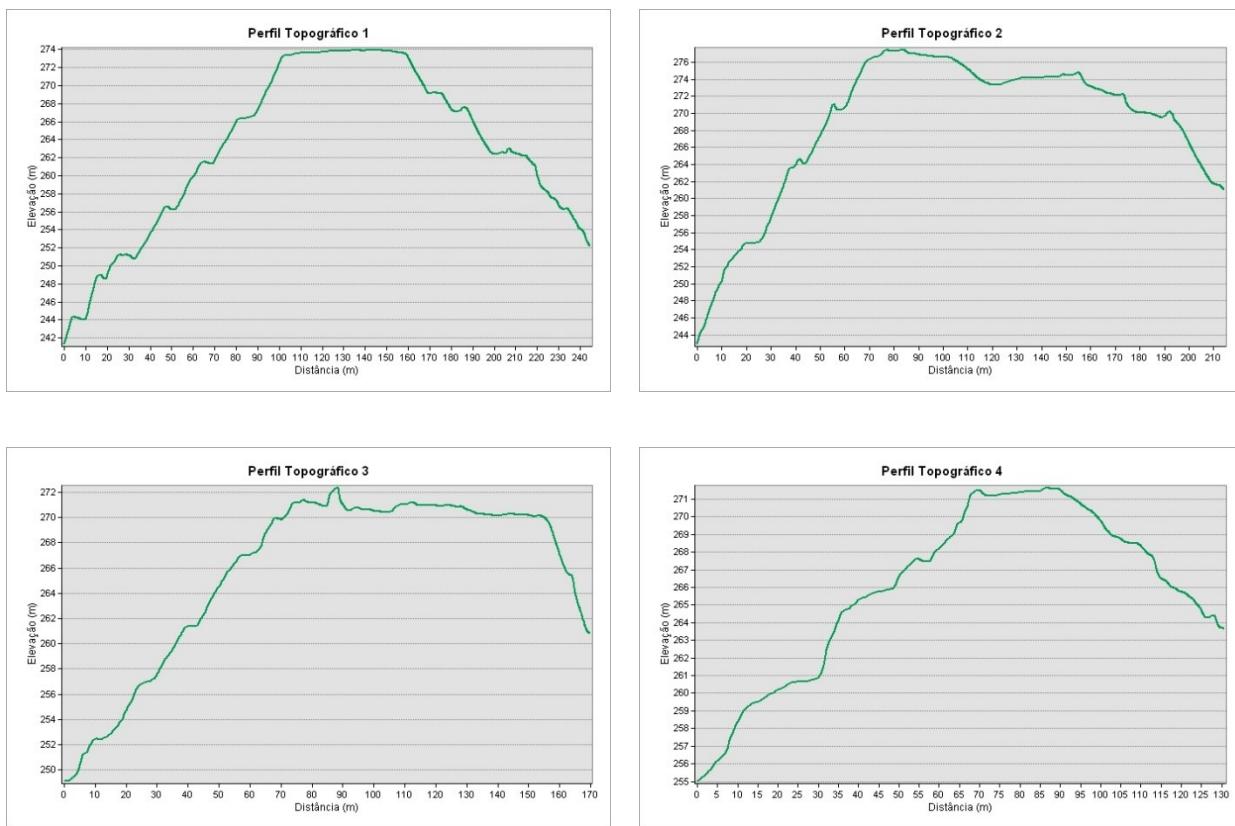


Figura 4 – Modelo Digital de Superfície (MDS) e Seções Transversais (ST) do aterro sanitário de Cuiabá.
Fonte: Autores (2025).

As seções transversais ST1 e ST2 se referem à célula de resíduos que estava ativa em 2017, ano em que o aerolevantamento foi realizado, enquanto as seções ST3 e ST4 são da primeira célula utilizada para disposição de resíduos, que se encontrava desativada em 2017 (Figura 4).



*Figura 5 – Perfis topográficos.
Fonte: Esri (2016).*

Por meio dos perfis topográficos, foi possível determinar a altura e a base das células de resíduos. Constatou-se que a célula ativa em 2017 tinha aproximadamente entre 33 metros (ST1) e 29 metros (ST2) de altura e 250 metros (ST1) e 220 metros (ST2) de largura. Já a célula desativada apresentou alturas variando de 23 metros (ST3) a 16 metros (ST4) e larguras variando de 170 metros (ST3) a 135 metros (ST4).

3.1 Análise visual e investigação de campo

A análise visual das imagens aéreas indicou que a disposição de resíduos não estava em conformidade com alguns requisitos mínimos estabelecidos pela PNRS. Os principais problemas observados, tanto no ortomosaico quanto na investigação de campo realizada no dia do aerolevantamento, foram: disposição inadequada de resíduos sólidos, vazamento de chorume sobre a célula, abandono da lagoa de tratamento de chorume e sinais de possível queima de resíduos sólidos.

3.1.1 Disposição inadequada dos resíduos sólidos

A disposição adequada de resíduos sólidos em aterros sanitários requer a proteção do solo, do ar e da água. Conforme a Norma Brasileira (NBR) n. 8.419 de 1992, a disposição dos resíduos deve ser acompanhada de compactação e cobertura ao final das operações, diariamente. No entanto, observou-se a ausência de cobertura e compactação dos resíduos dispostos (Figura 6A), ocasionando atração de micro e macro vetores para o maciço, exposição dos resíduos às ações climáticas, o que pode intensificar a degradação da matéria orgânica e aumentar a produção de chorume e gases, bem como dispersar os resíduos para além da célula ou maciço de rejeitos.

3.1.2 Vazamento de chorume

A análise visual do ortomosaico permitiu a identificação e localização de diversos pontos de vazamento de chorume (Figura 6B e 6C). De acordo com Malta *et al.* (2017), é possível identificar pontos de drenos de chorume e gás por meio de aerolevantamento. Christensen *et al.* (2001) destacam o impacto da presença de chorume no solo, com efeitos adversos a distâncias superiores a 100 metros do local de disposição final, causados por substâncias tóxicas originadas na massa de resíduos. Castilhos Junior *et al.* (2006) expõem os riscos de contaminação das águas subterrâneas e superficiais, caso o material lixiviado atinja os mananciais locais, causando sérios danos ambientais, incluindo a emissão de gases voláteis na atmosfera.

3.1.3 Abandono da lagoa de tratamento de chorume

Outro problema observado pela análise visual do ortomosaico e confirmado pelos coletores presentes no dia do aerolevantamento, foi o abandono da estação de tratamento de chorume (Figura 6D), projetada para o tratamento de chorume originado no aterro.

O chorume é uma substância altamente poluente, formada pela decomposição e lixiviação de resíduos orgânicos. Em vista de sua baixa biodegradabilidade, esse efluente pode causar sérios danos ao meio ambiente e à saúde pública se não for tratado adequadamente. Os danos ambientais incluem a contaminação do solo e dos lençóis freáticos, ocasionando um ciclo completo de contaminação hídrica. Portanto, a NBR n. 8.419/1992 define as condições mínimas exigidas para a construção de um aterro sanitário, estipulando que o projeto deve incluir um sistema de coleta, drenagem e tratamento de líquidos percolados. Os métodos mais utilizados para o tratamento de chorume, neste caso, são o tratamento biológico aeróbio ou anaeróbio (lodos ativados, lagoas e filtros biológicos) e os processos de tratamento físico-químico (diluição, filtração, coagulação, floculação, precipitação, sedimentação, adsorção, troca iônica e oxidação química) (IWAI, 2005).

Na Figura 6D, é evidente o aspecto de abandono das lagoas, com difícil acesso devido ao crescimento excessivo da vegetação densa ao seu redor, falta de recirculação do chorume e provável falta de manutenção e monitoramento das lagoas, contribuindo para o aumento da contaminação por chorume.

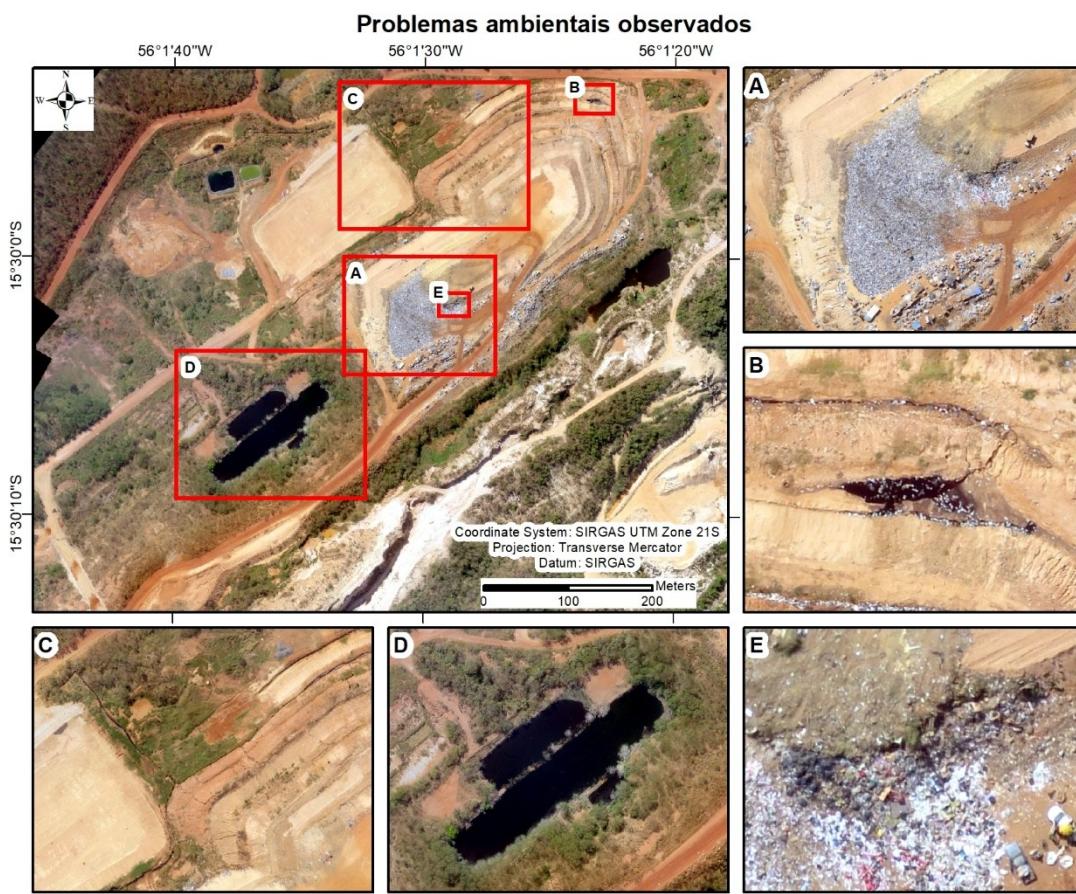
3.1.4 Queima de resíduos sólidos

Outro aspecto evidente na análise visual foi a presença de marca dispersa de chamas extintas, indicando potencial queima de resíduos sólidos (Figura 6E).

O Artigo 47 da PNRS proíbe a queima de resíduos sólidos ou rejeitos a céu aberto, ou em recipientes, instalações e equipamentos não licenciados para essa finalidade. Entretanto, incêndios são frequentemente observados em locais de disposição final de resíduos sólidos onde não há o devido controle e monitoramento, uma vez que a decomposição dos resíduos gera gases, principalmente metano e dióxido de carbono, denominado biogás (LANDIM; AZEVEDO, 2008).

Em tais situações, à medida que o metano é formado, ele acumula pressão e começa a se mover pelos caminhos de menor resistência do maciço de resíduos. Como o metano é mais leve que o ar e altamente inflamável, se sua concentração atingir de 5% a 15% do ar presente nos vazios do maciço ou na superfície, pode ocorrer uma faísca, chama ou, até mesmo, uma grave explosão no local (LANDIM; AZEVEDO, 2008).

Além disso, a queima recorrente de resíduos em lixões ou aterros abandonados emitem partículas e poluentes atmosféricos, que geram impactos no ar ao redor e se estendem para além das áreas de disposição final dos resíduos, afetando toda a população de seu entorno (GOUVEIA, 2012).



*Figura 6 – Problemas observados no aterro controlado de Cuiabá-MT.
Fonte: Autores (2025).*

4. Considerações finais

Este estudo demonstrou a eficácia do uso de ortomosaico e Modelo Digital de Superfície (MDS), obtidos por meio de aerolevantamento com Aeronaves Remotamente Pilotadas (ARP), para o monitoramento ambiental rápido e preciso de aterros sanitários. A acurácia do MDS foi comparável à do levantamento geodésico tradicional baseado exclusivamente em dados de campo. Essa abordagem também permitiu a identificação precisa dos principais problemas operacionais no aterro de Cuiabá, incluindo vazamentos de chorume, abandono da lagoa de tratamento de chorume, resíduos expostos sem compactação e cobertura adequadas e sinais de queima de resíduos sólidos. A análise visual baseada no ortomosaico ofereceu uma visão clara do estado operacional da unidade de disposição de resíduos durante o levantamento aéreo. A identificação desses problemas permitirá aprimorar a conformidade da gestão do aterro com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

Os resultados enfatizam a importância do diagnóstico e monitoramento de aterros sanitários com tecnologias como a ARP e recomendam essas ferramentas para outros aterros no Brasil, especialmente em casos de operações inadequadas, como as observadas em Cuiabá-MT.

Agradecimentos

Gostaríamos de expressar nossa gratidão ao Centro Geo Geotecnologias Comércio e Serviços LTDA EPP por nos fornecer a ARP eBee da senseFly, equipado com uma câmera digital Canon, modelo IXUS 127 HS, bem como o software

Pix4Dmapper Pro, versão 3.1.22, e o GNSS de dupla frequência RTX, Trimble R10. Também estendemos nossos agradecimentos à Universidade Federal de Mato Grosso pelo fornecimento do software ArcGIS, versão 10.4.1.

Referências

- ABRELPE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020*. São Paulo: ABRELPE, 2020. Disponível em: <https://abrelpe.org.br/panorama/>. Acesso em: Jan 25, 2024
- AGEAGLE. *Sensors*. Disponível em: <https://ageagle.com/solutions/sensors/>. Acesso em: Mar 20, 2024.
- AGEAGLE. *eBee X mapping drone - Drones*. Disponível em: <https://ageagle.com/drones/ebee-x/>. Acesso em: Mar 20, 2024.
- ALMEIDA, A. Número de catadores cresce 200% no “lixão a céu aberto”. *Gazeta Digital*. Disponível em: <https://www.gazetadigital.com.br/editorias/cidades/numero-de-catadores-cresce-200-no-lixao-a-ceu-aberto/554886>. Acesso em: Jan 24, 2024.
- AMADU, C. C.; OWUSU, S.; FOLI, G.; BRAKO, B. A.; ABANYIE, S. K. COMPARISON OF ORDINARY KRIGING (OK) AND INVERSE DISTANCE WEIGHTING (IDW) METHODS FOR THE ESTIMATION OF A MODIFIED PALAEOPLACER GOLD DEPOSIT: A CASE STUDY OF THE TEBEREBIE GOLD DEPOSIT, SW GHANA. *Malaysian Journal of Geosciences (MJG)*, v. 6, n. 1, p. 19-28, 2022. <http://doi.org/10.26480/mjg.01.2022.19.28>
- BEZERRA, J. P. P. Gestão de resíduos sólidos e geotecnologias: considerações elementares. *Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista*, v. 10, n. 4, p. 75–91, 12 nov. 2014.
- BRASIL. *Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências*. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/12305.htm. Acesso em: Sep 17, 2024.
- CAETANO, R. G. Prefeitura apresenta Estudo de Impacto Ambiental do novo aterro sanitário ao Ministério Público. *Prefeitura de Cuiabá*. Disponível em: <http://www.cuiaba.mt.gov.br/procuradoria-geral/prefeitura-apresenta-estudo-de-impacto-ambiental-do-novo-aterro-sanitario-ao-ministerio-publico/13509>. Acesso em: Jan 24, 2024.
- CARVALHO, E. M. A.; SILVA, I. A. F. Análise Diagnóstica sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos: um Estudo de Caso no Aterro Sanitário de Cuiabá - MT. In: *VIII SIMPÓSIO DE EXCELÊNCIA EM GESTÃO E TECNOLOGIA*, 2011 Resende, Rio de Janeiro. Anais [...]. Resende: AEDB, 2011. Disponível em: <https://www.aedb.br/seget/arquivos/artigos11/26114223.pdf>. Acesso em: Sep 17, 2024.
- CASTILHOS JUNIOR, A. B. DE; PROJETOS (BRASIL) (FINEP), F. DE E. E; PROJETOS (BRASIL) (FINEP), F. DE E. E. *Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários*. [s.l.] Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2006. Disponível em: <https://repositorio.mcti.gov.br/handle/mctic/5582>. Acesso em: Sep 17, 2024.
- CHRISTENSEN, T. H.; KJELDSEN, P.; BJERG, P. L.; JENSEN, D. L.; CHRISTENSEN, J. B.; BAUN, A.; ALBRECHTSEN, H.-J.; HERON, G. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, v. 16, n. 7, p. 659–718, 1 jun. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(00\)00082-2](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(00)00082-2)
- CUIABÁ. *Plano municipal de saneamento básico*. Prefeitura de Cuiabá, 2013. Disponível em: <http://www.cuiaba.mt.gov.br/upload/arquivo/planosaneamentobasico.pdf>. Acesso em: Sep 17, 2024.
- CUIABÁ. *Estudo de Impacto Ambiental – EIA*. Prefeitura Municipal de Cuiabá, 2016a. Disponível em: <https://www.cuiaba.mt.gov.br/download.php?id=34789>. Acesso em: Sep 17, 2024.
- CUIABÁ. *Novo aterro sanitário de Cuiabá relatório de impacto ambiental – RIMA*. Prefeitura Municipal de Cuiabá, 2016b. Disponível em: <https://www.cuiaba.mt.gov.br/download.php?id=34788>. Acesso em: Sep 17, 2024.

- CUIABÁ. *Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Cuiabá/MT*. Prefeitura Municipal de Cuiabá, 2020. Disponível em: https://cae8e92f-fad0-4b7a-b2de-69a8ad2088f9.filesusr.com/ugd/7f0fbc_b1802fa0ac5c4361ad26ef09abd9b162.pdf. Acesso em: Sep 17, 2024.
- ESRI. *ArcGIS 10.4.1 for (Desktop, Engine, Server) Geocoding General Maintenance Patch*. Disponível em: <https://support.esri.com/en-us/patches-updates/2016/arcgis-10-4-1-for-desktop-engine-server-geocoding-general-7382>. Acesso em: Mar 20, 2024.
- FERREIRA, A. M. *Cuiabá “enterra” lixão e passa a operar Ecoparque Pantanal com licitação de R\$ 25 milhões*. Repórter MT. Disponível em: <https://www.reporterm.com/intervista/cuiaba-enterra-lixao-e-passa-a-operar-ecoparque-pantanal-com-licitacao-de-r-25-milhoes/188672>. Acesso em: Jan 24, 2024.
- FILKIN, T.; SLIUSAR, N.; HUBER-HUMER, M.; RITZKOWSKI, M.; KOROTAEV, V. Estimation of dump and landfill waste volumes using unmanned aerial systems. *Waste Management*, v. 139, p. 301–308, 15 fev. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.12.029>
- GALIN, E.; GUÉRIN, E.; PEYTAVIE, A.; CORDONNIER, G.; CANI, M.-P.; BENES, B.; GAIN, J. A Review of Digital Terrain Modeling. *Computer Graphics Forum*, v. 38, n. 2, p. 553–577, 2019. <https://doi.org/10.1111/cgf.13657>
- GOUVEIA, N. Resíduos sólidos urbanos: impactos socioambientais e perspectiva de manejo sustentável com inclusão social. *Ciência & Saúde Coletiva*, v. 17, p. 1503–1510, jun. 2012. <https://doi.org/10.1590/S1413-81232012000600014>
- HASSAN, S. Z.; SUN, P.; GOKGOZ, M.; CHEN, J.; REINHART, D. R.; GUSTITUS-GRAHAM, S. UAV-based approach for municipal solid waste landfill monitoring and water ponding issue detection using sensor fusion. *Journal of Hydroinformatics*, v. 25, n. 6, p. 2107–2127, 10 out. 2023. <https://doi.org/10.2166/hydro.2023.195>
- IWAI, C. K. *Tratamento de chorume através de percolação em solos empregados como material de cobertura de aterros para resíduos sólidos urbanos*. [s.l.] Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista. Bauru - SP., 14 jan. 2005. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/90805>. Acesso em: Sep 17, 2024.
- KANG, T.; SUH, M. Retrieval of High-Resolution Grid Type Visibility Data in South Korea Using Inverse Distance Weighting and Kriging. *Korean Journal of Remote Sensing*, v. 37, n. 1, p. 97-110, 2021. <https://doi.org/10.7780/kjrs.2021.37.1.8>
- KNECHTEL, R.; PAULA, R. B.; SILVA, M. A.; SILVA, C. R. M.; SANTOS, C. C. B.; COELHO, A. C.; RIGOTTI, V. L.; PEREIRA, P. T.; CUTRIM, A. O. Avaliação da dispersão da pluma de contaminação do antigo lixão da cidade de Cuiabá-MT, usando sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico. In: *13TH INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY & EXPOGEF*, 2013, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: 29 ago. 2013. Disponível em: <https://library.seg.org/doi/10.1190/sbgf2013-114>. Acesso em: Jan 24, 2024
- LANDIM, A. L. P. F.; AZEVEDO, L. P. DE. O aproveitamento energético do biogás em aterros sanitários: unindo o inútil ao sustentável. *BNDES Setorial*, n. 27, p. 59–99, mar. 2008. <http://web.bnDES.gov.br/bib/jspui/handle/1408/2433>
- LAUREANO, A. T.; SHIRAIWA, S. Ensaios geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá-MT. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 26, p. 173–180, jun. 2008. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2008000200005>
- LI, J.; HEAP, A. D. Spatial interpolation methods applied in the environmental sciences: A review. *Environmental Modelling & Software*, v. 53, p. 173-189, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2013.12.008>
- LIMA, L. M. Q. *Remediação de lixões municipais (aplicações da biotecnologia)*. São Paulo: Hemus, 2005.
- LINDSAY, J. B. Efficient hybrid breaching-filling sink removal methods for flow path enforcement in digital elevation models. *Hydrological Processes*, v. 30, n. 6, p. 846–857, 2016. <https://doi.org/10.1002/hyp.10648>
- MALTA, L.; BARROS, J.; CANDEIAS, A. Projeto aerofotogramétrico para RPA's (VANT) no aterro sanitário no município de escada. In: *XIX SEMANA DE ENGENHARIA FLORESTAL DA UFRPE*, 2017, Recife. Anais [...]. Recife:

- UFRPE, 2017. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/317348735_PROJETO_AEROFOTOGRAMETRICO_PARA_RPA'S_VANT_NO_ATERRO_SANITARIO_NO_MUNICIPIO_DE_ESCADA. Acesso em: Sep 17,2024.
- MELLO, C.; SIMÕES, G. Aerofotogrametria com VANT aplicada ao monitoramento volumétrico de aterros sanitários. In: *IX CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOTECNIA AMBIENTAL (REGE 2019) VIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOSSINTÉTICOS (GEOSSINTÉTICOS 2019)*, 2019, São Carlos. Anais [...]. São Carlos: REGE, 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Caio-Mello-3/publication/340315988_Aerofotogrametria_com_VANT_aplicada_ao_monitoramento_volumetrico_de_aterros_sanitarios/links/5e83d68c299bf130796dbca0/Aerofotogrametria-com-VANT-aplicada-ao-monitoramento-volumetrico-de-aterros-sanitarios.pdf. Acesso em: Sep 17,2024.
- MOUSSA, H; ABOUD, M. The Methodology of Applying Inverse Distance Weighting Interpolation Method in Determining Normal Heights. *Proceedings of Science and Technology*, v. 4, n. 1, 2024. <https://doi.org/10.21625/resourceedings.v4i1.1068>
- PARENTE, D. C. *Utilização de veículo aéreo não tripulado (VANT) na identificação de resíduos de construção civil (RCC) dispostos em locais inadequados*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Tocantins, Palmas, 9 nov. 2016. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11612/364>. Acesso em: Sep 17,2024.
- PIX4D. *Professional photogrammetry and drone mapping software*. Disponível em: <<https://www.pix4d.com/>>. Acesso em: 20 mar. 2024.
- PIX4DMAPPER. *Quality Report*. Disponível em: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202558689-Quality-Report-Help-PIX4Dmapper>. Acesso em: 20 mar. 2024.
- RIBEIRO, N. L. D.; CANTÓIA, S. F. O lixão de Cuiabá e a geração de impactos socioambientais. *Geosaberes*, Fortaleza, v. 11, p. 100–115, jan. 2020. <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/53500>
- SANFORD, C. *Prefeitura faz acordo judicial e recebe licença para o funcionamento do Aterro Sanitário*. Prefeitura de Cuiabá. Disponível em: <http://www.cuiaba.mt.gov.br/secretarias/empresa-cuiabana-de-zeladoria-e-servicos-urbanos/prefeitura-faz-acordo-judicial-e-recebe-licenca-para-o-funcionamento-do-aterro-sanitario/6536>. Acesso em: Jan 26, 2024.
- SHIRAIWA, S.; LISOVSKY, S. P.; ELIS, V. R.; PORSANI, J. L.; BORGES, W. R. Estudos geofísicos integrados no lixão de Cuiabá, MT, Brasil: resultados preliminares. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 20, p. 181–186, dez. 2002. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2002000300004>
- SILVA, C. A. DA; SOUTO, M. V. S.; DUARTE, C. R.; BICHO, C. P.; & SABADIA, J. A. B. Avaliação da acurácia dos ortomosaicos e modelos digitais do terreno gerados pelo MVANT/DNPM. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 67, n. 7, p. 1479–1495, 2015. <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/64400>
- TRIMBLE. *User guide-Trimble R10 GNSS receiver*. Disponível em: https://www.trimble.com/ls_receiverhelp/v5.11/en/r10_userguide.pdf. Acesso em: Mar 20, 2024.
- WYARD, C.; BEAUMONT, B.; GRIPPA, T.; HALLOT, E. UAV-Based Landfill Land Cover Mapping: Optimizing Data Acquisition and Open-Source Processing Protocols. *Drones*, v. 6, n. 5, p. 123, maio 2022. <https://doi.org/10.3390/drones6050123>