

ENGENHARIA CIVIL

CAIO CÉSAR DE SOUSA MELLO

**Avaliação de Drenagem Superficial em Aterros Sanitários Utilizando
Topografia De Alta Resolução Gerada por Aerofotogrametria com Drones**

Belo Horizonte
2024

CAIO CÉSAR DE SOUSA MELLO

**Avaliação De Drenagem Superficial Em Aterros Sanitários Utilizando
Topografia De Alta Resolução Gerada Por Aerofotogrametria Com Drones**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado a
Faculdade de Engenharia de Minas Gerais como
requisito parcial para obtenção do título de
Engenheiro Civil

Belo Horizonte
2024

PROBLEMA DE PESQUISA

Aterros sanitários são obras civis para disposição final de resíduos sólidos urbanos. Os resíduos sólidos urbanos possuem características físicas, químicas e biológicas diversas, a depender do local onde são gerados, e essas características, principalmente a biodegradabilidade dos resíduos compostos por matéria orgânica, fazem com que os maciços dos aterros estejam em constantes processos de alteração de geometria devido à recalques superficiais.

A drenagem superficial em aterros sanitários é uma questão de suma importância, pois normalmente são grandes áreas de drenagem em maciços inclinados, de modo que concentram o escoamento superficial. A alteração constante de geometria das obras gera necessidade de manutenção recorrente dos dispositivos de drenagem, fazendo com que levantamentos topográficos precisos e detalhados sejam necessários para verificação do funcionamento e locação das obras.

Nesta pesquisa, pretende-se utilizar os drones ou veículos aéreos não tripulados para realizar coleta de dados topográficos de forma precisa e em alta resolução em obras de aterro sanitário e verificar a utilização dessa topografia na avaliação da drenagem superficial nos aterros.

Como forma de nortear a abordagem do problema, as seguintes perguntas foram elaboradas e serão respondidas ao longo do desenvolvimento do projeto:

1. Como é possível utilizar levantamentos com drones para avaliar drenagem superficial em obras como aterros sanitários?
2. Porque é importante avaliar sistemas de drenagem superficial neste tipo de obra?
3. Caso não seja feito esse tipo de monitoramento, quais são os problemas que podem ser acarretados?
4. Como a topografia com drones pode auxiliar no processo, em relação à topografia convencional?
5. Quais os avanços científicos e tecnológicos essa pesquisa pode trazer para a sociedade?

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	5
2	Capítulo 1: VANTs, conceitos básicos, aerofotogrametria, processamento de imagens.....	8
2.1	Características gerais.....	8
2.2	Regulamentação.....	10
2.3	Aerofotogrametria com VANTs.....	10
2.3.1	Planejamento de voo	12
2.3.2	Vantagens e limitações do método	13
2.3.3	Principais demandas e escalas de aplicação	14
3	Capítulo 2: Aterros sanitários: conceitos básicos, monitoramento operacional, dispositivos de drenagem superficial.....	16
3.1	Aterros sanitários no Brasil.....	16
3.2	Aspectos estruturais e operacionais em aterros sanitários	17
3.3	Monitoramento em aterros sanitários.....	21
3.3.1	Práticas e instrumentos usuais no monitoramento geotécnico de aterros sanitários ²³	
3.3.2	Sistema de drenagem superficial em aterros sanitários	24
4	Capítulo 3: AEROFOTOGAMETRIA APLICADA AO MONITORAMENTO DE ATERROS SANITÁRIOS COM ENFOQUE EM DISPOSITIVOS DE DRENAGEM SUPERFICIAL.....	26
5	Capítulo 4: Modelagem SIMWE para análise de escoamento e processos erosivos em aterros sanitários.....	31
5.1	Descrição da área de estudo	31
5.2	Descrição da coleta de dados no aterro.....	32
5.2.1	Coleta GNSS.....	32
5.2.2	Coleta com VANT.....	33
5.2.3	Processamento de Dados Fotogramétricos.....	35
5.3	Descrição do processamento de dados - SIMWE.....	36
6	Capítulo 5: ANÁLISE DE RESULTADOS.....	37
6.1	Extração da rede de drenagem	38
6.2	Simulação do escoamento superficial.....	39
6.3	Avaliação do Sistema de Drenagem Superficial	41
7	Conclusões e recomendações	42
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	43

1 INTRODUÇÃO

Gerenciar os resíduos sólidos é uma atividade que vai muito além da visão técnico-científica. O desafio de superar questões rotineiras, culturais e sociais, que estabeleceram historicamente a relação entre o indivíduo, a comunidade e os resíduos gerados por eles, está condicionado, entre outras, na materialização de um senso de responsabilidade compartilhada por um bem comum, que é o meio ambiente equilibrado sob a ótica do desenvolvimento perene e sustentável. A percepção de valor em materiais recicláveis, adoção de tecnologias mais limpas de produção e redução/reutilização de insumos passa por uma conscientização organizacional caminhando paralelamente a bases normativas objetivas, realísticas e eficazes.

Os aterros sanitários se integram à cadeia de gerenciamento de resíduos sólidos como a forma de disposição final de resíduos e rejeitos legalmente instituída pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, sendo configurados como estruturas de controle ambiental tecnicamente seguras e eficientes, podendo acomodar diferentes tipologias de resíduos e se adaptar às características da população a ser atendida por ele.

Por receber grandes quantidades de resíduos continuamente, com grande parte destes apresentando características orgânicas biodegradáveis, os aterros sanitários são considerados obras dinâmicas, que experimentam constantes alterações geométricas e estruturais. Para suprir os requisitos de segurança ambiental e geotécnica, essas estruturas devem ser construídas sob critérios técnicos de engenharia, e requerem campanhas de monitoramento contínuas, periódicas e integradas para garantir o bom desempenho do empreendimento, mitigando os possíveis impactos à comunidade e ao meio ambiente circundante.

O monitoramento em aterros sanitários pode ser subdividido em três setores: o ambiental – que se ocupa com o controle da qualidade do meio físico do entorno, da geração de biogás e dos líquidos lixiviados; o geotécnico – responsável por avaliar recalques superficiais, movimentações internas, poro-pressões nos maciços e a integridade estrutural da obra; e o operacional, que objetiva acompanhar topograficamente a geometria da obra, o volume de resíduos incorporados, a compactação na rampa de aterragem e o controle do peso específico aparente dos resíduos sólidos.

O nível de detalhamento, complexidade e periodicidade exigidos nos procedimentos de monitoramento, por envolver tema de segurança ambiental e social, faz com que esta etapa de acompanhamento possa se tornar, conseqüentemente, uma etapa onerosa em termos operacionais, logísticos e financeiros. Esse cenário descortina a oportunidade de se buscar ferramentas e metodologias inovadoras - no aspecto tecnológico -, alternativas - em relação às práticas convencionais -, eficientes - no que tange à qualidade dos resultados ofertados - e com custos reduzidos - seja em termos monetários, operacionais ou de tempo.

Uma tecnologia que vem ganhando espaço para as aplicações de representação, acompanhamento e monitoramento da superfície terrestre é a aerofotogrametria baseada em Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) – ou drones. A aerofotogrametria sumariamente pode ser descrita como um procedimento de representação métrica, tridimensional e em escala da superfície terrestre obtida por meio de fotografias aéreas ortogonais. É uma técnica antiga que historicamente era restrita a usos militares, ganhando destaque na época das grandes guerras, quando eram utilizados aviões e/ou helicópteros para tomada das imagens aéreas.

Avanços científicos e tecnológicos recentes permitiram a integração da inteligência artificial ao aeromodelismo, dando origem aos VANTs. Estas aeronaves não tripuladas são operadas remotamente e incorporam sistemas de posicionamento geográfico, controle de estabilidade, acelerômetro, dentre outros. Essas plataformas podem ainda ser munidas de sensores fotográficos de alta resolução bem como também sensores multiespectrais, prestando-se como uma notável plataforma de aquisição de dados da superfície terrestre, com possibilidade de aplicações em escalas variáveis.

Um dos produtos cartográficos digitais gerados como resultado da aplicação fotogramétrica é o Modelo Digital de Elevação (MDE), que reúne os dados de altimetria, em alta resolução, do terreno mapeado, ou seja, representa a topografia da área de interesse. O outro produto é a ortofoto (ou ortomosaico), que apresenta uma carta bidimensional da região mapeada com informações visuais em visão ortogonal.

Os serviços topográficos têm forte atuação nos procedimentos de monitoramento dos aterros sanitários, sendo, por exemplo, a principal fonte de dados sobre a geometria da obra para o acompanhamento operacional, além de subsidiar informações importantes

para o acompanhamento geotécnico. A partir deste contexto, o presente estudo traz uma avaliação sobre a aplicação de VANT para auxílio no monitoramento de aterros sanitários, mais precisamente empenhando uma comparação periódica de longo prazo entre essa nova tecnologia e o levantamento topográfico convencional utilizando estação total. A confrontação de ferramentas se deu em termos do cálculo volumétrico mensal de resíduos dispostos em um aterro em operação, pautando uma discussão sobre a diferença entre os valores encontrados para cada uma das metodologias, as possíveis fontes de divergência, as vantagens e desvantagens relacionadas.

As informações planialtimétricas contidas nos MDEs também podem ser utilizadas como ponto de partida para análises hidrológicas relacionadas à configuração da superfície levantada. Algoritmos computacionais aplicados em sistemas de informação geográfica (SIG) para geoprocessamento conseguem, por exemplo, simular a rede de drenagem superficial de um terreno a partir de dados de elevação e declividade da superfície, como é o caso da metodologia *D-infinity* (TARBOTON, 1997).

O sistema de drenagem superficial de aterros sanitários é previsto para escoar de maneira eficiente águas pluviais que afluem para a área do empreendimento. Dessa maneira, busca-se minimizar a infiltração e percolação de águas para o interior do aterro, reduzindo o volume de líquidos lixiviados gerados e acumulados no interior do aterro, e condicionar a condução hídrica sobre os taludes, evitando o desencadeamento de processos erosivos que possam comprometer o papel das camadas de cobertura final e gerar perturbações estruturais na obra.

Considerando a alta resolução dos MDEs gerados por VANT, percebe-se que estes são capazes de representar detalhadamente os dispositivos de drenagem superficial dos aterros sanitários, como descidas e escadas d'água entre taludes, possibilitando a aplicação dos algoritmos supramencionados para representar os fluxos hídricos simulados no sistema de drenagem implantado nos aterros. Por consequência a isto, este trabalho também aborda a aplicação dos produtos cartográficos gerados pela aerofotogrametria para analisar os dispositivos de drenagem superficial implantados em um aterro sanitário encerrado. A avaliação foi realizada em dois momentos distintos, intervalados em um ano, buscando trazer um diagnóstico do sistema de drenagem previamente ao período

convencional de chuvas, identificando inconformidades e indicando possibilidades de melhoria.

Em consonância com as aplicações de monitoramento apresentadas, há ainda perspectiva de se utilizar as ortofotos geradas para as regiões mapeadas no intuito de prover identificações e confirmações visuais sobre dados gerados. Isso é possível pois os ortomosaicos apresentam as informações visuais do mapeamento em uma resolução suficientemente alta para que sejam observados detalhes de ordem de grandeza centimétricos na superfície.

Portanto, em síntese, a motivação desta dissertação está em aplicar uma ferramenta tecnológica inovadora, que apresenta características de baixo custo operacional relativo, segurança operacional e alto desempenho, no contexto das rotinas de monitoramento operacional, ambiental e geotécnico praticadas em aterros sanitários, no intuito de se obter informações robustas para serem utilizadas no acompanhamento eficaz do empreendimento bem como no subsídio de tomadas de decisões estratégicas de planejamento, aproveitando-se ao máximo dos dados geoespacializados gerados.

2 CAPÍTULO 1: VANTS, CONCEITOS BÁSICOS, AEROFOTOGRAMETRIA, PROCESSAMENTO DE IMAGENS

2.1 Características gerais

O avanço da integração tecnológica entre as áreas do conhecimento que envolvem a mecânica, aeronáutica, eletrônica, computação, inteligência artificial e robótica, em conjunto com a difusão de uso dos sistemas de informação automatizados, deram origem aos Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTS), popularmente conhecidos como drones (GREENWOOD *et al.*, 2019).

Os VANTS são plataformas aéreas motorizadas e controladas remotamente, podendo ser autônomas ou não. A principal diferença para as aeronaves usuais é a ausência de piloto a bordo, o que não implica que o equipamento não necessite de supervisão humana (EVARAERTS, 2008). Inicialmente desenvolvidos para fins militares, ganharam espaço e interesse para uso civil sendo empregados para fins diversos, desde recreação e entretenimento até a prestação de serviços para engenharia. Os modelos de drone podem

ser multirrotores (quadricópteros, hexacópteros, octacópteros, a depender do número de hélices) e de asa fixa (Figura 2.1).



Figura 2.1 - Modelos de VANT multirrotor (esquerda) e asa fixa (direita). (NETO *et al.*, 2017)

A aplicabilidade do tipo de drone é influenciada de acordo com alguns parâmetros relacionados à área a ser mapeada e a finalidade do mapeamento (GREENWOOD *et al.*, 2019):

- Tamanho da área: os equipamentos de asa fixa possuem maior autonomia de voo, e consequentemente são mais indicados para áreas maiores de levantamento.
- Características do relevo: o processo de decolagem e aterrissagem dos multirrotores é extremamente simples de ser controlado, e requer um espaço dedicado em campo da ordem de grandeza do equipamento. Em contrapartida, para os de asa fixa esses procedimentos (principalmente a aterrissagem) requisitam grandes áreas descampadas e relativamente planas.
- Equipamentos embarcados: os equipamentos de asa fixa, por serem mais robustos, comportam carregar mais peso, o que implica na possibilidade de carregar um maior número de sensores, ou sensores mais pesados.
- Qualidade geométrica das fotos: devido a sua maior estabilidade de voo, os multirrotores fornecem imagens de melhor qualidade do que os modelos de asa fixa.
- Versatilidade operacional: também devido à maior estabilidade de voo, a capacidade de realizar deslocamentos curtos e precisos no ar, e de sobrevoar muito próximo aos alvos, os multirrotores exibem uma versatilidade bem superior aos modelos de asa fixa.

2.2 Regulamentação

No Brasil a regulamentação sobre o uso de VANTs fica a cargo da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC) no que tange a normativas e fiscalização, e do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA), órgão da aeronáutica vinculado ao Ministério da Defesa, que lida com o controle do espaço aéreo.

O Regulamento Brasileiro de Aviação Civil Especial nº 94 (ANAC, 2017) determina que para VANTs de até 25 kg a operação deve se restringir a até 120 metros de altura, mantendo sempre a linha de visada entre o operador e a aeronave, observando uma distância horizontal de no mínimo 30 metros de pessoas. Enquadrando-se neste caso, os voos não precisam de projeto autorizativo, mas devem se cadastrar no sistema online SISANT, apresentando informações sobre o operador e o equipamento.

O ICA 100-40/2017 do Ministério da Defesa (BRASIL, 2017) dispõe sobre o acesso ao espaço aéreo brasileiro referente ao controle de aeronaves não tripuladas. Esta normativa dispõe sobre os usos e prioridades do espaço aéreo, das responsabilidades envolvidas e do procedimento autorizativo e cadastral de voos por meio do sistema online SARPAS. Diz ainda que voos em espaços confinados e de propriedade privada (estádios, arenas, terrenos) são de inteira responsabilidade do proprietário e devem seguir as regulamentações da ANAC.

2.3 Aerofotogrametria com VANTs

Os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) são ferramentas incipientes no contexto da evolução das geotecnologias. Esses equipamentos, além de portáteis e robustos em termos tecnológicos e aeromecânicos, possuem sistema de posicionamento geográfico embarcado e podem ser equipados com sensores fotográficos de alta resolução, como também sensores multiespectrais, tornando-se uma poderosa plataforma de aquisição de dados da superfície terrestre. As características supracitadas descortinaram diversas possibilidades para seu uso, como aplicações de fotogrametria para geração de ortofotos (ou ortomosaicos) e modelos digitais de elevação (MDEs) em alta resolução (EISENBEISS, 2011).

A técnica de aerofotogrametria digital com VANT tem sua base em um algoritmo computacional denominado *Structure-from-Motion* (SfM), que foi criado à luz dos

princípios básicos da estereoscopia, tomando proveito da robusta capacidade computacional dos equipamentos atuais para processar grande número de imagens sequenciais, em alta resolução, permitindo a reconstrução tridimensional do terreno mapeado (ZEKKOS *et al.*, 2018). A metodologia de reconstrução 3D para a estereofotogrametria baseada em iterações, ajustes e correções de imagens com sobreposição redundante está descrita em detalhes por alguns autores como Westoby *et al.* (2012) e Cook (2017).

Zekkos *et al.* (2018) dão destaque também a um procedimento de suma importância para a confecção de produtos aerofotogramétricos confiáveis, que é a coleta de pontos de controle (PCs) em solo. Estes pontos são aspectos do terreno mapeado que podem ser identificados nas imagens aéreas coletadas pela aeronave, podendo ser feições naturais ou objetos planejados, como alvos (Figura 2.2).



Figura 2.2 - Exemplo de alvo confeccionado (à esquerda) e feição natural do terreno (à direita) para fins de coleta de pontos de apoio para aerofotogrametria.

As coordenadas geográficas desses pontos de controle são coletadas por equipamentos GNSS de alta precisão e, posteriormente, são adicionadas à metodologia de processamento de imagens para escalonar e amarrar o posicionamento cartográfico e métrico dos modelos gerados.

Os PCs devem ser harmonicamente distribuídos em toda a área de interesse do aerolevante e são normalmente intercalados por Pontos de Verificação (PVs). Estes últimos são pontos coletados com a mesma metodologia dos PCs, porém não entram na

fase de processamento de dados, sendo utilizados apenas como referência para avaliar, ao final dos processamentos, a precisão dos resultados gerados.

O número de pontos de controle coletados deve ser ponderado em termos de custo operacional e qualidade posicional final dos resultados, sendo que quanto maior a extensão do terreno, maior a densidade de pontos requerida para se obter uma precisão satisfatória. Destaque para o número mínimo de PCs, que nunca deve ser inferior a 3 pontos, para garantir a triangulação posicional na reconstrução tridimensional da superfície.

2.3.1 Planejamento de voo

A etapa compreendida como planejamento de voo abrange uma gama de fatores que devem ser avaliados de modo a garantir a segurança operacional, a produtividade e a qualidade do levantamento. Alguns parâmetros que devem ser equacionados são (NETO, *et al.*, 2016):

- Fatores climáticos: são determinantes para a realização da operação, devendo-se evitar dias chuvosos. Os trabalhos devem ser executados preferencialmente entre 10h e 14h, para furtar-se do sombreamento na região de interesse; também é desejável uma taxa de insolação constante durante o sobrevoo.
- Reconhecimento prévio da área: importante para avaliar a extensão, os desníveis e pontos de interesse na área do mapeamento e determinar os prováveis tempo e altura de execução do voo.
- Situação do equipamento: para garantia de segurança é recomendado checar o funcionamento dos motores, a carga das baterias e a qualidade de conexão remota entre os componentes antes de iniciar a operação.

Após a averiguação dos segmentos supramencionados, parte-se para a elaboração do plano de voo, ajustando parâmetros de tempo de voo, altura de voo, sobreposição lateral e sobreposição longitudinal (RACZYNSKI, 2017):

- Tempo de voo: deve ser avaliado levando em consideração a autonomia da bateria e a quantidade de baterias disponíveis para realizar a operação, e é reflexo dos demais parâmetros ajustados.

- Altura de voo: deve ser selecionada para vencer o desnível máximo do terreno, evitando colisões, e obter uma resolução espacial compatível com o nível de detalhamento desejado para o levantamento.
- Sobreposições de imagens: têm de garantir a reconstrução estereoscópica da área de voo, sendo recomendado um percentual mínimo de 70% para aplicações de aerofotogrametria com VANT.

Cabe ressaltar ainda que as imagens devem ser capturadas de forma ortogonal, isto é, formando um ângulo de 90° entre o obturador e a superfície mapeada. O número de imagens coletadas varia de acordo com a altura e as sobreposições ajustadas, além de ser dependente da extensão territorial do levantamento. Deve-se avaliar o número de fotos perante os custos de processamento computacional na execução dos algoritmos de processamento de imagens (ZEKKOS *et al.*, 2018).

2.3.2 Vantagens e limitações do método

Os VANTs multirrotores de pequeno porte, categoria que pesa até 25 kg, vem ganhando destaque no cenário de aerolevantamentos na última década e podem ser considerados como a abertura de uma nova fronteira na aviação.

Os estudos de Eisenbeiss (2009), Remondino *et al.* (2011), Sauerbier *et al.* (2012) e Zekkos *et al.* (2018) focam majoritariamente nas características de VANTs multirrotores de pequeno porte, apontando-os como ferramenta inovadora e com diversas aplicações em escalas variáveis, introduzidas como alternativas de baixo custo (quando comparadas com veículos aéreos tradicionais) e de rápida resposta de resultados. Os autores elencam algumas vantagens e limitações desses sistemas, dispostos nos parágrafos seguintes.

Fundamentalmente, a aquisição de dados via VANT está revolucionando a área de levantamentos de agrimensura em termos de facilidade operacional, precisão e custos. A principal vantagem observada é a possibilidade de uso em situações/áreas de alto risco e difícil acesso sem que haja perigo para o operador. Destaque também para a possibilidade de voar a baixas altitudes e em linhas de voo realmente próximas ao objeto alvo, garantindo uma alta resolução às imagens.

O sistema de posicionamento embarcado, conjuntamente com o sistema de navegação e estabilização dos multirrotores proporcionam voos precisos e ainda garantem uma

cobertura imagética com grandes porcentagens de sobreposição, que são usadas para confecção de ortomosaicos de alta resolução, modelos digitais de terreno e modelos tridimensionais.

As operações de aerolevantamentos podem ser realizadas por sistema de voo automático/autônomo, menos sujeito a falhas. A rapidez para aquisição de dados também é um ponto de destaque para os drones, assim como a viabilidade real de aplicações em pequena escala, que muitas vezes se torna insustentável pelas vias convencionais da aerofotogrametria, isto é, por aviões e helicópteros.

A despeito do cenário favorável da versatilidade de aplicações apresentadas, há de se ponderar os fatores limitantes da técnica, de modo a aplicá-la com critério. O principal destes é a necessidade em se coletar pontos de controle em solo ao longo da estrutura a ser medida para obter uma exatidão cartográfica satisfatória, procedimento que eleva o tempo de trabalho em campo.

Por ser baseada em fotografias aéreas, há também uma limitação intrínseca da metodologia que delimita sua precisão à ordem de grandeza centimétrica, restringindo seu campo de aplicação. Outra desvantagem operacional dos VANTs está ainda no limite de peso passível de ser carregado pela aeronave, restringindo o embarque de sensores, bem como a autonomia das aeronaves, que são dependentes integralmente de baterias.

Por fim, uma limitação importante para o método é a presença de vegetação densa em grandes extensões na superfície a ser mapeada. Nestes casos, a ferramenta fotográfica não possibilita o discernimento entre a vegetação e a superfície original do terreno, impossibilitando, nestes casos, a geração de modelos digitais de terreno (MDTs) e análises geoespaciais que dependam deste.

2.3.3 Principais demandas e escalas de aplicação

As principais demandas para esse tipo de mapeamento são as atividades de monitoramento, como, por exemplo, detecção de novas construções, mudanças em áreas florestais e urbanas, acompanhamento volumétrico de pilhas de minério e aterros de resíduos e serviços de agrimensura. Ressalta-se que, além das atividades de medição tradicional, outra demanda real é a documentação e registro periódico da área por fotos

que, no caso da aerofotogrametria, é realizada de forma simultânea à primeira, tudo em um só procedimento (SIEBERT; TEIZER, 2014).

Fazendo uso da base de dados da Administração Federal de Aviação dos Estados Unidos (ano de 2016), o estudo de Greenwood *et al.* (2019) elenca o número de operações realizadas até àquele momento relacionado aos respectivos campos de aplicação (Figura 15). Os dados mostram o relevante impacto do uso de VANTs principalmente nas áreas de inspeção, levantamentos, construção, infraestrutura e meio ambiente, comprovando sua entrada efetiva como ferramenta para atividades de monitoramento e engenharia.

3 CAPÍTULO 2: ATERROS SANITÁRIOS: CONCEITOS BÁSICOS, MONITORAMENTO OPERACIONAL, DISPOSITIVOS DE DRENAGEM SUPERFICIAL

3.1 Aterros sanitários no Brasil

A Lei 12.305/2010 institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) com uma visão sistêmica na gestão integrada dos resíduos, considerando variáveis ambientais, sociais, culturais, econômicas, tecnológicas e de saúde pública, e classifica, dentre outras técnicas, os aterros sanitários como uma disposição final ambientalmente adequada, desde que respeitadas normas operacionais específicas a favor da segurança da população e do meio ambiente.

Essa mesma Lei, em seu art. 54, determina que todas as administrações públicas municipais, independentemente de seu porte e localização, teriam um prazo de quatro anos a partir da sanção desta Lei (ano de 2010) para viabilizar uma destinação final correta para seus RSU, substituindo os lixões e aterros controlados existentes.

Impasses administrativos, logísticos e principalmente financeiros nos mostram que apesar das determinações da PNRS, a situação real ainda está muito aquém do planejado. Dos RSU coletados em 2016, 58,4% foram destinados a aterros sanitários, 24,2% dispostos em aterros controlados e 17,4% em lixões (ABRELPE, 2016).

Os lixões (ou vazadouros), apesar de ainda receberem uma parcela significativa dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, são formas inadequadas de disposição final por não apresentarem nenhum tipo de estrutura de controle e proteção ambiental e sanitária. Neles os RSU são descarregados diretamente sobre o solo sem critérios técnicos e ações preventivas, tornando o local propenso à proliferação de vetores de doenças, geração de maus odores e poluição generalizada da área (FEAM, 2006).

Os aterros controlados por outro lado são regidos por alguns critérios de engenharia estipulados pela NBR 8849/1985 como compactação e cobertura frequente com material inerte, que os tornam uma disposição final de resíduos em solo que não causa danos à saúde pública e a segurança. Com esta técnica os impactos ao meio ambiente são reduzidos, mas não isentos. A falta de impermeabilização de base, sistema de tratamento

de percolado e extração/queima controlada dos gases gerados são responsáveis por gerar poluição localizada (FEAM, 2006).

Os aterros sanitários são definidos pela norma de apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos (NBR 8419/1992) como uma disposição de RSU no solo que utiliza de técnicas de engenharia para confiná-los à menor área possível e menor volume permissível, de modo que não cause danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais.

Tecnicamente seguro e eficiente para destinação dos rejeitos, os aterros sanitários se apresentam como uma estrutura completa de controle ambiental, comportando-se como reatores dinâmicos através das reações químicas e biológicas que acontecem em seu maciço. Apresentam boa relação custo-benefício, podendo acomodar vários tipos de resíduos e se adaptar às características da comunidade a ser atendida independente de seu tamanho e localização geográfica (MMA, 2009).

Ressalta-se que o poder público se responsabiliza apenas por uma fatia da cadeia dos resíduos sólidos, sendo a iniciativa privada (fábricas, indústrias, mineradoras, entre outros) também grande contribuinte na geração de resíduos, que por vezes também tem a destinação em aterros. O Inventário Estadual de Resíduos Industriais de 2016 realizado pela Fundação Estadual de Meio Ambiente de Minas Gerais (FEAM/MG) relata um total de 58.964.261,18 toneladas de resíduos industriais inventariados no Estado de Minas Gerais no ano de 2015 por empreendimentos classe 3, 4, 5 e 6. Do montante de resíduos inventariados, tem-se que 1,73% foram destinados a “Aterro Sanitário Municipal”, 5,47% a “Aterro Industrial de Terceiros” e 1,25% a “Aterro Industrial Próprio”, somando aproximadamente 4.982.480 toneladas de resíduos sólidos destinados a aterros no ano em questão.

3.2 Aspectos estruturais e operacionais em aterros sanitários

A implantação de aterros no Brasil e no mundo é uma prática consolidada e amplamente sabida nos meios técnicos, científicos e operacionais. Guias provenientes dos órgãos de engenharia no país, como o “Guia para elaboração de projetos de aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos” do Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Paraná (CREA-PR), dos órgãos ambientais, como o “Manual de operação de aterros sanitário em

valas” da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) e da literatura internacional como “Criteria for solid waste disposal facilities” da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA-USA) são exemplos de termos que oferecem diretrizes básicas para as distintas etapas que compreendem essas obras.

Como consequência do domínio desta técnica, seus possíveis aspectos e impactos ambientais nos meios físico, biótico e antrópico já são discernidos, descomplicando o processo de licenciamento ambiental nos órgãos estaduais e municipais, que possuem termos de referência para elaboração de estudos de impactos ambientais específicos para este tipo de empreendimento. A nível federal a resolução CONAMA 404/2008 estabelece diretrizes e critérios para licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos.

As grandes fases de planejamento, construção, operação/manutenção e monitoramento dos aterros requerem uma equipe técnica capacitada e multidisciplinar, capaz de atender as exigências diversas da parte topográfica, geotécnica, ambiental, sanitária, manuseio de maquinário, logística e outros (CREA/PR, 2009). É também fundamental o treinamento operacional periódico dessa equipe, com ênfase nas atividades específicas do indivíduo e nos procedimentos de emergência, minimizando possíveis acontecimentos adversos.

Recomenda-se também ser estipulados procedimentos específicos e sistematizados para cada etapa, que devem ser registrados em relatórios periódicos de consolidação de dados que permitam o acompanhamento e avaliação da operação, resultando em uma eficiência maximizada que assegure seu funcionamento confiável durante toda a vida útil do empreendimento (FEAM, 2006).

O projeto de um aterro sanitário deve atender exigências mínimas que garantam sua competência no que tange à proteção sanitária e ambiental. Para isso a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) dispõe tanto da norma NBR 8419/1992 que objetiva fixar condições mínimas para projetos de aterros sanitários, como a NBR 13896/1997 com objetivo de fixar condições mínimas para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos.

Dentre os principais elementos de projeto destaca-se (Lange et. al., 2003; ReCESA, 2008):

- Projeto geométrico: nele define-se a geometria e a técnica de construção do aterro, podendo ser em vala, área, trincheira, encosta e outros. É idealizado para atender os requisitos de estabilidade de fundação e dos taludes, e otimizar o volume disponível para disposição dos rejeitos. O estudo do projeto geométrico é baseado, entre outros aspectos, na população a ser atendida, na geração per capita de resíduos, na rotina de operação prevista, na topografia local, na profundidade do lençol freático, na disponibilidade de material terroso, no planejamento de ocupação da área e na concepção dos demais sistemas que compõe a obra, elencados nos próximos tópicos. Além disso, tem aplicação na estimativa da vida útil do empreendimento e nas análises de estabilidade de maciço.
- Sistema de drenagem das águas superficiais: evita a entrada de água no aterro proveniente de escoamento superficial, durante e após sua vida útil. A infiltração de água no maciço aumenta o volume de lixiviado, causa erosões e pode gerar instabilidade por aumento induzido de poro-pressões.
- Sistema de impermeabilização de fundo e lateral: impede a percolação do lixiviado para o solo e águas subterrâneas, e também eventuais migrações de gases através de falhas no subsolo. Utiliza-se comumente argila compactada, geomembranas, betume, entre outros, como materiais impermeabilizantes nesse sistema.
- Sistema de drenagem de lixiviados: configurado de acordo com as características do local, tem a função de drenar o lixiviado proveniente de balanço hídrico positivo dentro do aterro sanitário, conduzindo-o ao sistema de tratamento, e assim reduzindo as pressões destes na massa de resíduo, e minimizado o potencial de migração e contaminação do subsolo.
- Sistema de tratamento de efluentes líquidos: os efluentes líquidos gerados num aterro sanitário são compostos basicamente dos líquidos lixiviados drenados, e da água de chuva incidente diretamente na área do aterro. O lixiviado apresenta grande concentração de substâncias sólidas e alto teor de matéria orgânica. O objetivo do sistema de tratamento é que o efluente atinja os padrões de lançamento, e então possa ser disposto em um corpo hídrico. O lixiviado também pode ser recirculado na massa de rejeitos para manter o grau de umidade ótimo inerente ao processo de decomposição orgânica dos resíduos. O lodo porventura gerado no tratamento pode ser disposto no próprio aterro.

- Sistema de drenagem e queima dos gases: a decomposição da matéria orgânica presente nos resíduos é predominantemente anaeróbia, produzindo um gás composto basicamente de Metano (CH_4) – 45 a 60% - e Dióxido de Carbono (CO_2) – 40 a 60%. O metano é um gás inflamável e passível de combustão espontânea, fazendo com que a coleta deste gás seja de extrema importância para a segurança das pessoas e da estrutura envolvida. A queima do biogás acontece transformando o metano em gás carbônico, e assim reduzindo consideravelmente o potencial de efeito estufa do mesmo.
- Sistema de cobertura dos resíduos (diário, intermediário e final): tem a função de evitar a proliferação de vetores de doenças, diminuir a formação de lixiviados, reduzir a exalação de odores e impedir a saída descontrolada do biogás. Realiza-se a cobertura diária ao fim de cada jornada de trabalho; a cobertura intermediária se faz necessária nos locais onde a superfície ficará inativa por determinado tempo; a cobertura final se dá no fechamento da célula de aterramento. É importante que a cobertura final seja impermeável, podendo ser de diferentes materiais, como argila compactada, geomembrana, e combinações destes, junto de uma camada superficial de proteção vegetal.

A figura 3.1 mostra uma visão esquemática dos principais elementos de projeto e sua disposição locacional em um aterro sanitário.

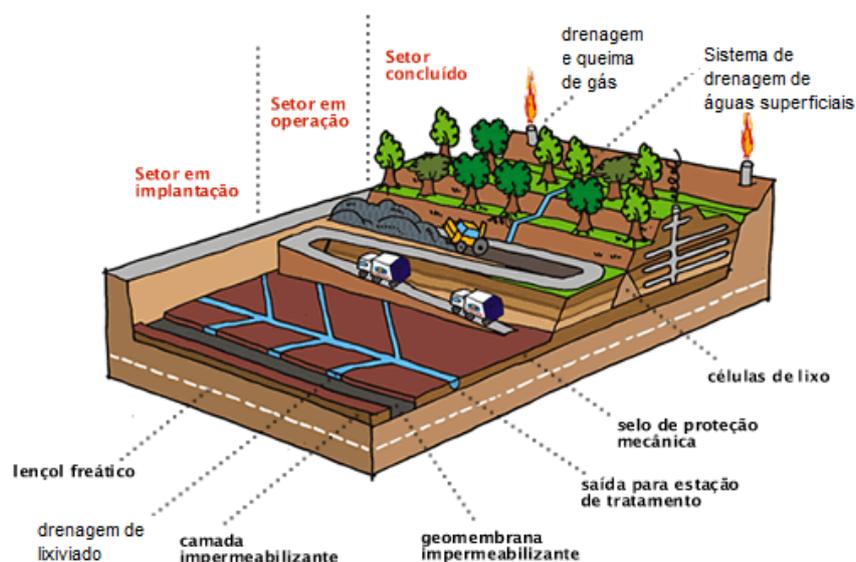


Figura 3.1 - Estrutura esquematizada de um aterro sanitário convencional nos setores de implantação, operação e finalização. Fonte: SEMARH-AL, 2017

3.3 Monitoramento em aterros sanitários

No que diz respeito ao monitoramento, este se divide no âmbito ambiental e geotécnico, e tem importância ímpar na garantia de segurança, salubridade, eficiência operacional, integridade estrutural e preservação do meio ambiente, tendo início desde a implantação do aterro, e se prolongando após o encerramento de suas atividades, por tempo indeterminado. As rotinas de acompanhamento devem ser estabelecidas por um plano de monitoramento que vislumbre os parâmetros a serem analisados, os critérios de análise, os valores esperados e o cronograma/frequência de atividades, permitindo a identificação de desconformidades aos parâmetros de projeto e elaboração de medidas corretivas.

O monitoramento ambiental tem como objetivo mínimo atender à legislação e aos órgãos de controle ambiental competentes, e estabelece os seguintes controles (ReCESA, 2008; MMA, 2009):

- Qualidade das águas superficiais a montante e a jusante do aterro, por meio de análises laboratoriais de amostras, a fim de avaliar a contaminação de águas pluviais na região do aterro e preservar os mananciais de águas superficiais.
- Qualidade das águas subterrâneas, por meio de análises laboratoriais de amostras coletadas em poços no sentido preferencial de fluxo do lençol freático, a fim de avaliar os sistemas de impermeabilização e drenagem de lixiviados e preservar os mananciais subterrâneos.
- Qualidade do ar, por meio de instrumentos de medição in loco, a fim de avaliar a qualidade do ar no entorno, preservando-a.
- Qualidade e quantidade de lixiviados, por meio de análises laboratoriais, objetivando avaliar a eficiência do sistema de tratamento e o atendimento aos padrões de lançamento.
- Controle de animais e vetores de doenças, por meio de inspeções visuais, com intuito de avaliar a qualidade sanitária da obra.

O monitoramento geotécnico avalia as condições de estabilidade e comportamento do maciço, concebendo (Batista, 2010 e ReCESA, 2008):

- Medidas de poro-pressões: com intuito de mensurar as poro-pressões de líquidos e gases nos diques de contenção e no interior do maciço, por meio de piezômetros instalados em locais específicos, verificando se as pressões estão em níveis seguros que não comprometam a estabilidade estrutural dos maciços.
- Medidas de recalques superficiais: para avaliação contínua da vida útil do aterro, e aferição da estabilidade dos taludes, faz-se necessário o monitoramento dos recalques nas direções verticais e horizontais nos taludes do aterro, por meio de medidores específicos e registros topográficos.
- Inspeções de campo: engloba detecção visual de toda e qualquer desconformidade estrutural em todo o aterro, que são indícios de falhas de projeto e/ou operação, analisando erosões, trincas e fissuras nas camadas de cobertura, vazamentos de lixiviados, integridade estrutural dos dispositivos de drenagem de gás, água pluvial e lixiviado, conformidade das camadas de cobertura (solo e geotêxtil), afundamentos localizados, desalinhamento/escorregamento de taludes, vazamento de gases, etc.
- Controle tecnológico dos materiais geotécnicos: para garantir que as especificações de projeto sejam atendidas conforme estipulado, deve ser realizado o controle tecnológico dos materiais com ensaios laboratoriais e em campo, avaliando a qualidade dos mesmos, e também a localização estratégica segura destes materiais dentro da área de operação do aterro.
- Serviços topográficos: o constante acompanhamento topográfico da estrutura é peça fundamental no monitoramento geotécnico, fornecendo, por exemplo, a inclinação da rampa de compactação, a geometria do aterro como um todo, as configurações das camadas, dos taludes e das bermas, e a verificação dos recalques.

As atividades operação, o monitoramento e as atividades de manutenção do aterro sanitário devem ser computadas e registradas periodicamente no chamado “Diário de Obras do Aterro”, mantido atualizado com informações pertinentes para o próprio operador, utilizando como registro histórico, bem como objeto disponível para fiscalizações externas eventuais (CREA/PR, 2009).

3.3.1 Práticas e instrumentos usuais no monitoramento geotécnico de aterros sanitários

Batista (2010), em sua dissertação sobre Desenvolvimento de Diretrizes para Monitoramento Geotécnico e Plano de Contingência/Emergência em Aterros Sanitários, propôs questionários que objetivavam levantar dados sobre monitoramento geotécnico de aterros sanitários no Brasil. Para isso analisou respostas de diferentes painelistas, sendo eles pesquisadores, projetistas e consultores ligados à área de resíduos sólidos e/ou geotecnia e operadores de aterros de portes variados sobre as práticas usuais de monitoramento instauradas, obtendo a seguinte compilação:

1) Para aterros de médio porte¹: em geral nas estruturas desse porte observou-se utilização de parâmetros básicos de monitoramento. O controle tecnológico dos materiais terrosos e pétreos é realizado de forma visual, bem como o controle dos recalques verticais, sendo esses realizados de forma mensal na fase de operação e semestral no pós-fechamento.

As inspeções visuais têm frequência semanal durante a operação e mensal após fechamento da estrutura, e avaliam os parâmetros de erosão, trincas, falha de material de cobertura e proteção vegetal, afundamentos localizados e surgência de lixiviado em taludes e bermas.

2) Para aterros de grande porte: em geral para essas estruturas observou-se um aumento significativo na quantidade de parâmetros avaliados, e um leque mais amplo de métodos utilizados. O controle de materiais terrosos e pétreos é feito visualmente e também por ensaios de campo. O acompanhamento dos recalques verticais e horizontais, além de realizado visualmente, também dispõe de medidas topográficas convencionais e medidas de recalques em profundidade (para os verticais), sendo realizados mensalmente durante a operação, e semestralmente no pós-fechamento.

As medidas de poro-pressões nos líquidos e gases ocorrem de forma mensal na fase operacional, feitas por meio de piezômetros convencionais e medidores de nível (para os líquidos). Após o fechamento as medições nos líquidos passam a ser semestrais, e a

¹ Considerou-se nesse estudo que aterros de médio porte possuem altura de até 20 metros, e aterros de grande porte possuem altura acima de 20 metros.

de gases se mantém. As inspeções visuais se dão da mesma maneira que em aterros de médio porte.

Esse cenário revela a fragilidade dos aterros de médio porte em relação ao monitoramento geotécnico, principalmente no que se refere à ausência de medições de poro-pressão nos líquidos e gases, e de topografia convencional no controle de recalques verticais e horizontais.

As inspeções visuais idealmente também deveriam avaliar inclinação de arbustos e dreno de gases, embarrigamento/desalinhamento/escorregamento de taludes, desalinhamento e obstrução dos dispositivos de drenagem superficial e surgência de gases (borbulhamento) nos taludes e bermas.

3.3.2 Sistema de drenagem superficial em aterros sanitários

Conforme Lange et. al. (2003), o sistema de drenagem superficial é previsto para conduzir de maneira eficiente águas pluviais que afluem para a área do empreendimento. Dessa maneira, busca-se minimizar a infiltração e percolação de águas para o interior do aterro, reduzindo o volume de líquidos lixiviados, e condicionar o escoamento superficial hídrico sobre os taludes, evitando que este desencadeie processos erosivos que possam comprometer o papel das camadas de cobertura final e gerar perturbações estruturais na obra.

Constituem esses sistemas: dispositivos de dissipação de energia, canaletas nas bermas, escadas ou descidas d'água nos taludes e outros. A concepção desses deve ser pautada no projeto geométrico, plano operacional e regime hidrológico local e deve-se prever, considerando as constantes deformações dos aterros, um plano de monitoramento e manutenção que garanta o bom desempenho da rede de drenagem superficial.

Jorge (2004) relata que dentre as atividades básicas de conservação e manutenção para células de aterro encerradas estão principalmente a limpeza e desobstrução de dispositivos de drenagem superficial, o retaludamento dos maciços e a recuperação de áreas sujeitas a processos erosivos. Esses serviços, quando em caráter preventivo, identificam desconformidades e evitam a evolução dos processos de degradação.

3.3.2.1 Monitoramento de drenagem superficial com VANT

O sistema VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) vem ganhando espaço na área da geomática nos últimos anos e se tornou uma ferramenta de sensoriamento remoto versátil, capaz de operar em baixas altitudes e alcançar resultados em alta resolução e com efetiva acurácia topográfica utilizando equipamentos de baixo/médio custo (Barreiro et. al., 2014)

As aplicações práticas da aerofotogrametria com VANT se baseiam nos principais produtos da técnica: as ortofotos e modelos digitais de terreno. As ortofotos (ou ortomosaicos) são mapas bidimensionais escalonáveis em visão ortogonal da superfície, enquanto os modelos digitais de elevação (MDEs) são a representação tridimensional, em escala, da elevação da superfície terrestre, sendo ambos georreferenciados por sistemas de coordenadas espaciais (Eisenbeiss, 2011).

MDEs fornecem dados de entrada para modelagens computacionais capazes de extrair redes de drenagem baseadas em topografia. O'Callaghan & Mark (1984) e Tarboton (1997) propuseram algoritmos computacionais capazes de manipular dados espaciais de elevação subsidiados por MDEs para simular perfis de escoamento superficial em terrenos naturais. Essas simulações são divididas em duas etapas principais: (1) direção de fluxo e (2) acumulação de fluxo. A primeira modela a direção de fluxo de cada célula para sua célula vizinha de declive mais íngreme. A segunda compila a convergência de fluxos ao longo da área de contribuição no terreno, dando origem ao escoamento acumulado.

Estudos utilizando essas metodologias vem sendo testados utilizando MDEs de alta resolução gerados por aerofotogrametria com VANT como base de dados topográficos. Leitão et. al (2016) e Rosa et. al (2018) realizaram simulações de rede de fluxo superficial para drenagem urbana e chegaram à conclusão que a alta resolução desses modelos proporciona uma avaliação mais detalhada e, conseqüentemente, mais realista dos padrões de drenagem na superfície.

Para se instaurar rotinas de monitoramento e manutenção preventivo e corretivo em sistemas de drenagem superficial de aterros sanitários é imprescindível o entendimento da dinâmica hídrica no relevo da área. Destaca-se que, pelas características dos resíduos sólidos, os aterros sanitários estão sujeitos a grandes deformações em sua superfície, o

que demanda permanentes atividades de levantamentos topográficos e manutenções, principalmente no sistema de drenagem superficial. Nesse contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar o potencial de utilização de VANT e de ferramentas de análise de fluxo superficial sobre o MDE em alta resolução de um aterro sanitário encerrado para avaliar seu sistema de drenagem superficial e identificar oportunidades de intervenção.

4 CAPÍTULO 3: AEROFOTOGRAMETRIA APLICADA AO MONITORAMENTO DE ATERROS SANITÁRIOS COM ENFOQUE EM DISPOSITIVOS DE DRENAGEM SUPERFICIAL

Os Modelos Digitais de Elevação resultantes dos procedimentos de aerofotogrametria fornecem dados matriciais de entrada para modelagens computacionais capazes de extrair redes de drenagem baseadas em topografia. O'Callaghan e Mark (1984) apresentaram uma rotina de processamento iterativa, denominada D8, e Tarboton (1997) expandiu os estudos propondo a metodologia D-infinity. Ambos são algoritmos computacionais capazes de manipular dados espaciais de elevação subsidiados por MDEs para simular padrões de escoamento superficial em terrenos naturais. Essas simulações são divididas em duas etapas principais: (1) direção de fluxo e (2) acumulação de fluxo. A primeira modela a direção de fluxo de cada célula pontual da superfície para células vizinhas com declive mais íngreme. A segunda compila a convergência de fluxos ao longo da área de contribuição no terreno, dando origem ao escoamento acumulado.

O método D8, pioneiro neste tipo de análise, executa a operação de direção de fluxo escolhendo apenas uma, dentre as oito células vizinhas disponíveis na representação matricial, para escoar o fluxo concentrado de um ponto do terreno para outro. Dessa forma, os fluxos hídricos representados são bastante concentrados e resumidos. Já a metodologia D-infinity, proposta como uma melhoria do D8 para simular de maneira mais realista como ocorre o deflúvio superficial, distribui a direção de fluxo de maneira ponderada para as duas células vizinhas mais favoráveis à escoar a drenagem pluvial. Uma representação gráfica da execução destes algoritmos pode ser observada na Figura 4.1.

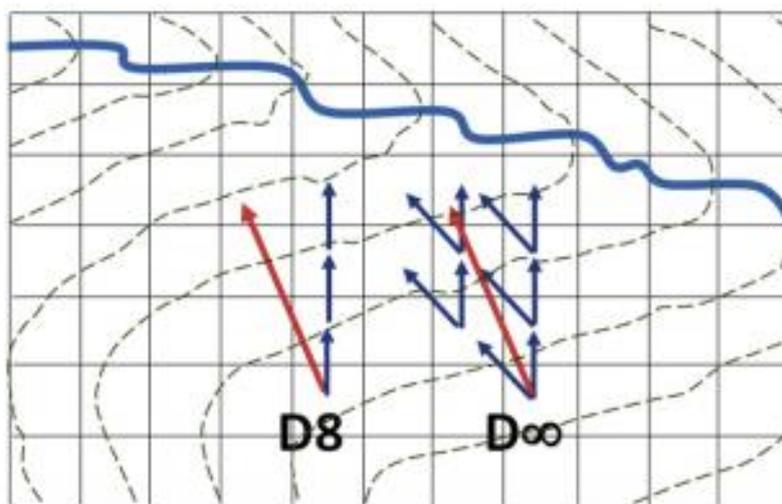


Figura 2 - Representação da aplicação dos algoritmos D8 e D-infinity na conformação da drenagem superficial.

Estudos utilizando essas rotinas de processamento vêm sendo testadas com MDEs de alta resolução como base de dados topográficos. Leitão *et al.* (2016) promoveram um estudo de avaliação quali-quantitativa de MDEs gerados por VANT para aplicações em drenagem urbana e observaram que: (1) a altitude de voo reflete diretamente na resolução espacial dos MDEs e, conseqüentemente, na sua capacidade de representar as nuances da superfície mapeada; (2) A incidência solar tem influência direta na geração de sombras no terreno, o que pode prejudicar a reconstituição tridimensional das áreas mapeadas, sendo o tempo nublado com insolação uniforme o mais indicado para operação; (3) Feições como árvores e muros de construções não são bem representados pela aerofotogrametria com VANT, podendo dificultar análises de drenagem em ambientes urbanos.

No mesmo estudo, os autores processaram a geração de padrões de drenagem superficial aplicando o algoritmo D8, tendo como base topográfica MDEs gerados por VANT (com resoluções de 0,5m/pixel, 1 m/pixel e 2 m/pixel) e Laser Scanner (com resolução de 2 m/pixel), a título comparativo (Figura 4.2).

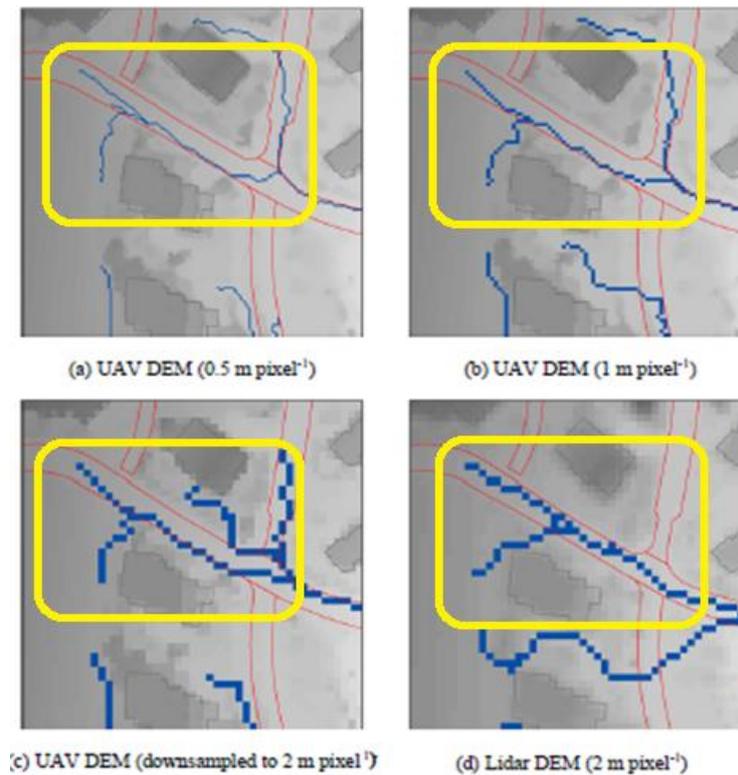


Figura 4.23 - Comparação de rede de drenagem gerada por VANT (em diferentes resoluções) e por Laser Scanner (adaptado de Leitão *et al.*, 2016).

As conclusões foram que a variação da resolução espacial pouco interferiu no padrão de drenagem gerado por MDE-VANT, e que esta se assemelhou consideravelmente com a rede de drenagem resultante do MDE-Laser Scanner, sendo a vegetação a principal causa das diferenças observadas.

Rosa *et al.* (2018) também realizaram simulações de rede de fluxo superficial, com algoritmo *D8*, para projeção de sistemas de drenagem urbana utilizando MDEs em diferentes resoluções provenientes de aerolevantamentos com VANT. Os estudos apontaram que a alta resolução desses modelos proporciona uma avaliação mais detalhada e, conseqüentemente, mais realista dos padrões de drenagem na superfície.

Após a geração da rede de drenagem superficial, esta foi associada, de maneira simplificada, a parâmetros de precipitação média local e uso e ocupação do solo, fornecendo uma estimativa de vazões de projeto para implantação do sistema de drenagem urbana baseada no Método Racional (Figura 4.3).

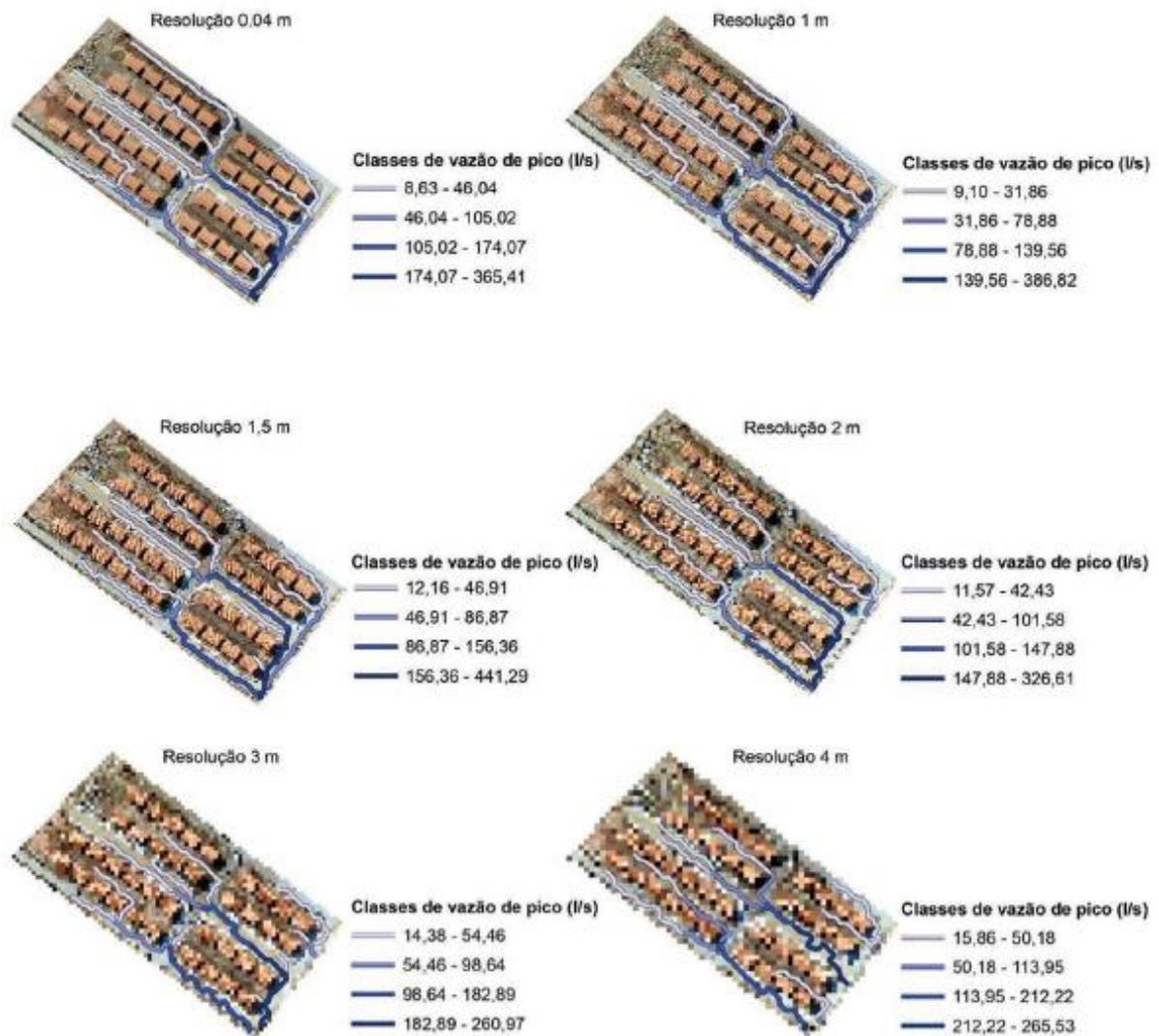


Figura 4 - Delimitação da rede de drenagem e estimativa de vazão de projeto para áreas urbanas utilizando MDEs obtidos por aerofotogrametria com VANT (adaptado de Rosa *et al.*, 2018).

O trabalho desenvolvido por Pijl *et al.* (2019) avalia minuciosamente a drenagem superficial em um sistema de plantio por terraceamento em encostas. Neste tipo de cultivo a drenagem superficial deve ser constantemente monitorada, pois as altas declividades (da ordem de 50%) são extremamente favoráveis para eventos de erosão e danos estruturais. Para geração do modelo tridimensional altimétrico foi utilizado levantamento fotogramétrico com VANT, cobrindo uma região de três hectares. A nuvem de pontos resultante do processamento imagético foi manipulada para remoção parcial da vegetação, no intuito de minimizar interferências e gerar um MDE com resolução de 20 cm/pixel.

A simulação da rede de drenagem utilizou o algoritmo *D-infinity* para gerar os padrões de fluxo superficial, que possibilitaram a identificação de três zonas críticas para análise de intervenções (Figura 4.4). A seleção das áreas críticas foi baseada na concentração de fluxo hídrico e o consequente risco de erosões.

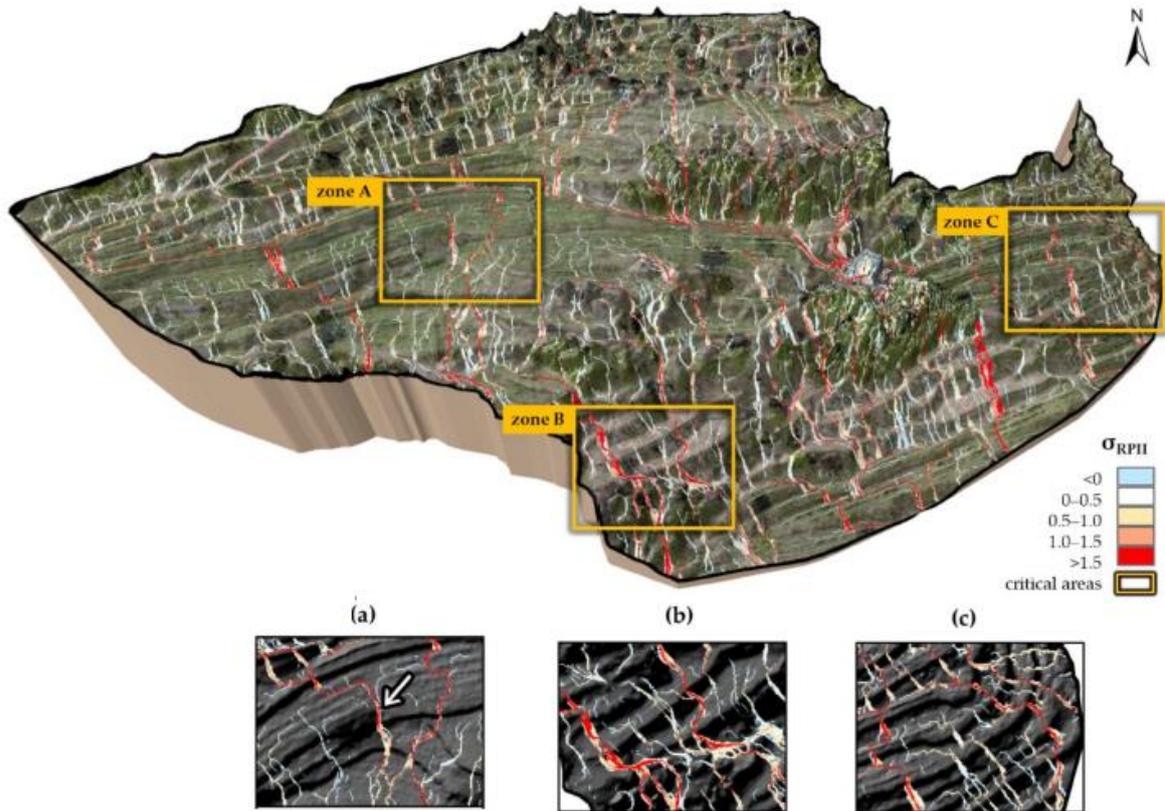


Figura 5 - Conformação da rede de drenagem em área de plantio em terraceamento, com seleção de 03 zonas críticas (adaptado de Pijl et al., 2019).

A análise da rede de drenagem superficial no terraço mapeado foi de grande utilidade para avaliação do cenário atual e previsão de intervenções futuras, no intuito de amenizar a convergência dos fluxos nas zonas críticas e mitigar eventos erosivos. Os autores destacam que a flexibilidade operacional da técnica de aerofotogrametria com VANT descortina a possibilidade de se realizar análises periódicas da área, acompanhando o desenvolvimento das intervenções prescritas em projeto, sendo uma ferramenta bastante útil para a tomada de decisões e monitoramento de ações.

5 CAPÍTULO 4: MODELAGEM SIMWE PARA ANÁLISE DE ESCOAMENTO E PROCESSOS EROSIVOS EM ATERROS SANITÁRIOS

Pesquisas recentes têm enfatizado a importância de utilizar técnicas avançadas de modelagem para avaliar a erosão do solo e a dinâmica da água em diversas paisagens. Cucchiari et al. (2020) destacaram os desafios enfrentados na avaliação da degradação do solo em paisagens agrícolas em terraços, principalmente em áreas com topografia acidentada e cobertura vegetal. Eles empregaram uma abordagem de fusão de dados usando técnicas de topografia de alta resolução para superar esses desafios, enfatizando a importância de combinar dados de diferentes métodos e plataformas para capturar com precisão a rugosidade da superfície.

Luo et al. (2023) exploraram o processo de interface geográfica em múltiplas escalas da erosão do solo, utilizando análise wavelet e o modelo de Erosão Hídrica Simulada (SIMWE) para avaliar a dinâmica de escoamento superficial e sedimentos sob diferentes padrões microtopográficos. Seu estudo destacou a importância de considerar a microtopografia na modelagem da erosão e demonstrou a viabilidade do SIMWE em simular a dinâmica de escoamento superficial e sedimentos em escala microtopográfica.

Fernandes et al. (2017) focaram na avaliação da suscetibilidade de taludes de terra a ravinas devido à aplicação do modelo SIMWE. Eles utilizaram um modelo digital de elevação de alta resolução para analisar a distribuição espacial de formas erosivas e sua associação com características hidrológicas e propriedades do solo. Seus resultados enfatizaram a importância de considerar a textura do solo, estrutura e condutividade hidráulica na avaliação da suscetibilidade à erosão.

Li et al. (2020) abordaram as complexidades do manejo de inundações urbanas propondo o uso do modelo SIMWE para previsão de inundações em tempo real. Eles demonstraram a aplicabilidade do modelo em diferentes resoluções espaciais e destacaram sua capacidade de gerar mapas de profundidade de água, essenciais para avaliar os riscos de inundação em áreas urbanas.

5.1 Descrição da área de estudo

O local para a realização deste trabalho é um centro de tratamento e disposição de resíduos

gerenciado pela iniciativa privada e localizado no município de Betim, Minas Gerais. A unidade conta com diversas tecnologias para destinação de resíduos, incluindo a disposição em aterros. Para análise do sistema de drenagem superficial, o objeto de estudo foi um aterro classe II, também de grande porte, já na fase de monitoramento pós-encerramento, com uma área aproximada de 14 hectares (Figura 5.1).



Figura 5.1 - Aterro encerrado onde foram realizadas as análises de drenagem superficial

5.2 *Descrição da coleta de dados no aterro*

5.2.1 *Coleta GNSS*

Assim como no procedimento para o aterro em operação, no aterro encerrado também se procedeu com a utilização de receptor geodésico GNSS modelo ComNav T300 de dupla frequência para coleta dos Pontos de Controle e Verificação. Os pontos foram adquiridos pela metodologia de levantamento pós-processado e a correção posicional foi realizada pelo serviço de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP) do IBGE. A Figura 33 mostra a distribuição geográfica destes pontos.



Figura 5.2 - Distribuição geográfica dos PCs e PVs utilizados nos levantamentos do aterro encerrado.

Para os levantamentos no aterro encerrado foram utilizados seis Pontos de Controle e três Pontos de Verificação. Os pontos foram coletados em feições estáticas foto-identificáveis no terreno e foram replicados para os levantamentos posteriores, uma vez que a obra já se encontra encerrada e não há variações significativas nas coordenadas geográficas dos pontos estáticos escolhidos. Isso porque as possíveis variações topográficas ocasionadas pelos recalques que ocorreram no período são da ordem de grandeza de fração de centímetros, não sendo capazes de influenciar de maneira relevante na posterior simulação de fluxo superficial.

5.2.2 Coleta com VANT

A plataforma aérea utilizada para este trabalho é um VANT quadricóptero modelo Phantom 4 Professional, da fabricante chinesa DJI. Esta aeronave é classificada como um multirrotor de pequeno porte, conforme apontado por Eisenbeiss (2009) e Zekkos et al. (2018). O VANT é equipado com sistema de navegação por satélite integrado e uma eficiente combinação de interfaces mecânicas, eletrônicas e aerodinâmicas. O sistema aéreo é manuseado por um rádio controle com alcance de até 5 quilômetros (segundo a fabricante) e está munido por um sistema anti-colisão que conta com cinco dispositivos

periféricos. Além disso, o Phantom 4 Professional ainda transporta um sensor fotográfico de alta resolução (20 megapixels). Esses atributos destacados, aliados à capacidade da aeronave em realizar voos autônomos pré-programados, viabilizam seu uso para mapeamentos aéreos de fotogrametria.

Para planejar a tomada de fotos aéreas na área de interesse, também foi utilizado o software DJI Ground Station Pro, com plano de voo padrão exibido na Figura 5.3.



Figura 5.3 - Plano de voo padrão adotado para coleta de imagens aéreas no aterro encerrado.

Os parâmetros de voo (Tabela 5.1) foram adotados com base em um equilíbrio entre os fatores intervenientes no desempenho do levantamento. Optou-se por uma altura de voo de 100 metros para garantir uma resolução espacial capaz de representar os dispositivos de drenagem do aterro em detalhe, mas que restringisse o tempo de voo em uma bateria do VANT. Para a sobreposição de imagens, foi adotado o percentual de 75%, garantindo a representação tridimensional do terreno suficiente para a posterior análise de fluxos superficiais.

Tabela 5.1 – Parâmetros de voo para aerolevantamentos no aterro encerrado

Tempo de voo (min)	Altura de voo (m)	Sobreposição (%)		Número de fotos	Área mapeada (ha)
		Lateral	Longitudinal		
18	100	75	75	350	16

5.2.3 Processamento de Dados Fotogramétricos

O processamento de dados digitais é balizado por softwares com alto grau de automatização, que exigem considerável capacidade de processamento computacional para manusear fotografias em alta resolução e aplicar o algoritmo de Structure From Motion. Para este trabalho, a plataforma utilizada foi o Agisoft Photoscan, em sua versão de testes gratuita. O fluxo de trabalho genérico de processamento pelo software cumpre as seguintes etapas (AGISOFT PHOTOSCAN, 2018):

1. Alinhamento das imagens: procedimento de reconhecimento de imagem que identifica feições comuns entre as fotografias (advindos das sobreposições longitudinais e laterais) e as interliga formando um bloco único orientado pelas semelhanças ópticas e informações geográficas.
2. Calibração automática da câmera: utiliza os parâmetros de orientação exterior e interior do sensor fotográfico para retificar os ângulos e o posicionamento das fotografias, corrigindo as distorções geradas pelo sistema de lentes.
3. Inserção dos Pontos de Controle: nesta etapa, as coordenadas geográficas dos pontos de controle são inseridas no mosaico de fotografias para aperfeiçoar seu posicionamento cartográfico.
4. Geração da nuvem de pontos: processam-se os pares estereoscópicos da cena para promover sua reconstrução tridimensional a partir de uma triangulação de pontos notáveis do modelo, gerando a nuvem de pontos esparsa. Posteriormente, esses pontos são interpolados entre si e dão origem à nuvem de pontos densa.
5. Confecção do MDE: a nuvem de pontos é manipulada para remover ruídos e superfícies inconvenientes à topografia, os pontos da nuvem sofrem operações de interpolação e os dados altimétricos são gravados em uma matriz que representa a elevação da superfície.
6. Confecção do ortomosaico: gerado a partir da texturização da superfície da nuvem de pontos, consiste em um mapa de vista ortogonal, fruto do agrupamento das fotos aéreas obtidas.

5.3 Descrição do processamento de dados - SIMWE

A metodologia proposta para avaliação da erosão do solo em um aterro sanitário utilizando o modelo SIMWE e o SIG é baseada em uma abordagem integrada, inspirada em estudos recentes da literatura. Inicialmente, os dados necessários são adquiridos, incluindo um Modelo Digital de Elevação (MDE) de alta resolução da topografia do aterro e informações sobre textura do solo, estrutura, condutividade hidráulica e cobertura do solo, conforme sugerido por Cucchiaro et al. (2020) e Fernandes et al. (2017). Em seguida, os dados são pré-processados para garantir sua qualidade, incluindo a remoção de anomalias no MDE e a preparação dos dados de solo e cobertura do solo para integração no SIG.

No SIG, os dados de solo, cobertura do solo e topografia são sobrepostos e analisados para entender a distribuição espacial de tipos de solo, cobertura do solo e características topográficas, seguindo uma abordagem semelhante à proposta por Luo et al. (2023). A seguir, o modelo SIMWE é configurado com base nos dados coletados, incluindo o MDE, as propriedades do solo e os dados de cobertura do solo. Os cenários de intensidade de chuva são definidos com base em dados históricos ou projeções climáticas, conforme sugerido por Li et al. (2020). O modelo é então calibrado e validado utilizando dados observados de escoamento superficial e sedimentos, se disponíveis, seguindo uma abordagem semelhante à descrita por Cucchiaro et al. (2020).

Com o modelo SIMWE configurado e validado, são realizadas simulações para diferentes cenários de chuva, a fim de avaliar o risco de erosão do solo. Os resultados das simulações são utilizados para gerar mapas que representam zonas de risco de erosão com base na dinâmica simulada de escoamento superficial e sedimentos, conforme sugerido por Fernandes et al. (2017). A análise da distribuição espacial dessas zonas de risco é realizada para identificar áreas vulneráveis dentro do aterro. Com base nessas análises, estratégias de mitigação são desenvolvidas, como cobertura vegetal, estruturas de controle de erosão ou planejamento de uso do solo, para mitigar os riscos de erosão, seguindo recomendações semelhantes às propostas por Luo et al. (2023). Finalmente, os resultados são compilados em um relatório abrangente detalhando as descobertas da avaliação do risco de erosão e recomendações de mitigação, para tomada de decisões informadas sobre o manejo da erosão do solo no aterro sanitário.

Para o presente trabalho, foi utilizado um evento de chuva de 60 minutos de duração calculado pela Instrução Técnica de Drenagem da PBH extrapolada para a região metropolitana. Este evento resultou em uma lâmina de chuva de 55mm com a seguinte distribuição temporal apresentada na Tabela 5.2. Para a infiltração, foi utilizada uma taxa média de 15% em relação à precipitação, seguindo resultados de Lopes (2011). Com isso, a lâmina de precipitação efetiva foi de 47mm/h.

Tabela 5.2 – Evento de precipitação utilizado para a modelagem

Duração (min)		60
Intensidade (mm/h)		55,08
Pt (mm)		55,08
Δt (min)		6
t (min)	P (mm)	ΔP (mm)
6	8,26	8,26
12	18,17	9,91
18	29,74	11,57
24	37,45	7,71
30	43,51	6,06
36	48,47	4,96
42	52,32	3,86
48	53,97	1,65
54	54,52	0,55
60	55,08	0,55

6 CAPÍTULO 5: ANÁLISE DE RESULTADOS

Os aerolevantamentos realizados no aterro encerrado em setembro foram estrategicamente escolhidos para avaliar o desempenho da rede de drenagem superficial do empreendimento antes do início das chuvas. Essa prática é comum em grandes empreendimentos que possuem sistemas de drenagem extensos, como obras de terraplenagem, mineração e aterros sanitários. A avaliação pré-chuvas visa identificar inconformidades a tempo de serem corrigidas, garantindo que a obra suporte os eventos pluviométricos intensos sem danos estruturais significativos.

A Figura 6.1 apresenta os resultados do processamento fotogramétrico gerados pelos sobrevoos no aterro encerrado. As ortofotos obtiveram uma resolução espacial de 4 cm/pixel, enquanto os Modelos Digitais de Elevação (MDEs) foram exportados com resolução de 25 cm/pixel.

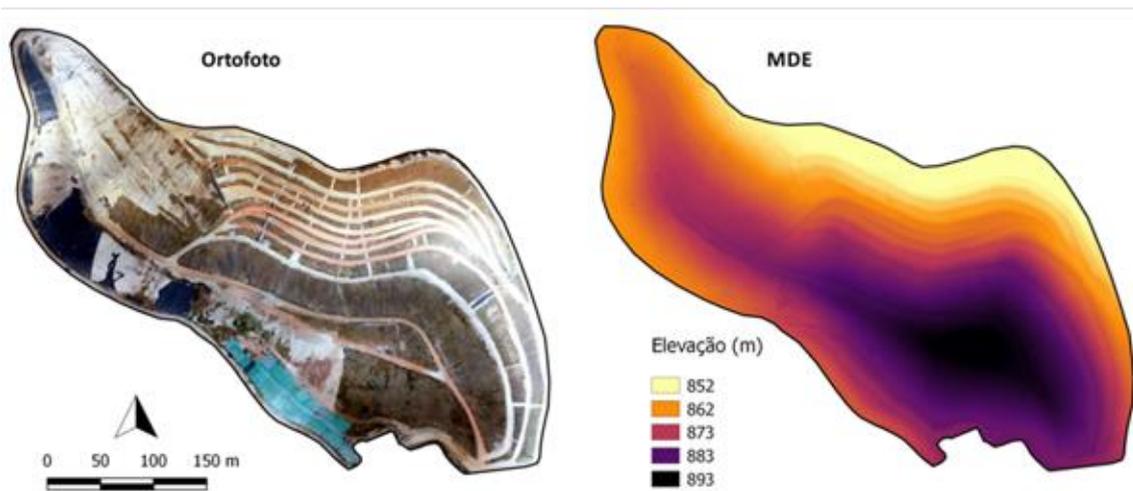


Figura 6 - Ortofoto e MDE gerados para o aterro encerrado.

O MDE de alta resolução fornecido pela aerofotogrametria com VANT permitiu captar detalhes minuciosos da topografia do aterro, possibilitando uma representação geométrica precisa dos dispositivos de drenagem. A ortofoto da área de estudo facilitou validações visuais dos cenários a serem discutidos. Assim, a modelagem de escoamento superficial, subsidiada pelos dados topográficos, foi capaz de simular detalhadamente os cursos preferenciais das águas pluviais dentro do aterro.

Com base nesse comportamento esperado para o sistema de drenagem e nos resultados processados através dos algoritmos de simulação, os tópicos seguintes discutem a avaliação dos dispositivos de drenagem superficial do aterro sanitário encerrado.

6.1 Extração da rede de drenagem

A extração da rede de drenagem para a topografia do aterro sanitário encerrado é apresentada na Figura 6.2. A metodologia de extração aplicando o algoritmo D-infinity de Tarboton (1997) em um modelo de elevação de alta resolução gerado por VANT resultou em uma simulação robusta do direcionamento do escoamento superficial no aterro encerrado, representando detalhadamente as nuances da superfície analisada.

Este resultado estava previsto com base nos trabalhos de Rosa et al. (2018) e Pijl et al. (2019), onde a simulação de fluxos superficiais delineou eficientemente os traçados em áreas com declividade favorável. A técnica apresentou bons resultados, inclusive quando comparada ao levantamento com laser scanner, conforme Leitão et al. (2016). A aplicação desta metodologia na avaliação dos dispositivos de drenagem de um aterro sanitário

encerrado é um diferencial deste estudo, consolidando-a como uma aplicação viável para monitoramentos periódicos em empreendimentos que necessitam de acompanhamento criterioso da drenagem superficial de águas pluviais.

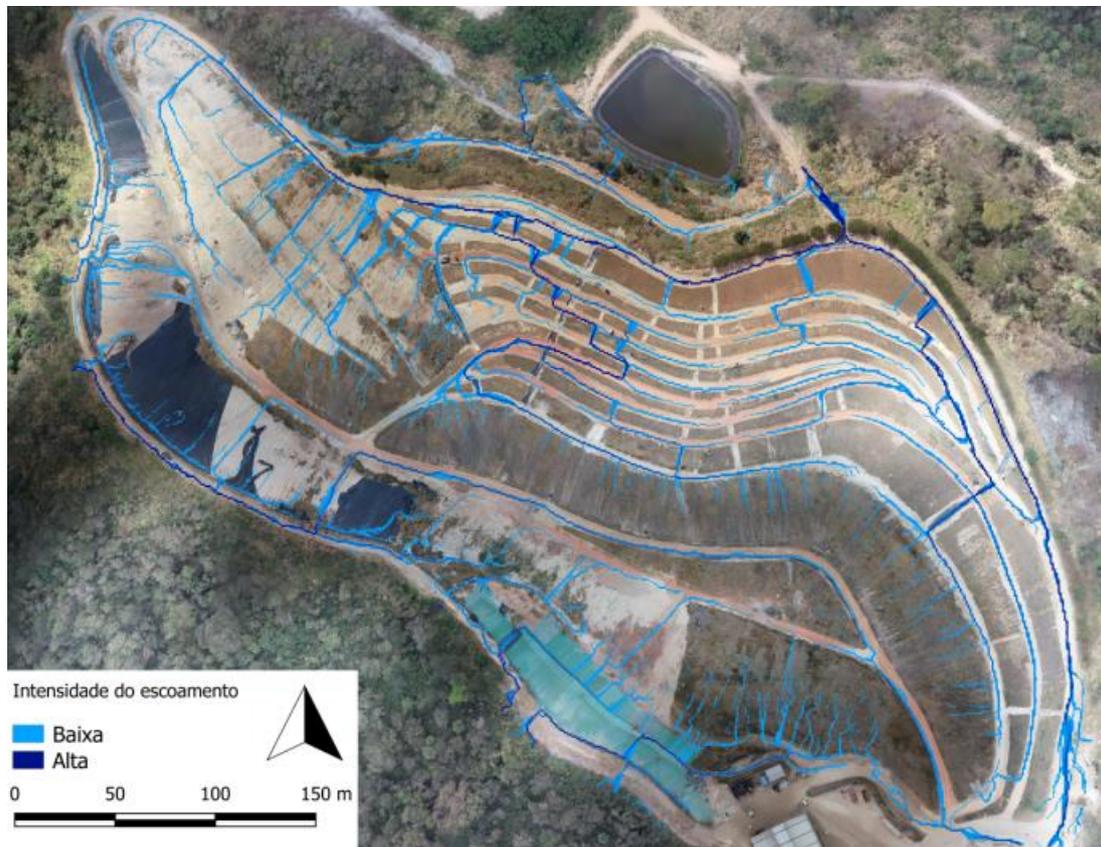


Figura 6.2 - Rede de drenagem elaborada para a área de estudo.

6.2 Simulação do escoamento superficial

Os resultados da simulação de escoamento superficial utilizando o modelo SIMWE são apresentados a seguir. Foram geradas duas imagens geoespacialmente referenciadas: uma representando a vazão (Figura 6.3) e outra a profundidade da lâmina d'água (Figura 6.4). A análise dessas imagens permite visualizar a distribuição e o comportamento do fluxo de água pluvial sobre a superfície do aterro encerrado. Essas informações são fundamentais para identificar áreas críticas e avaliar a eficiência dos dispositivos de drenagem superficial, contribuindo para a implementação de medidas corretivas e preventivas necessárias para a manutenção do sistema de drenagem do empreendimento.

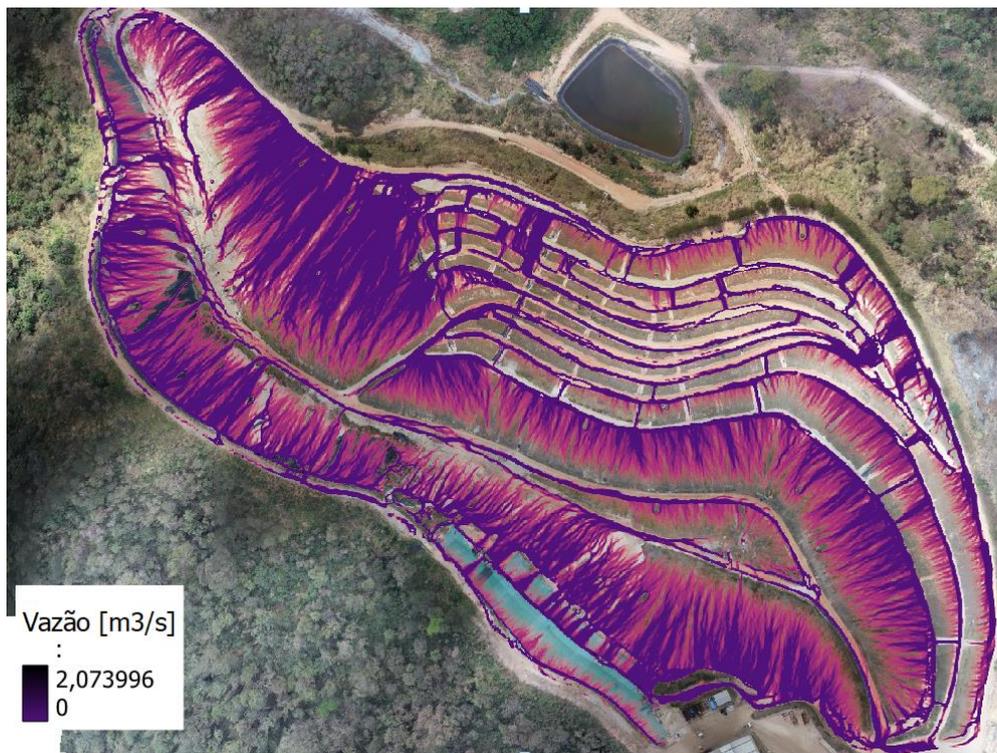


Figura 6.3 – Vazão do escoamento superficial para a área de estudo.

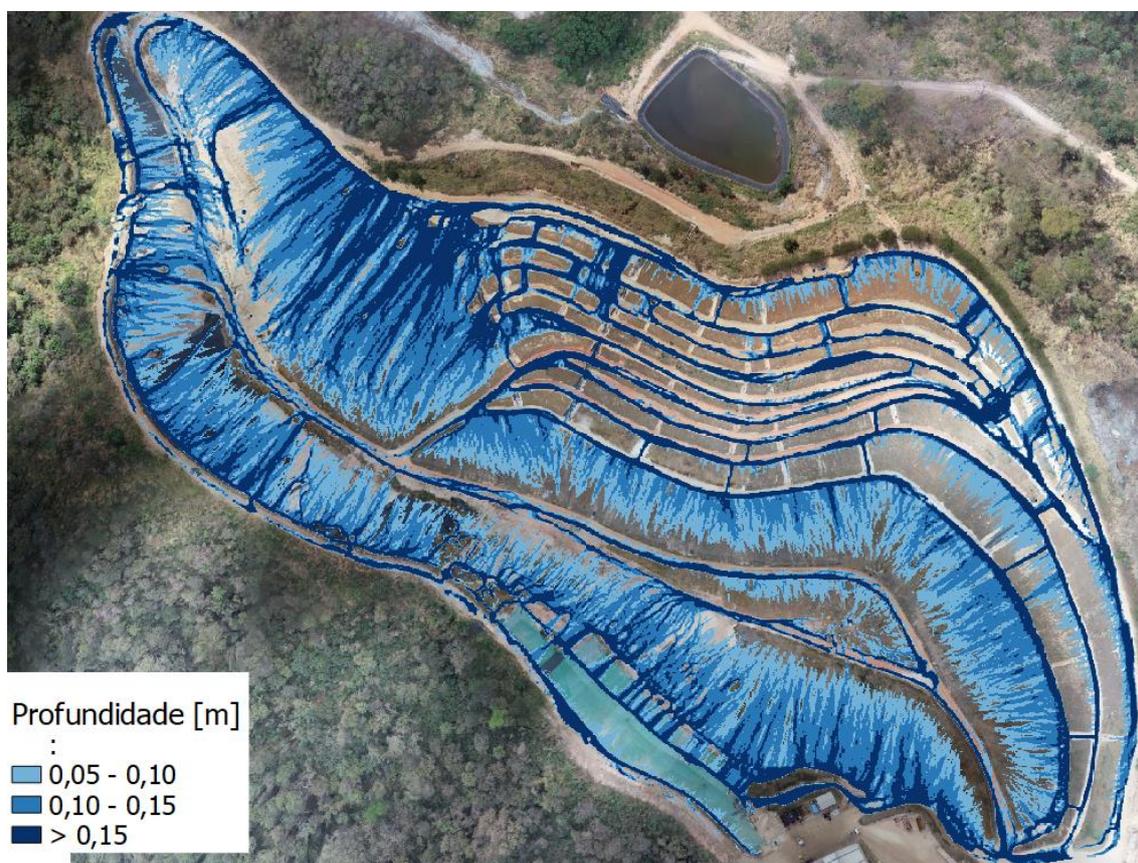


Figura 6.4 – Profundidade do escoamento superficial para a área de estudo.

6.3 Avaliação do Sistema de Drenagem Superficial

A avaliação do sistema de drenagem superficial do aterro sanitário encerrado em Betim, Minas Gerais, revela um cenário complexo que requer atenção constante. O comportamento atual da drenagem indica que, embora os dispositivos projetados estejam em funcionamento, há áreas críticas onde a eficiência do escoamento superficial está comprometida. O mapa de vazão do escoamento superficial (Figura 6.3) indica que a vazão variou de zero até 2 m³/s, uma quantidade considerável, especialmente concentrada nos taludes noroeste e sudoeste do aterro.

Os principais pontos de atenção incluem as áreas onde a vazão e a profundidade do escoamento superficial são mais elevadas. A profundidade do escoamento variou de zero até 50 centímetros, e as maiores lâminas de água coincidem com as maiores vazões. Esses pontos críticos, principalmente nos taludes noroeste e sudoeste, são áreas que demandam intervenções imediatas para evitar a extrapolação dos dispositivos de drenagem previstos. Lâminas de água muito profundas podem causar transbordamentos, resultando em problemas significativos de erosão e potencialmente comprometendo a integridade estrutural do aterro.

Os focos erosivos têm maior potencial de desenvolvimento nas áreas onde a vazão é mais concentrada e a profundidade do escoamento é elevada. Nessas regiões, a água pluvial pode facilmente extravasar os dispositivos de drenagem, causando erosão do solo e danificando as estruturas de contenção. Particularmente, os taludes noroeste e sudoeste estão em risco devido à alta concentração de vazão e profundidade do escoamento. A combinação desses fatores exige monitoramento contínuo e intervenções corretivas para garantir a estabilidade do aterro.

Para manter o sistema de drenagem superficial do aterro em condições operacionais, é essencial estabelecer uma rotina de atividades de manutenção periódica. As atividades recomendadas incluem:

1. **Inspeção Regular dos Dispositivos de Drenagem:** Verificar a condição e o funcionamento dos canais, bueiros, valas e demais estruturas de drenagem para identificar e corrigir quaisquer obstruções ou danos.
2. **Limpeza Periódica:** Remover sedimentos, detritos e vegetação que possam bloquear os

dispositivos de drenagem e comprometer o escoamento eficiente da água pluvial.

3. Monitoramento Topográfico: Realizar levantamentos topográficos regulares para identificar mudanças na conformação do terreno que possam afetar o sistema de drenagem.

4. Reparos e Melhorias Estruturais: Implementar reparos nas áreas danificadas e introduzir melhorias nas estruturas de drenagem onde necessário, para garantir que possam suportar as vazões previstas.

5. Revegetação e Cobertura do Solo: Promover a revegetação das áreas de solo exposto e utilizar materiais geossintéticos para estabilizar os taludes e reduzir a erosão.

6. Simulações Periódicas com SIMWE: Utilizar regularmente o modelo SIMWE para simular o escoamento superficial e identificar potenciais áreas problemáticas antes que se tornem críticos.

Em resumo, a drenagem superficial no aterro sanitário encerrado apresenta desafios significativos, especialmente nas áreas de maior vazão e profundidade de escoamento. A implementação de uma rotina rigorosa de manutenção e monitoramento, utilizando ferramentas avançadas como o SIMWE, é crucial para garantir a eficiência do sistema de drenagem e a estabilidade do aterro a longo prazo.

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os avanços das geotecnologias recentes, como é o caso da aerofotogrametria com VANT, propicia um cenário onde a coleta de informações geoespaciais para reconstrução digital e tridimensional da superfície terrestre seja uma realidade disruptiva. A oportunidade de se mapear áreas de tamanhos variáveis com garantias de alta acurácia posicional e resolução espacial nos resultados abre um leque de aplicações desses dados como informações de entrada para simular cenários de intervenções diversos.

A utilização de VANT para coleta de dados está edificada em duas vantagens principais, que são a elevada produtividade, garantindo rapidez na geração dos resultados e

proporcionando economia de tempo nas tomadas de decisões; e a operação remota, evitando interferências físicas no ambiente monitorado, e garantindo a segurança ao evitar traslados por locais perigosos.

Um contexto avaliado neste trabalho foi a aplicação da extração da rede de drenagem superficial no aterro encerrado, utilizando, para isso, MDEs em alta resolução. Os aterros de resíduos sólidos são caracterizados por apresentarem grandes deformações geométricas ao longo do tempo, fato que acaba por comprometer o desempenho do sistema de drenagem superficial, demandando constantes ações de manutenção. A identificação e análise dessas situações fazem parte importante dos aspectos geotécnicos e ambientais do monitoramento dos aterros, principalmente para obras já encerradas.

Por fim, cabe destacar que as informações trazidas pelos mapeamentos aéreos possuem aplicações que vão além de registros e análises de monitoramento. Os levantamentos periódicos e frequentes realizados em uma região de interesse criam um banco de dados geoespacializado para o gestor da obra acompanhar cronologicamente o desempenho de sua operação.

Dessa maneira, a última recomendação que este trabalho traz é o incentivo ao desenvolvimento de uma aplicação baseada em sistema de informação geográfica, para gerenciar de forma prática o banco de dados de geoinformações trazidas pelos aerolevantamentos, criando uma ferramenta onde fosse possível incluir dados de monitoramento, relatórios, observações; e também planejar tomadas de decisões sobre planejamento de escavação e aterro, de áreas de operação futuras, de locação de infraestrutura e de abertura de vias, tudo isso sendo representado por uma interface gráfica que utilize as ortofotos em alta resolução para representação georreferenciada dos dados.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGISOFT LLC. **Agisoft Photoscan User Manual: Professional Edition**, V 1.3. 2017. 105p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE DRONES. **Checklist pre-voo**. Disponível em: www.associacaobrasileiradrones.org/checklist-pre-voo.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2016**. São Paulo, 2016. 64 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 13896. **Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projeto, implantação e operação**. Rio de Janeiro, 1997a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 8419. **Apresentação de projetos de aterros de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 1992a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10004. **Resíduos sólidos: classificação**. Rio de Janeiro, 2004a.

BATISTA, H. P. **Desenvolvimento de diretrizes para monitoramento geotécnico e plano de contingência/emergência em aterros sanitários**. 147 p. Tese (Mestrado) - Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, DESA, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

BRASIL, G. C. **Monitoramento Ambiental com a Utilização de Veículos Aéreos não Tripulados (VANTs)**. 107p. Tese (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Setor Tecnológico, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

BRASIL, Resolução CONAMA nº404, de 11 de novembro de 2008. **Estabelece critérios e diretrizes para o licenciamento ambiental de aterro sanitário de pequeno porte de resíduos sólidos urbanos**. Diário Oficial da União. 12 nov. 2008

BRASIL. Decreto Lei nº 89.917 de 20 de junho de 1984. **Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional**. Diário Oficial da União. 20 jun. 1984.

BRASIL. Lei nº 11.445/2007. **Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências**. Diário Oficial da União. 05 jan. 2007.

BRASIL. Lei nº 12.305/ 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da União. 03 ago. 2010a.

BRITO, J. L. N. e S.; COELHO FILHO, L. C. T. **Fotogrametria Digital**. Rio de Janeiro: EdUERJ, 2007. 196p.

CÂMARA, G.; ORTIZ, M.J. **Sistemas de Informação Geográfica para Aplicações Ambientais e Cadastrais: Uma Visão Geral**. In: Souza E SILVA, M., "Cartografia, Sensoriamento e Geoprocessamento", cap. 2, pp.59-88. Lavras, UFLA/SBEA, 1998.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Manual de Operação de aterro sanitário em valas**. São Paulo, 2010. 24p.

CONSELHO REGIONAL DE ENGENHARIA E AGRONOMIA DO PARANÁ (CREA/PR). **Guia para Elaboração de Projetos de Aterros Sanitários para Resíduos Sólidos Urbanos, volume III.** 64 p., 2009.

DJI: Phantom 4 Pro User Manual V1.0. Disponível em: <https://www.dji.com/phantom-4-pro>.

EISENBEISS, H. **The Potential of Unmanned Aerial Vehicles for Mapping.** In: Photogrammetric Week '11, Wichmann/VDE Verlag, Berlin & Offenbach, 2011. 11 p.

EISENBEISS, H. **UAV photogrammetry.** Dissertation (Doctor of Sciences) - Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH Zurich, Switzerland, Mitteilungen, 2009.

EVERAERTS, J. **The Use of Unmanned Aerial Vehicles (UAVS) for Remote Sensing and Mapping.** In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, ISPRS Congress, Beijing, China, XXXVII. Part B1, 1187-1192, 2008.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Inventário Estadual de Resíduos Industriais de 2016.** Belo Horizonte, 2016. 52p.

FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE (FEAM). **Orientações básicas para a operação de aterro sanitário.** Belo Horizonte, 2006. 36p.

GASPERINI, D., ALLEMAND, P., DELACOURT, C.; GRANDJEAN, P. **Potential and limitation of UAV for monitoring subsidence in municipal landfills.** In: *Int. J. Environmental Technology and Management*, Vol. 17, No. 1, 2014, pp.1–13.

GUERRA, Antônio J. T. *et al.* **Geomorfologia ambiental.** Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2006. 192 p.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (INPE). Satélites e sistemas Sensores. 2011. Disponível em: www.dsr.inpe.br/vcsr/files/satelite_sistema_sensores.pdf.

LANGE, L. C.; SIMÕES, G. F.; FERREIRA, C. F. A. **Capítulo 5 – Aterro Sustentável: Um Estudo para a Cidade de Catas Altas MG.** In: Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte. Armando Borges de Castilhos Junior (coord.). Rio de Janeiro: ABES, RiMa, 2003. Projeto PROSAB. 294p.

LOZYNSKYI, V.; NIKULISHYN, V.; ILKIV, T. **Technological features of creation of a large-scale topographical plan of Lviv city landfill using combined method.** Lviv Polytechnic National University, ISTCGCAP, 2016, p. 65-75.

LUHMANN, T., ROBSON, S., KYLE, S. & HARLEY, I. **Close Range Photogrammetry - Principles, Methods and Applications.** Whittles Publishing, 2006. 510p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos; Instrumento de Responsabilidade Socioambiental na Administração Pública**. Brasília, 2014. 64p.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). Programa Nacional de Capacitação de Gestores Ambientais. **Módulo Específico – Licenciamento Ambiental de Estações de Tratamento de Esgoto e Aterros Sanitários**. Brasília, 2009. 68p.

MONICO, J. F. G.; DAL PÓZ, A. P.; GALO, M.; SANTOS, M. C.; OLIVEIRA, L. C. **Acurácia e Precisão: Revendo os conceitos de forma acurada**. In: BOLETIM DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS, v.15, num 3, p. 469-483. Curitiba, 2009.

NAKANO, T.; KAMIYA, I.; TOBITA, M.; IWAHASHI, J.; NAKAJIMA, H. **Landform Monitoring in active volcano by UAV and SDM-MVS technique**. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, vol. XL-8, 2014, p. 71-75.

NETO, M. S. **GSD, o que é isso**. Blog Droneng, 2016. Disponível em: blog.droneng.com.br/gsd.

NETO, M. S.; ARIAS, A.; CAMPITELLI, M. **Drones e Produtividade: Asa fixa X Multirotor**. Blog Droneng, 2016.

REDE DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL (RECESA). **Resíduos sólidos: projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários**. Guia do profissional em treinamento: nível 2. Ministério das Cidades. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (org.). – Belo Horizonte, 2008. 120 p.

ROSA, R. **Introdução ao Geoprocessamento**. Instituto de Geografia – Laboratório de Geoprocessamento. Universidade Federal de Uberlândia – UFU, 2013. 142 p.

SECRETARIA DO ESTADO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS HÍDRICOS DE ALAGOAS (SEMARH – AL). **Aterro de Resíduos Perigosos**. Alagoas, 2017.

SILVA, C. A. **Avaliação da Acurácia dos Ortomosaicos e Modelos Digitais do Terreno Gerados por Vant e sua Aplicação no Cálculo de Volume de Pilhas de Rejeito da Pedra Cariri**. 148p. Tese (Mestrado). Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

SILVA, D. C. **Evolução da Fotogrametria no Brasil**. In: Revista Brasileira de Geomática, v.3, n.2, p.08-96. Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR, 2015.

SILVA, D. C.; TOONSTRA, G. W. A.; SOUZA, H. L. S.; PEREIRA, T. A J. **Qualidade de ortomosaicos de imagens de VANT processados com os softwares APS, PIX4D e Photoscan**. In: V SIMPÓSIO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS GEODÉSICAS E TECNOLOGIAS DA GEOINFORMAÇÃO, 5. 2014, Recife. UFPE, 2014. p. 747-54.

TOMMASELLI, A. M. G. **Fotogrametria Básica – Introdução**. Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, 2009.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA-USA).
Criteria for Solid Waste Disposal Facilities – A guide for Owners/Operators. Estados Unidos, 1993. 22p.