



Limites e possibilidades de aplicações de modelos digitais de elevação gerados a partir de produtos obtidos por sensores remotos nos cálculos de volumes de terraplenagem

Cristiano Brilhante de Souza

Auditor Federal de Controle Externo no TCU, mestre em Direito Constitucional pelo Instituto Brasileiro de Direito Público - IDP (2016-2018), especialista em Auditoria de Obras Públicas Rodoviárias pela Universidade de Brasília (2016-2018). Graduado em Engenharia Cartográfica pela Universidade Federal do Paraná - UFPR (1998) e em Direito pelo Centro Universitário do Distrito Federal (2006). Atuou como Engenheiro Militar do Exército Brasileiro no período de 1999 a 2008.

RESUMO

Constitui objeto do presente artigo o estudo de métodos alternativos e viáveis para a medição de volumes topográficos que possam ser empregados nas fiscalizações de obras rodoviárias, em especial, na fase de terraplenagem. De forma geral, os projetos de terraplenagem se utilizam dos levantamentos topográficos clássicos para a obtenção dos volumes de terra que serão escavados ou aterrados. Em razão desta fase demandar grande parte do orçamento de uma obra rodoviária, torna-se relevante o seu controle. E toda vez que recursos federais são empregados na realização de tais obras, compete ao Tribunal de Contas da União (TCU) a fiscalização desses empreendimentos. No entanto, para bem desempenhar o controle externo, é desejável que as fiscalizações levadas a efeito pelo TCU nessas obras possam prescindir dos dados primitivos gerados pelos responsáveis pelo projeto e pela execução. Para tanto, é preciso saber se o atual estado da arte oferece métodos alternativos que atendam as precisões requeridas nos seguintes momentos da terraplenagem: o anteprojeto, o projeto e a execução. É dentro desse contexto que as ferramentas que podem ser oferecidas por meio de sensores remotos ganham relevância já que tornam possível agregar às fiscalizações de obras rodoviárias, novas metodologias de controle que se utilizem das informações provenientes de imagens obtidas por satélites, aeronaves tripuladas (aerofotogrametria) ou por meio de veículos aéreos não tripulados (VANT). Com isso o artigo busca identificar os limites e as possibilidades de emprego dos modelos digitais de elevação obtidos por meio de sensores remotos no cálculo de volumes das superfícies topográficas que serão impactadas pela implantação de uma rodovia.

Palavras-chave: Terraplenagem. Volumes Topográficos. Modelagem Digital do Terreno. Sensores Remotos. Veículo aéreo não tripulado.



1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um país continental, que escolheu o modal rodoviário como seu principal sistema de transportes. Segundo informações extraídas do Sistema Nacional de Viação – SNV (2018), o Brasil possui uma malha rodoviária contendo cerca de 1,7 milhão de quilômetros, sendo destes, 211 mil quilômetros de rodovias pavimentadas, 1,3 milhão de quilômetros de rodovias não pavimentadas e 157 mil quilômetros de rodovias planejadas. Considerando apenas a malha sob a jurisdição federal (União), são 65,5 mil quilômetros de rodovias pavimentadas, 10,7 mil quilômetros de rodovias não pavimentadas e 44,3 mil quilômetros de rodovias planejadas.

Diante de tamanho desafio, é inevitável para o Estado atuar, de alguma maneira, para prover e manter a referida infraestrutura. Nesse sentido, uma das formas de atuação estatal se dá por meio da realização de obras para construir ou reformar a malha rodoviária, utilizando para tanto, vultosos volumes de recursos públicos.

Nesse contexto se insere a atividade de fiscalização realizada pelo Tribunal de Contas da União - TCU, no âmbito de suas competências constitucionais previstas nos incisos do art. 71 da CF/1988, em especial quando recursos federais forem utilizados nas diversas obras que se fazem necessárias. No desempenho de sua missão institucional, no sentido de “Aprimorar a Administração Pública em benefício da sociedade por meio do controle externo”¹, cabe ao TCU a fiscalização de obras públicas financiadas com recursos públicos da União. Assim, considerando a importância do transporte rodoviário para o desenvolvimento do Brasil e, sobretudo, os investimentos federais que são feitos nessa matriz de transporte, é necessário que o TCU possua condições estruturais, técnicas e humanas que permitam à Corte de Contas contribuir de maneira efetiva para que a atuação do Estado, na tarefa de prover e manter a malha rodoviária, seja a mais eficiente possível.

Nessa senda, entre outras atribuições, cabe ao TCU coibir a ocorrência de fraudes e desvios de recursos públicos. Para tanto, o Tribunal deve conhecer o negócio a ser fiscalizado e, sempre que possível, valer-se de metodologias independentes que permitam à Corte avaliar se as ações do Estado são as mais adequadas. Por tal razão, o TCU necessita contar com recursos humanos capacitados e metodologias bem definidas, aceitáveis e consagradas, para analisar as diversas etapas que compreendem as obras rodoviárias.

Isso porque, em algumas dessas etapas, o risco de fraudes e desvios de recursos públicos é muito alto. Um bom exemplo para o risco apontado será objeto do presente artigo e se vislumbra nos movimentos de terra projetados para determinada obra rodoviária bem como nos volumes deles decorrentes, efetivamente medidos por ocasião da execução dos trabalhos. Nesses casos, é oportuno e importante para o órgão de fiscalização, poder contar com ferramentas de controle próprias que permitam, dentro de precisões aceitáveis, aferir a adequação da movimentação de terra projetada para a obra, por meio de cortes e aterros, além de atestar, com alguma segurança, se determinado volume medido pelo construtor e efetivamente pago pelo órgão público responsável pela obra condiz de fato com a realidade

1 Referencial Estratégico do Tribunal de Contas da União, 2015 – 2021. Disponível em: < <http://portal.tcu.gov.br/planejamento-e-gestao/referencial-estrategico/>>. Acesso em 8/12/2017.



dos trabalhos executados. Nesse contexto fático se inserem as ferramentas oferecidas pelo sensoriamento remoto que podem, em alguma medida, auxiliar na verificação que caberá ao TCU realizar no exercício de suas competências constitucionais.

A etapa construtiva de terraplenagem é uma atividade de fundamental importância na construção de obras de engenharia por representar o preparo do terreno para que possa ser materializado o projeto de um empreendimento, seja uma edificação, uma obra de arte especial ou uma obra rodoviária.

Nesse escopo, vale repisar que as obras de infraestrutura rodoviária demandam investimentos financeiros consideráveis. Segundo Pedrozo (2001), sob o ponto de vista econômico, os serviços de terraplenagem representam, em média, 19% no custo total de uma obra de implantação (construção) rodoviária, representando o segundo maior serviço no orçamento global em uma obra rodoviária. Daí a importância de se buscar alternativas de controle que permitam ao TCU aprimorar seus métodos de fiscalização com vistas a exercer sua função constitucional de zelar pelos recursos públicos.

É dentro desse contexto que as ferramentas de controle que podem ser oferecidas pelo sensoriamento remoto ganham relevância, na medida em que, é possível agregar às fiscalizações de obras rodoviárias, novas metodologias de controle fazendo uso das informações oriundas de imagens de satélites ou obtidas por meio de veículos aéreos não tripulados – VANT².

A intenção do artigo é, portanto, identificar, no atual estágio do desenvolvimento tecnológico, as possibilidades de geração de modelos digitais do terreno, por meio das ferramentas oferecidas pelo sensoriamento remoto, com objetivo de extrair informações de volume das superfícies topográficas que serão impactadas pela implantação de uma rodovia, permitindo, dessa forma, comparar esses volumes com os calculados pelos métodos tradicionais (medição direta por meio de instrumentos de topografia). É investigar o estado da arte no que diz respeito a modelagem digital do terreno com vistas a aferir seu grau de aplicação no cálculo de volumes de superfícies topográficas. Com isso, pretende-se, ao final, verificar em que medida essas ferramentas podem ser utilizadas pelo Tribunal de Contas da União nas fiscalizações de obras rodoviárias, em especial, nos serviços contidos na terraplenagem. Para guiar a leitura do presente artigo, foi formulada a seguinte questão que ao final a pesquisa pretende responder:

Considerando as precisões alcançáveis, os resultados obtidos no cálculo de volumes topográficos por meio da utilização de informações obtidas por sensores remotos, em comparação com os levantamentos clássicos tais como o topográfico, possibilitam alguma utilização prática nas fiscalizações de obras rodoviárias que tenham por objeto os movimentos de terra?

No caminho de responder à questão, a estruturação dos dados coletados por meio das pesquisas bibliográficas realizadas está organizada em quatro seções. A primeira, contém breve explanação acerca dos principais elementos de terraplenagem, abordando as principais

2 VANT - gênero que comporta os conhecidos “drones”.



características técnicas exigidas nos projetos de terraplenagem, tais como os métodos de obtenção das seções transversais que servirão ao cálculo dos cortes e aterros necessários à implantação da rodovia. Também são mencionadas as normas do DNIT que tratam da execução dos serviços de corte e aterro com as respectivas precisões requeridas no controle geométrico realizado. Na segunda, apresentam-se os principais conceitos necessários para compreender a modelagem digital do terreno. A terceira seção aborda as principais técnicas que permitem a obtenção de volumes considerando sensores remotos diferentes, a exemplo das imagens de satélites e das imagens obtidas por meio de fotogrametria com aeronaves tripuladas. A quarta seção apresenta estudos empíricos que avaliam o uso da fotogrametria com veículos aéreos não tripulados (Vants). Nesses estudos, os pesquisadores apresentam o grau de precisão que é possível alcançar utilizando tais equipamentos em levantamentos topográficos, avaliando, inclusive, a possibilidade da obtenção de volumes do terreno por meio dessa técnica.

Vale mencionar que este artigo, em razão das limitações inerentes, não tem a pretensão de firmar regras ou sugerir “o melhor procedimento”. A ideia principal é oferecer uma revisão bibliográfica das técnicas mencionadas cotejando os limites e as possibilidades de cada uma no que tange ao cálculo de volumes topográficos.

2. OBRAS RODOVIÁRIAS: ELEMENTOS DE TERRAPLENAGEM

2.1 INTRODUÇÃO

A decisão política de implantar novas rodovias demanda do poder público, escolhas técnicas que tornem a obra rodoviária útil e eficiente, considerando o menor custo possível. Nesse caminho está a escolha de um traçado racional, que será função, entre outros fatores, da topografia da região e das condições geológicas e geotécnicas do terreno.

Nessa senda, não é difícil perceber que regiões topograficamente acidentadas, geralmente acarretam grandes movimentos de terra, elevando substancialmente os custos de construção. Da mesma forma, as condições geológicas e geotécnicas podem inviabilizar determinada diretriz de uma estrada, já que, na maioria dos casos, são grandes os custos necessários para estabilização de cortes e aterros a serem executados em terrenos com características internas desfavoráveis (cortes em rocha, aterros sobre solos moles, etc.). De todo modo, independentemente das escolhas técnicas que se façam, toda a obra rodoviária demandará, em alguma medida para sua implantação, serviços de terraplenagem.

Segundo o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT (2017, p. 3), define-se terraplenagem como o “conjunto de operações necessárias à escavação e movimentação de solos e rochas, removendo-se o excesso de material de uma região para outra em função de sua escassez”. No contexto de obras rodoviárias, a terraplenagem tem por objetivo a conformação do relevo terrestre para implantação das rodovias, dando à superfície do terreno a forma projetada para a construção.

2.2 PLANTA BAIXA

A planta baixa de uma rodovia é a representação em projeção horizontal dos elementos do terreno e projeto. Segundo Ratton, E. *et al.* (2015, p. 5), a planta baixa constitui-se de uma vista “de cima” da faixa projetada, nela se apresentando, de maneira geral: (i) eixo de projeto, estaqueado convenientemente; (ii) os bordos da plataforma de terraplenagem; (iii) as projeções dos taludes de corte e aterro e a linha de encontro destes com o terreno natural -“off-set”; (iv) os cursos d’água; (v) os bueiros e as obras de arte especiais (pontes, viadutos, muros de arrimo, etc.); (vi) as interseções; (vii) as construções existentes; e (viii) os limites da faixa de domínio. Aqui, o terreno é representado pelas curvas de nível, conforme se observa na representação dada pela figura 1 a seguir:

Figura 1 – Planta referente a Projeto Geométrico



Fonte: Planus Topografia e Projetos.³

Ensina Garcia D. S. P (2016, p. 6) que o projeto planimétrico é constituído pelos seguintes elementos:

- a. **Eixo:** é o alinhamento longitudinal da rodovia, localizando-se, geralmente, na parte central da plataforma;
- b. **Estacas:** definem e materializam o eixo, crescendo a partir da origem de 20 em 20 metros;
- c. **Alinhamento reto (reta):** localizado entre as curvas horizontais, é o trecho retilíneo que compõe uma rodovia;
- d. **Curva de concordância horizontal:** é o arco ou sequência de arcos que concordam geometricamente dois alinhamentos retos sucessivos. A referida curva é caracterizada pelo raio de curvatura.

2.3 PERFIL LONGITUDINAL

O Perfil longitudinal pode ser caracterizado pela representação gráfica de um corte vertical no corpo estradal, através de uma superfície perpendicular e coincidente com o eixo da rodovia. Segundo Garcia D. S. P. (2016, p. 7), compõem o perfil longitudinal de uma estrada:

- a. **Linha do terreno natural:** representa a variação do terreno através da interseção deste com a superfície vertical que determina o perfil;

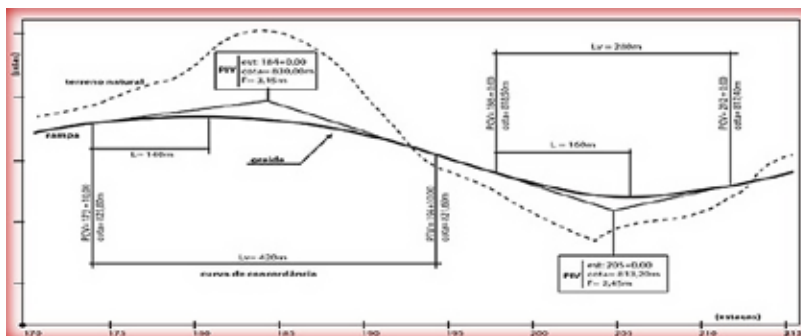
³ Disponível em: < <http://planus.eng.br/projetos/projeto-geometrico/>>. Acesso em 17/1/2018.



- b. Linha de projeto ou greide:** é uma linha em perfil longitudinal precisamente posicionada em relação ao terreno natural. Vale mencionar que o posicionamento desta linha em relação a linha do terreno natural indica a ocorrência de cortes e aterros;
- c. Declividade:** é a taxa de acréscimo ou decréscimo altimétrico do greide. É oportuno mencionar que a declividade pode se apresentar em forma de aclave (ou rampa), declive (contra rampa) ou em nível (nula). O primeiro caso ocorre quando, a partir da origem do estaqueamento, observa-se trecho ascendente com declividade constante. O segundo caso se dá quando, a partir do estaqueamento, depara-se com trecho descendente e declividade constante. Por fim, o último caso ocorre quando declividade está em nível (igual a zero);
- d. Curva de concordância vertical:** é a curva que concorda geometricamente duas rampas sucessivas, utilizando-se, normalmente para sua representação matemática, da parábola de 2º grau.

A figura 2, a seguir, apresenta um esquema exemplificativo de um perfil longitudinal.

Figura 2 – Perfil longitudinal de trecho de obra rodoviária



Fonte: Instituto IDD.⁴

2.4 SEÇÕES TRANSVERSAIS

As seções transversais são obtidas a partir da intercessão da superfície do terreno natural com diversos planos verticais, normais e transversais ao eixo da rodovia, posicionados sobre o estaqueamento (20 em 20 metros em geral) e sobre estacas específicas (Garcia D. S. P., 2016, p. 8). Colocando de outra maneira, as seções transversais correspondem a cortes efetuados no terreno, ortogonalmente ao eixo de projeto, nos pontos referidos no estaqueamento. Tais seções, em um projeto rodoviário, são constituídas por duas linhas: (i) uma que representa o perfil transversal do terreno natural e, (ii) outra que representa o perfil transversal do projeto, ou gabarito.

Na figura 3 a seguir, que apresenta as seções transversais típicas, a linha pontilhada representa o perfil transversal do terreno e a linha contínua representa o perfil transversal do projeto.

4 Disponível em: <<http://www.idd.edu.br/curso/pos-graduacao-e-mba/pavimentacao-rodoviaria>>. Acesso em 22/1/2018.

Figura 3 – Configurações típicas de seções transversais

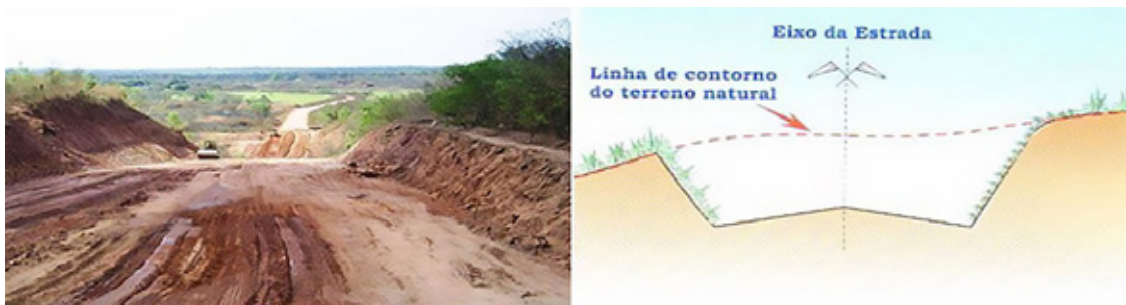


Fonte: LEE, 2013.

2.5 CORTES

A Norma DNIT 106/2009⁵ define cortes como sendo segmentos de rodovia, em que a implantação requer a escavação do terreno natural, ao longo do eixo e no interior dos limites das seções do projeto (“Off sets”) que definem o corpo estradal, o qual corresponde à faixa terraplenada. A figura 4 ilustra uma seção de corte:

Figura 4 – Trecho de obra rodoviária: Seção de Corte



Fonte: Universidade Federal Fluminense (adaptado)⁶

Consoante preconiza a Norma DNIT 106/2009, na etapa que envolve os cortes projetados, há de ser feito o controle geométrico da execução dos serviços, por meio de levantamento topográfico com gabarito apropriado e considerando os elementos geométricos estabelecidos nas “Notas de Serviço”, com as quais deve ser feito o acompanhamento da execução dos serviços. Segundo a referida norma, por meio do nivelamento do eixo e das bordas e de medidas da largura, deve ser verificado se foi alcançada a conformação da seção transversal do projeto de engenharia, admitidas as seguintes tolerâncias:

5 NORMA DNIT 106/2009 – ES: Terraplenagem – Cortes – Especificação de serviço: Define a sistemática a ser empregada na execução dos cortes e no transporte de materiais escavados para implantação de rodovia.

6 Disponível em: <<http://uff-desprojcivil.blogspot.com.br/2009/10/projeto-em-secao-transversal-pista.html>>. Acesso em 21/1/2018.



- a. variação de altura máxima, para eixo e bordas:
 - Cortes em solo: $\pm 0,05$ m;
 - Cortes em rocha: $\pm 0,10$ m.
- b. variação máxima de largura de + 0,20 m para cada semi-plataforma, não se admitindo variação negativa.

2.6 ATERROS

A Norma DNIT 108/2009⁷ define os aterros como segmentos de rodovia cuja implantação requer depósito de materiais provenientes de cortes e/ou de empréstimos no interior dos limites das seções de projeto (“Off sets”) que definem o corpo estradal, o qual corresponde à faixa terraplenada. A figura 5 ilustra uma seção em aterro:

Figura 5 – Trecho de obra rodoviária: Seção em aterro



Fonte: Universidade Federal Fluminense (adaptado).⁸

Consoante preconiza a Norma DNIT 108/2009, na etapa que envolve os aterros projetados, há de ser feito o controle geométrico da execução dos serviços por meio de levantamento topográfico com gabarito apropriado e considerando os elementos geométricos estabelecidos nas “Notas de Serviço”, com os quais deve ser feito o acompanhamento da execução dos serviços. Nos termos da norma mencionada, por meio da verificação do alinhamento, do nivelamento do eixo e das bordas e de medidas de largura deve ser verificado se foi alcançada a conformação da seção transversal do projeto de engenharia, admitidas as seguintes tolerâncias:

- a. variação máxima da altura máxima de $\pm 0,04$ m, para o eixo e bordas;
- b. variação máxima da largura de + 0,30 m, para a plataforma, não sendo admitida variação negativa.

7 NORMA DNIT 108/2009 – ES: Terraplenagem – Aterros – Especificação de serviço: Define a sistemática a ser empregada na execução de aterros como parte integrante da plataforma da rodovia.

8 Disponível em: <<http://uff-desprojcivil.blogspot.com.br/2009/10/projeto-em-secao-transversal-pista.html>>. Acesso em 21/1/2018.



2.7 FASES DO PROJETO DE TERRAPLENAGEM: ANTEPROJETO E PROJETO

2.7.1 ANTEPROJETO DE TERRAPLENAGEM

Segundo Ratton, E. *et al.* (2015, p. 49), a fase de Anteprojeto de um “Projeto Final de Engenharia Rodoviária” objetiva o estudo de alternativas de traçado para definição de uma única diretriz a ser levada à Fase de Projeto. Portanto, todos os trabalhos desenvolvidos visam a obtenção de dados para um comparativo técnico-econômico ao final desta fase. Nesse contexto, vale dizer que, como se trata de uma fase de definição de traçado, não se dispõe de dados de grande precisão, já que os elementos obtidos oferecem uma gama muito grande de informações, porém, em escalas reduzidas.

Para o Anteprojeto de Terraplenagem, conta-se com subsídios retirados do Anteprojeto Geométrico e das investigações geotécnicas desenvolvidas em cada alternativa. Observa-se que o Anteprojeto Geométrico é elaborado, comumente, sobre plantas topográficas em escala 1:5.000, estas obtidas por processo aerofotogramétrico ou por processo topográfico convencional. No entanto, os Estudos Geotécnicos investigam a natureza dos cortes e subleitos por meio de sondagens com coleta de amostras para ensaios de laboratório, com espaçamento da ordem de 1.000 m, contendo, no mínimo, um furo por corte (Ratton, E. *et al.*, 2015).

Com base nesses subsídios, o Anteprojeto de Terraplenagem, busca determinar, com as aproximações possíveis, os serviços e as conseqüentes quantidades, com vistas à definição dos custos envolvidos, para cada uma das alternativas eventualmente apresentadas.

Importa mencionar que, para fins do artigo em epígrafe, que tem entre seus objetivos identificar métodos alternativos aos procedimentos convencionais utilizados na elaboração do anteprojeto de terraplenagem, em especial, no que tange ao cálculo de volumes, não serão feitas comparações abarcando os Estudos Geotécnicos por meio dos quais se investiga a natureza dos cortes e aterros. Assim, para fins desta pesquisa, a referência para a precisão dos volumes topográficos nos anteprojetos deve ser **compatível com as limitações de informação contidas nas cartas topográficas na escala 1:5.000.**

2.7.2 PROJETO DE TERRAPLENAGEM

Já a fase de um “Projeto Final de Engenharia Rodoviária” tem por objetivo a determinação de todos os elementos necessários à construção, bem como para a elaboração de editais e propostas de empresas construtoras para execução dos serviços (Ratton, E. *et al.*, 2015).

Desta forma, os dados para cada item de projeto devem ser os mais precisos possíveis. Para o caso específico do Projeto de Terraplenagem, os dados obtidos do Projeto Geométrico são provenientes de levantamentos convencionais de campo, com aparelhagem de precisão, do qual decorrem plantas contendo as seguintes representações:



- a. elementos horizontais do perfil longitudinal em escala 1:2.000;
- b. elementos verticais do perfil longitudinal e as seções transversais (de 20 em 20 metros) em escala 1:200.

Do exposto, vale mencionar que o Projeto de Terraplenagem terá sua precisão compatível com a precisão dos referidos itens de projeto, e não poderá deixar dúvidas acerca dos problemas e das soluções construtivas (Ratton, E. *et al.*, 2015).

3. MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO: CONCEITOS BÁSICOS

A origem do termo Modelo Digital de Terreno (MDT) é creditada aos trabalhos realizados pelo Prof. Charles L. Miller, do *Massachusetts Institut of Technology* (MIT) entre 1955 e 1960. Segundo Matos (2005), o Prof. Miller estava realizando pesquisas para o Departamento de Obras Públicas do *Massachusetts (Massachussets Department of Public Works)* e para a Agência Federal de Rodovias Públicas (*U.S. Bureau of Public Roads*), com o objetivo de elaborar projetos de rodovias através do uso do computador utilizando dados do terreno adquiridos por meio de fotogrametria. Na ocasião, vários programas computacionais foram preparados para processar os dados com vistas a gerar a linha central do perfil da estrada e as curvas de nível, determinar as regiões de corte e de aterro e obter áreas de seções transversais e os diagramas de distâncias para transporte de terra e cálculo de volumes nas operações de corte e aterro. Foram desenvolvidos, ainda, programas para determinar o perfil ótimo da rodovia baseado numa malha, nos limites da estrada e suas curvas, e para calcular a quantidade de terra a ser deslocada, bem como as distâncias de transporte de uma forma otimizada para diminuir custos e tempo (Matos, 2005, p. 37).

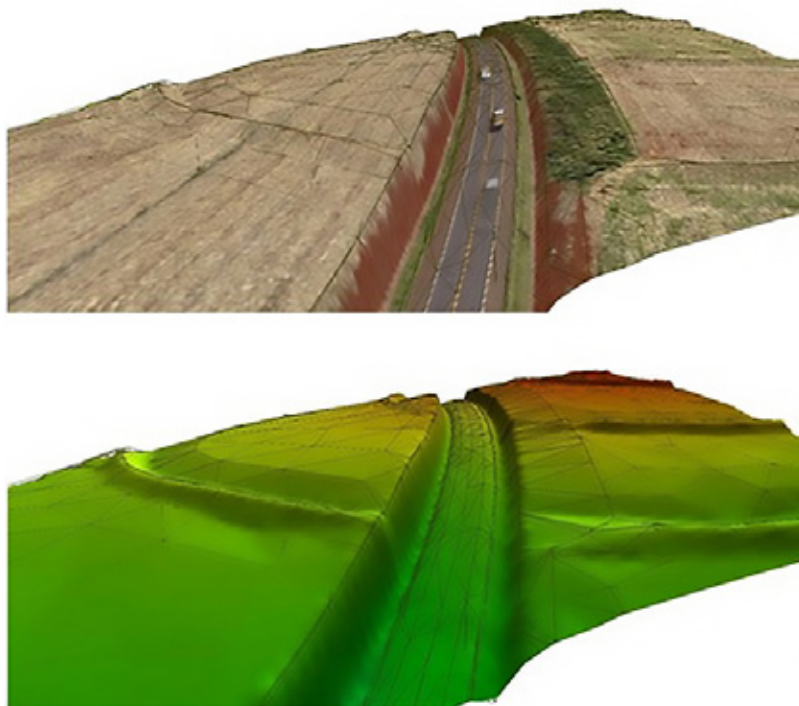
Petrie & Kennie (1990) ensinam que o termo Modelo Digital do Terreno (MDT) apareceu pela primeira vez no artigo “The digital terrain model – theory and applications, publicado na revista *Photogrammetric Eng.* n.3, V.24, pp. 433-442, 1958, dos autores Charles Miller e R. A. LaFlamme, ambos do Instituto de Tecnologia de Massachusetts. No referido artigo, os autores assim definiram o MDT:

“The digital terrain model (DTM) is simply a statistical representation of the continuous surface of the ground by a large number of selected points with known X, Y, Z coordinates in an arbitrary coordinate field”
(O modelo digital do terreno (MDT) é simplesmente uma representação estatística da superfície contínua do terreno por um grande número de pontos selecionados com conhecimento das coordenadas X, Y, Z em um sistema de coordenadas arbitrário).

Alguns autores (Andrade, 1998) preferem usar o termo Modelo Digital de Elevação (MDE) para designar apenas a elevação da superfície e o termo MDT significando um modelo mais completo do terreno, incluindo outras feições, tais como: casas, prédios, vegetação, árvores etc.

Brito, Prado e Augusto (1999) definem Modelo Digital de Superfícies (MDS) qualquer representação numérica para uma determinada superfície física do terreno (relevo, por exemplo) a ser representada. Desse modo, para os referidos autores, um MDS pode expressar vários tipos de atributos tais como temperatura, pressão e declividade, e também altitude. Assim, quando, um MDS exprime altitudes, chama-se Modelo Numérico de Elevações (MNE) ou Modelo Digital de Elevações (MDE ou DEM, Digital Elevation Model). A figura 6 ilustra, respectivamente, um MDT e um MDE.

Figura 6 – Modelo Digital do Terreno e Modelo Digital de Elevação



Fonte: NewGeo Mapeamento Digital.⁹

A despeito da variação das nomenclaturas que tratam da modelagem digital do terreno, importa mencionar que, para fins desta pesquisa, será utilizado o conceito de Modelo Digital de Elevações - MDE, já que o objetivo é identificar as precisões alcançáveis no cálculo de volumes topográficos referentes ao relevo natural que será objeto de cortes e aterros necessários à implementação de uma obra rodoviária.

São várias as estruturas utilizadas para representar as elevações da superfície. Entre elas, as mais utilizadas são as três a seguir descritas:

- a. Rede Triangular Irregular (RTI), mais conhecida pela sigla em inglês por *Triangular Irregular Network* (TIN), com ou sem linhas de descontinuidade (*breaklines*);
- b. Malha quadrada ou retangular;
- c. Curvas de nível com ou sem pontos cotados.

⁹ Disponível em: < <http://www.newgeomapdigital.com.br/aplicacoes>>. Acesso em 10/1/2018.



Segundo Matos (2001), para construir modelos digitais de elevação, é necessário utilizar técnicas de interpolação. Referidas técnicas são empregadas quando é necessário obter valores para células de uma malha quadrada a partir de uma triangular, quando se quer adensar a malha ou estimar valores em pontos internos da mesma e outras situações.

Nessas modelagens, um princípio básico compartilhado por todos os métodos de interpolação é o de que pontos mais próximos entre si tendem a ter características mais semelhantes do que pontos mais distantes.

Segundo Burrough (1986), as funções interpolantes normalmente utilizadas, com as suas respectivas características, são: (i) média das altitudes das amostras vizinhas, (ii) triangulação de Delaunay, (iii) vizinho natural, (iii) superfície de tendência, (iv) série de Fourier, (v) superfície de mínima curvatura (*Spline*), (vi) Krigagem.

Vale mencionar que o objetivo do presente estudo não contempla as formulações matemáticas que cada função interpolante citada possui. Basta saber que, por trás dos softwares que permitem criar modelos digitais de elevação, tais formulações estarão presentes na programação e, em alguns casos, o operador será chamado a escolher qual delas deve ser utilizada na modelagem em curso.

4. FONTES DE INFORMAÇÕES DO TERRENO APTAS À GERAÇÃO DO MDE: LIMITES E POSSIBILIDADES DE EMPREGO NO CÁLCULO DE VOLUMES TOPOGRÁFICOS

4.1 INTRODUÇÃO

Atualmente, existem várias fontes de dados para se obter altitudes tendo por objetivo a elaboração de Modelos Digitais de Elevação. Segundo Brito & Coelho Filho (2007), um dos primeiros métodos que foi por muito tempo adotado era a digitalização das coordenadas de determinados pontos, obtidos por inspeção em cartas topográficas. Em razão de se tratar de uma abordagem pouco prática e passível de erros, tal método não se popularizou.

A digitalização de cartas em papel através de mesa digitalizadora (Figura 7) é outro método que ainda hoje é utilizado, sobretudo quando o mapeamento do local desejado só existe em meio analógico (papel). O aparelho mencionado possui um transdutor com um cursor que transfere as coordenadas planimétricas do mapa que está sobre a superfície da mesa. Assim um operador, percorrendo uma curva de nível com o cursor, consegue obter as coordenadas planimétricas de pontos situados sobre a curva. Com isso, um documento cartográfico analógico pode ser digitalizado a partir desses procedimentos (Brito & Coelho Filho, 2007, p.158).

Figura 7 – Mesa digitalizadora



Fonte: Laboratório de Cartografia, UFPR.¹⁰

Um outro método que pode ser empregado para a aquisição de dados para um modelo digital de elevação é o que se utiliza de equipamentos GPS em método cinemático ou semi cinemático (Figura 8). Nesse caso, percorre-se o terreno com a antena portátil, ligada a um coletor de feições, e, ao fim, descarregam-se os dados para seu pós-processamento. Vale mencionar que nesse método, assim como no levantamento topográfico com estações totais ou teodolitos, o contato com ao terreno (alvo) é direto.

Figura 8 – Levantamento de informações altimétricas com GPS



Fonte: LEPTOP Topografia e Geoprocessamento.¹¹

Para além das metodologias acima mencionadas, interessa ao presente estudo métodos que utilizem sensores remotos. Nessa senda, Lillesand e Kiefer (1994) definem sensoriamento remoto como a ciência e a arte de obter informação sobre um objeto (alvo), área ou fenômeno através da análise de dados adquiridos por um dispositivo (sensor) que não está em contato direto com o objeto, área ou fenômeno sob investigação. Portanto, os sensores remotos são equipamentos que captam e registram a energia refletida ou emitida pelos elementos da superfície terrestre. As câmeras fotográficas, as câmeras de vídeo, os radiômetros, os sistemas de varredura (scanners) e os radares são exemplos de sensores.

10 Disponível em:< http://www.cartografica.ufpr.br/portal/?page_id=32>. Acesso em 10/2/2018.

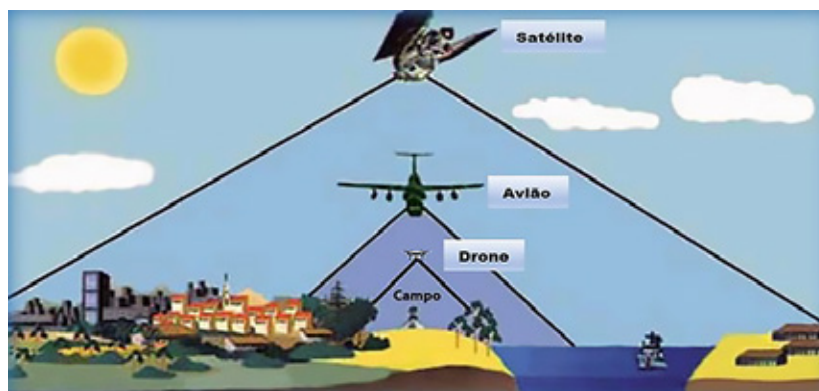
11 Disponível em:< <http://www.leptopografia.com.br/atuacao.php#geo>>. Acesso em 7/2/2018.



Considerando a fonte de energia, os sensores são classificados como ativos ou passivos¹². Sensores ativos são aqueles que possuem sua própria fonte de radiação eletromagnética, como os radares instalados em aviões ou em satélites. Já os sensores passivos não possuem uma fonte própria de radiação, medindo a radiação solar refletida ou radiação emitida pelos alvos, como os sistemas fotográficos e satélites.

Hoje em dia, diversas são as plataformas que transportam os sensores remotos, ativos ou passivos, que tem por objetivo obter informações sobre as feições da topografia terrestre. A figura 9 ilustra as plataformas mais usuais.

Figura 9 – Plataformas de transporte de sensores remotos



Fonte: Pontuschka, et. al., 2012 (adaptado).

Dado o contexto, as próximas seções terão por objetivo descrever algumas das principais tecnologias para a obtenção de dados para o MDE de forma remota, apresentando as precisões alcançadas em cada uma delas. Entre elas, estão a fotogrametria, as imagens de satélite de alta e altíssima resolução, o Radar e o perfilamento Laser (Lidar).

4.2 CRITÉRIO NORMATIVO PARA AVALIAÇÃO DE ERROS: O DECRETO 89.817/1984

Uma boa referência para avaliar o erro máximo encontrado associando-o com as escalas máximas que cada técnica que será apresentada nas seções seguintes permite chegar, é o Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984. Referida norma estabeleceu critérios para classificação de cartas topográficas quanto à sua exatidão e à distribuição de erros ao longo das mesmas, utilizando um indicador estatístico da qualidade posicional, denominado de Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Em síntese, pelo referido decreto, as cartas são classificadas em três grupos, nos termos constantes do quadro 1.

¹² Sensores passivos detectam a radiação solar refletida a partir da terra e radiação térmica nos comprimentos de onda visíveis e de infravermelhos do espectro eletromagnético. Eles não emitem sua própria radiação, mas apenas recebem luz natural e radiação de calor refletida pela superfície da Terra (Löffler *et al.* 2005). Já os sensores ativos possuem sua própria fonte de radiação eletromagnética, como os radares instalados em drones, aviões ou em satélites.



Quadro 1 – Decreto 89.819/1984 – Padrão de Exatidão Cartográfica

| Carta | PEC Planimétrico | Erro Padrão | PEC Altimétrico | Erro Padrão |
|----------|------------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| Classe A | 0,5 mm x Escala | 0,3 mm x Escala | 1/2 da equidistância | 1/3 da equidistância |
| Classe B | 0,8 mm x Escala | 0,5 mm x Escala | 3/5 da equidistância | 2/5 da equidistância |
| Classe C | 1 mm x Escala | 0,6 mm x Escala | 3/4 da equidistância | 1/2 da equidistância |

Fonte: Elaborado pelo autor.

A depender da escala da carta topográfica, a altimetria é representada segundo os seguintes níveis de detalhamento apontados no quadro 2.

Quadro 2 – Relação Escala da Carta x Curva de nível

| Escala da Carta | Equidistância das curvas de nível em metros |
|-----------------|---|
| 1:500 | 0,25 m |
| 1:1.000 | 0,50 m |
| 1:2.000 | 1,0 m |
| 1:5.000 | 2,0 m |
| 1:10.000 | 5,0 m |
| 1:25.000 | 10,0 m |
| 1:50.000 | 25,0 m |
| 1:100.000 | 50,0 m |

Fonte: Elaborado pelo autor.

Adotando-se como referência o Decreto nº 89.819/1984 para aferir o material cartográfico oriundo de levantamentos topográficos é possível estabelecer parâmetros de aceitação de erros, nas escalas requeridas na terraplenagem, segundo os níveis de detalhamento dados pelo quadro 3.



Quadro 3 – Padrão de Exatidão Cartográfica para as escalas requeridas na terraplenagem

| Escala da Carta | Equidistância das curvas de nível em metros | Tipo de classificação | PEC Planimétrico (m) | Erro Padrão (m) | PEC Altimétrico (m) | Erro Padrão (m) |
|-----------------|---|-----------------------|----------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| 1:200 | 0,10 m | Classe A | 0,1 | 0,06 | 0,05 | 0,033333 |
| | | Classe B | 0,16 | 0,1 | 0,06 | 0,04 |
| | | Classe C | 0,2 | 0,12 | 0,075 | 0,05 |
| 1:2.000 | 1,0 m | Classe A | 1 | 0,6 | 0,5 | 0,333333 |
| | | Classe B | 1,6 | 1 | 0,6 | 0,4 |
| | | Classe C | 2 | 1,2 | 0,75 | 0,5 |
| 1:5.000 | 2,0 m | Classe A | 2,5 | 1,5 | 1 | 0,666667 |
| | | Classe B | 4 | 2,5 | 1,2 | 0,8 |
| | | Classe C | 5 | 3 | 1,5 | 1 |

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3 AEROFOTOGRAMETRIA

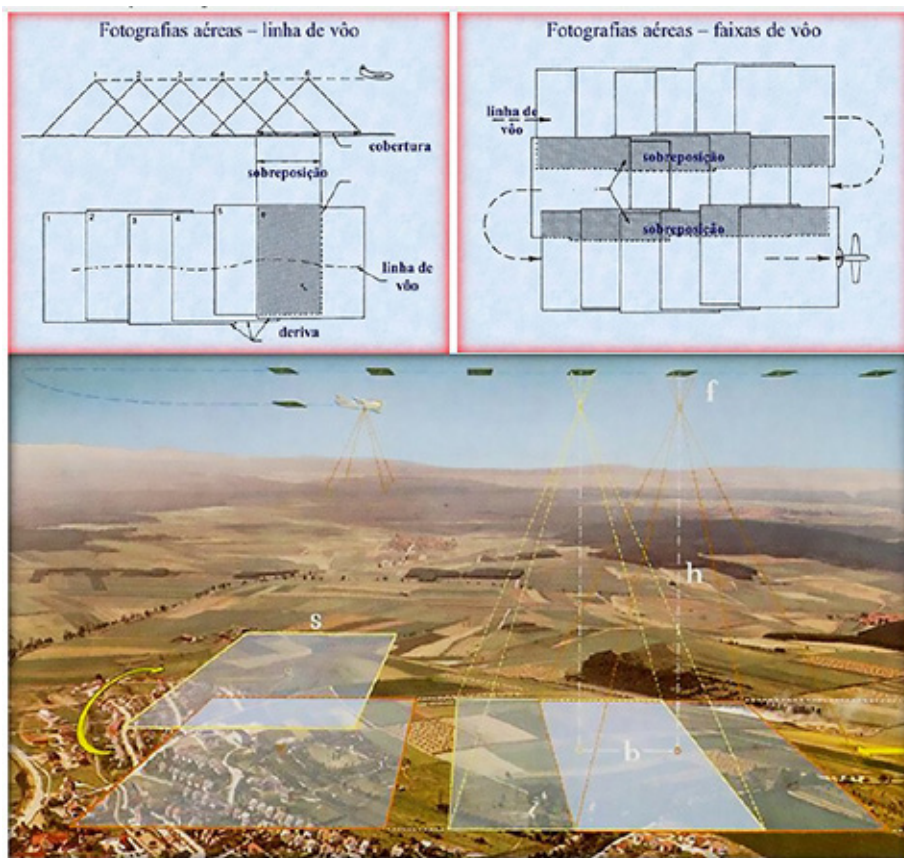
Brito & Coelho Filho (2007) definem a fotogrametria como sendo a ciência e tecnologia de se reconstruir o espaço tridimensional, ou parte do mesmo (espaço objeto), a partir de imagens bidimensionais, advindas da gravação de padrões de ondas eletromagnéticas (espaço imagem), sem contato físico direto com o objeto ou alvo de interesse.

Segundo Maune (2001), a aerofotogrametria é a tecnologia mais utilizada para a elaboração de mapeamento de áreas de grandes dimensões sobretudo em razão de apresentar produtos precisos a custos relativamente baixos. A referida técnica faz uso de fotografias aéreas tomadas com câmera aerotransportada rigorosamente calibrada¹³, montada com o eixo ótico próximo da vertical em uma aeronave devidamente preparada e homologada para receber o sistema.

Geralmente, o recobrimento longitudinal de uma fotografia aérea é calculado para fornecer aproximadamente 60% de sobreposição entre fotografias subsequentes. Já a sobreposição entre faixas de voo varia de 20% a 40% e é chamada de recobrimento lateral. As mencionadas sobreposições, longitudinal e lateral é que possibilitam a obtenção de estereoscopia (visão em 3D a partir de pontos de vistas diferentes). A figura 10 mostra de forma esquemática as linhas de voo, nas quais ocorre o recobrimento longitudinal com sobreposição bem como a sobreposição entre as faixas de voo.

¹³ Para a calibração de uma câmera aérea é preciso conhecer a distância focal, os parâmetros de distorção de lentes e o tamanho de quadro do negativo.

Figura 10 – Esquema de voo aerofotogramétrico: sobreposição longitudinal e lateral



Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).¹⁴

O resultado da sobreposição longitudinal entre duas fotos aéreas consecutivas é chamado de par estereoscópico. Vale mencionar que as fotos tomadas são importadas para estações fotogramétricas digitais (com software de fotogrametria digital) após o voo. Nessas estações, as imagens são projetadas em um sistema ótico de modo a formar um modelo tridimensional na ocular. (Brito & Coelho Filho, 2007).

Nesse caminho, os elementos planimétricos são obtidos por meio do delineamento e registro de pontos da forma das feições usando a marca estereoscópica do aparelho. Essa deve sempre ser mantida em contato com a superfície da feição a fim de manter a sua correta coordenada. Para cada ponto, registra-se os valores dos eixos X, Y e Z representativos da localização espacial.

A obtenção da altimetria é realizada com a marca estereoscópica sempre numa determinada altitude, onde o operador deve procurar no terreno visualizado, os pontos que possuem esta mesma altitude, materializando assim as curvas de nível (Santos *et al.*, 2002).

O que se tem, ao final, é uma transformação entre sistemas: um sistema bidimensional, chamado sistema fotográfico, e um sistema tridimensional, que representa o próprio espaço-

14 Disponível em: < <http://blog.droneng.com.br/mdt-com-drones/>>. Acesso em 15/2/2018.



objeto. Normalmente, utiliza-se um sistema bidimensional próprio de cada câmera, com origem aproximadamente no centro de seu quadro e de coordenadas determinadas por calibração da câmera em laboratório, antes de sua utilização. O sistema tridimensional, no caso mais comum, representa o sistema de coordenadas do terreno sobre o qual as imagens são obtidas, terreno que pode estar sendo representado em coordenadas geodésicas (latitude: ϕ , longitude: λ , e altura: H ou altitude: h^{15}), planialtimétricas do tipo transversa de Mercator (leste: E , norte: N e altura: H ou altitude: h) ou cartesianas (X , Y e Z) (Brito & Coelho Filho, 2007).

Para que a transformação seja implementada, também é necessário um conjunto de pontos de controle (ou de campo), que são expressos no espaço-objeto. Uma vez locados no espaço-imagem, temos os parâmetros de entrada para a dedução da função que mapeia um sistema no outro (Brito & Coelho Filho, 2007).

4.3.1 PRECISÃO ALCANÇADA COM O USO DA FOTOGRAMETRIA

A precisão alcançada pela fotogrametria já sob a égide digital dependerá da altura do voo da aeronave e será diretamente influenciada pela resolução da câmera digital utilizada. Nessa senda, para a captação direta de imagens digitais utiliza-se o conceito de GSD (Ground Sample Distance). O GSD representa o tamanho real, em unidades do terreno, que um determinado pixel representa em função da resolução de uma imagem. O pixel (picture element) por sua vez é a menor unidade de uma imagem digital e define a sua resolução. Assim, uma imagem digital pode ser considerada como sendo uma matriz cujos índices de linha e colunas identificam um ponto na imagem e o correspondente valor do elemento da matriz identifica o nível de cinza naquele ponto. Os elementos identificados pela combinação de linhas e colunas desta matriz são chamados de elementos de imagem ou pixels (Kugler, 2008). Na figura 11 apresenta-se uma sequência de imagens com diferentes GSD, nas quais se observa que, quanto menor for essa unidade melhor a nitidez dos detalhes.

Figura 11 – Imagens com diferentes GSD



15 A diferença entre altura e altitude reside no fato de a primeira estar referenciada a uma figura geométrica (elipsoide de revolução) e a última, a uma figura geofísica (geoide). A separação entre as duas chama-se desnível geoidal e pode ser calculada por métodos gravimétricos.



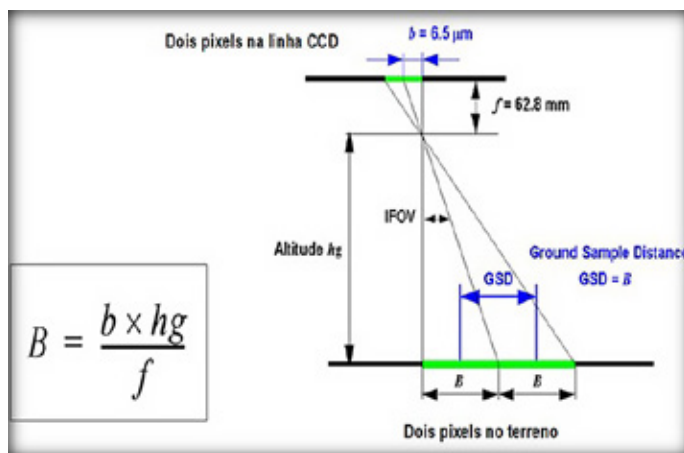
GSD: 1 m

GSD: 2 m

Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).¹⁶

O GSD é diretamente relacionado com a altura de voo da aeronave em relação ao solo. Além desse fator, a distância focal da câmera utilizada e o tamanho físico do pixel no CCD também influenciam o GSD. A figura 12 a seguir ilustra como se dá o cálculo do GSD em função dessas variáveis.

Figura 12 – Cálculo do GSD em função da altura de voo, distância focal e tamanho físico no CCD



Fonte: Kugler, 2008.

É válido mencionar que a aerofotogrametria é amplamente utilizada nos anteprojetos e projetos de obras rodoviárias em razão de atender as precisões requeridas. Quanto a precisão, segundo Santos (2013), os sensores mais modernos, a exemplo do Sensor ADS 40, permitem alcançar GSD's a partir de 5 cm, atendendo, no máximo, a escala 1:500. Convém lembrar que, no anteprojeto, a escala requerida é 1:5.000 e nos projetos, os elementos planimétricos do perfil devem ser representados na escala 1:2.000, escalas comumente atendidas pela aerofotogrametria. Quanto aos elementos verticais do perfil, os projetos requerem a escala 1:200, escala que a aerofotogrametria convencional não atende.

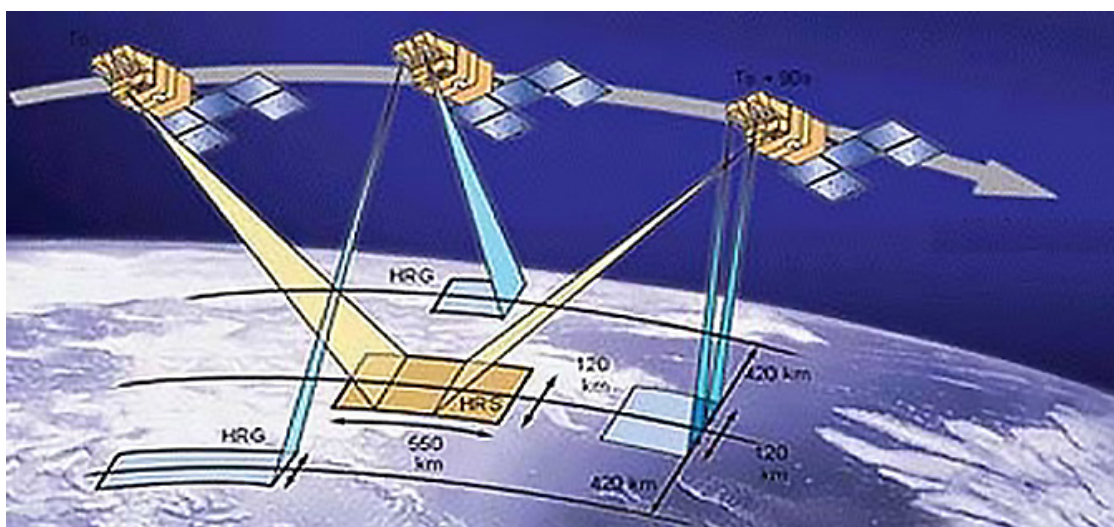
¹⁶ Disponível em: < <http://blog.droneng.com.br/gsd/>>. Acesso em 15/2/2018.



4.4 3.4 – IMAGENS DE SATÉLITE DE ALTA RESOLUÇÃO COM ESTEREOSCOPIA

Da mesma maneira que na aerofotogrametria, um par estereoscópico de imagens de satélites consiste em duas cenas adquiridas para uma mesma localização geográfica, de duas perspectivas distintas durante uma mesma passagem do satélite. O objetivo é extrair a altimetria de feições geográficas naturais, tais como o relevo e a vegetação, e de objetos construídos, tais como construções. A figura 13 ilustra como ocorre a estereoscopia entre imagens tomadas por satélites.

Figura 13 – Esquema de estereoscopia com imagens de satélites



Fonte: Zaidan, 2011.

Vale mencionar que a estereoscopia a partir de imagens de satélites depende das informações sobre o modelo geométrico (IGM), que consiste na equação e nos parâmetros técnicos que retratam as condições de aquisição das imagens usadas e do sensor. Com isso, incorporando os dados do IGM e o par estereoscópico nos softwares comerciais de processamento de imagens geralmente disponíveis no mercado, é possível criar produtos tais como modelos digitais de elevação. São vários os softwares homologados pelos provedores de imagens de satélites e que suportam geralmente os formatos das imagens em estereoscopia fornecidas comercialmente. Entre os mais conhecidos estão: LH SocetSet, Erdas Stereo Analyst e Orthobase, PCI OrthoEngine, Z/I Image Station e SSK.

Atualmente, todos os sensores de alta e altíssima resolução de observação da Terra comercialmente disponíveis têm capacidade de imageamento em estereoscopia. O quadro 4 a seguir apresenta uma síntese dos principais sensores de alta e altíssima resolução, bem como as possibilidades de se obter informações altimétricas por meio das imagens produzidas por eles:



Quadro 4 – Principais sensores orbitais de alta e altíssima resolução

| Sensor | Resolução espacial máxima | Estereoscopia? | Foto do Satélite |
|--------------|--|--|---|
| Geoeye | Pan P&B: 0,5 m; Multiespectral: 2,0 m | Sim |  |
| Pleiades | Pan P&B: 0,5 m; Multiespectral: 2,0 m | Sim |  |
| World View 4 | Pan P&B: 0,3 m; Multiespectral: 1,24 m | Sim |  |
| Kompsat | Pan P&B: 0,40 m; Multiespectral: 1,6 m | Sim, possibilitando gerar curvas de nível de 2 em 2 metros |  |
| Eros B | Pan P&B: 0,7 m | Sim |  |
| Ikonos | Pan P&B: 1,0 m; Multiespectral: 4,0 m. | Sim, possibilitando gerar curvas de nível de 5 em 5 metros |  |

Fonte: EngeSat (adaptado).¹⁷

Conforme se observa do quadro, com as imagens de altíssima resolução espacial chegando a 30 cm, considerando a natureza dos serviços a serem executados no projeto e dependendo do relevo da região, do imageamento de cenas sem nuvens sobre a área de interesse e com pontos de controle coletados em levantamentos de campo, as imagens de alta resolução podem alcançar uma precisão absoluta planialtimétrica de 0,30 m, e curvas de nível de até 2m de equidistância.

Cotejando as precisões alcançadas com imagens de altíssima resolução com as requeridas nos projetos de terraplenagem, verifica-se que é possível utilizar tais insumos na elaboração do anteprojeto, seja na planimetria, seja na altimetria, já que a escala requerida é 1:5.000. Aqui, tanto na elaboração do anteprojeto como em uma eventual fiscalização dos estudos

17 Disponível em: < <http://www.engesat.com.br/imagem-de-satelite/>>. Acesso em 12/12/2017.



preliminares e de viabilidade de obras rodoviárias, seria possível utilizar o modelo digital de elevações gerado a partir de imagens de altíssima resolução com estereoscopia, como elemento de tomada de decisão.

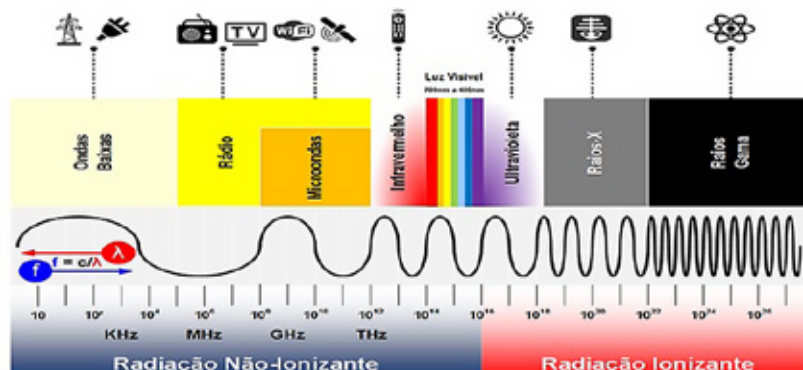
Já nos projetos, os elementos planimétricos do perfil devem ser representados na escala 1:2.000, e esta escala é alcançada por boa parte dos sensores mencionados. Quanto aos elementos verticais do perfil, os projetos requerem a escala 1:200. Conforme se viu, para essa escala, não é possível a utilização de imagens de satélite de alta resolução. Assim, nos projetos de obras rodoviárias, a utilização de imagens de altíssima resolução se restringe aos elementos planimétricos porquanto as precisões máximas alcançadas para a geração de modelos digitais de elevação estão longe dos erros máximos permitidos para a componente altimétrica desses projetos.

4.5 RADAR

O termo Radar (Radio Detection And Ranging) significa detecção de alvos e avaliação de distâncias por ondas de rádio. Trata-se de um sistema imageador ativo de ondas de rádio, em geral micro-ondas, embarcado em aeronave ou satélite. Distingue-se dos sensores ópticos, na faixa do visível ou do infravermelho, pelo fato de utilizar uma fonte de ondas de rádio como elemento gerador de radiação e por possuir uma fonte ativa e controlável de radiação a qual define a frequência, a polarização e o ângulo de incidência da onda transmitida (Matos, 2005). Vale dizer que os radares operam em comprimentos de onda bem maiores do que os da região espectral do visível e infravermelho, encontrando-se na região das micro-ondas entre as bandas Ka (frequência: 40,0 - 26,5 GHz) e P (frequência: 0,2 - 0,4 GHz).

A figura 14 apresenta as faixas do espectro eletromagnético, nas quais é possível identificar as micro-ondas e ondas de Rádio em comparação com a faixa do visível λ de 700nm a 400nm).

Figura 14 – Espectro eletromagnético



Fonte: Labcisco (adaptado).¹⁸

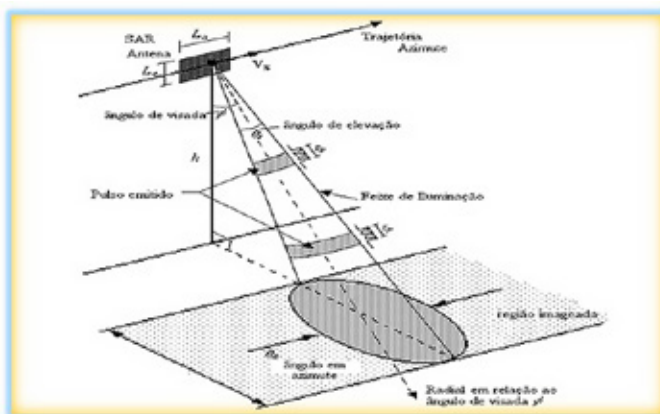
18 Disponível em: < <http://labcisco.blogspot.com.br/2013/03/o-espectro-eletromagnetico-na-natureza.html> >. Acesso em 14/12/2017.

Segundo Matos (2005), um sistema típico de Radar possui um transmissor, um coletor e uma antena. O transmissor produz pulsos de micro-ondas, que são regulados por um sincronizador e padronizados a uma potência conhecida por um modulador. Por uma fração de segundo, a chave transmissão/recepção é ligada para transmissão e o transmissor envia um pulso de micro-ondas pela antena. Em seguida, a chave transmissão/recepção retorna à sua posição original e a antena recebe pulsos refletidos pela superfície da Terra. Esses pulsos são convertidos para uma forma adequada para amplificação e processamento pelo misturador e pelo oscilador local, sendo em seguida enviados para o receptor. Esse amplifica o sinal, passando-o para o detector que produz um sinal eletrônico adequado para gravação em filme fotográfico, fita analógica ou forma digital.

São dois os tipos de Radar: o Radar de Abertura Real (RAR, *Real Aperture Radar*) e Radar de Abertura Sintética (SAR, *Synthetic Aperture Radar*). Os sistemas RAR foram os primeiros imageadores por micro-ondas e necessitam operar em comprimentos de onda muito curtos para terem uma boa resolução. Por outro lado, sofrem uma influência muito grande da atmosfera. Para comprimentos de onda mais longos, torna-se necessário o uso do sistema SAR, já que os sistemas RAR teriam uma resolução muito baixa.

Os sistemas SAR simulam uma grande antena, através do deslocamento de uma antena (pequena) ao longo da direção de voo da plataforma. As posições sucessivas da antena são tratadas eletronicamente como se fossem elementos de uma única antena grande (Matos, 2005). O sistema é constituído de um Radar, com as características convencionais, com visada lateral, ou seja, o diagrama de irradiação da antena do Radar é disposto obliquamente em relação ao eixo definido pelo vetor direção de voo da plataforma na qual está instalada a antena. A figura 15 apresenta a geometria de imageamento do sistema SAR.

Figura 15 – Geometria de imageamento SAR



Fonte: Matos, 2005 (adaptado).

Segundo a empresa Bradar¹⁹, os sensores Radar mais recentes permitem a obtenção de cartas topográficas nas escalas 1:50.000, 1:25.000, 1:10.000 e 1:5.000. Com isso, considerando a maior escala (1:5.000), vislumbra-se que a aplicação de imagens oriundas

19 Disponível em: <http://www.bradar.com.br/images/folders/sensore/folder_Cartografia.pdf>. Acesso em 10/12/2017.



de sensores Radar para o cálculo de volumes de terraplenagem nas obras rodoviárias se circunscreve ao anteprojeto.

4.6 PERFILAMENTO LASER (LIDAR)

O sistema LIDAR (*Light Detecting And Ranging*) é a denominação mais abrangente do sistema de perfilamento a laser. De maneira geral, tem-se uma tecnologia que usa luz, especificamente uma luz de laser, para medir distâncias.

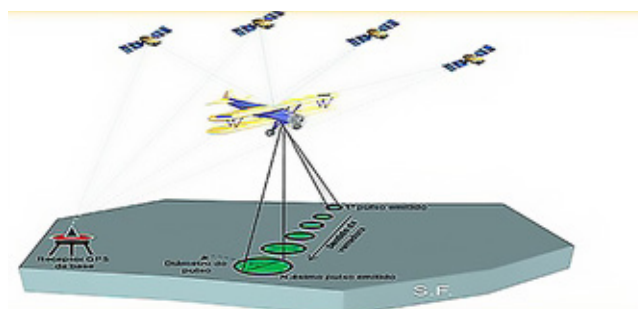
Segundo Brandalize (2002), o sistema de perfilamento a laser (*ALS - Airborne LASER Scanning*) ou sistema para mapeamento do terreno por laser aerotransportado (*ALTM - Airborne LASER Terrain Mapper*) é um sistema que adquire dados digitais de elevação do terreno com precisão equivalente ao GPS e de forma mais eficaz, uma vez que o sensor principal do sistema está localizado em uma aeronave cujo deslocamento, sobre uma área de interesse, é extremamente rápido quando comparado com os levantamentos convencionais. Segundo Sallem Filho (2007), o sistema em questão se desenvolveu a partir da necessidade de usuários de modelos digitais de elevação em casos onde os métodos convencionais não eram suficientes sendo que as primeiras experiências datam de 1993.

O princípio de operação é relativamente simples. Os pulsos de laser são gerados e emitidos pelo sistema com o auxílio de um espelho de varredura atingindo os objetos. Estes objetos refletem o pulso emitido e parte de sua energia volta para o sistema. Com isto, a medida da distância entre o sensor e o objeto iluminado é determinado através do intervalo de tempo entre a emissão e a reflexão (retorno) do pulso (Schafer & Loch, 2005).

A reconstrução do pulso laser emitido é dada no sistema referencial WGS84, isto é, a distância percorrida pelo pulso entre a plataforma e o objeto perfilado é calculada em pós-processamento baseada na determinação do ângulo que o pulso formou com a aeronave no momento de sua emissão, juntamente com os dados de posição e atitude da aeronave, fornecidos pelo sistema de integração GPS/INS, bem como em função da velocidade da luz (c) e tempo de emissão e recepção do pulso Laser (Δt) (Dalmolin & Santos, 2004).

Segundo Santos (2013), a varredura é feita no sentido transversal à direção da linha de voo, o que possibilita o perfilamento tridimensional da área de interesse, com a divergência configurável pelo sistema permitindo a determinação da largura da faixa abrangida pelo perfilamento laser. Com a realização do voo, o sistema fornece dados brutos com informações tridimensionais do terreno sobrevoado. Esses dados são de posição (GPS), orientação da aeronave e de cada pulso emitido e intervalos de tempo (medida laser). A figura 16 apresenta o princípio de funcionamentos do laser aerotransportado.

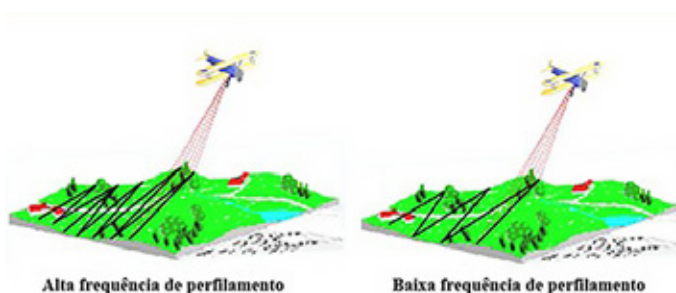
Figura 16 – Princípio de funcionamento do laser aerotransportado



Fonte: Santos (2013).

O pulso laser emitido pelo sistema possui um diâmetro que aumenta na medida em que ocorre sua propagação no meio. Conforme se vislumbra na figura 16, o diâmetro do pulso no momento da emissão é consideravelmente inferior quando ele interage com a superfície. E esse diâmetro do pulso varia de acordo com a altitude de voo estabelecida no levantamento aéreo. A figura 17 ilustra esquemas de alta e baixa frequência de perfilamento:

Figura 17 – Princípio de funcionamento do laser aerotransportado



Fonte: Santos (2013).

De acordo com Wher e Lohr (1999), o sistema *laser scanning* fornece coordenadas planimétricas com precisão em torno de 0,5 m e altimétricas com precisão em torno de 0,15 m. No entanto, a precisão do sistema depende das características dos componentes utilizados, tipo de terreno, qualidade do INS empregado e altura de voo.

Os fabricantes de sistemas de perfilamento a laser estabelecem como tolerâncias aceitáveis para a qualidade planimétrica dos pontos laser após processamento, valores na ordem de $1/5.000 \times H$ a $1/10.000 \times H$ (H é a altura de voo). Com isso, a qualidade planimétrica esperada para uma altura de vôo de 1.000 m seria de 0,20 a 0,10 m e para uma altura de voo de 3.000 m, seria de 0,60 a 0,30 m, sendo tais valores válidos para 68% (1 sigma) dos pontos testados (Sallem Filho, 2007).

A qualidade vertical é dependente de inúmeros fatores, mas um dos preponderantes é a altura de voo. Assim, para uma altura de voo de 1.000 m espera-se uma qualidade menor que 0,15 m



para cerca de 68% destes pontos. Para 90% dos pontos testados, a precisão vertical é menor que 0,30 m, segundo os fabricantes (Sallem Filho, 2007).

No que interessa ao presente artigo, cotejando as precisões alcançadas com o perfilamento a laser com as requeridas nos projetos de terraplenagem, verifica-se que é possível utilizar tais insumos na elaboração do anteprojeto, seja na planimetria, seja na altimetria, já que a escala requerida é 1:5.000. Aqui, tanto na elaboração do anteprojeto como em uma eventual fiscalização dos estudos preliminares e de viabilidade de obras rodoviárias, seria possível utilizar o modelo digital de elevações gerado a partir de perfilamento a laser, como insumo para a tomada de decisão.

Já nos projetos, os elementos planimétricos do perfil devem ser representados na escala 1:2.000, e esta escala é alcançada tranquilamente por essa técnica. Quanto aos elementos verticais do perfil, os projetos requerem a escala 1:200, o perfilamento laser com aeronaves tripuladas poderá atingir precisão compatível com essa escala a depender da altura de voo da aeronave e do bom funcionamento dos componentes do sistema.

5. POTENCIALIDADES DA FOTOGRAMETRIA COM VANTS

Nas seções precedentes, foi possível observar as precisões requeridas (ou erros máximos tolerados) para a obtenção de volumes nas fases de anteprojeto, projeto e execução da terraplenagem, bem como as principais técnicas alternativas aos levantamentos topográficos clássicos, com enfoque no uso de sensores remotos, para a obtenção desses volumes. No entanto, a despeito de ser importante o embasamento teórico na fundamentação da escolha de uma solução para a obtenção de volumes, mais importante é a validação prática da solução.

Nesse contexto, uma limitação do presente estudo consiste no fato de não ter sido possível, por meio de atividades práticas, testar as afirmações teóricas mencionadas pelos diversos autores. Isso ocorreu em função do tempo exíguo e de outras dificuldades práticas, tais como a impossibilidade de aquisição dos equipamentos e insumos necessários para testar algumas das técnicas apresentadas.

Não obstante essas constatações, o presente capítulo apresentará, a partir de fontes secundárias, estudos práticos que demonstram de forma empírica as potencialidades da fotogrametria com veículos aéreos não tripulados (VANTS).

No primeiro caso, foram comparados empiricamente e em vários aspectos, o levantamento topográfico e a fotogrametria com veículos aéreos não tripulados (VANTS). Entre as características comparadas está o modelo digital de elevação gerado por meio das duas técnicas e o cálculo de volumes topográficos. Tal experiência foi realizada pela DronEng Drones & Engenharia²⁰ em conjunto com a Empresa Júnior de Engenharia Cartográfica da Universidade Estadual Paulista (UNESP) em março de 2016.

20 Este e outros estudos estão disponíveis no endereço eletrônico: <<http://droneng.com.br/materiais-educativos/>>



Segundo os responsáveis técnicos²¹, o objetivo central do teste foi realizar um projeto em área determinada utilizando as duas técnicas: Topografia e Fotogrametria com uso de drones. Buscou-se verificar na prática as semelhanças e divergências destas duas técnicas de levantamento. A área escolhida para o teste localiza-se no município de Pirapozinho, no Estado de São Paulo, e abrange uma área aproximada de 31.000 m², distante 4km da área central do município. Trata-se de área que contém relevo acidentado, característica que facilita as comparações entre os modelos digitais de elevação gerados a partir das duas ciências em estudo.

Para o sobrevoo da área escolhida e com vistas a possibilitar o levantamento fotogramétrico com VANT, foi utilizado, pelos responsáveis no teste apresentado, o BATMAP. Segundo a empresa fabricante²², o referido aparelho é um VANT/Drone de uso duradouro que tem autonomia para voar por cerca de 90 minutos (1,5h) possibilitando recobrir até 4.200 ha em um único voo. Possui uma câmera com resolução de 24,3 MP sincronizada com o GPS e pode voar até 1.500 m de altura, situação em que consegue recobrir a maior área.

Para o planejamento do voo, foi utilizado o programa Mission Planner. Trata-se de um software open-source e gratuito, compatível apenas com o Windows. Foi desenvolvido para ser uma estação de controle em solo para vários tipos de VANTS. O Vant sobrevoou a região estudada a uma altura de 120 chegando a uma GSD de 3 cm. Foram ao todo 5 faixas de voo, 136 imagens tomadas com recobrimento longitudinal de 80% e lateral de 50%.

Foram selecionados e medidos com rastreadores GPS geodésicos no terreno, 7 (sete) pontos de amarração visíveis e identificáveis nas fotos. Além desses outros 3 (três) pontos de controle (check) foram medidos para checar a precisão do modelo de transformação das fotos para o terreno. As coordenadas referentes à altitude geométrica (referenciada ao elipsoide que compõe o sistema de posicionamento global utilizado) obtidas pelo levantamento GPS foram transformadas para ortométricas (referenciadas ao nível médio dos mares) por meio do software MAPGEO 2015.

O teste revelou, para os 7 (sete) pontos de controle utilizados na transformação do referencial da foto para o referencial do terreno, os seguintes resultados em termos de precisão: erro em X(m): 0,02452; erro em Y(m): 0,034092 e erro em z: 0,0332.

Na fotogrametria, contudo, o indicador de qualidade do produto final é a acurácia (RMS) dos pontos de verificação (check). Com isso, ao se obter as coordenadas dos 3 (três) pontos de controle por meio do modelo de transformação gerado a partir dos 7 (sete) pontos de amarração, tem-se de fato, a qualidade do modelo. Nesse sentido as comparações levaram aos

21 A equipe técnica responsável pelo “case” foi composta pelos seguintes profissionais: Manoel Silva Neto (Eng. Cartógrafo); Nicolas Machancoses (Eng. Cartógrafo); Maurício Campiteli (Eng. Cartógrafo) e Anderson Arias (Aluno de graduação do curso de Eng. Cartográfica/UNESP).

22 O BATMAP é um DRONE de alta performance desenvolvido no Brasil pela Empresa Nuvem UAV. < <http://nuvem UAV.com/>>



seguintes resultados em termos de acurácia: erro em X(m): 0,017532; erro em Y(m): 0,051084 e erro em z: 0,082662.

Posteriormente, a mesma região foi medida por meio de técnicas de topografia clássica. A comparação dos resultados é resumida a seguir:

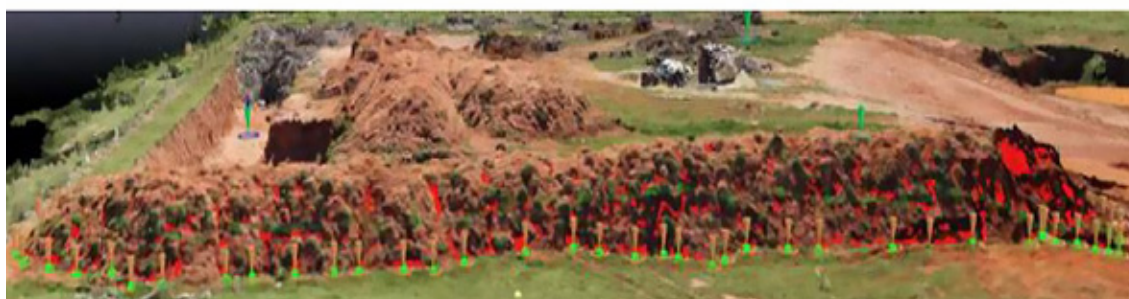
Figura 18 – Comparativo Topografia x Fotogrametria com VANT



Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).²³

Com as informações da área de teste obtidas por meio das duas técnicas, a equipe responsável pelo “case” realizou, para fins comparativos, o cálculo de volume topográfico de uma mesma porção do terreno. Para tanto, escolheu-se no terreno uma área de morro. A figura 19 ilustra a área escolhida:

Figura 19 – Área selecionada para cálculo de volume topográfico



Fonte: DronEng Drones & Engenharia (adaptado).²⁴

Os resultados encontrados mostram que, na comparação entre os volumes obtidos, houve uma diferença de 66 m³. Considerando que o volume medido para o morro a partir das informações

²³ Disponível em:< <http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>>. Acesso em 10/1/2018.

²⁴ Disponível em:< <http://conteudo.droneng.com.br/e-book-drones-e-topografia>>. Acesso em 10/1/2018.

oriundas do levantamento topográfico chegou ao resultado de 1.167,16 m³ e que para a mesma região escolhida o volume obtido a partir da fotogrametria chegou ao resultado de 1.233,23 m³, a diferença entre as metodologias chega a 5,65% considerando como referência o volume obtido por meio da topografia. Essa diferença percentual para volumes maiores tende a ser muito reduzida, já que a área onde ocorreu a medição do volume é relativamente pequena. Vale também mencionar que a diferença encontrada não se deve tão somente à diferença entre a acuracidade nas duas técnicas empregadas. Os levantamentos topográficos por exemplo, a despeito de apresentarem resultados mais precisos para os pontos levantados (628 pontos no teste realizado), apresentam limitações quanto a real representação das variações topográficas do terreno já que, pela limitação dos pontos irradiados, o cálculo das curvas de nível e dos volumes acaba fazendo uso de interpolações matemáticas (onde não existe informações) em maior intensidade que a fotogrametria.

A acurácia atribuída à fotogrametria alcançada no teste apresentado se confirma por outros experimentos considerando outros modelos de VANTs. No Brasil, a Empresa DronEng já realizou outros experimentos dos quais dois se destacam, em razão da utilização do equipamento DJI Phantom 4. Trata-se de um VANT semiprofissional acessível que custa cerca de R\$ 5.000,00. A figura 20 ilustra o equipamento mencionado:

Figura 20 – Drone DJI Phantom 4



Fonte: DJI Drones.²⁵

Em um dos testes, denominado “Mapeamento aéreo com Phantom – resultados e análise de qualidade”, realizado em uma área de 27 hectares, para um GSD de cerca de 4 cm, o teste chegou aos seguintes erros médios na avaliação de qualidade: a 0,8 cm em X (E), 2,12 cm em Y (N) e 3,27 cm em Z (H).

No outro teste utilizando o mesmo equipamento, realizado em conjunto com outra empresa (Mapear com Drones), o “case” denominado de “Mapeamento aéreo com Drones aplicado à topografia”, realizado em uma área de 20,7 hectares, para um GSD de cerca de 3,5 cm, o teste chegou aos seguintes erros médios na avaliação de qualidade: a 2,95 cm em X (E), 3,72 cm em Y (N) e 5,98 cm em Z (H).

25 Disponível em: < <https://www.dji.com/support/product/phantom-4> >. Acesso em 3/2/2018.



Em trabalho realizado em 2015, com o título “DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill”, publicado na seção “Measurement” do periódico internacional ELSEVIER²⁶, os autores M. Uysal, A.S. Toprak, N. Polat relatam, em seu experimento, cujo objetivo principal foi o de avaliar a precisão vertical (Z) de um Modelo Digital de Elevação referente a uma área de aproximadamente 5 hectares, que, considerando 30 pontos de verificação, chegaram a um erro médio vertical na casa de 6,62 cm, considerando uma altura de voo de 60 m. No experimento foi utilizado o VANT “OCTO XL”.

Maciej S. e Beata M. (2017), em artigo apresentado à Academia Polonesa de Ciências, ao estudarem a acuracidade do georreferenciamento de imagens obtidas por veículos aéreos não tripulados, para uma área de aproximadamente 1 hectare e considerando 10 pontos de verificação, chegaram aos seguintes erros médios na avaliação de qualidade: a 6 cm em X (E), 5 cm em Y (N) e 4 cm em Z (H).

Além das pesquisas apresentadas neste capítulo, vale mencionar que há no Brasil e no mundo muitas outras pesquisas que também têm alcançado níveis de precisão semelhantes aos expostos. Com isso, considerando que a fotogrametria com o uso de veículos aéreos não tripulados está se consolidando no âmbito da engenharia, é possível concluir que, por seu relativo baixo custo e facilidade operacional, esta tecnologia pode oferecer para as fiscalizações de obras insumos precisos e necessários que, somados aos procedimentos já existentes, serão essenciais para formação de opiniões na análise dos achados de auditoria.

6. CONSIDERAÇÕES CONCLUSIVAS

Ao longo deste artigo, buscou-se, por meio de pesquisa bibliográfica, apresentar técnicas alternativas aos levantamentos topográficos clássicos que permitissem a obtenção de volumes do terreno, com vistas a responder a questão inicial formulada para guiar o presente artigo.

Para responder a questão, o presente estudo identificou, inicialmente, para cada fase da terraplenagem de uma obra rodoviária, a precisão mínima requerida. Assim, observou-se que na fase de Anteprojeto de Terraplenagem as informações topográficas necessárias devem contemplar, no mínimo, a escala 1:5.000 (ou maiores) tanto para os elementos horizontais do perfil longitudinal quanto para os verticais, aceitando-se os erros inerentes à mencionada escala.

Na fase de Projeto, contudo, os elementos horizontais do perfil longitudinal devem ser obtidos na escala 1:2.000 (ou maiores). Já os elementos verticais do perfil longitudinal e as respectivas seções transversais devem ser obtidos a partir da escala 1:200.

Na fase de execução da Terraplenagem, observou-se que, para os Cortes, a Norma DNIT 106/2009 autoriza como variação máxima de altura para eixo e bordas $\pm 0,05$ m se o corte se der em solo ou $\pm 0,10$ m se o corte se der em rocha. Para os Aterros, a Norma DNIT 108/2009

26 Disponível em: <<https://www.journals.elsevier.com/measurement>>. Acesso em 12/2/2018.



estabelece como parâmetro de variação máxima de altura $\pm 0,04$ m, para eixo e bordas e + 0,3 m para a plataforma.

Em seguida, o estudo apresentou os conceitos necessários para a compreensão das técnicas alternativas aos levantamentos topográficos clássicos na obtenção de volumes do terreno. Entre os conceitos apresentados destaca-se o de Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizado para designar apenas a elevação da superfície e o termo MDT (ou MDS) significando um modelo mais completo do terreno, incluindo outras feições, tais como: casas, prédios, vegetação, árvores etc.

Verificou-se também que o Decreto nº 89.817/1984, estabelece critérios para classificação de cartas topográficas quanto à sua exatidão e à distribuição de erros ao longo das mesmas, utilizando um indicador estatístico da qualidade posicional, denominado de Padrão de Exatidão Cartográfica (PEC). Adotando-se como referência essa norma para aferir o material cartográfico oriundo de levantamentos topográficos é possível estabelecer parâmetros de aceitação de erros, nas escalas requeridas na terraplenagem, quais sejam, 1:200 para os elementos verticais do perfil longitudinal na fase de Projeto; 1:2.000, para os elementos horizontais do perfil longitudinal na fase de projeto e 1:5.000 na fase de Anteprojeto.

Nas obras rodoviárias, a precisão do cálculo dos volumes topográficos depende da precisão das coordenadas de terreno (E, N, H ou X, Y e Z) que integram as seções transversais do perfil longitudinal, sendo a componente altimétrica (H ou Z) a mais importante. Diante dessa constatação, após apresentadas cada uma das técnicas que, fazendo uso de sensores remotos, permitem o cálculo de volumes topográficos, verificou-se que as informações oriundas da Aerofotogrametria, do Perfilamento Laser aerotransportado, do Radar aerotransportado e das Imagens de Satélite de Alta Resolução podem ser utilizadas na elaboração de Anteprojetos por atenderem a escala 1:5.000 e também na elaboração de Projetos os quais requerem a escala 1:2.000, com uso limitado (do ponto de vista da precisão requerida) aos elementos horizontais do perfil longitudinal. Vale rememorar que nenhuma das técnicas apresentadas no presente estudo permitem obter volumes topográficos nas precisões requeridas (erros tolerados em torno de 5 cm em altura - Z) na fase de execução de uma obra rodoviária. Isso porque, não se mostra adequado comparar, para fins de fiscalização, volumes obtidos com precisão inferior com aqueles medidos por técnicas topográficas convencionais de maior precisão.

Quanto ao emprego de VANTs na fiscalização de volumes, verificou-se que sua empregabilidade alcança com facilidade as escalas 1:5.000 (anteprojeto) e 1:2.000 (projeto), permitindo aferir os elementos horizontais do perfil longitudinal. Observou-se ainda que, como as precisões obtidas com essa técnica são muito próximas aos erros tolerados na obtenção dos elementos verticais do perfil longitudinal apresentados no projeto (escala 1:200) e, também, na fase de execução da obra (medições tolerando erros próximos de 5 cm), vislumbram-se possibilidades concretas de utilização dessa tecnologia na fiscalização das aludidas fases. Para tanto, novos testes voltados para a medição de volumes com esse equipamento seriam necessários, avaliando, por exemplo, alturas de voo ideais, bem como a influência da resolução das câmeras digitais utilizadas na tomada aérea, na precisão final obtida. Com isso, seria possível formular uma metodologia que serviria de orientação para essas fiscalizações.



As informações compiladas no presente artigo permitem vislumbrar aplicações de várias das técnicas apresentadas em momentos distintos de fiscalização realizada pelo TCU. Ao realizar controle prévio, os volumes calculados nos anteprojetos e projetos de engenharia poderiam ser checados a partir da seleção de áreas amostrais mais sensíveis, nas quais seriam realizados testes de campo, com a utilização, por exemplo, de veículos aéreos não tripulados. O controle concomitante teria por objetivo aferir as medições de volumes, o que poderia ser feito, com boa aproximação, também com o uso de VANTs. No entanto, em um ou outro caso, seria necessário o desenvolvimento de metodologias para o emprego dessas técnicas. Para que isso possa ocorrer, seria necessário a realização de outros testes com vistas a confirmar a acuracidade do método, e solidificar os procedimentos de medição.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, J. B. **Fotogrametria**. Curitiba: SBEE, 1998.

BRANDALIZE, A. A. **Perfilamento a LASER: Comparação com Métodos Fotogramétricos**. Anais do I simpósio Brasileiro de Geomática, Presidente Prudente, julho, 2002.

BRASIL, Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria Executiva. Coordenação-Geral de Custos de Infraestrutura de Transportes. **Manual de Custos de Infraestrutura de Transportes**. 1ª Edição - Brasília, 2017.

_____. DNIT 106-ES – **Terraplenagem – Cortes – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: IPR, 2009.

_____. DNIT 108-ES – **Terraplenagem – Aterros – Especificação de serviço**. Rio de Janeiro: IPR, 2009.

_____. **Decreto nº 89.817, de 20 de junho de 1984**. Estabelece as Instruções Reguladoras das Normas Técnicas da Cartografia Nacional. Disponível em: <<http://www.planalto.gov.br>> Acesso em: 18/2/2018.

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

———, PRADO, W. e AUGUSTO, E. **Estágio de fotogrametria digital para engenheiros cartógrafos** (notas de aula). IME, 1999.

BURROUGH, P. A. **Methods of spacial interpolation**. In: BURROUGH, P. A. (Ed.). Principles of geographical information systems for land resources assessment. New York: Oxford University Press, 1986.

Dalmolin, Q.; Santos, D. R. **Sistema Laserscanner: conceitos e princípios de funcionamento**. 3. ed. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências da Terra. Departamento de Geomática. Curitiba: 2004.



GARCIA, D. S. P. **Apostila de Rodovias**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Departamento de Engenharia de Produção e Transportes: 2016.

Kugler, A. **Qual a Escala de Um Voo Digital?** Curitiba, 2008. Disponível em: < <http://www.esteio.com.br/downloads/2008/EscalaDigital.pdf>>

LEE, S. H. **Introdução ao projeto geométrico de rodovias**. 4. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 2013.

LILLESAND, T.M.; KIEFER, R.W. **Remote sensing and image interpretation**. 3. ed. Crawforsville: J. Wiley and Sons, 1994.

LÖFFLER, E., HONECKER, U., STABEL, E. **Geographie und Fernerkundung. Eine Einführung in die geographische Interpretation von Luftbildern und Fernerkundungsdaten**. Berlin/ Stuttgart, 2005.

MACIEJ S., BEATA M. **Low aerial imagery – an assessment of georeferencing errors and the potential for use in environmental inventory**. Polish Academy of Sciences. Geodesy and Cartography.Vol. 66, n. 1, 2017.

MATOS, A. C. O. C. de. **Implementação de modelos digitais de terreno para aplicações na área de geodésia e geofísica na América do Sul**. São Paulo, 2005.

MATOS, J. L. de. **Fundamentos de informação geográfica**. 2. ed. Lisboa: Lidel edições técnicas, 2001.

MAUNE, D. F. **Digital elevation model technologies and applications: the DEM users manual**. [S.l.]: ASPRS (The Imaging & Geospatial Information Society), 2001.

MILLER, C. **The spatial model concept of photogrammetry**. Photogrammetric Engineering, v. 23, n. 1, p. 31, Mar. 1957.

MILLER, C.; FLAMME, R. A. L. **The digital terrain model-theory and applications**. Photogrammetric Engineering, v. 24, n. 3, p. 433–442, 1958.

NETO, M. S.; Machancoses, N.; Campiteli, M.; Arias, A. **Case Técnico: Topografia x Fotogrametria. DronEng Drones e Engenharia**. Empresa Júnior de Engenharia Cartográfica/ UNESP. 2016.

NICHOLS, H. e DAVID, D. **Moving the Earth: The workbook of excavation**, 6th. ed. - McGraw-Hill Professional, 2010.

PEDROZO, L. G. **Custos da Infra-Estrutura rodoviária: análise e sistematização**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Porto Alegre, 2001.



PETRIE, G. & KENNIE, T. J. M. **Terrain modelling in surveying and civil engineering**. Caithness: Whittles, 1990.

PONTUSCHKA, M.; ALBUQUERQUE, P. T. F. Geoprocessamento e fotointerpretação: da imagem ao mapa. Departamento de Engenharia de Pesca e Aquicultura – UNIR, 2012.

RATTON, E.; PERREIRA, D. M.; BLASI, G. F.; PEREIRA, M. de A.; Küster Filho, W.. **Introdução à Terraplenagem**. Universidade Federal do Paraná. Setor de Tecnologia. Departamento de Transportes. Curitiba: 2015.

Referencial Estratégico do Tribunal de Contas da União, 2015 – 2021. Disponível em: < <http://portal.tcu.gov.br/planejamento-e-gestao/referencial-estrategico/>>. Acesso em 8/12/2017.

SALLEM FILHO, S. **As inovações do laser aerotransportado: suas vantagens para o mapeamento de dutos**. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP. Instituto Brasileiro de Petróleo e Gás – IBP. 2007.

SANTOS, A. L. S.; AMARO, V. E.; BICHO, C. P.; SABADIA, J. A. B. **Avaliação da acurácia do cálculo de volume de pilhas de rejeito utilizando vant, gnss e LIDAR**. Bol. Ciênc. Geod., Curitiba, v. 22, no1, p.73 - 94, jan-mar, 2016.

SANTOS, D. R. **Fotogrametria I**. 1. ed. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Geomática. Setor de Ciências da Terra. Departamento de Geomática. Curitiba: 2013.

SCHAFER, A. G.; LOCH, R. E. N. **Aplicação dos dados do sensor Laserscanner para modelagem do terreno visando projetos rodoviários**. Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, Brasil, 16-21 abril 2005, INPE, p. 749-756.

UYSAL, M.; TOPRAK, A.S.; Polat, N. **DEM generation with UAV Photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill**. Disponível em:< <https://www.journals.elsevier.com/measurement> >. Acesso em 12/2/2018.

Z Aidan, R. T. **Fotointerpretação e Sensoriamento Remoto**. Universidade Federal de Juiz de Fora. Departamento de Geociências. Laboratório de Geoprocessamento Aplicado, 2011.



Os conceitos e interpretações emitidos nos trabalhos assinados são de exclusiva responsabilidade de seus autores.